



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην ηρεμία
λιμενολεκάνης μέσω μαθηματικής προσομοίωσης – Η περίπτωση
του Λιμένα του Πειραιά



Ιωσήφ Κόλλιας

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

Επιβλέπουσα: Β. Κ. Τσουκαλά, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εκτίμηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στην ηρεμία λιμενολεκάνης μέσω μαθηματικής προσομοίωσης – Η περίπτωση του Λιμένα του Πειραιά

Λέξεις κλειδιά: Ηρεμία λιμενολεκάνης, εξωτερικά προστατευτικά έργα, κλιματική αλλαγή, επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος, PIANC, σενάρια εκπομπών, RCP 4.5, RCP 8.5, IPCC, Telemac – Mascaret, TOMAWAC, ARTEMIS.

Impact assessment of climate change on the harbor's tranquility through mathematical simulation – The case of the Port of Piraeus

Key words: Harbor tranquility, external protective works, climate change, permitted wave height limits, PIANC, emission scenarios, RCP 4.5, RCP 8.5, IPCC, Telemac – Mascaret, TOMAWAC, ARTEMIS.

Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

Φεβρουάριος 2023, Αθήνα

Ιωσήφ Κόλλιας

Ευχαριστίες

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, κα. Βίκυ Τσουκαλά, για την ανάθεση του θέματος και την πολύτιμη βοήθεια και επιστημονική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω επίσης στον υπ. Διδάκτορα Ανδρέα Γ. Παπαδημητρίου για τη συνεχή καθοδήγηση, τις σημαντικές υποδείξεις και συμβουλές του καθώς και το γεγονός πως ήταν πάντα διαθέσιμος για οποιοδήποτε ζήτημα προέκυπτε, παρά τις αμέτρητες του υποχρεώσεις.

Τέλος, από τα βάθη της καρδιάς μου ευχαριστώ τους γονείς μου Αλέξανδρο και Ουρανία, που με αμέτρητες θυσίες μου προσέφεραν τα μέγιστα όλα τα χρόνια των σπουδών μου. Εκτός από την πολύτιμη στήριξη, μου έδωσαν εφόδια ώστε να προσπαθώ πάντα για το καλύτερο.

Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων	i
Ευρετήριο Εικόνων.....	iii
Ευρετήριο Πινάκων	v
Ευρετήριο Σχημάτων.....	vi
Περίληψη	ix
Abstract	x
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	1
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	3
2.1 Ηρεμία Λιμενολεκάνης.....	3
2.1.1 Γενικά στοιχεία.....	3
2.1.2 Χρόνος διακοπής λειτουργίας	4
2.2 Κύμα σχεδιασμού.....	6
2.3 Κλιματική Αλλαγή	8
2.3.1 Έννοια κλιματικής αλλαγής.....	8
2.3.2 Κλιματική αλλαγή στα λιμενικά έργα	10
2.3.3 Πρόβλεψη επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής	13
3 Περιγραφή αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης	19
3.1 Φασματικό μοντέλο TOMAWAC	19
3.2 Μοντέλο ήπιας κλίσης ARTEMIS	24
4 Περιοχή Μελέτης – Προετοιμασία προσομοιώσεων.....	27
4.1 Περιοχή Μελέτης.....	27
4.1.1 Γεωγραφική θέση και περιγραφή του Λιμένα του Πειραιά	27
4.1.2 Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή	29
4.2 Προετοιμασία αρχικών δεδομένων	32
4.2.1 Κατασκευή βυθομετρίας.....	32
4.2.2 Λήψη και επεξεργασία ωκεανογραφικών δεδομένων.....	34
4.2.3 Κατασκευή οριακών συνθηκών	40
4.2.4 Κατασκευή αρχείων εισόδου των φασματικών μοντέλων TOMAWAC & ARTEMIS49	
4.3 Παράμετροι Προσομοίωσης	54
4.3.1 Αρχείο παραμέτρων για το μοντέλο TOMAWAC.....	54

4.3.2	Αρχείο παραμέτρων για το μοντέλο ARTEMIS	55
5	Αποτελέσματα	57
5.1	Μελέτη εξωτερικών έργων προστασίας του λιμένα.....	57
5.2	Μελέτη ηρεμίας της λιμενολεκάνης	61
6	Συμπεράσματα.....	75
6.1	Σύνοψη συμπερασμάτων	75
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	76
	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	77
	Παράρτημα Α – Αρχεία εισόδου	79
	Παράρτημα Β – Περαιτέρω αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	83
	Παράρτημα Γ – Ανάλυση ακραίων τιμών	99

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος κατά τις οδηγίες PIANC No 121-2014 (PIANC , 2014).....	5
Εικόνα 2.2: Κύριες αιτίες της αλλαγής της στάθμης της θάλασσας (Hall, 2016).....	10
Εικόνα 2.3: Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 1900-2018 (NASA, 2022)	11
Εικόνα 2.4: Κατανομή του μέσου 50ετούς δείκτη SSI(m) (Κρεστενίτης, 2021).....	12
Εικόνα 2.5: Παγκόσμια πρόβλεψη για την άνοδο της στάθμης της θάλασσας για τα σενάρια SRES (Church, 2011).....	14
Εικόνα 2.6: Μέση μεταβολή της παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας για το 2006-2100 συγκριτικά με το διάστημα 1986-2005 (IPCC, 2014).....	16
Εικόνα 2.7: Μέση άνοδος της στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα για το 2006-2100 συγκριτικά με το διάστημα 1986-2005 (IPCC, 2014).....	16
Εικόνα 4.1: Γεωγραφική Θέση Λιμένα Πειραιά (Google Earth)	27
Εικόνα 4.2: Στρατηγική θέση του Λιμένα του Πειραιά (PCDC).....	28
Εικόνα 4.3: Ζώνες Δραστηριοτήτων του Λιμένα (ΟΛΠ).....	28
Εικόνα 4.4: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου στην Αττική για τα σενάρια RCP 4.5 (πάνω) και RCP 8.5 (κάτω) (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).....	30
Εικόνα 4.5: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης θερινής ταχύτητας ανέμου στην Αττική για τα σενάρια RCP 4.5 (πάνω) και RCP 8.5 (κάτω) (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).....	31
Εικόνα 4.6: Κατανομή της εκτιμώμενης μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 2031-2060 (κοντινό μέλλον) συγκριτικά με την περίοδο 1971-2000 (περίοδο αναφοράς) για το σενάριο RCP 4.5 (αριστερά) και το RCP 8.5 (δεξιά), βασισμένη στο κλιματικό μοντέλο MPI – ESM – MR (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).....	32
Εικόνα 4.7: Κατανομή της εκτιμώμενης μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 2071-2100 (μακρινό μέλλον) συγκριτικά με την περίοδο 1971-2000 (περίοδο αναφοράς) για το σενάριο RCP 4.5 (αριστερά) και το RCP 8.5 (δεξιά), βασισμένη στο κλιματικό μοντέλο MPI – ESM – MR (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).....	32
Εικόνα 4.8: Ναυτικός χάρτης κλίμακας 1:5800 (NAVIONICS).....	33
Εικόνα 4.9: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.....	33
Εικόνα 4.10: Γεωμετρικοί και χρονικοί περιορισμοί για την περιοχή μελέτης στην πλατφόρμα Copernicus Marine Service (CMS).....	35
Εικόνα 4.11: Επιλογή μεταβλητών στην βάση Copernicus Marine Service (CMS).....	35
Εικόνα 4.12: Διαδικασία λήψης δεδομένων από τη βάση Copernicus Climate Change Service (C3S).....	37
Εικόνα 4.13: Διαδικασία λήψης δεδομένων από τη βάση C3S.....	38
Εικόνα 4.14: Δημιουργία χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος για το διάστημα 1993-1995 (CMS) στο λογισμικό Panoply	39
Εικόνα 4.15: Δημιουργία χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος για το σενάριο RCP4.5 το έτος 2041 (C3S) στο λογισμικό Panoply.....	40
Εικόνα 4.16: Κύριες διευθύνσεις κυματισμών για τον Πειραιά.....	41
Εικόνα 4.17: Προσαρμογή κατανομής Gumbel για την περίπτωση του RCP 8.5 για εύρη διευθύνσεων 190°-235°	45
Εικόνα 4.18: Γεωμετρικό αρχείο (geometry.slf) για τα μοντέλα TOMAWAC & ARTEMIS.....	49
Εικόνα 4.19: Αρχείο οριακών συνθηκών (boundary.cli) στο μοντέλο TOMAWAC.....	51

Εικόνα 4.20: Συντελεστής ανάκλασης για διάφορους τύπους υλικών (Thompson, 1996).....	52
Εικόνα 4.21: Αρχείο οριακών συνθηκών (boundary.cii) στο μοντέλο ARTEMIS	53
Εικόνα 5.1: Έξαλλοι φυσικοί κυματοθραύστες στο Λιμάνι του Πειραιά.....	57
Εικόνα 5.2: Ιστορική φωτογραφία για το Λιμάνι του Πειραιά (ΟΛΠ)	63

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Βαθμός συνεισφοράς αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας)	9
Πίνακας 2.2: Σενάρια εκπομπών SRES	13
Πίνακας 2.3: Εκτιμήσεις των σεναρίων RCP σχετικά με το radiative forcing και τις συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων (IPCC, 2014).	15
Πίνακας 4.1: Πίνακας Συχνότητας Ύψους Κύματος για τα δεδομένα HINDCAST.....	42
Πίνακας 4.2: Πίνακας Συχνότητας Περιόδου Κορυφής για τα δεδομένα HINDCAST.....	42
Πίνακας 4.3: Πίνακας Συχνότητας Ύψους Κύματος για το σενάριο RCP4.5	42
Πίνακας 4.4: Πίνακας Συχνότητας Περιόδου για το σενάριο RCP 4.5	43
Πίνακας 4.5: Πίνακας Συχνότητας Ύψους Κύματος για το σενάριο RCP8.5	43
Πίνακας 4.6: Πίνακας Συχνότητας Περιόδου για το σενάριο RCP 8.5	43
Πίνακας 4.7: Συντελεστές συσχέτισης για τις κατανομές Gumbel και Weibull	44
Πίνακας 4.8: Κύματα σχεδιασμού και συντελεστές συσχέτισης ανά σενάριο και τομέα διευθύνσεων κυματισμού	46
Πίνακας 4.9: Εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού για δεδομένα HINDCAST.....	47
Πίνακας 4.10: Εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού για το σενάριο RCP 4.5	47
Πίνακας 4.11: Εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού για το σενάριο RCP 8.5	48
Πίνακας 4.12: Κωδικοί για κάθε οριακή συνθήκη (Tutorial Manual for the Mesher in BlueKenue)	50
Πίνακας 4.13: Συντελεστές ανάκλασης κλειστών ορίων	52
Πίνακας 4.14: Κωδικοί οριακών συνθηκών για το μοντέλο ARTEMIS.	53
Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα φασματικού μοντέλου TOMAWAC στο Βόρειο και Νότιο Κυματοθραύστη, με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.....	61
Πίνακας 5.2: Επιτρεπόμενα Ύψη Κύματος για τις θέσεις παραβολής	63
Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για τα δεδομένα HINDCAST, με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.....	67
Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 4.5 - Περίπτωση 1 (αγνοώντας την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.	67
Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 8.5 - Περίπτωση 1 (αγνοώντας την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.	68
Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 4.5 - Περίπτωση 2 (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.....	69
Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 8.5 - Περίπτωση 2 (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.....	69
Πίνακας 5.8: Υπέρβαση των ορίων της PIANC για το Κριτήριο 1	71
Πίνακας 5.9: Υπέρβαση των ορίων της PIANC για το Κριτήριο 3	72
Πίνακας 5.10: Ποσοστό (%) μη λειτουργίας του λιμένα για τα Κριτήρια 1 & 3 της PIANC....	73

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 5.1: Σημεία εξαγωγής χρονοσειρών των κυματικών χαρακτηριστικών	58
Σχήμα 5.2: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51m$, $T_p=8.20sec$, $MWD=167.5^\circ$).	59
Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51m$, $T_p=8.20sec$, $MWD=212.5^\circ$).	60
Σχήμα 5.4: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.01m$, $T_p=7.58sec$, $MWD=212.5^\circ$).	60
Σχήμα 5.5: Σημεία ενδιαφέροντος εντός λιμενολεκάνης	62
Σχήμα 5.6: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 9 ($H_s=1.15m$, $T_p=5.19sec$, $MWD=212.5^\circ$)	64
Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 ($H_s=1.63m$, $T_p=4.75sec$, $MWD=257.5^\circ$)	65
Σχήμα 5.8: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 ($H_s=1.66m$, $T_p=4.72sec$, $MWD=257.5^\circ$)	65
Σχήμα 5.9: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 ($H_s=1.63m$, $T_p=4.75sec$, $MWD=257.5^\circ$)	66
Σχήμα 5.10: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 ($H_s=1.66m$, $T_p=4.72sec$, $MWD=257.5^\circ$)	66
Σχήμα Π.Β.1: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=1.69m$, $T_p=7.77sec$, $MWD=122.5^\circ$).	83
Σχήμα Π.Β.2: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.71m$, $T_p=7.21sec$, $MWD=122.5^\circ$).	83
Σχήμα Π.Β.3 Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.30m$, $T_p=7.13sec$, $MWD=122.5^\circ$).	84
Σχήμα Π.Β.4: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51m$, $T_p=8.20sec$, $MWD=167.5^\circ$).	84
Σχήμα Π.Β.5: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.71m$, $T_p=9.41sec$, $MWD=167.5^\circ$).	85
Σχήμα Π.Β.6: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=4.21m$, $T_p=9.47sec$, $MWD=167.5^\circ$).	85
Σχήμα Π.Β.7: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=1.62m$, $T_p=7.71sec$, $MWD=212.5^\circ$).	86
Σχήμα Π.Β.8: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51m$, $T_p=8.20sec$, $MWD=212.5^\circ$).	86
Σχήμα Π.Β.9: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.01m$, $T_p=7.58sec$, $MWD=212.5^\circ$).	87
Σχήμα Π.Β.10: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=1.03m$, $T_p=5.90sec$, $MWD=257.5^\circ$).	87
Σχήμα Π.Β.11: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.20m$, $T_p=6.45sec$, $MWD=257.5^\circ$).	88
Σχήμα Π.Β.12: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.21m$, $T_p=6.55sec$, $MWD=257.5^\circ$).	88
Σχήμα Π.Β.13: : Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 2 ($H_s=1.17m$, $T_p=5.21sec$, $MWD=122.5^\circ$)	89

Σχήμα Π.Β.14: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 5 (Hs=2.80m, Tr=5.45sec, MWD=122.5°)	89
Σχήμα Π.Β.15 Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 4 (Hs=2.20m, Tr=5.06sec, MWD=122.5°)	90
Σχήμα Π.Β.16: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 5 (Hs=2.80m, Tr=5.45sec, MWD=122.5°)	90
Σχήμα Π.Β.17: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 4 (Hs=2.20m, Tr=5.06sec, MWD=122.5°)	91
Σχήμα Π.Β.18: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 7 (Hs=2.66m, Tr=6.51sec, MWD=167.5°)	91
Σχήμα Π.Β.19: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 10 (Hs=2.71m, Tr=5.41sec, MWD=167.5°)	92
Σχήμα Π.Β.20: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 12 (Hs=4.08m, Tr=5.91sec, MWD=167.5°)	92
Σχήμα Π.Β.21: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 10 (Hs=2.71m, Tr=5.41sec, MWD=167.5°)	93
Σχήμα Π.Β.22: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 12 (Hs=4.08m, Tr=5.91sec, MWD=167.5°)	93
Σχήμα Π.Β.23: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 9 (Hs=1.15m, Tr= 5.19sec, MWD=212.5°)	94
Σχήμα Π.Β.24: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 15 (Hs=2.67m, Tr=5.39sec, MWD=212.5°)	94
Σχήμα Π.Β.25: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 17 (Hs=2.70m, Tr=5.33sec, MWD=212.5°)	95
Σχήμα Π.Β.26: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 15 (Hs=2.67m, Tr=5.39sec, MWD=212.5°)	95
Σχήμα Π.Β.27: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 17 (Hs=2.70m, Tr=5.33sec, MWD=212.5°)	96
Σχήμα Π.Β.28: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 10 (Hs=0.59m, Tr=4.33sec, MWD=257.5°)	96
Σχήμα Π.Β.29: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 (Hs=1.63m, Tr=4.75sec, MWD=257.5°)	97
Σχήμα Π.Β.30: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 (Hs=1.66m, Tr=4.72sec, MWD=257.5°)	97
Σχήμα Π.Β.31: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 (Hs=1.63m, Tr=4.75sec, MWD=257.5°)	98
Σχήμα Π.Β.32: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2 ^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 (Hs=1.66m, Tr=4.72sec, MWD=257.5°)	98
Σχήμα Π.Γ.1: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 100°-145°	99
Σχήμα Π.Γ.2: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 145°-190°	99
Σχήμα Π.Γ.3: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 190°-235°	100
Σχήμα Π.Γ.4: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 235°-280°	100

Σχήμα Π.Γ.5: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 100°-145°	101
Σχήμα Π.Γ.6: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 145°-190°	101
Σχήμα Π.Γ.7: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 190°-235°	102
Σχήμα Π.Γ.8: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 235°-280°	102
Σχήμα Π.Γ.9: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 100°-145°	103
Σχήμα Π.Γ.10: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 145°-190°	103
Σχήμα Π.Γ.11: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 190°-235°	104
Σχήμα Π.Γ.12: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 235°-280°	104

Περίληψη

Η σημασία των λιμένων στην αλυσίδα των θαλάσσιων μεταφορών είναι πολύ σημαντική και επηρεάζει αισθητά την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη της περιοχής που εξυπηρετεί. Η παγκόσμια μεταβολή του κλίματος απειλεί όλο και περισσότερο τους λιμένες. Φαινόμενα όπως η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, η αύξηση της έντασης και της συχνότητας εμφάνισης των ακραίων φαινομένων και η μεταβολή της πνοής της κύριας διεύθυνσης του ανέμου επηρεάζουν δραστικά τη λειτουργία του λιμένα. Συνεπώς, η διερεύνηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα κυματικά χαρακτηριστικά της λιμενολεκάνης είναι ζωτικής σημασίας ώστε να εξασφαλισθεί η απρόσκοπτη λειτουργία του λιμένα στο μέλλον.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στη ζώνη του Επιβατικού Λιμένα του Πειραιά. Πιο συγκεκριμένα, διερευνώνται τα εξωτερικά προστατευτικά έργα του λιμένα και η ικανοποίηση των συνθηκών ηρεμίας εντός της λιμενολεκάνης, λαμβάνοντας υπόψη τα σενάρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου RCP4.5 και RCP8.5, τα οποία αναπτύχθηκαν από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC). Τα απαραίτητα ωκεανογραφικά δεδομένα αποκτήθηκαν από τις βάσεις δεδομένων Copernicus Marine Service (CMS) και Copernicus Climate Change Service (C3S), των οποίων είναι απαραίτητη η μετατροπή σε επεξεργάσιμη μορφή μέσω του λογισμικού Panoply. Οι απαραίτητες κυματικές προσομοιώσεις γίνονται με τη χρήση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα Telemac – Mascaret και συγκεκριμένα, με το φασματικό κυματικό μοντέλο TOMAWAC και το μοντέλο ήπιας κλίσης ARTEMIS. Για τον προσδιορισμό της ηρεμίας της λιμενολεκάνης αξιοποιούνται τα επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος που προτείνουν οι οδηγίες της PIANC και στην περίπτωση που αυτά υπερβαίνονται, υπολογίζεται το ποσοστό (%) μη λειτουργίας του λιμένα.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις αποδεικνύουν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στον επιβατικό Λιμένα του Πειραιά. Στην περίπτωση των εξωτερικών προστατευτικών έργων, τα ύψη κύματος που προκύπτουν από τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5 είναι αρκετά μεγαλύτερα από αυτά των HINDCAST δεδομένων, ενώ παρατηρείται πως τα μεγαλύτερα ύψη κύματος στον πόδα των εξωτερικών έργων εμφανίζονται από κύματα σχεδιασμού με εύρος διευθύνσεων 190°-235° για τα σενάρια εκπομπών και 145°-190° για τα δεδομένα HINDCAST. Αντίστοιχα, για την ηρεμία λιμενολεκάνης, τα σενάρια εκπομπών RCP έχουν ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα ύψη κύματος εντός της λιμενολεκάνης συγκριτικά με αυτά των δεδομένων HINDCAST, ενώ η μεγαλύτερη αναταραχή της λιμενολεκάνης προκύπτει από σενάρια κυματισμού με εύρος διευθύνσεων 235°-280° για τα σενάρια εκπομπών και 190°-235° για τα δεδομένα HINDCAST.

Abstract

The importance of ports in the maritime transport chain is major, as it significantly impacts the socio - economic development of the region it serves. Global climate change is increasingly threatening the ports. Events such as the rise of sea level, the increase in the intensity and frequency of extreme events, and the alteration in the main wind direction have a drastic impact on port operability. Therefore, investigating the impact of climate change on the wave characteristics of the port basin is crucial to ensure the uninterrupted operation of the port in the future.

The present study aims to examine the impact of climate change on the passenger Port of Piraeus. Specifically, the external protective works of the port and the maintenance of the harbor's tranquility are investigated, considering the emission scenarios RCP4.5 and RCP8.5, developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The necessary oceanographic data were obtained from the Copernicus Marine Service (CMS) and Copernicus Climate Change Service (C3S) databases and converted into a processable format using Panoply's software. The necessary wave simulations are performed using the open-source software Telemac – Mascaret, specifically the TOMAWAC spectral wave model and the ARTEMIS elliptic mild slope wave model. Harbor's tranquility is occurred by using the wave height limits suggested by the PIANC guidelines.

The results obtained from the simulations demonstrate the impact of climate change on the passenger Port of Piraeus. For the external protective works, the wave heights obtained from the RCP 4.5 and RCP 8.5 emission scenarios are significantly higher than those obtained from the HINDCAST data. Also, it is observed that the highest wave heights occur from design waves with a directional range of 190°-235° for the emission scenarios and 145°-190° for the HINDCAST data. Likewise, for the harbor's tranquility, the RCP emission scenarios result in higher wave heights with the harbor's basin compared to those of the HINDCAST data. The most significant basin turbulence results from wave scenarios with a directional range of 235°-280° for the emission scenarios and 190°-235° for the HINDCAST data.

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η πρόβλεψη των κυματικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης αποτελεί ένα σημαντικό αντικείμενο μελέτης για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των λιμενικών έργων. Η απουσία κυματικών αναταραχών εντός της λιμενολεκάνης είναι εξαιρετικά σημαντική για λόγους σωστής και ασφαλούς λειτουργίας του λιμένα.

Τα τελευταία χρόνια, η μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων. Οι λιμένες σαν υποδομές απειλούνται όλο και περισσότερο από το φαινόμενο της αύξησης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Επιπτώσεις του φαινομένου όπως, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, η μεταβολή της έντασης και της συχνότητας των έντονων καιρικών φαινομένων αλλά και η μεταβολή της κύριας πνοής διεύθυνσης του ανέμου επηρεάζουν άμεσα τη λειτουργία του λιμένα. Δεδομένου του σπουδαίου ρόλου των λιμένων στις παγκόσμιες αλυσίδες ανεφοδιασμού, η μελέτη επιρροής της κλιματικής αλλαγής και η προστασία τους από αυτή είναι ένα ζήτημα μείζονος σημασίας ώστε να αποφευχθούν οικονομικές και κοινωνικές απώλειες.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στη ζώνη του Επιβατικού Λιμένα του Πειραιά με χρήση μαθηματικών μοντέλων. Συγκεκριμένα, η έρευνα αφορά τα εξωτερικά προστατευτικά έργα και την ηρεμία της λιμενολεκάνης, τα οποία είναι καθοριστικά για την ορθή λειτουργία του λιμένα. Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής προσομοιώνεται μέσω των σεναρίων της IPCC, το ευμενές σενάριο RCP 4.5 και το δυσμενές RCP 8.5, τα οποία σχετίζονται με τις μελλοντικές εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Ο προσδιορισμός της ηρεμίας της λιμενολεκάνης γίνεται σύμφωνα με επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος, όπου η υπέρβαση αυτών θα ορίσει το ποσοστό (%) μη λειτουργίας του λιμένα. Το Λιμάνι του Πειραιά παρουσιάζει σπουδαίο ενδιαφέρον λόγω της καίριας γεωγραφικής του θέσης, στο σταυροδρόμι των τριών Ηπείρων, που το καθιστά ένα από τα μεγαλύτερα λιμάνια στη διέλευση επιβατών και στη διαχείριση εμπορευματοκιβωτίων στην Ευρώπη και σε ολόκληρο τον κόσμο αντίστοιχα.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Σε αυτή την υποενότητα θα γίνει μια συνοπτική περιγραφή των κεφαλαίων που περιλαμβάνονται στην παρούσα διπλωματική εργασία εκτός από το Κεφάλαιο 1, της εισαγωγής.

- Στο Κεφάλαιο 2, παρουσιάζεται πιο αναλυτικά το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τις μεθόδους εκτίμησης αναταραχής της λιμενολεκάνης, την έννοια της κλιματικής αλλαγής και των σεναρίων που περιλαμβάνουν την επίδραση της κλιματικής αλλαγής, τον τρόπο υπολογισμού του κύματος σχεδιασμού και την χρήση των ωκεανογραφικών δεδομένων.
- Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας. Συνοπτικά, γίνεται αναφορά στο φασματικό μοντέλο 3^{ης} γενιάς TOMAWAC και στο ελλειπτικό μοντέλο ήπιας κλίσης ARTEMIS, τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο Εθνικό Εργαστήριο

Υδραυλικής της Γαλλίας και ανήκουν στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα Telemac – Mascaret. Για τα παραπάνω μοντέλα παρουσιάζονται το πεδίο εφαρμογής τους, οι βασικές εξισώσεις υπολογισμού στις οποίες βασίζεται η λειτουργία τους καθώς και οι παράμετροι εισόδου και εξόδου που χρειάζονται ή προκύπτουν από την εκτέλεση της προσομοίωσης.

- Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης του Επιβατικού Λιμένα του Πειραιά και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην προσαρμογή του έναντι της κλιματικής αλλαγής. Στη συνέχεια, γίνεται η προετοιμασία των αρχικών δεδομένων για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Αρχικά, παρουσιάζεται η κατασκευή του κάρναβου πεπερασμένων στοιχείων και η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης. Έπειτα αναφέρονται οι βάσεις δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για την άντληση ωκεανογραφικών μεταβλητών και ο τρόπος επεξεργασίας τους. Ακόμη, παρουσιάζεται η κατασκευή των οριακών συνθηκών για την μελέτη των εξωτερικών προστατευτικών έργων και για την ηρεμία της λιμενολεκάνης. Τελικά, κατασκευάζονται τα απαραίτητα αρχεία εισόδου και ορίζονται οι παράμετροι προσομοίωσης, για κάθε αριθμητικό μοντέλο ξεχωριστά.
- Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται αναλυτικά η μελέτη των εξωτερικών προστατευτικών έργων και η μελέτη ηρεμίας της λιμενολεκάνης. Επίσης, παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την κάθε περίπτωση και γίνεται σύγκριση των υπό μελέτη διαφορετικών σεναρίων.
- Στο Κεφάλαιο 6, συγκεντρώνονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη παρούσα διπλωματική εργασία και παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μέθοδοι εκτίμησης της αναταραχής της λιμενολεκάνης και ο υπολογισμός του κύματος σχεδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της κλιματικής αλλαγής χρησιμοποιώντας δεδομένα από ωκεανογραφικές βάσεις δεδομένων.

2.1 Ηρεμία Λιμενολεκάνης

2.1.1 Γενικά στοιχεία

Οι λιμένες αποτελούν το κύριο στοιχείο στην πραγματοποίηση των θαλάσσιων μεταφορών και η σωστή λειτουργία αυτών είναι καθοριστική για την ποιότητά τους. Κύριος σκοπός της λειτουργίας των λιμένων είναι να εξασφαλίσουν ασφαλείς συνθήκες αγκυροβόλησης για τα πλοία που εξυπηρετούν, καθώς και να διευκολύνουν την άμεση και ασφαλή φορτοεκφόρτωση των εμπορευμάτων και απο-επιβίβαση των επιβατών. Συνεπώς, η απουσία κυματικών αναταραχών που θα εμπόδιζαν τις παραπάνω λειτουργίες κρίνεται αναγκαία.

Εφόσον η ηρεμία της λιμενολεκάνης είναι απαραίτητη για να διασφαλίσει καθημερινές λειτουργικές ανάγκες του λιμένα, η έρευνα αναταραχών σε αυτή πρέπει να προσανατολιστεί προς το μέσο ετήσιο κυματικό κλίμα της περιοχής, καθώς αυτό είναι που θα καθορίσει το ποσοστό του χρόνου, που οι λειτουργίες του λιμανιού δεν δύναται να πραγματοποιηθούν. Επομένως, κύριο παράγοντα που προκαλεί την διακοπή της λειτουργίας του λιμένα αποτελούν οι ανεμογενείς κυματισμοί.

Η διασφάλιση της ηρεμίας της λιμενολεκάνης αποτελεί καίριο στόχο του σχεδιασμού και δίνεται ιδιαίτερη σημασία κατά τη φάση της μελέτης. Ο σωστός και αποτελεσματικός σχεδιασμός των λιμενικών έργων είναι που θα καθορίσει την απουσία των κυματικών αναταραχών στη λιμενολεκάνη και θα εξασφαλίσει την καλύτερη δυνατή λειτουργία του λιμένα. Ωστόσο, στη μελέτη συνυπολογίζονται οι οικονομικές, αλλά και περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνεπάγεται η κατασκευή των διαφόρων λιμενικών έργων για κάθε προσφερόμενο βαθμό ηρεμίας που επιτυγχάνεται και επιλέγεται η βέλτιστη χάραξη.

Οι απαιτούμενες συνθήκες μπορούν να εξασφαλιστούν με εργαστηριακή διερεύνηση διαφόρων λύσεων σε φυσικό ομοίωμα. Σε αυτές τις έρευνες, ελέγχεται η κυματική διαταραχή σε καίρια σημεία της λιμενολεκάνης και οι συνεπαγόμενες κινήσεις των παραβελημένων πλοίων. Εκτός από τα φυσικά ομοιώματα, σημαντικά αποτελέσματα προσφέρουν και οι αριθμητικές μέθοδοι, οι οποίες λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των Η/Υ και των αριθμητικών μοντέλων Υπολογιστικής Υδροδυναμικής εφαρμόζονται όλο και περισσότερο. Σε αυτήν την περίπτωση, λαμβάνονται υπόψη κυματικές διεργασίες όπως η περίθλαση, η διάθλαση και η ρήγωση και σε συνδυασμό με την μετάδοση του κυματισμού και την ανάκλαση, υπολογίζονται τα κυματικά χαρακτηριστικά στα σημεία ενδιαφέροντος εντός της λιμενολεκάνης. Έπειτα, η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος, συνήθως από προδιαγραφές έγκριτων οργανισμών (PIANC, EAU) είναι που θα καθορίσει την λειτουργικότητα της λιμενολεκάνης. Οι αριθμητικές μέθοδοι πλεονεκτούν έναντι των φυσικών ομοιωμάτων, στην ευκολία με την οποία μπορούν να μελετήσουν διάφορες διατάξεις έργων έως ότου καταλήξουν στην βέλτιστη λύση.

Φαινόμενα που επηρεάζουν την ηρεμία της λιμενολεκάνης, εκτός από τους ανεμογενείς κυματισμούς, αποτελούν οι μακρές ταλαντώσεις (seiches). Μακρές ταλαντώσεις ονομάζονται τα εγκλωβισμένα στην λιμενολεκάνη κύματα, με περίοδο μεγαλύτερη από 30 sec. που οφείλονται σε μακρούς κυματισμούς που δημιουργούνται στα ανοικτά λόγω χαμηλών βαρομετρικών, σε αλλαγές της ατμοσφαιρικής πίεσης, κ.λπ. Το κύριο πρόβλημα παρουσιάζεται στην περίπτωση που η γεωμετρία της λιμενολεκάνης βοηθάει την ανάπτυξη του φαινομένου του συντονισμού για τις επικρατούσες ελεύθερες ταλαντώσεις στην περιοχή. Οι τιμές των περιόδων των μακρών ταλαντώσεων κυμαίνονται στα όρια 1-3 min, οι οποίες είναι και οι επιβλαβέστερες στα παραβεβλημένα σκάφη (Μέμος, 2013).

2.1.2 Χρόνος διακοπής λειτουργίας

Κατά την διερεύνηση της ηρεμίας της λιμενολεκάνης, υπολογίζεται η αναταραχή σε καίρια σημεία λόγω των ανεμογενών κυματισμών. Στόχος της παραπάνω διαδικασίας είναι ο υπολογισμός του ύψους κύματος σε βασικά σημεία ενδιαφέροντος της λιμενολεκάνης. Στην περίπτωση που τα αποτελέσματα βρίσκονται εντός των ορίων, ο λιμένας μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του. Αντιθέτως, κατά την υπέρβαση των ορίων γίνεται αναφορά για “χρόνο διακοπής λειτουργίας” ή αλλιώς τις ημέρες του έτους κατά τις οποίες η λειτουργία του λιμένα δεν είναι δυνατή. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως έως σήμερα δεν έχουν οριστεί όρια ύψους κύματος για τους λιμένες, που να είναι ανεκτά για τη ναυτιλία. Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τον καθορισμό των επιτρεπόμενων ορίων θα χρησιμοποιηθούν οι οδηγίες της PIANC (PIANC, 2014).

Σύμφωνα με τις οδηγίες της PIANC, θεωρείται πως οι λειτουργικές συνθήκες για την παραβολή αλλά και τους ελιγμούς των πλοίων εντός της λιμενολεκάνης, ταυτίζονται με τις συνθήκες που έχουν καθιερωθεί και για τις υπόλοιπες λιμενικές περιοχές. Αυτό ισχύει ανεξάρτητα από το γεγονός ότι οι πιο προστατευμένες θέσεις που προσφέρει η λιμενολεκάνη οδηγούν σε μικρότερο ποσοστό χρόνου διακοπής λειτουργίας.

Για την ορθή λειτουργία της λιμενολεκάνης λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω βασικές διεργασίες:

- Ο ελλιμενισμός των σκαφών
- Οι εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης εμπορευμάτων ή επιβατών
- Η αγκυροβόληση των σκαφών σε προβλήτες και αποβάθρες

Τα επιτρεπόμενα όρια που προκύπτουν για την ομαλή ολοκλήρωση των παραπάνω διεργασιών, συνδέονται άμεσα με το είδος και το μέγεθος του εκάστοτε πλοίου, ωστόσο υπάρχουν και άλλοι δραστηριοί παράγοντες, οι οποίοι λαμβάνονται υπόψη από τις οδηγίες της PIANC. Ο ελλιμενισμός των σκαφών εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον αριθμό διαθέσιμων ρυμουλκών στην αποβάθρα, ενώ οι εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του φορτίου και από τον εξοπλισμό εκφόρτωσης που χρησιμοποιείται. Τα επιτρεπόμενα όρια για τα πλοία που αγκυροβολούν στις αποβάθρες και τις προβλήτες, εξαρτώνται από τις αντοχές του μέσου που χρησιμοποιείται για αυτό τον σκοπό (άγκυρες, αλυσίδες, σχοινιά κτλ.), από την διαθεσιμότητα εξοπλισμού ρυμούλκησης για την απομάκρυνση των πλοίων από το κρηπίδωμα σε ακραίες καιρικές συνθήκες, καθώς και από την δυνατότητα της ασφαλούς μετακίνησης του σκάφους προς άλλες αποβάθρες ή

αγκυροβόλια στην περίπτωση που οι καιρικές συνθήκες το θέτουν απαραίτητο. Ακόμη, σε ορισμένες περιπτώσεις υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που συμβάλλουν στον καθορισμό των ορίων όπως η άνεση των επιβατών ενός κρουαζιερόπλοιου υπό την επίδραση κυματισμών. Τα επιτρεπόμενα όρια συμπεριλαμβανομένων όλων των παραπάνω παραγόντων εμφανίζονται στην Εικόνα 2.1.

Description	$V_{W,1 min}$	$V_{F,1 min}$	H_s
1. Vessel berthing			
• Forces longitudinal to the quay	17.0 m/s	1.0 m/s	2.0 m
• Forces transverse to the quay	10.0 m/s	0.1 m/s	1.5 m
2. Loading and unloading operation stoppage (conventional equipment)			
• Forces longitudinal to the quay			
– Oil tankers			
< 30,000 DWT	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m
30,000 DWT – 200,000 DWT	22 m/s	1.5 m/s	2.0 m
> 200,000 DWT	22 m/s	1.5 m/s	2.5 m
– Bulk carriers			
Loading	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m
Unloading	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
– Liquid Gas Carriers			
< 60,000 m ³	22 m/s	1.5 m/s	1.2 m
> 60,000 m ³	22 m/s	1.5 m/s	1.5 m
– General cargo merchant ships, deep sea fishing boats and refrigerated vessels	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
– Container ships, RoRo ships and ferries	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
– Liners and Cruise ships ¹	22 m/s	1.5 m/s	0.5 m
– Fishing boats	22 m/s	1.5 m/s	0.6 m
• Forces transverse to the quay			
– Oil tankers			
< 30,000 DWT	20 m/s	0.7 m/s	1.0 m
30,000 DWT – 200,000 DWT	20 m/s	0.7 m/s	1.2 m
> 200,000 DWT	20 m/s	0.7 m/s	1.5 m
– Bulk carriers			
Loading	22 m/s	0.7 m/s	1.0 m
Unloading	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
– Liquid Gas Carriers			
< 60,000 m ³	16 m/s	0.5 m/s	0.8 m
> 60,000 m ³	16 m/s	0.5 m/s	1.0 m
– General cargo merchant ships, deep sea fishing boats and refrigerated vessels	22 m/s	0.7 m/s	0.8 m
– Container ships, RoRo ships and ferries	22 m/s	0.5 m/s	0.3 m
– Liners and Cruise ships ¹	22 m/s	0.7 m/s	0.3 m
– Fishing boats	22 m/s	0.7 m/s	0.4 m
3. Vessel at quay			
• Oil tankers and Liquid Gas Carriers			
– Actions longitudinal to the quay	30 m/s	2.0 m/s	3.0 m
– Actions transverse to the quay	25 m/s	1.0 m/s	2.0 m
• Liners and Cruise ships ²			
– Actions longitudinal to the quay	22 m/s	1.5 m/s	1.0 m
– Actions transverse to the quay	22 m/s	0.7 m/s	0.7 m
• Recreational boats ²			
– Actions longitudinal to the quay	22 m/s	1.5 m/s	0.4 m
– Actions transverse to the quay	22 m/s	0.7 m/s	0.2 m
• Other types of vessel	Limitations imposed by the design loads		
Notes:	1. Conditions relative to passengers embarking or disembarking. 2. Conditions relative to the limits for passenger's comfort on board. 3. Longitudinal = wind, current or waves taken as acting longitudinally when their direction lies in the sector of $\pm 45^\circ$ relative to the vessel's longitudinal axis. 4. Transverse = wind, current or waves taken as acting transversally when their direction lies in the sector of $\pm 45^\circ$ relative to the vessel's transverse axis.		

Εικόνα 2.1:Επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος κατά τις οδηγίες PIANC No 121-2014 (PIANC , 2014)

Η διαδικασία υπολογισμού των αναταραχών εντός της λιμενολεκάνης, λόγω των ανεμογενών κυματισμών αποτελεί σημαντικό κεφάλαιο για τον λιμένα. Μέσω αυτής, θα οριστούν οι ημέρες του έτους που οι αναταραχές στα σημεία ενδιαφέροντος είναι μεγαλύτερες από τα επιτρεπόμενα όρια και συνεπώς η λειτουργία του λιμένα καθίσταται αδύνατη.

Η διαδικασία που ακολουθείται περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα (Μέμος, 2013) :

1. Καθορίζεται η τρισδιάστατη κατανομή των χαρακτηριστικών υψών κύματος, κατεύθυνσης διάδοσης και περιόδου εξωτερικά του λιμένα.

2. Επιλέγονται τα σημεία ενδιαφέροντος του λιμένα στα οποία θα γίνει ο έλεγχος αναταραχών. Συνήθως, αφορούν τις θέσεις παραβολής των πλοίων, τους κύκλους ελιγμών που ακολουθούν, κ.α. τα οποία επιλέγονται σύμφωνα με τον σκοπό που εξυπηρετεί κάθε λιμένας.
3. Υπολογίζονται τα ύψη κύματος στα σημεία ενδιαφέροντος για διαφορετικά σενάρια προσπίπτοντος κυματισμού κάθε φορά.
4. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τα επιτρεπόμενα όρια και υπολογίζεται η χρονική περίοδος για την οποία γίνεται υπέρβαση αυτών, και συνεπώς η λειτουργία του λιμένα καθίσταται αδύνατη.

Οι παραπάνω τιμές προέρχονται είτε από μετρήσεις κυματισμών, είτε από κατανομές.

2.2 Κύμα σχεδιασμού

Θεωρία Ακραίων Τιμών

Σε κατασκευές όπως τα παράκτια έργα που έρχονται αντιμέτωπα με ακραία καιρικά φαινόμενα, των οποίων η ένταση και η συχνότητα μεταβάλλονται λόγω της κλιματικής αλλαγής είναι συχνή η χρήση της Θεωρίας των Ακραίων Τιμών (Extreme Value Theory – EVT). Στόχος της Θεωρίας των Ακραίων Τιμών, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των ελάχιστων και μέγιστων τιμών ενός δείγματος και πως οι τιμές αυτές μπορούν να περιγραφούν από τις κατανομές ακραίων τιμών. Επίσης, με την χρήση των ακραίων τιμών μπορεί να υπολογιστεί η πιθανότητα υπέρβασης των παραμέτρων σχεδιασμού για τα παραπάνω έργα. Για τον καθορισμό των ακραίων τιμών συνήθως απαιτείται ο καθορισμός των ακροτάτων στο δείγμα που συνήθως επιλέγεται με τις ακόλουθες μεθόδους:

1. Μέθοδος προσδιορισμού ακροτάτων ανά περίοδο (Block Maxima), όπου εντοπίζονται τα ακρότατα διαχωρίζοντας το δείγμα σε συγκεκριμένα τμήματα/περιόδους. Συνηθέστερα, τα ακρότατα υπολογίζονται σε διαδοχικές περιόδους ενός έτους (Annual Maximum).
2. την μέθοδο κορυφών πάνω από κατώφλι POT (Peaks Over Threshold), όπου κάθε καταγραφή που ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι θεωρείται ως ακρότατο.

Στην συνέχεια, αφού προσδιοριστούν τα ακρότατα γίνεται προσαρμογή μια θεωρητικής Γενικευμένης Κατανομής Ακραίων Τιμών (GEV) στο δείγμα.

Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV)

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της μέγιστης και ελάχιστης τιμής του ύψους κύματος, σύμφωνα με το θεώρημα των Fisher-Tippet (1928) μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τρεις κατανομές ακραίων τιμών όπως φαίνονται παρακάτω:

Gumbel:

$$F(x) = \exp \left\{ -\exp \left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right] \right\}, \quad -\infty < x < \infty \quad (2.1)$$

Frèchet:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \mu \\ \exp\left\{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^\sigma\right\}, & x > \mu \end{cases} \quad (2.2)$$

Weibull:

$$F(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^\sigma\right]\right\}, & x < \mu \\ 1, & x \geq \mu \end{cases} \quad (2.3)$$

Όπου μ : η παράμετρος θέσης,

σ : η παράμετρος κλίμακας

Το αρνητικό με την χρήση των τριών οριακών κατανομών είναι πως η λανθασμένη επιλογή κατανομής οδηγεί σε λάθος αντιπροσώπευση του δείγματος. Για τον λόγο αυτό οι τρεις κατανομές ενοποιήθηκαν από τον Von Mises (1954) σε μια οικογένεια κατανομών, την Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV).

Η κατανομή GEV έχει αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας:

$$G(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad \text{στο σύνολο} \left\{ \begin{array}{l} \left\{x: 1 + \frac{\xi(x-\mu)}{\sigma} > 0\right\} \\ -\infty < \mu < \infty \\ \sigma > 0 \\ -\infty < \xi < \infty \end{array} \right. \quad (2.4)$$

Όπου μ η παράμετρος θέσης,

σ : η παράμετρος κλίμακας,

ξ : η παράμετρος σχήματος

Ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου ξ , παρατηρούνται τα παρακάτω:

1. Για $\xi=0$ προκύπτει η κατανομή Gumbel με την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας (Coles, 2001):

$$G(x) = \exp\left\{-\exp\left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]\right\}, \quad \text{όπου } -\infty < x < \infty \quad (2.5)$$

2. Για $\xi>0$ προκύπτει η κατανομή Frèchet και για $\xi<0$ προκύπτει η κατανομή Weibull με συνάρτηση (Coles, 2001):

$$G(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\}, \quad \text{όπου } \xi \neq 0 \quad (2.6)$$

Οι παράμετροι της κατανομής GEV μπορούν να εκτιμηθούν με διάφορες μεθόδους, με ποιο διαδεδομένες, την μέθοδο μέγιστης πιθανοφάνειας και την μέθοδο των L- ροπών.

Περίοδος Επαναφοράς

Περίοδος επαναφοράς ενός φαινομένου ορίζεται το μέσο χρονικό διάστημα κατά το οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο έστω μια φορά, με τιμή ίση ή μεγαλύτερη της δοθείσας. Για περίοδο επαναφοράς T , ορίζεται ως p η πιθανότητα υπέρβασης:

$$p = \frac{1}{T} \quad (2.7)$$

Στην περίπτωση που η πιθανότητα υπέρβασης p αφορά μέγιστες τιμές της μεταβλητής X , ισχύει ότι $p = P(X \geq x)$ και επομένως:

$$T = \frac{1}{p} = \frac{1}{1 - P(X \leq x)} \quad (2.8)$$

Στην Θεωρία Ακραίων Τιμών (EVA) στόχος είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου επαναφοράς T , δηλαδή $u(T)$, που ορίζεται ως το όριο για το οποίο ο μέσος αριθμός υπερβάσεων, για διάστημα T ετών, είναι ίσος με μονάδα. Για την Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV), το επίπεδο επαναφοράς που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης p υπολογίζεται από τις εξισώσεις (Coles, 2001) :

$$z_p = \mu - \frac{\sigma}{\xi} [1 - \{-\log(1 - p)\}^{-\xi}], \text{ όπου } \xi \neq 0 \text{ και } p = \frac{1}{T} \quad (2.9)$$

$$z_p = \mu - \sigma \log\{-\log(1 - p)\}, \text{ όπου } \xi = 0 \quad (2.10)$$

Όπου $G(z_p) = 1 - p$, με z_p το επίπεδο επαναφοράς, το οποίο αναμένεται να υπερβληθεί μια φορά κάθε $T = \frac{1}{p}$ έτη

2.3 Κλιματική Αλλαγή

2.3.1 Έννοια κλιματικής αλλαγής

Η κλιματική αλλαγή σαν φαινόμενο ορίζεται με διαφορετικούς τρόπους, τόσο από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα, όσο και από Διεθνείς Οργανισμούς. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), κλιματική αλλαγή ορίζεται κάθε αλλαγή του κλίματος στην πάροδο του χρόνου ανεξάρτητα με το αν οφείλεται σε ανθρωπογενή δραστηριότητα ή είναι αποτέλεσμα φυσικής μεταβλητότητας. Η αλλαγή του κλίματος μπορεί να εντοπιστεί με μεταβολές του μέσου όρου των βασικών του δεικτών ή των ιδιοτήτων του, με την χρήση στατιστικών δοκιμών (IPCC, 2021). Αντιθέτως, στη Σύμβαση – Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για τις Κλιματικές Μεταβολές (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) η κλιματική αλλαγή αναφέρεται σε μεταβολές του κλίματος άμεσα ή έμμεσα εξαρτώμενες από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, που μεταβάλλουν την σύσταση της ατμόσφαιρας και παρατηρούνται σε συγκρίσιμες χρονικές περιόδους (UNFCCC, 2014).

Το κλίμα της γης χαρακτηρίζεται από φυσική μεταβλητότητα, το οποίο αποδεικνύεται από τις ριζικές αλλαγές που έχει δεχθεί από τον σχηματισμό του πλανήτη έως και σήμερα. Ωστόσο, τα τελευταία 150 χρόνια, που χαρακτηρίζονται ως "Βιομηχανική Εποχή", η θερμοκρασία παρουσιάζει μια αύξηση ταχύτερη από οποιαδήποτε άλλη εποχή. Για τον παραπάνω λόγο ο ορισμός της κλιματικής αλλαγής σχετίζεται κυρίως με τις μεταβολές του κλίματος που προκαλούνται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Ένα από τα

σημαντικότερα αίτια της κλιματικής αλλαγής αποτελεί το “φαινόμενο του θερμοκηπίου”. Ως φαινόμενο του θερμοκηπίου ορίζεται η διαδικασία στην οποία η θερμότητα συγκρατείται από την ατμόσφαιρα μέσω των αερίων του θερμοκηπίου (όζον, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, διοξείδιο του άνθρακα, χλωροφθοράνθρακες και υδρατμοί) με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πλανήτη. Ανθρώπινες δραστηριότητες που συμβάλλουν στην έξαρση του φαινομένου αποτελούν (Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας):

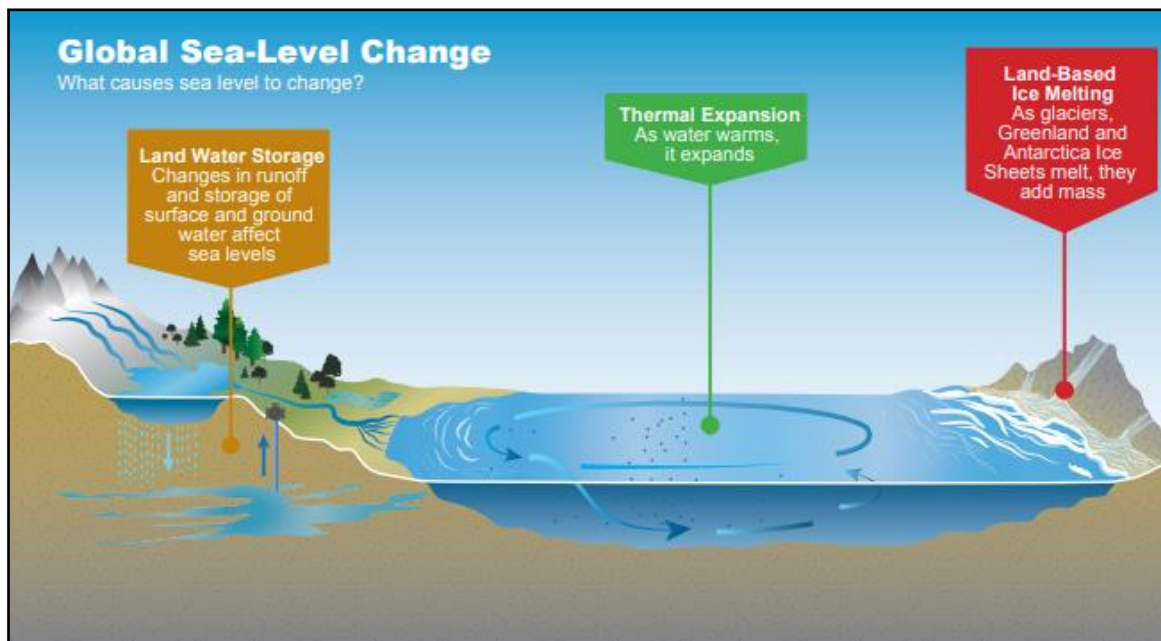
1. Η καύση ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας και το αέριο, απαραίτητα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που ευθύνονται για το 50% των συνολικών εκπομπών, εκ των οποίων το 40% είναι διοξείδιο του άνθρακα, ενώ το υπόλοιπο 10% αποτελείται από μεθάνιο, όζον και μονοξείδιο του άνθρακα.
2. Οι συχνές αλλαγές στη χρήση γης που οδηγούν στην καταστροφή των δασών λόγω αποψίλωσης, καύσης ή εκχέρσωσης ευθύνονται κατά 15% στην αύξηση των αερίων του θερμοκηπίου.
3. Η εντεταμένη χρήση συνθετικών χημικών ουσιών, όπως οι χλωροφθοράνθρακες.
4. Η υπέρογκη κτηνοτροφία και γεωργία ευθύνονται για το 15% των εκπομπών.

Στον Πίνακα 2.1 δίνεται το ποσοστό συνεισφοράς κάθε αερίου της ατμόσφαιρας, υπεύθυνο για την ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου σύμφωνα με το (Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας).

Πίνακας 2.1: Βαθμός συνεισφοράς αερίων στο φαινόμενο του θερμοκηπίου (Κέντρο Εκπαιδευτικής Έρευνας)

Αέριο	Συνεισφορά (%)
Διοξείδιο του Άνθρακα	50-60
Χλωροφθοράνθρακες	15-25
Μεθάνιο	12-20
Υποξείδιο του αζώτου	5
Όζον και άλλα αέρια	11

Η αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου προκαλεί υπερθέρμανση του πλανήτη, η οποία επηρεάζει άμεσα τους ωκεανούς και την κρυόσφαιρα. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί θερμική διαστολή του ωκεανού και απόψυξη των πολικών περιοχών και ορεινών παγωμένων εκτάσεων. Τα παραπάνω φαινόμενα αποτελούν την κύρια αιτία της ανόδου της στάθμης της θάλασσας. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζονται σχηματικά οι κύριες αιτίες της αλλαγής της στάθμης της θάλασσας. Μια ακόμη επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας είναι η αύξηση της έντασης και της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων. Αυτό, προκαλεί ταυτόχρονα, αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού, στα οικοσυστήματα, στις ανθρώπινες υποδομές και στην οικονομία (Hall, 2016).



Εικόνα 2.2: Κύριες αιτίες της αλλαγής της στάθμης της θάλασσας (Hall, 2016).

2.3.2 Κλιματική αλλαγή στα λιμενικά έργα

Στις παράκτιες περιοχές είναι εγκατεστημένο περίπου το 40% του παγκόσμιου πληθυσμού και υποδομών και αναμένεται μια αύξηση αυτού κατά 75% έως το 2050 (Losada, 2011). Οι παράκτιες πόλεις και τα λιμάνια αποτελούν βασικό στοιχείο της κοινωνίας, της παγκόσμιας οικονομίας και της ανάπτυξης σε παγκόσμια, περιφερειακή ή τοπική κλίμακα, ενώ ταυτόχρονα, συνδέουν τις τοπικές και εθνικές αλυσίδες εφοδιασμού με τις παγκόσμιες αγορές. Αυτή η συσσώρευση στις παράκτιες περιοχές σε συνδυασμό με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας καθιστά τα παράκτια συστήματα από τα πιο ευάλωτα έναντι της κλιματικής αλλαγής. Οι λιμένες είναι από τις υποδομές που απειλούνται όλο και περισσότερο από τις υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και δεδομένου του βασικού τους ρόλου στις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού, η προσαρμογή και η προστασία τους από την κλιματική αλλαγή είναι ζωτικής σημασίας, ώστε να αποφευχθούν οικονομικές και κοινωνικές απώλειες.

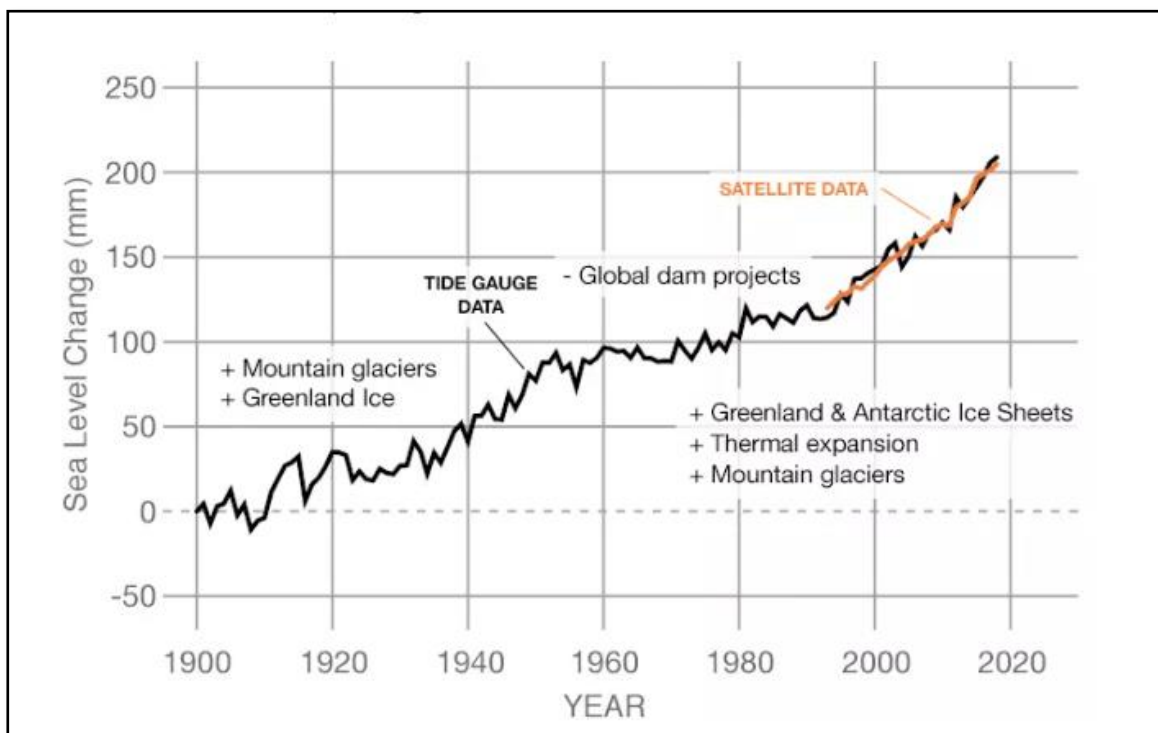
Η κλιματική αλλαγή επιδρά στα λιμενικά έργα άμεσα ή έμμεσα με διάφορους τρόπους. Οι άμεσες επιπτώσεις σχετίζονται με :

1. την αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας, ή οποία μειώνει την υψομετρική διαφορά της στάθμης της θάλασσας από την στάθμη των προστατευτικών έργων, ευνοώντας έτσι την υπερπήδηση κυματισμών εντός της λιμενολεκάνης.
2. την μεταβολή της έντασης και της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων, που οδηγούν στην δημιουργία μεγαλύτερων κυμάτων και ισχυρότερων ρευμάτων.
3. την μεταβολή της κύριας διεύθυνσης πνοής ανέμου, η οποία πλέον δημιουργεί κυματικά χαρακτηριστικά διαφορετικά από αυτά που έχει γίνει ο σχεδιασμός του έργου.

Ωστόσο, τα λιμενικά έργα επηρεάζονται και έμμεσα από την κλιματική αλλαγή. Η ένταση αλλά και η διάρκεια των ακραίων καιρικών φαινομένων, είναι πιθανό να θέσουν αδύνατη την λειτουργία του λιμένα για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα. Το παραπάνω, θα προκαλέσει προβλήματα διανομής των αγαθών και θα δημιουργήσει την ανάγκη για περισσότερο αποθηκευτικό χώρο, ο οποίος μπορεί να μην είναι διαθέσιμος.

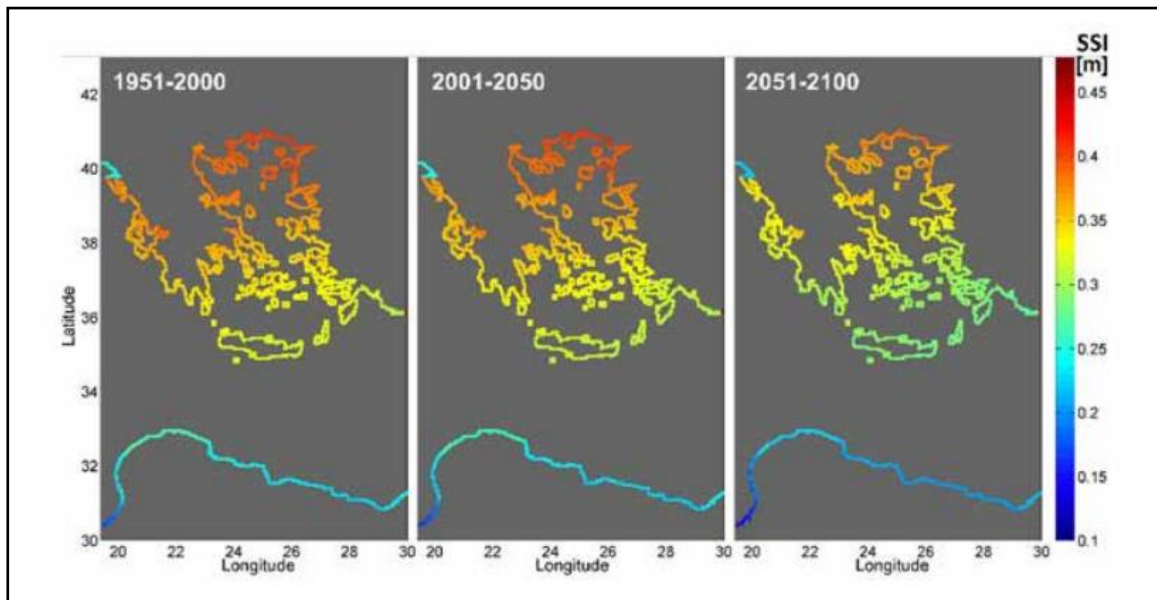
Για την θωράκιση των λιμενικών έργων έναντι της κλιματικής αλλαγής πρέπει να ληφθούν υπόψη οι παρακάτω βασικές παράμετροι. Αρχικά, στην προκειμένη μελέτη, πρέπει να συμπεριληφθεί η συνολική αύξηση της στάθμης της θάλασσας. Αυτή, αποτελείται από τη μόνιμη αύξηση της θάλασσας, αλλά και από την προσωρινή αύξηση ή μετεωρολογική παλίρροια. Ο συνδυασμός αυτών μπορεί να οδηγήσει σε συχνότερες υπερπηδήσεις των κυματισμών, από τους κυματοθραύστες εντός της λιμενολεκάνης και συνεπώς σε μεγαλύτερη μετάδοση ενέργειας.

Η μόνιμη αύξηση της θάλασσας είναι αποτέλεσμα της θερμικής διαστολής του νερού του ωκεανού και της τήξης των ορεινών παγωμένων εκτάσεων και των πολικών περιοχών. Το φαινόμενο εξαρτάται άμεσα από τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου και την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Στο γράφημα που εμφανίζεται στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η αυξητική τάση της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για το διάστημα 1900-2018. Τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί από παράκτιους παλιρροιογράφους και δορυφόρους. Τα στοιχεία που εμφανίζονται με (+) είναι παράγοντες που προκαλούν αύξηση της παγκόσμιας στάθμης της θάλασσας, ενώ τα (-) προκαλούν μείωση αυτής. Η τοποθέτηση τους στο γράφημα έχει γίνει σύμφωνα με την χρονική περίοδο επιρροής τους (NASA, 2022).



Εικόνα 2.3: Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 1900-2018 (NASA, 2022)

Μετεωρολογική παλίρροια (storm surge) χαρακτηρίζεται η άνοδος της στάθμης της θάλασσας η οποία προκαλείται από την ατμοσφαιρική πίεση και τους ανέμους που εμφανίζονται σε μια θαλάσσια περιοχή, κατά τη διάρκεια ανάπτυξης χαμηλών βαρομετρικών συστημάτων στην ατμόσφαιρα. Η μελέτη της είναι σημαντική, καθώς η εμφάνιση της μπορεί να αυξήσει την στάθμη ηρεμίας της θάλασσας από αρκετά εκατοστά έως και λίγα μέτρα σε διάστημα λίγων ωρών με αποτέλεσμα την εμφάνιση παράκτιων πλημμύρων. Για την περιγραφή του φαινομένου γίνεται χρήση του συντελεστή μετεωρολογικής παλίρροιας SSI (Storm Surge Index), ο οποίος ορίζεται ως ο μέσος όρος των τριών μέγιστων μετεωρολογικών παλιρροιών ανά χρόνο, με χρονικό διάστημα μεταξύ τους πέντε ημερών. Έπειτα από διερεύνηση του Ν. Κρεστενίτη σχετικά με την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην μεταβολή της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας των μετεωρολογικών παλιρροιών στην Μεσόγειο, έγινε ανάλυση της περιόδου των τελευταίων 150 ετών. Αποτέλεσμα της παραπάνω μελέτης αποτελεί η Εικόνα 2.4 στην οποία φαίνεται ο δείκτης μετεωρολογικής παλίρροιας να εμφανίζει σημαντική αύξηση το διάστημα 2001-2050, σε σχέση με την περίοδο 1951-2000, και έπειτα για το διάστημα 2051-2100 να εμφανίζει μείωση (Κρεστενίτης, 2021).



Εικόνα 2.4: Κατανομή του μέσου 50ετούς δείκτη SSI(m) (Κρεστενίτης, 2021).

Σύμφωνα με την έκθεση της IPCC, κατά την διάρκεια του 21^{ου} αιώνα, τα ακραία καιρικά γεγονότα που ιστορικά συνέβαιναν μία φορά ανά αιώνα, προβλέπεται να αυξηθεί η συχνότητα εμφάνισης τους στα περισσότερα μέρη του κόσμου (IPCC, 2021). Συνεπώς, η θωράκιση των λιμενικών έργων έναντι της κλιματικής αλλαγής αποτελεί επιτακτική ανάγκη. Επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής όπως, η αστοχία των κυματοθραυστών, η μη λειτουργία των κρηπιδότοιχων λόγω ανεπαρκούς ελεύθερου περιθωρίου, η συσσώρευση φερτών υλικών στην λιμενολεκάνη και στον διάυλο εισόδου και η συγκέντρωση υπέρογκων ποσοτήτων υδάτων στον χώρο του λιμένα, εκθέτουν τις λιμενικές εγκαταστάσεις και τον εξοπλισμό αυτών σε άμεσο κίνδυνο.

2.3.3 Πρόβλεψη επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής

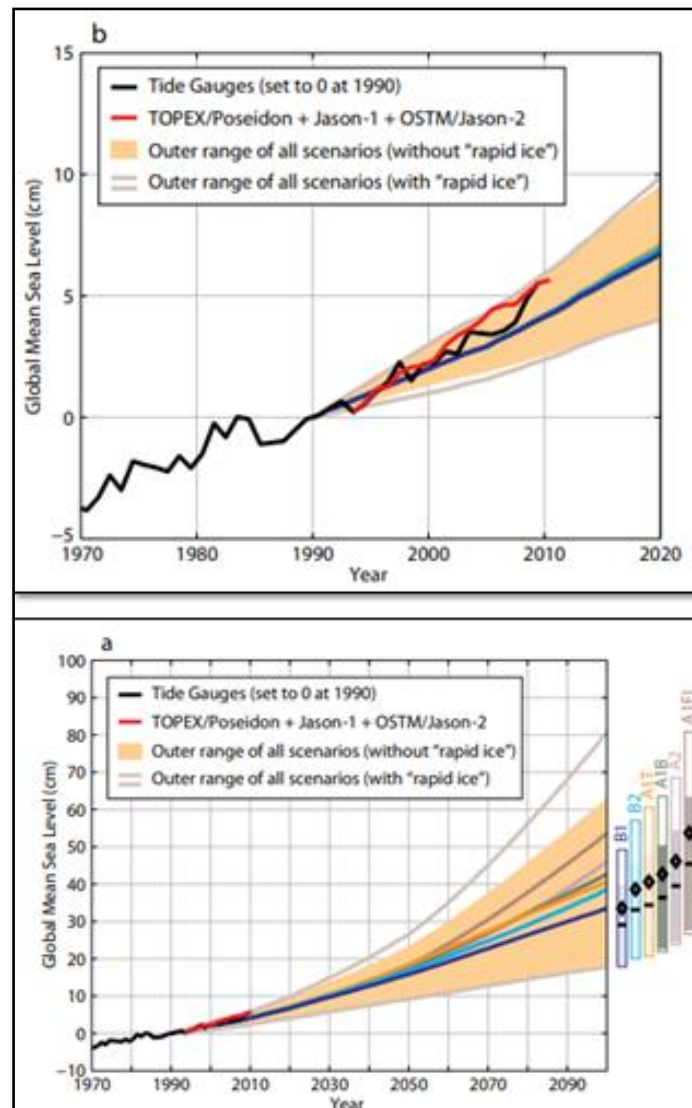
Η αύξηση της μεταβολή του κλίματος του πλανήτη δημιούργησε στους επιστήμονες προβληματισμούς σχετικά με τις μελλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να προκληθούν. Για τον λόγο αυτό, δημιουργήθηκε η ανάγκη παρακολούθησης του παγκόσμιου κλίματος και εκτίμησης των κλιματικών συνθηκών στις επόμενες εκατονταετίες. Χρήσιμα εργαλεία σε αυτή την προσπάθεια, αποτελούν τα κλιματικά μοντέλα. Τα κλιματικά μοντέλα προσομοιώνουν τις αλληλεπιδράσεις της ατμόσφαιρας με τους ωκεανούς, την επιφάνεια της γης και τις πολικές περιοχές χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Τα τελευταία χρόνια, η κύρια χρήση των κλιματικών μοντέλων έγκειται στην εκτίμηση της πορείας της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, εξαιτίας του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change / IPCC) είναι υπεύθυνη για την κατασκευή παγκόσμιων σεναρίων εξέλιξης των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα, στην τέταρτη Ειδική Έκθεση Αξιολόγησης (AR4) δημοσίευσε τα σενάρια SRES (Special Report on Emission Scenarios). Τα σενάρια αυτά χρησιμοποιούν μεταβλητές, όπως η οικονομική δραστηριότητα, η αύξηση του πληθυσμού και η χρήση της ενέργειας, παρόλα αυτά, χαρακτηρίζονται ως σενάρια αναφοράς καθώς δεν παίρνουν υπόψη καμία στρατηγική περιορισμού των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (IPCC, 2007). Τα σενάρια SRES έχουν χωριστεί σε τέσσερις βασικές κατηγορίες και περιγράφονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Σενάρια εκπομπών SRES

SRES	Περιγραφή		
A1	Το σενάριο βασίζεται στην συνεχή οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη, καθώς και την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού έως το 2050. Επίσης, υποθέτει μια ομοιογένεια των πολιτιστικών και οικονομικών διαφορών μεταξύ των κοινωνιών. Χωρίζεται σε τρεις περαιτέρω κατηγορίες που σχετίζονται με την τεχνολογική ανάπτυξη στον ενεργειακό κλάδο.	A1F1	Στηρίζεται στην χρήση ορυκτών καυσίμων.
		A1T1	Στηρίζεται στην χρήση εναλλακτικών πηγών ενέργειας.
		A1B	Στηρίζεται στην ισορροπημένη χρήση όλων των πηγών ενέργειας.
A2	Σε αυτό το σενάριο εμφανίζεται διαφοροποίηση στα πολιτιστικά και οικονομικά χαρακτηριστικά κάθε κοινωνίας. Θεωρείται βραδεία τεχνολογική ανάπτυξη σε αντίθεση με τον παγκόσμιο πληθυσμό που αυξάνεται ραγδαία.		
B1	Ταυτίζεται με το σενάριο A1 όσον αφορά την αύξηση του πληθυσμού και την οικονομική ανάπτυξη. Όμως, σε αυτό το σενάριο, γίνεται εκτίμηση για φιλική ανάπτυξη προς το περιβάλλον μέσω της χρήσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας.		
B2	Ταυτίζεται με το σενάριο B1 ως αναφορά την φιλική προς το περιβάλλον ανάπτυξη. Αντιθέτως, θεωρεί έναν όχι τόσο ραγδαίο ρυθμό αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού.		

Στην Εικόνα 2.5 παρουσιάζεται η πρόβλεψη της ανόδου της στάθμης της θάλασσας για τα σενάρια SRES (α) έως το 2100 και (β) έως το 2020, σε σχέση με το 1990. Οι εξωτερικές φωτεινές γραμμές δείχνουν το εύρος των τιμών χωρίς να λαμβάνουν υπόψη οποιαδήποτε συνιστώσα ταχείας παγοποίησης. Οι συνεχείς χρωματιστές γραμμές υποδεικνύουν την κεντρική τιμή της πρόβλεψης συμπεριλαμβανομένου της συμβολής της ταχείας παγοποίησης. Από τα διαγράμματα φαίνεται πως η μέση άνοδος της στάθμης της θάλασσας για τα σενάρια SRES κυμαίνεται από 19cm (κατώτατη τιμή, σύμφωνα με το σενάριο B1) έως 63 cm (υψηλότερη τιμή, σύμφωνα με το σενάριο A1F1) (Church, 2011).



Εικόνα 2.5: Παγκόσμια πρόβλεψη για την άνοδο της στάθμης της θάλασσας για τα σενάρια SRES (Church, 2011).

Η πρόβλεψη των μελλοντικών επιπέδων των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι μια δύσκολη και αβέβαιη διαδικασία, καθώς επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες. Ωστόσο, η IPCC αξιολογεί τα παραπάνω σενάρια ως χρήσιμα εργαλεία για την κατανόηση και την ανάλυση της κλιματικής αλλαγής.

Ύστερα, η IPCC στην πέμπτη Ειδική Έκθεση Αξιολόγησης (AR5), δημοσίευσε μια πιο εξελιγμένη γενιά σεναρίων εξέλιξης εκπομπών, τα σενάρια RCPs (Representative

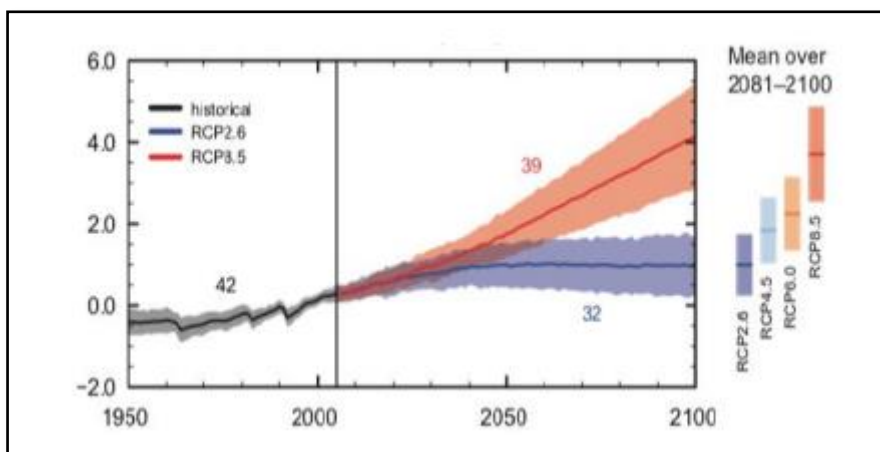
Concentration Pathways). Πιο συγκεκριμένα, τα σενάρια RCPs αποτελούνται από τα RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RCP8.5, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι αριθμοί καθορίζουν το προβλεπόμενο radiative forcing το 2100. Το Radiative forcing μετράται σε $Watt/m^2$ και είναι η παράμετρος που χρησιμοποιείται ώστε να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση ενός παράγοντα στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος Ατμόσφαιρα-Γή.

Τα συγκεκριμένα σενάρια χρησιμοποιούν παράγοντες όπως η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η αξιοποίηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, η ανάπτυξη της οικονομίας και η εξέλιξη της τεχνολογίας. Συνεπώς, σε αντίθεση με τα σενάρια SRES της τέταρτης έκθεσης (AR4), πλέον λαμβάνονται υπόψη και μέτρα μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζεται η πορεία του radiative forcing και των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2100 (IPCC, 2014).

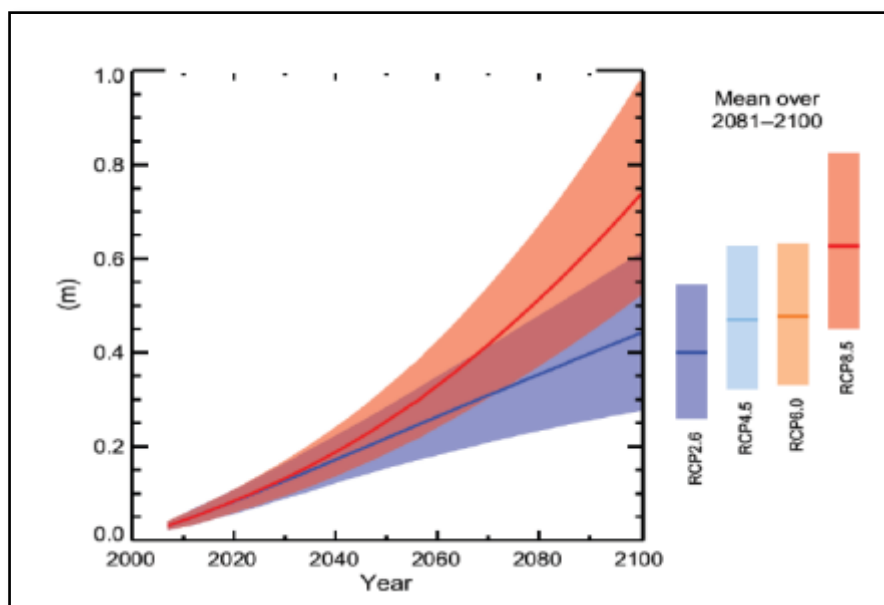
Πίνακας 2.3: Εκτιμήσεις των σεναρίων RCP σχετικά με το radiative forcing και τις συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων (IPCC, 2014).

Σενάριο RCP	Radiative Forcing ($Watt/m^2$)	Εκπομπές Αερίων
RCP2.6	Μέγιστο radiative forcing 3 $Watt/m^2$ το 2040 και σταδιακή μείωση έως το 2.6 $Watt/m^2$ το 2100.	Συνεχής μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2100.
RCP4.5	Radiative forcing 4.5 $Watt/m^2$ το 2100 και σταθεροποίηση αυτού στα μέσα του επόμενου αιώνα.	Αργή μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2100.
RCP6	Radiative forcing 6 $Watt/m^2$ το 2100 και σταθεροποίηση αυτού στα μέσα του επόμενου αιώνα.	Σταδιακή αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2100.
RCP8.5	Radiative forcing 8.5 $Watt/m^2$ το 2100 και σταθεροποίηση αυτού στα μέσα του επόμενου αιώνα.	Συνεχής αύξηση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου έως το 2100, που συνεπάγεται υψηλή ατμοσφαιρική ρύπανση.

Στην Εικόνα 2.6 και 2.7 παρουσιάζεται η μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας και η μέση άνοδος της στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα από το 2006 έως το 2100, σε σύγκριση με το διάστημα 1986-2005, αντίστοιχα. Οι χρονοσειρές με μπλε χρώμα αφορούν το σενάριο RCP2.6, ενώ αυτές με το κόκκινο το σενάριο RCP8.5.



Εικόνα 2.6: Μέση μεταβολή της παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας για το 2006-2100 συγκριτικά με το διάστημα 1986-2005 (IPCC, 2014).



Εικόνα 2.7: Μέση άνοδος της στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμια κλίμακα για το 2006-2100 συγκριτικά με το διάστημα 1986-2005 (IPCC, 2014).

Για την Μεσόγειο, η IPCC (AR5) προβλέπει άνοδο στην στάθμη της θάλασσας για τον 21^ο αιώνα κατά 0.30m στην δυσμενέστερη περίπτωση. Η τιμή αυτή αποκλίνει αρκετά από τις παλαιότερες προβλέψεις της IPCC (AR4), που υπολόγιζαν μια μεταβολή της στάθμης της θάλασσας ανάμεσα στις τιμές -0,07m έως 0,18m.

Τέλος, η IPCC στην έκτη Ειδική Έκθεση Αξιολόγησης (AR6) δημοσίευσε μια πιο εξελιγμένη γενιά σεναρίων, τα SSP (Shared Socioeconomic Pathway). Ειδικότερα, τα σενάρια SSP αποτελούνται από τα SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 και λαμβάνουν δεδομένα σχετικά με την κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, τους μετασχηματισμούς της ενέργειας, την χρήση της γης, τις μεταφορές, τα κτίρια και την βιομηχανία. Οι παγκόσμιες και τοπικές προβλέψεις της στάθμης της θάλασσας που περιλαμβάνονται στην AR6 αφορούν την περίοδο 2020-2150.

Ωκεανογραφικά Δεδομένα

Το κυματικό κλίμα ορίζεται μέσω χαρακτηριστικών του κύματος, όπως είναι το σημαντικό ύψος κύματος, η περίοδος κορυφής και η διεύθυνση διάδοσης. Απαραίτητα δεδομένα για την παρούσα διπλωματική, αποτελούν οι χρονοσειρές ωκεάνιων κυμάτων, οι οποίες θα συμπεριλαμβάνουν τον αντίκτυπο της κλιματικής αλλαγής. Τα δεδομένα αυτά είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα του Copernicus Climate Change Service (C3S).

Τα παραπάνω επιφανειακά κυματικά πεδία των ωκεανών υπολογίζονται με τη χρήση του κυματικού μοντέλου SAW, που λαμβάνει υπόψη τον επιφανειακό άνεμο και την παγοκάλυψη στους πόλους. Προκειμένου να εκτιμηθεί ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής γίνεται χρήση του μοντέλου SAW για τρία διαφορετικά σενάρια:

1. Το ιστορικό σενάριο (δηλαδή το κλίμα που επικρατεί σήμερα), για το διάστημα 1976-2005.
2. Το σενάριο εξέλιξης εκπομπών RCP4.5 για το διάστημα 2041-2100, το οποίο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω θεωρείται ως ένα αισιόδοξο σενάριο, καθώς οι εκπομπές ρύπων αρχίζουν να μειώνονται μετά το 2040.
3. Το σενάριο εξέλιξης εκπομπών RCP8.5 για το διάστημα 2041-2100, το οποίο αποτελεί ένα δυσμενή σενάριο, όπου οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συνεχίζουν να αυξάνονται καθ' όλη την διάρκεια του αιώνα.

3 Περιγραφή αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία προέκυψε η ανάγκη υπολογισμού των κυματικών χαρακτηριστικών, τόσο στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, όσο και εξωτερικά αυτής μπροστά από τα έργα προστασίας. Για τον εξής λόγο γίνεται χρήση του λογισμικού Telemac – Mascaret, ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που αναπτύχθηκε και συντηρείται από Πανεπιστήμια και εταιρείες της Γερμανίας και της Γαλλίας. Το κύριο στοιχείο που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο λογισμικό είναι η γεωμετρία του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων (mesh) πάνω στον οποίο πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί. Στο συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιείται κανάβος με στοιχεία ακανόνιστης γεωμετρίας (unstructured mesh). Στην πλατφόρμα Telemac – Mascaret ανήκουν, το φασματικό μοντέλο τρίτης γενιάς TOMAWAC και το ελλειπτικό κυματικό μοντέλο ήπιας κλίσης ARTEMIS, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα έρευνα.

Παρακάτω, θα γίνει μια σύντομη αναφορά σχετικά με το πεδίο εφαρμογής και τις φυσικές διεργασίες που προσομοιώνουν, τις βασικές εξισώσεις υπολογισμού, τις οριακές συνθήκες και τα αρχεία εισόδου και εξόδου που χρειάζονται ή προκύπτουν από την εκτέλεση τους.

3.1 Φασματικό μοντέλο TOMAWAC

Το αριθμητικό μοντέλο TOMAWAC (TELEMAC based Operational Model Addressing Wave Action Computation) αποτελεί ένα φασματικό κυματικό μοντέλο 3^η γενιάς, που προσομοιώνει τη χρονική και χωρική εξέλιξη του φάσματος πυκνότητας δράσης των ανεμογενών κυματισμών. Ανήκει στο λογισμικό Telemac – Mascaret και αναπτύχθηκε από το Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE).

Η εφαρμογή του μοντέλου TOMAWAC γίνεται κυρίως για τις εξής τρεις περιπτώσεις:

1. Εκτίμηση του κυματικού κλίματος,
2. Εκτίμηση των κυματικών συνθηκών με τη χρήση αντίστροφης ανάλυσης (hindcast),
3. Μελέτη ακραίων φαινομένων.

Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες

Το πεδίο εφαρμογής για το μοντέλο TOMAWAC είναι αρκετά ευρύ και καλύπτει περιοχές που βρίσκονται στην ωκεάνια κλίμακα (βαθιά και ενδιάμεσα νερά) έως και την παράκτια ζώνη. Το μεγάλο εύρος εφαρμογής του οφείλεται στην ανεξάρτηση της διακριτοποίησης του υπολογιστικού πλέγματος από το μήκος κύματος των κυματισμών. Η διακριτοποίηση εξαρτάται μόνο από τον χρήστη, ενώ γενικά είναι θεμιτό ο κανάβος των πεπερασμένων στοιχείων να επηρεάζεται από την τοπική βυθομετρία (πύκνωση των στοιχείων στα ρηγά νερά). Στον κανάβο υπολογισμού, του μοντέλου αυτού, υπάρχει η δυνατότητα ο μέγιστος λόγος της επιφάνειας των μεγαλύτερων προς των μικρότερων στοιχείων να ξεπερνά το 100. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται το εύρος εφαρμογής του χωρίς να τίθεται θέμα αστάθειας στους υπολογισμούς.

Το μοντέλο TOMAWAC κατά την εκτέλεση του λαμβάνει υπόψη τις ακόλουθες φυσικές διεργασίες:

Ως όρους πηγής / απώλειας:

- Αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα και γένεση κυματισμών λόγω του ανέμου
- Απόσβεση λόγω τριβής του πυθμένα
- Θραύση κυματισμών λόγω μεγάλης κλίσης
- Απόσβεση λόγω θραύσης των κυματισμών από την επίδραση του πυθμένα
- Απόσβεση λόγω θραύσης των κυματισμών από ισχυρά ρεύματα αντίθετης κατεύθυνσης

Μη γραμμικές διεργασίες μεταφοράς ενέργειας:

- Μη γραμμική αλληλεπίδραση τετράδων, μηχανισμό που επικρατεί στα βαθιά νερά
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση τριάδων, μηχανισμό που κυριαρχεί στα ρηχά νερά

Διεργασίες που σχετίζονται με τη διάδοση του κυματισμού:

- Διάδοση του κύματος λόγω της ταχύτητας της ομάδας κυματισμών ή της ταχύτητας του μέσου διάδοσης (π.χ. θαλάσσια ρεύματα)
- Διάθλαση εξαιτίας της επίδρασης του πυθμένα
- Διάθλαση λόγω της παρουσίας ρευμάτων
- Ρήχωση εξαιτίας της επίδρασης του πυθμένα
- Αλληλεπίδραση με ασταθή πεδία ρεύματος και μεταφορές συχνοτήτων (π.χ. σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από ισχυρά φαινόμενα παλίρροιας)
- Περίθλαση λόγω εμποδίων (π.χ. εξωτερικά προστατευτικά έργα λιμένα, βραχονησίδες)

Παρ' όλο που το μοντέλο TOMAWAC εμπεριέχει την περίθλαση στους υπολογισμούς του, στα φασματικά μοντέλα 3^{ης} γενιάς η διεργασία αυτή χαρακτηρίζεται από αρκετούς περιορισμούς και για το λόγο αυτό οι λιμένες εξαιρούνται από το πεδίο εφαρμογής του. Η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις που τα φαινόμενα της ανάκλασης και της περίθλασης δεν μπορούν να αγνοηθούν.

Βασικές Εξισώσεις TOMAWAC

Για την γενική περίπτωση διάδοσης του κυματισμού σε μη σταθερό μέσο, εξαιτίας της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας ή την επίδραση ρευμάτων, το φαινόμενο περιγράφεται από τη φασματική πυκνότητα της κυματικής δράσης $N(f, \theta)$. Το φάσμα πυκνότητας δράσης σχετίζεται με τη διακύμανση του κατευθυντικού φάσματος μέσω της σχέσης:

$$N = \frac{F}{\sigma} \quad (3.1)$$

Όπου σ : η σχετική γωνιακή συχνότητα, δηλαδή η γωνιακή ταχύτητα που προκύπτει αν μεταβληθεί το σύστημα συντεταγμένων κατά την διεύθυνση διάδοσης ενός ρεύματος.

Όταν το σύστημα συντεταγμένων είναι καθορισμένο γίνεται χρήση της απόλυτης γωνιακής συχνότητας ω , η οποία διαφέρει από την σχετική γωνιακή συχνότητα σ . Οι δύο συχνότητες

συνδέονται μέσω του φαινομένου Doppler, υπό την παρουσία ρεύματος ταχύτητας U και τη σχέση διασποράς των κυματισμών ως εξής:

$$\Omega(k, x, t) = \omega = \sigma + \kappa U \quad (3.2)$$

Όπου κ : το διάνυσμα κατεύθυνσης του κυματισμού που χαρακτηρίζεται από μέτρο κ και διεύθυνση θ

U : το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος

Ενώ η σχετική γωνιακή ταχύτητα σ δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \sqrt{[g \tanh(kd)]} \quad (3.3)$$

Όπου g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

d : το βάθος του κύματος

Το φάσμα πυκνότητας δράσης είναι συνάρτηση των εξής 5 μεταβλητών:

$$N(k, x, t) = N(K_x, K_y, x, y, t) \quad (3.4)$$

Όπου $x = (x, y)$ το διάνυσμα θέσης σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

$k = (K_x, K_y) = (\kappa \cdot \sin\theta, \kappa \cdot \cos\theta)$ το διάνυσμα του αριθμού κύματος για διεύθυνση διάδοσης θ

Παίρνοντας υπόψη τις φυσικές διεργασίες του μοντέλου και την περιοχή εφαρμογής του, προκύπτει η εξής σχέση εξέλιξης του φάσματος της κυματικής δράσης:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{k}_x N)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\dot{k}_y N)}{\partial k_y} = Q(K_x, K_y, x, y, t) \quad (3.5)$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει ότι για την γενική περίπτωση διάδοσης κυμάτων σε ασταθές και μη ομοιογενές μέσο, η δράση των κυμάτων διατηρείται εντός των όρων πηγής και απώλειας που ορίζονται με τον όρο Q .

Από την γραμμική θεωρία κυματισμών προκύπτουν οι ρυθμοί μεταφοράς ως εξής:

$$\dot{x} = C_g \frac{K_x}{K} + U_x \quad (3.6)$$

$$\dot{y} = C_g \frac{K_y}{K} + U_y \quad (3.7)$$

$$\dot{K}_x = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial x} - \kappa \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$Ky = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial y} - k \frac{\partial U}{\partial y} \quad (3.9)$$

Όπου C_g : σχετική ομαδική ταχύτητα των κυμάτων, που εκφράζεται με τη σχέση:

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial \kappa} = n \frac{\sigma}{\kappa} \quad (3.10)$$

Όπου n : η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας για κάθε χρονική στιγμή

Σε αυτό το σημείο η βασική εξίσωση μετασχηματίζεται σε καρτεσιανές συντεταγμένες. Μετασχηματίζοντας τις μεταβλητές από (x, y, K_x, K_y, t) σε (x, y, fr, θ, t) ισχύει ότι:

$$N(x, y, K_x, K_y, t) = \frac{CC_g}{2\pi\sigma} \tilde{N}(x, y, fr, \theta, t) = \tilde{B}\tilde{F}(x, y, fr, \theta, t) \quad (3.11)$$

Όπου $C = \frac{\sigma}{k}$: η σχετική ταχύτητα φάσης των κυματισμών

Και θέτοντας $\tilde{B} = \frac{C_g}{2\pi^2 k fr}$ στην εξίσωση (3.5), η τελική εξίσωση διάδοσης του κυματισμού σε καρτεσιανές συντεταγμένες είναι η εξής:

$$\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial y} + \dot{\theta} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial k_x} + fr \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial k_y} = \tilde{B}\tilde{Q}(x, y, \theta, fr, t) \quad (3.12)$$

Τελικά, οι ρυθμοί μεταφοράς από την γραμμική θεωρία κυματισμών δίνονται ως εξής:

$$\dot{x} = C_g \sin\theta + U_x \quad (3.13)$$

$$\dot{y} = C_g \cos\theta + U_y \quad (3.14)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} n \nabla d - \frac{1}{k} n \nabla U \quad (3.15)$$

$$\dot{fr} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + U \nabla d \right) - C_g k t \nabla U \right] \quad (3.16)$$

Όπου \dot{x}, \dot{y} : οι χωρικοί ρυθμοί μεταφοράς που αντιπροσωπεύουν τη διάδοση των κυμάτων στο χώρο και τη ρήχωση, $\dot{\theta}$: ο ρυθμός της γωνίας μετάδοσης που μοντελοποιεί την επαγόμενη από διάθλαση αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος και \dot{fr} : ο ρυθμός μεταφοράς της συχνότητας, ο οποίος περιγράφει τις σχετικές μεταβολές της συχνότητας

που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας (χωρικές και χρονικές) και των ρευμάτων.

Οριακές συνθήκες του μοντέλου

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο TOMAWAC χαρακτηρίζονται από έναν κωδικό που τοποθετείται στην πρώτη στήλη του αρχείου οριακών συνθηκών και αφορά τον τύπο του ορίου. Οι διαθέσιμες για το μοντέλο οριακές συνθήκες είναι δύο τύπων:

- Τα υγρά όρια (liquid boundaries) από τα οποία γίνεται η είσοδος των κυματισμών στο υπολογιστικό πεδίο, ενώ η κυματική ενέργεια δεν μπορεί να εξέλθει και χαρακτηρίζονται με κωδικό αριθμό 5.
- Τα στερεά όρια (solid boundaries) στα οποία θεωρείται πλήρης απορρόφηση της κυματικής ενέργειας από την ακτή και χαρακτηρίζονται με κωδικό αριθμό 2.

Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου

Για την εκτέλεση της προσομοίωσης στο μοντέλο TOMAWAC είναι απαραίτητη η κατασκευή αρχείων εκ των οποίων κάποια είναι υποχρεωτικά, ενώ άλλα προαιρετικά. Τα κυριότερα αρχεία εισόδου είναι:

- Το αρχείο παραμέτρων της προσομοίωσης (cas file) (υποχρεωτικό), στο οποίο εμπεριέχονται οι παράμετροι και οι μέθοδοι υπολογισμού, με τη χρήση λέξεων κλειδιών και εισέρχονται στον κώδικα του προγράμματος.
- Το γεωμετρικό αρχείο (geometry file) (υποχρεωτικό), στο οποίο εμπεριέχονται ο κάναβος πεπερασμένων στοιχείων και η βυθομετρία της περιοχής μελέτης.
- Το αρχείο οριακών συνθηκών (boundary conditions file) (υποχρεωτικό), το οποίο περιλαμβάνει τα στερεά και ανοιχτά όρια της περιοχής μελέτης.
- Το αρχείο FORTRAN (προαιρετικό), στο οποίο εμπεριέχονται οι υπορουτίνες του χρήστη που συμμετέχουν στη προσομοίωση, σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77.

Το αρχείο εξόδου βρίσκεται σε διδιάστατη μορφή και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις παρακάτω παραμέτρους, που εμφανίζονται με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται και στο αρχείο παραμέτρων, υπολογισμένες για κάθε σημείο του κανάβου.

- MO: η διακύμανση της επιφάνειας της θάλασσας (m)
- HM0: το χαρακτηριστικό ύψος κύματος
- TPD: η περίοδος αιχμής του φάσματος των κυματισμών (s)
- DMOY: η μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών (°)
- ZF: η μέση ανύψωση του πυθμένα (m)
- WD: το βάθος του νερού (m)

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο TOMAWAC ο αναγνώστης παραπέμπεται στο εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου (TOMAWAC User Manual).

3.2 Μοντέλο ήπιας κλίσης ARTEMIS

Στην πλατφόρμα του λογισμικού Telemac – Mascaret ανήκει και το αριθμητικό μοντέλο ARTEMIS (Agitation and Refraction with TElemac on a Mild Slope). Στόχος του μοντέλου είναι ο υπολογισμός της κυματικής διαταραχής και της διάδοσης των κυματισμών με τη χρήση της εξίσωσης μέσης κλίσης ελλειπτικού τύπου, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες

Το πεδίο εφαρμογής του ARTEMIS περιορίζεται σε διαστάσεις λίγων χιλιομέτρων καθώς, το μοντέλο βασίζεται στη μέθοδο χωρικής και χρονικής ανάλυσης των κυματισμών της διακριτοποίησης στη φάση.

Η εφαρμογή του μοντέλου ARTEMIS γίνεται συνήθως για τις εξής περιπτώσεις:

- Μελέτη της κυματικής διαταραχής εντός λιμένα ή κόλπου
- Εκτίμηση της επίδρασης των κατασκευών ως προς τη διάδοση των κυματισμών (π.χ. πως διαδίδονται οι κυματισμοί πίσω από έναν κυματοθραύστη)
- Μελέτη της απόσβεσης του κυματισμού πίσω από εμπόδιο
- Διερεύνηση του φαινομένου του συντονισμού στους λιμένες

Κατά την εκτέλεση του, το μοντέλο ARTEMIS, λαμβάνει υπόψη του τα παρακάτω φυσικά φαινόμενα:

- Ανάκλαση των κυματισμών εξαιτίας κάποιου εμποδίου (π.χ. κυματοθραύστης)
- Περίθλαση των κυματισμών πίσω από εμπόδιο (π.χ. κυματοθραύστης)
- Διάθλαση και θραύση των κυματισμών που οφείλονται σε βαθυμετρικές μεταβολές
- Απόσβεση των κυματισμών λόγω της τριβής του πυθμένα

Βασικές Εξισώσεις ARTEMIS

Για τον υπολογισμό της διάδοσης των κυματισμών, το μοντέλο κάνει χρήση της εξίσωσης ήπιας κλίσης ελλειπτικού τύπου (Berkhoff, 1972). Κατά τη χρήση της μεθόδου υπάρχουν παραδοχές όπως: η θεώρηση του ρευστού ως νευτώνειο και ασυμπίεστο, η θεώρηση αστρόβιλης ροής, και επομένως ο ορισμός του δυναμικού των ταχυτήτων ροής ως $\nabla\Phi = \vec{u}$, και η πολύ μικρή κλίση του πυθμένα.

Η βασική εξίσωση που επιλύεται στο μοντέλο είναι:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + CC_g k^2 \varphi = 0 \quad (3.17)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι αποτέλεσμα γραμμικοποίησης, περιγράφει τη διάδοση και το μετασηματισμό γραμμικών κυμάτων χωρίς να εμπεριέχει μηχανισμούς απόσβεσης της ενέργειας.

Η λύση της (3.17) είναι της μορφής:

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{ch[k(z + h)]}{ch(kh)} \cdot \varphi(x, y) \cdot e^{-i\omega t} \quad (3.18)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, ο 1^{ος} όρος εξαρτάται από την εξίσωση διασποράς, ο 2^{ος} ονομάζεται μειωμένο δυναμικό ταχυτήτων και ο 3^{ος} καθορίζει την περιοδικότητα της λύσης.

Για να ικανοποιείται η παραδοχή της μικρής κλίσης πυθμένα πρέπει να ισχύει:

$$e_3 = \frac{\Delta h/h}{h/L} \ll 1 \quad (3.19)$$

Όπου Δh: η μεταβολή του βάθους κατά μήκος οριζόντιας απόστασης h.

Η εξίσωση (3.17) τροποποιήθηκε από τους Booij (1981) και De Girolamo et al. (1988), ώστε να λαμβάνονται υπόψη το φαινόμενο της θραύσης και της τριβής του πυθμένα, ως εξής:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + CC_g(k^2 + i\kappa\mu)\varphi = 0 \quad (3.20)$$

Όπου μ: η σταθερά απόσβεσης η οποία περιγράφει την απώλεια της ενέργειας εξαιτίας της θραύσης ή της τριβής του πυθμένα.

Στην περίπτωση της θραύσης χρησιμοποιείται η μέθοδος των Battjes and Jansen (1978) για σύνθετους κυματισμούς, η οποία στοχεύει στον υπολογισμό του ποσοστού των θραυόμενων κυματισμών Q_b:

$$\frac{1 - Q_b}{Q_b} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right) = -\left(\frac{H_{rms}}{h}\right) \quad (3.21)$$

Με σταθερά απόσβεσης μ_{br}:

$$\mu_{br} = \frac{2aQ_b}{C_g} \left(\frac{H_m}{H_{rms}}\right)^2 \quad (3.22)$$

Αντίστοιχα, στην περίπτωση της τριβής του πυθμένα για τον υπολογισμό της σταθεράς απόσβεσης ακολουθείται η προσέγγιση των Putnam & Johnson (1949) όπου:

$$\mu_{bf} = \frac{2}{3\pi} \frac{f_w}{gC_g \sinh^3(kh)} \quad (3.23)$$

Όπου f_w: ο συντελεστής τριβής του πυθμένα.

Μια ακόμη σημαντική ιδιότητα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η ικανότητα του να περιγράφει σύνθετους πολυκατεθυντικούς κυματισμούς παρά τη γραμμική του φύση.

Χωρίζεται το φάσμα των κυματισμών σε ισαπέχουσα ζεύγη συχνοτήτων με το κριτήριο της ισόποσης ενέργειας και επιλύεται η εξίσωση ήπιας κλίσης, θεωρώντας τη κάθε κυματική συνιστώσα ως μεμονωμένο μονοχρωματικό κυματισμό. Στο τέλος γίνεται υπέρθεση των επιμέρους αποτελεσμάτων με αποτέλεσμα, σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος να προκύπτει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος ως υπέρθεση των επιμέρους υψών κύματος των μονοχρωματικών κυματισμών.

Οριακές συνθήκες του μοντέλου

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, έτσι και στο μοντέλο ARTEMIS οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από έναν κωδικό που εμφανίζεται στην πρώτη στήλη του αρχείου των οριακών συνθηκών. Οι οριακές συνθήκες που εξυπηρετούν το μοντέλο, είναι οι παρακάτω:

- Υγρό όριο εισόδου προσπίπτοντος κυματισμού, από το οποίο είναι δυνατή η είσοδος των κυμάτων που έρχονται από τα ανοιχτά προς το υπολογιστικό πεδίο ,καθώς και η έξοδος αυτών, με διεύθυνση αντίθετη αυτής της διάδοσης των κυμάτων.
- Υγρό όριο ελεύθερης εξόδου, από το οποίο είναι δυνατή η έξοδος κυμάτων που σχηματίζουν γωνία θ_p με την κάθετη στο όριο.

Τα δύο παραπάνω όρια χαρακτηρίζονται με το κωδικό αριθμό 1

- Στερεό όριο, στο οποίο ορίζεται ένας συντελεστής ανάκλασης R με τιμές στο όριο 0 έως 1, όπου 0 είναι η πλήρης απορρόφηση του κυματισμού και 1 η ολική ανάκλαση αυτού. Χαρακτηρίζεται με κωδικό αριθμό 2

Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου

Όντας στην ίδια πλατφόρμα λογισμικών με το TOMAWAC τα αρχεία εισόδου είναι ακριβώς ίδια με πριν, επομένως δεν δύναται σκόπιμο να αναφερθούν ξανά.

Το δισδιάστατο αρχείο εξόδου του μοντέλου περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις παρακάτω παραμέτρους, που εμφανίζονται με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται και στο αρχείο παραμέτρων, υπολογισμένες για κάθε σημείο του κανάβου.

- HS: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για σύνθετους και μονοχρωματικούς κυματισμούς
- T01: Μέση περίοδος, υπολογισμένη από το φάσμα των κυμάτων (sec)
- PHAS: Φάση των κυματισμών (rad)
- C: Ταχύτητα φάσης των κυμάτων (m/s)
- Cg: Ταχύτητα ομάδας των κυμάτων (m/s)
- ZF: Μέση ανύψωση του πυθμένα (m)
- WD: Βάθος του νερού (m)

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το μοντέλο ARTEMIS ο αναγνώστης παραπέμπεται στο εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου (ARTEMIS User Manual, 2014).

4 Περιοχή Μελέτης – Προετοιμασία προσομοιώσεων

4.1 Περιοχή Μελέτης

4.1.1 Γεωγραφική θέση και περιγραφή του Λιμένα του Πειραιά

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο Σαρωνικό Κόλπο, ανήκει στην περιφερειακή ενότητα Πειραιώς και σύμφωνα με την τελευταία απογραφή, του 2021, ο πληθυσμός της ανέρχεται στους 163.572 κατοίκους. Συγκεκριμένα, ο Λιμένας του Πειραιά εκτείνεται από το Πέραμα έως το Μικρολίμανο (πρώην Λιμένας Μουνηχίας), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1.



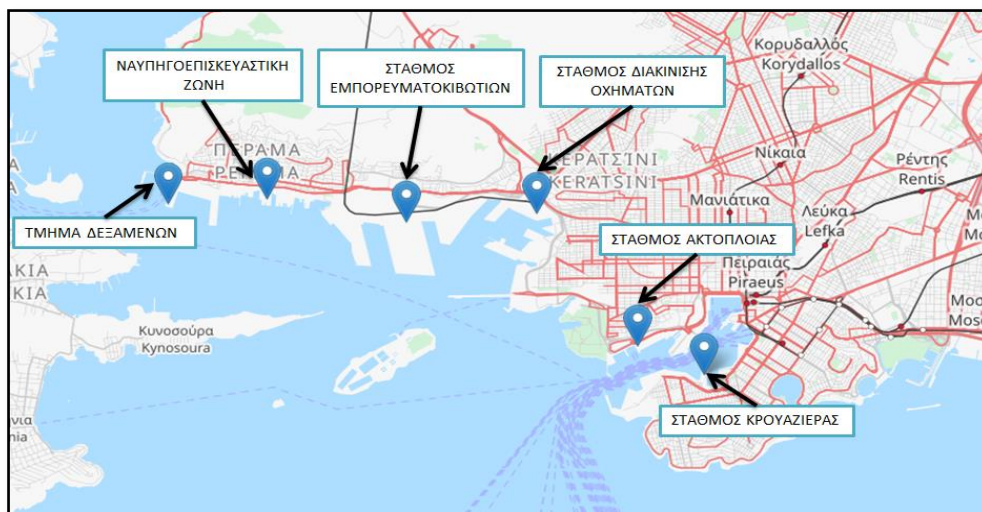
Εικόνα 4.1: Γεωγραφική Θέση Λιμένα Πειραιά (Google Earth)

Το Λιμάνι του Πειραιά είναι το μεγαλύτερο λιμάνι σε έκταση της Ελλάδας και ένα από τα μεγαλύτερα της Μεσογείου. Η έκταση του είναι περίπου 5000 στρέμματα, εκ των οποίων το 10% καλύπτεται από τις κτιριακές του εγκαταστάσεις. Σύμφωνα με τα δεδομένα της Eurostat για το 2015, το Λιμάνι του Πειραιά αποτελεί το έκτο μεγαλύτερο στην Ευρώπη σχετικά με τον αριθμό διέλευσης επιβατών (Eurostat, 2020) και το εικοστό-έκτο μεγαλύτερο στον κόσμο και έκτο στην Ευρώπη ως προς τον ετήσιο όγκο εμπορευματοκιβωτίων (Lloyd's List). Επίσης, αποτελεί την κύρια θαλάσσια πύλη για την Ελλάδα, είναι υπεύθυνο για την ακτοπλοϊκή σύνδεση της Ηπειρωτικής Ελλάδας με τα νησιά, ενώ παράλληλα ευνοεί την εξυπηρέτηση των χωρών στα Βαλκάνια και γύρω από την Μαύρη Θάλασσα. Η γεωγραφική του θέση, το καθιστά σταυροδρόμι των τριών ηπείρων (Ευρώπη, Αφρική, Ασία), με αποτέλεσμα να είναι από τα σημαντικότερα λιμάνια ως προς την διαχείριση εμπορευματοκιβωτίων σε ολόκληρο τον κόσμο, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4.2.



Εικόνα 4.2: Στρατηγική θέση του Λιμένα του Πειραιά (PCDC)

Το Λιμάνι του Πειραιά εγκαινιάστηκε το 1924 και έως σήμερα έχει εξελιχθεί σε ένα αρκετά πολύπλοκο λιμάνι, συγκριτικά με τα υπόλοιπα της Μεσογείου, λόγω των πολυάριθμων δραστηριοτήτων που ασχολείται. Εξυπηρετεί επιβατικές κινήσεις (είτε ακτοπλοΐας, είτε κρουαζιέρες), μεταφορές κάθε είδους φορτίου (ανεξάρτητα προελεύσεως και προορισμού), ενώ ταυτόχρονα στεγάζει στους χώρους του ναυπηγοεπισκευαστική ζώνη και την λειτουργία πορθμείων (ΟΛΠ). Τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικότερα στην Εικόνα 4.3.



Εικόνα 4.3: Ζώνες Δραστηριοτήτων του Λιμένα (ΟΛΠ)

4.1.2 Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή

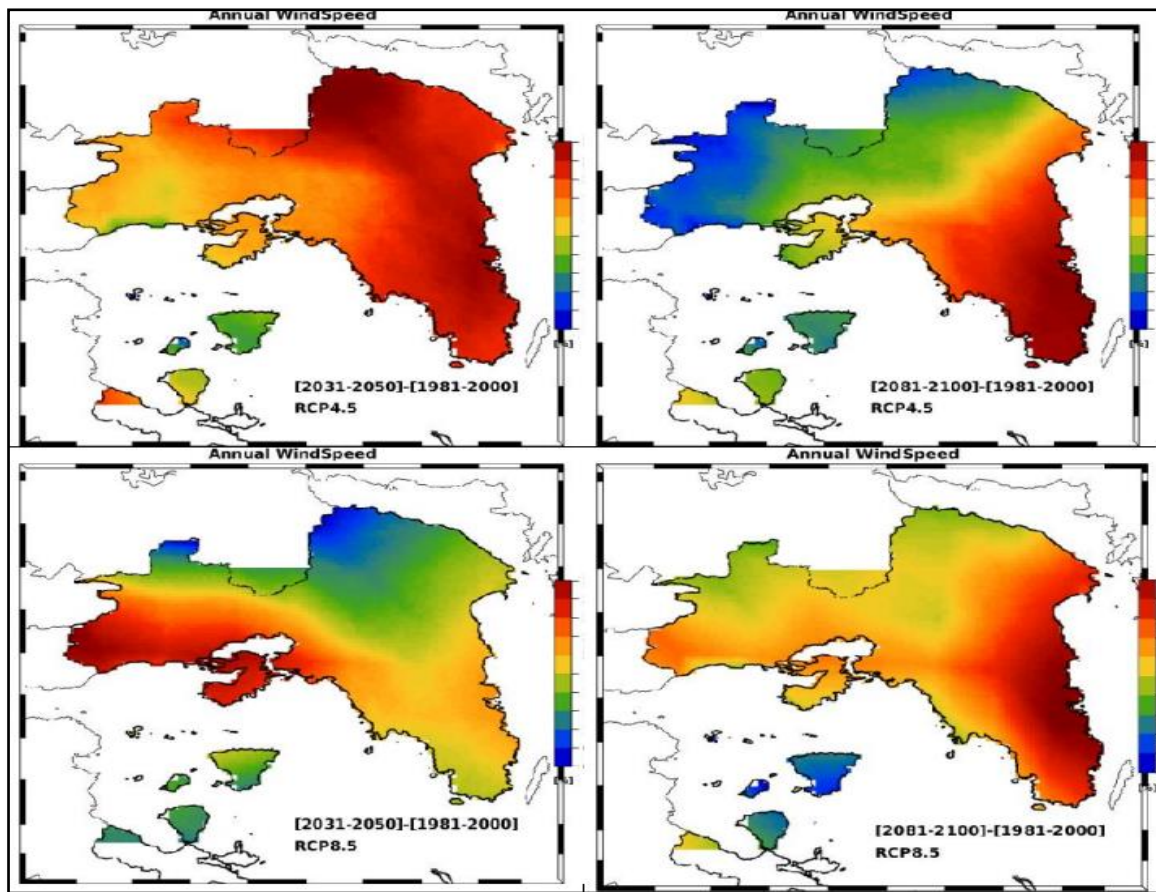
Το Λιμάνι του Πειραιά συμμετέχει ενεργά στον στόχο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για κλιματική ουδετερότητα έως το 2050. Οι επενδύσεις, τα κατασκευαστικά έργα και οι εργασίες εκσυγχρονισμού και αναβάθμισης του λιμανιού, σέβονται τις αρχές της πράσινης ανάπτυξης, με αποτέλεσμα η στρατηγική ανάπτυξης του Λιμένα του Πειραιά να καθιστά ως πρωταρχικό μέλημα την προστασία του περιβάλλοντος και την αειφόρο ανάπτυξη. Επίσης, προάγει την χρήση τεχνολογιών που αποσκοπούν στην εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών, όπως: η παράκτια παροχή ρεύματος σε πλοία κατά την παραμονή τους στο λιμάνι μέσω εγκαταστάσεων ηλεκτροδότησης, και η ψηφιοποίηση συστημάτων με σκοπό την εξοικονόμηση ενέργειας και πόρων. Μέσω της συμμετοχής του σε έργα προστασίας του περιβάλλοντος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το 2020, το Λιμάνι του Πειραιά κέρδισε τον τίτλο «Ευρωπαϊκό Πράσινο Λιμάνι» της χρονιάς.

Στο πλαίσιο της προστασίας του περιβάλλοντος και της αντιμετώπισης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, εφαρμόστηκε το έργο “Green and Connected Ports”. Το έργο αφορά την εγκατάσταση αισθητήρων οι οποίοι συλλέγουν μετεωρολογικά και περιβαλλοντικά δεδομένα όπως: θερμοκρασία, υγρασία, ατμοσφαιρική πίεση, ποιότητα αέρα, θόρυβος και εκπομπές πλοίων. Τα παραπάνω δεδομένα αναλύονται και προβάλλονται σε πραγματικό χρόνο μέσω μιας ψηφιακής πλατφόρμας. Αυτή η δράση αποσκοπεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, την παραγωγικότητα και την απόδοση του Λιμένα του Πειραιά (Europe Direct Piraeus, 2021).

Για την Περιφέρεια Αττικής, στην οποία συγκαταλέγεται και ο Πειραιάς, έχει αναπτυχθεί το Περιφερειακό Σχέδιο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ). Στόχος του συγκεκριμένου περιφερειακού σχεδίου αποτελεί η εκτίμηση των προβλεπόμενων κλιματικών αλλαγών για την περιοχή μελέτης. Τα σενάρια που λαμβάνει υπόψη είναι το RCP 4.5 και RCP 8.5, όπως έχουν αναλυθεί και στο Κεφάλαιο 2.3, σύμφωνα με την 5^η Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC. Επίσης, γίνεται χρήση μετεωρολογικών δεδομένων 30 ετών (1985-2014), που προέρχονται από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για τις χρονικές περιόδους:

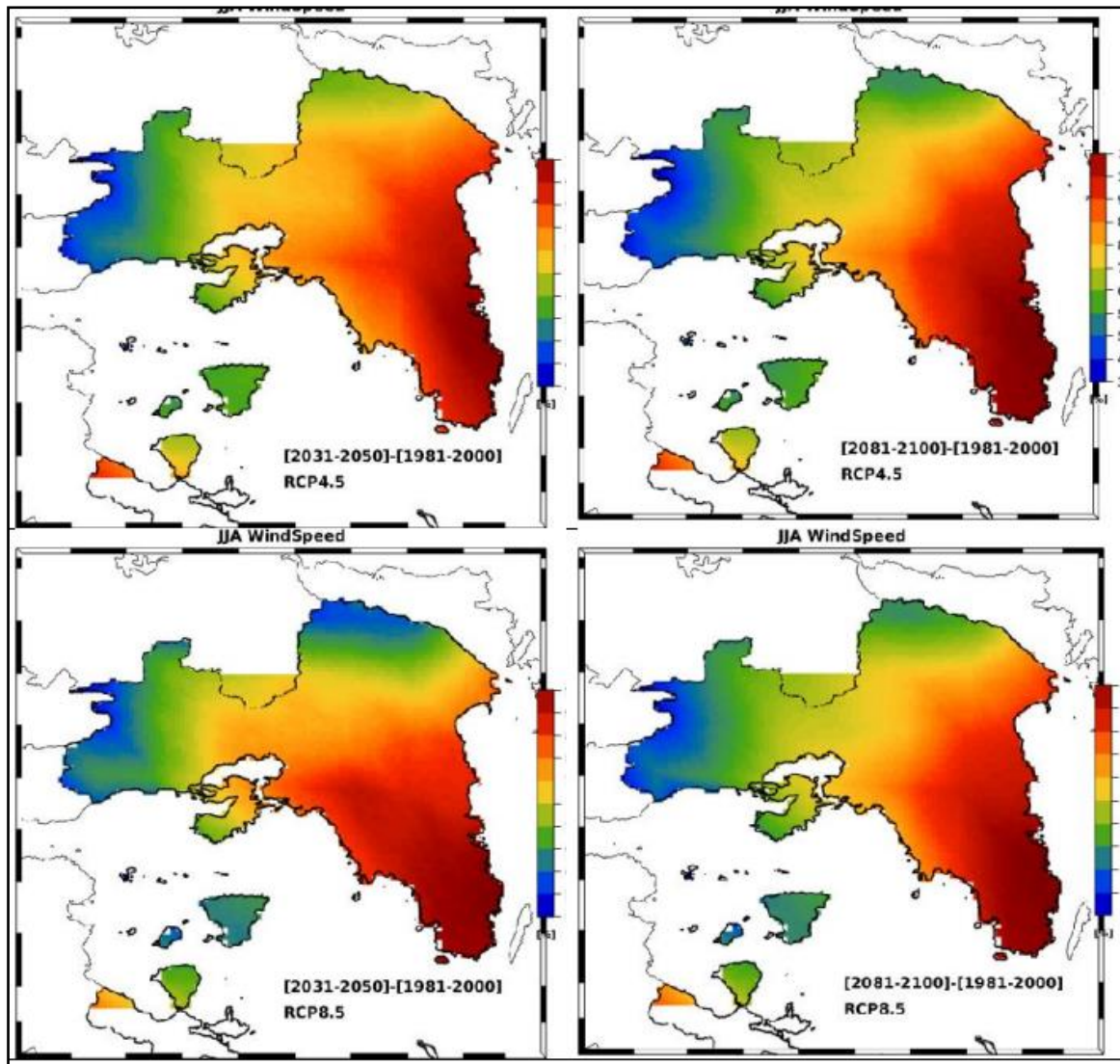
- περίοδος αναφοράς (1981-2000),
- χρονική περίοδος (2031-2050),
- χρονική περίοδος (2081-2100).

Στην Εικόνα 4.4 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της ετήσιας ταχύτητας ανέμου στην Αττική, για τα υπό μελέτη σενάρια. Παρατηρείται αύξηση του ανέμου κατά 2% για το κοντινό μέλλον, ενώ για το μακρινό εκτιμάται αύξηση 3.8% για το σενάριο RCP 4.5 και 5.5% για το RCP 8.5. Στα σχήματα που παρουσιάζονται αριστερά εμφανίζονται οι μεταβολές μεταξύ του κοντινού μέλλοντος και της περιόδου αναφοράς, ενώ στα δεξιά, οι μεταβολές μεταξύ του μακρινού μέλλοντος και της περιόδου αναφοράς.



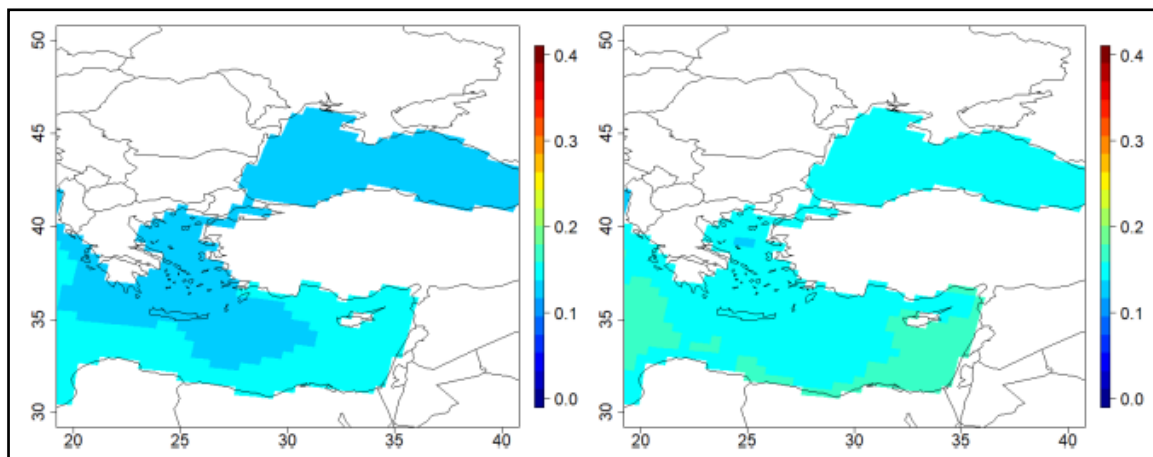
Εικόνα 4.4: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου στην Αττική για τα σενάρια RCP 4.5 (πάνω) και RCP 8.5 (κάτω) (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).

Η κατάσταση δυσχεραίνει κατά τους θερινούς μήνες, καθώς η αύξηση των ανέμων τόσο για το κοντινό όσο και το μακρινό μέλλον είναι σημαντικά πιο αυξημένη και για τα δυο σενάρια. Συγκεκριμένα, η αύξηση για το κοντινό μέλλον εκτιμάται στο 9%, ενώ για το μακρινό μέλλον θα υπερβεί το 15% στην περίπτωση του δυσμενούς σεναρίου RCP 8.5. Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.5.



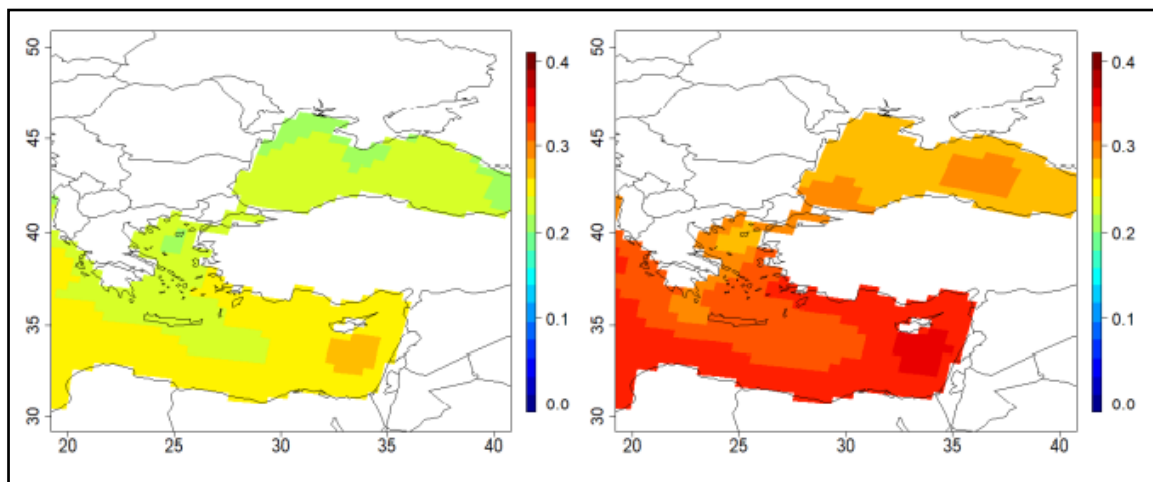
Εικόνα 4.5: Ποσοστιαία μεταβολή της μέσης θερινής ταχύτητας ανέμου στην Αττική για τα σενάρια RCP 4.5 (πάνω) και RCP 8.5 (κάτω) (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).

Τέλος, χρήσιμη πληροφορία αποτελεί η εκτιμώμενη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας για τις περιόδους μελέτης. Οι μεταβολές μεταξύ της περιόδου 2031-2060 και της περιόδου αναφοράς 1971-2000, στη θαλάσσια ζώνη της Αττικής, είναι της τάξης των 12 cm για το σενάριο RCP 4.5 και 15cm για το σενάριο RCP 8.5, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Κατανομή της εκτιμώμενης μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 2031-2060 (κοντινό μέλλον) συγκριτικά με την περίοδο 1971-2000 (περίοδο αναφοράς) για το σενάριο RCP 4.5 (αριστερά) και το RCP 8.5 (δεξιά), βασισμένη στο κλιματικό μοντέλο MPI – ESM – MR (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).

Αντίστοιχα, οι μεταβολές μεταξύ της περιόδου 2071-2100 και της περιόδου αναφοράς 1971-2000, για τη θαλάσσια ζώνη της Αττικής, είναι της τάξης των 22 cm για το σενάριο RCP 4.5 και 30cm για το σενάριο RCP 8.5. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Κατανομή της εκτιμώμενης μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για την περίοδο 2071-2100 (μακρινό μέλλον) συγκριτικά με την περίοδο 1971-2000 (περίοδο αναφοράς) για το σενάριο RCP 4.5 (αριστερά) και το RCP 8.5 (δεξιά), βασισμένη στο κλιματικό μοντέλο MPI – ESM – MR (ΠεΣΠΚΑ Αττικής,2022).

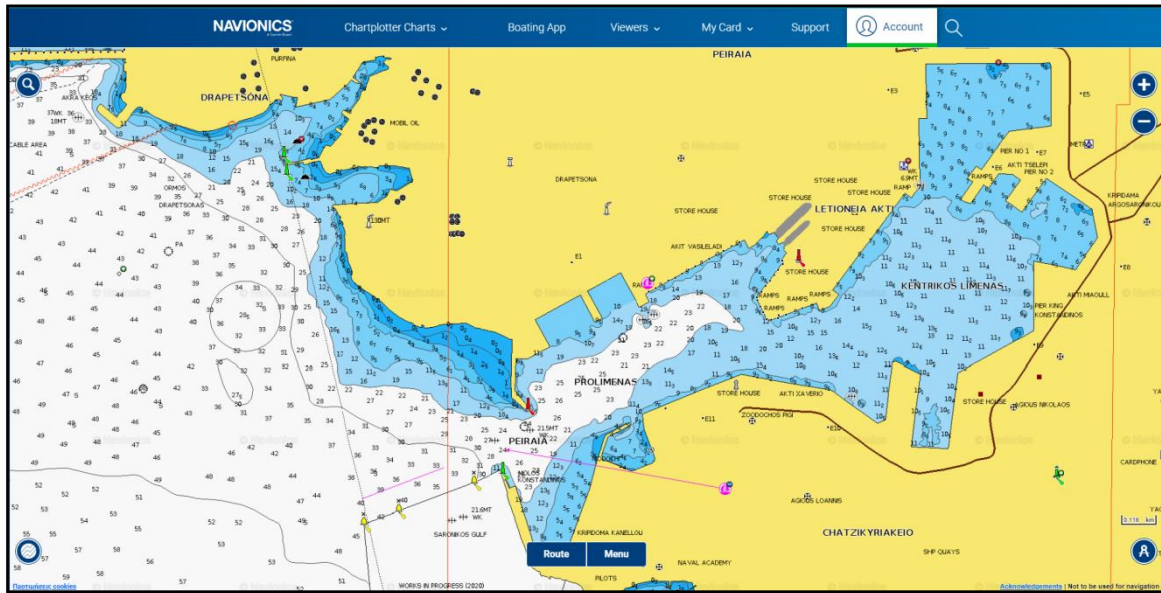
4.2 Προετοιμασία αρχικών δεδομένων

4.2.1 Κατασκευή βυθομετρίας

Βυθομετρία και Ακτογραμμή περιοχής μελέτης

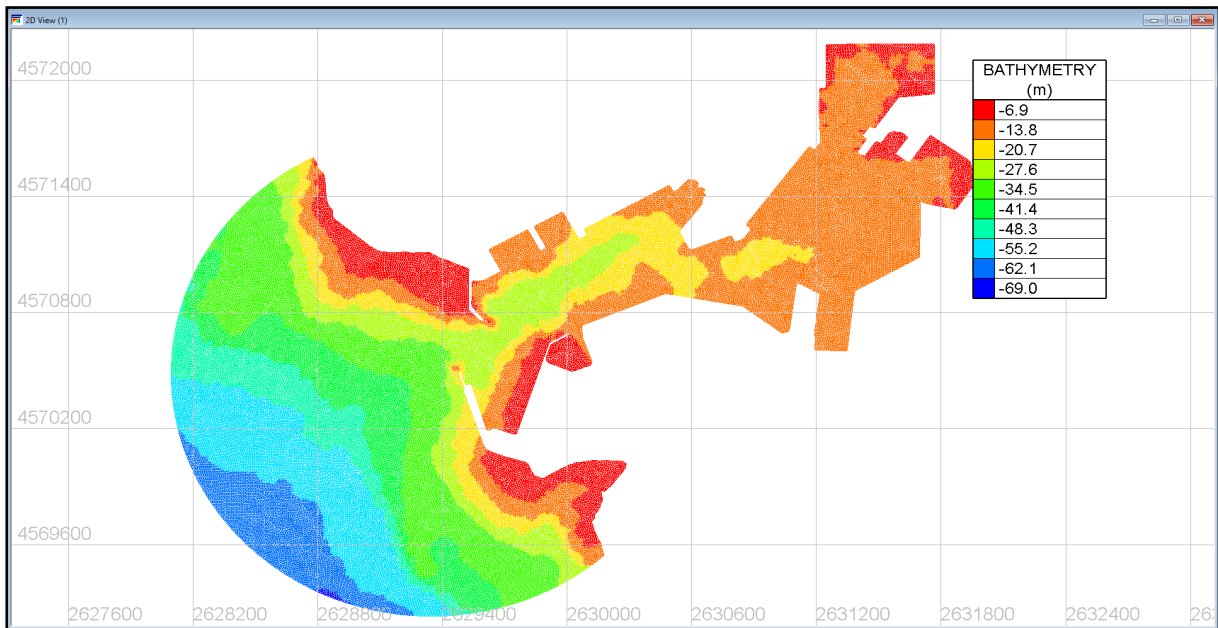
Για την μελέτη της διάδοσης των κυματισμών, από τα βαθιά στην είσοδο της λιμενολεκάνης, αλλά και εντός της λιμενολεκάνης με τα μοντέλα TOMAWAC και ARTEMIS αντίστοιχα, είναι απαραίτητη η κατασκευή της ακτογραμμής και της βυθομετρίας της περιοχής μελέτης.

Τα απαραίτητα δεδομένα για την περιοχής μελέτης, αποκτήθηκαν από ναυτικούς χάρτες υψηλής ανάλυσης της εφαρμογής NAVIONICS, σε κλίμακα 1:5800.



Εικόνα 4.8: Ναυτικός χάρτης κλίμακας 1:5800 (NAVIONICS)

Οι παραπάνω χάρτες εισέρχονται στο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών QGIS, ώστε να μετατραπούν σε αξιοποιήσιμη μορφή. Να τονιστεί πως γίνεται χρήση του Εθνικού συστήματος συντεταγμένων "Greek Grid" σε προβολή ΕΓΣΑ '87. Για την βυθομετρία, η ψηφιοποίηση των χαρτών έγινε με την χρήση σημείων (points) στα οποία ορίστηκε το βάθος. Αντίστοιχα, ο σχεδιασμός της ακτογραμμής έγινε με την χρήση γραμμών (lines), με κοινή φορά από την αρχή έως το τέλος. Τα παραπάνω αρχεία αποθηκεύονται σε μορφή εγγράφου κειμένου .csv. Η βυθομετρία της περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης

Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων

Η κατασκευή του κάναβου των πεπερασμένων στοιχείων έγινε με την χρήση του λογισμικού Telemac – Mascaret. Στο συγκεκριμένο λογισμικό, γίνεται χρήση κάναβου που αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία (flexible mesh). Ο τριγωνικός κάναβος, προσφέρει την δυνατότητα χρήσης μεγάλου μεγέθους στοιχεία στα βαθιά νερά, ενώ επιτρέπει την πύκνωση αυτών, κοντά στην ακτογραμμή. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου κάναβου έγκειται στο μεγάλο χρόνο προσομοίωσης.

4.2.2 Λήψη και επεξεργασία ωκεανογραφικών δεδομένων

Σε αυτή την παράγραφο, γίνεται αναφορά στις βάσεις δεδομένων, στα προϊόντα και στις ωκεανογραφικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν και στον τρόπο λήψης και επεξεργασίας των δεδομένων.

Λήψη ωκεανογραφικών δεδομένων

Για την εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών στα ανοικτά της περιοχής μελέτης, αντλήθηκαν ωκεανογραφικά δεδομένα από την βάση Copernicus Marine Service (CMS). Συγκεκριμένα, έγινε χρήση του πακέτου δεδομένων:

- MEDSEA_MULTIYEAR_WAV_006_012, με χωρική ανάλυση $0,042^{\circ} \times 0,042^{\circ}$ και χρονικό βήμα διακριτοποίησης μία ώρα.

Τα δεδομένα που παρέχει το παραπάνω πακέτο είναι αποτέλεσμα του συστήματος πρόβλεψης κυμάτων της Μεσογείου (Med – WAV). Γεωγραφικά, αφορούν την Μεσόγειο Θάλασσα (από $30.1875^{\circ} \text{ N} - 45.9792^{\circ} \text{ S}$ και από $18.125^{\circ} \text{ W} - 36.2917^{\circ} \text{ E}$), ενώ χρονικά καλύπτουν το διάστημα από τον Ιανουάριο του 1993 έως και ένα μήνα πριν από σήμερα.

Για τη λήψη των ωκεανογραφικών δεδομένων από την βάση Copernicus Marine Service ακολουθείται η εξής διαδικασία:

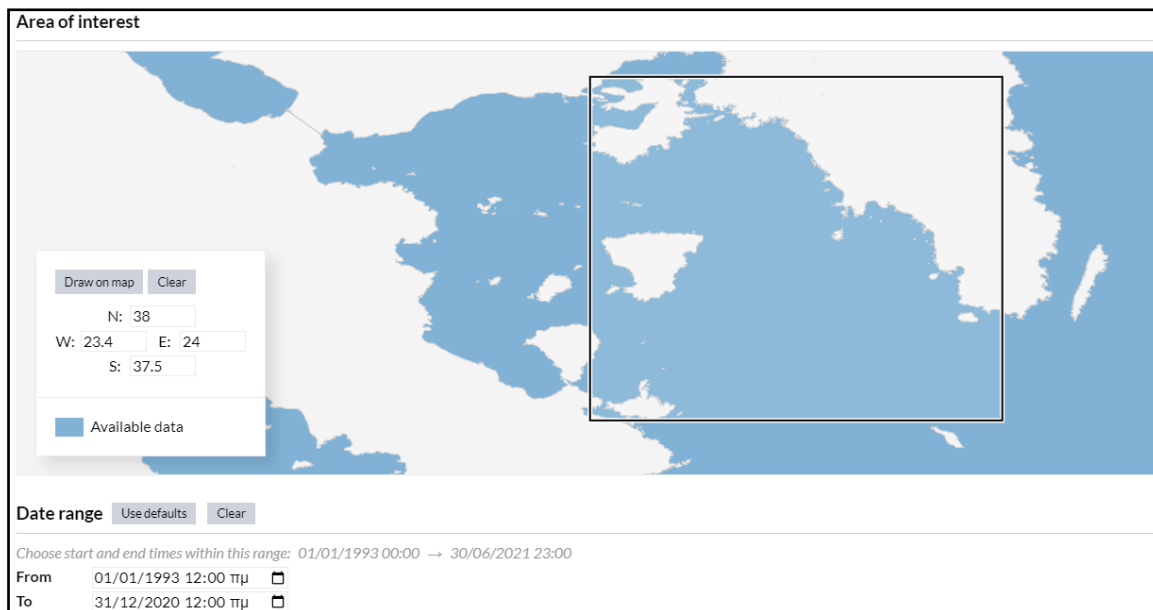
1. Προσδιορίζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες γύρω από την περιοχή μελέτης (φ,λ),
2. Καθορίζεται η χρονική διάρκεια των δεδομένων,
3. Επιλέγονται οι απαραίτητες μεταβλητές,
4. Γίνεται λήψη των αρχείων σε μορφή netcdf.

Για το Λιμάνι του Πειραιά επιλέχθηκε η γεωγραφική περιοχή εντός του πλαισίου:

$$(\phi, \lambda) = (23.4, 24) \div (37.5, 38)$$

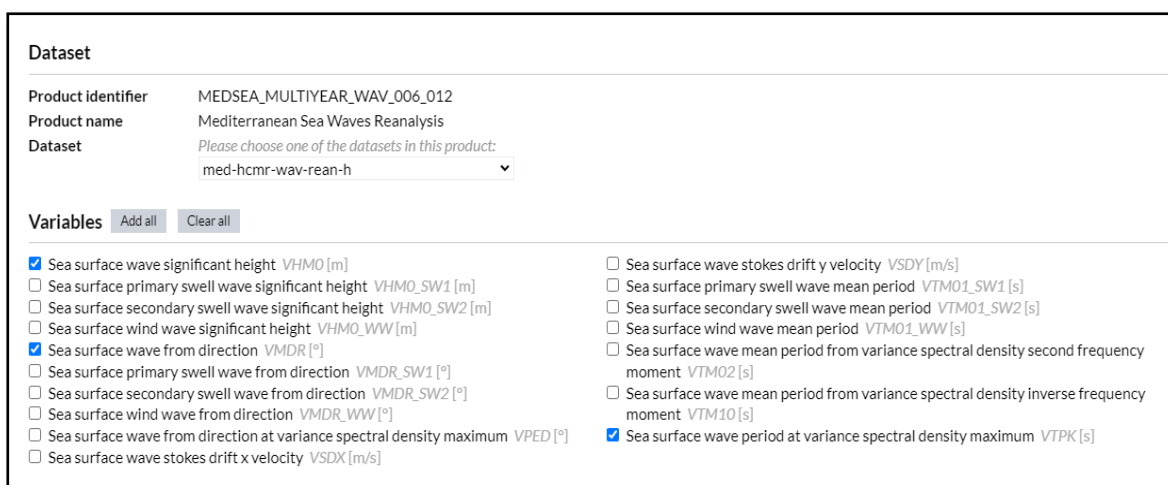
Ενώ το χρονικό διάστημα που έγινε η λήψη των δεδομένων είναι από τις 01/01/1993 12:00 πμ έως τις 31/12/2020 12:00 πμ.

Οι παραπάνω γεωγραφικοί και χρονικοί περιορισμοί παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10: Γεωμετρικοί και χρονικοί περιορισμοί για την περιοχή μελέτης στην πλατφόρμα Copernicus Marine Service (CMS).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται χρήση του dataset “med-hcmr-wav-rean-h” και συγκεκριμένα των μεταβλητών: σημαντικό ύψος κύματος, μέση κατεύθυνση κύματος και περίοδο κορυφής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11: Επιλογή μεταβλητών στην βάση Copernicus Marine Service (CMS)

Για την εκτίμηση της επιρροής της κλιματικής αλλαγής έγινε χρήση της βάσης δεδομένων Copernicus Climate Change Service (C3S). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα πακέτα δεδομένων:

1. Ocean surface wave time series for the European coast from 1976 to 2100 derived from climate projections.

Το παραπάνω πακέτο δεδομένων παρουσιάζει χρονοσειρές του κλίματος των παράκτιων κυμάτων, με βάση τις παραμέτρους των επιφανειακών κυμάτων, σε Ευρωπαϊκό επίπεδο για το χρονικό διάστημα από το 1977 έως το 2100. Το κυματικό κλίμα ορίζεται μέσω των ολοκληρωμένων φασματικών παραμέτρων του κύματος, όπως το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος κορυφής. Τα επιφανειακά κυματικά πεδία των ωκεανών υπολογίζονται με τη χρήση του κυματικού μοντέλου SAW, που λαμβάνει υπόψη τον επιφανειακό άνεμο και το ποσοστό παγοκάλυψης στους πόλους. Προκειμένου να εκτιμηθεί η επιρροή της κλιματικής αλλαγής στο επιφανειακό κυματικό πεδίο του ωκεανού, το μοντέλο SAW εκτελείται για τέσσερα διαφορετικά σενάρια:

- Το ιστορικό σενάριο (δηλαδή το κλίμα που επικρατεί σήμερα), για την περίοδο 1976-2005.
- Το σενάριο RCP4.5, για την περίοδο 2041 – 2100.
- Το σενάριο RCP8.5, για την περίοδο 2041 – 2100.

2. Water level change time series for the European coast from 1977 - 2100 derived from climate projections.

Αυτό το πακέτο δεδομένων παρουσιάζει χρονοσειρές της στάθμης της θάλασσας, που προκύπτουν από τις παλίρροιες, τα κύματα και την άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Τα δεδομένα καλύπτουν την περιοχή της Ευρώπης, ενώ χρονικά το διάστημα από το 1977 έως το 2100. Η κατασκευή του βασίζεται στη χρήση του παγκόσμιου μοντέλου παλίρροιας και κύματος (Global Tide and Surge Model, GTSM) Deltares. Προκειμένου τα εκτιμηθεί ο αντίκτυπος της κλιματικής αλλαγής, το μοντέλο GTSM εκτελείται για τρία διαφορετικά σενάρια:

- Το ιστορικό σενάριο (δηλαδή το κλίμα που επικρατεί σήμερα), για την περίοδο 1977-2005.
- Το σενάριο RCP4.5, για την περίοδο 2071 – 2100.
- Το σενάριο RCP8.5, για την περίοδο 2041 – 2070.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης (ECMWF, 2020) του πακέτου δεδομένων, η επιλογή των παραπάνω σεναρίων για τις συγκεκριμένες χρονικές περιόδους έγινε για τους εξής λόγους:

- Εξαιτίας της μεγάλης κλιματικής μεταβλητότητας της στάθμης της θάλασσας, χρειάζονται αρκετές δεκαετίες, ώστε να διαχωριστεί η ανθρωπογενής κλιματική μεταβολή από την φυσική. Ως εκ τούτου, οι μελλοντικές κλιματικές προσομοιώσεις θα ξεκινούν από το 2040.
- Επί του παρόντος, οι παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα παρατηρούνται κοντά στην πορεία του RCP8.5. Λόγω αυτού, όσον αφορά το βραχυπρόθεσμο μέλλον, δηλαδή την περίοδο 2040-2070, γίνεται χρήση του σεναρίου RCP8.5.
- Σύμφωνα με την Συμφωνία του Παρισιού (Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, 2016), οι χώρες σε όλο τον κόσμο έχουν δεσμευτεί να περιορίσουν την παγκόσμια μεταβολή της θερμοκρασίας στον 1.5 °C. Για την επίτευξη του παραπάνω απαιτούνται αυστηρές μειώσεις της παγκόσμια εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα. Στην παρούσα κατάσταση, το σενάριο RCP2.6 θεωρείται ανέφικτο, επομένως για το

μακροπρόθεσμο μέλλον, δηλαδή την περίοδο 2070-2100, γίνεται χρήση του σεναρίου RCP4.5.

Για τη λήψη των ωκεανογραφικών δεδομένων από την βάση Copernicus Climate Change Service (C3S) ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Επιλέγονται οι απαραίτητες μεταβλητές,
2. Καθορίζεται το σενάριο από το οποίο θα αντληθούν δεδομένα,
3. Επιλέγονται τα έτη για τα οποία θα αντληθούν δεδομένα,
4. Γίνεται λήψη των αρχείων σε μορφή netcdf.

Για το πρώτο πακέτο δεδομένων γίνεται χρήση των μεταβλητών: σημαντικό ύψος κύματος, περίοδος κορυφής και μέση κατεύθυνση κύματος. Επιλέγονται τα σενάρια RCP4.5 και RCP8.5 για τις χρονολογίες 2041 – 2100. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η διαδικασία λήψης δεδομένων από την βάση C3S, για το σενάριο RCP4.5 στην Εικόνα 4.12.

Variable					
<input checked="" type="checkbox"/> Mean wave direction					<input type="checkbox"/> Mean wave period
<input checked="" type="checkbox"/> Peak wave period					<input checked="" type="checkbox"/> Significant wave height
<input type="checkbox"/> Wave spectral directional width					

Experiment			
<input type="radio"/> ERAS reanalysis	<input type="radio"/> Historical	<input checked="" type="radio"/> RCP4.5	<input type="radio"/> RCP8.5

Year					
<input type="checkbox"/> 1976	<input type="checkbox"/> 1977	<input type="checkbox"/> 1978	<input type="checkbox"/> 1979	<input type="checkbox"/> 1980	<input type="checkbox"/> 1981
<input type="checkbox"/> 1982	<input type="checkbox"/> 1983	<input type="checkbox"/> 1984	<input type="checkbox"/> 1985	<input type="checkbox"/> 1986	<input type="checkbox"/> 1987
<input type="checkbox"/> 1988	<input type="checkbox"/> 1989	<input type="checkbox"/> 1990	<input type="checkbox"/> 1991	<input type="checkbox"/> 1992	<input type="checkbox"/> 1993
<input type="checkbox"/> 1994	<input type="checkbox"/> 1995	<input type="checkbox"/> 1996	<input type="checkbox"/> 1997	<input type="checkbox"/> 1998	<input type="checkbox"/> 1999
<input type="checkbox"/> 2000	<input type="checkbox"/> 2001	<input type="checkbox"/> 2002	<input type="checkbox"/> 2003	<input type="checkbox"/> 2004	<input type="checkbox"/> 2005
<input type="checkbox"/> 2006	<input type="checkbox"/> 2007	<input type="checkbox"/> 2008	<input type="checkbox"/> 2009	<input type="checkbox"/> 2010	<input type="checkbox"/> 2011
<input type="checkbox"/> 2012	<input type="checkbox"/> 2013	<input type="checkbox"/> 2014	<input type="checkbox"/> 2015	<input type="checkbox"/> 2016	<input type="checkbox"/> 2017
<input checked="" type="checkbox"/> 2041	<input checked="" type="checkbox"/> 2042	<input checked="" type="checkbox"/> 2043	<input checked="" type="checkbox"/> 2044	<input checked="" type="checkbox"/> 2045	<input checked="" type="checkbox"/> 2046
<input checked="" type="checkbox"/> 2047	<input checked="" type="checkbox"/> 2048	<input checked="" type="checkbox"/> 2049	<input checked="" type="checkbox"/> 2050	<input checked="" type="checkbox"/> 2051	<input checked="" type="checkbox"/> 2052
<input checked="" type="checkbox"/> 2053	<input checked="" type="checkbox"/> 2054	<input checked="" type="checkbox"/> 2055	<input checked="" type="checkbox"/> 2056	<input checked="" type="checkbox"/> 2057	<input checked="" type="checkbox"/> 2058
<input checked="" type="checkbox"/> 2059	<input checked="" type="checkbox"/> 2060	<input checked="" type="checkbox"/> 2061	<input checked="" type="checkbox"/> 2062	<input checked="" type="checkbox"/> 2063	<input checked="" type="checkbox"/> 2064
<input checked="" type="checkbox"/> 2065	<input checked="" type="checkbox"/> 2066	<input checked="" type="checkbox"/> 2067	<input checked="" type="checkbox"/> 2068	<input checked="" type="checkbox"/> 2069	<input checked="" type="checkbox"/> 2070
<input checked="" type="checkbox"/> 2071	<input checked="" type="checkbox"/> 2072	<input checked="" type="checkbox"/> 2073	<input checked="" type="checkbox"/> 2074	<input checked="" type="checkbox"/> 2075	<input checked="" type="checkbox"/> 2076
<input checked="" type="checkbox"/> 2077	<input checked="" type="checkbox"/> 2078	<input checked="" type="checkbox"/> 2079	<input checked="" type="checkbox"/> 2080	<input checked="" type="checkbox"/> 2081	<input checked="" type="checkbox"/> 2082
<input checked="" type="checkbox"/> 2083	<input checked="" type="checkbox"/> 2084	<input checked="" type="checkbox"/> 2085	<input checked="" type="checkbox"/> 2086	<input checked="" type="checkbox"/> 2087	<input checked="" type="checkbox"/> 2088
<input checked="" type="checkbox"/> 2089	<input checked="" type="checkbox"/> 2090	<input checked="" type="checkbox"/> 2091	<input checked="" type="checkbox"/> 2092	<input checked="" type="checkbox"/> 2093	<input checked="" type="checkbox"/> 2094
<input checked="" type="checkbox"/> 2095	<input checked="" type="checkbox"/> 2096	<input checked="" type="checkbox"/> 2097	<input checked="" type="checkbox"/> 2098	<input checked="" type="checkbox"/> 2099	<input checked="" type="checkbox"/> 2100

Εικόνα 4.12: Διαδικασία λήψης δεδομένων από τη βάση Copernicus Climate Change Service (C3S).

Στο δεύτερο πακέτο δεδομένων γίνεται χρήση της μεταβλήτης της μέσης στάθμης της θάλασσας. Επιλέγονται τα σενάρια RCP4.5 για τις χρονολογίες 2071- 2100 και RCP8.5 για τις χρονολογίες 2041 – 2070. Ενδεικτικά, παρουσιάζεται η διαδικασία λήψης δεδομένων, για το σενάριο RCP4.5 στην Εικόνα 4.13.

The screenshot shows a web interface for selecting data from the C3S database. It is divided into three main sections: Variable, Experiment, and Year.

- Variable:** Includes checkboxes for 'Mean sea level' (checked), 'Storm surge residual', 'Tidal elevation', and 'Total water level'. There are 'Select all' and 'Clear all' buttons.
- Experiment:** Includes radio buttons for 'Historical', 'ERA5 reanalysis', 'RCP4.5' (selected), and 'RCP8.5'. There is a 'Clear all' button.
- Year:** A grid of years from 1977 to 2100. Years from 2072 to 2099 are checked. There are 'Select all' and 'Clear all' buttons at the bottom right.

Εικόνα 4.13: Διαδικασία λήψης δεδομένων από τη βάση C3S.

Επεξεργασία ωκεανογραφικών δεδομένων

Η λήψη των ωκεανογραφικών δεδομένων από τις βάσεις CMS και C3S γίνεται σε αρχεία netcdf μορφής. Για να επεξεργαστούν τα κυματικά χαρακτηριστικά, ώστε να δημιουργηθούν τα απαραίτητα αρχεία εισόδου για τα αριθμητικά μοντέλα, πρέπει να γίνεται λήψη μόνο μίας μεταβλητής σε κάθε αρχείο netcdf.

Η επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων και η μετατροπή τους σε επεξεργάσιμη μορφή γίνεται μέσω του λογισμικού Panoply.

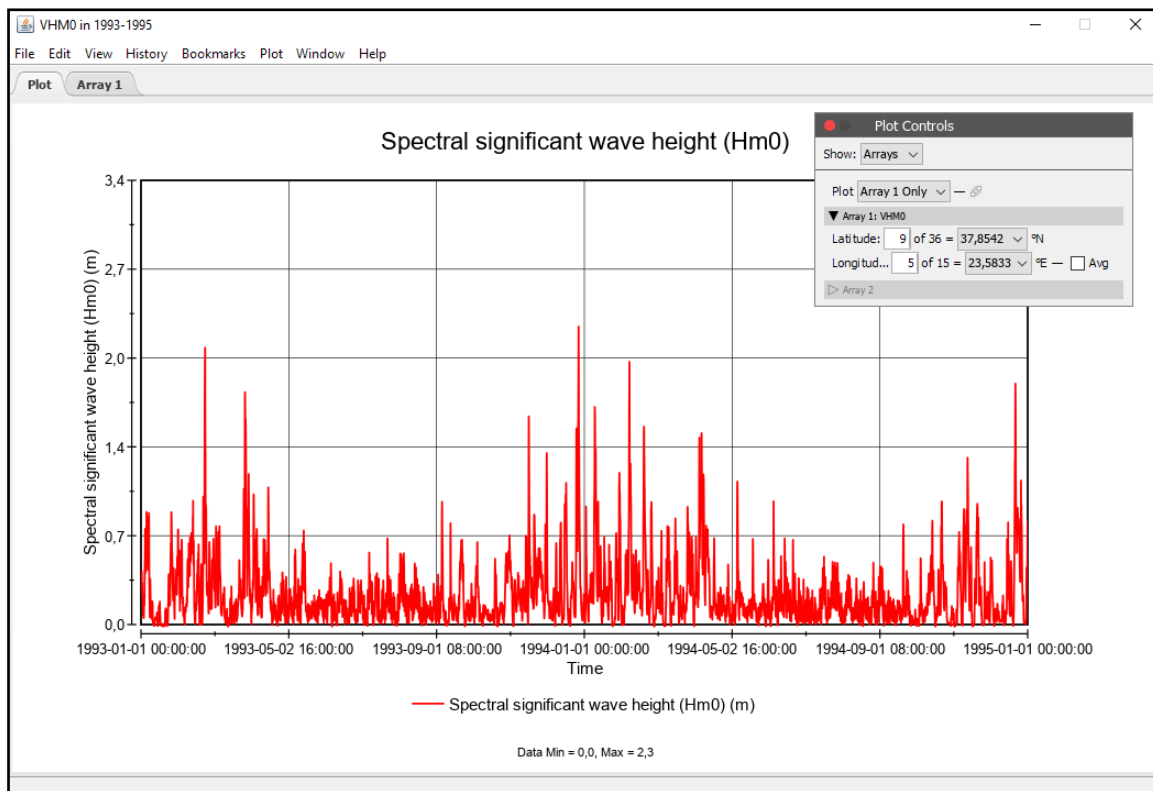
Για την επεξεργασία των ωκεανογραφικών μεταβλητών με το λογισμικό, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Εισαγωγή του netcdf αρχείου στο λογισμικό Panoply.
2. Δημιουργία γραμμικού γραφήματος, όπου στον κατακόρυφο άξονα είναι η ωκεανογραφική μεταβλητή και στον οριζόντιο ο χρόνος.
3. Προσδιορισμός του γεωγραφικού μήκους και πλάτους ή σταθμού.
4. Εξαγωγή των δεδομένων σε επεξεργάσιμη μορφή.

Στην περίπτωση της επεξεργασίας των δεδομένων από την βάση CMS, για τον προσδιορισμό της τοποθεσίας εξαγωγής των δεδομένων, γίνεται χρήση του γεωγραφικού μήκους και πλάτους.

Για τον Πειραιά έχει επιλεγεί το σημείο (Latitude, Longitude)= (37.8542, 23.5833).

Στην Εικόνα 4.14 παρουσιάζεται ενδεικτικά το διάγραμμα σημαντικού ύψους κύματος για τα έτη 1993-1995 που αντλήθηκε από την CMS.

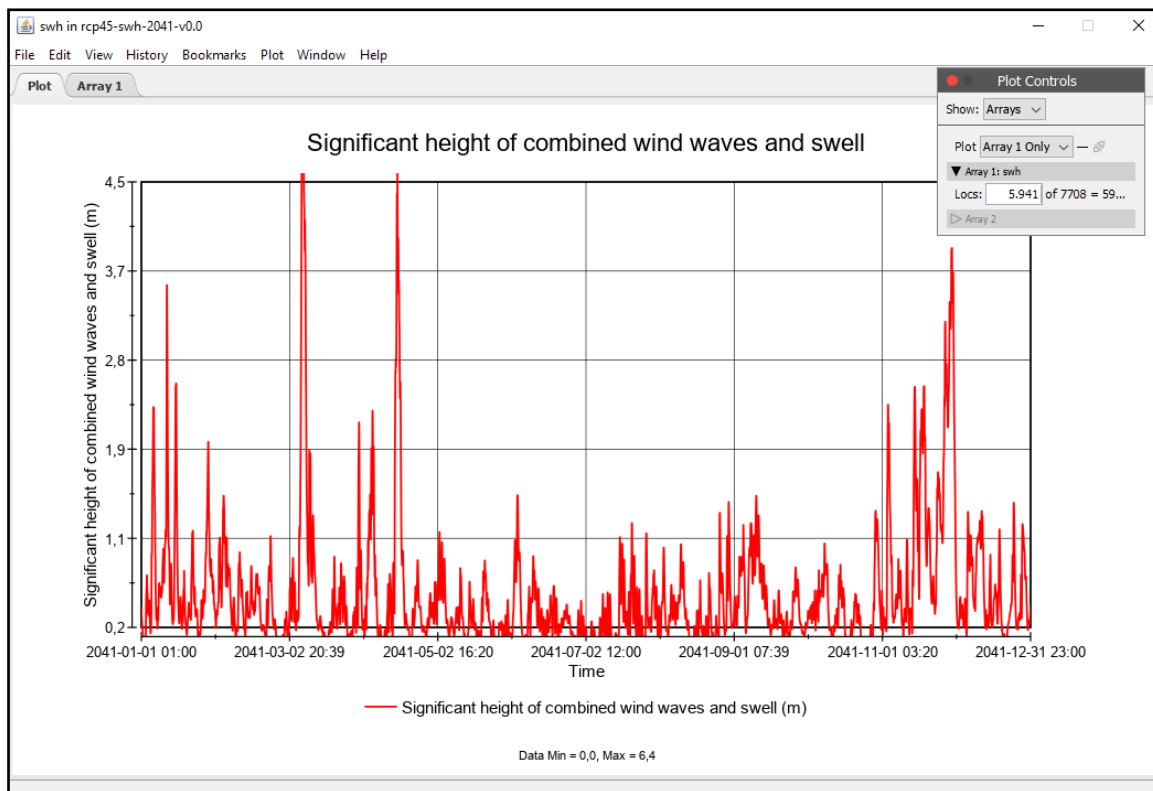


Εικόνα 4.14: Δημιουργία χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος για το διάστημα 1993-1995 (CMS) στο λογισμικό Panoply

Αντιθέτως, στην περίπτωση επεξεργασίας δεδομένων από την βάση C3S, γίνεται χρήση σταθμών (locs).

Για τον Πειραιά γίνεται χρήση του loc =5941, το οποίο αντιστοιχεί στο σημείο (Latitude, Longitude)= (37.80, 23.70).

Στην Εικόνα 4.15 παρουσιάζεται ενδεικτικά το διάγραμμα σημαντικού ύψους κύματος για το σενάριο RCP4.5 το έτος 2041, που αντλήθηκε από την C3S.



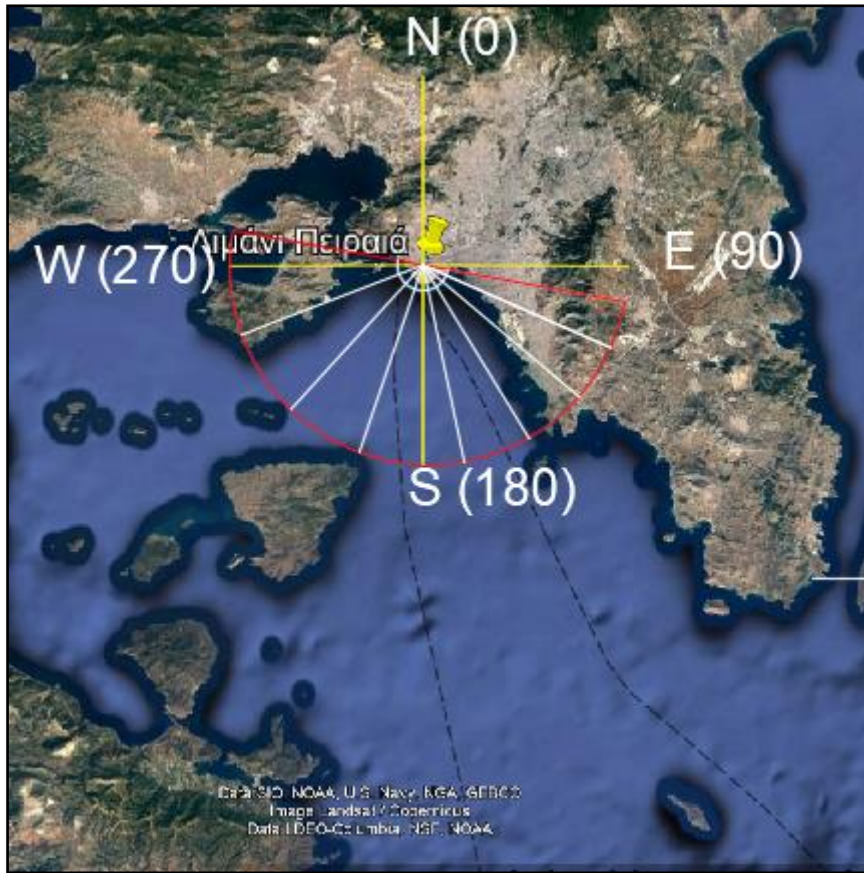
Εικόνα 4.15: Δημιουργία χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος για το σενάριο RCP4.5 το έτος 2041 (C3S) στο λογισμικό Panoply.

4.2.3 Κατασκευή οριακών συνθηκών

Στην παράγραφο 4.2.2 έγινε λόγος για την λήψη, την επεξεργασία και την αποθήκευση των απαραίτητων ωκεανογραφικών δεδομένων σε μορφή csv.

Πίνακες Συχνότητας

Για να περιοριστεί ο όγκος των δεδομένων λαμβάνονται υπόψη μόνο οι κύριες διευθύνσεις κυματισμού για την περιοχή μελέτης, δηλαδή αυτές που επηρεάζουν άμεσα τον υπό μελέτη λιμένα. Στην περίπτωση του Πειραιά, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.16 τα σημαντικότερα αποτελέσματα προκύπτουν από κυματισμούς στο εύρος διευθύνσεων από 100°-280° (με κόκκινο χρώμα). Για την καλύτερη μελέτη του εύρους διευθύνσεων γίνεται διαχωρισμός σε μικρότερα τμήματα των 45°. Επομένως, οι κύριες διευθύνσεις μελέτης των κυματισμών χωρίζονται στα διαστήματα (100°-145°), (145°-190°), (190°-235°) και (235°-280°), όπου οι 0° αντιστοιχούν στον Βορρά.



Εικόνα 4.16: Κύριες διευθύνσεις κυματισμών για τον Πειραιά

Για τις παραπάνω κύριες διευθύνσεις κατασκευάστηκαν πίνακες συχνοτήτων για τις μεταβλητές του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου κορυφής. Για το ύψος κύματος χρησιμοποιήθηκαν κλάσεις του μισού μέτρου (0.50m), ενώ για την περίοδο κορυφής επιλέχθηκαν κλάσεις των δύο δευτερολέπτων (2s).

Στους Πίνακες 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται οι πίνακες συχνοτήτων του ύψους κύματος και της περιόδου κορυφής για τα δεδομένα των περιπτώσεων HINDCAST, RCP4.5 και RCP8.5.

Πίνακας 4.1: Πίνακας Συχνοτήτων Ύψους Κύματος για τα δεδομένα HINDCAST.

HINDCAST – Ύψος Κύματος				
Κλάσεις ύψους κύματος (m)	100°-145°	145°-190°	190°-235°	235°-280°
0-0.5	4.827%	49.306%	3.644%	1.778%
0.5-1	0.071%	6.821%	0.107%	0.016%
1-1.5	0.012%	1.611%	0.005%	-
1.5-2	-	0.347%	-	-
2-2.5	-	0.061%	-	-
2.5-3		0.009%		

Πίνακας 4.2: Πίνακας Συχνοτήτων Περιόδου Κορυφής για τα δεδομένα HINDCAST.

HINDCAST – Περίοδος Κορυφής				
Κλάσεις Περιόδου (s)	100°-145°	145°-190°	190°-235°	235°-280°
0-2	1.165%	2.924%	0.701%	1.011%
2-4	2.533%	27.487%	0.937%	0.469%
4-6	0.570%	17.671%	1.540%	0.198%
6-8	0.531%	9.456%	0.542%	0.098%
8-10	0.095%	0.609%	0.033%	0.013%
10-12	0.015%	0.041%	0.004%	0.003%

Πίνακας 4.3: Πίνακας Συχνοτήτων Ύψους Κύματος για το σενάριο RCP4.5

RCP 4.5 – Ύψος Κύματος				
Κλάσεις ύψους κύματος (m)	100°-145°	145°-190°	190°-235°	235°-280°
0-0.5	3.260%	17.106%	8.257%	6.942%
0.5-1	0.257%	3.958%	1.713%	0.972%
1-1.5	0.040%	1.254%	0.375%	0.149%
1.5-2	0.006%	0.350%	0.073%	0.015%
2-2.5	0.001%	0.086%	0.011%	-
2.5-3	0.001%	0.023%	0.002%	-

Πίνακας 4.4: Πίνακας Συχνοτήτων Περιόδου για το σενάριο RCP 4.5

RCP 4.5 - Περίοδος Κορυφής				
Κλάσεις Περιόδου (s)	100°-145°	145°-190°	190°-235°	235°-280°
0-2	0.757%	3.963%	3.015%	1.980%
2-4	1.999%	7.714%	3.013%	5.142%
4-6	0.600%	7.852%	2.928%	0.793%
6-8	0.189%	3.018%	1.350%	0.153%
8-10	0.015%	0.230%	0.122%	0.010%
10-12	0.004%	0.003%	0.002%	-

Πίνακας 4.5: Πίνακας Συχνοτήτων Ύψους Κύματος για το σενάριο RCP8.5

RCP 8.5 – Ύψος Κύματος				
Κλάσεις ύψους κύματος (m)	100°-145°	145°-190°	190°-235°	235°-280°
0-0.5	3.416%	17.162%	7.894%	6.800%
0.5-1	0.271%	3.937%	1.543%	0.999%
1-1.5	0.041%	1.186%	0.355%	0.142%
1.5-2	0.009%	0.360%	0.075%	0.018%
2-2.5	0.000%	0.098%	0.010%	-
2.5-3	-	0.023%	0.002%	-
3-3.5	-	0.001%	-	-
3.5-4	-	0.001%	-	-
4-4.5	-	0.001%	-	-

Πίνακας 4.6: Πίνακας Συχνοτήτων Περιόδου για το σενάριο RCP 8.5

RCP 8.5 - Περίοδος Κορυφής				
Κλάσεις Περιόδου (s)	100°-145°	145°-190°	190°-235°	235°-280°
0-2	0.851%	4.227%	3.066%	2.008%
2-4	2.084%	7.566%	2.752%	5.008%
4-6	0.569%	7.863%	2.636%	0.786%
6-8	0.212%	2.893%	1.303%	0.150%
8-10	0.021%	0.225%	0.122%	0.007%
10-12	0.001%	0.003%	0.002%	-

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής, τόσο στα εξωτερικά έργα προστασίας του λιμένα, όσο και στην ηρεμία της λιμενολεκάνης.

Μελέτη Ευστάθειας Εξωτερικών Έργων Προστασίας

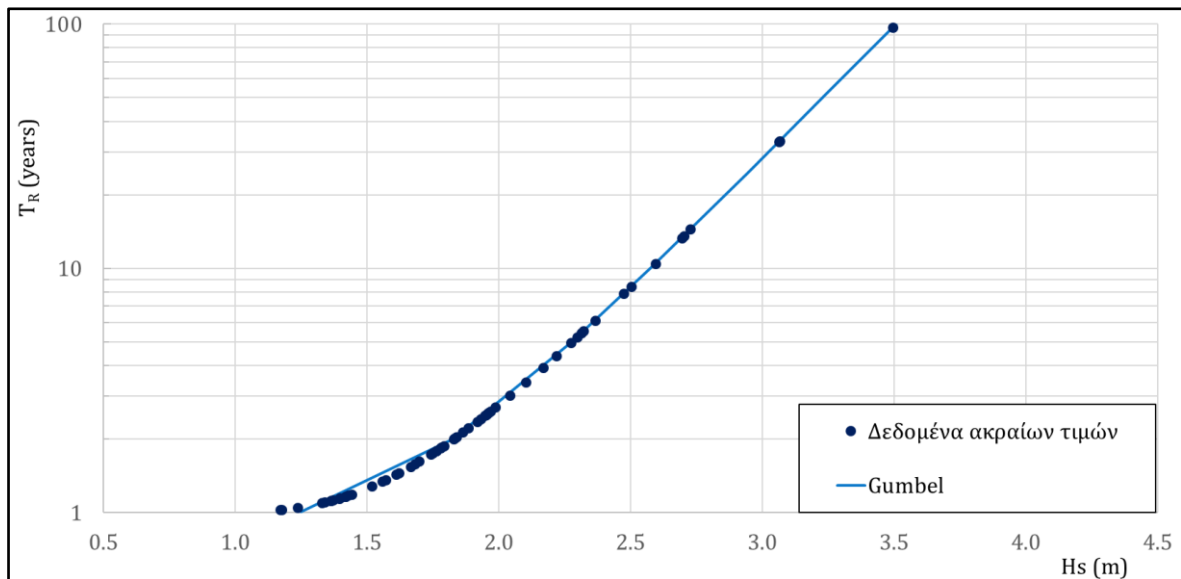
Η μελέτη της ευστάθειας των εξωτερικών έργων προστασίας του εμπορικού λιμένα Πειραιά, προϋποθέτει τον προσδιορισμό του κύματος σχεδιασμού σε αυτά. Δηλαδή, τον υπολογισμό του ύψους κύματος σχεδιασμού, αλλά και την αντίστοιχη περίοδο κορυφής.

Όπως παρουσιάστηκε και στο Κεφάλαιο 2, η εκτίμηση του κύματος σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς 100 ετών επιτυγχάνεται πραγματοποιώντας ανάλυση ακραίων τιμών, προσαρμόζοντας την κατάλληλη θεωρητική κατανομή της γενικευμένης συνάρτησης ακροτάτων στα δεδομένα. Κριτήριο για την επιλογή της βέλτιστης θεωρητικής κατανομής ήταν η επίτευξη υψηλότερου συντελεστή συσχέτισης (R). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εξετάστηκαν οι κατανομές Gumbel και Weibull. Για την κατανομή Weibull θεωρήθηκαν οι παρακάτω διακριτές τιμές του συντελεστή σχήματος, 0.75, 1.0, 1.4, 2.0. Επιπρόσθετα, η μέθοδος του μέγιστου ετήσιου κυματισμού επιλέχθηκε για τον καθορισμό των ακραίων τιμών. Σημειώνεται ότι η ανάλυση ακραίων τιμών πραγματοποιήθηκε για κάθε ένα από τα 4 διακριτά εύρη μέσης διεύθυνσης του κυματισμού και για τα πρωτογενή δεδομένα των περιπτώσεων HINDCAST, RCP 4.5 και RCP 8.5.

Ενδεικτικά, στην Εικόνα 4.17 παρουσιάζεται το διάγραμμα που προέκυψε για την 60-ετή χρονοσειρά δεδομένων για το σενάριο RCP 8.5, για τις διευθύνσεις κυματισμού στο διάστημα 145° - 190° , ενώ στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης που προέκυψαν για τις κατανομές Gumbel και Weibull, οι οποίες εξετάστηκαν. Η βέλτιστη προσαρμογή ως προς το συντελεστή συσχέτισης R, για τη συγκεκριμένη περίπτωση προέκυψε για την κατανομή Gumbel με οριακή διαφορά σε σχέση με την περίπτωση της κατανομής Weibull με συντελεστή σχήματος 2. Σημειώνεται πως στην Εικόνα 4.17 με μπλε κουκίδες συμβολίζεται η εκτιμώμενη κατανομή και με συνεχή γραμμή η προσαρμογή της θεωρητικής κατανομής Gumbel. Παρατηρείται πως η θεωρητική κατανομή προσεγγίζει ικανοποιητικά την θεωρητική κατανομή Gumbel, με μεγαλύτερη απόκλιση να παρατηρείται στις μικρότερες τιμές (για περίοδο επαναφοράς μεταξύ 1-2 ετών). Τα διαγράμματα για τις λοιπές περιπτώσεις που εξετάστηκαν παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Γ – Ανάλυση Ακραίων Τιμών.

Πίνακας 4.7: Συντελεστές συσχέτισης για τις κατανομές Gumbel και Weibull

	Gumbel	Weibull			
		Συντελεστής σχήματος			
		0.75	1	1.4	2
R	0.993	0.917	0.960	0.986	0.992



Εικόνα 4.17: Προσαρμογή κατανομής Gumbel για την περίπτωση του RCP 8.5 για εύρη διευθύνσεων 190°-235°

Ο προσδιορισμός της περιόδου κορυφής του κύματος σχεδιασμού γίνεται με την μέθοδο της συσχέτισης (correlation). Το διάγραμμα διασποράς των υψών κύματος και των περιόδων επαναφοράς χαρακτηρίζεται από μια σχέση της μορφής:

$$T_p = c \cdot H_s^d \quad (4.1)$$

όπου c , d : συντελεστές της εξίσωσης

H_s : το ύψος κύματος σχεδιασμού

Επομένως, για τον υπολογισμό της περιόδου κορυφής του κύματος σχεδιασμού ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Διαχωρίζονται οι ακραίες τιμές ύψους και περιόδου κύματος για κάθε έτος σε κάθε διεύθυνση.
- Δημιουργείται διάγραμμα διασποράς με το ύψος κύματος στον οριζόντιο άξονα και την περίοδο επαναφοράς στον κατακόρυφο.
- Μέσω του γραφήματος διασποράς προσδιορίζονται οι συντελεστές c , d .
- Υπολογίζεται η περίοδος κορυφής του φάσματος T_p με χρήση της Σχέσης (4.1), όπου H_s η τιμή του ύψους κύματος σχεδιασμού όπως αυτό υπολογίστηκε από την ανάλυση ακραίων τιμών.

Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα κύματα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς $T=100$ έτη, καθώς και η βέλτιστη κατανομή με τον αντίστοιχο συντελεστή συσχέτισης για κάθε περίπτωση.

Πίνακας 4.8: Κύματα σχεδιασμού και συντελεστές συσχέτισης ανά σενάριο και τομέα διευθύνσεων κυματισμού

	Τομέας	Βέλτιστη Κατανομή	Συντελεστής συσχέτισης R	Hs (m)	Tp (s)
HINDCAST	[100°-145°)	Weibull (shape = 2)	0.980	1.69	7.77
	[145°-190°)	Gumbel	0.997	3.51	8.20
	[190°-235°)	Gumbel	0.992	1.62	7.71
	[235°-280°)	Weibull (shape = 2)	0.984	1.03	5.90
RCP 4.5	[100°-145°)	Gumbel	0.996	2.71	7.21
	[145°-190°)	Weibull (shape = 2)	0.997	3.71	9.41
	[190°-235°)	Gumbel	0.996	3.51	8.20
	[235°-280°)	Gumbel	0.964	2.20	6.45
RCP 8.5	[100°-145°)	Gumbel	0.990	2.30	7.13
	[145°-190°)	Gumbel	0.993	4.21	9.47
	[190°-235°)	Weibull (shape = 2)	0.992	3.01	7.58
	[235°-280°)	Weibull (shape = 2)	6.05	2.21	6.55

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω συγκεντρωτικό Πίνακα 4.8, για τα σενάρια εκπομπών RCP4.5, RCP8.5 προκύπτουν αρκετά δυσμενέστερα κύματα σχεδιασμού, συγκριτικά με αυτά των δεδομένων HINDCAST.

Μελέτη Ηρεμίας Λιμενολεκάνης

Για τη μελέτη ηρεμίας της λιμενολεκάνης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των κυματικών χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένα σημεία ενδιαφέροντος. Όπως έχει αναλυθεί και στο Κεφάλαιο 2.1, η ηρεμία της λιμενολεκάνης εξυπηρετεί καθημερινές ανάγκες του λιμένα, επομένως η μελέτη των αναταραχών προσανατολίζεται ως προς το μέσο ετήσιο κυματικό κλίμα της περιοχής. Τα εξεταζόμενα κυματικά σενάρια προκύπτουν μέσω των πινάκων συχνότητας της κάθε περίπτωσης (HINDCAST, RCP4.5, RCP8.5), όπου για κάθε κλάση ύψους κύματος έχει υπολογιστεί η συχνότητα εμφάνισης για κάθε ένα από τα εύρη μέσης διεύθυνσης κυματισμού. Για την κατασκευή των εξεταζόμενων κυματικών σεναρίων ορίζεται, ως ύψος κύματος του σεναρίου ο σταθμισμένος μέσος όρος της εκάστοτε κλάσης, ως διεύθυνση κυματισμού ο μέσος όρος του εκάστοτε εύρους διευθύνσεων, ενώ η περίοδος κορυφής προσδιορίζεται με τη μέθοδο της συσχέτισης (correlation).

Στους Πίνακες 4.9, 4.10 και 4.11 παρουσιάζονται τα εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού και η συχνότητα εμφάνισής τους. Τα σενάρια κυματισμού για τα RCP είναι περισσότερα από αυτά των HINDCAST δεδομένων, καθώς στα πρώτα εμφανίζονται μεγαλύτερα ύψη κύματος

από τις κύριες διευθύνσεις κυματισμού, με αποτέλεσμα στους πίνακες συχνοτήτων ύψους κύματος να εισέρχονται περισσότερες κλάσεις. Με κόκκινο χρώμα εμφανίζονται για όλες τις περιπτώσεις τα δυσμενέστερα σενάρια κυματισμού, για κάθε εύρος διεύθυνσης.

Πίνακας 4.9: Εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού για δεδομένα HINDCAST.

HINDCAST				
A/A	Hs (m)	Tr (s)	MWD (°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)
1	0.68	4.50	122.5	0.071
2	1.17	5.21	122.5	0.012
3	0.69	4.52	167.5	6.821
4	1.19	5.24	167.5	1.611
5	1.69	5.76	167.5	0.347
6	2.19	6.18	167.5	0.061
7	2.66	6.51	167.5	0.009
8	0.62	4.39	212.5	0.107
9	1.15	5.19	212.5	0.005
10	0.59	4.33	257.5	0.016

Πίνακας 4.10: Εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού για το σενάριο RCP 4.5

RCP 4.5				
A/A	Hs (m)	Tr (s)	MWD (°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)
1	0.68	3.80	122.5	0.257
2	1.19	4.38	122.5	0.040
3	1.67	4.78	122.5	0.006
4	2.16	5.10	122.5	0.001
5	2.80	5.45	122.5	0.001
6	0.70	3.84	167.5	3.958
7	1.20	4.40	167.5	1.254
8	1.69	4.80	167.5	0.350
9	2.23	5.15	167.5	0.086
10	2.71	5.41	167.5	0.023
11	0.70	3.84	212.5	1.713
12	1.18	4.38	212.5	0.375
13	1.67	4.78	212.5	0.073
14	2.21	5.13	212.5	0.011
15	2.67	5.39	212.5	0.002
16	0.67	3.80	257.5	0.972
17	1.19	4.39	257.5	0.149
18	1.63	4.75	257.5	0.015

Για την περίπτωση του RCP 4.5, τα δυσμενέστερα σενάρια κυματισμού σε κάθε διεύθυνση ενδιαφέροντος, εμφανίζουν μεγαλύτερα ύψη κύματος, συγκριτικά με τα δεδομένα HINDCAST. Πιο συγκεκριμένα, για κυματισμούς διεύθυνσης MWD=122.5°,212.5° και 257.5° οι τιμές του ύψους κύματος του σεναρίου εκπομπών είναι αρκετά μεγαλύτερες, ενώ για κύμα διεύθυνσης MWD=167.5° η διαφορά είναι οριακή. Το μέγιστο ύψος κύματος για το σενάριο εκπομπών είναι Hs=2.80m για διεύθυνση κυματισμού MWD=122.5°, έναντι του Hs=2.66m για διεύθυνση κυματισμού MWD=167.5° των HINDCAST δεδομένων.

Πίνακας 4.11: Εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού για το σενάριο RCP 8.5

RCP 8.5				
A/A	Hs (m)	Tp (s)	MWD (°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)
1	0.70	3.81	122.5	0.271
2	1.18	4.34	122.5	0.041
3	1.65	4.71	122.5	0.009
4	2.20	5.06	122.5	0.001
5	0.70	3.81	167.5	3.937
6	1.20	4.35	167.5	1.186
7	1.70	4.75	167.5	0.360
8	2.20	5.06	167.5	0.098
9	2.69	5.32	167.5	0.023
10	3.20	5.56	167.5	0.001
11	3.73	5.78	167.5	0.001
12	4.08	5.91	167.5	0.001
13	0.70	3.81	212.5	1.543
14	1.19	4.34	212.5	0.355
15	1.68	4.73	212.5	0.075
16	2.19	5.06	212.5	0.010
17	2.70	5.33	212.5	0.002
18	0.68	3.78	257.5	0.999
19	1.18	4.34	257.5	0.142
20	1.66	4.72	257.5	0.018

Αντίστοιχα, στην περίπτωση του RCP 8.5, τα δυσμενέστερα σενάρια κυματισμού για κάθε διεύθυνση είναι αρκετά μεγαλύτερα από αυτά των HINDCAST δεδομένων. Το μέγιστο ύψος κύματος για το σενάριο RCP8.5 είναι Hs=4.08m για διεύθυνση κυματισμού MWD=167.5°, έναντι του Hs=2.66m για διεύθυνση κυματισμού MWD=167.5° των HINDCAST δεδομένων.

Συγκρίνοντας τα δύο σενάρια εκπομπών μεταξύ τους, παρατηρείται πως η περίπτωση του RCP 8.5 δίνει δυσμενέστερα σενάρια κυματισμού σε σχέση με το RCP 4.5, το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς το RCP 8.5 αποτελεί δυσμενέστερο σενάριο εκπομπών μεταξύ των δύο. Επίσης, παρατηρείται πως στα σενάρια εκπομπών εμφανίζονται ύψη κυματισμού, ικανά να διαταράξουν την ηρεμία της λιμενολεκάνης, σε διευθύνσεις που τα δεδομένα HINDCAST δίνουν αρκετά μικρές τιμές. Δηλαδή, για τη διεύθυνση κυματισμών MWD=257.5°

παρατηρούνται ύψη κύματος με τιμές $H_{sRCP8.5}=1.66m$, $H_{sRCP4.5}=1.63m$ για τα σενάρια εκπομπών, ενώ για τα δεδομένα HINDCAST $H_{sHINDCAST}=0.59m$.

4.2.4 Κατασκευή αρχείων εισόδου των φασματικών μοντέλων TOMAWAC & ARTEMIS

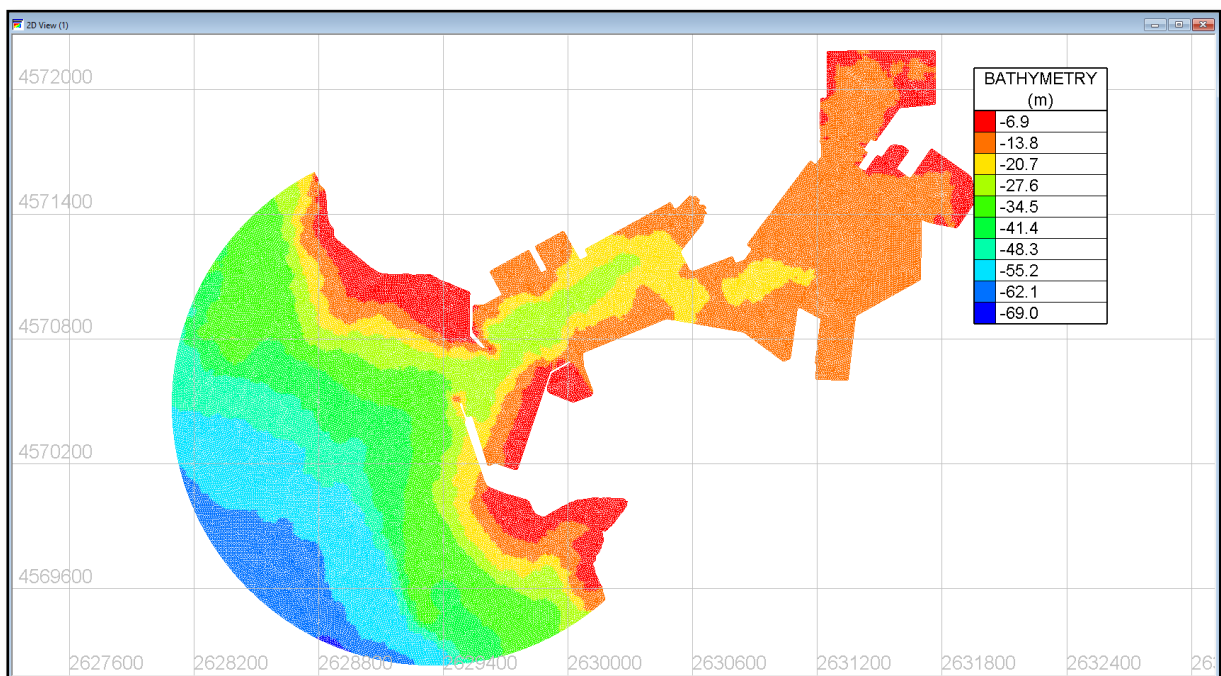
Έπειτα από την κατασκευή της βυθομετρίας της περιοχής μελέτης, τον κάναβο πεπερασμένων στοιχείων και τον προσδιορισμό των κυμάτων σχεδιασμού και των βασικών σεναρίων, επόμενο βήμα αποτελεί η κατασκευή των απαραίτητων αρχείων εισόδου για τα μοντέλα TOMAWAC και ARTEMIS.

Αρχεία εισόδου για τα μοντέλα TOMAWAC και ARTEMIS αποτελούν το γεωμετρικό αρχείο (*geometry.slf*) και το αρχείο οριακών συνθηκών (*boundary.cli*). Η κατασκευή αυτών γίνεται μέσω του ελεύθερου λογισμικού Blue Kenue, που έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Κέντρο Έρευνας του Καναδά.

Αρχείο Γεωμετρίας

Το γεωμετρικό αρχείο είναι ένα δυαδικό αρχείο που αποτελείται από τον κάναβο της βυθομετρίας. Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.2.1, ο κάναβος που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τριγωνικά στοιχεία. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η πυκνωση των στοιχείων στο εσωτερικό του λιμένα και κοντά στην ακτογραμμή. Επίσης, προϋπόθεση για την εκτέλεση των απαραίτητων υπολογισμών στα μοντέλα είναι η μετονομασία του κάναβου της βυθομετρίας σε BOTTOM.

Στην Εικόνα 4.18 φαίνεται το κοινό γεωμετρικό αρχείο που χρησιμοποιείται για τα μοντέλα TOMAWAC και ARTEMIS.



Εικόνα 4.18: Γεωμετρικό αρχείο (*geometry.slf*) για τα μοντέλα TOMAWAC & ARTEMIS

Αρχείο Οριακών Συνθηκών

Το αρχείο των οριακών συνθηκών διαφοροποιείται για τα δυο φασματικά μοντέλα και πρέπει να κατασκευαστεί για το καθένα διαφορετικά.

Για το μοντέλο TOMAWAC:

Για το φασματικό μοντέλο TOMAWAC, κατά την δημιουργία του αρχείου οριακών συνθηκών λαμβάνεται υπόψη η κατασκευή των ανοικτών και στερεών ορίων της περιοχής μελέτης. Ως στερεό όριο ορίζεται η ακτογραμμή, τα προστατευτικά εξωτερικά έργα και τα κρηπιδώματα που αποτελούν τον λιμένα. Αντιθέτως, ως ανοικτό όριο θεωρείται το τμήμα εκείνο από το οποίο εισέρχεται ο κυματισμός.

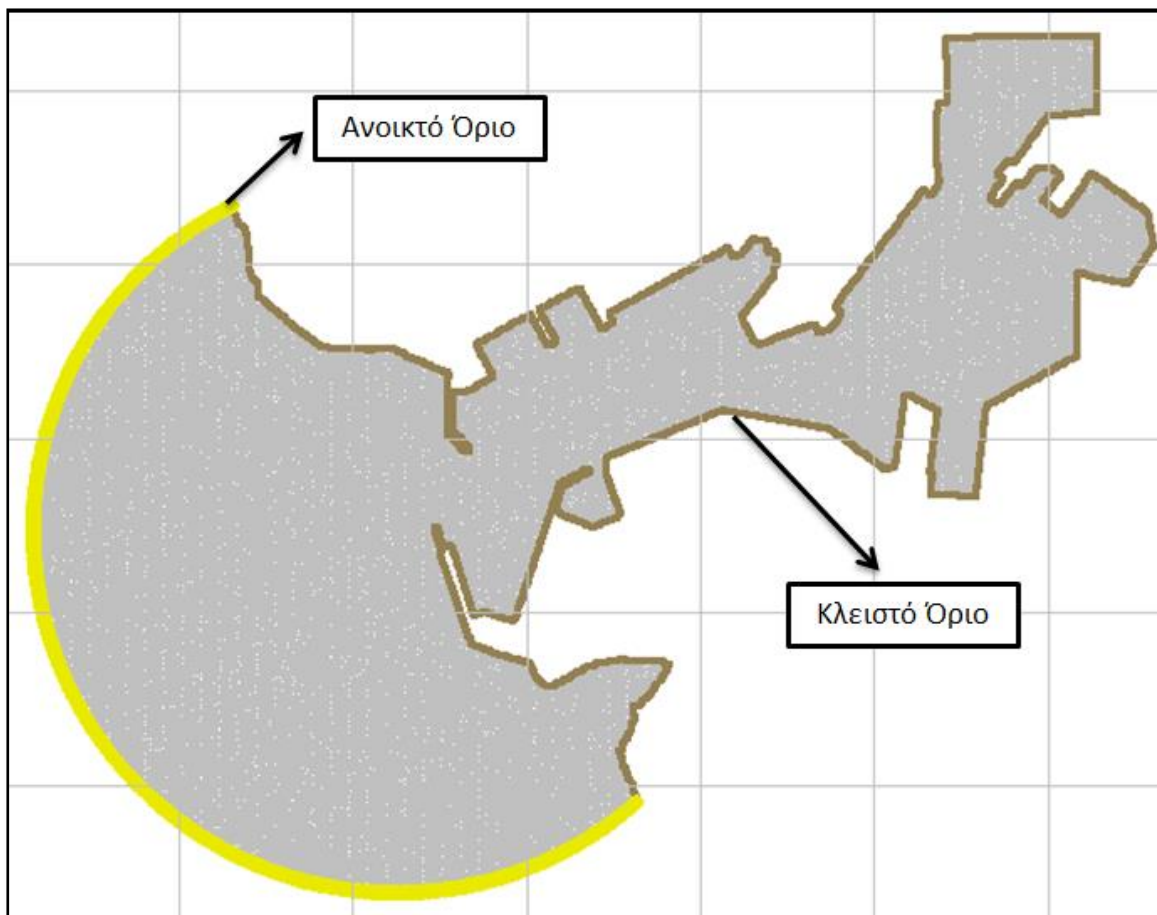
Σημαντική παράμετρος ώστε να γίνουν οι υπολογισμοί στο μοντέλο είναι, κατά την δημιουργία των ορίων, να χρησιμοποιηθεί ο σωστός κωδικός σύμφωνα με τον Πίνακα 4.12 (Maron, 2015).

Πίνακας 4.12: Κωδικοί για κάθε οριακή συνθήκη (Tutorial Manual for the Mesher in BlueKenue)

Boundary Type	Code
Closed Boundary	222
Open Boundary with prescribed Q	455
Open Boundary with prescribed H	544
Open Boundary with prescribed Q and H	555
Open Boundary with prescribed UV	466
Open Boundary with prescribed UV and H	566
Open Boundary with incident waves	111

Στην περίπτωση του μοντέλου TOMAWAC, για τα κλειστά όρια γίνεται χρήση του κωδικού 222 (Closed Boundary), ενώ για τα ανοιχτά του 544 (Open Boundary with prescribed H). Οι παραπάνω κωδικοί συμπληρώνονται στις τρεις πρώτες στήλες του αρχείου οριακών συνθηκών.

Στην Εικόνα 4.19 δίνεται το αρχείο οριακών συνθηκών για το μοντέλο TOMAWAC. Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται το ανοικτό όριο, ενώ με καφέ το κλειστό όριο της περιοχής μελέτης.

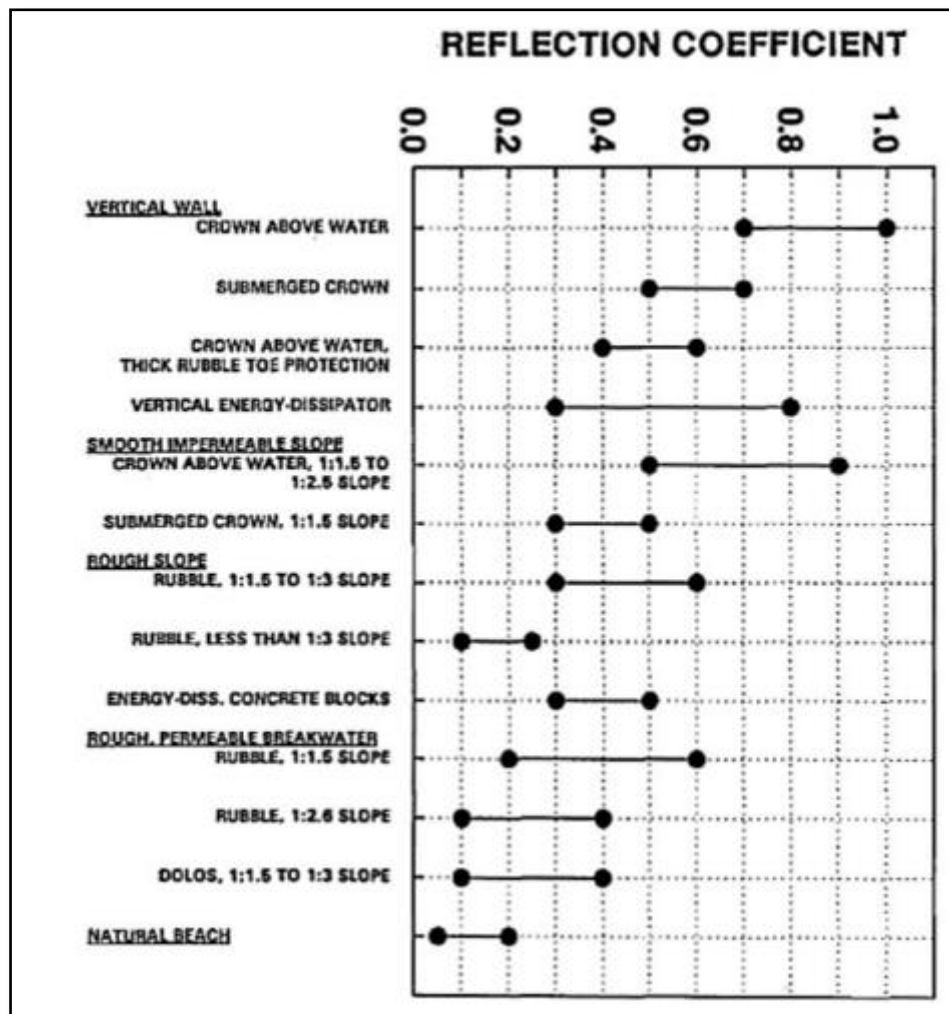


Εικόνα 4.19: Αρχείο οριακών συνθηκών (boundary.cli) στο μοντέλο TOMAWAC

Για το μοντέλο ARTEMIS:

Το αρχείο των οριακών συνθηκών για το μοντέλο ARTEMIS κατασκευάζεται με παρόμοιο τρόπο με το αντίστοιχο αρχείο του TOMAWAC, μόνο που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι αναγκαίο να καθοριστούν οι συντελεστές ανάκλασης για τα κλειστά όρια της περιοχής μελέτης.

Το κλειστό όριο της περιοχής μελέτης χωρίζεται σε τρία τμήματα: στην ακτή, στο κρηπίδωμα και στους φυσικούς ογκολίθους. Ο συντελεστής ανάκλασης σύμφωνα με τον (Thompson, 1996) ορίζεται ανάλογα το υλικό της κατασκευής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.20.



Εικόνα 4.20: Συντελεστής ανάκλασης για διάφορους τύπους υλικών (Thompson, 1996)

Επομένως οι αναλυτικές τιμές του συντελεστή ανάκλασης R δίνονται στον Πίνακα 4.13.

Πίνακας 4.13: Συντελεστές ανάκλασης κλειστών ορίων

	Κρηπίδωμα	Φυσικοί Ογκόλιθοι	Ακτή
Συντελεστής Ανάκλασης R	1 (Ολική Ανάκλαση)	0.50	0.20

Επίσης, σχετικά με τους απαραίτητους κωδικούς για την εκάστοτε οριακή συνθήκη, γίνεται χρήση:

- για το ανοικτό όριο ο κωδικός 111 (Open Boundary with incident waves),
- για την περιοχή κρηπιδώματος ο κωδικός 455 (Open Boundary with prescribed Q),
- για την περιοχή με φυσικούς ογκόλιθους ο κωδικός 544 (Open Boundary with prescribed H),
- για την ακτή ο κωδικός 555 (Open Boundary with prescribed Q and H).

Σημαντική τροποποίηση για την σωστή πραγματοποίηση των υπολογισμών στο μοντέλο ARTEMIS είναι η αλλαγή του πρώτου ψηφίου των παραπάνω κωδικών σε 2, στην περίπτωση κλειστού ορίου. Οι τελικοί κωδικοί δίνονται στον Πίνακα 4.14.

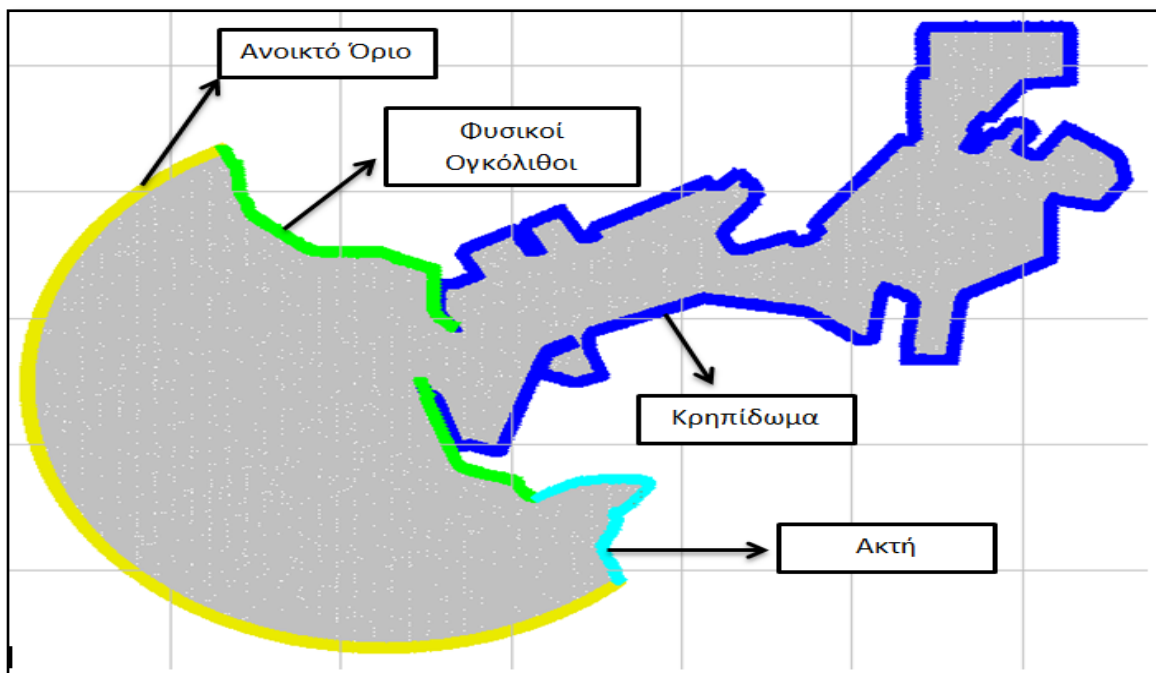
Πίνακας 4.14: Κωδικοί οριακών συνθηκών για το μοντέλο ARTEMIS.

BOUNDARY TYPE	Κρηπίδωμα	Φυσικοί Ογκόλιθοι	Ακτή
CODE	255	244	255

Σαν οριακές συνθήκες για το μοντέλο ARTEMIS χρησιμοποιούνται τα εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού όπως παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.9, 4.10 και 4.11. Η τοποθέτησή τους στο αρχείο των οριακών συνθηκών γίνεται με τον εξής τρόπο:

- Στις πρώτες τρεις στήλες του τοποθετείται ο απαραίτητος κωδικός σύμφωνα με τον Πίνακα 4.14.
- Στην τέταρτη στήλη τοποθετείται το χαρακτηριστικό ύψος κύματος στην περίπτωση του ανοικτού ορίου.
- Στην έβδομη στήλη σημειώνεται ο συντελεστής ανάκλασης των στερεών ορίων σύμφωνα με τον Πίνακα 4.13.

Στην Εικόνα 4.21 δίνεται το αρχείο οριακών συνθηκών για το μοντέλο ARTEMIS. Με κίτρινο χρώμα σημειώνεται το ανοικτό όριο, με πράσινο οι φυσικοί ογκόλιθοι, με γαλάζιο η ακτή και με σκούρο μπλε το κρηπίδωμα της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.21: Αρχείο οριακών συνθηκών (boundary.cli) στο μοντέλο ARTEMIS

4.3 Παράμετροι Προσομοίωσης

Το αρχείο παραμέτρων (cas. File) είναι απαραίτητο και για τις δύο προσομοιώσεις τόσο για το φασματικό μοντέλο TOMAWAC, όσο και για το μοντέλο ARTEMIS. Παρακάτω, περιγράφεται η διαδικασία κατασκευής του συγκεκριμένου αρχείου για το κάθε μοντέλο ξεχωριστά.

4.3.1 Αρχείο παραμέτρων για το μοντέλο TOMAWAC

Το αρχείο προσομοίωσης κατασκευάζεται με την χρήση λέξεων κλειδιών, οι οποίες καθορίζουν τις παραμέτρους εισόδου για το κάθε μοντέλο.

Το μοντέλο TOMAWAC χρησιμοποιεί σαν οριακές συνθήκες το κύμα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς 100 ετών, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8. Η εισαγωγή τους στο αρχείο των παραμέτρων γίνεται στην ενότητα των οριακών συνθηκών (Boundary Conditions) με τον εξής τρόπο:

- Το ύψος σχεδιασμού του κύματος τοποθετείται στην μεταβλητή Boundary Significant Wave Height.
- Η περίοδος κορυφής του κύματος εισέρχεται στο αρχείο στην μορφή συχνότητας στην μεταβλητή Boundary Peak Frequency, όπου:

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.9)$$

- Η κύρια διεύθυνση μετάδοσης του κυματισμού τοποθετείται στην μεταβλητή Boundary Main Direction 1. Σύμφωνα με την τριγωνομετρική σύμβαση που ακολουθείται για το μοντέλο TOMAWAC, η γωνία για τα κύματα που διαδίδονται προς :
 - τον Βορρά είναι 180°,
 - την Ανατολή είναι 90°,
 - τον Νότο είναι 0°,
 - την Δύση είναι 270°.

Επίσης, γίνεται χρήση 24 συχνοτήτων και 36 διευθύνσεων για την διακριτοποίηση του φάσματος πυκνότητας - δράσης και ορίζεται το χρονικό βήμα της προσομοίωσης στα 100s.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν οι περεταίρω παράμετροι που λαμβάνει το αρχείο, για τον λόγο αυτό το αρχείο προσομοίωσης για το μοντέλο TOMAWAC παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α – Αρχεία εισόδου.

Τα αποτελέσματα του παραπάνω αρχείου προκύπτουν σε ένα δισδιάστατο αρχείο στο οποίο εκτυπώνονται οι εξής μεταβλητές, υπολογισμένες για κάθε σημείο του κάναβου:

- HM0: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος,
- DMOY: Μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών,
- TPR5: Περίοδος αιχμής του φάσματος.

4.3.2 Αρχείο παραμέτρων για το μοντέλο ARTEMIS

Το αρχείο παραμέτρων του μοντέλου ARTEMIS ακολουθεί την ίδια λογική με αυτή του TOMAWAC.

Σαν οριακές συνθήκες, το μοντέλο ARTEMIS χρησιμοποιεί τα εξεταζόμενα σενάρια κυματισμού. Η εισαγωγή τους στο αρχείο παραμέτρων γίνεται με παρόμοιο τρόπο με πριν.

- Η περίοδος κορυφής τοποθετείται στην μεταβλητή Peak Period και παράλληλα ορίζονται τα όρια Minimum / Maximum Spectral Period.
- Η κύρια διεύθυνση μετάδοσης του κυματισμού τοποθετείται στην μεταβλητή Direction of Wave Propagation. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η τριγωνομετρική σύμβαση που ακολουθείται για το μοντέλο ARTEMIS, θέτει την γωνία για τα κύματα που διαδίδονται προς:
 - τον Βορρά να είναι 90° ,
 - την Ανατολή να είναι 0° ,
 - τον Νότο να είναι 270° ,
 - την Δύση να είναι 180° .

Στην μεταβλητή Initial Water Level τοποθετείται η άνοδος της στάθμης της θάλασσας την οποία λαμβάνουμε υπόψη.

Η επιλογή του χρονικού βήματος γίνεται από το ίδιο το μοντέλο, από την στιγμή που εφαρμόζονται λύσεις σταθερών συνθηκών και γίνεται επίλυση των εξισώσεων ήπιας κλίσης.

Οι υπόλοιποι παράμετροι για το αρχείο παραμέτρων του ARTEMIS παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α – Αρχεία εισόδου.

Τα αποτελέσματα του παραπάνω αρχείου προκύπτουν σε ένα δισδιάστατο αρχείο στο οποίο εκτυπώνονται οι μεταβλητές, υπολογισμένες για κάθε κόμβο του πλέγματος.

5 Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μελέτη των εξωτερικών προστατευτικών έργων καθώς και η μελέτη ηρεμίας της λιμενολεκάνης. Επίσης, γίνεται αναφορά στον τρόπο επιλογής του εκάστοτε αριθμητικού μοντέλου, για την κάθε μελέτη και παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα αυτών.

5.1 Μελέτη εξωτερικών έργων προστασίας του λιμένα

Στην είσοδο του Λιμένα του Πειραιά παρατηρείται η ύπαρξη δυο έξαλλων φυσικών κυματοθραυστών στο βόρειο και νότιο τμήμα του αντίστοιχα, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.1. Στόχος των κυματοθραυστών αποτελεί η μείωση της έντασης των κυματισμών που εισέρχονται στη λιμενολεκάνη και συνεπώς η εξασφάλιση ασφαλούς αγκυροβολίου για τα πλοία.



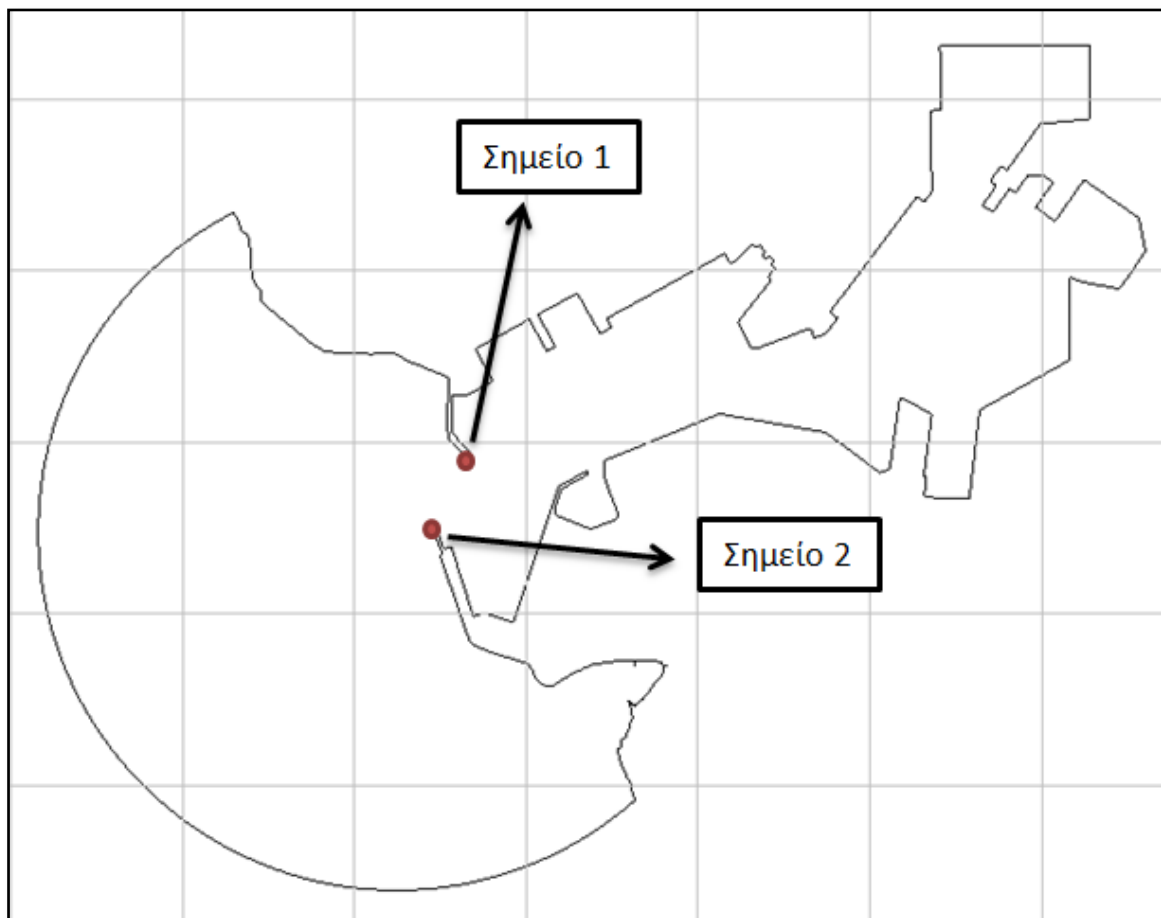
Εικόνα 5.1: Έξαλλοι φυσικοί κυματοθραύστες στο Λιμάνι του Πειραιά (ΟΛΠ)

Όπως αναφέρθηκε αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 4.2.3, για την μελέτη των εξωτερικών έργων προστασίας γίνεται χρήση του κύματος σχεδιασμού για κάθε διεύθυνση, για περίοδο επαναφοράς 100 ετών (Πίνακας 4.8).

Για τον υπολογισμό του κύματος σχεδιασμού στους κυματοθραύστες γίνεται χρήση του φασματικού μοντέλου TOMAWAC. Η επιλογή φασματικού μοντέλου 3^{ης} γενιάς βασίστηκε στο ευρύ πεδίο εφαρμογής του, που καλύπτει περιοχές που ανήκουν στην ωκεάνια κλίμακα έως και την παράκτια ζώνη, αλλά όχι εντός του λιμένα.

Τα αποτελέσματα του παραπάνω φασματικού κυματικού μοντέλου παρουσιάζονται με τη μορφή χωρικής κατανομής ύψους κύματος. Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται χρήση του λογισμικού Blue Kenue, όπου η εκτέλεση της προσομοίωση των 3 ωρών απαιτεί χρόνο ίσο με 6' 40 s.

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα του φασματικού μοντέλου και να γίνει σωστή αξιολόγηση, η εξαγωγή των χρονοσειρών των κυματικών χαρακτηριστικών γίνεται στο Σημείο 1 με συντεταγμένες $(x,y) = (2629586.69, 4570755.23)$ για τον Βόρειο κυματοθραύστη και στο Σημείο 2 με συντεταγμένες $(x,y) = (2629477.6, 4570487.26)$ για τον Νότιο όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Σημεία εξαγωγής χρονοσειρών των κυματικών χαρακτηριστικών

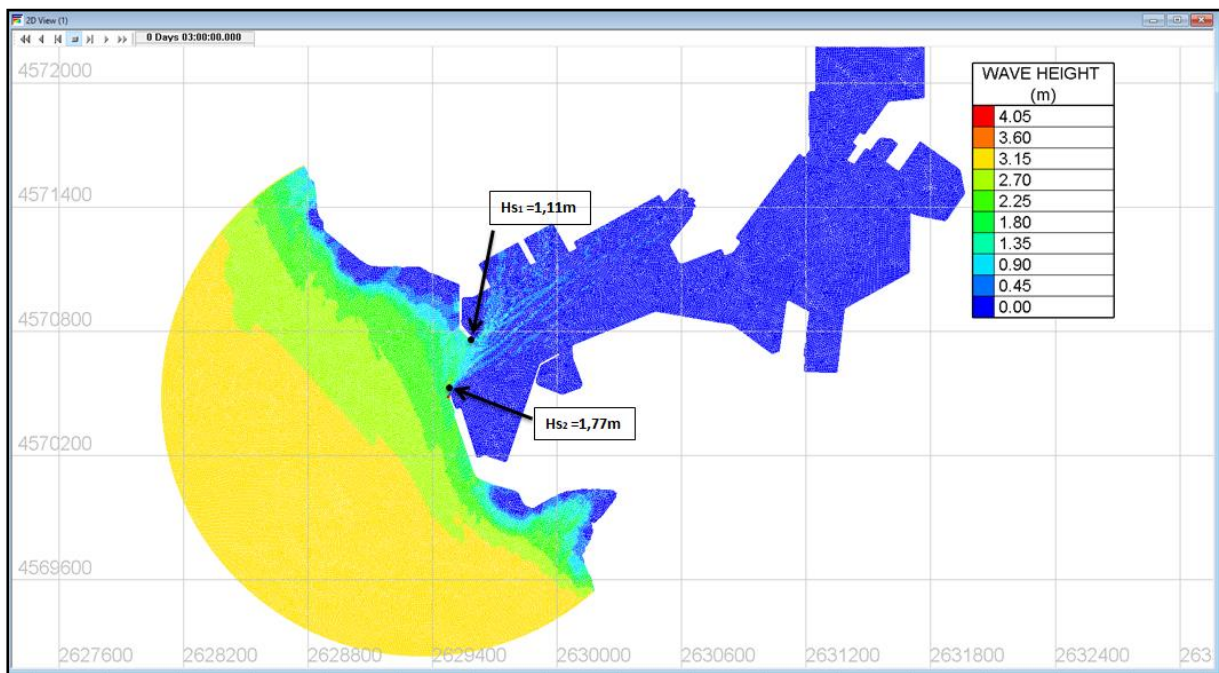
Ενδεικτικά, θα παρουσιαστούν στα παρακάτω σχήματα τα δυσμενέστερα σενάρια κυματισμού για τον κάθε κυματοθραύστη ξεχωριστά.

Στον Βόρειο κυματοθραύστη, για την περίπτωση των δεδομένων HINDCAST, φαίνεται πως τα δυσμενέστερα ύψη κύματος προκύπτουν από κύμα σχεδιασμού με διεύθυνση $MWD=167.5^\circ$, ενώ για τα σενάρια εκπομπών RCP 4.5 και RCP 8.5 από κύμα σχεδιασμού με διεύθυνση $MWD=212.5^\circ$. Συγκεκριμένα, για την περίπτωση των δεδομένων HINDCAST, με κύμα σχεδιασμού (Υψος κύματος, Περίοδος κορυφής, Διεύθυνση κυματισμού) = (3.51m, 8.20s, 167.5°) προκύπτει στον πόδα του κυματοθραύστη ύψος κύματος $H_s=1.11m$, για το σενάριο εκπομπών RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού (Υψος κύματος, Περίοδος κορυφής,

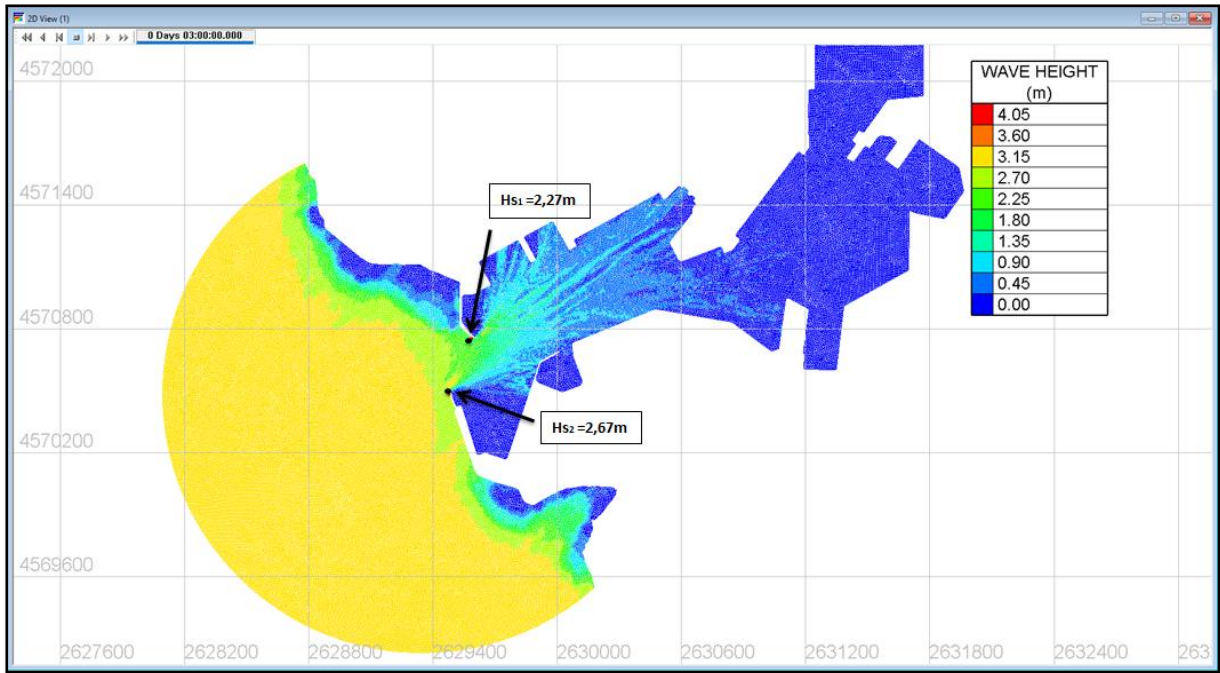
Διεύθυνση κυματισμού) = (3.51m, 8.20s, 212.5°) προκύπτει $H_s=2.27\text{m}$, ενώ για το RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού (Υψος κύματος, Περίοδος κορυφής, Διεύθυνση κυματισμού) = (3.01m, 7.58sec, 212.5°) προκύπτει $H_s=2.15\text{m}$.

Αντίστοιχα, στον Νότιο κυματοθραύστη παρατηρείται πως τα δυσμενέστερα ύψη κύματος, στην περίπτωση των δεδομένων HINDCAST προκύπτουν από κύμα σχεδιασμού με διεύθυνση $MWD=167.5^\circ$, ενώ για τα σενάρια εκπομπών RCP 4.5 και RCP 8.5 από κύμα σχεδιασμού με διεύθυνση $MWD=212.5^\circ$. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση δεδομένων HINDCAST με κύμα σχεδιασμού (Υψος κύματος, Περίοδος κορυφής, Διεύθυνση κυματισμού) = (3.51m, 8.20s, 167.5°) προκύπτει στον πόδα του κυματοθραύστη ύψος κύματος $H_s=1.77\text{m}$, για το σενάριο εκπομπών RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού (Υψος κύματος, Περίοδος κορυφής, Διεύθυνση κυματισμού) = (3.51m, 8.20s, 212.5°) προκύπτει $H_s=2.67\text{m}$, ενώ για το RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού (Υψος κύματος, Περίοδος κορυφής, Διεύθυνση κυματισμού) = (3.01m, 7.58sec, 212.5°) προκύπτει $H_s=2.52\text{m}$.

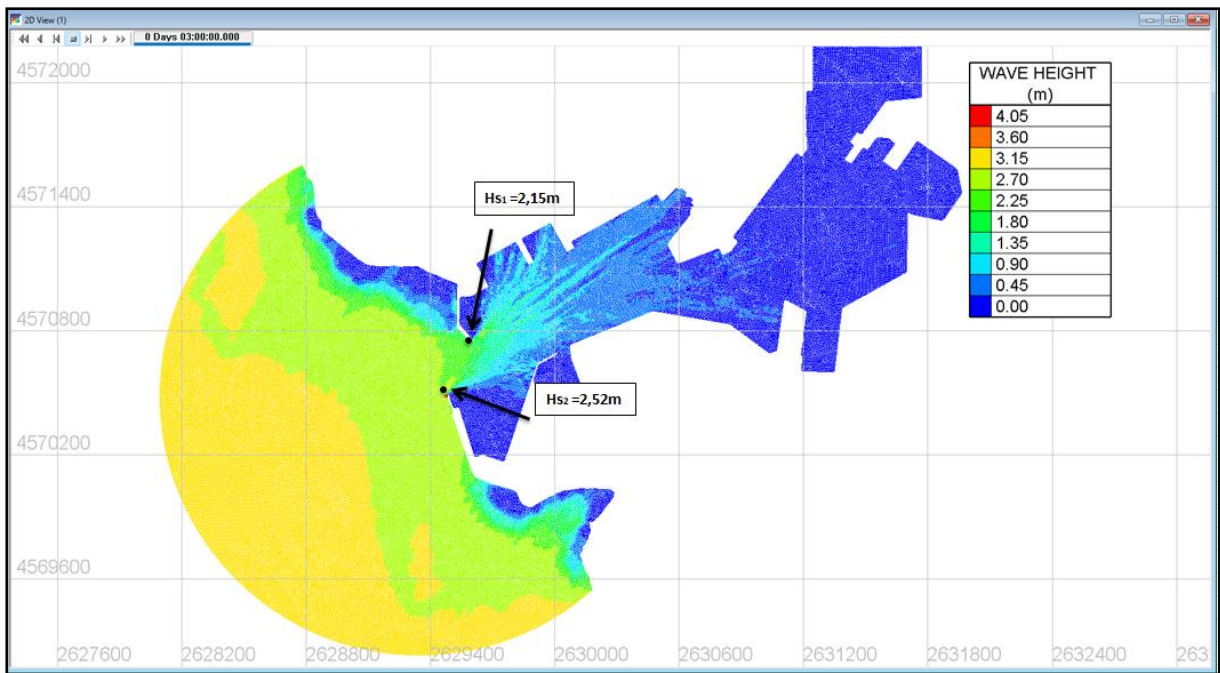
Οι χωρικές κατανομές του ύψους κύματος για τον Βόρειο και Νότιο κυματοθραύστη, σημείο 1 και 2 αντίστοιχα, παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.2, 5.3 και 5.4



Σχήμα 5.2: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51\text{m}$, $T_p=8.20\text{sec}$, $MWD=167.5^\circ$).



Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51m$, $T_p=8.20sec$, $MWD=212.5^\circ$).



Σχήμα 5.4: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.01m$, $T_p=7.58sec$, $MWD=212.5^\circ$).

Τα αποτελέσματα για τα υπόλοιπα κύματα σχεδιασμού δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.1, ενώ οι χωρικές κατανομές του ύψους κύματος εμφανίζονται αναλυτικά για όλα τα σενάρια στο Παράρτημα Β – Περαιτέρω αποτελέσματα προσομοιώσεων.

Από τα αποτελέσματα του φασματικού μοντέλου για το Βόρειο και Νότιο κυματοθραύστη παρατηρείται πως τα σενάρια εκπομπών RCP προκαλούν μεγαλύτερα ύψη κύματος στον πόδα των εξωτερικών προστατευτικών έργων, συγκριτικά με αυτά των δεδομένων HINDCAST. Επίσης, τα δυσμενέστερα αποτελέσματα στους κυματοθραύστες προκαλούνται από κύμα σχεδιασμού με διεύθυνση MWD=167.5° για τα δεδομένα HINDCAST και MWD=212.5° για τα σενάρια εκπομπών.

Πίνακας 5.1: Αποτελέσματα φασματικού μοντέλου TOMAWAC στο Βόρειο και Νότιο Κυματοθραύστη, με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές

					Βόρειος Κυματοθραύστης	Νότιος Κυματοθραύστης
	Τομέας	Hs (m)	Tp (s)	MWD(°)	Hs (m)	Hs (m)
HINDCAST	[100°-145°)	1.69	7.77	122.5	0.12	0.26
	[145°-190°)	3.51	8.20	167.5	1.11	1.77
	[190°-235°)	1.62	7.71	212.5	1.05	1.23
	[235°-280°)	1.03	5.90	257.5	0.70	0.89
RCP 4.5	[100°-145°)	2.71	7.21	122.5	0.15	0.36
	[145°-190°)	3.71	9.41	167.5	1.40	2.21
	[190°-235°)	3.51	8.20	212.5	2.27	2.67
	[235°-280°)	2.20	6.45	257.5	1.60	2.03
RCP 8.5	[100°-145°)	2.30	7.13	122.5	0.13	0.29
	[145°-190°)	4.21	9.47	167.5	1.49	2.34
	[190°-235°)	3.01	7.58	212.5	2.15	2.52
	[235°-280°)	2.21	6.55	257.5	1.64	2.10

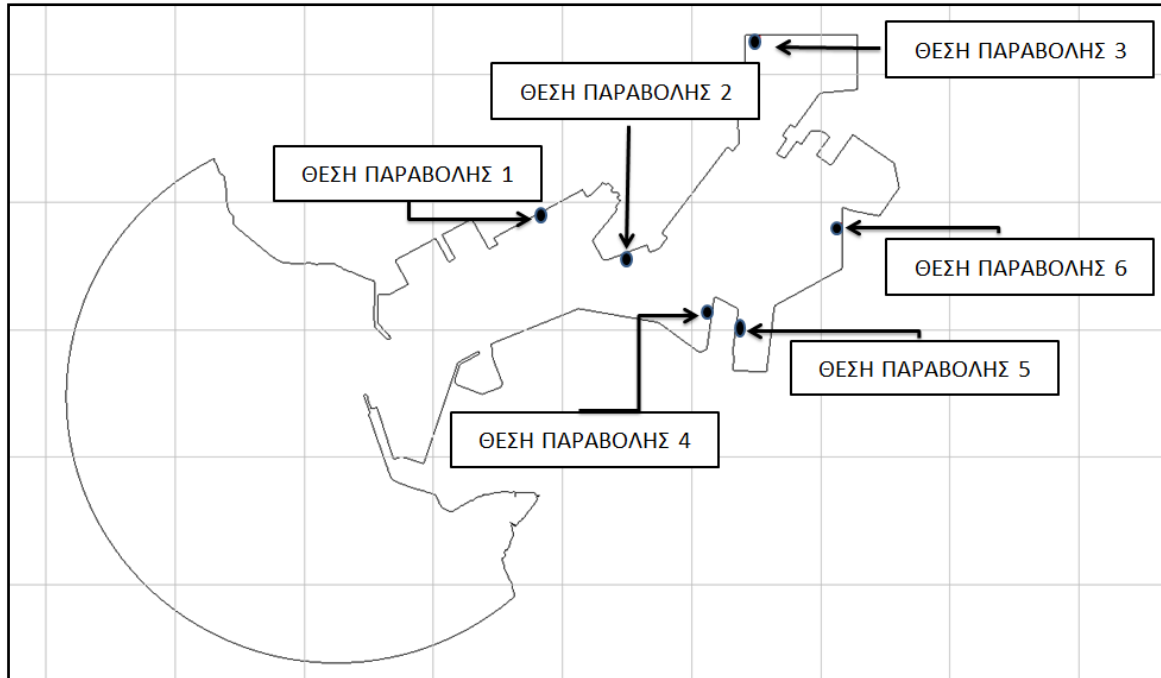
5.2 Μελέτη ηρεμίας της λιμενολεκάνης

Σε αυτή την παράγραφο, μελετάται η ηρεμία της λιμενολεκάνης. Στόχος της μελέτης αποτελεί ο προσδιορισμός των κυματικών χαρακτηριστικών στα κύρια σημεία ενδιαφέροντος εντός της λιμενολεκάνης. Η μελέτη θα πραγματοποιηθεί για δύο βασικές περιπτώσεις: στην 1^η περίπτωση, ως απλοποιημένο σενάριο μελέτης, η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας αγνοείται σαν παράμετρος του προβλήματος, ενώ στην 2^η περίπτωση λαμβάνεται υπόψη μέσω των σεναρίων εκπομπών RCP. Τέλος, κρίνεται σκόπιμο να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα και σε σύγκριση με επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος για τη λιμενολεκάνη, να προσδιοριστεί το ποσοστό μη λειτουργίας του λιμένα.

Ως σημεία ενδιαφέροντος για την μελέτη έχουν επιλεγθεί 6 θέσεις παραβολής των πλοίων που εξυπηρετούν το Λιμάνι του Πειραιά, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.5. Οι συντεταγμένες των θέσεων παραβολής είναι :

- Θέση παραβολής 1 (x, y)=(2630296.48, 4571337.19)

- Θέση παραβολής 2 (x, y)=(2630696.73, 4571151.27)
- Θέση παραβολής 3 (x, y)=(2631307.88, 4572173.74)
- Θέση παραβολής 4 (x, y)=(2631079.35, 4570868.83)
- Θέση παραβολής 5 (x, y)=(2631211.65, 4570815.40)
- Θέση παραβολής 6 (x, y)=(2631689.13, 4571292.58)



Σχήμα 5.5: Σημεία ενδιαφέροντος εντός λιμενολεκάνης

Για τον προσδιορισμό των επιτρεπόμενων υψών κύματος εντός της λιμενολεκάνης γίνεται χρήση των οδηγιών της PIANC, όπως αναφέρεται αναλυτικότερα και στο Κεφάλαιο 2.1.2. Οι οδηγίες της PIANC εξετάζουν την ηρεμία της λιμενολεκάνης μέσω τριών βασικών κριτηρίων. Το 1^ο κριτήριο αφορά τον ελλιμενισμό των σκαφών, το 2^ο τις εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης εμπορευμάτων και επιβατών και το 3^ο την ασφαλή αγκυροβόληση των σκαφών στην αποβάθρα.

Η επιλογή των επιτρεπόμενων ορίων συνδέεται άμεσα με το είδος και το μέγεθος του πλοίου. Επίσης, σημαντική παράμετρο καθιστά η γωνία του προσπίπτον κυματισμού ως προς το άξονα του πλοίου. Η υπό μελέτη περιοχή εξυπηρετεί τους σταθμούς της ακτοπλοΐας και κρουαζιέρας όπως ειπώθηκε στο Κεφάλαιο 4.1.1. Από την χρήση ιστορικών φωτογραφιών, όπως την Εικόνα 5.2, παρατηρείται πως οι θέσεις παραβολής 1,2,3 και 6 εξυπηρετούν πλοία ακτοπλοΐας, ενώ οι θέσεις 4 και 5 κρουαζιερόπλοια. Επομένως, στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση των Κριτηρίων 1 και 3, καθώς δεν υφίσταται φορτοεκφόρτωση εμπορευμάτων. Επίσης, εμφανής είναι ο τρόπος παραβολής κάθε πλοίου στην προβλήτα, ώστε να επιλεγεί αν οι κυματισμοί έχουν διαμήκη ή εγκάρσια δράση ως προς τον άξονα του πλοίου. Τα κύματα θεωρείται ότι δρουν διαμήκως όταν η διεύθυνση του προσπίπτον κυματισμού είναι $\pm 45^\circ$ σε σχέση με τον διαμήκη άξονα του πλοίου, και αντίστοιχα ότι δρουν εγκάρσια όταν η διεύθυνση του προσπίπτον κυματισμού είναι $\pm 45^\circ$

ως προς τον εγκάρσιο άξονα του πλοίου. Επομένως, για τις θέσεις παραβολής 1, 2, 3, 5 η δράση των κυματισμών είναι εγκάρσια, ενώ για τις 4, 6 είναι διαμήκης.



Εικόνα 5.2: Ιστορική φωτογραφία για το Λιμάνι του Πειραιά (ΟΛΠ)

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά συγκεντρώνονται στον Πίνακα 5.2 και σε συνδυασμό με τις οδηγίες PIANC (Εικόνα 2.1) προκύπτουν τα επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος για κάθε θέση παραβολής.

Πίνακας 5.2: Επιτρεπόμενα Ύψη Κύματος για τις θέσεις παραβολής

		Επιτρεπόμενα Όρια Ύψους Κύματος (m)					
		1	2	3	4	5	6
Θέση Παραβολής							
Δράση Κυματισμού		Εγκάρσια	Εγκάρσια	Εγκάρσια	Διαμήκης	Εγκάρσια	Διαμήκης
Κριτήριο	1	1.5	1.5	1.5	2.0	1.5	2.0
	3	0.7	0.7	0.7	1.0	0.7	1.0

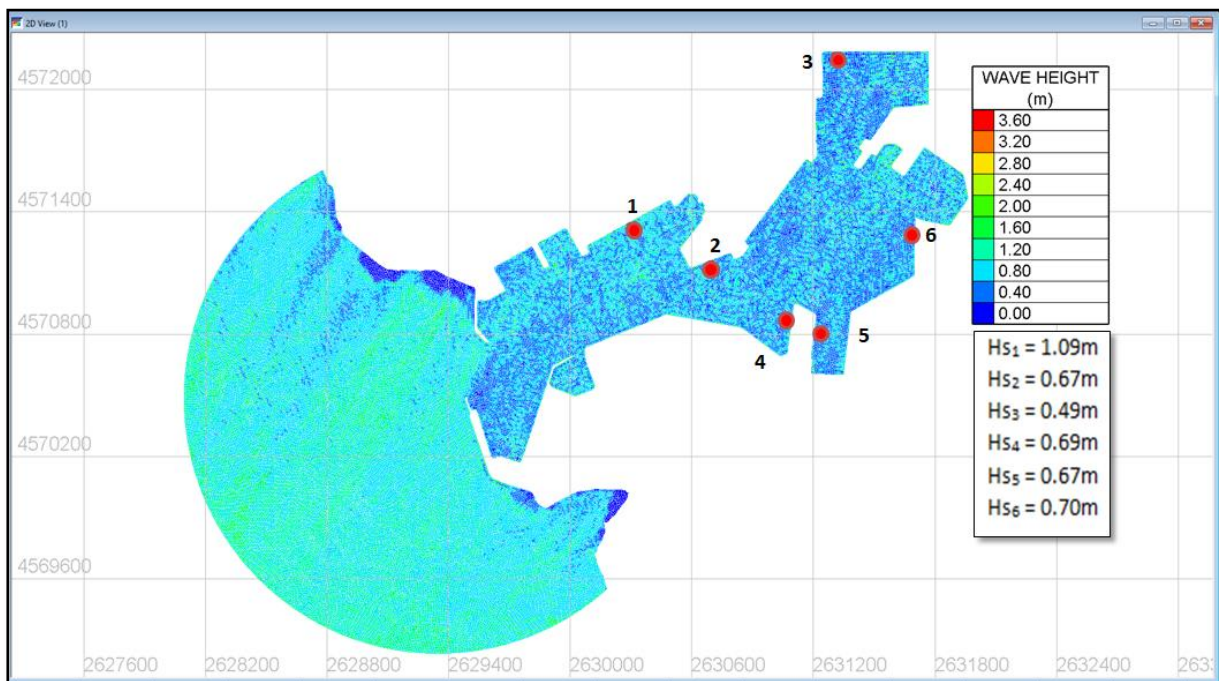
Για τον υπολογισμό των υψών κύματος εντός της λιμενολεκάνης στα σημεία ενδιαφέροντος, γίνεται χρήση του μοντέλου ARTEMIS. Η επιλογή αυτού του μοντέλου οφείλεται στο μικρό πεδίο εφαρμογής, με διαστάσεις λίγων χιλιομέτρων, και στην ικανότητα του να περιγράψει αποτελεσματικά τα φαινόμενα της ανάκλασης, της περίθλασης και της θραύσης, τα οποία κυριαρχούν εντός του λιμένα. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά το θέτουν ιδανικό για την μελέτη της κυματικής διαταραχής εντός της λιμενολεκάνης.

Καθώς η ηρεμία της λιμενολεκάνης εξυπηρετεί καθημερινές ανάγκες του λιμένα, ως οριακές συνθήκες για το μοντέλο ARTEMIS χρησιμοποιούνται τα σενάρια κυματισμού (Πίνακες 4.8, 4.9 και 4.10), τα οποία περιγράφουν το μέσο ετήσιο κλίμα της περιοχής, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.2.3.

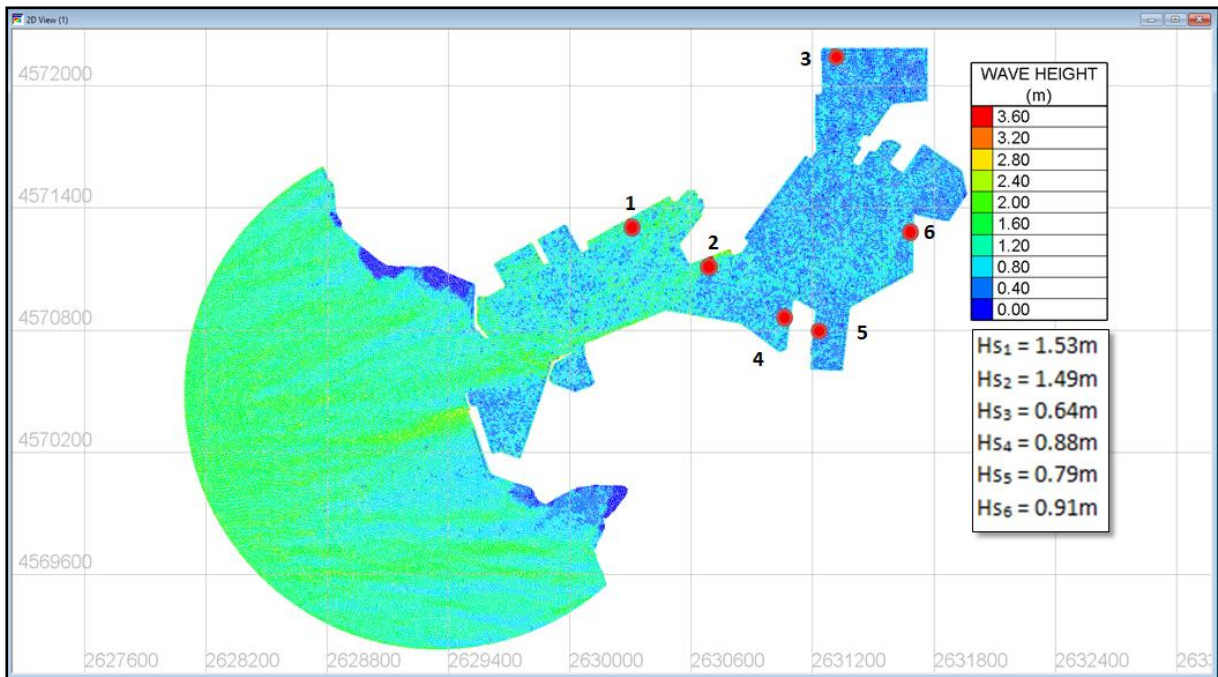
Τα αποτελέσματα του μοντέλου ARTEMIS προκύπτουν με την μορφή χωρικής κατανομής ύψους κύματος, από την οποία εξάγονται οι ζητούμενες τιμές, στις 6 θέσεις παραβολής. Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται και σε αυτή την περίπτωση με την βοήθεια του λογισμικού Blue Kenue.

Οι προσομοιώσεις για το μοντέλο ARTEMIS αφορούν σύνθετους μονοκατευθυντικούς κυματισμούς. Γίνεται χρήση 6 διακριτών περιόδων, με ελάχιστη 1.5s και μέγιστη 8s. Στην 1^η περίπτωση μελέτης, που αγνοείται η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας τέθηκε Initial Water Level = 0 m. Ωστόσο, στην 2^η περίπτωση η μεταβολή της στάθμης λήφθηκε υπόψη ως εξής: για το σενάριο RCP 4.5, Initial Water Level = 0.42m και για το RCP 8.5, Initial Water Level = 0.28 m.

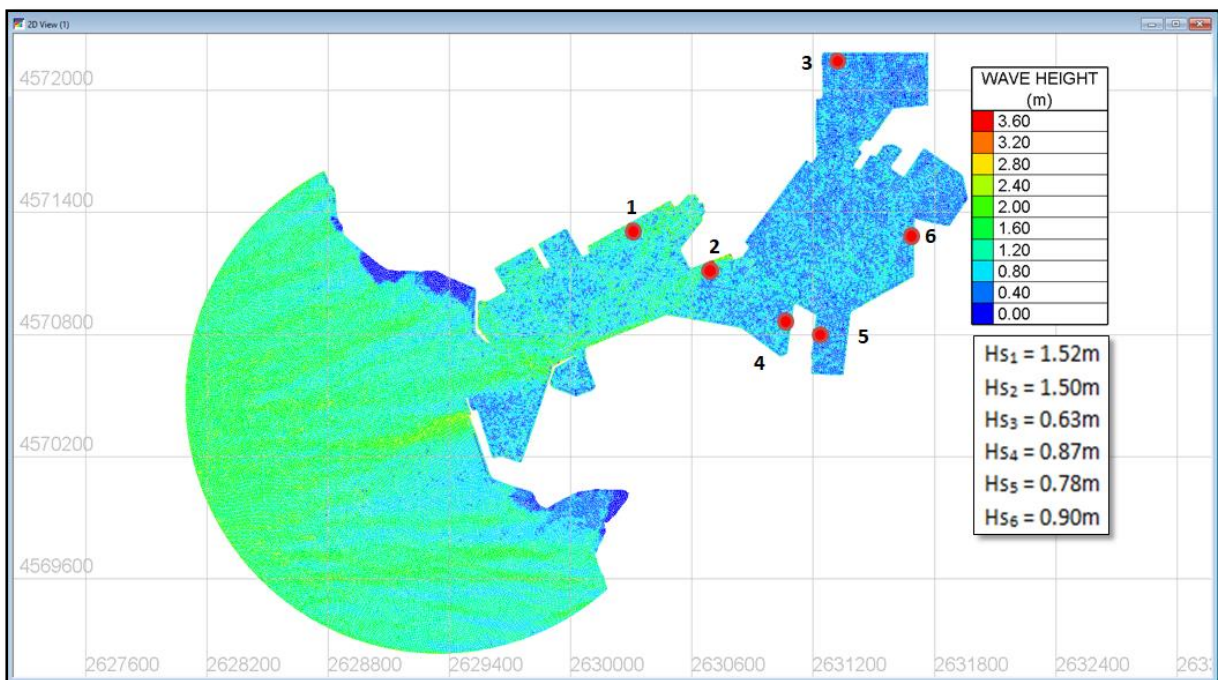
Ενδεικτικά, στα Σχήματα 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 και 5.10 δίνονται οι χωρικές κατανομές ύψους κύματος των δυσμενέστερων σεναρίων για τα δεδομένα HINDCAST και τα σενάρια εκπομπών RCP 4.5, RCP 8.5 για την 1^η (αγνοώντας την άνοδο στάθμης της θάλασσας) και 2^η (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο στάθμης της θάλασσας) περίπτωση μελέτης.



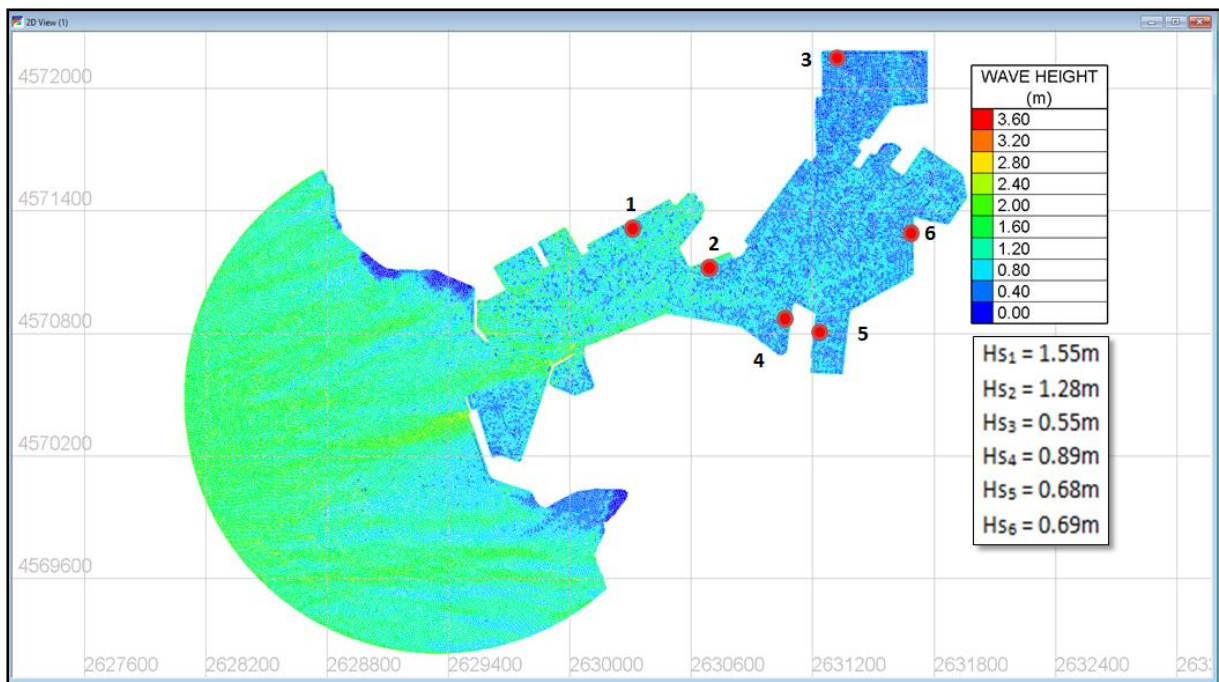
Σχήμα 5.6: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 9 ($H_s=1.15m$, $T_p=5.19sec$, $MWD=212.5^\circ$)



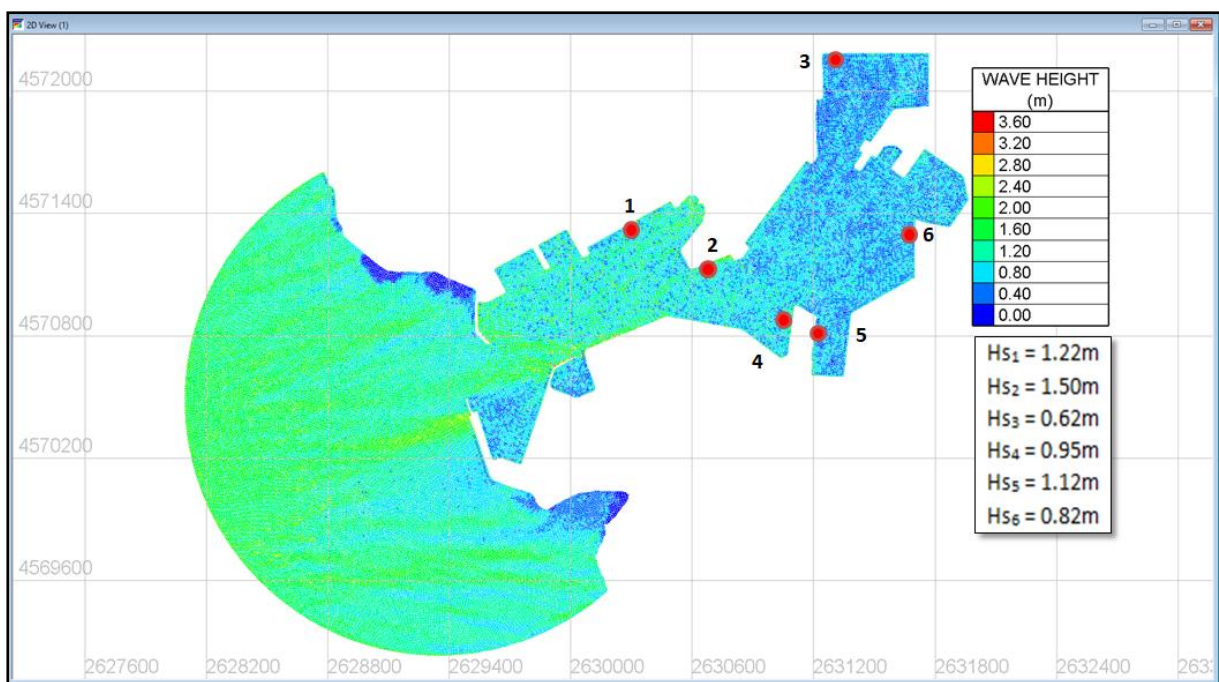
Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 (Hs=1.63m, Tr=4.75sec, MWD=257.5°)



Σχήμα 5.8: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 (Hs=1.66m, Tr=4.72sec, MWD=257.5°)



Σχήμα 5.9: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 (Hs=1.63m, Tr=4.75sec, MWD=257.5°)



Σχήμα 5.10: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 (Hs=1.66m, Tr=4.72sec, MWD=257.5°)

Τα αποτελέσματα για τα υπόλοιπα εξεταζόμενα σενάρια παρατίθενται στους Πίνακες 5.3, 5.4, 5.5, 5.6 και 5.7, ενώ οι χωρικές κατανομές του ύψους κύματος για τα δυσμενέστερα σενάρια κυματισμών ανά διεύθυνση δίνονται στο Παράρτημα Β – Περαιτέρω αποτελέσματα προσομοιώσεων. Με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές ύψους κύματος σε κάθε θέση παραβολής, για όλα τα υπό μελέτη σενάρια.

Η διαταραχή της λιμενολεκάνης παρατηρείται πως είναι μεγαλύτερη για τα σενάρια εκπομπών RCP4.5 και RCP8.5, συγκριτικά με αυτά των δεδομένων HINDCAST. Επίσης, στην περίπτωση των δεδομένων HINDCAST, η μεγαλύτερη αναταραχή της λιμενολεκάνης οφείλεται σε κυματισμούς διεύθυνσης $MWD=212.5^\circ$, ενώ για τα σενάρια RCP σε κυματισμούς διεύθυνσης $MWD=257.5^\circ$. Ακόμη, σχετικά με τις Περιπτώσεις μελέτης 1 και 2, όπου στην πρώτη αγνοείται η άνοδος στάθμης της θάλασσας ενώ στη δεύτερη λαμβάνεται υπόψη, παρατηρούνται μικρές διαφορές στα αποτελέσματα. Συνεπώς, η μεταβλητή της στάθμης της θάλασσας δεν επηρεάζει δραστικά την περιοχή μελέτης. Τα παραπάνω, αναμένεται να εξακριβωθούν και από τα ποσοστά μη ικανοποίησης των κριτηρίων της PIANC για την λειτουργία του λιμένα.

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για τα δεδομένα HINDCAST, με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.

					Ύψος Κύματος (m)						
	Hs(m)	Tp(s)	MWD(°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)	1	2	3	4	5	6	
HINDCAST	1	0.68	4.50	122.5	0.071	0.08	0.05	0.07	0.10	0.06	0.07
	2	1.17	5.21	122.5	0.012	0.09	0.11	0.07	0.10	0.19	0.09
	3	0.69	4.52	167.5	6.821	0.19	0.14	0.11	0.18	0.17	0.12
	4	1.19	5.24	167.5	1.611	0.27	0.35	0.16	0.26	0.21	0.25
	5	1.69	5.76	167.5	0.347	0.34	0.23	0.33	0.42	0.31	0.35
	6	2.19	6.18	167.5	0.061	0.44	0.32	0.37	0.53	0.36	0.31
	7	2.66	6.51	167.5	0.009	0.47	0.53	0.47	0.37	0.72	0.34
	8	0.62	4.39	212.5	0.107	0.48	0.38	0.49	0.48	0.58	0.36
	9	1.15	5.19	212.5	0.005	1.09	0.67	0.49	0.69	0.67	0.70
	10	0.59	4.33	257.5	0.016	0.78	0.86	0.68	0.67	1.06	0.57

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 4.5 - Περίπτωση 1 (αγνοώντας την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.

Περίπτωση 1					Ύψος Κύματος (m)						
	Hs(m)	Tp(s)	MWD(°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)	1	2	3	4	5	6	
RCP 4.5	1	0.68	3.80	122.5	0.257	0.13	0.38	0.09	0.20	0.28	0.14
	2	1.19	4.38	122.5	0.040	0.12	0.33	0.20	0.13	0.12	0.11
	3	1.67	4.78	122.5	0.006	0.16	0.15	0.12	0.12	0.23	0.17
	4	2.16	5.10	122.5	0.001	0.09	0.11	0.07	0.12	0.13	0.07
	5	2.80	5.45	122.5	0.001	0.11	0.14	0.11	0.15	0.21	0.12
	6	0.70	3.84	167.5	3.958	0.25	0.33	0.15	0.27	0.35	0.25
	7	1.20	4.40	167.5	1.254	0.32	0.78	0.37	0.32	0.35	0.17
	8	1.69	4.80	167.5	0.350	0.40	0.59	0.27	0.36	0.53	0.50
	9	2.23	5.15	167.5	0.086	0.42	0.32	0.22	0.31	0.44	0.15
	10	2.71	5.41	167.5	0.023	0.28	0.24	0.22	0.31	0.59	0.26
	11	0.70	3.84	212.5	1.713	0.61	0.32	0.32	0.27	0.56	0.25
	12	1.18	4.38	212.5	0.375	0.70	0.85	0.66	0.58	0.49	0.52

	13	1.67	4.78	212.5	0.073	0.90	0.59	0.81	0.88	0.65	0.71
	14	2.21	5.13	212.5	0.011	0.95	0.90	0.55	0.67	0.61	0.68
	15	2.67	5.39	212.5	0.002	0.94	0.75	0.62	0.54	1.30	0.73
	16	0.67	3.80	257.5	0.972	0.76	0.45	0.49	0.36	1.04	0.63
	17	1.19	4.39	257.5	0.149	1.17	1.35	0.45	0.53	0.65	0.51
	18	1.63	4.75	257.5	0.015	1.53	1.49	0.64	0.88	0.79	0.91

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 8.5 - Περίπτωση 1 (αγνοώντας την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.

Περίπτωση 1						Ύψος Κύματος (m)					
	Hs(m)	Tp(s)	MWD(°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)	1	2	3	4	5	6	
RCP 8.5	1	0.70	3.81	122.5	0.271	0.14	0.07	0.07	0.11	0.11	0.06
	2	1.18	4.34	122.5	0.041	0.24	0.22	0.10	0.13	0.16	0.19
	3	1.65	4.71	122.5	0.009	0.11	0.08	0.11	0.11	0.13	0.09
	4	2.20	5.06	122.5	0.001	0.12	0.13	0.11	0.12	0.12	0.17
	5	0.70	3.81	167.5	3.937	0.21	0.17	0.18	0.18	0.27	0.17
	6	1.20	4.35	167.5	1.186	0.42	0.37	0.19	0.53	0.38	0.46
	7	1.70	4.75	167.5	0.360	0.48	0.20	0.21	0.40	0.38	0.34
	8	2.20	5.06	167.5	0.098	0.36	0.22	0.18	0.23	0.16	0.19
	9	2.69	5.32	167.5	0.023	0.25	0.24	0.18	0.27	0.32	0.31
	10	3.20	5.56	167.5	0.001	0.17	0.22	0.34	0.23	0.40	0.41
	11	3.73	5.78	167.5	0.001	0.19	0.24	0.03	0.16	0.21	0.12
	12	4.08	5.91	167.5	0.001	0.33	0.29	0.29	0.27	0.25	0.18
	13	0.70	3.81	212.5	1.543	0.57	0.25	0.35	0.39	0.49	0.31
	14	1.19	4.34	212.5	0.355	0.73	0.71	0.40	1.03	0.88	0.81
	15	1.68	4.73	212.5	0.075	0.90	0.59	0.81	0.88	0.65	0.71
	16	2.19	5.06	212.5	0.010	1.40	0.93	0.56	0.79	0.94	0.85
	17	2.70	5.33	212.5	0.002	1.31	0.97	0.62	0.82	0.76	0.66
	18	0.68	3.78	257.5	0.999	0.74	0.54	0.49	0.60	0.61	0.51
	19	1.18	4.34	257.5	0.142	1.03	1.00	0.67	0.97	0.85	0.79
	20	1.66	4.72	257.5	0.018	1.52	1.50	0.63	0.87	0.78	0.90

Πίνακας 5.6: Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 4.5 - Περίπτωση 2 (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.

Περίπτωση 2						Ύψος Κύματος (m)					
	Hs(m)	Tr(s)	MWD(°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)	1	2	3	4	5	6	
RCP 4.5	1	0.68	3.80	122.5	0.257	0.11	0.12	0.06	0.09	0.17	0.21
	2	1.19	4.38	122.5	0.040	0.13	0.21	0.08	0.14	0.16	0.15
	3	1.67	4.78	122.5	0.006	0.16	0.15	0.11	0.10	0.28	0.27
	4	2.16	5.10	122.5	0.001	0.10	0.09	0.03	0.06	0.09	0.09
	5	2.80	5.45	122.5	0.001	0.20	0.12	0.09	0.09	0.16	0.09
	6	0.70	3.84	167.5	3.958	0.21	0.26	0.19	0.20	0.26	0.23
	7	1.20	4.40	167.5	1.254	0.40	0.29	0.14	0.28	0.41	0.35
	8	1.69	4.80	167.5	0.350	0.54	0.26	0.33	0.46	0.40	0.32
	9	2.23	5.15	167.5	0.086	0.24	0.23	0.27	0.32	0.30	0.28
	10	2.71	5.41	167.5	0.023	0.59	0.31	0.23	0.26	0.33	0.28
	11	0.70	3.84	212.5	1.713	0.50	0.54	0.45	0.33	0.46	0.64
	12	1.18	4.38	212.5	0.375	0.56	0.82	0.26	0.67	0.68	0.43
	13	1.67	4.78	212.5	0.073	0.94	0.65	0.48	0.50	0.50	0.50
	14	2.21	5.13	212.5	0.011	1.03	0.79	0.58	0.70	0.85	0.58
	15	2.67	5.39	212.5	0.002	1.19	1.13	0.78	0.94	1.73	1.03
	16	0.67	3.80	257.5	0.972	0.60	0.56	0.62	0.99	0.72	0.63
	17	1.19	4.39	257.5	0.149	1.29	1.08	0.38	1.02	0.71	0.72
	18	1.63	4.75	257.5	0.015	1.55	1.28	0.55	0.89	0.68	0.69

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS στις θέσεις παραβολής για το σενάριο εκπομπών RCP 8.5 - Περίπτωση 2 (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο της στάθμης της θάλασσας), με κόκκινο σημειώνονται οι δυσμενέστερες τιμές.

Περίπτωση 2						Ύψος Κύματος (m)					
	Hs(m)	Tr(s)	MWD(°)	Συχνότητα εμφάνισης (%)	1	2	3	4	5	6	
RCP 8.5	1	0.70	3.81	122.5	0.271	0.09	0.08	0.18	0.19	0.12	0.09
	2	1.18	4.34	122.5	0.041	0.23	0.17	0.14	0.29	0.11	0.14
	3	1.65	4.71	122.5	0.009	0.22	0.21	0.17	0.18	0.16	0.15
	4	2.20	5.06	122.5	0.001	0.16	0.10	0.08	0.09	0.09	0.08
	5	0.70	3.81	167.5	3.937	0.21	0.18	0.25	0.19	0.22	0.17
	6	1.20	4.35	167.5	1.186	0.42	0.42	0.34	0.47	0.25	0.31
	7	1.70	4.75	167.5	0.360	0.46	0.39	0.35	0.40	0.74	0.46
	8	2.20	5.06	167.5	0.098	0.36	0.34	0.27	0.30	0.25	0.25
	9	2.69	5.32	167.5	0.023	0.54	0.24	0.24	0.41	0.38	0.26
	10	3.20	5.56	167.5	0.001	0.36	0.22	0.41	0.22	0.13	0.25
	11	3.73	5.78	167.5	0.001	0.28	0.50	0.45	0.36	0.35	0.60
	12	4.08	5.91	167.5	0.001	0.22	0.31	0.20	0.32	0.41	0.25
	13	0.70	3.81	212.5	1.543	0.56	0.25	0.47	0.44	0.43	0.31
	14	1.19	4.34	212.5	0.355	0.75	0.73	0.52	0.78	0.54	0.72
	15	1.68	4.73	212.5	0.075	0.77	0.60	0.83	0.75	0.62	0.66

16	2.19	5.06	212.5	0.010	1.50	1.20	0.77	0.92	0.89	0.98
17	2.70	5.33	212.5	0.002	1.81	0.71	0.59	1.23	1.10	0.94
18	0.68	3.78	257.5	0.999	0.73	0.39	0.53	0.55	0.62	0.24
19	1.18	4.34	257.5	0.142	0.93	1.15	0.71	0.92	0.71	0.56
20	1.66	4.72	257.5	0.018	1.22	1.50	0.62	0.95	1.12	0.82

Έχοντας συγκεντρώσει τα αποτελέσματα του ύψους κύματος στους παραπάνω πίνακες και γνωρίζοντας τη συχνότητα εμφάνισης κάθε εξεταζόμενου σεναρίου, μπορεί να προσδιοριστεί το ποσοστό (%) μη λειτουργίας της κάθε θέσης παραβολής, ανάλογα του εκάστοτε κριτηρίου. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα σε αυτή την ενότητα, η μελέτη αφορά το Κριτήριο 1, που σχετίζεται με τον ελλιμενισμό των πλοίων και το Κριτήριο 3, που αφορά την ασφαλή αγκυροβόληση τους στην αποβάθρα. Τα επιτρεπόμενα όρια για κάθε θέση παραβολής δίνονται στον Πίνακα 5.2. Παρατηρείται πως το Κριτήριο 3 ορίζει αυστηρότερα επιτρεπόμενα όρια και για τον λόγο αυτό, αναμένεται το ποσοστό (%) μη λειτουργίας των θέσεων παραβολής να είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με το Κριτήριο 1.

Στους Πίνακες 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ύψους κύματος σε κάθε θέση παραβολής και σημειώνονται με μπλε επισήμανση και έντονα γράμματα οι τιμές εκείνες που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια για το Κριτήριο 1 και 3 αντίστοιχα. Γνωρίζοντας τη συχνότητα εμφάνισης κάθε εξεταζόμενου σεναρίου προσδιορίζεται το ποσοστό (%) μη λειτουργίας της κάθε θέσης.

Πίνακας 5.8: Υπέρβαση των ορίων της PIANC για το Κριτήριο 1

Κριτήριο 1 - Ελλιμενισμός των πλοίων														
Εξεταζόμενα Σενάρια		FREQ.	1	2	3	4	5	6						
HINDCAST	1	0,071%	0,08	0,05	0,07	0,10	0,06	0,07						
	2	0,012%	0,09	0,11	0,07	0,10	0,19	0,09						
	3	6,821%	0,19	0,14	0,11	0,18	0,17	0,12						
	4	1,611%	0,27	0,35	0,16	0,26	0,21	0,25						
	5	0,347%	0,34	0,23	0,33	0,42	0,31	0,35						
	6	0,061%	0,44	0,32	0,37	0,53	0,36	0,31						
	7	0,009%	0,47	0,53	0,47	0,37	0,72	0,34						
	8	0,107%	0,48	0,38	0,49	0,48	0,58	0,36						
	9	0,005%	1,09	0,67	0,49	0,69	0,67	0,70						
	10	0,016%	0,78	0,86	0,68	0,67	1,06	0,57						
% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ			0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%						
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 - (αγνοώντας την άνοδο στάθμης της θάλασσας)							ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 - (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο στάθμης της θάλασσας)							
ΒΑΣΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ		FREQ.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
RCP_4.5	1	0,257%	0,13	0,38	0,09	0,20	0,28	0,14	0,11	0,12	0,06	0,09	0,17	0,21
	2	0,040%	0,12	0,33	0,20	0,13	0,12	0,11	0,13	0,21	0,08	0,14	0,16	0,15
	3	0,006%	0,16	0,15	0,12	0,12	0,23	0,17	0,16	0,15	0,11	0,10	0,28	0,27
	4	0,001%	0,09	0,11	0,07	0,12	0,13	0,07	0,10	0,09	0,03	0,06	0,09	0,09
	5	0,001%	0,11	0,14	0,11	0,15	0,21	0,12	0,20	0,12	0,09	0,09	0,16	0,09
	6	3,958%	0,25	0,33	0,15	0,27	0,35	0,25	0,21	0,26	0,19	0,20	0,26	0,23
	7	1,254%	0,32	0,78	0,37	0,32	0,35	0,17	0,40	0,29	0,14	0,28	0,41	0,35
	8	0,350%	0,40	0,59	0,27	0,36	0,53	0,50	0,54	0,26	0,33	0,46	0,40	0,32
	9	0,086%	0,42	0,32	0,22	0,31	0,44	0,15	0,24	0,23	0,27	0,32	0,30	0,28
	10	0,023%	0,28	0,24	0,22	0,31	0,59	0,26	0,59	0,31	0,23	0,26	0,33	0,28
	11	1,713%	0,61	0,32	0,32	0,27	0,56	0,25	0,50	0,54	0,45	0,33	0,46	0,64
	12	0,375%	0,70	0,85	0,66	0,58	0,49	0,52	0,56	0,82	0,26	0,67	0,68	0,43
	13	0,073%	0,90	0,59	0,81	0,88	0,65	0,71	0,94	0,65	0,48	0,50	0,50	0,50
	14	0,011%	0,95	0,90	0,55	0,67	0,61	0,68	1,03	0,79	0,58	0,70	0,85	0,58
	15	0,002%	0,94	0,75	0,62	0,54	1,30	0,73	1,19	1,13	0,78	0,94	1,73	1,03
	16	0,972%	0,76	0,45	0,49	0,36	1,04	0,63	0,60	0,56	0,62	0,99	0,72	0,63
	17	0,149%	1,17	1,35	0,45	0,53	0,65	0,51	1,29	1,08	0,38	1,02	0,71	0,72
	18	0,015%	1,53	1,49	0,64	0,88	0,79	0,91	1,55	1,28	0,55	0,89	0,68	0,69
% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ			0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 - (αγνοώντας την άνοδο στάθμης της θάλασσας)							ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 - (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο στάθμης της θάλασσας)							
ΒΑΣΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ		FREQ.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
RCP_8.5	1	0,271%	0,14	0,07	0,07	0,11	0,11	0,06	0,09	0,08	0,18	0,19	0,12	0,09
	2	0,041%	0,24	0,22	0,10	0,13	0,16	0,19	0,23	0,17	0,14	0,29	0,11	0,14
	3	0,009%	0,11	0,08	0,11	0,11	0,13	0,09	0,22	0,21	0,17	0,18	0,16	0,15
	4	0,000%	0,12	0,13	0,11	0,12	0,12	0,17	0,16	0,10	0,08	0,09	0,09	0,08
	5	3,937%	0,21	0,17	0,18	0,18	0,27	0,17	0,21	0,18	0,25	0,19	0,22	0,17
	6	1,186%	0,42	0,37	0,19	0,53	0,38	0,46	0,42	0,42	0,34	0,47	0,25	0,31
	7	0,360%	0,48	0,20	0,21	0,40	0,38	0,34	0,46	0,39	0,35	0,40	0,74	0,46
	8	0,098%	0,36	0,22	0,18	0,23	0,16	0,19	0,36	0,34	0,27	0,30	0,25	0,25
	9	0,023%	0,25	0,24	0,18	0,27	0,32	0,31	0,54	0,24	0,24	0,41	0,38	0,26
	10	0,001%	0,17	0,22	0,34	0,23	0,40	0,41	0,36	0,22	0,41	0,22	0,13	0,25
	11	0,001%	0,19	0,24	0,03	0,16	0,21	0,12	0,28	0,50	0,45	0,36	0,35	0,60
	12	0,001%	0,33	0,29	0,29	0,27	0,25	0,18	0,22	0,31	0,20	0,32	0,41	0,25
	13	1,543%	0,57	0,25	0,35	0,39	0,49	0,31	0,56	0,25	0,47	0,44	0,43	0,31
	14	0,355%	0,73	0,71	0,40	1,03	0,88	0,81	0,75	0,73	0,52	0,78	0,54	0,72
	15	0,075%	0,90	0,59	0,81	0,88	0,65	0,71	0,77	0,60	0,83	0,75	0,62	0,66
	16	0,010%	1,40	0,93	0,56	0,79	0,94	0,85	1,50	1,20	0,77	0,92	0,89	0,98
	17	0,002%	1,31	0,97	0,62	0,82	0,76	0,66	1,81	0,71	0,59	1,23	1,10	0,94
	18	0,999%	0,74	0,54	0,49	0,60	0,61	0,51	0,73	0,39	0,53	0,55	0,62	0,24
	19	0,142%	1,03	1,00	0,67	0,97	0,85	0,79	0,93	1,15	0,71	0,92	0,71	0,56
	20	0,018%	1,52	1,50	0,63	0,87	0,78	0,90	1,22	1,50	0,62	0,95	1,12	0,82
% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ			0,02%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Πίνακας 5.9: Υπέρβαση των ορίων της PIANC για το Κριτήριο 3

Κριτήριο 3 - Αγκυροβόληση στον προβλήτα														
Εξεταζόμενα Σενάρια		FREQ.	1	2	3	4	5	6						
HINDCAST	1	0,071%	0,08	0,05	0,07	0,10	0,06	0,07						
	2	0,012%	0,09	0,11	0,07	0,10	0,19	0,09						
	3	6,821%	0,19	0,14	0,11	0,18	0,17	0,12						
	4	1,611%	0,27	0,35	0,16	0,26	0,21	0,25						
	5	0,347%	0,34	0,23	0,33	0,42	0,31	0,35						
	6	0,061%	0,44	0,32	0,37	0,53	0,36	0,31						
	7	0,009%	0,47	0,53	0,47	0,37	0,72	0,34						
	8	0,107%	0,48	0,38	0,49	0,48	0,58	0,36						
	9	0,005%	1,09	0,67	0,49	0,69	0,67	0,70						
	10	0,016%	0,78	0,86	0,68	0,67	1,06	0,57						
% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ			0,02%	0,02%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%						
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 - (αγνοώντας την άνοδο στάθμης της θάλασσας)									ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 - (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο στάθμης της θάλασσας)					
ΒΑΣΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ		FREQ.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
RCP_4_5	1	0,257%	0,13	0,38	0,09	0,20	0,28	0,14	0,11	0,12	0,06	0,09	0,17	0,21
	2	0,040%	0,12	0,33	0,20	0,13	0,12	0,11	0,13	0,21	0,08	0,14	0,16	0,15
	3	0,006%	0,16	0,15	0,12	0,12	0,23	0,17	0,16	0,15	0,11	0,10	0,28	0,27
	4	0,001%	0,09	0,11	0,07	0,12	0,13	0,07	0,10	0,09	0,03	0,06	0,09	0,09
	5	0,001%	0,11	0,14	0,11	0,15	0,21	0,12	0,20	0,12	0,09	0,09	0,16	0,09
	6	3,958%	0,25	0,33	0,15	0,27	0,35	0,25	0,21	0,26	0,19	0,20	0,26	0,23
	7	1,254%	0,32	0,38	0,37	0,32	0,35	0,17	0,40	0,29	0,14	0,28	0,41	0,35
	8	0,350%	0,40	0,59	0,27	0,36	0,53	0,50	0,54	0,26	0,33	0,46	0,40	0,32
	9	0,086%	0,42	0,32	0,22	0,31	0,44	0,15	0,24	0,23	0,27	0,32	0,30	0,28
	10	0,023%	0,28	0,24	0,22	0,31	0,59	0,26	0,59	0,31	0,23	0,26	0,33	0,28
	11	1,713%	0,61	0,32	0,32	0,27	0,56	0,25	0,50	0,54	0,45	0,33	0,46	0,64
	12	0,375%	0,69	0,85	0,66	0,58	0,49	0,52	0,56	0,82	0,26	0,67	0,68	0,43
	13	0,073%	0,90	0,59	0,81	0,88	0,65	0,71	0,94	0,65	0,48	0,50	0,50	0,50
	14	0,011%	0,95	0,90	0,55	0,67	0,61	0,68	1,03	0,79	0,58	0,70	0,85	0,58
	15	0,002%	0,94	0,75	0,62	0,54	1,30	0,73	1,19	1,13	0,78	0,94	1,73	1,03
	16	0,972%	0,76	0,45	0,49	0,36	1,04	0,63	0,60	0,56	0,62	0,99	0,72	0,63
	17	0,149%	1,17	1,35	0,45	0,53	0,65	0,51	1,29	1,08	0,38	1,02	0,71	0,72
	18	0,015%	1,53	1,49	0,64	0,88	0,79	0,91	1,55	1,28	0,55	0,89	0,68	0,69
% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ			1,22%	0,55%	0,07%	0,00%	0,99%	0,00%	1,22%	0,55%	0,00%	0,15%	1,13%	0,00%
ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 1 - (αγνοώντας την άνοδο στάθμης της θάλασσας)									ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ 2 - (λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο στάθμης της θάλασσας)					
ΒΑΣΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ		FREQ.	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
RCP_8_5	1	0,271%	0,14	0,07	0,07	0,11	0,11	0,06	0,09	0,08	0,18	0,19	0,12	0,09
	2	0,041%	0,24	0,22	0,10	0,13	0,16	0,19	0,23	0,17	0,14	0,29	0,11	0,14
	3	0,009%	0,11	0,08	0,11	0,11	0,13	0,09	0,22	0,21	0,17	0,18	0,16	0,15
	4	0,000%	0,12	0,13	0,11	0,12	0,12	0,17	0,16	0,10	0,08	0,09	0,09	0,08
	5	3,937%	0,21	0,17	0,18	0,18	0,27	0,17	0,21	0,18	0,25	0,19	0,22	0,17
	6	1,186%	0,42	0,37	0,19	0,53	0,38	0,46	0,42	0,42	0,34	0,47	0,25	0,31
	7	0,360%	0,48	0,20	0,21	0,40	0,38	0,34	0,46	0,39	0,35	0,40	0,74	0,46
	8	0,098%	0,36	0,22	0,18	0,23	0,16	0,19	0,36	0,34	0,27	0,30	0,25	0,25
	9	0,023%	0,25	0,24	0,18	0,27	0,32	0,31	0,54	0,24	0,24	0,41	0,38	0,26
	10	0,001%	0,17	0,22	0,34	0,23	0,40	0,41	0,36	0,22	0,41	0,22	0,13	0,25
	11	0,001%	0,19	0,24	0,03	0,16	0,21	0,12	0,28	0,50	0,45	0,36	0,35	0,60
	12	0,001%	0,33	0,29	0,29	0,27	0,25	0,18	0,22	0,31	0,20	0,32	0,41	0,25
	13	1,543%	0,57	0,25	0,35	0,39	0,49	0,31	0,56	0,25	0,47	0,44	0,43	0,31
	14	0,355%	0,73	0,71	0,40	1,03	0,88	0,81	0,75	0,73	0,52	0,78	0,54	0,72
	15	0,075%	0,90	0,59	0,81	0,88	0,65	0,71	0,77	0,60	0,83	0,75	0,62	0,66
	16	0,010%	1,40	0,93	0,56	0,79	0,94	0,85	1,50	1,20	0,77	0,92	0,89	0,98
	17	0,002%	1,31	0,97	0,62	0,82	0,76	0,66	1,81	0,71	0,59	1,23	1,10	0,94
	18	0,999%	0,74	0,54	0,49	0,60	0,61	0,51	0,73	0,39	0,53	0,55	0,62	0,24
	19	0,142%	1,03	1,00	0,67	0,97	0,85	0,79	0,93	1,15	0,71	0,92	0,71	0,56
	20	0,018%	1,52	1,50	0,63	0,87	0,78	0,90	1,22	1,50	0,62	0,95	1,12	0,82
% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ			1,60%	0,53%	0,07%	0,35%	0,53%	0,00%	1,60%	0,53%	0,23%	0,36%	0,53%	0,01%

Τα ποσοστά (%) μη λειτουργίας της κάθε θέσης παραβολής για τα Κριτήρια 1 και 3 αντίστοιχα, σε όλα τα υπό μελέτη σενάρια, δίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 5.10.

Πίνακας 5.10: Ποσοστό (%) μη λειτουργίας του λιμένα για τα Κριτήρια 1 & 3 της PIANC.

ΚΡΙΤΗΡΙΟ 1		% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΆΘΕ ΘΕΣΗΣ ΠΑΡΑΒΟΛΗΣ						Άθροισμα μη λειτουργίας
		1	2	3	4	5	6	
HINDCAST		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00%
1 ^η Περίπτωση	RCP4.5	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02%
	RCP8.5	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04%
2 ^η Περίπτωση	RCP4.5	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02%
	RCP8.5	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04%
ΚΡΙΤΗΡΙΟ 3		% ΜΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΆΘΕ ΘΕΣΗΣ ΠΑΡΑΒΟΛΗΣ						Άθροισμα μη λειτουργίας
		1	2	3	4	5	6	
HINDCAST		0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.05%
1 ^η Περίπτωση	RCP4.5	1.22	0.55	0.07	0.00	0.99	0.00	2.84%
	RCP8.5	1.60	0.53	0.07	0.35	0.53	0.00	3.08%
2 ^η Περίπτωση	RCP4.5	1.22	0.55	0.00	0.15	1.13	0.00	3.06%
	RCP8.5	1.60	0.53	0.23	0.36	0.53	0.01	3.25%

Τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.10 επιβεβαιώνουν τις αρχικές εκτιμήσεις που προέκυψαν από την σύγκριση των χωρικών κατανομών ύψους κύματος για τα δυσμενέστερα σενάρια. Αρχικά, παρατηρείται πως τα σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5 προκαλούν μεγαλύτερο ποσοστό (%) μη λειτουργίας του λιμένα, και για τα δύο κριτήρια λειτουργίας, συγκριτικά με τα σενάρια που προέκυψαν από τα δεδομένα HINDCAST. Επίσης, φαίνεται πως η εισαγωγή της μεταβλητής της ανόδου της στάθμης της θάλασσας στη μελέτη της ηρεμίας της λιμενολεκάνης του Πειραιά δεν επηρεάζει δραστικά τα αποτελέσματα. Τέλος, για την ικανοποίηση των επιτρεπόμενων ορίων ύψους κύματος της PIANC, για την ασφαλή αγκυροβόληση των πλοίων στον προβλήτα (Κριτήριο 3), απαιτείται ο λιμένας να βρίσκεται εκτός λειτουργίας για περίπου 11 ημέρες τον χρόνο, σύμφωνα με τη δυσμενέστερη περίπτωση που εξετάστηκε (σενάριο RCP 8.5, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της στάθμης της θάλασσας), ενώ το ποσοστό (%) μη λειτουργίας για την ικανοποίηση των ορίων για τον ελλιμενισμό των πλοίων, είναι σχεδόν μηδενικό.

6 Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στο Λιμάνι του Πειραιά. Η μελέτη χωρίστηκε σε δύο κλάδους, στα εξωτερικά προστατευτικά έργα και στην ηρεμία της λιμενολεκάνης. Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής προσομοιώθηκε μέσω των σεναρίων εκπομπών της IPCC, RCP 4.5 (ευμενές σενάριο) και RCP 8.5 (δυσμενές σενάριο), ενώ παράλληλα αξιοποιήθηκαν δεδομένα HINDCAST από την βάση του Copernicus για σύγκριση. Τα σενάρια εκπομπών μελετήθηκαν για δύο περιπτώσεις, όπου αρχικά αγνοήθηκε η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, ενώ έπειτα λήφθηκε υπόψη. Οι αριθμητικές προσομοιώσεις κυματικής διάδοσης πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του λογισμικού ανοιχτού κώδικα Telemac – Mascaret και συγκεκριμένα των μοντέλων TOMAWAC και ARTEMIS. Για τον προσδιορισμό της ηρεμίας της λιμενολεκάνης χρησιμοποιήθηκαν τα επιτρεπόμενα όρια ύψους κύματος που προτείνονται από τις οδηγίες της PIANC και εν συνεχεία ορίστηκαν τα ποσοστά (%) μη λειτουργίας του λιμένα.

Η μελέτη των εξωτερικών έργων βασίστηκε στο κύμα σχεδιασμού για περίοδο επαναφοράς 100 ετών που προέκυψε από την κατανομή Gumbel. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα σενάρια εκπομπών RCP 4.5 και RCP 8.5 είναι αρκετά μεγαλύτερα από αυτά που προέκυψαν από τα HINDCAST δεδομένα. Συγκεκριμένα, τα δυσμενέστερα ύψη κύματος που εμφανίζονται στο Βόρειο κυματοθραύστη είναι: $H_{HINDCAST}=1.11m$, $H_{RCP4.5}=2.27m$, $H_{RCP8.5}=2.15m$ και αντιστοίχως στο Νότιο: $H_{HINDCAST}=1.77m$, $H_{RCP4.5}=2.67m$, $H_{RCP8.5}=2.52m$. Επίσης, τα δυσμενέστερα ύψη κύματος στον πόδα των εξωτερικών έργων εμφανίζονται για κύμα σχεδιασμού με εύρος διευθύνσεων $[190^{\circ}-235^{\circ})$ για την περίπτωση του σεναρίου εκπομπών RCP 4.5 και $[145^{\circ}-190^{\circ})$ για τα δεδομένα HINDCAST.

Η μελέτη της ηρεμίας της λιμενολεκάνης βασίστηκε στο μέσο ετήσιο κυματικό κλίμα της περιοχής το οποίο εκφράζεται μέσω των εξεταζόμενων κυματικών σεναρίων. Τα ύψη κύματος εντός του λιμένα υπολογίστηκαν για συγκεκριμένες θέσεις παραβολής σκαφών και συγκρίθηκαν με τα επιτρεπόμενα όρια που ορίζουν οι οδηγίες PIANC για κάθε κριτήριο. Αντιστοίχως, η διαταραχή της λιμενολεκάνης είναι μεγαλύτερη για τα σενάρια εκπομπών RCP, συγκριτικά με τη διαταραχή που προκαλείται από τα δεδομένα HINDCAST. Η μεγαλύτερη αναταραχή της λιμενολεκάνης προκύπτει από σενάρια κυματισμού με εύρος διευθύνσεων $[235^{\circ}-280^{\circ})$ για τα σενάρια εκπομπών και $[190^{\circ}-235^{\circ})$ για τα δεδομένα HINDCAST. Ακόμη, η εισαγωγή της μεταβλητής της αύξησης της στάθμης της θάλασσας (κατά την Περίπτωση 2) προκαλεί ελάχιστες διαφορές στα αποτελέσματα και συνεπώς δεν επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της λειτουργίας της λιμενολεκάνης του Πειραιά. Πιο συγκεκριμένα, για την ικανοποίηση των επιτρεπόμενων ορίων ύψους κύματος της PIANC, για το Κριτήριο 3, που αφορά την ασφαλή αγκυροβόληση των πλοίων στην αποβάθρα, ο λιμένας τίθεται εκτός λειτουργίας για περίπου 11 ημέρες το χρόνο, κατά το δυσμενέστερο σενάριο (σενάριο εκπομπών RCP 8.5, λαμβάνοντας υπόψη την άνοδο στάθμης της θάλασσας), ενώ το ποσοστό (%) μη λειτουργίας για την ικανοποίηση του Κριτηρίου 1, σχετικά με τον ασφαλή ελλιμενισμό των πλοίων, είναι πρακτικά μηδενικό για όλες τις περιπτώσεις.

Συμπερασματικά, η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στον επιβατικό Λιμένα του Πειραιά είναι αισθητή, καθώς τα υπό μελέτη σενάρια εκπομπών RCP προκαλούν μεγαλύτερα ύψη κύματος στον πόδα των εξωτερικών προστατευτικών έργων και μεγαλύτερη αναταραχή της λιμενολεκάνης, συγκριτικά με τα δεδομένα HINDCAST.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το Λιμάνι του Πειραιά είναι από τα σημαντικότερα λιμάνια ως προς την διαχείριση εμπορευματοκιβωτίων εξαιτίας της στρατηγικής του θέσης. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο οι εργασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης των εμπορευμάτων να πραγματοποιούνται απροβλημάτιστα, με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Σκόπιμη θεωρείται η εφαρμογή της παρούσας μελέτης στον εμπορικό λιμένα του Πειραιά, μελετώντας την αναταραχή στις θέσεις παραβολής των εμπορικών πλοίων και πως αυτή επηρεάζεται από την κλιματική αλλαγή. Για τον καθορισμό του ποσοστού (%) μη λειτουργίας του εμπορικού λιμένα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το Κριτήριο 2 της PIANC, και αν αυτό κριθεί απαγορευτικό να προταθεί η κατασκευή προστατευτικών έργων.

Για το υπό μελέτη τμήμα του Λιμένα του Πειραιά και για τον ορθότερο προσδιορισμό της ηρεμίας της λιμενολεκάνης, θα ήταν σκόπιμο να διαχωριστούν τα swell (αποθάλασσες). Αυτά, αφορούν ανεμογενείς κυματισμούς με περιόδους έως 30 sec και δημιουργούνται εξαιτίας της μετατόπισης των υγρών μορίων από τη θέση ισορροπίας τους λόγω του ανέμου. Όταν οι κυματισμοί αυτοί απομακρύνονται από τη περιοχή δημιουργίας τους τείνουν να αποκτούν μεγάλη κυρτότητα και περιόδους από 12 – 30 sec. Οι μεγάλοι περίοδοι και τα μεγάλα μήκη κύματος που τα χαρακτηρίζουν είναι ικανά να δημιουργήσουν σοβαρές αναταραχές στη ναυσιπλοΐα.

Τέλος, εκτός από τους ανεμογενείς κυματισμούς που διαταράσσουν την ηρεμία της λιμενολεκάνης, σημαντική επιρροή έχουν και οι μακρές ταλαντώσεις (seiches) και θα είχε ενδιαφέρον να διερευνηθεί η επίδρασή τους εφόσον υπάρχουν κατάλληλα δεδομένα. Αφορούν στάσιμους κυματισμούς που χαρακτηρίζονται από μεγάλη περίοδο (άνω των 30 sec). Εμφανίζονται κυρίως εντός κλειστών λιμενολεκάνων και κόλπων και είναι υπεύθυνοι για την εμφάνιση του φαινομένου του συντονισμού. Αριθμητικά μοντέλα, όπως το ARTEMIS, που χρησιμοποιούν τη μέθοδο διακριτοποίησης στη φάση, παρέχουν τη δυνατότητα προσομοιώσεων με στόχο τη διερεύνηση φαινομένων συντονισμού στη λιμενολεκάνη, επιλύοντας επαναληπτικά τις εξισώσεις, για κάθε εισερχόμενο ύψος κύματος για ένα εύρος περιόδων.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Battjes J.A. and Janssen J.P.F.M., (1978), Energy loss and set-up due to breaking of random waves, In proceedings of the 16th International Conference on Coastal Engineering, Hamburg

Berkhoff, J., (1972), Mathematical models for simple harmonic linear water waves: Wave diffraction and refraction, Netherlands

Booij N., (1981), Gravity waves on water with non-uniform depth and current, PhD thesis, Netherlands, Technical University of Delft

Church, J. J., (2011), Understanding and projecting sea level change, Oceanography

Coles. S, (2001), An introduction to statistical modelling of extreme values, Berlin

De Girolamo, P., Kostense, J.K. and Dingemans, M.W., (1988), Inclusion of wave breaking in a mild slope model, International Conference on Computer Modelling in Ocean Engineering, Venice

ECMWF, (2020), Product user guide for sea level and ocean wave products - time series and indicators

Europe Direct Piraeus, (2021), Green C Ports: Ο Πειραιάς λιμάνι φιλικό στο περιβάλλον

Eurostat, (2020), Eurostat Statistics Explained

Fisher R and Tippett, (1928), Fisher-Tippet Theorem

Hall, J. A., (2016), Regional Sea Level Scenarios for Coastal Risk Management: Managing the Uncertainty of Future Sea Level Change and Extreme Water Levels for Department of Defense Coastal Sites Worldwide, Alexandria

IPCC, (2007), Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, (2014), Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I,II,III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC, (2021), The Physical Science Basis, Contribution of Working Group 1 to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Losada, M., (2011), Coastal Evolution, Sea Level, and Assessment of Intrinsic Uncertainty.

Maron, P., (2015), Tutorial Manual for the Mesher in Blue Kenue, Canada

Mises, V., (1954), La distribution de la plus grande de valeurs, pp 271-294

PIANC REPORT N° 121, (2014), Harbour Approach Channel Guidelines, Bruxelles

Putnam, J.A. and Johnson, J.W., (1949), The dissipation of wave energy by bottom friction, A.G.U.

Thompson, E. H. (1996), Validation of numerical model for wind waves and swell in harbours

UNFCCC, (2014), Sixth National Communication and First Biennial Report from the European Union Under the UN Framework Convention on Climate Change.

Γαλιατσάτου, Π. (2009), Στατιστικές Μέθοδοι Προσομοίωσης Ακραίων Γεγονότων σελ. 39-57, Θεσσαλονίκη

Δρ. Καϊμάκη Στέλλα, Γ. Ε., (2022), Περιφερειακό Σχέδιο για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠεΣΠΚΑ) Αττικής.

Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, (2016), Συμφωνία των Παρισίων για την Κλιματική Αλλαγή.

Κρεστενίτης, Γ. Ν., (2021), Κλιματική Αλλαγή: Μεταβολές στάθμης θάλασσας και παράκτιες πλημμύρες, Θεσσαλονίκη

Μέμος, Κ. (2013), Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, Αθήνα

Ιστοσελίδες

Artemis User Manual: http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=user_manual_artemis

Tomawac User Manual: http://wiki.opentelemac.org/doku.php?id=user_manual_tomawac

Βάση Δεδομένων Copernicus Climate Change Service (C3S):
<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Βάση Δεδομένων Copernicus Marine Service (CMS): <https://marine.copernicus.eu/>

Εικόνα 2.3: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/>

Εικόνα 4.1: <https://earth.google.com/web/>

Εικόνα 4.2: <https://www.pcdc.com.gr/services/ypiresies-efodiastikis-alycidas/>

Εικόνα 4.8: <https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@12&key=%7BlpfFepeoC>

Ζώνες δραστηριότητας Λιμένα Πειραιά: <https://www.olp.gr/el/o-organismos/stratigiki-orama>

Πίνακας 2.1: http://www.kee.gr/perivallontiki/teacher6_4.html

Παράρτημα Α – Αρχεία εισόδου

- Αρχείο οδήγησης του μοντέλου TOMAWAC

```

/*****
/  STEERING FILE
/  TOMAWAC
/
/*****
/-----
/  FILES
/-----
GEOMETRY FILE = 'geometry.slf'
BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'bounds tomawac.cli'
2D RESULTS FILE = 'Gumbell 1 RCP 4.5.slf'
/FORTRAN FILE = 'user fortran'
/-----
/ INPUTS - OUTPUTS
/-----
TITLE = 'Students Implementation'
PERIOD FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 4
VARIABLES FOR 2D GRAPHIC PRINTOUTS = HM0,DMOY,TPR5,ZF,WD,VX,VY
PERIOD FOR LISTING PRINTOUTS = 1
SPHERICAL COORDINATES = NO
LIMIT SPECTRUM MODIFIED BY USER = NO
/FORMATTED FILE 1='Boundary wav.txt'
/-----
/ DISCRETISATION
/-----
MINIMAL FREQUENCY = 0.05
FREQUENTIAL RATIO = 1.1007
NUMBER OF FREQUENCIES = 24
NUMBER OF DIRECTIONS = 36
TIME STEP = 100.
NUMBER OF TIME STEP = 108
/-----
/ INITIAL CONDITIONS
/-----
/TYPE OF INITIAL DIRECTIONAL SPECTRUM = 6
/INITIAL SIGNIFICANT WAVE HEIGHT = 0.05
/INITIAL PEAK FREQUENCY = 0.222
/INITIAL PEAK FACTOR = 3.3
/INITIAL DIRECTIONAL SPREAD 1 = 3.
/INITIAL MAIN DIRECTION 1 = 0.
/-----
/ BOUNDARY CONDITIONS
```

```

/-----
TYPE OF BOUNDARY DIRECTIONAL SPECTRUM = 6
BOUNDARY SIGNIFICANT WAVE HEIGHT = 2.69
BOUNDARY PEAK FREQUENCY = 0.132
BOUNDARY PEAK FACTOR = 3.3
BOUNDARY DIRECTIONAL SPREAD 1 = 3.
BOUNDARY MAIN DIRECTION 1 = 302.5
/-----
/OPTIONS
/-----
MINIMUM WATER DEPTH = 0.01
INFINITE DEPTH = NO
CONSIDERATION OF SOURCE TERMS = YES
BOTTOM FRICTION DISSIPATION = 1
/-----DEFERLEMENT
NUMBER OF BREAKING TIME STEPS = 6
/----- 1 : Battjes et Janssen (1978)
/----- 2 : Thornton et Guza (1983)
DEPTH-INDUCED BREAKING DISSIPATION = 2
DEPTH-INDUCED BREAKING 2 (TG) WEIGHTING FUNCTION = 2
DEPTH-INDUCED BREAKING 2 (TG) CHARACTERISTIC FREQUENCY = 5
DEPTH-INDUCED BREAKING 2 (TG) COEFFICIENT B = 1.0
DEPTH-INDUCED BREAKING 2 (TG) COEFFICIENT GAMMA = 0.6
/
/-----
/WIND
/-----
NUMBER OF ITERATIONS FOR THE SOURCE TERMS = 3
CONSIDERATION OF PROPAGATION = YES
NON-LINEAR TRANSFERS BETWEEN FREQUENCIES = 1
/-----
/WATER LEVELS
/-----
INITIAL STILL WATER LEVEL = 0.00
&FIN

```

- Αρχείο οδήγησης για το μοντέλο ARTEMIS

```

/-----
/ARTEMIS
/AGITATION IN PORT PATRAS - MONODIRECTIONAL RANDOM WAVE
/-----
/
/-----
/FILES
/-----
/
/
RESULTS FILE      ='r2d peiraias full monodir 1 RCP4.5.slf'
/
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='bounds refl 1 rcp45.cli'
/
GEOMETRY FILE      ='geometry.slf'
/
/TOMAWAC DATA FILE 1  ='patra3 utm.spe'
/
/-----
/INPUTS,GENERALS
/-----
/
TITLE =' WAVE AGITATION IN PORT OF PEIRAIAS'
/
/LATITUDE OF ORIGIN POINT = 23.597691
/LONGITUDE OF ORIGIN POINT = 37.840042
WAVE HEIGHTS SMOOTHING      = NO
/
GRAPHIC PRINTOUT PERIOD = 1
/
VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS ='HS,PHAS,ZF,ZS,C,CG,QB,INC'
/
/-----
/EQUATIONS-INITIAL CONDITIONS
/-----
INITIAL CONDITIONS ='CONSTANT ELEVATION'
/
INITIAL WATER LEVEL      =0.
/
RAPIDLY VARYING TOPOGRAPHY = 3
/-----
/NUMERICAL PARAMETERS
/-----
MATRIX STORAGE =3

```

```

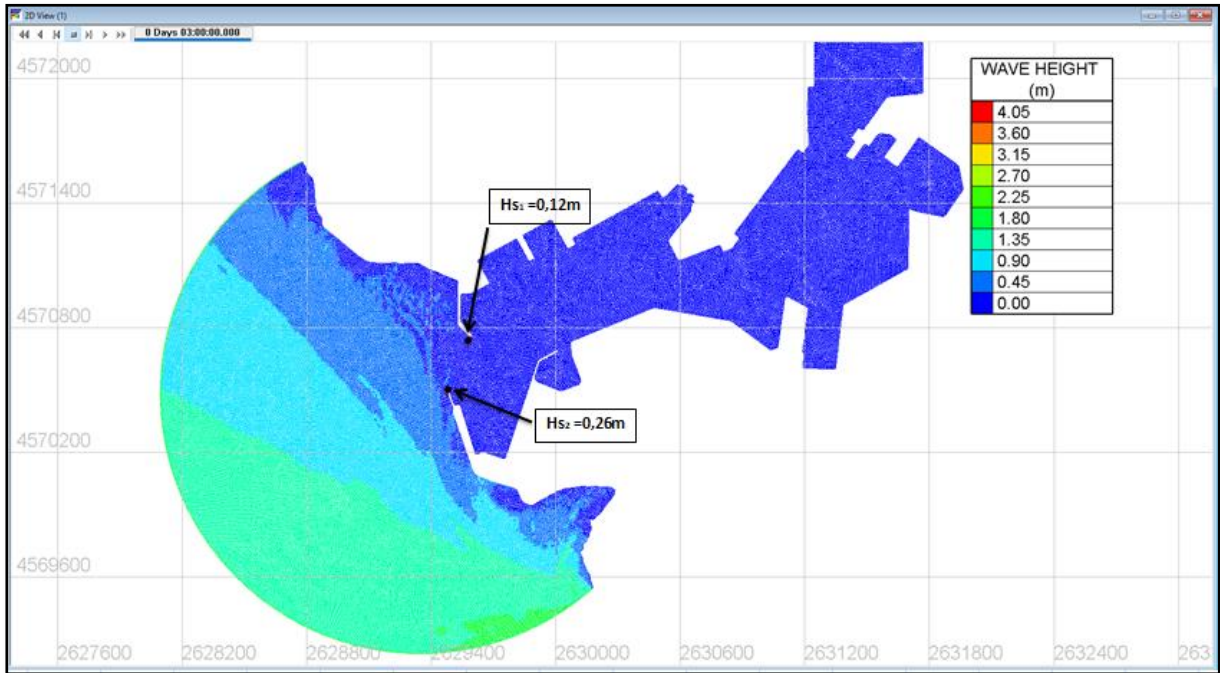
/
/-----
/PERIOD SCANNING
/-----
/PERIOD SCANNING = NO
/BEGINNING PERIOD FOR PERIOD SCANNING = 2
/ENDING PERIOD FOR PERIOD SCANNING = 20
/STEP FOR PERIOD SCANNING = 2
/-----
/SOLVER OPTIONS
/-----
/
/SOLVER =8
/
/CHAINING TOMAWAC 1= NO
/-----
/PHYSICAL PARAMETERS
/-----
/
/BREAKING = YES
/
/MONODIRECTIONAL RANDOM WAVE = YES
/
/GAMMA = 3.3
/
/PEAK PERIOD : 3.80
/
/MINIMUM SPECTRAL PERIOD : 1.5
/MAXIMUM SPECTRAL PERIOD : 8
/NUMBER OF PERIODS : 6
/
/GAMMA = 3.3
/DIRECTION OF WAVE PROPAGATION :147.5
/
/S EXPONENT = 10
/
/AUTOMATIC CALCULATION OF PHASE : YES
/REFERENCE WATER DEPTH FOR AUTOMATIC PHASE = 57.80
/PHASE REFERENCE COORDINATES = 2628253.5;4569877.0
/
/PRECONDITIONING : 2
/DISSIPATION RELAXATION : 0.25

```

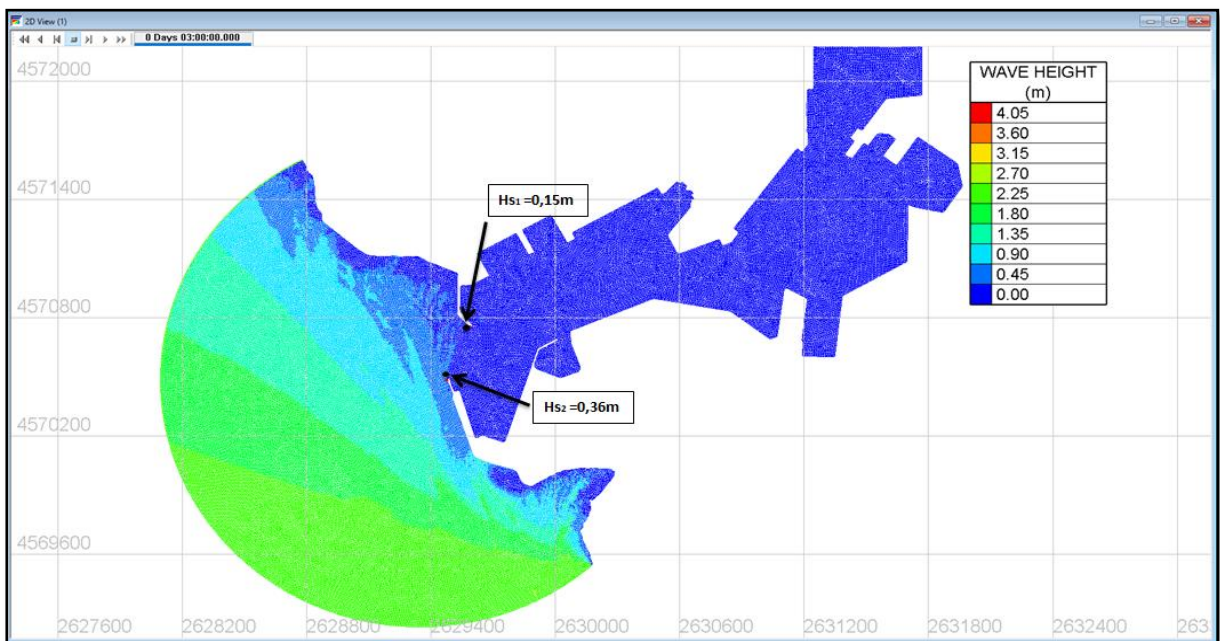
Παράρτημα Β – Περαιτέρω αποτελέσματα προσομοιώσεων

- Μελέτη εξωτερικών προστατευτικών έργων

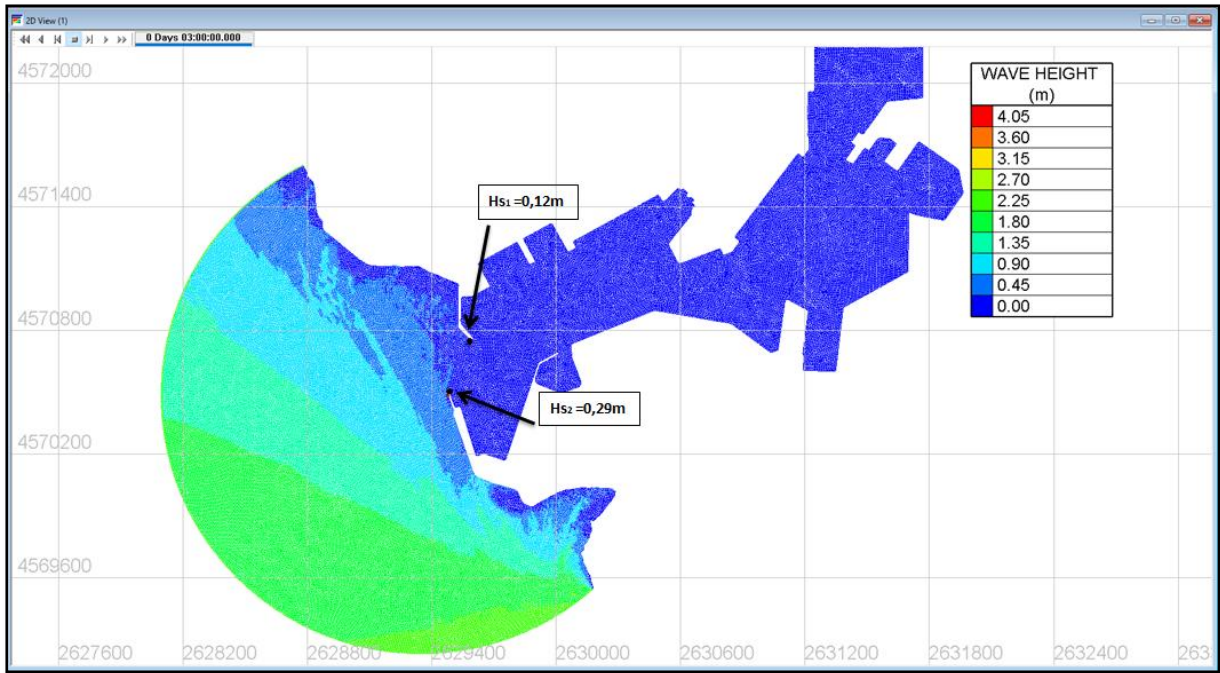
Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το εκάστοτε κύμα σχεδιασμού ανά διεύθυνση για όλες τις περιπτώσεις μελέτης.



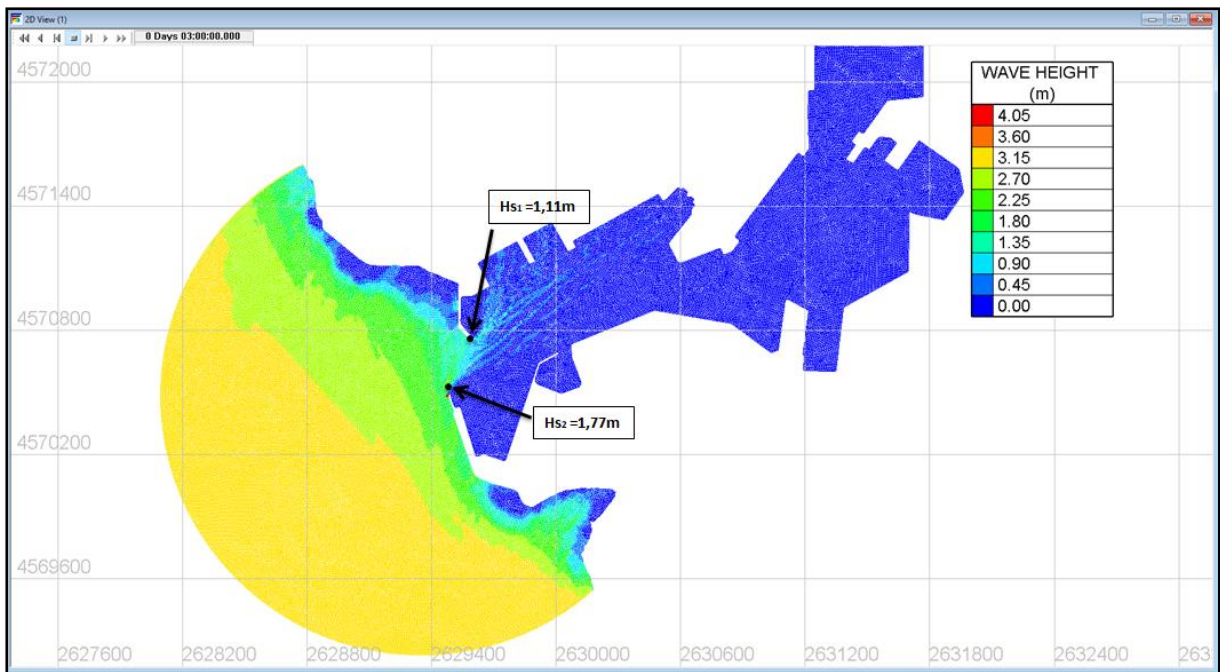
Σχήμα Π.Β.1: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=1.69m$, $T_p=7.77sec$, $MWD=122.5^\circ$).



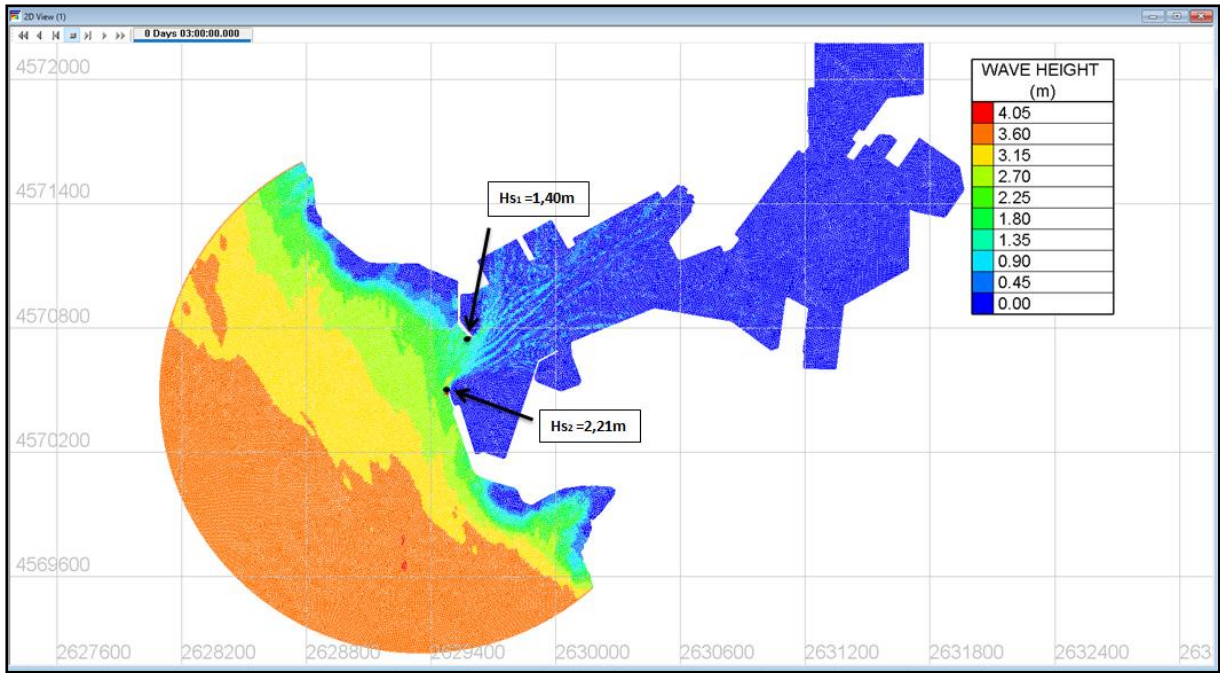
Σχήμα Π.Β.2: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.71m$, $T_p= 7.21sec$, $MWD=122.5^\circ$).



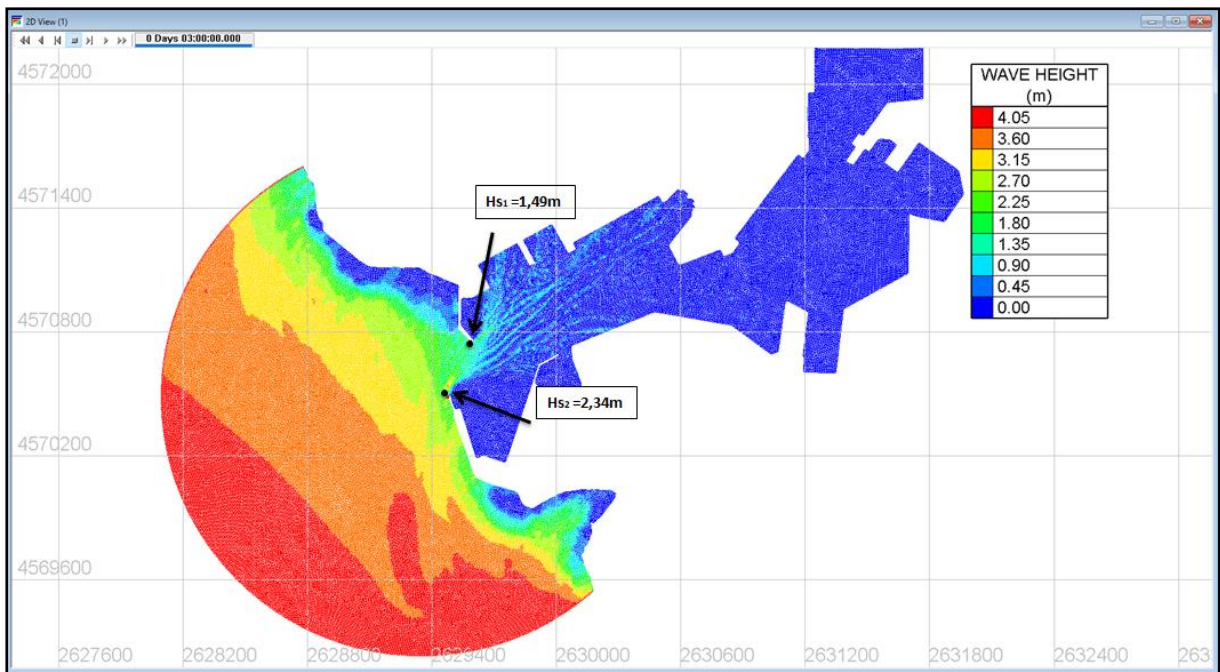
Σχήμα Π.Β.3 Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.30\text{m}$, $T_p=7.13\text{sec}$, $MWD=122.5^\circ$).



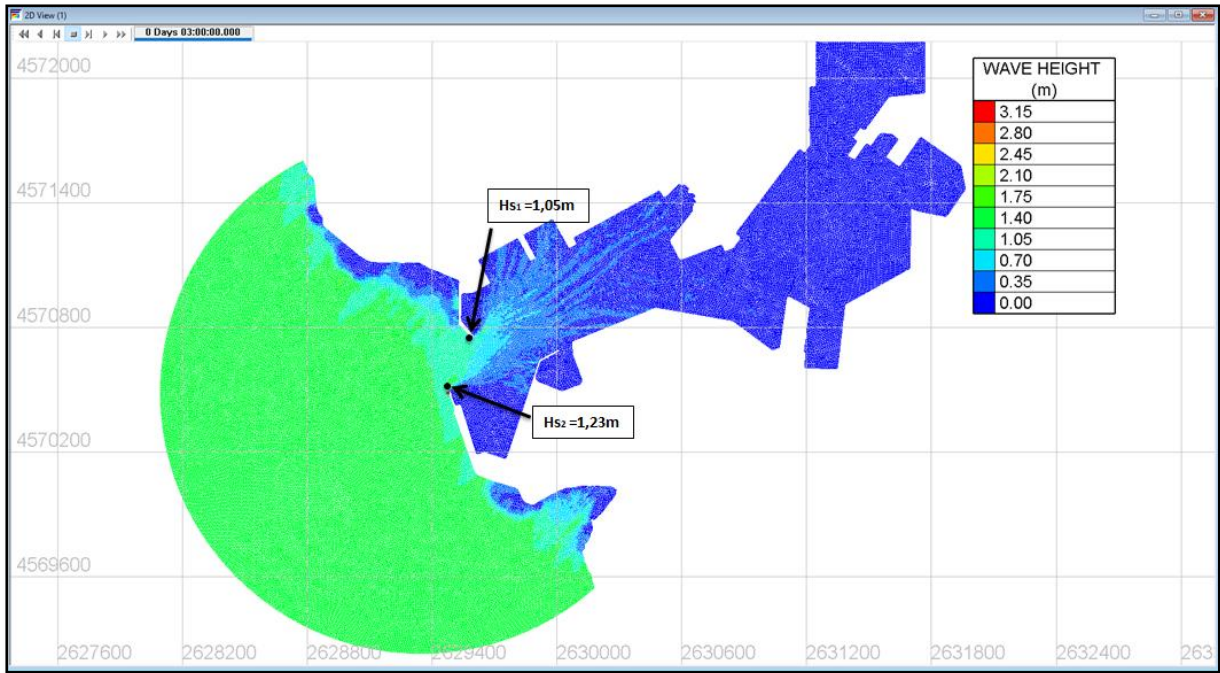
Σχήμα Π.Β.4: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51\text{m}$, $T_p=8.20\text{sec}$, $MWD=167.5^\circ$).



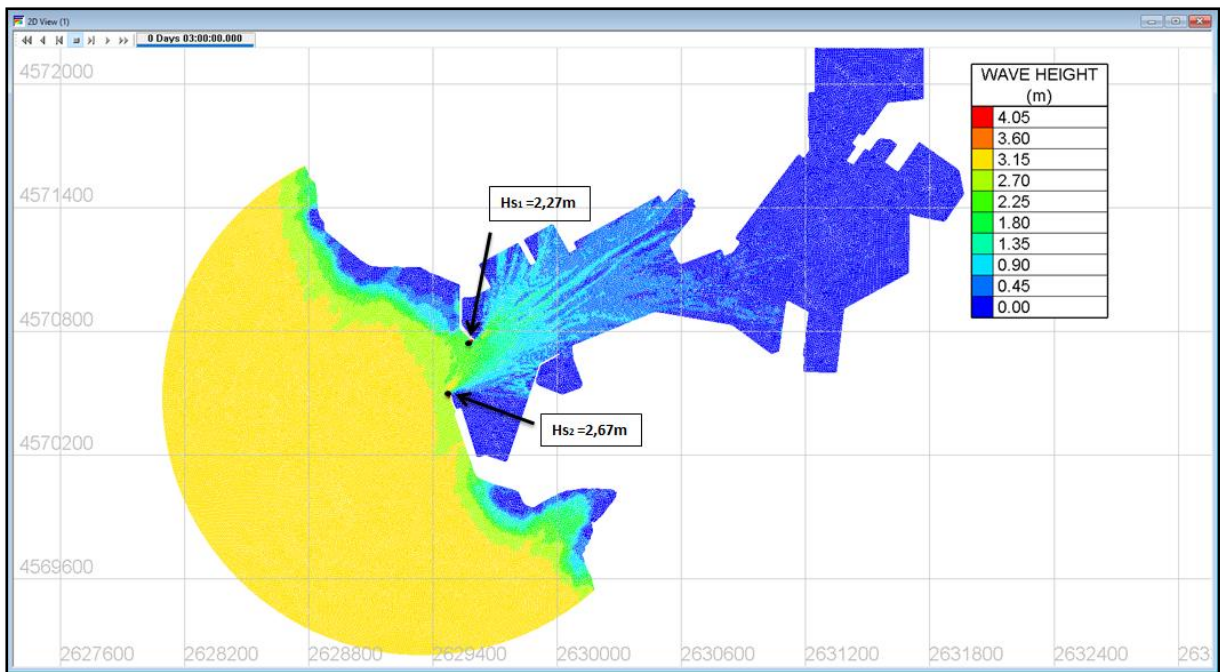
Σχήμα Π.Β.5: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.71\text{m}$, $T_p=9.41\text{sec}$, $MWD=167.5^\circ$).



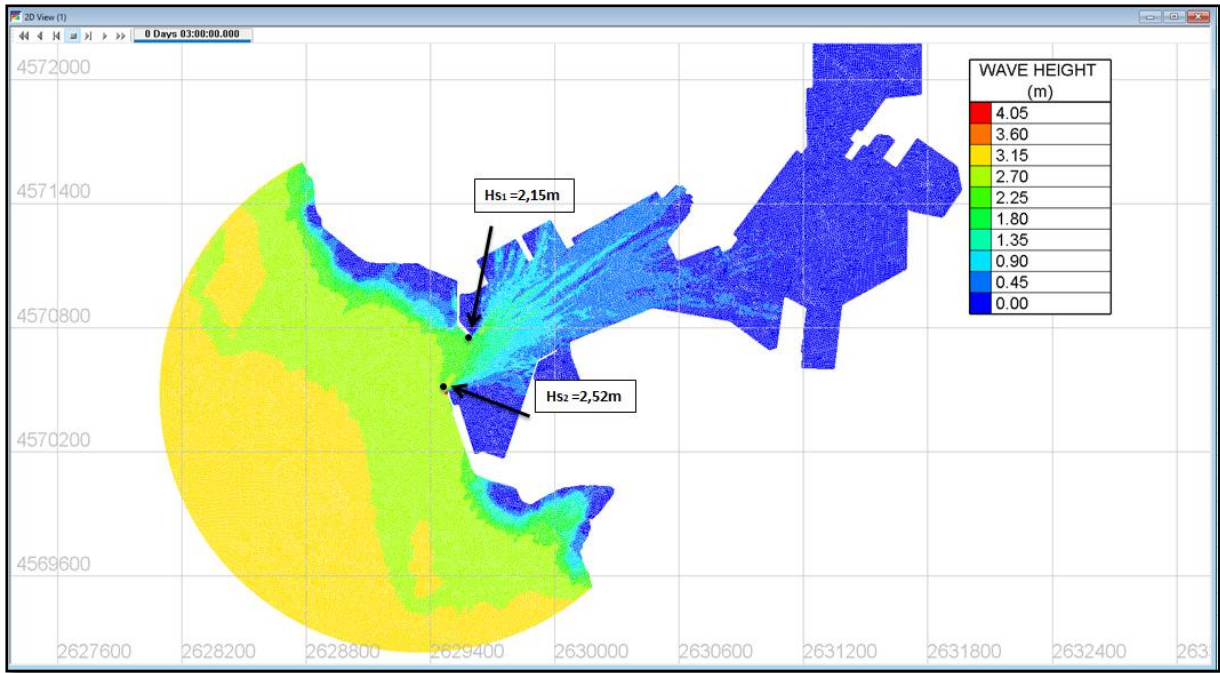
Σχήμα Π.Β.6: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=4.21\text{m}$, $T_p=9.47\text{sec}$, $MWD=167.5^\circ$).



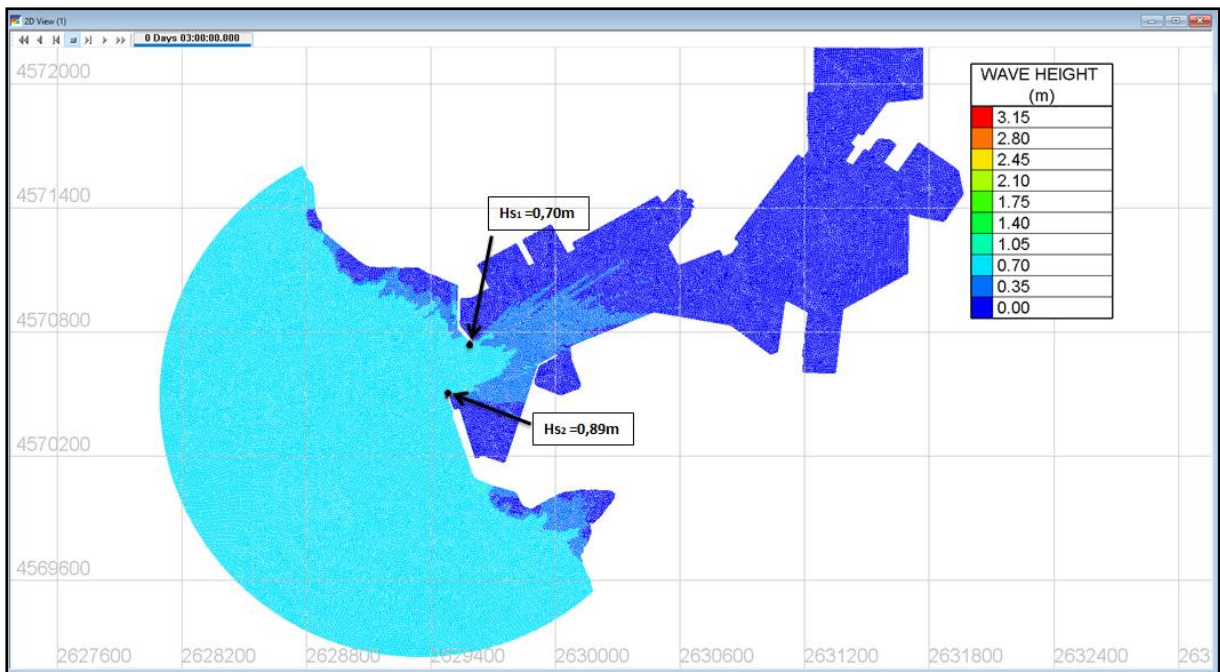
Σχήμα Π.Β.7: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=1.62m$, $T_p=7.71sec$, $MWD=212.5^\circ$).



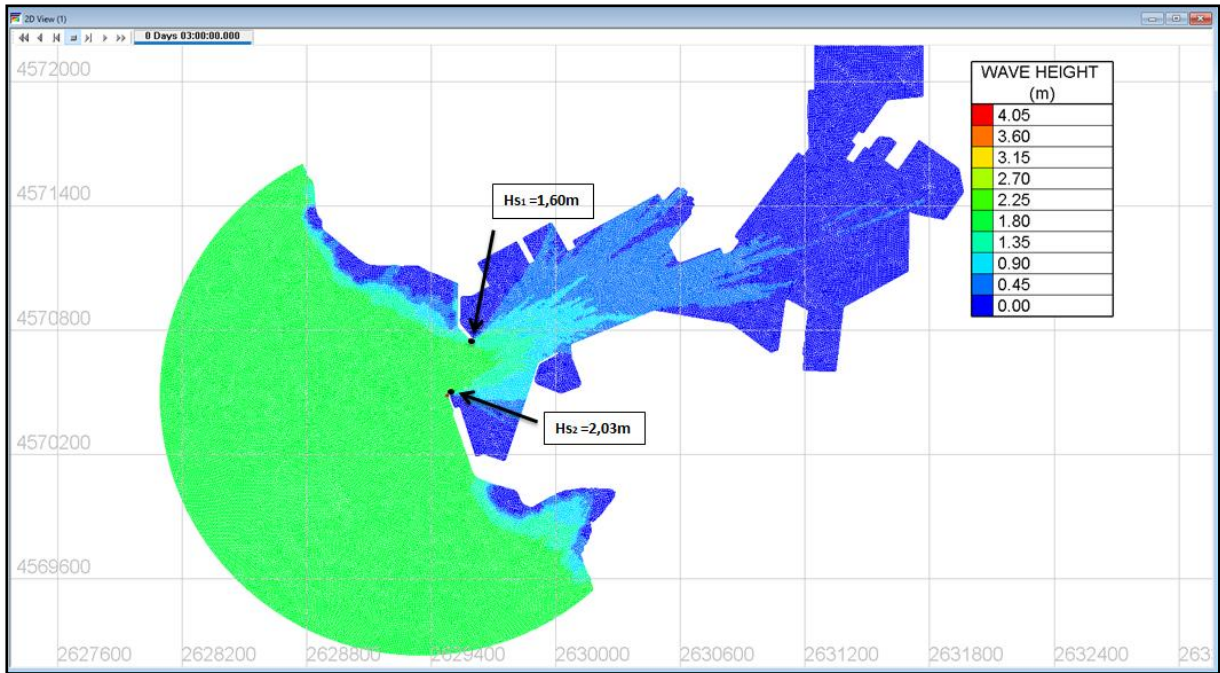
Σχήμα Π.Β.8: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.51m$, $T_p=8.20sec$, $MWD=212.5^\circ$).



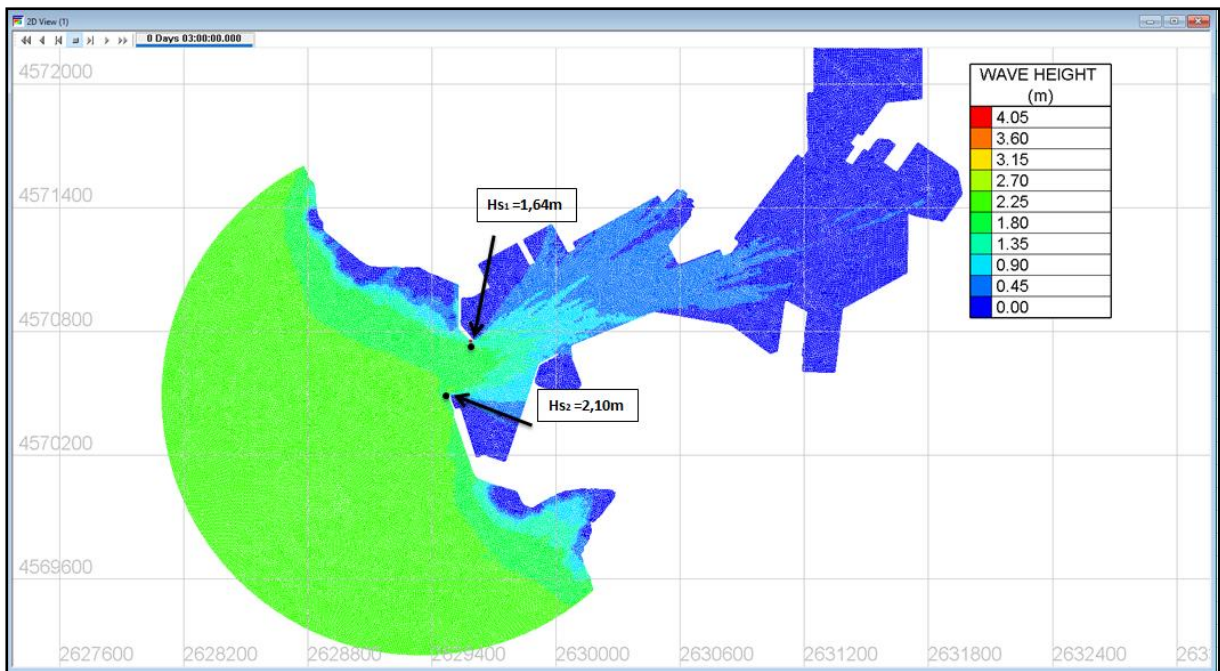
Σχήμα Π.Β.9: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=3.01m, T_p=7.58sec, MWD=212.5^\circ$).



Σχήμα Π.Β.10: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST με κύμα σχεδιασμού ($H_s=1.03m, T_p=5.90sec, MWD=257.5^\circ$).



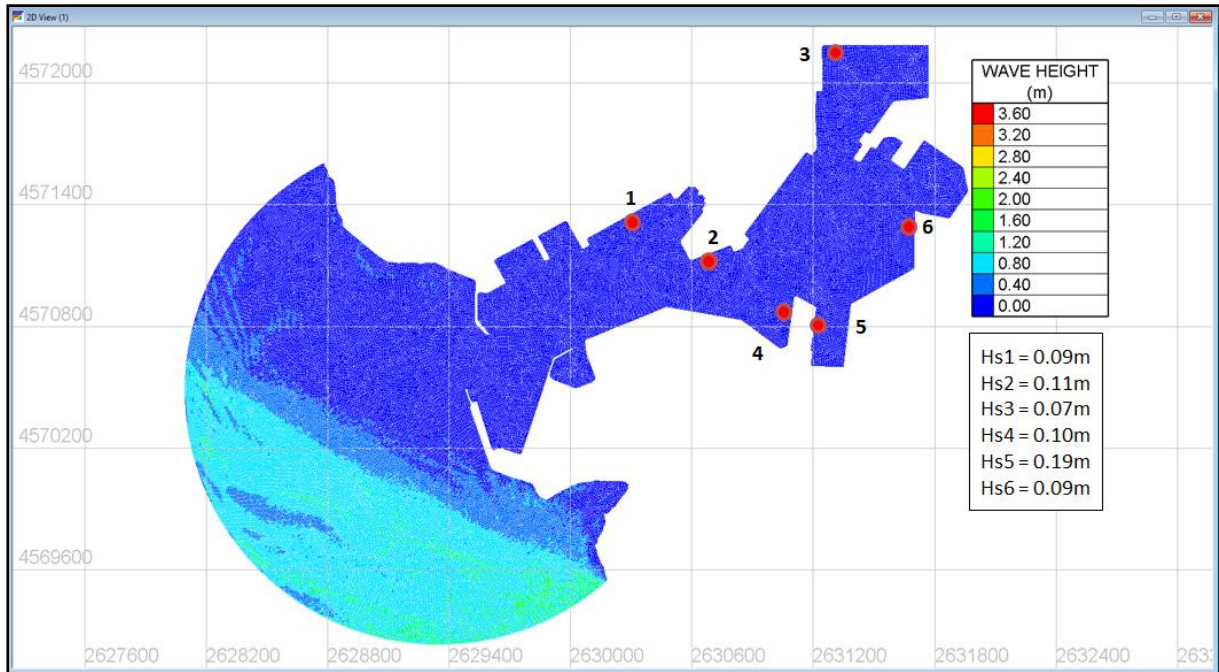
Σχήμα Π.Β.11: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.20\text{m}$, $T_p=6.45\text{sec}$, $MWD=257.5^\circ$).



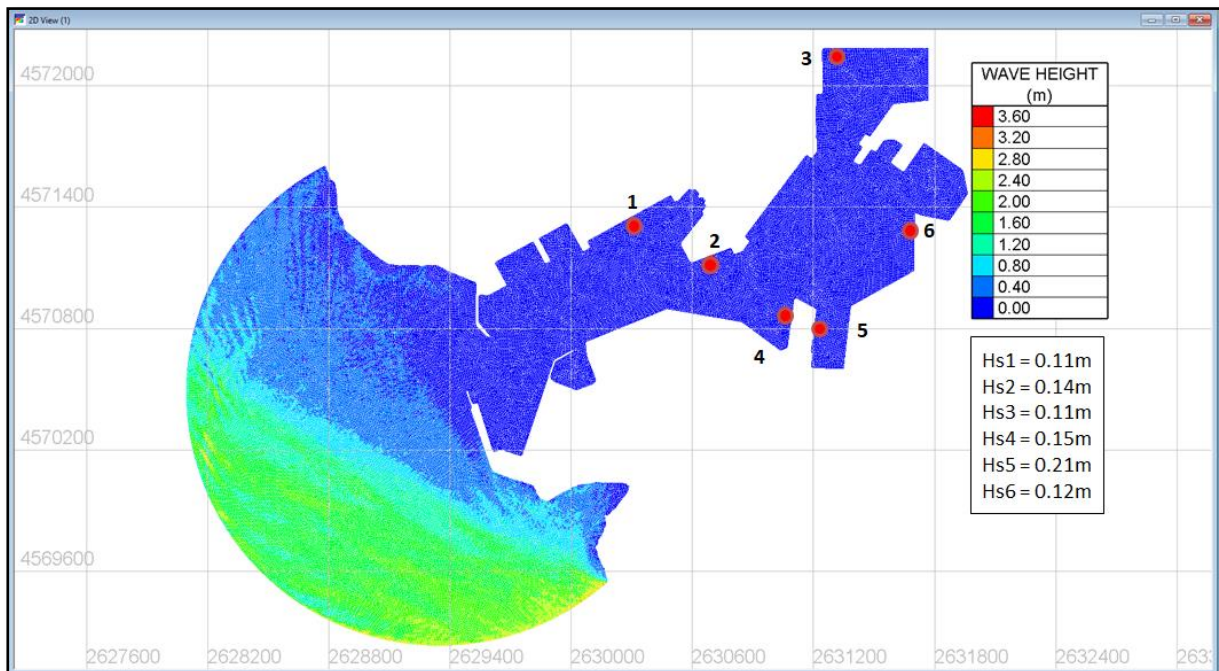
Σχήμα Π.Β.12: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 με κύμα σχεδιασμού ($H_s=2.21\text{m}$, $T_p=6.55\text{sec}$, $MWD=257.5^\circ$).

- Μελέτη ηρεμίας λιμενολεκάνης

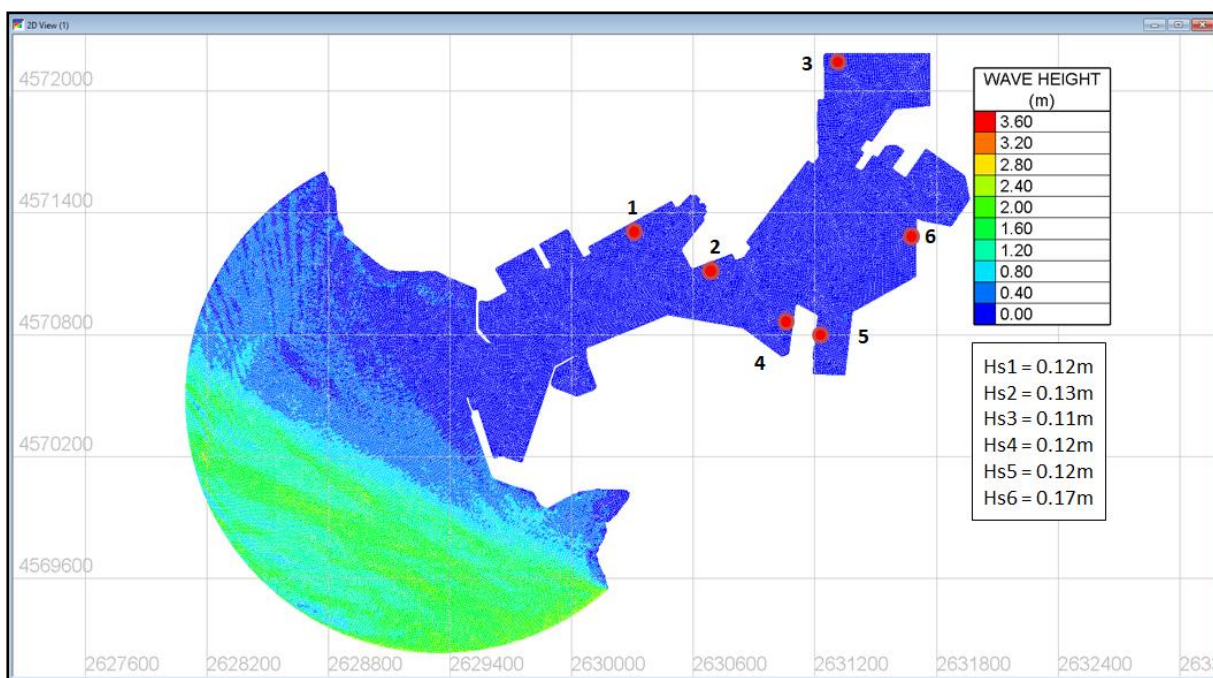
Παρουσιάζονται τα σενάρια με τους δυσμενέστερους κυματισμούς ανά διεύθυνση για όλες τις περιπτώσεις μελέτης.



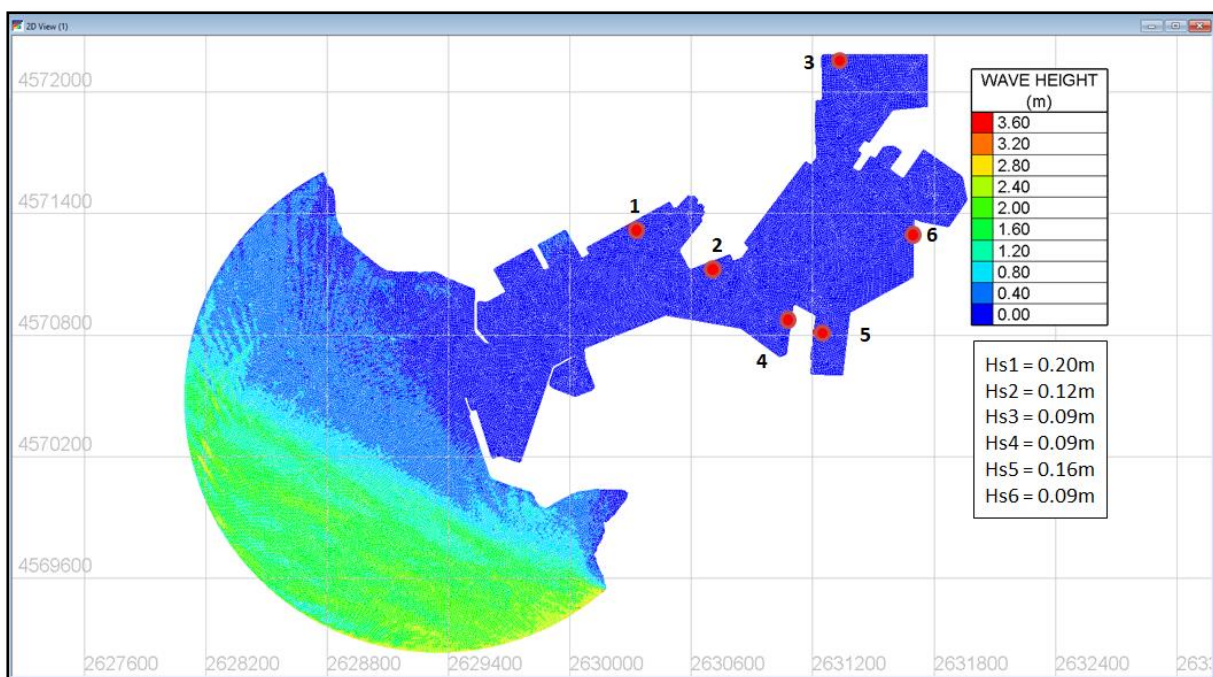
Σχήμα Π.Β.13: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 2 ($H_s=1.17m$, $T_p=5.21sec$, $MWD=122.5^\circ$)



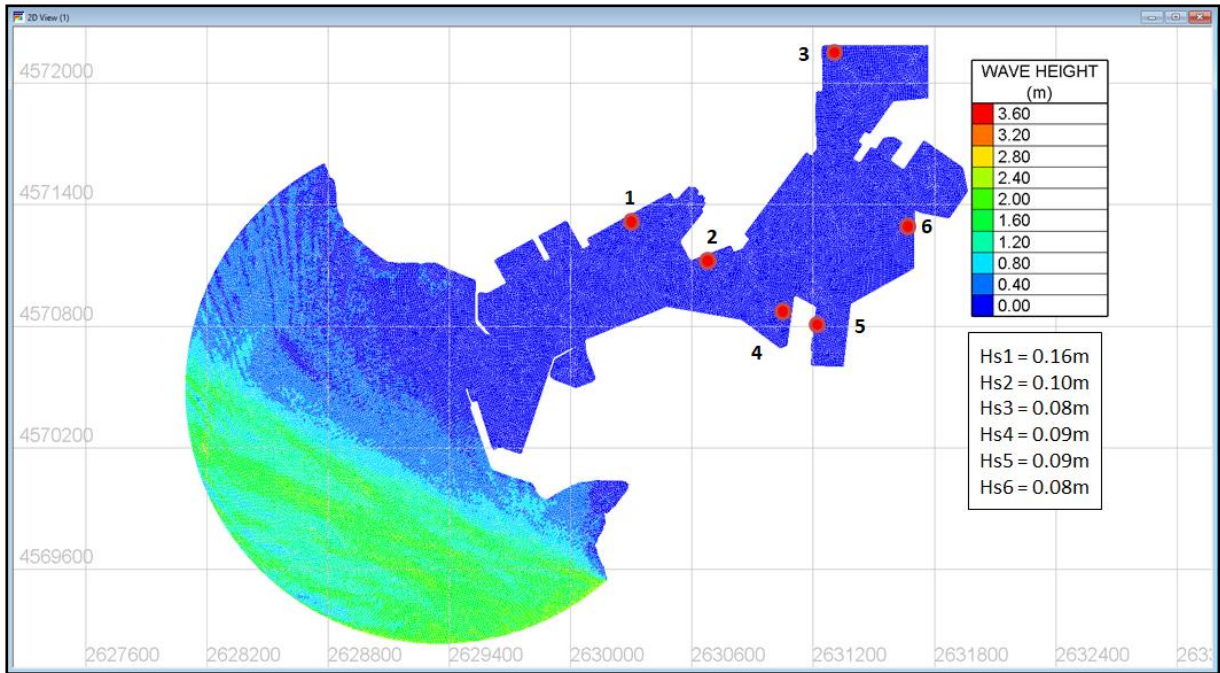
Σχήμα Π.Β.14: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 5 ($H_s=2.80m$, $T_p=5.45sec$, $MWD=122.5^\circ$)



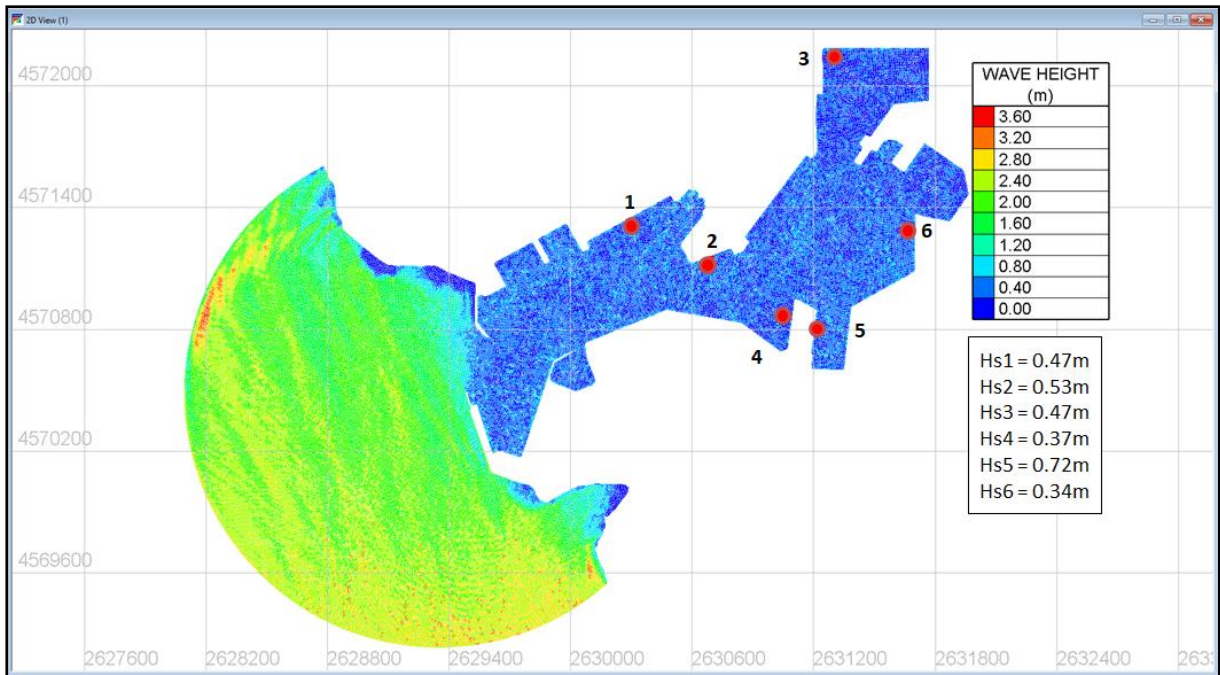
Σχήμα Π.Β.15 Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 4 (Hs=2.20m, Tr=5.06sec, MWD=122.5°)



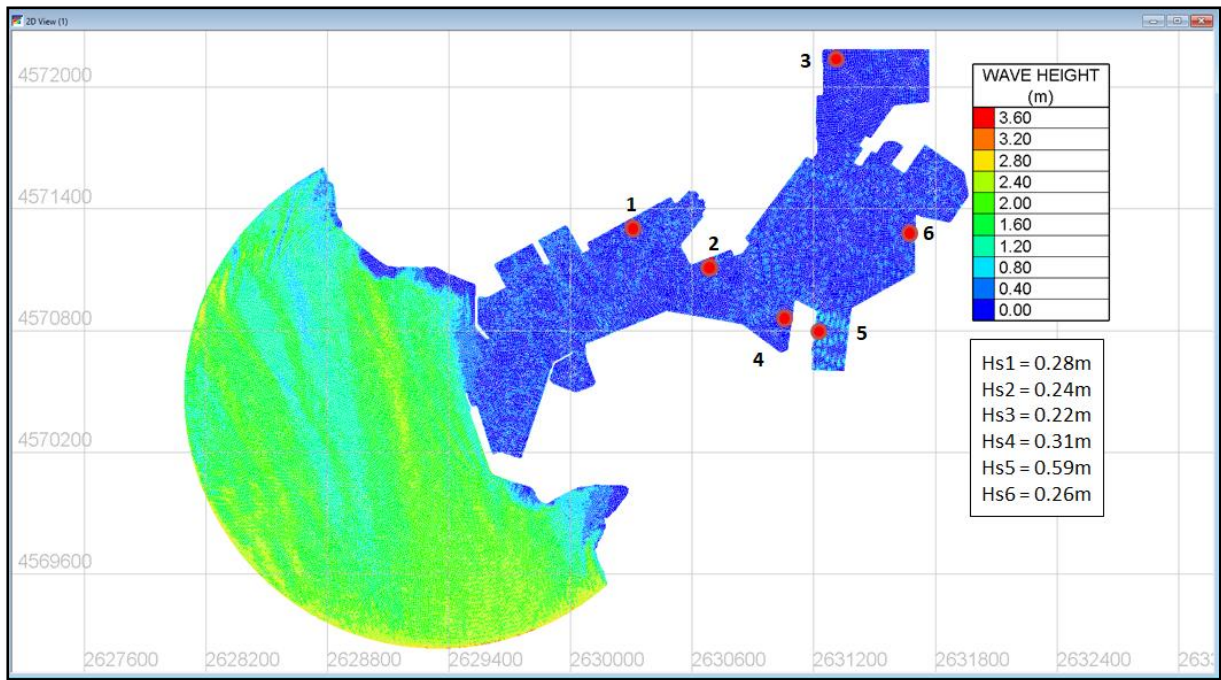
Σχήμα Π.Β.16: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 5 (Hs=2.80m, Tr=5.45sec, MWD=122.5°)



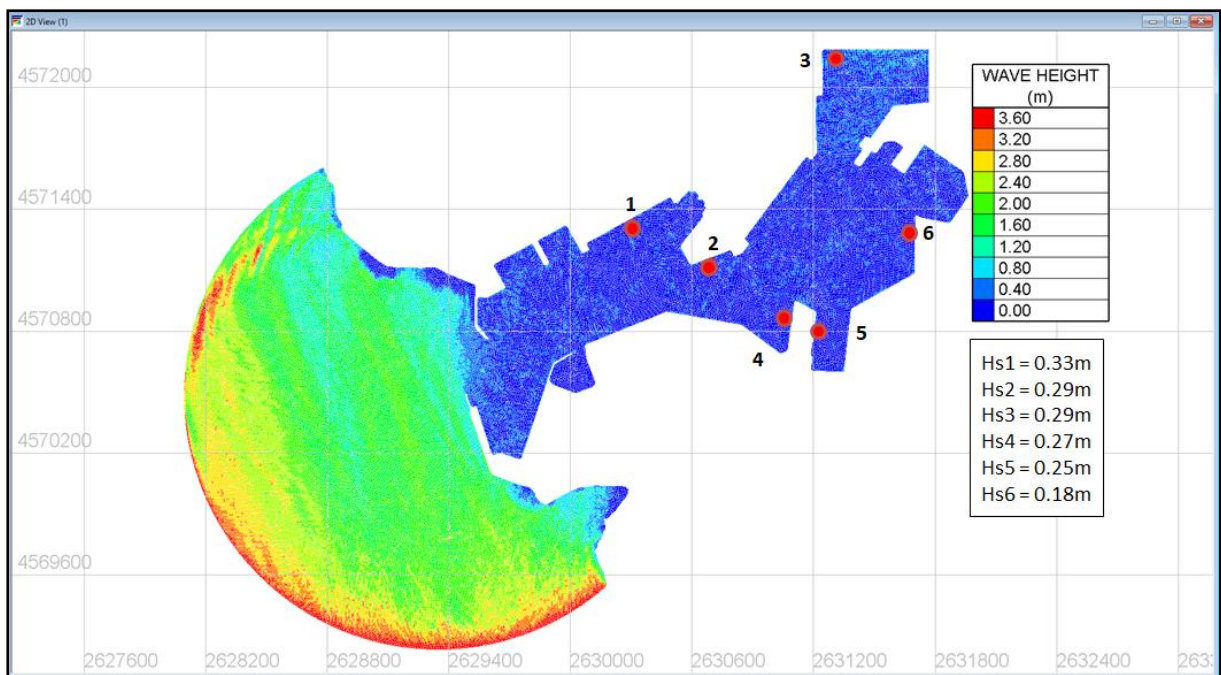
Σχήμα Π.Β.17: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 4 (Hs=2.20m, Tr=5.06sec, MWD=122.5°)



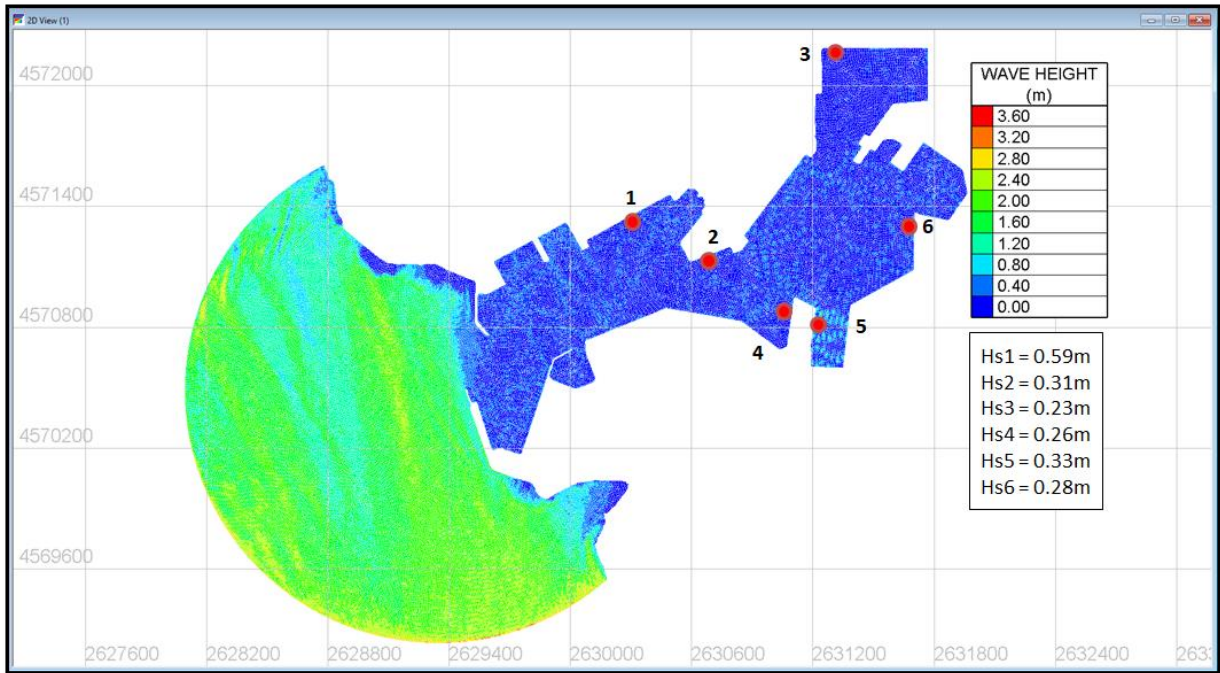
Σχήμα Π.Β.18: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 7 (Hs=2.66m, Tr=6.51sec, MWD=167.5°)



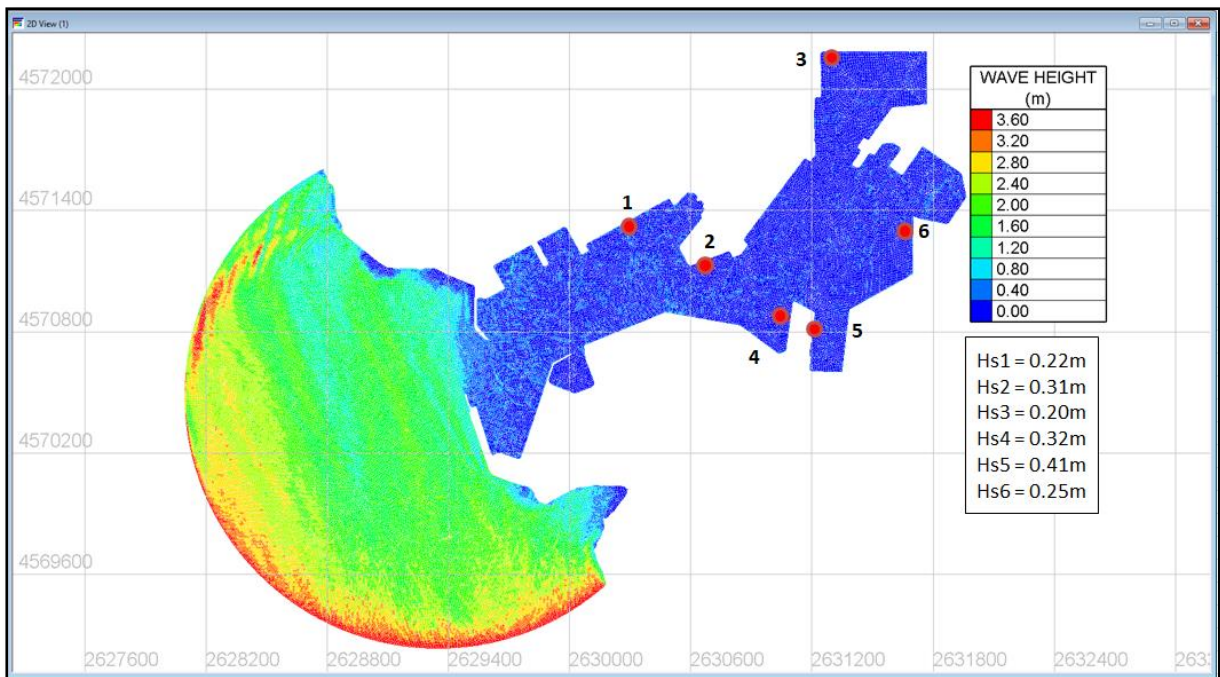
Σχήμα Π.Β.19: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 10 (Hs=2.71m, Tr=5.41sec, MWD=167.5°)



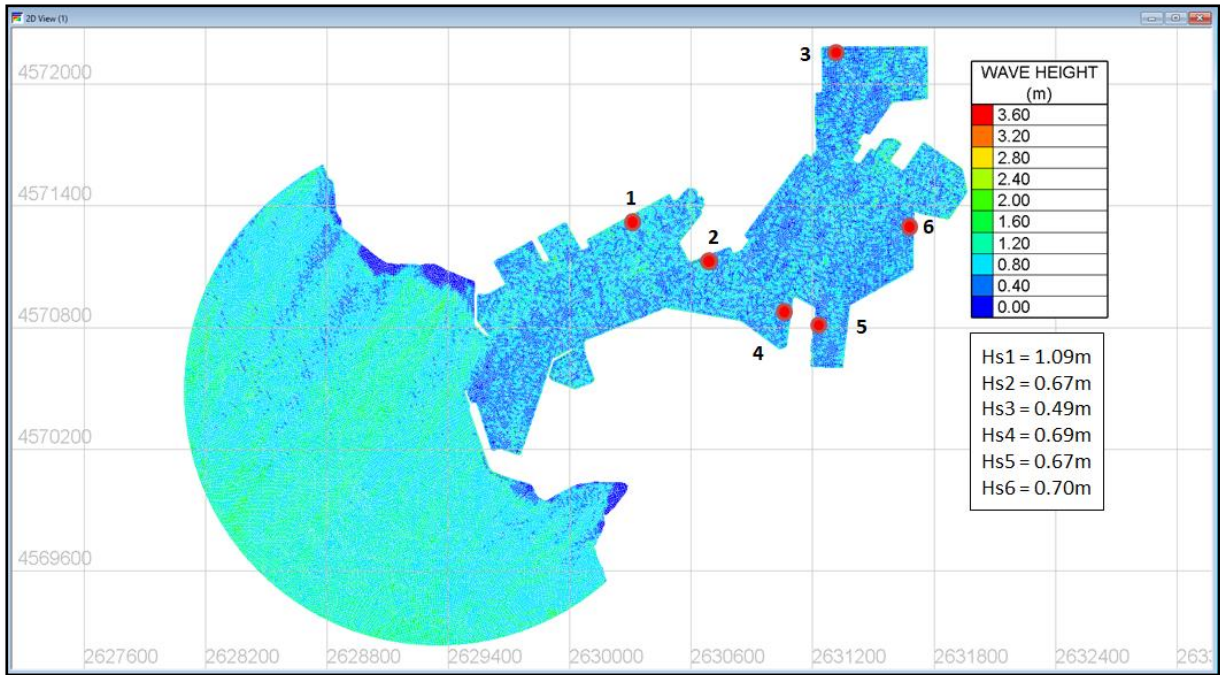
Σχήμα Π.Β.20: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 12 (Hs=4.08m, Tr=5.91sec, MWD=167.5°)



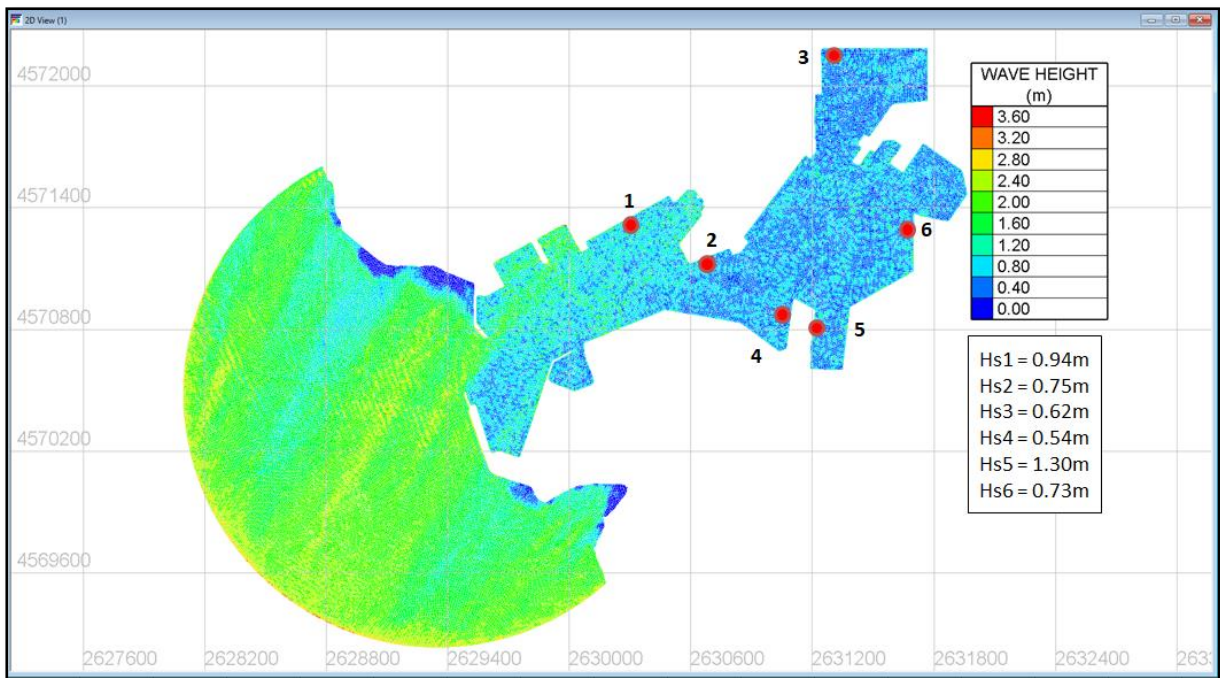
Σχήμα Π.Β.21: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 10 (Hs=2.71m, T_p=5.41sec, MWD=167.5°)



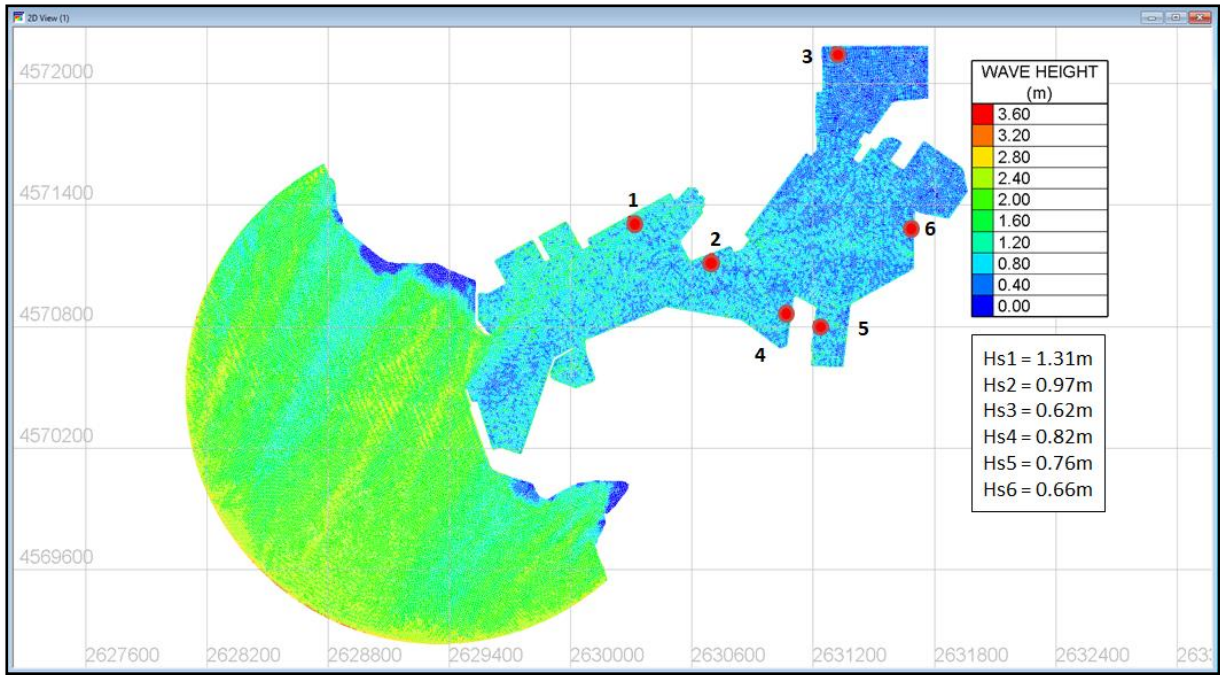
Σχήμα Π.Β.22: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 12 (Hs=4.08m, T_p=5.91sec, MWD=167.5°)



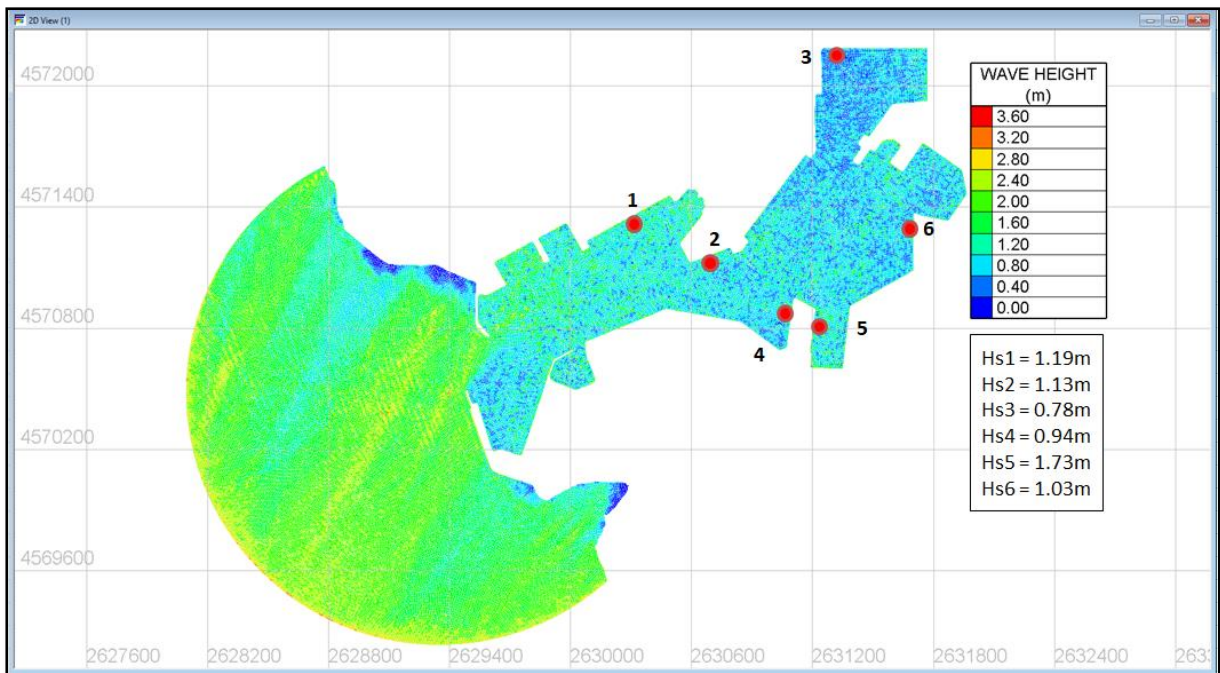
Σχήμα Π.Β.23: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 9 ($H_s=1.15m, T_p= 5.19sec, MWD=212.5^\circ$)



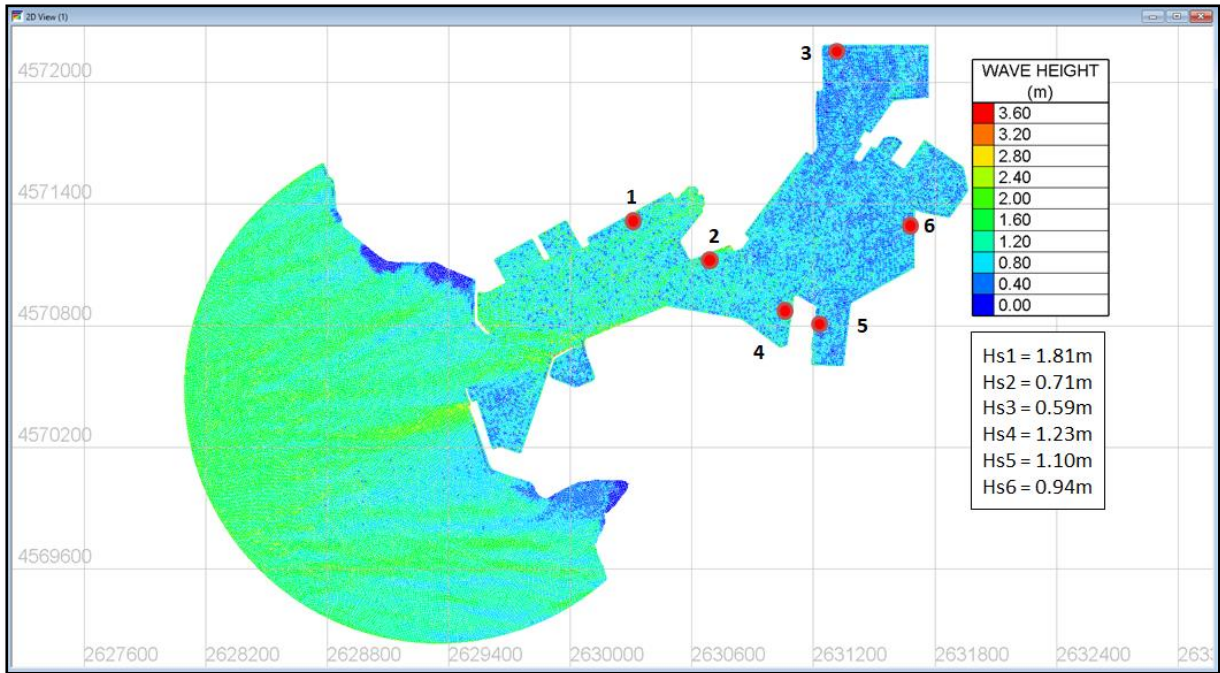
Σχήμα Π.Β.24: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 15 ($H_s=2.67m, T_p=5.39sec, MWD=212.5^\circ$)



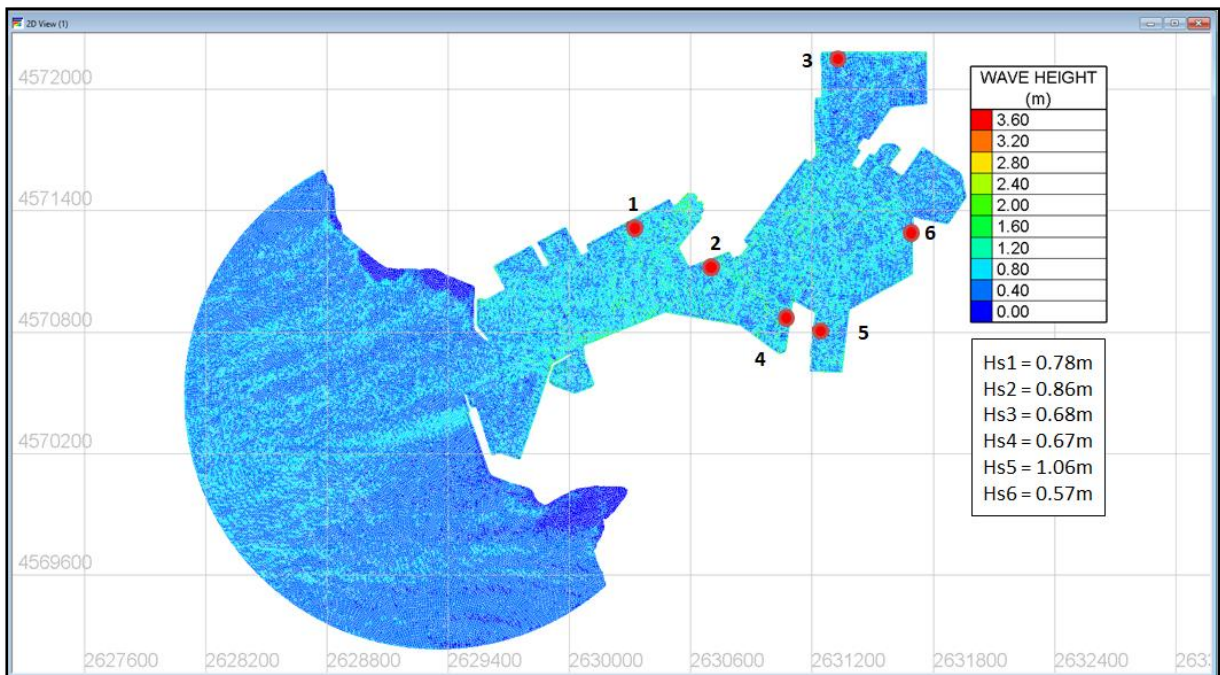
Σχήμα Π.Β.25: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 17 (Hs=2.70m, T_p=5.33sec, MWD=212.5°)



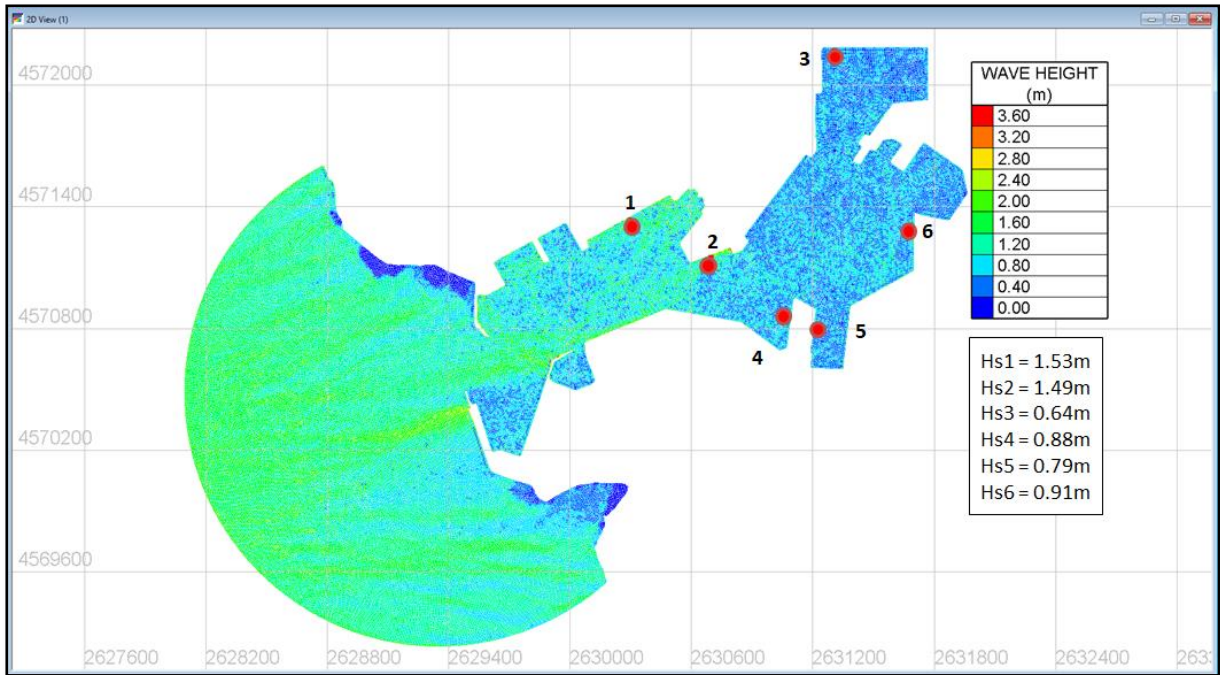
Σχήμα Π.Β.26: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 15 (Hs=2.67m, T_p=5.39sec, MWD=212.5°)



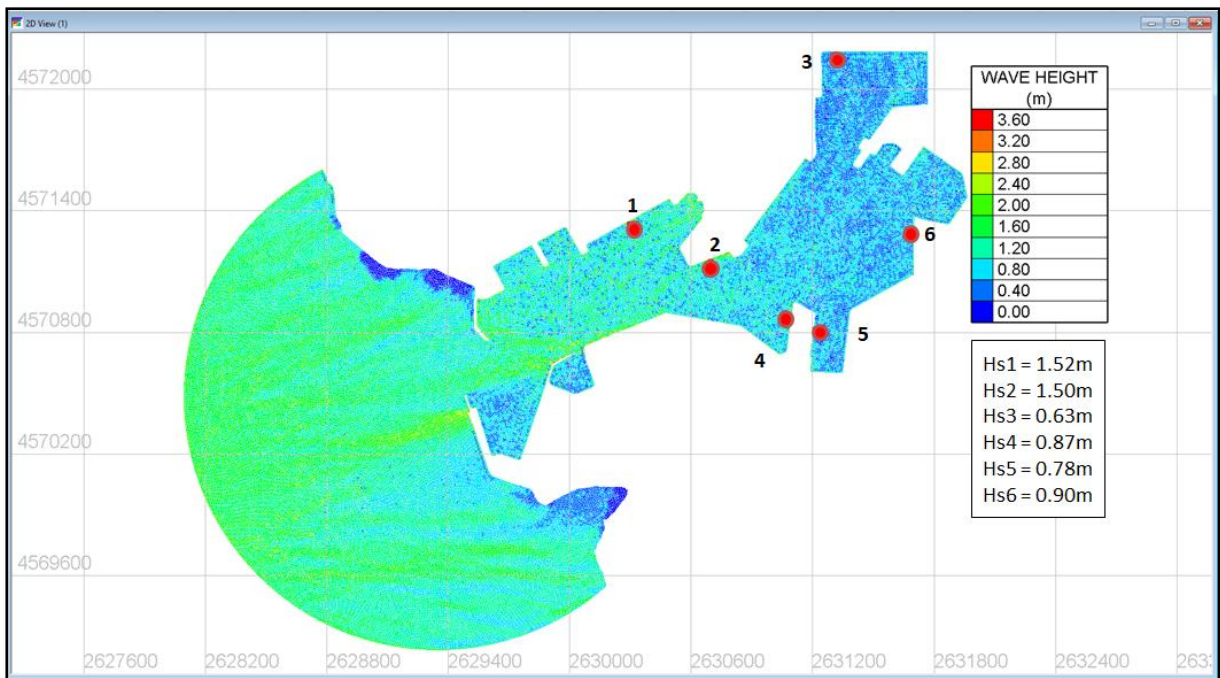
Σχήμα Π.Β.27: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 17 (Hs=2.70m, T_p=5.33sec, MWD=212.5°)



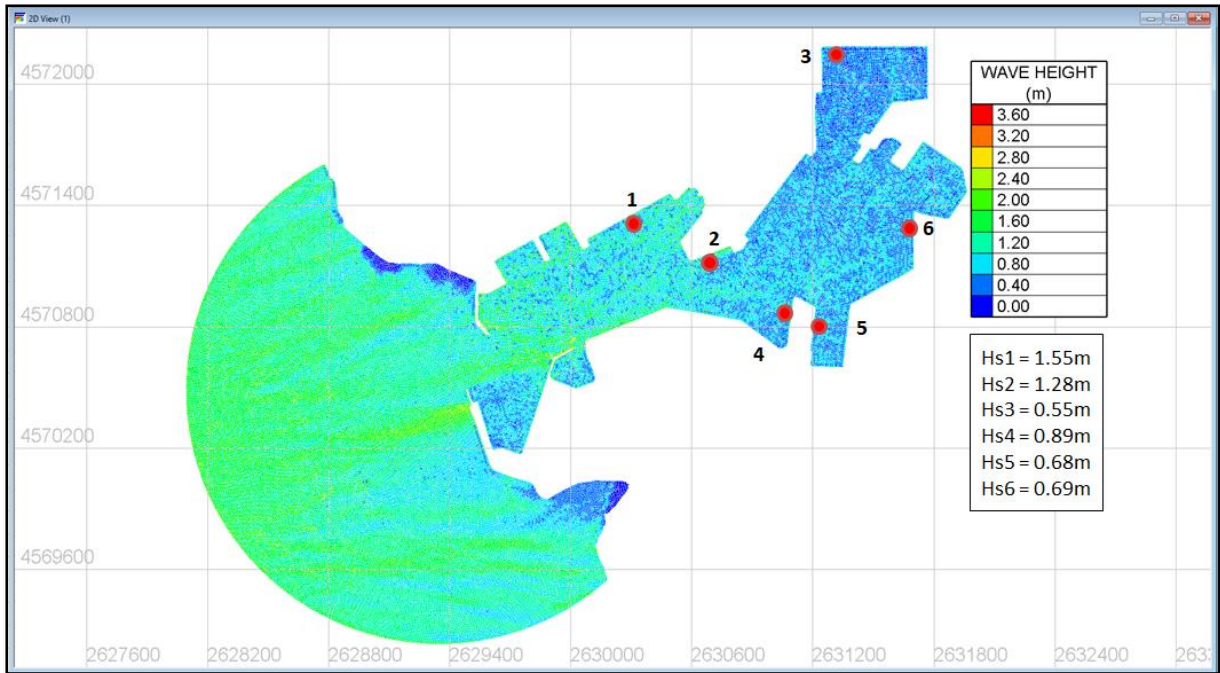
Σχήμα Π.Β.28: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για τα δεδομένα HINDCAST, σενάριο 10 (Hs=0.59m, T_p=4.33sec, MWD=257.5°)



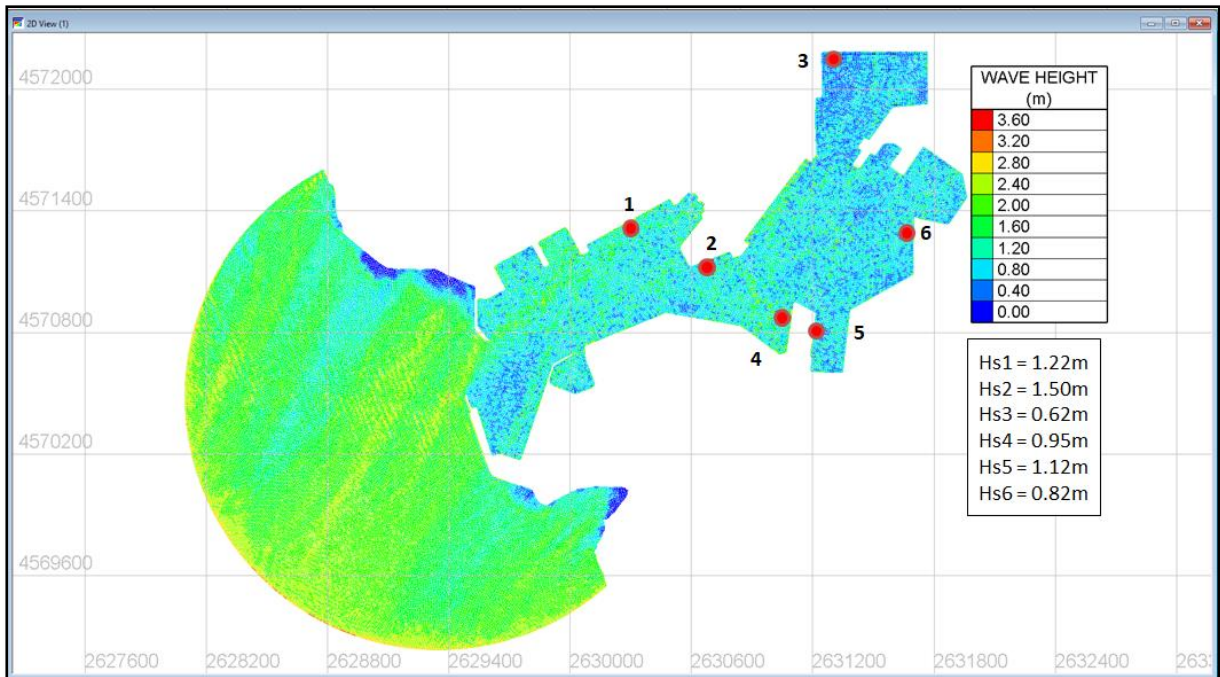
Σχήμα Π.Β.29: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 (Hs=1.63m, Tr=4.75sec, MWD=257.5°)



Σχήμα Π.Β.30: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (1^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 (Hs=1.66m, Tr=4.72sec, MWD=257.5°)



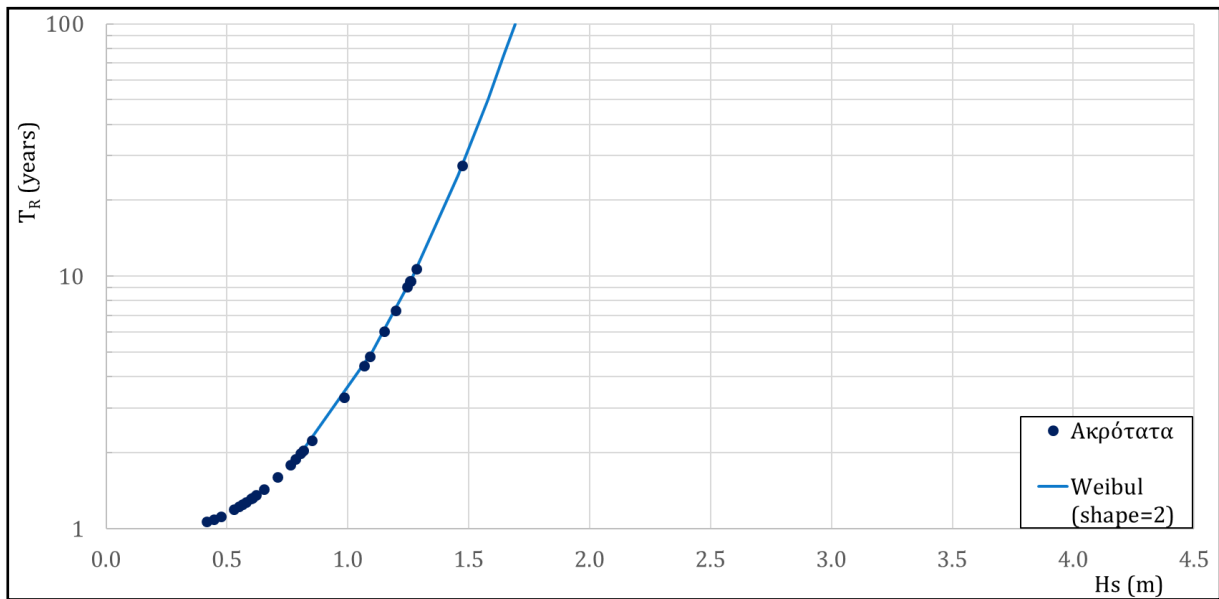
Σχήμα Π.Β.31: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 4.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 18 (Hs=1.63m, T_p=4.75sec, MWD=257.5°)



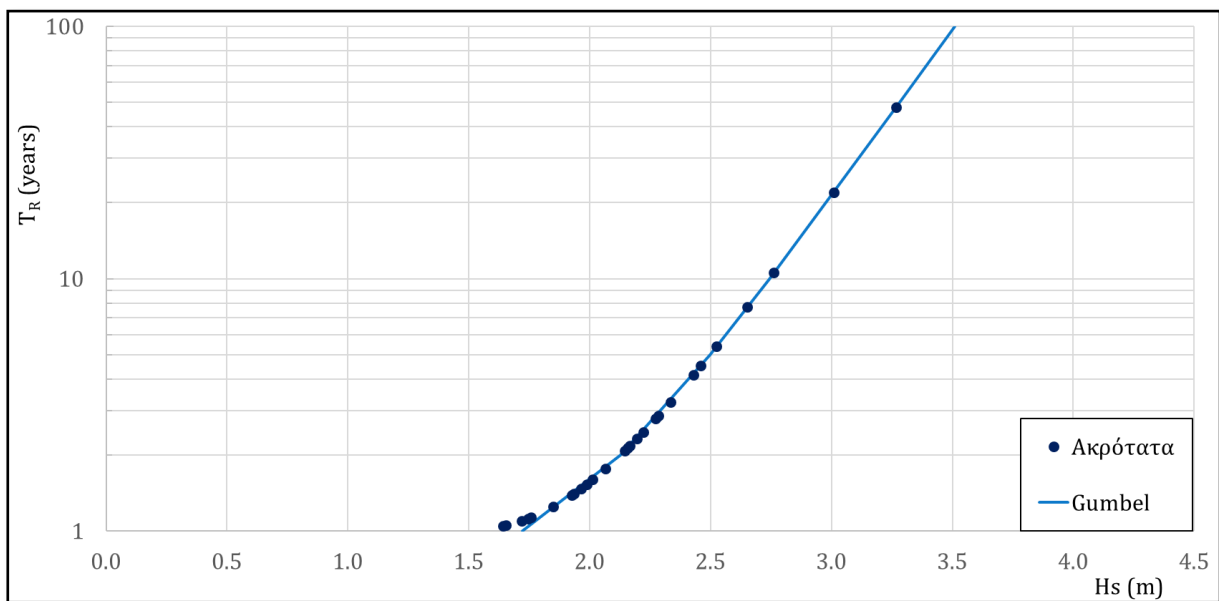
Σχήμα Π.Β.32: Χωρική κατανομή ύψους κύματος για το σενάριο RCP 8.5 (2^η περίπτωση μελέτης), κυματικό σενάριο 20 (Hs=1.66m, T_p=4.72sec, MWD=257.5°)

Παράρτημα Γ – Ανάλυση ακραίων τιμών

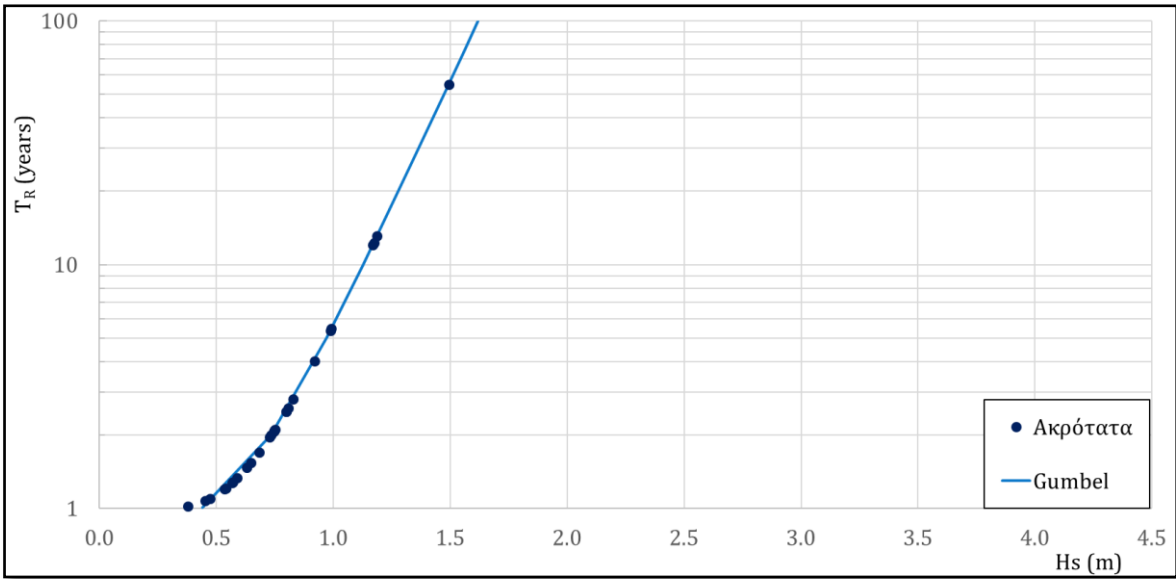
- HINDCAST



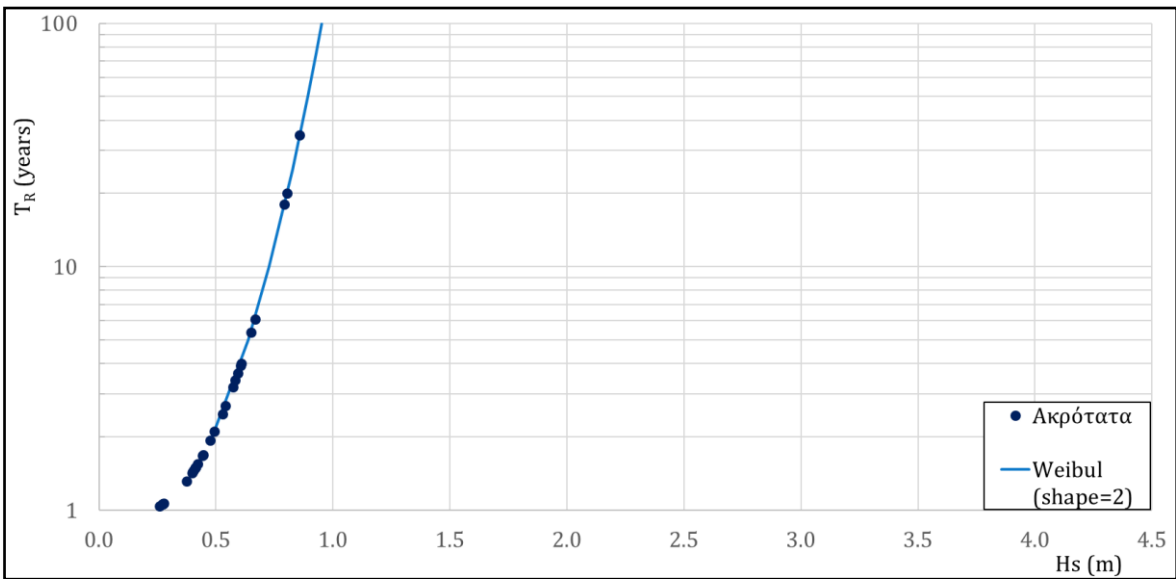
Σχήμα Π.Γ.1: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 100°-145°



Σχήμα Π.Γ.2: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 145°-190°

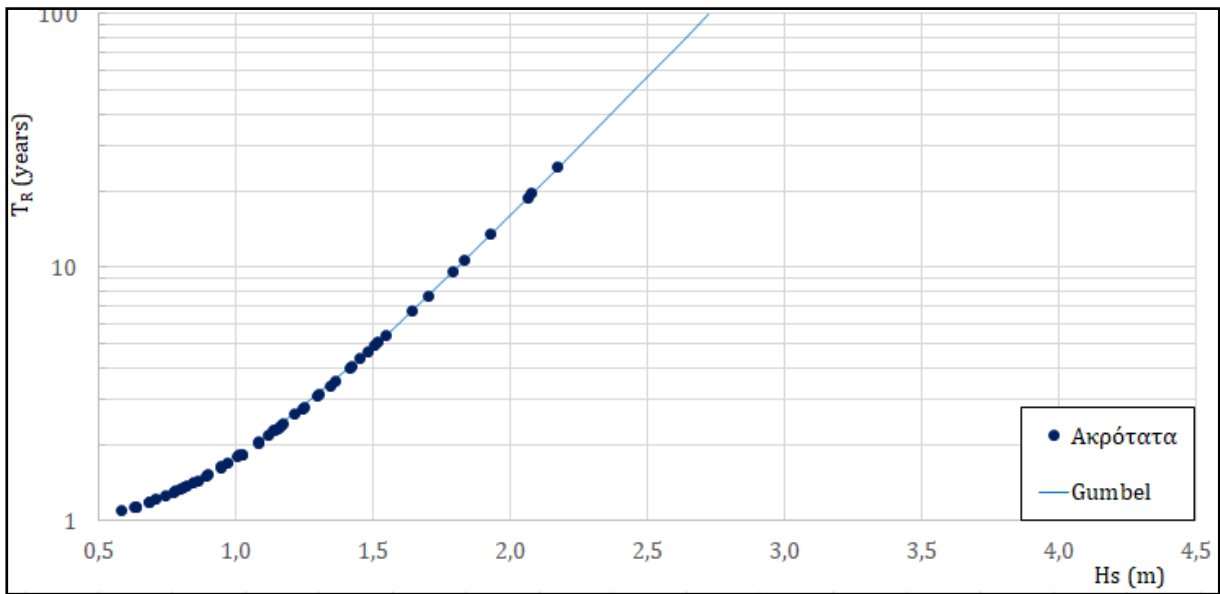


Σχήμα Π.Γ.3: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 190°-235°

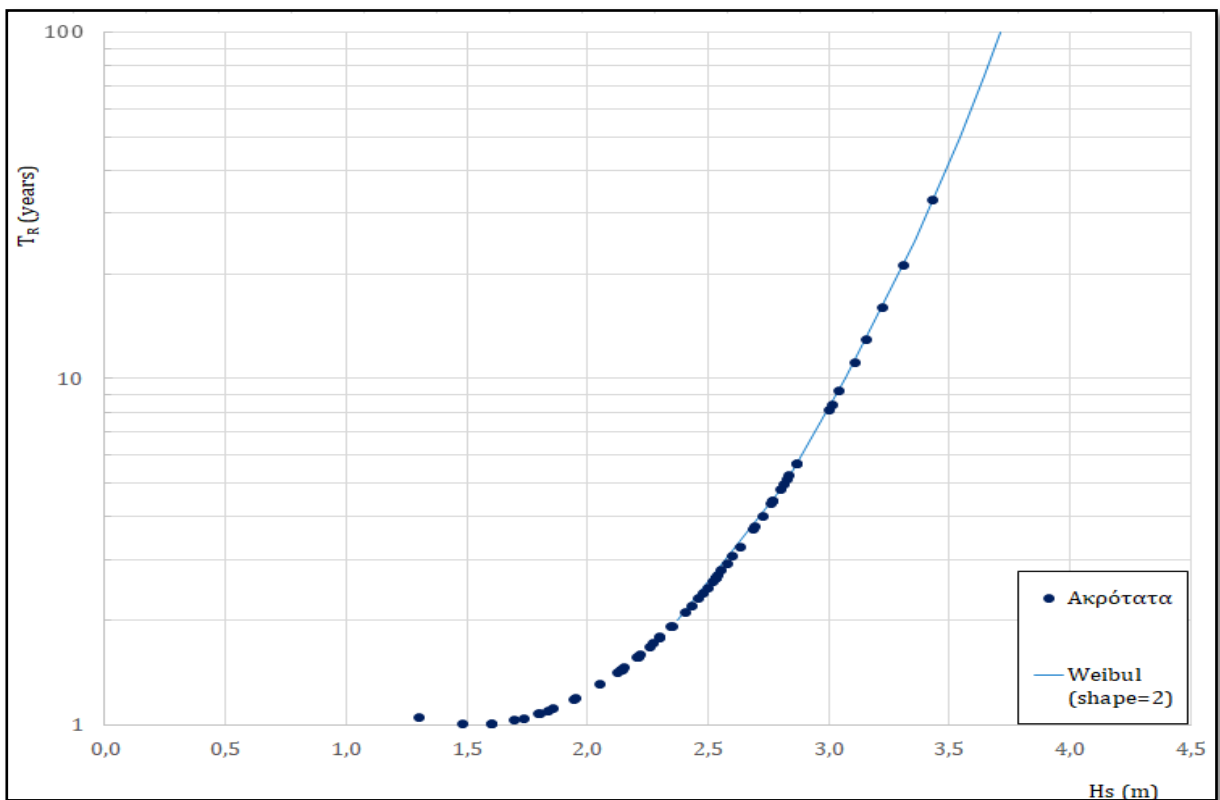


Σχήμα Π.Γ.4: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα HINDCAST στις διευθύνσεις 235°-280°

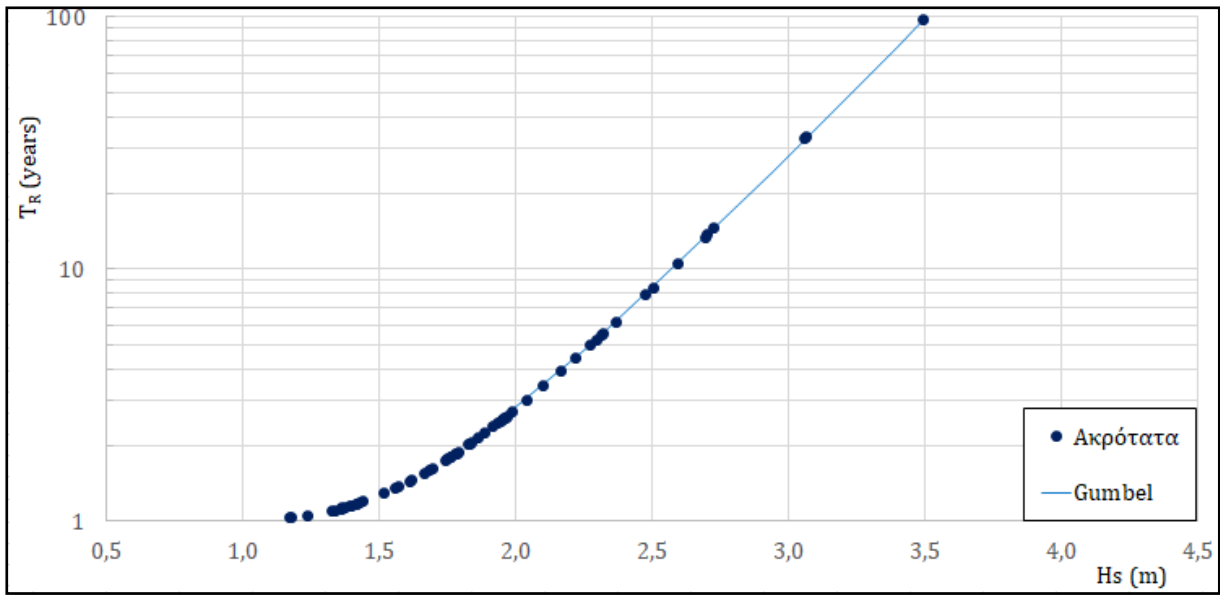
- RCP4.5



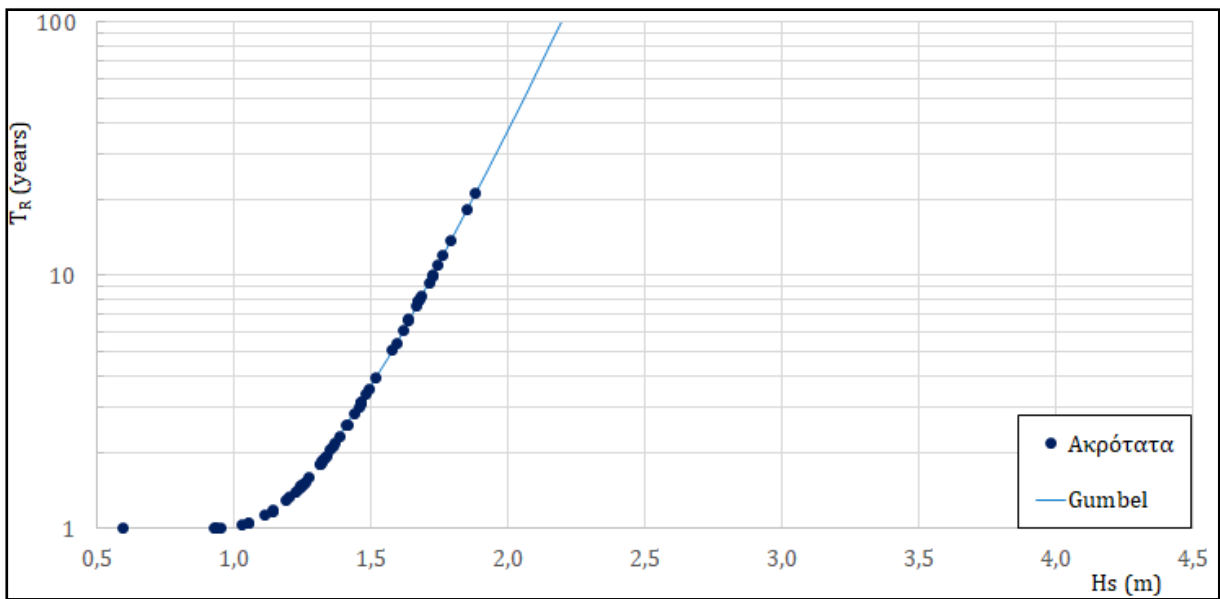
Σχήμα Π.Γ.5: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 100°-145°



Σχήμα Π.Γ.6: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 145°-190°

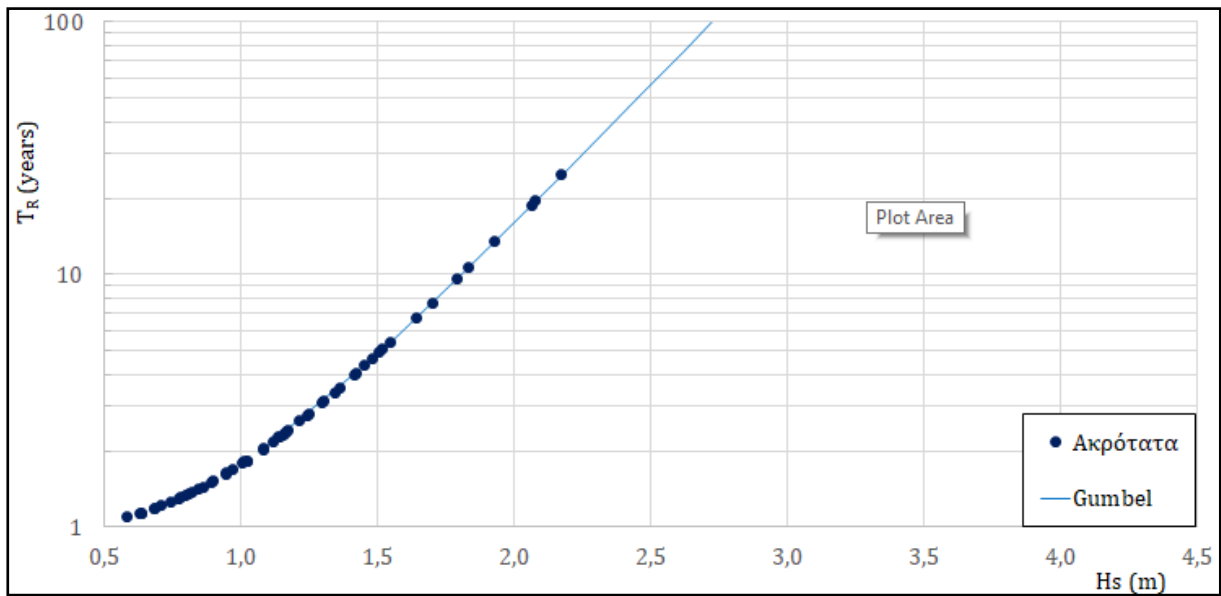


Σχήμα Π.Γ.7: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 190°-235°

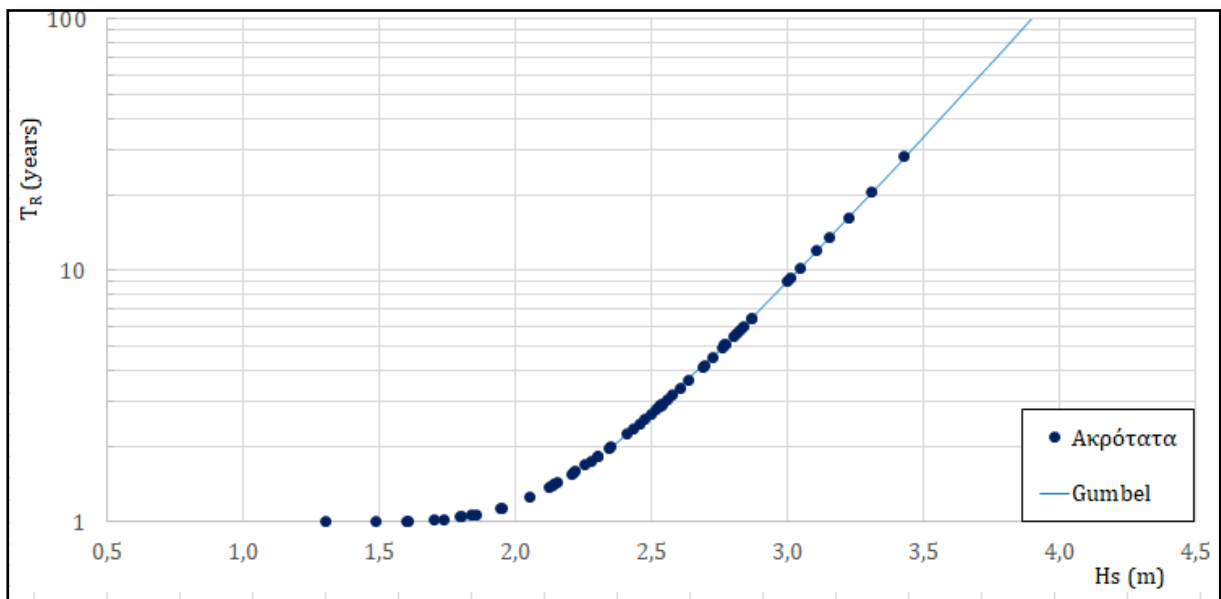


Σχήμα Π.Γ.8: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 4.5 στις διευθύνσεις 235°-280°

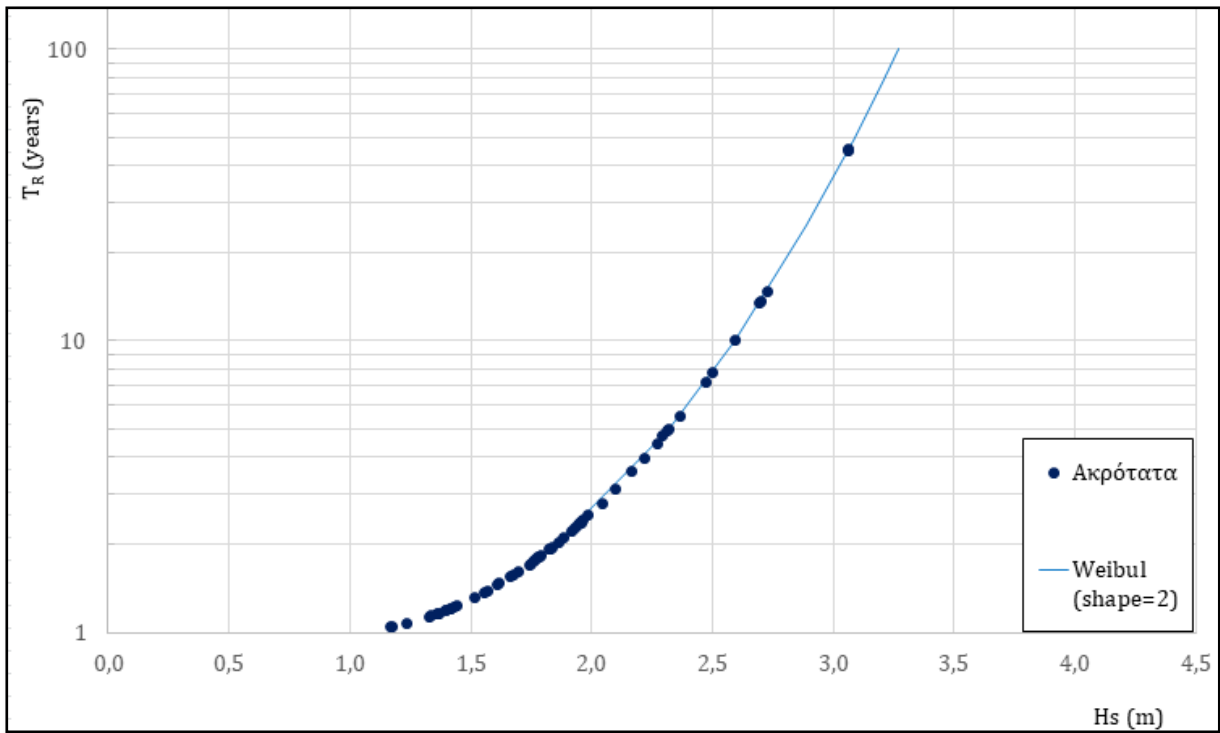
- RCP 8.5



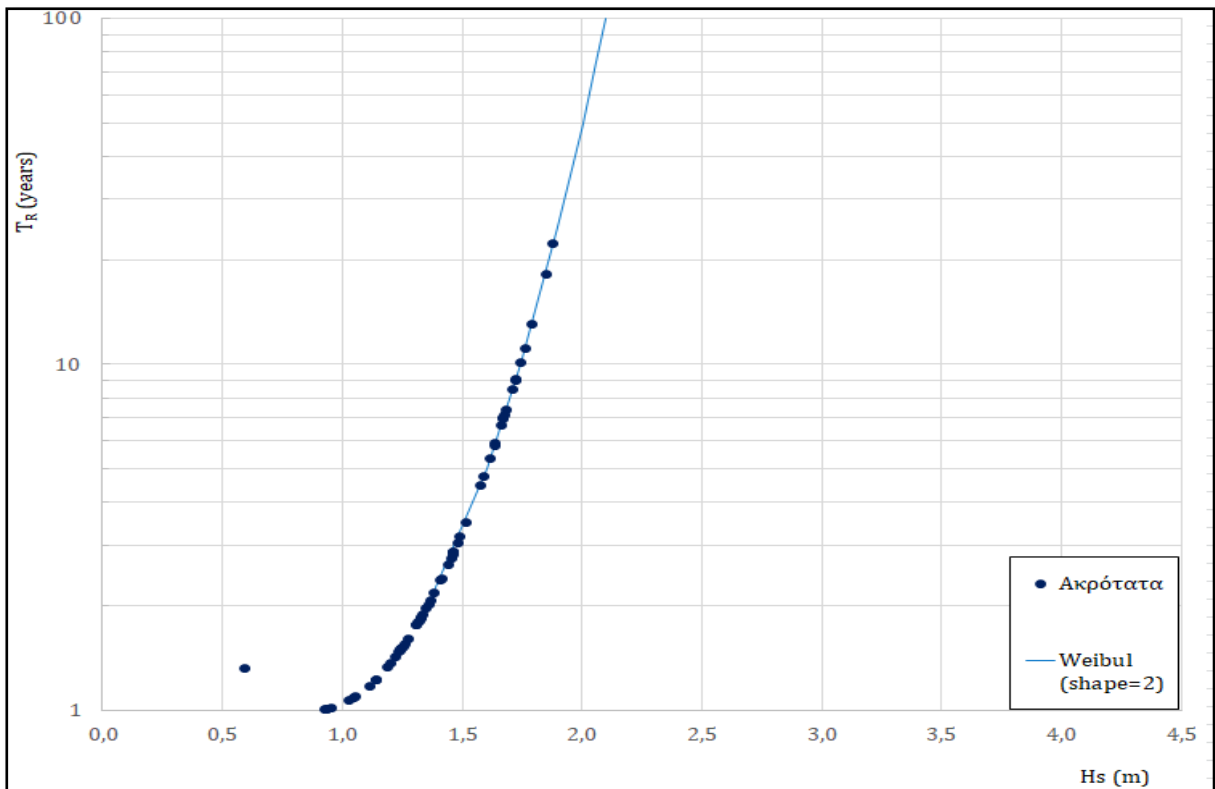
Σχήμα Π.Γ.9: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 100°-145°



Σχήμα Π.Γ.10: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 145°-190°



Σχήμα Π.Γ.11: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 190°-235°



Σχήμα Π.Γ.12: Προσαρμογή θεωρητικής κατανομής για τα ακραία κυματικά δεδομένα του σεναρίου RCP 8.5 στις διευθύνσεις 235°-280°