



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Εκτίμηση συνθηκών ναυσιπλοΐας σε λιμένες με αριθμητικά μοντέλα – Η περίπτωση του Λιμένα Πατρών

Ανδρέας Γ. Παπαδημητρίου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Κ. Μέμος, Ομότιμος Καθηγητής



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Εκτίμηση συνθηκών ναυσιπλοΐας σε λιμένες με αριθμητικά μοντέλα – Η περίπτωση του Λιμένα Πατρών

Ανδρέας Γ. Παπαδημητρίου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2019

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Κ. Μέμος, Ομότιμος Καθηγητής

Λέξεις κλειδιά: Δίαυλος ναυσιπλοΐας, ηρεμία λιμενολεκάνης, κυματικό κλίμα, TOMAWAC, MIKE21 SW, ARTEMIS, Wave - L, Λιμένας Πατρών

Assessment of navigation conditions in ports using numerical models – The case of the Port of Patras

Key words: Approach channel, harbour tranquility, wave climate, TOMAWAC, MIKE21 SW, ARTEMIS, Wave – L, Port of Patras

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας, ομότιμο καθηγητή ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Μέμο, ο οποίος με την καθοριστική του καθοδήγηση, ενδιαφέρον και εμπιστοσύνη που μου έδειξε συνέβαλλε τα μέγιστα στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και με παρακίνησε στο να εντρυφύσω και αγαπήσω ακόμη περισσότερο το αντικείμενο της θαλάσσιας υδροδυναμικής.

Ένα εξίσου μεγάλο ευχαριστώ στους διδάκτορες ΕΜΠ Αναστάσιο Μεταλληνό και Μιχάλη Χονδρό, για το συνεχές ενδιαφέρον τους, τις μακροσκελείς συζητήσεις περί αριθμητικών προσομοιώσεων και τη βοήθεια τους στη διαμόρφωση αυτής της εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την ΔΗΙ και ιδιαίτερα τον κ. Ηλία Μουσούλη για τη δωρεάν παραχώρηση των λογισμικών MIKE21 και MIKE3 που ήταν απαραίτητα για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Περιεχόμενα

Ευρετήριο εικόνων	iv
Ευρετήριο πινάκων	v
Ευρετήριο Σχημάτων.....	vi
Περίληψη.....	vii
Extended Abstract	x
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας.....	2
2. Ανασκόπηση βασικών εννοιών	3
2.1 Θαλάσσιοι κυματισμοί και μηχανισμοί γένεσής τους.	3
2.1.1 Χωρική και χρονική ανάλυση των κυματισμών – Διακριτοποίηση στη φάση ή μέθοδος μέσης φάσης	4
2.2 Διάδοση κυματισμών και μετασχηματισμοί στα αβαθή.	6
2.3 Δίαυλος προσέγγισης	7
2.4 Ηρεμίας λιμενολεκάνης και κυματικά φαινόμενα στους λιμένες	11
2.4.1 Γενικά στοιχεία για την ηρεμία λιμενολεκάνης	11
2.4.2 Μακρές ταλαντώσεις εντός λιμενολεκάνης.....	13
2.4.3 Συστάσεις για βελτίωση της ηρεμίας λιμενολεκάνης	15
3. Περιγραφή των λογισμικών και μεθόδων υπολογισμού.....	16
3.1 Φασματικό μοντέλο διάδοσης κυματισμών TOMAWAC.....	16
3.1.1 Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες.....	16
3.1.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού.....	19
3.1.3 Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες	22
3.1.4 Παράμετροι εισόδου / εξόδου του μοντέλου	24
3.2 Φασματικό μοντέλο διάδοσης κυματισμών MIKE21 SW.....	25
3.2.1 Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες.....	25
3.2.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού.....	26
3.2.3 Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες	27
3.2.4 Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου	29
3.3 Μοντέλο κυματικής διαταραχής ARTEMIS.....	30
3.3.1 Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες.....	30
3.3.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού.....	31
3.3.3 Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες	34
3.3.4 Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου	37
3.4 Μοντέλο υπολογισμού κυματικής διαταραχής WAVE - L.....	38

3.4.1	Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες.....	38
3.4.2	Βασικές εξισώσεις υπολογισμού.....	39
3.4.3	Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες	40
3.4.4	Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου	42
4.	Περιοχή Μελέτης – Προετοιμασία προσομοιώσεων	44
4.1	Παρουσίαση της περιοχής μελέτης.....	44
4.2	Προετοιμασία των αρχικών δεδομένων	45
4.2.1	Κατασκευή της βυθομετρίας στο μοντέλο MIKE ZERO	45
4.2.2	Λήψη ωκεανογραφικών μεταβλητών από τη βάση δεδομένων CMEMS ..	48
4.2.3	Κατασκευή οριακών συνθηκών των φασματικών μοντέλων και μετατροπή των ωκεανογραφικών παραμέτρων σε κατάλληλη μορφή	52
4.2.4	Κατασκευή βυθομετρίας και οριακών συνθηκών στο μοντέλο ARTEMIS .	57
4.2.5	Κατασκευή βυθομετρίας και οριακών συνθηκών στο μοντέλο WAVE–L...	60
4.3	Καθορισμός των παραμέτρων προσομοίωσης	61
4.3.1	Κατασκευή του αρχείου προσομοίωσης του μοντέλου TOMAWAC	61
4.3.2	Κατασκευή του αρχείου προσομοίωσης του μοντέλου MIKE21 SW.....	62
4.3.3	Κατασκευή του αρχείου προσομοίωσης του μοντέλου ARTEMIS.....	65
4.3.4	Καθορισμός των παραμέτρων προσομοίωσης του μοντέλου WAVE-L	66
5.	Αποτελέσματα προσομοιώσεων	67
5.1	Αποτελέσματα εναλλακτικών μοντέλων A	68
5.1.1	Αποτελέσματα μοντέλου TOMAWAC	68
5.1.2	Αποτελέσματα μοντέλου MIKE21 SW	71
5.1.3	Συγκριτική ανάλυση TOMAWAC και MIKE21 SW	74
5.2	Αποτελέσματα εναλλακτικών μοντέλων B	77
5.2.1	Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS	77
5.2.1.1	Αποτελέσματα διάδοσης μονοχρωματικών κυματισμών	78
5.2.1.2	Αποτελέσματα διάδοσης σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών .	79
5.2.1.3	Αποτελέσματα διάδοσης σύνθετων πολυκατευθυντικών κυματισμών	80
5.2.2	Αποτελέσματα μοντέλου Wave – L	81
5.2.3	Συγκριτική ανάλυση για την ανάκλαση των κυματισμών	83
5.2.4	Συγκριτική ανάλυση για την περίθλαση των κυματισμών	88
6.	Συμπεράσματα.....	94
6.1	Σύνοψη συμπερασμάτων.....	94
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	95
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	97
	Παράρτημα Α – Κώδικες υπολογισμού / Αρχεία εισόδου	100
	Παράρτημα Β – Παράγωγα μεγέθη των προσομοιώσεων.....	132

Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2.1: Ενεργειακό περιεχόμενο κυματισμών ανά κύκλο συχνότητας (Holthuijsen, 2007).....	4
Εικόνα 2.2: Τροχιές υγρών μορίων (από αριστερά προς τα δεξιά) σε ρηχά, ενδιάμεσα και βαθιά νερά αντίστοιχα (Dean & Dalrymple 1984).....	6
Εικόνα 2.3: Οι 6 βαθμοί ελευθερίας κίνησης των σκαφών	9
Εικόνα 2.4α: Βύθισμα (Z2) λόγω συνδυασμένης επίδρασης heave και pitch (PIANC,2014).....	10
Εικόνα 2.5β: Βύθισμα (Z3) λόγω συνδυασμένης επίδρασης heave και roll (PIANC,2014).....	10
Εικόνα 2.6: Στάσιμοι κυματισμοί σε απλή ορθογωνική δεξαμενή για τις τρεις πρώτες αρμονικές..	15
Εικόνα 3.1: Καταμερισμός φάσματος κυματισμών ως προς τις συχνότητες και τις διευθύνσεις διάδοσης (25 συχνότητες και 12 διευθύνσεις στην παρούσα εικόνα)	18
Εικόνα 3.2: Τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής του MIKE21 SW.....	25
Εικόνα 3.3: Παρουσίαση του παράθυρου προεργασίας της προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW	29
Εικόνα 3.4: Συμβολισμοί για την επιτρεπόμενη κλίση πυθμένα στο μοντέλο ARTEMIS (τροποποιημένη από το ARTEMIS User Manual)	32
Εικόνα 3.5: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου επίλυσης του ARTEMIS (Τροποποιημένη από το Artemis User's Manual)	36
Εικόνα 3.6: Σχηματική περιγραφή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο ARTEMIS (Artemis User's Manual).....	37
Εικόνα 3.7: Υπολογιστικό πλέγμα και διακριτοποίηση μοντέλου Wave-L (Καραμπάς Θ. 2015)	40
Εικόνα 3.8: Υπολογιστικό πεδίο - Συμβολισμοί (Καραμπάς Θ. 2015).....	42
Εικόνα 4.1: Γεωγραφική θέση του Νέου Λιμένα Πατρών	44
Εικόνα 4.2: Σημεία Βυθομετρίας και όρια της περιοχής μελέτης προς εφαρμογή στα μοντέλα MIKE21 SW και TOMAWAC.	46
Εικόνα 4.3: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων για την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος.....	47
Εικόνα 4.4: Βυθομετρία υπολογιστικού πεδίου του μοντέλου A	48
Εικόνα 4.5: Διαδραστική διαδικασία λήψης δεδομένων από τη βάση CMEMS για την περιοχή μελέτης.....	51
Εικόνα 4.6: Οριακές συνθήκες στο μοντέλο TOMAWAC - με πράσινο σημειώνεται το ανοιχτό όριο της περιοχής μελέτης ενώ με καφέ τα στερεά όρια	53
Εικόνα 4.7: Εικονιστικό επίπεδο με το πλέγμα τιμών της μεταβλητής χαρακτηριστικό ύψος κύματος από CMEMS, και επίπεδο με τους κόμβους του ανοιχτού ορίου του υπολογιστικού πλέγματος	54
Εικόνα 4.8: Αρίθμηση οριακών κόμβων στο τοπικό σύστημα	55
Εικόνα 4.9: Κωδική ονομασία των ανοιχτών ορίων της περιοχής μελέτης στο λογισμικό MIKE21 SW	56
Εικόνα 4.10: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων και βυθομετρία στο μοντέλο ARTEMIS	58
Εικόνα 4.11: Σχηματική περιγραφή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο ARTEMIS	59
Εικόνα 4.12: Στραμμένος κάνναβος και βαθυμετρία υπολογιστικού πεδίου στο μοντέλο WAVE-L. 60	
Εικόνα 4.13: Παράθυρο καθορισμού των παραμέτρων προσομοίωσης στο λογισμικό MIKE21 SW63	
Εικόνα 5.1: Θέση σημείου δειγματοληψίας (Σημείο A) κυματικών χαρακτηριστικών στο μοντέλο A	67
Εικόνα 5.2: Περίγραμμα υπολογιστικού πεδίου μοντέλου ARTEMIS, αναφορικά με το πλέγμα του μοντέλου TOMAWAC	78
Εικόνα 5.3: Συμβολή ανακλώμενου και προωθούμενου κυματισμού για περίπτωση πλάγιας πρόσπτωσης στον κυματοθραύστη (Bocconi, 2000).....	84
Εικόνα 5.4: Συντελεστής περίθλασης για κάθετη πρόσπτωση κυματισμών σε μονοχρωματικούς (αριστερά) και σύνθετους (δεξιά) κυματισμούς (Bocconi, 2000)	88

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 2.1: Μέγιστα επιτρεπόμενα ύψη κύματος εντός λιμένα (Δασκαλάκης, 2009)	12
Πίνακας 2.2: Οδηγία για όρια μέγιστων ταχυτήτων παραβολής για ασφαλείς συνθήκες παραβολής	13
Πίνακας 3.1: Σημαντικότερες κυματικές παράμετροι εξόδου του μοντέλου MIKE21 SW	30
Πίνακας 4.1: Δεδομένα κυματικών χαρακτηριστικών ανοιχτά του Νέου Λιμένα Πατρών στις 27/11/2018	50
Πίνακας 4.2: Φυσικές διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη στο μοντέλο TOMAWAC.....	62
Πίνακας 4.3: Φυσικές διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη στο μοντέλο MIKE21 SW	64
Πίνακας 4.4: Διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη στο μοντέλο ARTEMIS	65
Πίνακας 5.1: Στατιστικές παράμετροι χαρακτηριστικού ύψους κύματος από τις προσομοιώσεις TOMAWAC και MIKE21 SW	75
Πίνακας 5.2: Στατιστικές παράμετροι μέσης διεύθυνσης διάδοσης των κυματισμών, από τις προσομοιώσεις TOMAWAC και MIKE21 SW	76
Πίνακας 5.3: Στατιστικές παράμετροι περιόδου αιχμής των κυματισμών, από τις προσομοιώσεις TOMAWAC και MIKE21 SW	77
Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού στο μοντέλο ARTEMIS.....	78
Πίνακας 5.5: Εισερχόμενο χαρακτηριστικό ύψος κύματος στο Νότιο άκρο του κυματοθραύστη ...	89

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 5.1: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της πρώτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο TOMAWAC	68
Σχήμα 5.2: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της δεύτερης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο TOMAWAC	69
Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της τρίτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο TOMAWAC	70
Σχήμα 5.4: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος στο Σημείο Α, με τη θεώρηση hotstart και coldstart.....	71
Σχήμα 5.5: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της πρώτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW	72
Σχήμα 5.6: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της δεύτερης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW	73
Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της τρίτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW	73
Σχήμα 5.8: Χρονοσειρά χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο Σημείο Α	74
Σχήμα 5.9: Χρονοσειρά μέσης διεύθυνσης διάδοσης των κυματισμών (από), στο Σημείο Α	75
Σχήμα 5.10: Χρονοσειρά περιόδου αιχμής των κυματισμών στο Σημείο Α	76
Σχήμα 5.11: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος για μονοχρωματικούς κυματισμούς στο μοντέλο ARTEMIS	79
Σχήμα 5.12: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών στο μοντέλο ARTEMIS	80
Σχήμα 5.13: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος σύνθετων πολυκατευθυντικών κυματισμών στο μοντέλο ARTEMIS	81
Σχήμα 5.14: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Wave – L.....	82
Σχήμα 5.15: Τριδιάστατη κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο μοντέλο ARTEMIS - μονοχρωματικοί κυματισμοί.....	84
Σχήμα 5.16: Τριδιάστατη κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο μοντέλο ARTEMIS – σύνθετοι μονοκατευθυντικοί κυματισμοί	85
Σχήμα 5.17: Τριδιάστατη κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο μοντέλο ARTEMIS – σύνθετοι πολυκατευθυντικοί κυματισμοί	86
Σχήμα 5.18: Συντελεστής περίθλασης στην προστατευμένη περιοχή του κυματοθραύστη, για μονοχρωματικούς κυματισμούς.....	90
Σχήμα 5.19: Συντελεστής περίθλασης στην προστατευμένη περιοχή του κυματοθραύστη, για σύνθετους μονοκατευθυντικούς κυματισμούς.....	91
Σχήμα 5.20: Συντελεστής περίθλασης στην προστατευμένη περιοχή του κυματοθραύστη, για σύνθετους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς	92
Σχήμα Β.1: Χωρική κατανομή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (m) για μονοχρωματικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS	133
Σχήμα Β.2: Ποσοστό θραυόμενων κυματισμών για μονοχρωματικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS	134
Σχήμα Β.3: Ποσοστό θραυόμενων κυματισμών για σύνθετους μονοκατευθυντικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS	135
Σχήμα Β.4: Ποσοστό θραυόμενων κυματισμών για σύνθετους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS	136
Σχήμα Β.5: Ταχύτητα φάσης (m/s) για όλες τις περιπτώσεις κυματισμών, στο μοντέλο ARTEMIS.....	137
Σχήμα Β.6: Χωρική κατανομή της ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας (m), στο μοντέλο WAVE-L ..	138
Σχήμα Β.7: Ποσοστό θραυόμενων κυμάτων, στο μοντέλο WAVE-L	139
Σχήμα Β.8: Ταχύτητα φάσης (m/s) των κυματισμών, στο μοντέλο WAVE-L.....	140

Περίληψη

Οι λιμένες αποτελούν ζωτικούς κρίκους στην αλυσίδα των θαλάσσιων μεταφορών επηρεάζοντας καθοριστικά την ποιότητά τους. Η βασική λειτουργία των λιμένων περιλαμβάνει τις διαδοχικές διαδικασίες είσπλου σκαφών, επιλογής θέσης πρόσδεσης, φορτοεκφόρτωσης εμπορευμάτων, από-επιβίβασης επιβατών και απόπλου. Συνεπώς η γνώση των κυματικών χαρακτηριστικών στους διαύλους ναυσιπλοΐας και στη λιμενολεκάνη είναι ζωτικής σημασίας για την απρόσκοπτη λειτουργία του λιμένα και την αποφυγή ατυχημάτων.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής είναι η κατάστρωση ενός ολοκληρωμένου αριθμητικού μοντέλου πρόβλεψης κυματικών χαρακτηριστικών, με χρήση ωκεανογραφικών μεταβλητών από δορυφόρους, που θα είναι σε θέση να παρέχει προβλέψεις της θαλάσσιας κατάστασης ανά τρεις ώρες, με τελικό σκοπό την εξέταση αν διαταράσσονται οι συνθήκες ναυσιπλοΐας και η ηρεμία λιμενολεκάνης.

Το ολοκληρωμένο αυτό μοντέλο θα αποτελείται από ένα φασματικό κυματικό μοντέλο (Μοντέλο Α) και ένα μοντέλο ήπιας κλίσης (Μοντέλο Β) που θα αναλάβουν αντίστοιχα την διάδοση των κυματισμών στο δίαυλο ναυσιπλοΐας και εντός της λιμενολεκάνης. Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων θα εφαρμοστούν δύο εναλλακτικά μοντέλα Α (TOMAWAC και MIKE21 SW) και δύο εναλλακτικά μοντέλα Β (ARTEMIS και Wave – L), προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελεσματά τους και να εκτιμηθεί η ικανότητά τους στην περιγραφή των φυσικών νόμων διάδοσης και μετασχηματισμού των κυματισμών.

Το παραπάνω μοντέλο εφαρμόζεται για την περιοχή του Πατραϊκού Κόλπου, με έμφαση να δίνεται στο Νέο Λιμένα Πατρών. Τα πρωταρχικά δεδομένα που τροφοδοτούν τα φασματικά κυματικά μοντέλα προέρχονται από τη βάση Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS) και για την προετοιμασία των αρχικών δεδομένων σε κατάλληλη μορφή χρησιμοποιείται μια μέθοδος μέσω του λογισμικού QGIS, ενώ οι προσομοιώσεις εκτελούνται για ένα τρίωρο

Από τις προσομοιώσεις των εναλλακτικών μοντέλων Α, προκύπτει αρκετά μεγάλη ταύτιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου TOMAWAC και MIKE21 SW για το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, με μεγαλύτερες αποκλίσεις να εμφανίζονται στη διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών και στην περίοδο αιχμής. Και τα δύο μοντέλα κρίνονται ότι είναι σε θέση να περιγράψουν ικανοποιητικά τη διάδοση των κυματισμών στην ευρύτερη κλίμακα του Πατραϊκού Κόλπου.

Η συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των εναλλακτικών μοντέλων Β, παρουσιάζει μεγαλύτερες διαφορές, κρίνεται όμως ότι τόσο το ARTEMIS όσο και το Wave – L μπορούν να αναλάβουν τη διάδοση των κυματισμών εντός της λιμενολεκάνης. Οι διαφορές που προκύπτουν στα μοντέλα, συνδέονται κυρίως με το φαινόμενο της ανάκλασης, και στην παρούσα μεταπτυχιακή με την παρουσίαση εναλλακτικών θεωρήσεων θεωρείται ότι η σημαντική αύξηση του ανακλώμενου κυματισμού οφείλεται στο αν οι εισερχόμενοι κυματισμοί χειρίζονται ως σύνθετοι ή μονοχρωματικοί στο αριθμητικό μοντέλο.

Τέλος για το Νέο Λιμένα Πατρών, από τις προσομοιώσεις προκύπτει ότι ικανοποιούνται οι συνθήκες ηρεμίας λιμενολεκάνης για το τρίωρο που εξετάστηκε. Τα αποτελέσματα κρίνεται ότι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την εγκυρότητα των πρωταρχικών δεδομένων της βάσης CMEMS και τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου κυματισμού. Σε κάθε περίπτωση όμως το ολοκληρωμένο μοντέλο που παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για πληθώρα χρηστών, καθώς δύναται να περιγράψει ικανοποιητικά την διάδοση των κυματισμών στο διάυλο ναυσιπλοΐας και εντός της λιμενολεκάνης.

Extended Abstract

1. INTRODUCTION

Ports are vital links in the chain of maritime transportations and have a decisive impact on their quality. Recent reports of marine accidents show that up to 60% of them are due to the human factor. The majority of accidents could be avoided if appropriate means of support for navigation existed. Consequently, the need for near real time forecast of the sea state, especially in approach channels and inside the harbour, is increasing rapidly.

The aim of the present study is to develop an integrated numerical model that will be capable of using satellite forecasts of the sea state from open source databases as input and handle the wave propagation in a larger coastal scale focused in the harbour area. The wave propagation will be divided in two scales, a larger scale of almost 20 km² the simulation of which will be carried out by a spectral wave model (Model A) and a much smaller scale of about 5 km², which will be carried out by a phase resolving mild slope model (Model B).

In order to determine the capabilities of the aforementioned models to accurately predict the sea conditions, two alternative numerical models will be used as Model A and two as Model B. Regarding Model A, the third generation spectral wave model TOMAWAC developed at LNHE and the third generation spectral wave model MIKE21 SW, developed by DHI, will be used. As far as Model B is concerned, the elliptic mild slope wave agitation model ARTEMIS developed at LNHE, and the hyperbolic mild slope wave model WAVE – L developed at AUTH university, will be used.

In the present study, a 3 hour simulation was carried out for the Port of Patras using oceanographic variables concerning wave height characteristics provided by the Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS). The resulting spatial wave height distributions which stem from the simulations of the alternative models are compared for the Port of Patras, in order to determine the capabilities of the aforementioned models to accurately describe the physical processes related to the wave propagation in coastal areas. Special attention will be given in the wave conditions in the approach channel and inside the harbour area, in order to finally decide whether the conditions required for harbour tranquility are satisfied.

2. THEORETICAL BACKGROUND

For the accurate prediction of the wave characteristics, the most important of which are wave height, peak period and mean wave direction, one has to divide the study area in two areas of different space and time scales, depending on the accuracy of the desired representation of the sea state. Concerning the scale of coastal waters, that is generally comprised of the offshore area of a harbour, wave conditions can be forecast with numerical wave models accounting for the generation, propagation and dissipation of the waves. The description of ocean waves at this scale is not aimed at the detailed description of the sea state. Rather, such details should be ignored and the description should be aimed at characteristics that are relevant and predictable. This can be achieved by taking certain averages of the waves in space and time. This is the phase-averaging approach, in which statistical properties of the waves are defined and modelled. Meaningful averaging requires that, in some sense, the wave situation is

constant within the averaging interval, i.e., the situation should be homogeneous and stationary in the space and time interval considered. If the waves are not too steep and the water is not too shallow, the physically and statistically most meaningful phase-averaged characteristic of the waves is the wave spectrum. The spectrum is therefore determined in a deterministic manner from winds, tides and seabed topography. Thus, the computation of statistical characteristics of the waves (represented by the spectrum) are carried out in a deterministic manner. On small scales, of the order of a dozen or fewer wave periods or wave lengths (however loosely defined), (e.g., the dimension of the surf zone or a small harbour), waves can be described in great detail with theoretical models (details down to small fractions of the period or wave length). In these models, the basic hydrodynamic laws can be used to estimate the motion of the water surface, the velocity of the water particles and the wave-induced pressure in the water at any time and place in the water body. Since this approach provides details with a resolution that is a small fraction of the wave length or period, it is called the phase-resolving approach. (Holthuijsen, 2007)

The spectral wave models used in the present study as model A both follow the phase averaged approach since they provide the evolution of the spectrum on each mesh element.

The application domain of these models extend from regional scale to the coastal zone. They highly capable to be used for both forecasting and hindcasting studies especially in the offshore domain and the design of offshore structures. The calculations are performed on a unstructured finite element mesh, and due to the nature of the model, there exist no restrictions on the minimum element size, the spatial mesh resolution is left on the user's decision.

The governing equation is the action-balance equation of the wave spectrum $N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t)$, given in the so-called transport form:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial N}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial N}{\partial y} + \dot{k}_x \frac{\partial N}{\partial k_x} + \dot{k}_y \frac{\partial N}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (1a)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \text{grad}_{\mathbf{x}, \mathbf{k}}(N) = Q \quad (1b)$$

when defining $\mathbf{V}=(\dot{x}, \dot{y}, \dot{k}_x, \dot{k}_y)$ and Q representing the source and sink terms modeled.

The transfer rates are given by the linear wave theory (Komen et al., 1994)

$$\dot{x} = C_g \frac{k_x}{k} + U_x \quad (2)$$

$$\dot{y} = C_g \frac{k_y}{k} + U_y \quad (3)$$

$$\dot{k}_x = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial x} - \mathbf{k} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} \quad (4)$$

$$\dot{k}_y = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial y} - \mathbf{k} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial y} \quad (5)$$

The above equation is discretized in a spatial plane, which can be described in either Cartesian or spherical coordinates, and in a spectro-angular plane which consists of the discretized quantities of frequency and direction.

By switching the variables from (x, y, k_x, k_y) to (x, y, fr, q) and solving in Cartesian coordinates, it can be shown that the following relation exists for the directional spectrum of wave action:

$$\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial t} + \dot{x}\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial x} + \dot{y}\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial y} + \dot{\theta}\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial \theta} + fr\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial fr} = \tilde{B}\tilde{Q}(x, y, \theta, fr, t) \quad (6)$$

considering that $\tilde{B} = \frac{c_g}{(2\pi)^2 k fr}$

The quantity F which appears in equation 6 is called directional spectrum of variance density and is linked with the action density spectrum and the frequency dispersion σ by the relation:

$$F = N \sigma \quad (7)$$

The n -order ($n = 0, 1, 2, \dots$) moments m_n of the variance density directional spectrum are then defined as:

$$m_n = \int_{f=0}^{\infty} \int_{\theta=0}^{2\pi} f^n F(f, \theta) df d\theta \quad (8)$$

Using the above equation, various spectral quantities, such as the Spectral Wave Height H_{m0} can be retrieved at each time step for every mesh element.

The models used in the following study as Model B handle the wave propagation and agitation inside the Port of Patras and are therefore required to follow the phase resolving approach in order to describe the sea state in higher detail.

Firstly, the model ARTEMIS developed at LNHE is an elliptic mild slope wave model that performs its calculations on an unstructured finite element mesh. The model's main application of concern is the wave agitation in harbours or small bays.

ARTEMIS is able to take into account the following phenomena:

- Wave reflection by an obstacle
- Wave diffraction behind an obstacle
- Wave refraction by bottom variation
- Regular wave propagation
- Monodirectional or multidirectional random wave propagation
- Bottom friction dissipation
- Bathymetric breaking dissipation

The governing equation solved is Berkhoff's (1972) mild slope equation in its elliptic form, modified by Benoit (1999) to consider the effects of a rapidly varying bed topography.

$$\nabla(CC_g \nabla \varphi) + CC_g [k^2(1+f) + ik\mu] \varphi = 0 \quad (9)$$

with f being:

$$f = E_1(kh)(\nabla h)^2 + \frac{E_2(kh)}{k_0} \Delta h \quad (10)$$

The functions E_1 and E_2 are represented according to Champerlain & Porter (1995):

$$E_1(kh) = \frac{\{x^4 + 4x^3 \sinh(x) - 9 \sinh(x) \sinh(2x) + 3x[x + 2 \sinh(x)][\cosh^2(x) - 2 \cosh(x) + 3]\}}{6n[x + \sinh(x)]^3} \quad (11)$$

$$E_2(kh) = \frac{[\sinh(x) - x \cosh(x)]}{4n \cosh^2(x/2)[x + \sinh(x)]} \quad (12)$$

where:

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{x}{\sinh(x)} \right]$$

$$x = 2kh$$

The main results at each node of the computational mesh are the height, the phase and the direction of the wave. For the adequate resolution of the wave height and the stability of the linear system being solved it is required that the mean dimension of each cell is less than $L/7$, with L being the offshore wave length.

On the other hand, the model WAVE-L developed by Professor Th. V. Karambas at AUTH University (Christopoulos et al. 2012), solves the linear time-dependend hyperbolic mild slope equation on a regular equidistant grid. The model's application domain is generally the harbour area and the model focuses on agitation studies in harbours and layout design.

WAVE-L's governing equation is based on the modified hyperbolic mild slope equation developed by Watanabe & Muruyama (1986):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(U_w d)}{\partial x} + \frac{\partial(V_w d)}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial U_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial y} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial y} = v_h \left(\frac{\partial^2 U_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_w}{\partial y^2} \right) - f_b \sigma U_w \quad (14a)$$

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial x} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial x} = v_h \left(\frac{\partial^2 V_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_w}{\partial y^2} \right) - f_b \sigma V_w \quad (14\beta)$$

The main results at each node of the computational grid are the wave height, the free surface elevation and the breaking waves ratio at each time step. For the adequate resolution of the wave height and the stability of the linear system being solved it is required that the mean dimension of each cell is less than $L/7$, with L being the offshore wave length. The total

simulation time must be at least double of the mean propagation time of the offshore wave at the boundary.

3. METHODOLOGY

Input data for the numerical models consist of spectral wave parameters and are downloaded from the Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS). The time span of the input data is from 29/09/2018 11:00 to 29/09/2018 13:00 and cover a geographical area between: $(\varphi, \lambda) = (21.56, 38.08) \div (21.81, 38.33)$. The oceanographic variables, namely spectral significant wave height, peak wave period and mean wave direction will be used to construct spatially varying boundary conditions for the spectral wave models (Model A). For both alternative models used in the present study the same unstructured finite element mesh was used and the simulation was carried out considering fractional 1 hour simulations with successive re-initialization of the spectrum (hotstart), and a full simulation of 3 hours considering zero spectrum initial conditions (coldstart). The mesh was constructed in the MIKE Zero model interface. Indicative results for the third hour of the simulation from both TOMAWAC and MIKE21 SW wave models are given in Figure 1 and Figure 2 respectively.

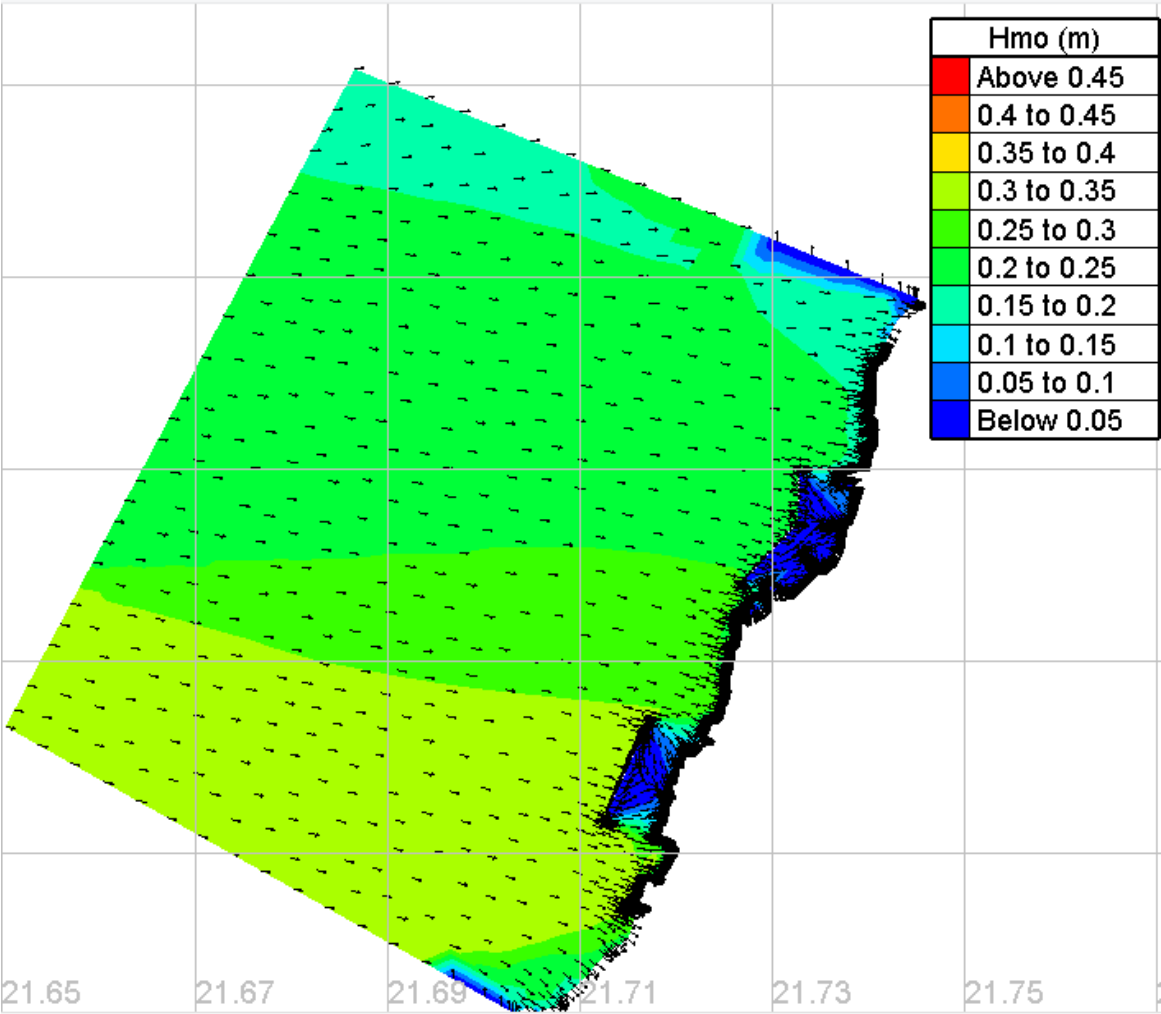


Figure 1: Spatial distribution of spectral wave height at the third hour of the simulation-Tomawac wave model

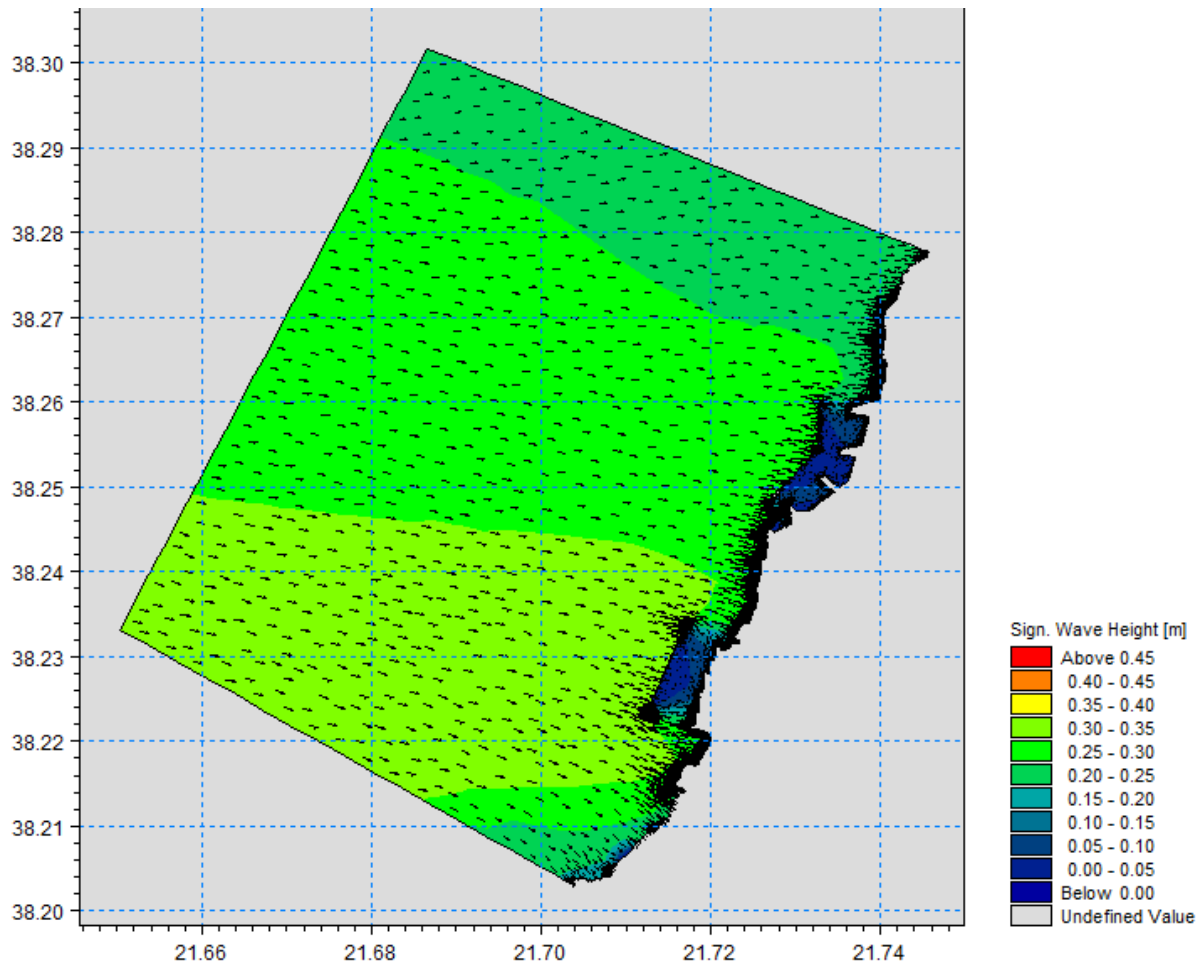


Figure 2: Spatial distribution of spectral wave height at the third hour of the simulation-MIKE21 SW wave model

The results of the significant wave height that stem from the TOMAWAC model simulations were then used as a boundary condition to force the alternative models used as Model B in this study, namely ARTEMIS and Wave-L. The wave height, peak period and mean wave direction were extracted along the line that coincides with the nodes of the offshore boundary used in both alternative mild slope models. ARTEMIS offers the capability to simulate spectral wave propagation, so three different simulations were carried out with the aforementioned model, a regular wave case, a monodirectional spectral and a multidirectional spectral wave case in order to compare the results.

In the following figures (Figure 3 and Figure 4) the wave height distribution after steady state is reached is given for the regular wave simulations executed in ARTEMIS and WAVE-L respectively.

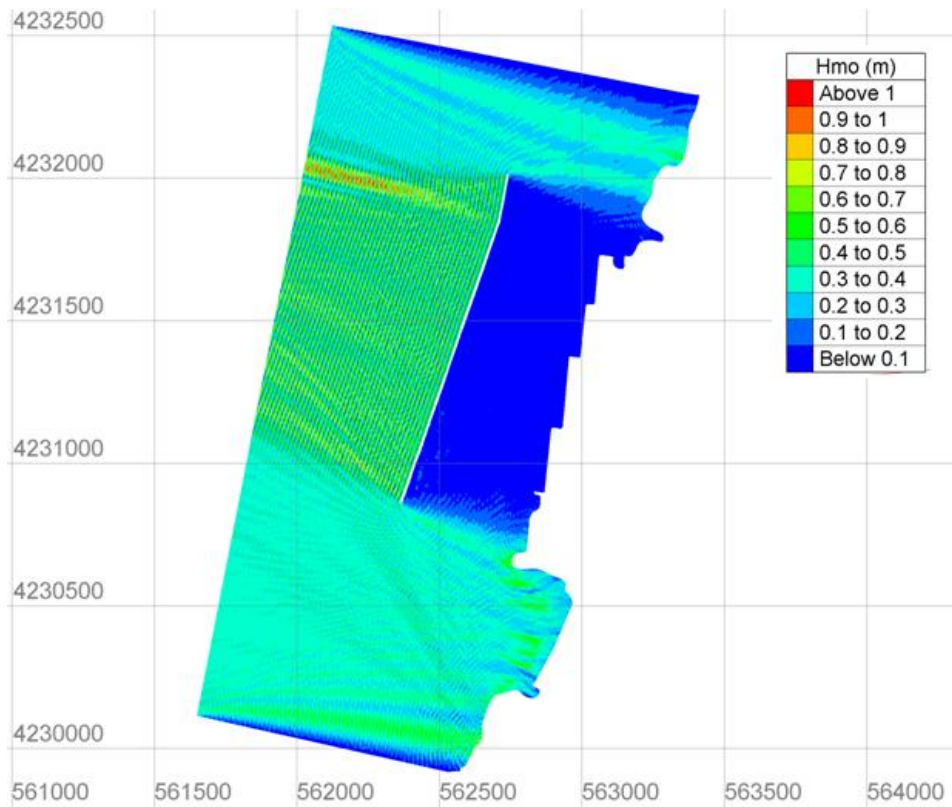


Figure 3: Spatial distribution of spectral wave height after steady state is achieved in ARTEMIS wave model

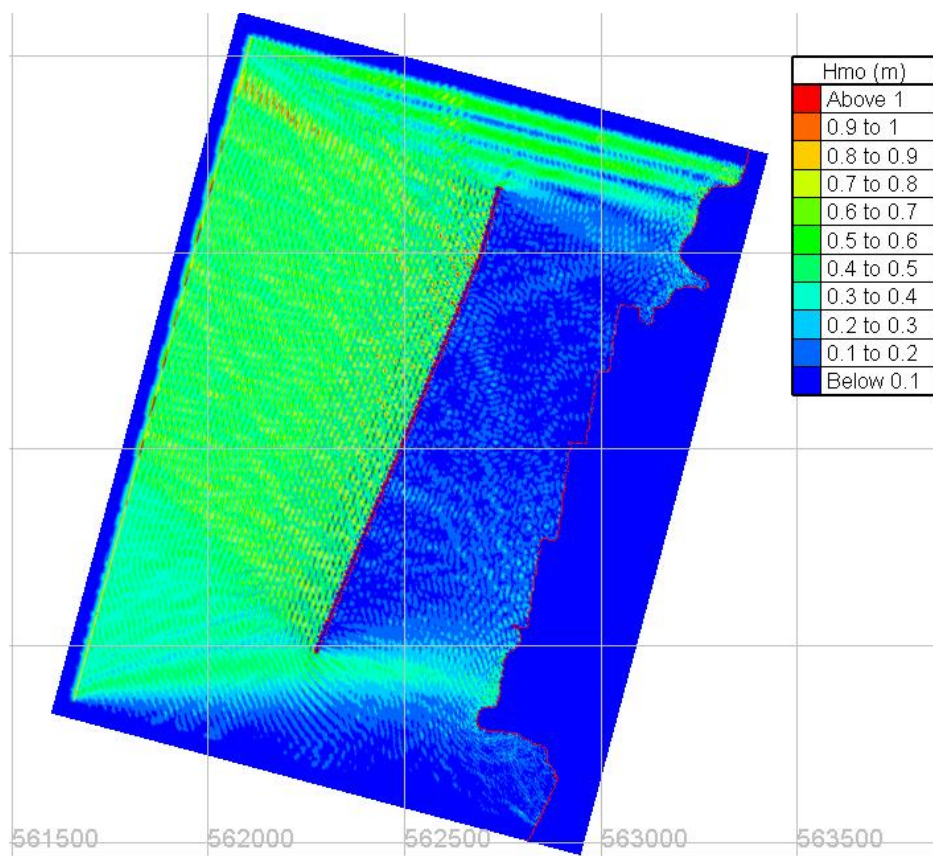


Figure 4: Spatial distribution of spectral wave height after steady state is achieved in Wave-L wave model

Both models are proven to be capable to simulate the transformation of waves entering shallow water, as well as wave-structure interaction phenomena and most importantly reflection and diffraction.

4. CONCLUSIONS

The integrated model used in the present study seems largely capable of handling the propagation in both oceaning scales and in coastal waters with emphasis given on the results inside the harbour layout.

The alternative models used as Model A, seem to largely be capable to capture the physics behind the wave propagation from deep to shallow water. A discrepancy in total simulation time was observed between the models, with TOMAWAC being over 10 times faster than MIKE21 SW. This aspect seems to emanate from the convergence of the spatially varying boundary conditions in MIKE21 SW which consumes a lot of simulation time before the solution converges.

The spatial distribution of wave height between TOMAWAC and MIKE21 SW, shows little differences, that can be mostly attributed in the different construction of the spatially varying boundary conditions and the different solution scheme used by the two models. For a more analytic comparison between the model results, a time series for the full simulation at a specific point about 800 m offshore the breakwater center is given in Figure 5. The two models results seem to largely be in a good agreement and the minimal differences are eliminated at the simulation end.

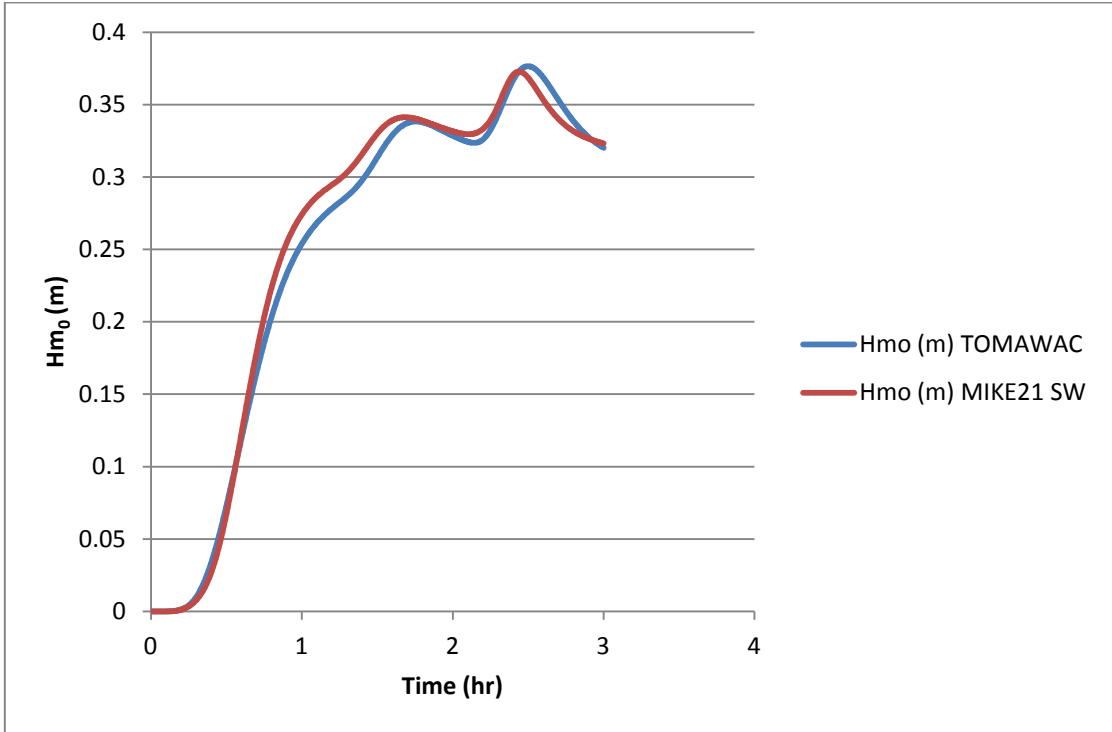


Figure 5: Time series of significant wave height at a Point 800 offshore of the breakwater

Comparing the results between ARTEMIS and Wave-L for the regular wave case, large reflected wave trains can be observed due to the presence of the breakwater. Furthermore

these reflected wave trains seem to be propagating until they reach the model boundaries, seemingly without dissipating. This phenomenon can be explained by the quasi-deterministic theory of wind waves since regular wave trains form nodes and antinodes at specific positions along the wave length and superposition of different wave components results in this unphysical increase in reflected wave height. Additionally in Wave-L wave components inside the harbour area seem to be constantly reflected between the lee side of the breakwater and the quay walls, creating oscillations inside the harbour that are not present in the simulation of ARTEMIS.

Further investigation about the phenomenon of reflection due to the breakwater was carried out with spectral wave simulations in the ARTEMIS wave model. It was observed that using regular components with a small difference in period and even direction can significantly reduce the distance of which the reflected waves travel, since the positions that the nodes and antinodes appear are different for each spectrum component. Indicative results of the regular wave propagation and the multidirectional random wave propagation are given in Figure 6 and Figure 7 respectively from bird's eye view (the wavemaker is to the left of the Figures while the coastline is to the right).

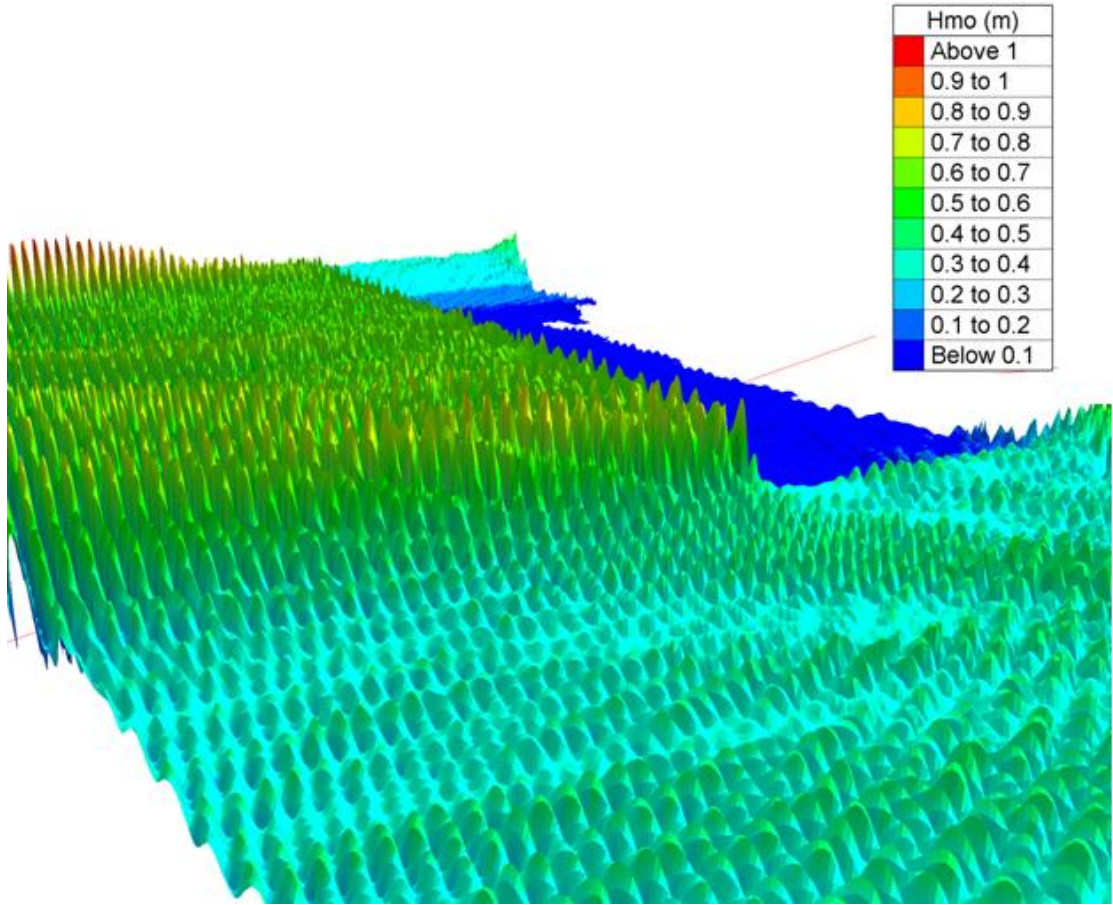


Figure 6: 3-D Wave height distribution for the regular wave case in ARTEMIS model

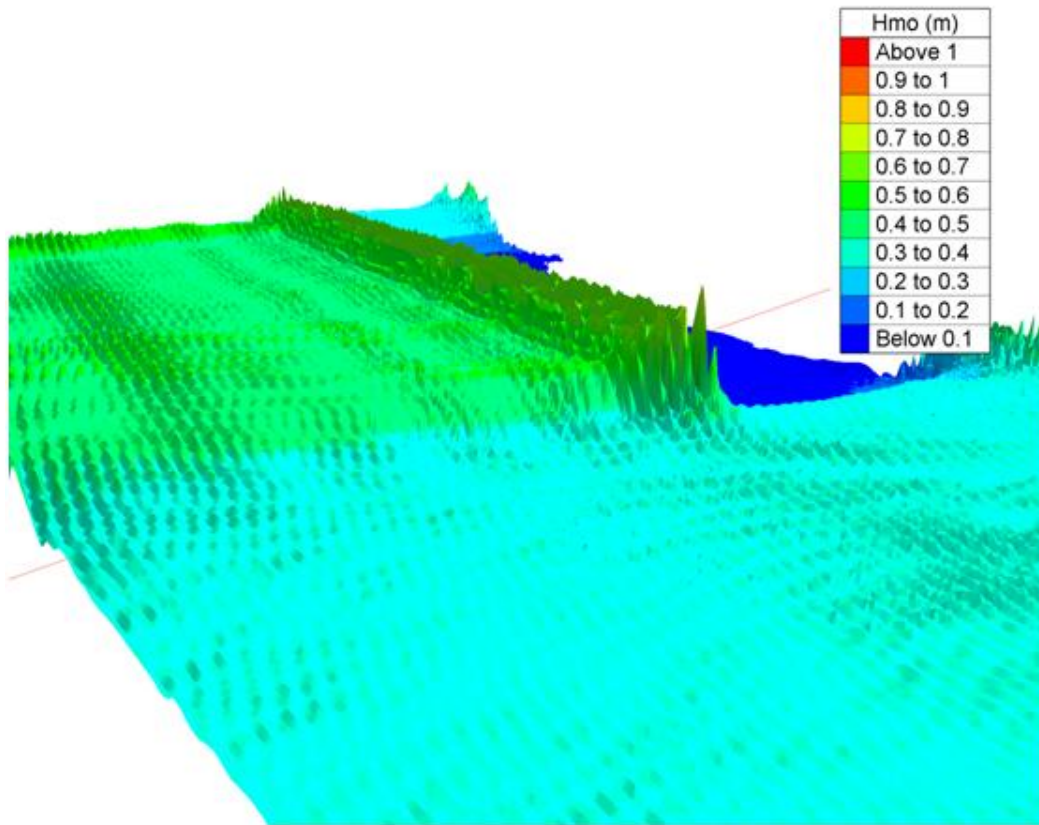


Figure 7: 3-D Wave height distribution for the multidirectional random wave case in ARTEMIS model

No serious agitations were observed inside the harbour layout for the simulation duration, however this can be attributed to the small incident wave height offshore (about 0.35 m) and a more thorough investigation for various wave conditions must be carried out.

The integrated model presented in this study, along with the various models that were examined can provide accurate forecasts of the sea state at 3 hour intervals with a minimal computational effort. With small improvements, mainly in model B (e.g. improvement of the results regarding reflected wave trains), this integrated model can be a valuable asset to a wide variety of users and be utilized to improve maritime safety and management of the harbour activities.

5. REFERENCES

- Awk T., 2017, Tomawac User Manual – Version 7.2, France
- Benoît M., 1999, Extension of Berkhoff's refraction-diffraction equation for rapidly varying topography (In French) HE-42/99/049/A
- Berkhoff, J.C.W., 1972, Mathematical models for simple harmonic linear water waves: Wave diffraction and refraction, Netherlands
- Chamberlain, P., and Porter, D., 1995, The modified mild-slope equation. *Journal of Fluid Mechanics*, 291, pp 393-407.
- Christopoulos, S., Avgeris, I., and Karambas, Th. V., 2012, HMAR_HARBOURL: An Integrated Numerical Model for Harbour Layout Design, *Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp 1243-1250
- DHI, 2016, MIKE21 SW FM – Spectral Wave Module – Scientific Documentation, Denmark
- EDF – R&D, 2009, Telemac Modelling System Theoretical Note and User Manual - Artemis Software Wave agitation Version 6.2, France
- Holthuijsen L. H., 2007, *Waves in Oceaning and Coastal Waters*, Cambridge University Press, UK
- Komen G.J, Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S. and Jansen P.A.E.M., 1994, *Dynamics and modelling of ocean waves*, Cambridge University Press, UK
- Watanabe, A. and Maruyama, K., 1986, Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking, *Coastal Engineering in Japan*, vol. 29, pp. 19-39

1. Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας

Η πρόβλεψη των κυματικών συνθηκών στο διάυλο ναυσιπλοΐας και εντός των λιμενολεκάνων, αποτελεί σημαντικό αντικείμενο διερεύνησης των τελευταίων δεκαετιών, καθώς η επίτευξη της ηρεμίας εντός της λιμενολεκάνης είναι εξαιρετικά σημαντική κυρίως για λόγους λειτουργικότητας του λιμένα.

Τα τελευταία χρόνια, τον κλάδο της θαλάσσιας υδραυλικής απασχολεί η κατά το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη των κυματικών χαρακτηριστικών με την ταυτόχρονη αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων προκειμένου να παρέχονται προβλέψεις σχεδόν σε πραγματικό χρόνο. Η απαίτηση για εξοικονόμηση χρόνου, σε συνδυασμό με την όλο αυξανόμενη ανάγκη για μεγαλύτερη γεωγραφική κάλυψη έχει οδηγήσει στην αξιοποίηση στοιχείων από δορυφόρους τα οποία είναι διαθέσιμα σε ψηφιακή μορφή χωρίς αντίτιμο και χρησιμοποιούνται πλέον κατά κόρον.

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής είναι η κατάστρωση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου (με χρήση υπάρχοντων διαθέσιμων αριθμητικών μοντέλων) που θα είναι ικανό να εκτελέσει την εξής διαδικασία:

- Αποθήκευση δεδομένων ωκεανογραφικών μεταβλητών που προέρχονται από δορυφόρους (π.χ. χαρακτηριστικό ύψος κύματος στα βαθιά νερά, περίοδο αιχμής, ταχύτητα και διεύθυνση ρεύματος κ.α.).
- Μετασχηματισμό των ως άνω μεταβλητών σε κατάλληλη μορφή για τη χρήση τους ως παραμέτρους εισόδου των αριθμητικών μοντέλων
- Διάδοση ανεμογενών κυματισμών από τα βαθιά ύδατα στα ρηχά, με χρήση φασματικού κυματικού μοντέλου μέσης φάσης (phase averaged), το οποίο χάριν συντομίας θα αποκαλείται στο εξής Μοντέλο Α.
- Εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών στο διάυλο προσέγγισης του Λιμένα μέσω των αποτελεσμάτων του Μοντέλου Α.
- Χρήση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του Μοντέλου Α που αφορούν τα χαρακτηριστικά των κυματισμών, σε προκαθορισμένο σημείο της περιοχής ενδιαφέροντος (π.χ. στην είσοδο του λιμένα) και διερεύνηση της διαταραχής της λιμενολεκάνης με χρήση κυματικού μοντέλου διακριτοποιημένου στη φάση (phase resolved), που θα καλείται στο εξής Μοντέλο Β.
- Διερεύνηση των συνθηκών ηρεμίας λιμενολεκάνης με εκτίμηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Β.

Στην τελική του μορφή το μοντέλο αναμένεται να παρέχει προβλέψεις της θαλάσσιας κατάστασης ανά τακτά χρονικά διαστήματα (3 ώρες), με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στις κυματικές συνθήκες εντός της λιμενολεκάνης.

1.2 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), πέντε κεφάλαια επιπλέον, που περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

- Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση των βασικών εννοιών που αφορούν τη διάδοση των κυματισμών από τα βαθιά ύδατα στις παράκτιες περιοχές καθώς και τις κυματικές διαταραχές στο διάυλο προσέγγισης και εντός των λιμενολεκάνων.
- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία. Συνοπτικά αυτά είναι:
 - i. Το φασματικό κυματικό μοντέλο TOMAWAC, που έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Εργαστήριο Υδραυλικής (Laboratoire National d'Hydraulique) της Γαλλίας.
 - ii. Το φασματικό κυματικό μοντέλο MIKE21 SW, που έχει αναπτυχθεί στο Υδραυλικό Ινστιτούτο της Δανίας (DHI)
 - iii. Το ελλειπτικό μοντέλο ήπιας κλίσης ARTEMIS, που έχει αναπτυχθεί από το Εθνικό Εργαστήριο Υδραυλικής (Laboratoire National d'Hydraulique) της Γαλλίας.
 - iv. Το υπερβολικό μοντέλο ήπιας κλίσης WAVE - L, που έχει αναπτυχθεί στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Παρατίθενται για καθένα από τα προαναφερθέντα μοντέλα, οι κύριες εξισώσεις υπολογισμού στις οποίες βασίζουν τη λειτουργία τους και επιπρόσθετα βασικές παράμετροι εισόδου/εξόδου για την εκτέλεση των προσομοιώσεων.

- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης του Πατραϊκού Κόλπου με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στο Νέο Λιμένα Πατρών. Στη συνέχεια παρατίθενται τα χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος όπως αυτά προέκυψαν από τη βάση δεδομένων CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) καθώς και η διαδικασία αρχικής προετοιμασίας των δεδομένων και σύζευξης των μοντέλων A και B.
- Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το κυματικό κλίμα όπως προκύπτουν από το κάθε αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε. Γίνεται επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο εναλλακτικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σαν μοντέλο A, και σχολιασμός αποτελεσμάτων των εναλλακτικών μοντέλων B, αναφορικά με την ένταση του φαινομένου της ανάκλασης και περίθλασης των κυματισμών.
- Στο Κεφάλαιο 6, συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της μεταπτυχιακής εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Γίνεται προσπάθεια να αιτιολογηθούν οι διαφορές που προέκυψαν από τις αναλύσεις στα εκάστοτε λογισμικά και προτείνονται βελτιώσεις που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σε μεταγενέστερο πλαίσιο.

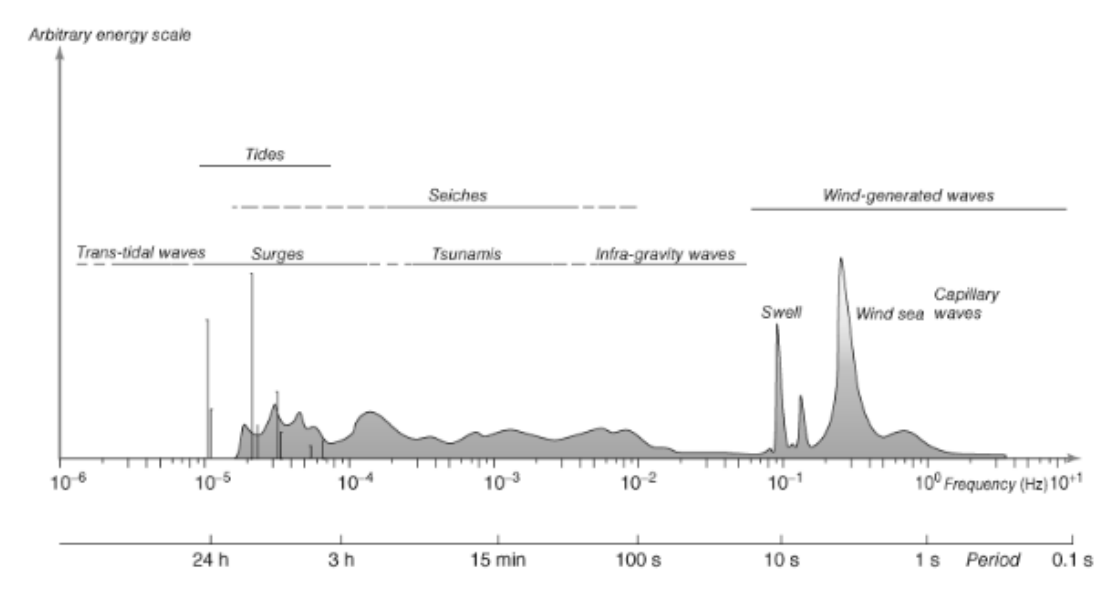
2. Ανασκόπηση βασικών εννοιών

2.1 Θαλάσσιοι κυματισμοί και μηχανισμοί γένεσής τους.

Οι κυματισμοί που συναντώνται σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον είναι πολλών τύπων και δρουν πολλές φορές ταυτόχρονα μεταξύ τους, ώστε η κίνηση των υδάτινων σωματιδίων προκύπτει σαν υπέρθεση όλων αυτών των διαφορετικών κυματισμών. Συνεπώς είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές και διαφορετικές κατατάξεις σχετικά με τα κυματικά φαινόμενα που συναντώνται στο θαλάσσιο περιβάλλον. Θα αναφερθεί αυτή που έγινε από τον Holthuijsen, 2007, και αφορά την κατηγοριοποίηση των επιφανειακών κυματισμών που είναι και οι πιο σημαντικοί για τις ανθρώπινες εφαρμογές :

- Τριχοειδή κύματα (capillary waves) τα οποία δημιουργούνται στο οριακό στρώμα θάλασσας-ατμόσφαιρας. Η επίδραση της υψηλής επιφανειακής τάσης σ' αυτή τη διεπιφάνεια προκαλεί τη δημιουργία τριχοειδών κυματισμών πολύ μικρής περιόδου (μικρότερης από 0.25 sec)
- Ανεμογενείς κυματισμοί με περιόδους μικρότερες από 30 sec. Αίτιο δημιουργίας τους είναι η δράση του ανέμου που δρα στα υγρά μόρια, και τα μετατοπίζουν από τη θέση ισορροπίας τους. Όταν δημιουργούνται από ανέμους που πνέουν τοπικά στην περιοχή, έχουν ακανόνιστη μορφή και μικρή κυρτότητα, με περιόδους 2-12 sec. Όταν διαφεύγουν της περιοχής δημιουργίας τους τείνουν να αποκτούν μεγαλύτερη κυρτότητα και κανονικοποιημένη μορφή, με περιόδους από 12-30 sec και καλούνται αποθάλασσες (swell).
- Infragravity waves με περιόδους από 30-250 sec. Αίτιο δημιουργία τους είναι η μεταφορά ενέργειας και η υπέρθεση ανεμογενών κυματισμών και αποθαλασσών και παρουσιάζονται συχνά εντός της ζώνης θραύσης των κυματισμών (surf beats).
- Seiches, που αποτελούν μορφή στάσιμων κυματισμών που είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προβλεφθούν. Η συχνότητά τους είναι ίση με τη συχνότητα συντονισμού στη λεκάνη στην οποία παρουσιάζονται, γι' αυτό και εμφανίζονται κυρίως εντός κλειστών λιμενολεκάνων και κόλπων. Τα αίτια δημιουργίας τους δεν είναι ξεκάθαρα ακόμη αν και θεωρείται ότι μερικά τουλάχιστον παράγονται από καταιγίδες.
- Tsunamis, που παράγονται από σεισμογενή δραστηριότητα ή υποθαλάσσιες κατολισθήσεις. Είναι εξίσου δύσκολο να προβλεφθούν και περνούν σχεδόν απαρατήρητα στην ανοιχτή θάλασσα, λόγω του σχετικά μικρού τους πλάτους. Επειδή πρόκειται για μακρούς κυματισμούς διατηρούν αναλλοίωτα τα χαρακτηριστικά τους πλησιάζοντας την ακτή, αυξάνοντας το ύψος τους με καταστροφικά πολλές φορές αποτελέσματα για την παράκτια ζώνη.
- Κυματικές καταιγίδες (storm surges), που αποτελούν ουσιαστικά μια ανύψωση της θαλάσσιας επιφάνειας σε μεγάλη κλίμακα και προκαλούνται από χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση και υψηλή ταχύτητα ανέμου, κατά τη διάρκεια μίας καταιγίδας. Ιδιαίτερα μεγάλες τιμές θαλάσσιας ανύψωσης παρατηρούνται κατά τη διάρκεια κυκλώνων.

Στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση του ενεργειακού φάσματος των επιφανειακών κυματισμών ανά κύκλους συχνοτήτων.



Εικόνα 2.1: Ενεργειακό περιεχόμενο κυματισμών ανά κύκλο συχνότητας (Holthuijsen, 2007)

2.1.1 Χωρική και χρονική ανάλυση των κυματισμών – Διακριτοποίηση στη φάση ή μέθοδος μέσης φάσης

Όπως γίνεται εμφανές από την Εικόνα 2.1, οι ανεμογενείς κυματισμοί περικλείουν το μεγαλύτερο ποσοστό της κυματικής ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας, ενώ οι πιο τυπικές ανθρώπινες θαλάσσιες κατασκευές καταπονούνται σε συντριπτικό ποσοστό από ανεμογενείς κυματισμούς.

Οι κυματισμοί αυτοί χαρακτηρίζονται κυρίως από την περίοδο ή το μήκος κύματός τους. Οι ανεμογενείς επιφανειακοί κυματισμοί λοιπόν καλύπτουν ένα φάσμα περιόδων $T = 0.5 - 30 \text{ s}$, ή μήκους κύματος $L = 0.1 - 1500 \text{ m}$ (σε βαθιά νερά). Για την περιγραφή της χρονικής και χωρικής εξέλιξης των παραπάνω κυματισμών χρησιμοποιούμε διαφορετικές κλίμακες, αυτές στις οποίες λαμβάνουν χώρα οι διεργασίες της γένεσης, διάδοσης και απόσβεσης τους και οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι:

- Σε μικρές κλίμακες της τάξης των 12 ή λιγότερων μηκών κύματος ή περιόδων, με άλλα λόγια σε διαστάσεις 10-1000 m (δηλαδή σε κλίμακα της ζώνης θραύσης των κυματισμών ή ενός τυπικού λιμένα), οι κυματισμοί μπορούν να περιγραφούν με πολύ μεγάλη λεπτομέρεια από το θεωρητικά μοντέλα. Σε αυτά τα μοντέλα οι βασικοί νόμοι της υδροδυναμικής μπορούν να εφαρμοσθούν για να εκτιμηθεί η μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας, της ταχύτητας των υγρών μορίων, και της κυματογενούς πίεσης στη στήλη του νερού, σε κάθε χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια, σε αυτή την προσέγγιση, η περιγραφή και η μοντελοποίηση των κυματισμών είναι πλήρως ντετερμινιστική. Έτσι ταχύτατες μεταβολές στην εξέλιξη της διάδοσης των κυματισμών (π.χ. θραύση) μπορούν να περιγραφούν με μεγάλη ακρίβεια.

Αφού αυτή η προσέγγιση δίνει πληροφορίες για τα κυματικά χαρακτηριστικά με ακρίβεια σε ανάλυση ενός μικρού κλάσματος του μήκους κύματος (ή περιόδου) ονομάζεται **προσέγγιση διακριτοποίησης στη φάση** (phase-resolving approach). Μια πληθώρα αριθμητικών μοντέλων βασίζει τη λειτουργία της σε αυτή την προσέγγιση (π.χ. μοντέλα Boussinesq, υπερβολικά ή ελλειπτικά μοντέλα ήπιας κλίσης). Στην παρούσα μελέτη, το μοντέλο B, το οποίο αναλαμβάνει τη διάδοση κυματισμών σε περιοχές από την είσοδο του λιμένα έως την ακτογραμμή, είναι επιθυμητό να βασίζει τη λειτουργία στην παραπάνω προσέγγιση για την ακριβέστερη πρόβλεψη των κυματικών χαρακτηριστικών εντός των λιμένων.

- Η αμέσως επόμενη χωρική κλίμακα αφορά μερικές εκατοντάδες περιόδους ή μήκη κύματος, διαστάσεων 100-10.000 m, όπου η προηγούμενη προσέγγιση δεν μπορεί να εφαρμοστεί και οι κυριότεροι λόγοι είναι οι εξής:
 - Το τεράστιο πλήθος των αριθμών (ή κόμβων καννάβου πεπερασμένων στοιχείων στην περίπτωση εφαρμογής αριθμητικών μοντέλων) που θα απαιτούταν για την περιγραφή των κυματισμών
 - Δεν μπορούν να προβλεφθούν σε αυτή την κλίμακα λεπτομέρειες για τον άνεμο και τη γένεση των κυματισμών που είναι σημαντικές για το ισοζύγιο ισορροπίας της κυματικής ενέργειας
 - Ακόμη και αν υπάρχει η δυνατότητα παρατήρησης των προαναφερθέντων λεπτομερειών, αυτές δεν μπορούν να γενικευθούν για κάθε υπολογισμό κυματικής διάδοσης.

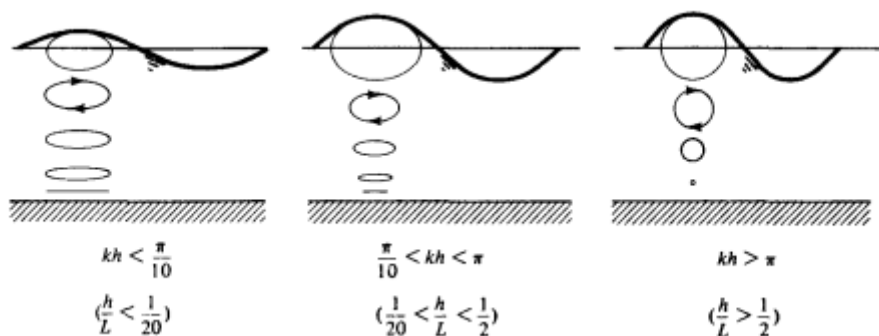
Επομένως σε αυτές τις κλίμακες η προσέγγιση διακριτοποίησης στη φάση πρέπει να εγκαταλειφθεί, και η προσέγγιση πρέπει να βασίζεται σε χαρακτηριστικά των κυματισμών που μπορούν να περιγραφούν στατιστικά. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας μέσες τιμές των κυματικών χαρακτηριστικών σε χώρο και χρόνο. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ονομάζεται **μέσης φάσης** (phase-averaged approach). Για να έχει υπόσταση η προσέγγιση μέσης φάσης θεωρείται ότι οι κυματικές συνθήκες, στο χωρικό και χρονικό διάστημα που λαμβάνονται οι μέσες τιμές, είναι ομογενείς και σταθερές. Αποκλείοντας περιπτώσεις που η κλίση των κυμάτων είναι σημαντική και τα νερά είναι πολύ ρηχά, τότε η σημαντικότερη στατιστική παράμετρος περιγραφής των κυμάτων είναι το φάσμα των κυματισμών.

- Ακολουθούν οι κλίμακες των i) παράκτιων ζωνών (της τάξεως των χιλιάδων μηκών κύματος ή περιόδων) ii) υφαλοκρηπίδων (της τάξεως των δεκάδων χιλιάδων μηκών κύματος ή περιόδων) iii) ωκεανών (της τάξεως των εκατοντάδων χιλιάδων μηκών κύματος ή περιόδων). Στους ωκεανούς και στις υφαλοκρηπίδες, η χρονική και χωρική κλίμακα περιγραφής των κυματισμών καθορίζεται από το χρόνο διάδοσης τους, τη χωρική κλίμακα της περιοχής μελέτης και την χρονική εξέλιξη του φαινομένου της παλίρροιας. Στην παράκτια ζώνη, στη διαμόρφωση της χωρικής κλίμακας παίζουν ρόλο γεωμορφολογικοί σχηματισμοί όπως ακτές, κόλποι, ακρωτήρια και νησίδες. Για παράδειγμα για τη διάδοση ανεμογενών κυματισμών σε απόσταση 10-20 km από μια λιμενολεκάνη απαιτούνται περίπου 15-30 λεπτά. Για τη Βόρεια Θάλασσα, που έχει χονδροειδώς 1500 km μήκος και 500 km πλάτος, ο χρόνος διάδοσης τυπικών ανεμογενών κυματισμών περιόδου 10 sec, κατά μήκος της θαλάσσιας ζώνης είναι περίπου 24 ώρες. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι ένα και μόνο φάσμα περιγραφής των κυματισμών δεν είναι επαρκές για την

περιγραφή των κυματισμών στις παραπάνω χαρακτηριστικές κλίμακες. Για το λόγο αυτό το φάσμα σε αυτές τις περιπτώσεις θεωρείται ότι μεταβάλλεται τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο (time varying-wave directional spectrum). Η πρόβλεψη της χωροχρονικής εξέλιξης του φάσματος σε αυτή την κλίμακα γίνεται με αριθμητικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη γένεση, διάδοση και απόσβεση των κυματισμών. Η εκτίμηση της εξέλιξης του φάσματος στη συνέχεια γίνεται με ντετερμινιστικό τρόπο λαμβάνοντας υπόψη φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με τον άνεμο, τη μορφολογία του πυθμένα, την παλίρροια κ.α. Τη μέθοδο της μέσης φάσης, για την πρόβλεψη της χωρικής και χρονικής εξέλιξης του φάσματος των κυματισμών είναι επιθυμητό να ακολουθεί το μοντέλο A που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα μεταπτυχιακή, καθώς οι χωρικές κλίμακες στις οποίες εφαρμόζεται δεν απαιτούν μεγάλη λεπτομέρεια στην περιγραφή των χαρακτηριστικών των κυματισμών. Σ' αυτή τη μεγάλη οικογένεια μοντέλων ανήκουν τα φασματικά μοντέλα τρίτης γενιάς που έχουν γνωρίσει ευρεία ανάπτυξη από το τέλος του 20^{ου} αιώνα (π.χ. WAM, WaveWatch III, STWave, SWAN , TOMAWAC, MIKE21 SW)

2.2 Διάδοση κυματισμών και μετασχηματισμοί στα αβαθή.

Τα χαρακτηριστικά των κυματισμών, όσο η διάδοσή τους γίνεται στα βαθιά νερά θεωρούνται αναλλοίωτα. Στην περιοχή των ενδιάμεσων και ρηχών νερών τα χαρακτηριστικά τους, ιδιαίτερα το ύψος και το μήκος κύματος, μεταβάλλονται λόγω πολλαπλών επιδράσεων, με κυριότερη αυτή του πυθμένα. Με την είσοδο των κυματισμών στα ενδιάμεσα νερά, οι τροχιές των υγρών μορίων αποκτούν ελλειψοειδή μορφή σε αντίθεση με τις κυκλικές που παρουσιάζουν στα βαθιά νερά.



Εικόνα 2.2: Τροχιές υγρών μορίων (από αριστερά προς τα δεξιά) σε ρηχά, ενδιάμεσα και βαθιά νερά αντίστοιχα (Dean & Dalrymple 1984)

Ειδικότερα για την περιοχή των ενδιάμεσων και των ρηχών νερών παρατηρούνται τα πιο σημαντικά και χαρακτηριστικά κυματικά φαινόμενα. Αυτά είναι τα εξής:

- Ρήγωση, λόγω επίδρασης του πυθμένα (βαθυμετρικές μεταβολές)
- Διάθλαση κυματισμών σε περίπτωση πλάγιας πρόσπτωσης των κυματισμών ως προς τις ισοβαθείς
- Ανάκλαση των κυματισμών λόγω φυσικού (π.χ. νησίδες) ή ανθρωπογενούς (π.χ. κυματοθραύστες) εμποδίου
- Περίθλαση των κυματισμών λόγω φυσικού (π.χ. νησίδες) ή ανθρωπογενούς (π.χ. κυματοθραύστες) εμποδίου στη διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών

- Εξασθένιση της κυματικής ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα
- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών και μεταφορά ενέργειας μεταξύ των διαφορετικών συχνοτήτων (non linear transfers between frequencies)
- Θραύση ή/και διάθλαση κυματισμών σε περίπτωση διάδοσης σε μη ομογενή αποδέκτη (π.χ. παρουσία ισχυρών ρευμάτων)
- Θραύση κυματισμών λόγω επίδρασης του πυθμένα

Οι παραπάνω διεργασίες είναι οι σημαντικότερες από αυτές που εμφανίζονται κατά τη διάδοση των κυματισμών από τα βαθιά στα ρηχά, και για παράκτιες εφαρμογές και εντός λιμενολεκάνων είναι επιθυμητό τα αριθμητικά μοντέλα που επιλέγονται για την εκάστοτε εφαρμογή να προσομοιάζουν ικανοποιητικά τις περισσότερες από τις παραπάνω διεργασίες.

2.3 Δίαυλος προσέγγισης

Πολλές φορές οι λιμένες εγκαθίστανται σε περιοχές με διαμόρφωση πυθμένα και βάθη που δεν επαρκούν για το βύθισμα των σκαφών που θα εξυπηρετηθούν από το λιμένα. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητο να εξασφαλισθεί επαρκής προσπέλαση από τα ανοιχτά μέχρι την είσοδο του λιμένα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βυθοκόρηση λωρίδας του πυθμένα, συνήθως σε διατομή τραπεζοειδούς μορφής, μέχρι το απαιτούμενο βάθος. Δημιουργείται έτσι ένας δίαυλος προσέγγισης του λιμένα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του οποίου καθορίζονται με βάση το μέγιστο σκάφος που θα τον διαπλεύσει και τις τοπικές συνθήκες κυματισμών και ποιότητας του εδάφους.

Το σε οριζοντιογραφία σχήμα του άξονα του διαύλου πρέπει να εξασφαλίζει άνετες συνθήκες πλεύσεως των σκαφών κατά το δυνατόν σε ευθυγραμμία ή με ομαλές καμπύλες μεγάλης ακτίνας, κατά το δυνατόν πάνω από $5L$, όπου L είναι το μήκος του πλοίου σχεδιασμού. Σημειώνεται πως οι συνθήκες πλεύσεως στο δίαυλο παρομοιάζουν με αυτές της ανοιχτής θαλάσσης και δεν επιβάλλεται αξιόλογη μείωση στην ταχύτητα των σκαφών. Οι επικρατούντες άνεμοι, κυματισμοί και το είδος των σκαφών καθορίζουν κατά κύριο λόγο τις ανεκτές ακτίνες καμπυλότητας ώστε να διασφαλίζονται απρόσκοπτες συνθήκες ναυσιπλοΐας στο δίαυλο. Η κατάληξη του διαύλου στην είσοδο του λιμένα πρέπει να ταυτίζεται ουσιαστικά με την προέκταση του άξονα της εισόδου, ώστε τα σκάφη να διαπλέουν την είσοδο κατά το δυνατόν σε ευθυγραμμία.

Η μελέτη της οριζοντιογραφίας των διαύλων γίνεται πλέον με προσομοίωση σε οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή των πραγματικών συνθηκών πλοήγησης του σκάφους κατά μήκος του διαύλου σε πραγματικό χρόνο.

Το μήκος του διαύλου ορίζεται ως το ανάπτυγμα της διαδρομής του μεταξύ της εισόδου του λιμένα και της ισοβαθούς που ταυτίζεται με το βάθος του διαύλου.

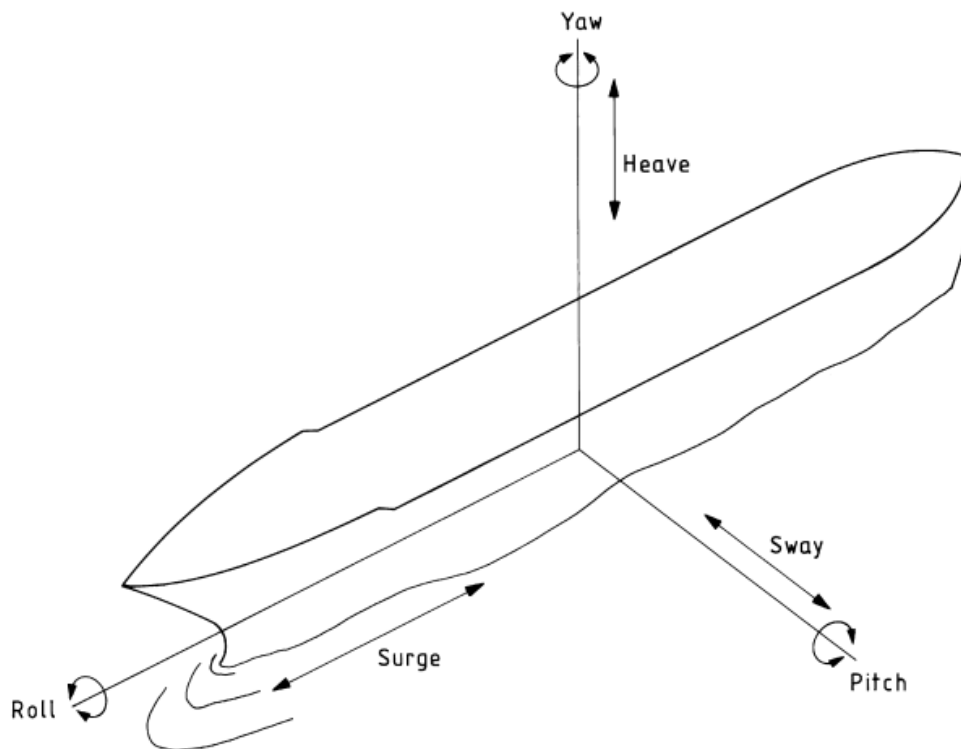
Η πιο βασική παράμετρος στη γεωμετρία των διαύλων προσέγγισης είναι το απαιτούμενο βάθος βυθοκόρησης. Το βάθος αυτό ορίζεται κυρίως από το μέγιστο βύθισμα του σκάφους σχεδιασμού που προβλέπεται να ελλιμενισθεί. Το μέγεθος αυτό πρέπει να λαμβάνεται κάτω από την κατώτατη ρηχία της περιοχής ώστε ο λιμένας να

είναι προσπελάσιμος πάντοτε. Σε περιοχές με έντονη παλίρροια, όπου η στάθμη της θάλασσας μεταβάλλεται αρκετά μέτρα, προκύπτει το ερώτημα κατά πόσον θα πρέπει να εξασφαλιστεί προσπελασιμότητα του λιμένα για κάθε χρονική στιγμή. Κάτι τέτοιο συνεπάγεται αύξηση της βυθοκόρησης για βάθος ίσο με τη μεταβολή της στάθμης λόγω παλίρροιας. Εναλλακτικά θα μπορούσε να γίνει δεκτό πως ο λιμένας δεν θα μπορεί να προσεγγισθεί για ορισμένες χρονικές περιόδους χαμηλών νερών. Επειδή οι χρονικές αυτές περιόδοι είναι προβλέψιμες στην αστρονομική παλίρροια, η λύση αυτή δεν είναι εξαρχής απορριπτέα ιδίως όταν ο λιμένας προσεγγίζεται μέσω διαύλου μεγάλου μήκους. Τα σκάφη παραμένουν στα ανοιχτά μέχρι τη στιγμή που ο διάυλος θα γίνει διαπλεύσιμος για το συγκεκριμένο σκάφος. Μια τέτοια λύση περιοδικής λύσης της εισόδου και του διαύλου παρουσιάζει βέβαια μειονεκτήματα που αφορούν τις καθυστερήσεις των σκαφών και άλλες λειτουργίες του λιμένα. Πρέπει επομένως να προηγείται προσεκτική μελέτη κόστους – όφελους πριν αποφασισθεί κατά πόσον ο λιμένας θα είναι ελεύθερης ή περιορισμένης πλευσιμότητας. Προβλήματα αυτού του είδους ωστόσο δεν εμφανίζονται στο χώρο της Μεσογείου και ειδικότερα στα ελληνικά λιμάνια, λόγω του περιορισμένου εύρους παλίρροιας.

Για τον καθορισμό του βάθους του διαύλου, εκτός από το βύθισμα του έμπορτου πλοίου σχεδιασμού, που θα πρέπει να ανάγεται με βάση το ειδικό βάρος των νερών της περιοχής, λαμβάνονται υπόψη και άλλες δευτερεύουσες επιδράσεις. Τέτοιες είναι η δράση των κυμάτων και ρευμάτων, η προσαύξηση του βυθίσματος λόγω γειννίασης με τα στερεά όρια (squat) και η κατά μήκος κλίση του σκάφους.

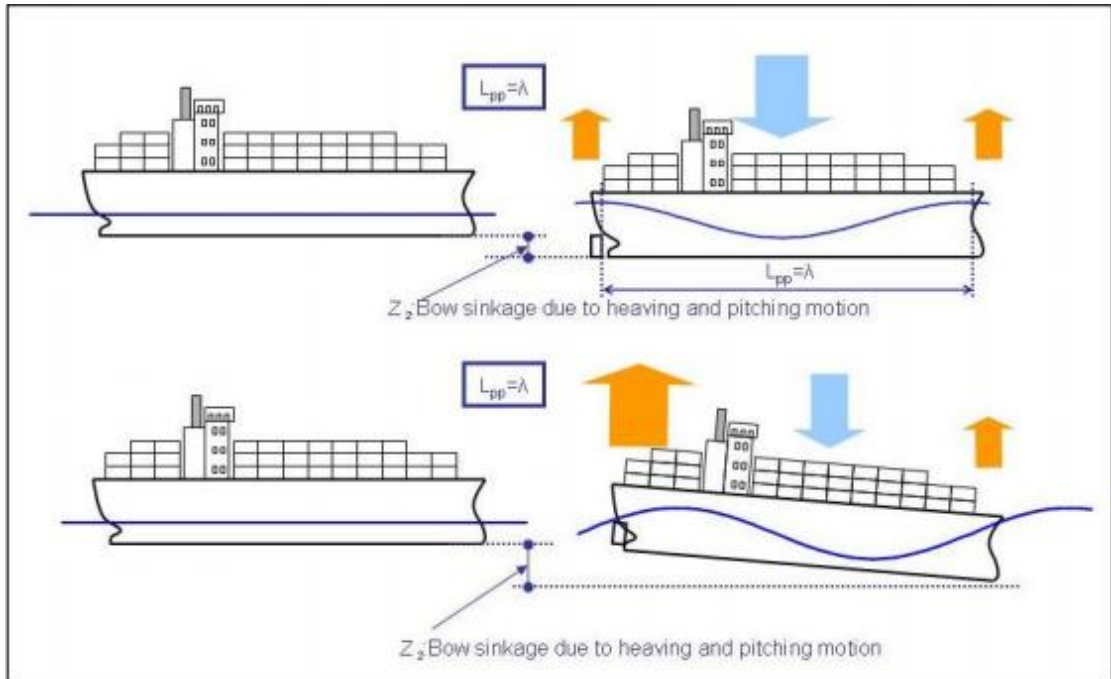
Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω επιδράσεις, καθώς και ένας περιθώριο ασφαλείας, η PIANC προτείνει ως πρώτη προσέγγιση μια προσαύξηση του βυθίσματος κατά 15 % περίπου ή 1.5 m – 2.5 m ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους και την ποιότητα του πυθμένα. Σημειώνεται πως όσο πιο σκληρός είναι ο πυθμένας, τόσο μεγαλύτερο περιθώριο ασφαλείας πρέπει να λαμβάνεται σε περίπτωση αστοχίας. Για τις μέσες ελληνικές συνθήκες μια προσαύξηση του βυθίσματος κατά 2 m θεωρείται γενικώς επαρκής. Σε πιο λεπτομερή μελέτη διαύλων οι παραπάνω παράμετροι εξετάζονται και ποσοτικοποιούνται ιδιαίτερω.

Η επίδραση των κυματισμών εκτιμάται μέσω των στροφών του σκάφους περί τους δύο οριζόντιους άξονες (Roll,Pitch) και της κατακόρυφης μετακίνησής του (Heave). Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζονται οι 6 βαθμοί ελευθερίας ενός σκάφους.

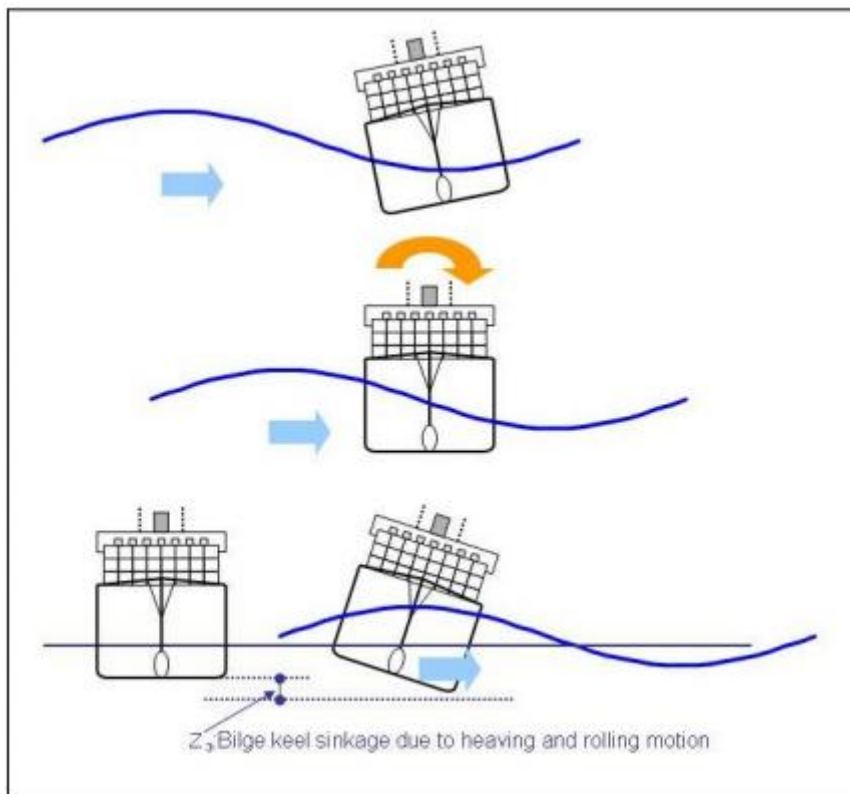


Εικόνα 2.3: Οι 6 βαθμοί ελευθερίας κίνησης των σκαφών

Συνήθως θεωρείται πως η μέγιστη απόκλιση λόγω στροφής περί τον δευτερεύοντα (εγκάρσιο) άξονα ισούται με το ήμισυ του ύψους κύματος που τον προκαλεί. Φυσικά οι αποκλίσεις αυτές εξαρτώνται από διάφορα μεγέθη, όπως τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου πλοίου, γι' αυτό και σε στάδιο οριστικής μελέτης προτείνονται αρκετές μέθοδοι υπολογισμού από την PIANC (2014), αναφορικά με την προσαύξηση του βάθους του διαύλου λόγω της επίδρασης των κυματισμών στα πλοία. Ουσιαστικά για κάθε πλοίο και για τις επικρατούσες κυματικές συνθήκες, πρέπει να διερευνηθούν τρεις τιμές κατακόρυφης κατάπτωσης της καρίνας τους πλοίου λόγω κυματισμών που οφείλονται στην κατακόρυφη μετακίνηση heave ($Z_{max,1}$), στη συνδυασμένη κατακόρυφη μετακίνηση και περιστροφή περί τον διαμήκη άξονα ($Z_{max,2}$) και τέλος, στη συνδυασμένη κατακόρυφη μετακίνηση και περιστροφή περί τον διαμήκη άξονα ($Z_{max,3}$). Οι παραπάνω μέγιστες αποκλίσεις παρουσιάζονται στις Εικόνες 2.4α και 2.4β. Αναλυτικές σχέσεις δε θα παρουσιαστούν σε αυτό το σημείο και ο αναγνώστης παροτρύνεται να μελετήσει τις αντίστοιχες σχέσεις από τις οδηγίες της PIANC που αναφέρθηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 2.4α: Βύθισμα (Z_2) λόγω συνδυασμένης επίδρασης heave και pitch (PIANC,2014)



Εικόνα 2.5β: Βύθισμα (Z_3) λόγω συνδυασμένης επίδρασης heave και roll (PIANC,2014)

Ο υπολογισμός της μείωσης του αρχικού βάθους h_0 σε h_1 , λόγω στερεών ορίων (squat) μπορεί να γίνει με εφαρμογή της παρακάτω σχέσης, υπολογισμού της ποσοστιαίας μείωσης του αρχικού βάθους d :

$$F = f \left(\frac{2d}{1-f^2} \right)^{0.5} \quad (2.1)$$

όπου:

$$d = (h_0 - h_1) / h_0$$

$$F = V / (gh_0)^{1/2}$$

$f = 1 - d - s$, με s το λόγο της ύψαλης διατομής του πλοίου προς τη διατομή του χώρου πλεύσεως, που πρακτικά ταυτίζεται με τη διατομή του διαύλου.

Το εύρος των τιμών F κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0.2 – 1.0. ενώ το ποσοστό d μπορεί να φτάσει το 20 % για μεγάλους λόγους του s .

Η διατομή των υφαυλάκων είναι τραπεζοειδής, με συνήθως ήπιες κλίσεις πρανών που εξαρτώνται από την ποιότητα του εδάφους, το βάθος των νερών και τα επικρατούντα ρεύματα. Συνήθεις τυπικές κλίσεις είναι της τάξεως του 1:4. Το πλάτος της διατομής μετρείται στο οριζόντιο τμήμα του πυθμένα και εξαρτάται από το εάν ο διάυλος θα είναι μονής ή διπλής κυκλοφορίας, καθώς και από τα επικρατούντα ρεύματα. Ενδεικτικά, για τα ευθύγραμμα τμήματα και για ευνοϊκές συνθήκες ναυσιπλοΐας το πλάτος του διαύλου μπορεί να ληφθεί 4 ή 7 φορές το πλάτος του πλοίου σχεδιασμού, ανάλογα με το είδος της κυκλοφορίας. Στα καμπύλα τμήματα του διαύλου, επαυξάνεται το πλάτος, ώστε να είναι δυνατή η στροφή των σκαφών μέσα στη λωρίδα του διαύλου. Ως γνωστόν, κατά τη στροφή, το πλοίο υφίσταται «έκπτωση» που αυξάνει όσο μειώνεται η ακτίνα καμπυλότητας. Η αύξηση του διαύλου στα καμπύλα τμήματα πρέπει να είναι τουλάχιστον $L^2 / (8R)$, με L το μήκος του πλοίου και R την ακτίνα καμπυλότητας

2.4 Ηρεμίας λιμενολεκάνης και κυματικά φαινόμενα στους λιμένες

Όπως έχει προαναφερθεί, αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η πρόβλεψη κυματικών χαρακτηριστικών στους διαύλους ναυσιπλοΐας και εντός των λιμενολεκάνων. Γι' αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να αναλυθεί με περισσότερη λεπτομέρεια η έννοια της ηρεμίας της λιμενολεκάνης και να παρουσιαστούν τα σημαντικότερα κυματικά φαινόμενα που προκαλούν αναταράξεις εντός αυτής.

2.4.1 Γενικά στοιχεία για την ηρεμία λιμενολεκάνης

Η βασική λειτουργία των λιμένων είναι να προσφέρουν ασφαλείς συνθήκες αγκυροβολίας για τα πλοία και να εξασφαλίζουν την ομαλή και ανεμπόδιστη μετάβαση επιβατών και εμπορεύματος μεταξύ θάλασσας και στεριάς. Η απουσία αναταραχών στη λιμενολεκάνη που θα εμποδίζαν την παραπάνω κύρια λειτουργία του λιμένα είναι επομένως επιβεβλημένη.

Εφόσον πρόκειται για λειτουργικές ανάγκες του λιμένα, η έρευνα αναταραχών της λιμενολεκάνης θα πρέπει να προσανατολιστεί προς το επικρατούν κυματικό κλίμα της περιοχής, παρά σε εξαιρετικά και ακραία γεγονότα, με βάση τα οποία γίνεται ο σχεδιασμός των εξωτερικών έργων. Το ζητούμενο στην προκειμένη περίπτωση είναι

το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο οι λιμενικές λειτουργίες δεν είναι δυνατό να εκτελεστούν. Συνεπώς, κύριος παράγων που προκαλεί διακοπή της λειτουργίας του λιμένα είναι οι ανεμογενείς κυματισμοί.

Με την αύξηση όμως της συχνότητας εμφάνισης των ακραίων κυματικών γεγονότων τα τελευταία χρόνια, ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που θα δέχεται σαν δεδομένα εισόδου ωκεανογραφικές μεταβλητές και θα δίνει πρόβλεψη κυματικών χαρακτηριστικών εντός των λιμένων, που είναι το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής, έρχεται να καλύψει την παραπάνω συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για συχνότερη πρόβλεψη των κυματικών χαρακτηριστικών εντός της λιμενολεκάνης.

Σημαντικό ρόλο στην εξασφάλιση της ηρεμίας λιμενολεκάνης παίζει και η χάραξη των λιμενικών έργων, συνυφασμένη βέβαια με την εκτίμηση των οικονομικών επιπτώσεων που συνεπάγεται η κατασκευή των διάφορων λιμενικών έργων για κάθε βαθμό ηρεμίας της λιμενολεκάνης που επιτυγχάνεται.

Ικανοποιητική απάντηση για την εξασφάλιση των απαιτούμενων συνθηκών μπορεί να δοθεί με εργαστηριακή διερεύνηση διαφόρων λύσεων διάταξης έργων σε φυσικό ομοίωμα. Στις έρευνες αυτές γίνεται έλεγχος της κυματικής διαταραχής σε επίκαιρα σημεία της λιμενολεκάνης και των συνεπαγόμενων κινήσεων των παραβεβλημένων πλοίων. Η πρώτη παράμετρος που οφείλει να εξεταστεί σε αυτή την περίπτωση είναι το ύψος κύματος. Σημειώνεται ότι δεν έχουν καθοριστεί ακόμη ανώτατα όρια υψών κυματισμών μέσα στους λιμένες, που να θεωρούνται ανεκτά για τη ναυτιλία. Είναι προφανές όμως ότι οποιαδήποτε όρια καθοριστούν συνδέονται άμεσα με το μέγεθος του εξεταζόμενου πλοίου. Για παράδειγμα ένα ύψος κύματος 0.4 m θα προκαλέσει σχεδόν μηδενικές μετακινήσεις σε ένα αγκυροβολημένο tanker, ενώ ενδέχεται να προκαλέσει σημαντικές αναταράξεις σε ένα μηχανοκίνητο σκάφος μήκους 4 m. Ένας ενδεικτικός πίνακας επιτρεπόμενων υψών κύματος σε σχέση με το μέγεθος του πλοίου που δίνεται από τον Δασκαλάκη, 2009, και προέρχεται από πειραματικές μετρήσεις σε φυσικά μοντέλα λιμένων (Cartie κ.τ.λ.) δίνεται στη συνέχεια:

Πίνακας 2.1: Μέγιστα επιτρεπόμενα ύψη κύματος εντός λιμένα (Δασκαλάκης, 2009)

Μέγεθος πλοίων Εκτόπισμα (tn)	Επιτρεπόμενο ύψος κύματος (m)	
	Στις θέσεις πλεύρισης	Στον κύκλο ελιγμών
10000	0.30	0.40
20000	0.30	0.55
30000	0.35	0.70
50000	0.50	1.25
75000	0.70	1.90
100000	0.90	2.50

Σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των σκαφών παίζει και η περίοδος του προσπίπτοντος κυματισμού, η οποία για ορισμένες τιμές δίνει επικίνδυνες συνθήκες, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια που γίνεται λόγος για την αναταραχή λόγω μακρών ταλαντώσεων.

Οι αριθμητικές μέθοδοι, που εφαρμόζονται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια, με την ανάπτυξη των Η/Υ και των αριθμητικών μοντέλων Υπολογιστικής Υδραυλικής, επιτρέπουν τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών (ύψος, περίοδος) σε πολλά διακριτά σημεία της λιμενολεκάνης πραγματοποιώντας στη συνέχεια τη σύγκριση με τα προκαθορισμένα όρια του επιτρεπόμενου ύψους κύματος. Πολλά αριθμητικά μοντέλα που βασίζονται στη μέθοδο διακριτοποίησης στη φάση δίνουν τη δυνατότητα εκτέλεσης ειδικών προσομοιώσεων που αφορούν τη διερεύνηση φαινομένων συντονισμού στις λιμενολεκάνες, επιλύοντας τις εξισώσεις επαναληπτικά, για κάθε ύψος εισερχόμενου κυματισμού και για ένα εύρος περιόδων (Period Scanning), ώστε να εκτιμηθεί αν εμφανίζονται φαινόμενα συντονισμού.

Η έννοια της ηρεμίας λιμενολεκάνης ωστόσο, τείνει να απεμπλακεί από την ρητή συσχέτισή της με τα χαρακτηριστικά των προσπίπτοντων κυματισμών, και να αναφέρεται ουσιαστικά στον περιορισμό των μετακινήσεων των πλοίων στους 6 βαθμούς ελευθερίας τους στις θέσεις παραβολής, κάτω από συγκεκριμένες επιτρεπόμενες τιμές. (Goda, 2000)

Μια εναλλακτική προσέγγιση η οποία δίνεται στους Βρετανικούς Κανονισμούς (BS 6349-1:2000), Maritime structures – Part 1: Code of practice for general criteria, βασίζεται στον περιορισμό της δυναμικής πρόσκρουσης ενός αγκυροβολημένου πλοίου στο κρηπίδωμα πρόσδεσης. Σε αυτή την περίπτωση ο περιορισμός βασίζεται στον περιορισμό της κινητικής ενέργειας του πλοίου. Στον Πίνακα 2.2 δίνονται όρια των ταχυτήτων παραβολής, για πλοία εκτοπίσματος μέχρι 8000 grt, όπως ferry boat, αλιευτικά σκάφη, Ro-Ro, γενικού φορτίου κ.α.

Πίνακας 2.2: Οδηγία για όρια μέγιστων ταχυτήτων παραβολής για ασφαλείς συνθήκες παραβολής

Ship size DWT	Surge m/s	Sway m/s	Heave m/s	Yaw degrees/s	Pitch degrees/s	Roll degrees/s
1000	0.6	0.6	-	2.0	-	2.0
2000	0.4	0.4	-	1.5	-	1.5
8000	0.3	0.3	-	1.0	-	1.0
NOTE These criteria are applicable to fishing vessels, coasters, freighters, ferries and ro-ro vessels						

Ωστόσο, ο υπολογισμός των παραπάνω ταχυτήτων απαιτεί τη χρησιμοποίηση λογισμικού υπολογισμού των δυνάμεων σε πλοία που θεωρείται ότι προσθέτει υπολογιστικό φόρτο και δεν είναι αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

2.4.2 Μακρές ταλαντώσεις εντός λιμενολεκάνης

Πέραν των συνήθων ανεμογενών κυματισμών, που διαταράσσουν την ελεύθερη επιφάνεια της λιμενολεκάνης, υπάρχει σειρά άλλων φυσικών παραγόντων, που επηρεάζουν σε μικρότερη κλίμακα τη λιμενολεκάνη. Πολλοί από αυτούς αναφέρονται σε εξαιρετικά γεγονότα, όπως θύελλες σεισμογενή κύματα κ.λπ. Σε τέτοιες καταστάσεις πολλοί λιμένες δεν προσφέρουν ικανοποιητικά καταφύγια στα σκάφη, τα οποία προτιμάται να βγαίνουν στα ανοιχτά ώστε να μην υποστούν ή προξενήσουν ζημιές μέσα στο λιμένα. (Μέμος, 2013).

Από τα φαινόμενα που επηρεάζουν σε συνεχή βάση τις λιμενολεκάνες και επακόλουθα τη λειτουργία των λιμένων, τα σημαντικότερα, πέραν των κυματισμών, μπορούν να ονομαστούν συγκεντρωτικά ως μακρές ταλαντώσεις (seiches). Πρόκειται κατ' ουσία για παγιδευμένα κύματα περιόδου άνω των 30 s που προκαλούνται από αλλαγές στην ατμοσφαιρική πίεση, μακρά κύματα που προκαλούνται στα ανοιχτά λόγω βαρομετρικών χαμηλών, surf beats, edge waves κ.λπ.

Σοβαρό πρόβλημα παρουσιάζεται όταν η γεωμετρία της λιμενολεκάνης ευνοεί την ανάπτυξη του φαινομένου του συντονισμού για τις συχνότητες των ελεύθερων ταλαντώσεων που επικρατούν στην περιοχή. Σε τέτοιες περιπτώσεις η στιγμιαία ταχύτητα στους δεσμούς της ταλάντωσης μπορεί να φτάσει τα 0.5 m/s παρόλο που οι υπερυψώσεις είναι γενικά μικρές.

Η περίοδος των μακρών ταλαντώσεων βρίσκεται συχνά στην περιοχή 1÷3 min, όπου συμβαίνει η μεγαλύτερη επιβάρυνση στα παραβεβλημένα πλοία, ιδίως όταν πρόκειται για μεγάλα σκάφη με τεταμένους κάβους.

Η ταχύτητα των μακρών αυτών κυματισμών, στα σχετικά αβαθή ύδατα του λιμένα, εξαρτάται μόνο από το τοπικό βάθος νερού (d) και δίδεται ως $(gd)^{1/2}$. Επομένως για λιμενολεκάνη με ορθογωνική κάτοψη διαστάσεων $L \times W$ και είσοδο στην πλευρά πλάτους W , οι περίοδοι συντονισμού κατά τις διευθύνσεις θα είναι:

$$T_L = \frac{4L}{n\sqrt{gd}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (2.2)$$

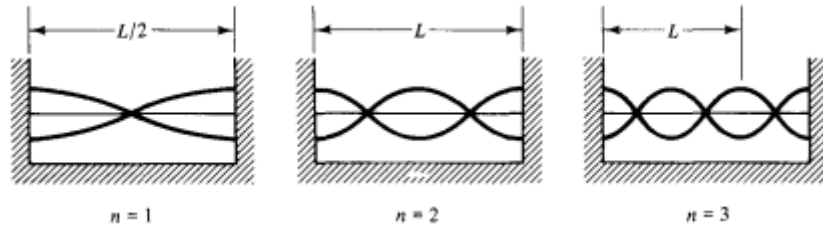
με δεσμό του στάσιμου κύματος στην είσοδο και κοιλία στην απέναντι πλευρά της λεκάνης, και

$$T_W = \frac{2W}{n\sqrt{gd}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

με κοιλίες στα δύο απέναντι κρηπιδώματα.

Κάθε τιμή του συντελεστή n , δηλώνει τις αρμονικές (modes) που δημιουργούνται λόγω seiching. Στην πραγματικότητα, οι χαμηλότερες αρμονικές είναι οι πιο επικρατούσες, καθώς η ενέργεια στις υψηλότερες αρμονικές αποσβάνει πολύ ταχύτερα.

Τυπική μορφή των στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται για μια μονοδιάστατη (1DH) δεξαμενή, με περίοδο συντονισμού που δίνεται από τη Σχέση (2.2), δίνεται για τις τρεις πρώτες αρμονικές στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.6: Στάσιμοι κυματισμοί σε απλή ορθογωνική δεξαμενή για τις τρεις πρώτες αρμονικές (Dean & Dalrymple, 1984)

Ένα βασικό μέτρο για την αποφυγή συντονισμού σε ένα νέο λιμένα είναι ο σχεδιασμός του με τέτοια γεωμετρία, ώστε οι παραπάνω συχνότητες συντονισμού να μην ταυτίζονται με τις συνήθεις συχνότητες των μακρών κυματισμών της περιοχής. Οι τελευταίες, πέρα από τη χρήση αριθμητικών μοντέλων όπως αναφέρθηκε, μπορούν να ανιχνευθούν με τη βοήθεια καταγραφικών συσκευών (λιμνογράφων) που δεν διεγείρονται από κυματισμούς υψηλής συχνότητας.

Όπως είναι γνωστό οι κυματισμοί χαμηλής συχνότητας μπορούν να διαπεράσουν τα στόμια του λιμένα χωρίς να υποστούν ουσιαστική μείωση του εύρους τους. Γι' αυτό οποιαδήποτε προσπάθεια για καλύτερη διάταξη των έργων προστασίας και των εισόδων δεν έχει παρά ελάχιστο αντίκρυσμα, όσον αφορά την αναχαίτιση των μακρών κυματισμών.

2.4.3 Συστάσεις για βελτίωση της ηρεμίας λιμενολεκάνης

Είναι φανερό πως βασικό στοιχείο στη χάραξη ενός λιμένα είναι να εμφανίζονται όσο το δυνατόν μικρότερες αναταραχές στη λιμενολεκάνη και ιδιαίτερα στις θέσεις παραβολής. Για το σκοπό αυτό, συνίστανται να εξετάζονται οι παρακάτω παράγοντες.

- Πρόβλεψη επαρκούς έκτασης της περιοχής του προλιμένα και όλης της λιμενολεκάνης για την εκτόνωση των κυματισμών που εισδύουν στο λιμένα.
- Πρόβλεψη απορροφητικών διαμορφώσεων (ακτών) σε επίκαιρες θέσεις του λιμένα που προσβάλλονται άμεσα ή μέσω ανακλάσεως από τους κυματισμούς.
- Πρόβλεψη απορροφητικών κρηπιδωμάτων με κατάλληλο σχεδιασμό για τα πιο επιβλαβή κύματα. Συνίσταται αυτού του τύπου οι κατασκευές να ελέγχονται σε φυσικό ομοίωμα, επειδή τα φαινόμενα μετατροπής της κυματικής ενέργειας, εκδίωξης του αέρα, καταπόνησης εκ των κάτω της πλάκας δαπέδου εργασίας κ.τ.λ. είναι αρκετά πολύπλοκα και δεν επιδέχονται εύκολη μαθηματική ανάλυση.

Σημειώνεται πάντως πως η χρησιμότητα των απορροφητικών κρηπιδωμάτων είναι συζητήσιμη, κυρίως λόγω της ανάκλασης των κυματισμών που προκαλείται ούτως ή άλλως λόγω της παρουσίας παραβεβλημένων σκαφών.

3. Περιγραφή των λογισμικών και μεθόδων υπολογισμού

Για να μπορεί να γίνει μια συγκριτική ανάλυση μεταξύ των επιμέρους αριθμητικών μοντέλων και να εκτιμηθεί η ικανότητά τους να προσομοιάσουν κατά το δυνατόν την αναμενόμενη προβλεπόμενη κατάσταση της θάλασσας, επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής δύο εναλλακτικά μοντέλα ως «μοντέλο Α» και δυο εναλλακτικά ως «μοντέλο Β». Αυτά κατά σειρά είναι:

- Μοντέλο Α
 - TOMAWAC, ένα φασματικό μοντέλο τρίτης γενιάς που ανήκει στην πλατφόρμα λογισμικών ανοιχτού κώδικα Telemac-Mascaret και έχει αναπτυχθεί στο Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) της Γαλλίας.
 - MIKE21 SW, ένα φασματικό μοντέλο τρίτης γενιάς που ανήκει στην εμπορική πλατφόρμα λογισμικών MIKE και έχει αναπτυχθεί στο Danish Hydraulic Institute (DHI).
- Μοντέλο Β
 - ARTEMIS, ένα ελλειπτικό κυματικό μοντέλο ήπιας κλίσης που ανήκει στην πλατφόρμα λογισμικών ανοιχτού κώδικα Telemac-Mascaret και έχει αναπτυχθεί στο Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) της Γαλλίας.
 - Wave – L, ένα υπερβολικό κυματικό μοντέλο ήπιας κλίσης ανοιχτού κώδικα που έχει αναπτυχθεί από τον Θ. Καραμπά στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Για καθένα από τα προαναφερθέντα μοντέλα θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση του πεδίου εφαρμογής τους, των διεργασιών που προσομοιώνουν, των βασικών εξισώσεων υπολογισμού και των αρχείων εισόδου-εξόδου που απαιτούν ή προκύπτουν από την εκτέλεσή τους.

3.1 Φασματικό μοντέλο διάδοσης κυματισμών TOMAWAC

3.1.1 Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες

Το αριθμητικό μοντέλο TOMAWAC (TELEMAC based Operational Model Addressing Wave Action Computation) είναι ένα φασματικό κυματικό μοντέλο τρίτης γενιάς που προσομοιώνει τη χωρική και χρονική εξέλιξη του φάσματος πυκνότητας δράσης των ανεμογενών κυματισμών.

Το TOMAWAC μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως στις ακόλουθες τρεις (3) περιπτώσεις εφαρμογής:

- Εκτίμησης / πρόβλεψης κυματικού κλίματος
- Εκτίμησης κυματικών συνθηκών μέσω αντίστροφης ανάλυσης (hindcast)
- Μελέτης σε ακραία φαινόμενα (π.χ. καταιγίδες)

Το πεδίο εφαρμογής του είναι ιδιαίτερα ευρύ και καλύπτει περιοχές που ανήκουν στην ωκεάνια κλίμακα έως την παράκτια ζώνη. Το μεγάλο εύρος εφαρμογής

βασίζεται στην ανεξάρτηση της διακριτοποίησης του υπολογιστικού πλέγματος από το μήκος κύματος των κυματισμών. Η διακριτοποίηση βασίζεται μόνο στην κριτική ικανότητα του χρήστη, και γενικά είναι επιθυμητό ο κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων να εξαρτάται από την τοπική βαθυμετρία (πύκνωση στοιχείων στα ρηχά). Στο μοντέλο, είναι δυνατό ο μέγιστος λόγος της επιφάνειας των μεγαλύτερων προς των μικρότερων πεπερασμένων στοιχεία να ξεπερνά το 100 αυξάνοντας έτσι το εύρος εφαρμογής .

Οι επόμενες φυσικές διεργασίες λαμβάνονται υπ' όψη κατά την εκτέλεση του TOMAWAC:

Όροι πηγής/απώλειας:

- Αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα και γένεση ανεμογενών κυματισμών
- Απόσβεση λόγω του φαινομένου white-capping, ή θραύση κυματισμών λόγω μεγάλης κλίσης
- Απόσβεση λόγω τριβής του πυθμένα
- Απόσβεση λόγω θραύσης κυμάτων από την επίδραση του πυθμένα
- Θραύση κυματισμών λόγω παρουσίας ρεύματος αντίθετης ταχύτητας διάδοσης με το κύμα (wave blocking effects)

Μη γραμμικές διαδικασίες μεταφοράς ενέργειας:

- Μη γραμμική αλληλεπίδραση τετράδων (non-linear resonant quadruplet interactions), μηχανισμό που κυριαρχεί στα βαθιά νερά
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση τριάδων (non-linear triplet interactions), μηχανισμό που επικρατεί στα ρηχά νερά

Διεργασίες σχετικές με τη διάδοση του κύματος

- Διάδοση του κύματος με την ταχύτητα ομάδας των κυματισμών και κατά περίπτωση, της ταχύτητας του μέσου διάδοσης (π.χ. θαλάσσια ρεύματα)
- Διάθλαση λόγω της επίδρασης του πυθμένα
- Ρήγωση λόγω της επίδρασης του πυθμένα
- Διάθλαση λόγω της παρουσίας ρευμάτων
- Αλληλεπίδραση με μη σταθερό πεδίο ρεύματος και μεταφορές συχνοτήτων (π.χ. σε περιοχές με έντονα φαινόμενα παλίρροιας)
- Περίθλαση λόγω εμποδίων (π.χ. κυματοθραύστες, νησίδες)

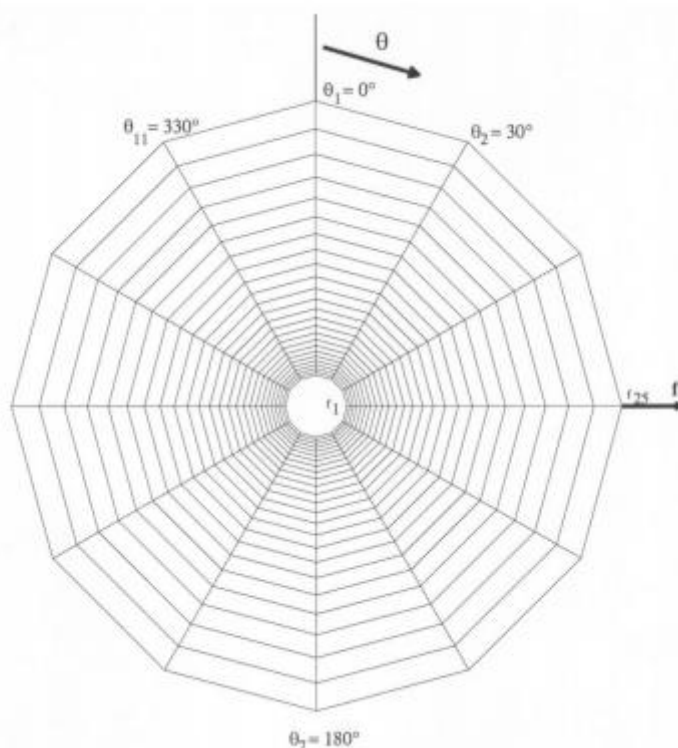
Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι παρ' όλο που το TOMAWAC μπορεί να περιλαμβάνει την περίθλαση στους υπολογισμούς του, η λειτουργία αυτή στα φασματικά μοντέλα τρίτης γενιάς έχει πολλούς περιορισμούς και συνεπώς στον τομέα εφαρμογής του δεν περιλαμβάνονται οι λιμένες. Γενικότερα, δεν συνίσταται η χρήση του σε περιπτώσεις όπου η επίδραση της ανάκλασης και της περίθλασης δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Σύμφωνα με τους Holthuijsen et al., (2003) που εισήγαγαν μια προσεγγιστική μέθοδο υπολογισμού της περίθλασης στα φασματικά μοντέλα τρίτης γενιάς, βασιζόμενοι στην εξίσωση ήπιας κλίσης, η προσέγγιση αυτή δε θα πρέπει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου:

- Ένα εμπόδιο ή η ακτογραμμή καλύπτουν μεγάλο ποσοστό του πεδίου διάδοσης των κυματισμών
- Η απόσταση του εμποδίου από την ακτογραμμή είναι μικρότερη από μερικά μήκη κύματος
- Υπάρχουν σημαντικές ανακλάσεις στο πεδίο υπολογισμού (κατακόρυφα μέτωπα με υψηλό συντελεστή ανάκλασης)

Οι παραπάνω λόγοι δικαιολογούν έμμεσα γιατί εντός λιμενολεκάνων, όπου τα φαινόμενα της ανάκλασης και περίθλασης κυριαρχούν και δεν μπορούν να αγνοηθούν, απαιτείται η χρησιμοποίηση ενός πιο αναλυτικού μοντέλου περιγραφής της εξέλιξης του κυματικού πεδίου, που θα βασίζεται στη μέθοδο διακριτοποίησης στη φάση (Μοντέλο Β)

Το TOMAWAC προσομοιώνει τη θαλάσσια κατάσταση επιλύοντας την εξίσωση ισορροπίας για το φάσμα πυκνότητας της κυματικής δράσης. Για την ικανοποίηση αυτού του σκοπού, το μοντέλο πρέπει να αναπαράγει ικανοποιητικά την χωρική και χρονική εξέλιξη του φάσματος πυκνότητας δράσης σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος. Συνεπώς, το κατευθυντικό φάσμα των κυματισμών καταμερίζεται σε πεπερασμένο αριθμό συχνοτήτων f_i και κατευθύνσεων διάδοσης θ_i . Ο καταμερισμός αυτός παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Καταμερισμός φάσματος κυματισμών ως προς τις συχνοτήτες και τις διευθύνσεις διάδοσης (25 συχνοτήτες και 12 διευθύνσεις στην παρούσα εικόνα)

3.1.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού

Θεωρώντας ότι η κυματική κατάσταση μπορεί να περιγραφεί σαν ένα διακριτό άθροισμα επιμέρους συνιστωσών μονοχρωματικών κυμάτων, που το καθένα έχει ενέργεια E , τότε για τους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς, η σχετική μεταβλητή που περιγράφει την εξέλιξή τους είναι το κατευθυντικό ενεργειακό φάσμα $E(f, \theta)$ που εξαρτάται, όπως είναι εμφανές, από τη συχνότητα του κύματος (Hz) και τη διεύθυνση διάδοσης (rad). Η ποσότητα αυτή είναι το άθροισμα των επιμέρους ενεργειών των συνιστωσών του φάσματος, διακριτοποιημένων ανά διεύθυνση και συχνότητα ως εξής:

$$\sum_f^{f+df} \sum_\theta^{\theta+d\theta} \frac{1}{2} \rho g a_m^2 = E(f, \theta) df d\theta \quad (3.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του μέσου διάδοσης και a_m το πλάτος της κάθε συνιστώσας του φάσματος των κυματισμών.

Ορίζουμε ως διακύμανση του κατευθυντικού φάσματος την ποσότητα:

$$F(f, \theta) = \frac{E(f, \theta)}{\rho g} \quad (3.2)$$

Στη γενική περίπτωση της διάδοσης κύματος σε ένα μη σταθερό μέσο (π.χ. λόγω της επίδρασης ρευμάτων ή μεταβολής της στάθμης της θάλασσας), το φαινόμενο περιγράφονται σε αυτή την περίπτωση από τη φασματική πυκνότητα της κυματικής δράσης $N(f, \theta)$. Αυτό το φάσμα πυκνότητας δράσης σχετίζεται με τη διακύμανση του κατευθυντικού φάσματος από τη σχέση:

$$N = \frac{F}{\sigma} \quad (3.3)$$

όπου το σ δηλώνει τη σχετική γωνιακή συχνότητα, δηλαδή αυτή που προκύπτει αν το σύστημα συντεταγμένων θεωρείται ότι μεταβάλλεται στη διεύθυνση διάδοσης ενός ρεύματος.

Αυτή η συχνότητα διαφέρει από την απόλυτη γωνιακή συχνότητα ω , που χρησιμοποιείται σε ένα καθορισμένο σύστημα συντεταγμένων. Οι δύο συχνότητες συνδέονται μέσω του φαινομένου Doppler, παρουσία ενός ρεύματος ταχύτητας U και της σχέσης διασποράς των κυματισμών ως εξής:

$$\Omega(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t) = \omega = \sigma + \mathbf{k}U = \sqrt{(gk \tanh(kd))} + \mathbf{k}U \quad (3.4)$$

όπου:

\mathbf{k} είναι ο κυματαριθμός με μέτρο k και διεύθυνση θ , ενώ \mathbf{U} το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος.

Το φάσμα πυκνότητας δράσης θεωρείται συνάρτηση 5 μεταβλητών

$$N(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t) = N(k_x, k_y, x, y, t) \quad (3.5)$$

Με $\mathbf{x} = (x, y)$ να αντιπροσωπεύει το διάνυσμα θέσης σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (k \sin\theta, k \cos\theta)$ το διάνυσμα του κυματαριθμού στη διεύθυνση διάδοσης θ του κυματισμού.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις φυσικές διεργασίες του μοντέλου, καθώς και την περιοχή εφαρμογής του μπορούμε να καταλήξουμε στην ακόλουθη σχέση εξέλιξης του φάσματος της κυματικής δράσης.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{k}_x N)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\dot{k}_y N)}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (3.6)$$

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει ότι στη γενική περίπτωση διάδοσης κυμάτων σε ένα μη ομοιογενές μέσο, η δράση των κυμάτων διατηρείται εντός των όρων πηγής και απώλειας (source and sink terms) που ορίζονται με τον όρο Q .

Εκμεταλλεούμενοι τις σχέσεις του Hamilton, μπορεί να αποδειχτεί ότι:

$$\frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{k}_x}{\partial k_x} + \frac{\partial \dot{k}_y}{\partial k_y} = 0 \quad (3.7)$$

και έτσι η εξίσωση η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης μπορεί να γραφτεί στην ακόλουθη μορφή (transport form)

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial N}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial N}{\partial y} + \dot{k}_x \frac{\partial N}{\partial k_x} + \dot{k}_y \frac{\partial N}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (3.8\alpha)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \text{grad}_{\mathbf{x}, \mathbf{k}}(N) = Q \quad (3.8\beta)$$

ορίζοντας ως $\mathbf{V} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{k}_x, \dot{k}_y)$

Οι ρυθμοί μεταφοράς δίνονται από την γραμμική θεωρία κυματισμών ως εξής:

$$\dot{x} = C_g \frac{k_x}{k} + U_x \quad (3.9)$$

$$\dot{y} = C_g \frac{k_y}{k} + U_y \quad (3.10)$$

$$\dot{k}_x = - \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial x} - \mathbf{k} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} \quad (3.11)$$

$$\dot{k}_y = -\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial y} - \mathbf{k} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (3.12)$$

Όπου C_g ορίζεται ως η ταχύτητα ομάδας των κυμάτων και δίνεται με τη σειρά της από τη σχέση:

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = n \frac{\sigma}{k} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] \frac{\sigma}{k} \quad (3.13)$$

Παρουσιάζεται σε αυτό το σημείο ο μετασχηματισμός της βασικής εξίσωσης σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

Μετασχηματίζοντας τις μεταβλητές από (x, y, k_x, k_y, t) σε (x, y, fr, θ, t) αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$N(x, y, k_x, k_y, t) = \frac{C C_g}{2\pi\sigma} \tilde{N}(x, y, fr, \theta, t) = \tilde{B} \tilde{F}(x, y, fr, \theta, t) \quad (3.14)$$

Στην εξίσωση (3.14) ο όρος $C = \frac{\sigma}{k}$ αντιπροσωπεύει τη σχετική ταχύτητα φάσης των κύματισμών

Θέτοντας όπου $\tilde{B} = \frac{C_g}{2\pi^2 k fr}$ στην εξίσωση (3.8a) προκύπτει η τελική εξίσωση διάδοσης του κύματος σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

$$\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial y} + \dot{\theta} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial \theta} + \dot{fr} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial fr} = \tilde{B} \tilde{Q}(x, y, \theta, fr, t) \quad (3.15)$$

με τα παρακάτω ποσοστά μεταφοράς, όπως έχουν υπολογισθεί από τη γραμμική θεωρία:

$$\dot{x} = C_g \sin\theta + U_x \quad (3.16)$$

$$\dot{y} = C_g \cos\theta + U_y \quad (3.17)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \mathbf{n} \nabla d - \frac{k}{k} \mathbf{n} \nabla U \quad (3.18)$$

$$\dot{fr} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{U} \nabla d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \mathbf{t} \nabla U \right] \quad (3.19)$$

Οι χωρικοί ρυθμοί μεταφοράς \dot{x} και \dot{y} (εξισώσεις 3.16 και 3.17) αντιπροσωπεύουν τις διεργασίες της χωρικής διάδοσης των κυμάτων και τη ρήγωση. Ο ρυθμός της γωνίας μετάδοσης $\dot{\theta}$ περιγράφει την επαγόμενη από διάθλαση αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος. Η διάθλαση δημιουργείται από τις χωρικές διακυμάνσεις του μέσου διάδοσης των κυματισμών και μπορούν να προκύψουν είτε από μια βαθυμετρική μεταβολή (πρώτος όρος της εξίσωσης 3.18) είτε από την επίδραση των ρευμάτων (δεύτερος όρος της εξίσωσης 3.18). Ο ρυθμός μεταφοράς της συχνότητας

f_r περιγράφει τις σχετικές μεταβολές συχνότητας που προκύπτουν από τις χωρικές και χρονικές διακυμάνσεις της μέσης στάθμης της θάλασσας και των ρευμάτων.

Οι όροι πηγής που εμφανίζονται στο δεξί μέλος των εξισώσεων (3.8) και (3.15) στις εξισώσεις εξέλιξης της κυματικής δράσης, λαμβάνουν υπόψιν τις φυσικές διεργασίες που έχουν ήδη προαναφερθεί στο παρόν κεφάλαιο.

$$Q = Q_{in} + Q_{ds} + Q_{nl} + Q_{bf} + Q_{br} + Q_{tr} + Q_{ds,cur} + Q_{veg} \quad (3.20)$$

Στην παραπάνω ισότητα:

Q_{in} : στιγμιαία μεταφορά της ενέργειας του ανέμου για τη γένεση ανεμογενών κυματισμών

Q_{ds} : απόσβεση ενέργειας λόγω white-capping

Q_{nl} : μεταφορά ενέργειας λόγω μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των συνιστωσών (σε τετράδες)

Q_{bf} : όρος που αντιπροσωπεύει την απόσβεση ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα

Q_{br} : απόσβεση ενέργειας λόγω του φαινομένου της θραύσης κυματισμών

Q_{tr} : μεταφορά ενέργειας λόγω μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των συνιστωσών (σε τριάδες)

$Q_{ds,curv}$: απόσβεση ενέργειας λόγω θραύσης κυματισμών που οφείλεται στην επίδραση ρευμάτων αντίθετης κατεύθυνσης διάδοσης

Q_{veg} : Απόσβεση ενέργειας σε περίπτωση ύπαρξης βλάστησης

3.1.3 Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες

Για τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου χρησιμοποιείται μη δομημένο πλέγμα (unstructured mesh), ενώ για τη διακριτοποίηση των εξισώσεων ακολουθείται η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Η πορεία επίλυσης που ακολουθείται είναι η εξής:

- Επίλυση της εξίσωσης διάδοσης των κυματισμών χωρίς να ληφθούν υπόψη οι όροι πηγής (advection step)
- Τροποποίηση του φάσματος σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος εισάγοντας τους κατάλληλους όρους πηγής/απώλειας (source/sink term integration step)

Το πρώτο κατά σειρά βήμα (advection step) λύνεται με τη Μέθοδο των Χαρακτηριστικών. Όταν δεν υπάρχει παρουσία διεργασιών που εξαρτώνται από το χρόνο (π.χ. παλίρροια, περίθλαση) η μέθοδος αυτή προσφέρει μεγάλη ευελιξία και σημαντική εξοικονόμηση στο χρόνο επίλυσης, καθώς οι χαρακτηριστικές τιμές

υπολογίζονται μια φορά στην αρχή της προσομοίωσης. Η διακριτοποιημένη εξίσωση που επιλύεται για το βήμα αυτό είναι:

$$\frac{(BF)^* - (BF)^n}{\Delta t_p} = V \cdot [grad(BF)]^n \quad (3.21)$$

Ένα ακόμη πλεονέκτημα της επίλυσης του βήματος μεταγωγής με τη μέθοδο των χαρακτηριστικών είναι το γεγονός ότι αποτελεί ευσταθές χωρίς περιορισμούς, δεν απαιτείται δηλαδή η ικανοποίηση του κριτηρίου CFL (Courant-Friedrich-Lewy), επιτρέποντας έτσι μεγάλη ευελιξία στην κατάστρωση του πλέγματος υπολογισμού. Συγκεκριμένα το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων αφήνεται στην κρίση του χρήστη.

Το βήμα στο οποίο υπολογίζονται οι όροι πηγής διακριτοποιείται στο χρόνο ως εξής:

$$\frac{F^{n+1} - F_*}{\Delta t} = (1 - \chi)Q_* + \chi Q^{n+1} \quad (3.22)$$

όπου F είναι η τιμή του φάσματος πυκνότητας δράσεις, Q το άθροισμα των όρων πηγής/απώλειας και ο δείκτης *, υποδηλώνει τιμές υπολογισμένες μετά το βήμα διάδοσης (advection step).

Ο συντελεστής χ λαμβάνει τιμές από 0 μέχρι 1 και δηλώνει τη σχέση μεταξύ ρητού και πεπλεγμένου σχήματος επίλυσης ($\chi = 0$ ρητό σχήμα, $\chi = 1$ πλήρως πεπλεγμένο σχήμα).

Οι διαθέσιμες οριακές συνθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο TOMAWAC χαρακτηρίζονται από ένα κωδικό αριθμό που αναφέρεται στον τύπο του ορίου και τοποθετείται στην πρώτη στήλη του αρχείου οριακών συνθηκών (για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τον τύπο αρχείου ο αναγνώστης παραπέμπεται στο εγχειρίδιο χρήσης του παραπάνω μοντέλου). Συνοπτικά προσφέρονται οι ακόλουθες οριακές συνθήκες που είναι δύο τύπων:

- Στερεά όρια (solid Boundaries), με κωδικό αριθμό 2, στα οποία θεωρείται πλήρης απορρόφηση της κυματικής ενέργειας
- Υγρά όρια (liquid Boundaries), με κωδικό αριθμό 5, από τα οποία γίνεται η είσοδος των κυματισμών στο υπολογιστικό πεδίο, ενώ κυματική ενέργεια δεν μπορεί να εξέλθει

Στο εξεταζόμενο μοντέλο, γίνεται η υπόθεση ότι στο ανοιχτό όριο της προς μελέτης περιοχής, η προκαθορισμένη τιμή ύψους κύματος είναι σταθερή στο χρόνο και στο χώρο. Σε περίπτωση που απαιτείται χρονική ή / και χωρική μεταβολή των κυματικών χαρακτηριστικών πρέπει να προγραμματιστεί η κατάλληλη υπορουτίνα (Limwac.f) η οποία επιτελεί αυτή τη λειτουργία.

3.1.4 Παράμετροι εισόδου / εξόδου του μοντέλου

Στο TOMAWAC απαιτείται η δημιουργία αρχείων, κάποια από τα οποία είναι υποχρεωτικά για την εκτέλεση της προσομοίωσης (mandatory files) ενώ κάποια όχι (optional). Τα βασικότερα αρχεία εισόδου είναι:

- Το αρχείο παραμέτρων της προσομοίωσης (cas/steering file) (υποχρεωτικό) που περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους και μεθόδους υπολογισμού που ορίζονται με τη χρήση λέξεων κλειδιών και περιέχονται στον κώδικα του προγράμματος.
- Το γεωμετρικό αρχείο (geometry file) (υποχρεωτικό) που περιέχει τον κάρναβο πεπερασμένων στοιχείων και τη βυθομετρία.
- Το αρχείο των οριακών συνθηκών (boundary conditions file) (υποχρεωτικό) που περιλαμβάνει τα ανοιχτά και τα στερεά όρια στην περιοχή μελέτης.
- Το αρχείο FORTRAN (προαιρετικό) που περιλαμβάνει τις υπορουτίνες στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77 που τροποποιούνται από το χρήστη και συμμετέχουν στην προσομοίωση.

Το αρχείο εξόδου είναι σε διδιάστατη δυαδική μορφή και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις εξής παραμέτρους που δίνονται με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται στο αρχείο εισόδου, όλες υπολογισμένες σε κάθε σημείο του κάρναβου:

- $M0$: είναι η διακύμανση της θαλάσσιας επιφάνειας (m)
- $HM0$: είναι το χαρακτηριστικό ύψος του κύματος ($H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$)
- $DMOY$: Η μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών (mean wave direction to) ($^{\circ}$)
- TPD : Η περίοδος αιχμής του φάσματος των κυματισμών (s)
- ZF : είναι η μέση ανύψωση του πυθμένα (m)
- WD : το βάθος του νερού (m)
- U_x, U_y : Οι συνιστώσες των ταχυτήτων των ρευμάτων στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα, εφόσον έχουν εισαχθεί στο TOMAWAC σαν παράμετροι εισόδου
- V_x, V_y : Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα, εφόσον έχουν εισαχθεί στο TOMAWAC σαν παράμετροι εισόδου
- T_{m01} : Είναι η μέση περίοδος υπολογισμένη από το φάσμα της κυματικής δράσης.

3.2 Φασματικό μοντέλο διάδοσης κυματισμών MIKE21 SW

3.2.1 Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες

Το αριθμητικό μοντέλο MIKE21 SW είναι ένα φασματικό κυματικό μοντέλο τρίτης γενιάς που αναπτύχθηκε από το Danish Hydraulic Institute (DHI). Το μοντέλο περιγράφει τη γένεση, διάδοση απόσβεση και μετασχηματισμό των ανεμογενών κυματισμών (sea state και swell). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές πρόβλεψης κυματικού κλίματος όσο και της αντίστροφης διαδικασίας (hindcast).

Το πεδίο εφαρμογής του εκτείνεται από την ωκεάνια κλίμακα μέχρι και την παράκτια ζώνη. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η κατά το δυνατόν ακριβέστερη πρόβλεψη του κυματικού κλίματος σε περιπτώσεις σχεδιασμού έργων (π.χ. λιμενικές εγκαταστάσεις, πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου κ.α.)



Εικόνα 3.2: Τυπικές περιπτώσεις εφαρμογής του MIKE21 SW

Το μοντέλο περιλαμβάνει τις ακόλουθες φυσικές διεργασίες:

- Γένεση κυματισμών από τη δράση του ανέμου
- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις κυμάτων
- Απόσβεση ενέργειας λόγω white-capping
- Απόσβεση ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα
- Θραύση κυματισμών λόγω της επίδρασης του πυθμένα
- Διάθλαση και περίθλαση των κυματισμών λόγω αλλαγής στη βυθομετρία
- Αλληλεπίδραση ρευμάτων - κυμάτων
- Επίδραση της χρονικής μεταβολής της μέσης στάθμης της θάλασσας (flooding-drying)
- Αλληλεπίδραση κύματος – παγωμένου στρώματος
- Ποιοτική περιγραφή της ανάκλασης από κατασκευές

3.2.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού

Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη διάδοση των επιφανειακών κυματισμών είναι η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης. Η χωρική και χρονική μεταβολή του φάσματος είναι συνάρτηση δύο παραμέτρων που σχετίζονται με τη φάση του κύματος και συγκεκριμένα, της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος θ , και της σχετικής γωνιακής συχνότητας σ .

Η πυκνότητα δράσης σχετίζεται με την ενεργειακή πυκνότητα μέσω της σχέσης:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (3.23)$$

Η παραπάνω σχέση είναι πανομοιότυπη με την εξίσωση (3.3) με μια διαφοροποίηση στην περιγραφή της ενεργειακής πυκνότητας του φάσματος. Το φάσμα των κυματισμών διακριτοποιείται μεταξύ μιας ελάχιστης (σ_{\min}) και μιας μέγιστης (σ_{\max}) συχνότητας. Στη συνέχεια γίνεται ο διαχωρισμός σε ένα αιτιοκρατικό τμήμα για συχνότητες μικρότερες από μια καθορισμένη τιμή (cut-off frequency) και σε ένα αναλυτικό τμήμα για συχνότητες μεγαλύτερες αυτής της τιμής. Η cut-off frequency καθορίζεται με δυναμικό τρόπο από τις ανεμολογικές συνθήκες και τη μέση συχνότητα του φάσματος ως εξής:

$$\sigma_{cut-off} = \min[\sigma_{max}, \max(2.5\bar{\sigma}, 4\sigma_{PM})] \quad (3.24)$$

όπου $\bar{\sigma}$ είναι η μέση συχνότητα του φάσματος και $\sigma_{PM} = [g/(28U_{10})]$ είναι η περίοδος αιχμής του φάσματος Pierson-Moskowitz.

Η ενεργειακή πυκνότητα δράσης περιγράφεται τελικώς από τη σχέση:

$$E(\sigma, \theta) = E(\sigma_{max}, \theta) \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma}\right)^{-m} \quad (3.25)$$

όπου στο παρόν μοντέλο η σταθερά m λαμβάνει την τιμή 5.

Η εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης επιλύεται σε καρτεσιανές (Komen et al., 1994) ή σε σφαιρικές συντεταγμένες (Young, 1999). Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν οι σχέσεις που αναφέρονται στη διάδοση κυματισμών σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3.26)$$

όπου $N(x,y,t,\theta,\sigma)$ είναι το φάσμα της πυκνότητας δράσης, $\vec{v}=(c_x, c_y, c_\theta, c_\sigma)$ η ταχύτητα διάδοσης μιας ομάδας κυματισμών σε χώρο τεσσάρων διαστάσεων (x,y,θ,σ) και S οι όροι πηγής που συμμετέχουν στην ισορροπία της κυματικής ενέργειας.

Η σχέση (3.26) είναι εναλλακτικός τρόπος γραφής της σχέσης (3.8), ενώ οι όροι μεταφοράς $(c_x, c_y, c_\theta, c_\sigma)$ δίνονται από τις σχέσεις (3.16-3.19)

Οι φυσικές διεργασίες που προσομοιώνει το μοντέλο MIKE21 SW συμμετέχουν στην εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης αθροιστικά ως εξής:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3.27)$$

όπου:

S_{in} : Ο όρος γένεσης κυματισμών από τη δράση του ανέμου

S_{nl} : Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυματισμών

S_{ds} : Απόσβεση λόγω white-capping

S_{bot} : Απόσβεση λόγω τριβής πυθμένα

S_{surf} : Απόσβεση ενέργειας μέσω θραύσης λόγω βαθυμετρικής μεταβολής

3.2.3 Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες

Οι υπολογισμοί του MIKE21 SW πραγματοποιούνται σε μη δομημένο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (flexible mesh). Για την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων στο χώρο και στο χρόνο χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (cell-centered finite volume method). Τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να είναι πολύγωνα συνήθως όμως χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία τριών κόμβων. Η πυκνότητα της κυματικής δράσης διατηρείται σταθερή τμηματικά και αποθηκεύεται στο κέντρο βάρους του κάθε στοιχείου.

Στο πεδίο των συχνοτήτων ακολουθείται μια λογαριθμική διακριτοποίηση:

$$\sigma_1 = \sigma_{min} \quad \sigma_i = f_\sigma \sigma_{i-1} \quad , i = 2, N_\sigma \quad (3.28)$$

όπου σ_{min} είναι η ελάχιστη συχνότητα του φάσματος, f_σ σταθερά που ορίζεται από το χρήστη για τον υπολογισμό των διακριτών συχνοτήτων και N_σ ο αριθμός των διακριτών συχνοτήτων.

Στο πεδίο των κατευθύνσεων, ακολουθείται μια ισόποση τμηματικά διακριτοποίηση:

$$\theta_m = (m - 1)\Delta\theta \quad \Delta\theta_m = \frac{2\pi}{N_\theta} \quad , m = 1, N_\theta \quad (3.29)$$

όπου N_θ είναι ο αριθμός των διακριτών κατευθύνσεων

Σχετικά με τη χωρική επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων, τόσο στο επίπεδο x-y, όσο και στα πεδία των συχνοτήτων και κατευθύνσεων, χρησιμοποιείται σχήμα επίλυσης Urwind 1^{ης} τάξης. Το σχήμα αυτό εισάγει σημαντική αριθμητική διάχυση, ειδικά σε εφαρμογές μικρής κλίμακας όπου η επίδραση του ανέμου δεν μπορεί να αγνοηθεί. Γι' αυτό το σκοπό εφαρμόζεται η τεχνική ENO (Essentially Non-

Oscillatory) που περιορίζει τις διαταραχές που προκαλεί η σημαντική μεταβολή της τιμής της πυκνότητας δράσης μεταξύ δύο γειτονικών πεπερασμένων στοιχείων.

Ο αλγόριθμος της χρονικής επίλυσης των διακριτοποιημένων εξισώσεων ακολουθεί τη μέθοδο της τμηματικής επίλυσης (fractional step method) που ακολουθείται και στο TOMAWAC, και συγκεκριμένα:

- Υπολογισμό της τιμής N^* στο επόμενο χρονικό βήμα (n+1) χωρίς τη θεώρηση των όρων πηγής (propagation step)
- Υπολογισμό της τιμής N στο επόμενο χρονικό βήμα (n+1) με τη θεώρηση των όρων πηγής (source term step)

Αναφορικά με το βήμα διάδοσης, χρησιμοποιείται ένα ρητό σχήμα Euler:

$$N_{i,l,m}^* = N_{i,l,m}^n + \Delta t \left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} \right)^n \quad (3.30)$$

Το συγκεκριμένο σχήμα είναι ευσταθές όταν ικανοποιείται η συνθήκη CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) που ορίζεται ως:

$$Cr_{i,l,m} = \left| c_x \frac{\Delta t}{\Delta x_i} \right| + \left| c_y \frac{\Delta t}{\Delta y_i} \right| + \left| c_\sigma \frac{\Delta t}{\Delta \sigma_i} \right| + \left| c_\theta \frac{\Delta t}{\Delta \theta_m} \right| < 1 \quad (3.31)$$

Προκειμένου να ξεπεραστεί ο αυστηρός περιορισμός ευστάθειας, εκτελείται μια μέθοδος πολλαπλών επαναλήψεων που βασίζεται στους Vilsmeier and Hänel (1995). Έτσι επιτυγχάνεται η αύξηση του μέγιστου χρονικού βήματος Δt_{\max} , εκτελώντας διαδοχικές επαναλήψεις για κάθε στοιχείο του υπολογιστικού πλέγματος.

Η επίλυση του βήματος με τη θεώρηση των όρων πηγής βασίζεται σε ένα πεπλεγμένο σχήμα:

$$N_{i,l,m}^{n+1} = N_{i,l,m}^* + \Delta t \left[\frac{(1 - \chi) S_{i,l,m}^* + \chi S_{i,l,m}^{n+1}}{\sigma_l} \right] \quad (3.32)$$

Το παραπάνω σχήμα είναι ουσιαστικά ταυτόσημο με αυτό που χρησιμοποιείται από το TOMAWAC (Σχέση 3.22), και ο συντελεστής χ συμβολίζει και πάλι τη σχέση μεταξύ εφαρμογής ρητού και πεπλεγμένου σχήματος.

Για οδεύοντα κύματα, επιλέγεται ρητό σχήμα ($\chi = 0$) ενώ για κύματα που αποσβαίνουν επιλέγεται πλήρως πεπλεγμένο σχήμα ($\chi = 1$).

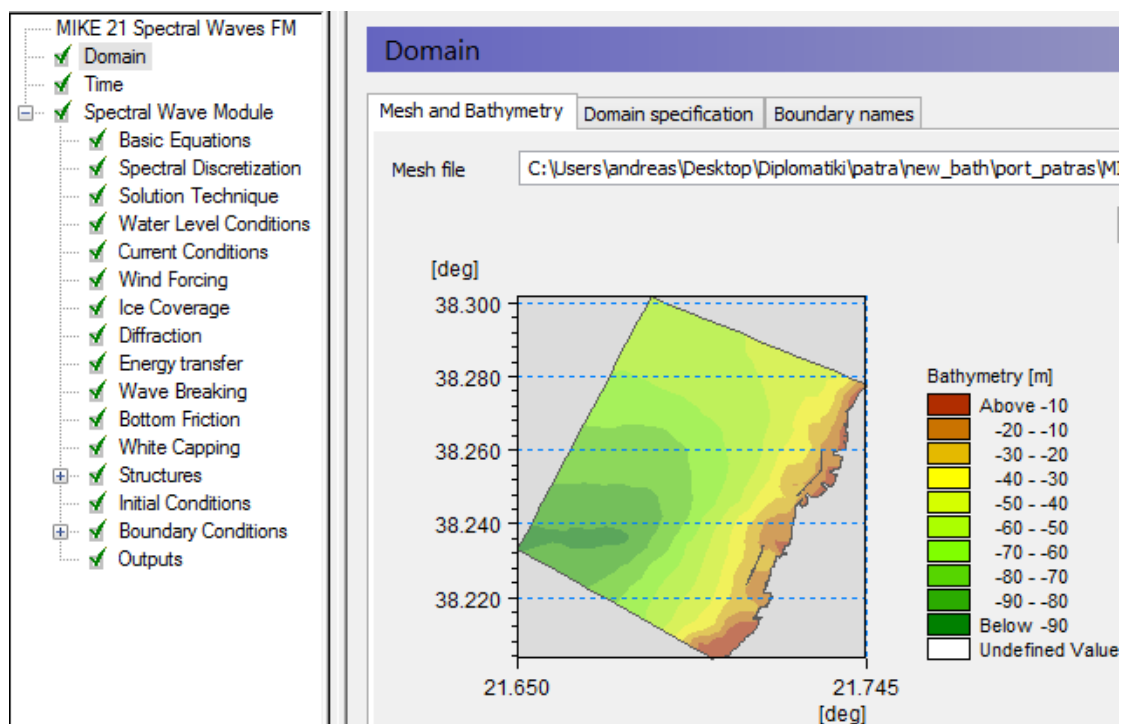
Οι διαθέσιμες οριακές συνθήκες που περιλαμβάνονται στο MIKE21 SW είναι οι εξής:

- Στερεά όρια που απορροφούν πλήρως την κυματική ενέργεια (π.χ. ακτογραμμή).
- Ανοιχτά όριο εισόδου της κυματικής ενέργειας. Απαιτείται ο καθορισμός του φάσματος του εισερχόμενου κυματισμού στο όριο, ενώ κύματα αντίθετης διεύθυνσης διαδίδονται αγνοούνται.

- Ανακλαστικά όρια της κυματικής ενέργειας. Αποτελούν ειδική διαμόρφωση των στερεών ορίων, όπου το ποσό της κυματικής ενέργειας που ανακλάται ελέγχεται σύμφωνα με ένα τοπικό συντελεστή ανάκλασης R_r . Ο συντελεστής ανάκλασης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 (πλήρης απορρόφηση κυματικής ενέργειας) και 1 (ολική ανάκλαση του εισερχόμενου κυματισμού).

3.2.4 Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου

Το μοντέλο MIKE21 SW προσφέρει ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον στο χρήστη στο οποίο καθορίζονται όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης που απαιτούνται από το μοντέλο. Απαραίτητη είναι η κατασκευή του μη δομημένου πλέγματος σε προηγούμενο στάδιο μέσω της πλατφόρμας προεργασίας MIKE ZERO. Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το παράθυρο καθορισμού των παραμέτρων της προσομοίωσης που απαιτούνται από το MIKE21 SW.



Εικόνα 3.3: Παρουσίαση του παράθυρου προεργασίας της προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW

Από το μοντέλο προσφέρονται δύο τύποι αποτελεσμάτων των κυματικών χαρακτηριστικών:

1. Παράγωγα μεγέθη του φάσματος των κυματισμών σε κάθε κόμβο των πεπερασμένων στοιχείων
2. Παράμετροι του φάσματος (ενέργεια ή/και πυκνότητα δράσης των κυματισμών) στους κόμβους των τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων

Σχετικά με την πρώτη κατηγορία μεγεθών, προσφέρονται τρεις επιλογές εξαγωγής

1. Χρονοσειρά των κυματικών χαρακτηριστικών σε ένα σημείο
2. Χρονοσειρά των κυματικών χαρακτηριστικών κατά μήκος μιας γραμμής

3. Δισδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε δυαδικό αρχείο

Οι σημαντικότερες κυματικές παράμετροι που μπορούν να εξαχθούν δίνονται στον ακόλουθο Πίνακα.

Πίνακας 3.1: Σημαντικότερες κυματικές παράμετροι εξόδου του μοντέλου MIKE21 SW

Μεταβλητή	Σύμβολο	Μονάδες SI
Σημαντικό ύψος κύματος	H_{m0}	Μέτρα (m)
Μέγιστο ύψος κύματος	H_{max}	Μέτρα (m)
Περίοδος αιχμής	T_p	Δευτερόλεπτα (s)
Μέση περίοδος κυματισμών	T_{01}	Δευτερόλεπτα (s)
Περίοδος τομής προς τα πάνω	T_{02}	Δευτερόλεπτα (s)
Μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών από	MWD	Μοίρες (°)
Διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών στην αιχμή του φάσματος	PWD	Μοίρες(°)

Οι παράμετροι του φάσματος, με την έννοια της πολυκατευθυντικής κυματικής πυκνότητας δράσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αρχικές συνθήκες σε μεταγενέστερες προσομοιώσεις. Αυτή η δυνατότητα θεωρείται πολύ σημαντική, εκμεταλλεύτηκε στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής και παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

3.3 Μοντέλο κυματικής διαταραχής ARTEMIS

Το αριθμητικό μοντέλο ARTEMIS (Agitation and Refraction with TElemac on a MId Slope) ανήκει όπως και το TOMAWAC στην πλατφόρμα λογισμικών ανοιχτού κώδικα open Telemac-Mascaret. Το μοντέλο υπολογίζει την κυματική διαταραχή και τη διάδοση των κυματισμών βασισμένο στην εξίσωση μέσης κλίσης ελλειπτικού τύπου, όπως διατυπώθηκε από τον Berkhoff (1972) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

3.3.1 Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες

Εφόσον το ARTEMIS βασίζεται στη μέθοδο χωρικής και χρονικής ανάλυσης των κυματισμών της διακριτοποίησης στη φάση, το πεδίο εφαρμογής του έχει διαστάσεις λίγων χιλιομέτρων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεταξύ άλλων κυρίως στις ακόλουθες περιπτώσεις:

- Μελέτη κυματικής διαταραχής εντός λιμένα ή κόλπου
- Εκτίμηση της επίδρασης των κατασκευών στη διάδοση των κυματισμών (π.χ. εκτίμηση διαταραχής πίσω από κυματοθραύστη)
- Απόσβεση κυματισμών πίσω από νησί
- Μελέτη συντονισμού σε λιμένες

Επιπρόσθετα, το μοντέλο είναι ικανό να περιγράψει τα ακόλουθα φυσικά φαινόμενα:

- Ανάκλαση κυματισμών από εμπόδιο (π.χ. νησί, κυματοθραύστης)
- Περίθλαση κυματισμών στη σκιά ενός εμποδίου (π.χ. νησί, κυματοθραύστης)
- Διάθλαση κυματισμών λόγω βαθυμετρικών μεταβολών
- Απόσβεση κυματικής δράσης λόγω τριβής πυθμένα
- Θραύση κυματισμών λόγω βαθυμετρικών μεταβολών

3.3.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού

Όπως αναφέρθηκε ήδη, το μοντέλο ARTEMIS υπολογίζει τη διάδοση των κυματισμών επιλύοντας την εξίσωση ήπιας κλίσης ελλειπτικού τύπου. Οι παραδοχές χρήσης αυτής της μεθόδου είναι οι εξής:

- Το ρευστό θεωρείται νευτώνειο
- Η ροή θεωρείται αστρόβιλη. Μπορεί να οριστεί λοιπόν το δυναμικό των ταχυτήτων ροής ως $\nabla\Phi = \vec{u}$
- Το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο
- Η κλίση του πυθμένα είναι πολύ μικρή

Η βασική εξίσωση που επιλύεται είναι:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \varphi) + CC_g k^2 \varphi = 0 \quad (3.33)$$

Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι της μορφής:

$$\Phi(x, y, z, t) = \frac{ch[k(z+h)]}{ch(kh)} \cdot \varphi(x, y) \cdot e^{-i\omega t} \quad (3.34)$$

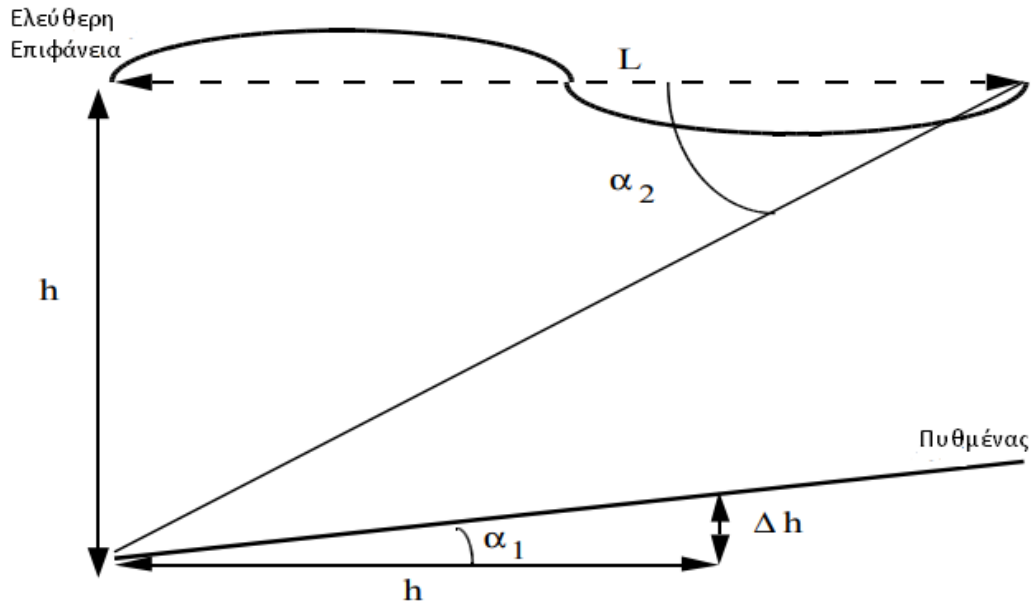
Η λύση που παρουσιάζεται στη σχέση (3.34) μπορεί να χωριστεί σε τρεις όρους, ο πρώτος εξαρτάται από την εξίσωση διασποράς, ο όρος $\varphi(x, y)$ ονομάζεται μειωμένο δυναμικό ταχυτήτων και είναι όρος πρώτης τάξης ανεξάρτητος του βάθους z . Ο τελευταίος όρος ορίζει την περιοδικότητα της λύσης.

Η ταχύτητα φάσης και η ταχύτητα ομάδας των κυματισμών που εισέρχονται στην εξίσωση (3.33) δίνονται από τη γραμμική θεωρία των κυματισμών, σύμφωνα με τη σχέση (3.13).

Σημειώνεται ότι η εξίσωση (3.33) έχει προκύψει με απαλοιφή των μη – γραμμικών όρων (γραμμικοποίηση), δεν περιλαμβάνει μηχανισμούς απόσβεσης ενέργειας και περιγράφει τη διάδοση και το μετασχηματισμό γραμμικών κυματισμών. Για να ισχύει επίσης η παραδοχή της μικρής κλίσης πυθμένα θα πρέπει να ισχύει:

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta h/h}{h/L} \ll 1 \quad (3.35)$$

Όπου ως Δh ορίζεται μια στοιχειώδη βαθυμετρική μεταβολή κατά μήκος μιας οριζόντιας απόστασης h (Εικόνα 3.4)



Εικόνα 3.4: Συμβολισμοί για την επιτρεπόμενη κλίση πυθμένα στο μοντέλο ARTEMIS (τροποποιημένη από το ARTEMIS User Manual)

Για να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα της θραύσης και της τριβής πυθμένα οι Booij (1981) και De Girolamo et al., (1988) πρότειναν την τροποποίηση της εξίσωσης (3.33) ως εξής:

$$\nabla(CC_g \nabla \varphi) + CC_g(k^2 + ik\mu)\varphi = 0 \quad (3.36)$$

Στην παραπάνω εξίσωση ως μ ορίζεται η σταθερά απόσβεσης που περιγράφει την απώλεια ενέργειας λόγω θραύσης ή τριβής πυθμένα.

Συγκεκριμένα για το φαινόμενο της θραύσης χρησιμοποιείται η μέθοδος που έχει προταθεί από τους Battjes and Jansen (1978) για σύνθετους κυματισμούς. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του ποσοστού θραυόμενων κυματισμών Q_b :

$$\frac{1 - Q_b}{Q_b} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right) = -\left(\frac{H_{rms}}{h}\right) \quad (3.37)$$

Η σταθερά απόσβεσης μ ορίζεται:

$$\mu_{br} = \frac{2\alpha Q_b}{C_g} \left(\frac{H_m}{H_{rms}}\right)^2 \quad (3.38)$$

Στην άνω εξίσωση η τιμή του συντελεστή $\alpha = 1$.

Σχετικά με τη σταθερά απόσβεσης λόγω τριβής πυθμένα, υιοθετείται η προσέγγιση των Putnam & Johnson (1949):

$$\mu_{bf} = \frac{2}{3\pi} \frac{f_w}{gC_g \sinh^3(kh)} \quad (3.39)$$

Στη σχέση (3.39) ο όρος f_w ορίζεται ως συντελεστής τριβής του πυθμένα. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές μελέτες σχετικά με την τιμή αυτού του συντελεστή, ενώ στο μοντέλο ARTEMIS υιοθετείται η μέθοδος υπολογισμού του συντελεστή τριβής του Van Rijn (1993).

Στο μοντέλο δίνεται η δυνατότητα να ληφθούν υπόψη φαινόμενα ραγδαίας μεταβολής της βυθομετρίας, τροποποιώντας την εξίσωση (3.33) σύμφωνα με την πρόταση του Benoit (1999):

$$\nabla(CC_g \nabla \varphi) + CC_g[k^2(1+f) + ik\mu]\varphi = 0 \quad (3.40)$$

Ο συντελεστής f ορίζεται ως:

$$f = E_1(kh)(\nabla h)^2 + \frac{E_2(kh)}{k_0} \Delta h \quad (3.41)$$

Οι συναρτήσεις E_1 και E_2 υπολογίζονται σύμφωνα με τους Champerlain & Porter (1995):

$$E_1(kh) = \frac{\{x^4 + 4x^3 \sinh(x) - 9 \sinh(x) \sinh(2x) + 3x[x + 2 \sinh(x)][\cosh^2(x) - 2 \cosh(x) + 3]\}}{6n[x + \sinh(x)]^3} \quad (3.42)$$

$$E_2(kh) = \frac{[\sinh(x) - x \cosh(x)]}{4n \cosh^2(x/2)[x + \sinh(x)]} \quad (3.43)$$

όπου:

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{x}{\sinh(x)} \right]$$

$$x = 2kh$$

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που προσφέρει το συγκεκριμένο αριθμητικό μοντέλο, είναι η ικανότητα περιγραφής σύνθετων πολυκατευθυντικών κυματισμών, παρά τη γραμμική φύση του. Το φάσμα των κυματισμών χωρίζεται σε ισαπέχουσες κλάσεις συχνοτήτων και κατευθύνσεων με το κριτήριο της ισόποσης ενέργειας (equal energy band discretization).

Για κάθε ζεύγος συχνότητας και κατεύθυνσης των κυματισμών επιλύεται η εξίσωση ήπιας κλίσης, θεωρώντας την κάθε κυματική συνιστώσα σα μεμονωμένο μονοχρωματικό κυματισμό και στο τέλος γίνεται υπέρθεση των επιμέρους αποτελεσμάτων. Έτσι τελικά σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος προκύπτει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_{m0} σαν υπέρθεση των επιμέρους υψών κύματος των μονοχρωματικών κυματισμών.

3.3.3 Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες

Το γραμμικό σύστημα που πρέπει να επιλυθεί, και αποτελείται από την εξίσωση μέσης κλίσης (3.40) και τις αντίστοιχες οριακές συνθήκες, έχει ως άγνωστο την ποσότητα του απομειωμένου δυναμικού ταχυτήτων $\varphi(x,y)$

Επειδή η εξίσωση αυτή είναι ελλειπτικού τύπου, μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σε τριγωνικά στοιχεία.

Θεωρώντας ότι το υπολογιστικό πεδίο συμβολίζεται ως Ω , με Γ το εξωτερικό του όριο τότε αν ορίσουμε ως Ψ μια συνάρτηση παρεμβολής στο χώρο Ω τύπου C_1 τότε η εξίσωση μέσης κλίσης περιγράφεται εναλλακτικά ως:

$$\forall \psi \in C_1(\Omega), \int_{\Omega} \psi \{ \nabla(CC_g \nabla \varphi) + CC_g [k^2(1+f) + ik\mu] \varphi \} d\Omega = 0 \quad (3.44)$$

Ολοκληρώνοντας κατά μέρη λαμβάνουμε:

$$\int_{\Gamma} \psi CC_g \frac{\partial \varphi}{\partial n} d\Gamma - \int_{\Omega} CC_g \nabla \varphi \nabla \Psi d\Omega + \int_{\Omega} CC_g [k^2(1+f) + ik\mu] \varphi \Psi d\Omega = 0 \quad (3.45)$$

Η οριακή συνθήκη μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = (A\varphi_i + B\varphi_r) + i(-A\varphi_r + B\varphi_i) - E - iF \quad (3.46)$$

όπου A, B, E, F είναι πραγματικοί αριθμοί που σχετίζονται με τον τύπο της οριακής συνθήκης.

Διαχωρίζοντας τα πραγματικά από τα φανταστικά μέρη στην εξίσωση (3.45) προκύπτει:

$$\int_{\Gamma} \psi CC_g (A\varphi_i + B\varphi_r) d\Gamma - \int_{\Omega} CC_g \nabla \varphi_r \nabla \Psi d\Omega + \int_{\Omega} CC_g [k^2(1+f)\varphi_r + k\mu\varphi_i] \Psi d\Omega = \int_{\Gamma} \psi CC_g E d\Gamma \quad (3.47)$$

$$\int_{\Gamma} \psi CC_g (B\varphi_i - A\varphi_r) d\Gamma - \int_{\Omega} CC_g \nabla \varphi_i \nabla \Psi d\Omega + \int_{\Omega} CC_g [k^2(1+f)\varphi_i + k\mu\varphi_r] \Psi d\Omega = \int_{\Gamma} \psi CC_g E d\Gamma \quad (3.48)$$

Θεωρώντας ότι το πλέγμα υπολογισμού αποτελείται από συνολικά NPOIN τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία τριών κόμβων, οι συνολικές ποσότητες φ_i, φ_r που εμφανίζονται στις σχέσεις (3.46)-(3.48) δίνονται από τις σχέσεις:

$$\varphi_r = \sum_{j=1}^{NPOIN} \varphi_r^j \Psi_j^e \quad (3.49)$$

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^{NPOIN} \varphi_i^j \Psi_j^e \quad (3.50)$$

Οι συναρτήσεις παρεμβολής Ψ_j^e είναι γραμμικές σε κάθε πεπερασμένο στοιχείο όταν συνοδεύονται με τον εκθέτη e , και μηδενικές σε αντίθετη περίπτωση.

Οι εξισώσεις (3.47) και (3.48) επιλύονται με τη βοήθεια πινακοποιημένου γραμμικού συστήματος :

$$\begin{pmatrix} AM & BM \\ -BM & AM \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varphi_r \\ \varphi_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} CV1 \\ CV2 \end{pmatrix} \quad (3.51)$$

όπου:

$$AM_{jk} = - \int_{\Gamma} \Psi_j \Psi_k C C_g B d\Gamma + \int_{\Omega} C C_g \nabla \Psi_j \cdot \nabla \Psi_k d\Omega - \int_{\Omega} C C_g k^2 (1 + f^2) \Psi_j \Psi_k d\Omega \quad (3.52)$$

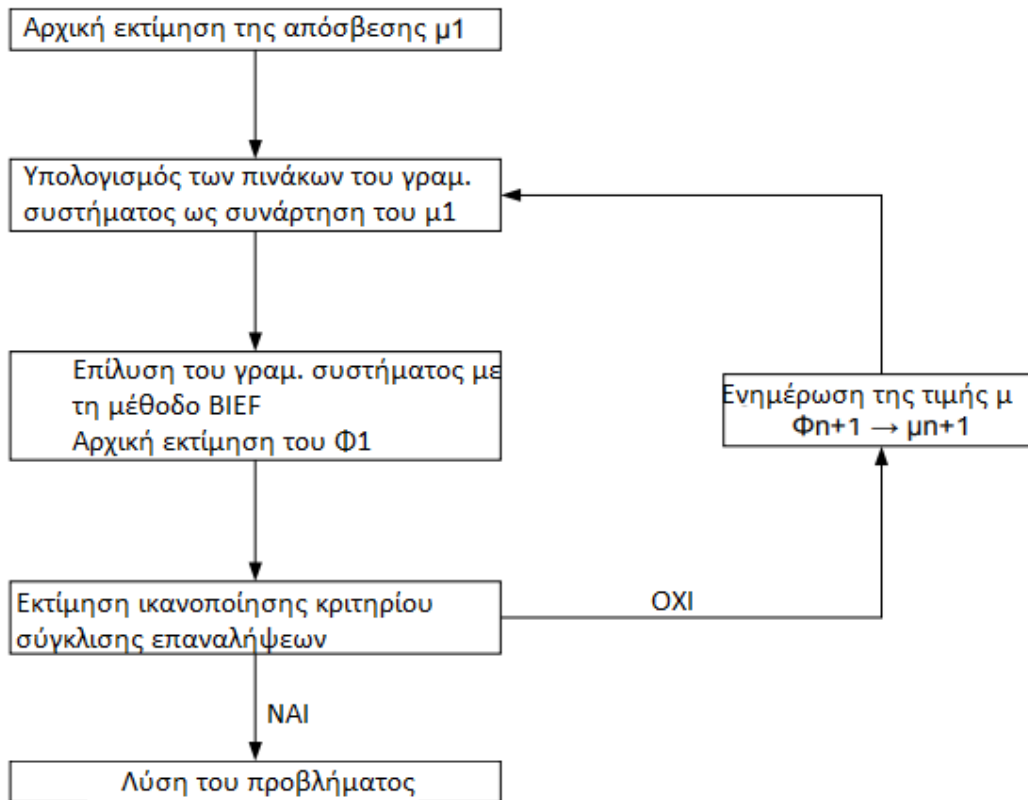
$$BM_{jk} = \int_{\Gamma} \Psi_j \Psi_k C C_g A d\Gamma + \int_{\Omega} \Psi_j \Psi_k C C_g k \mu d\Omega \quad (3.53)$$

$$CV1_{jk} = - \int_{\Gamma} \Psi_k C C_g E d\Gamma \quad (3.54)$$

$$CV2_{jk} = - \int_{\Gamma} \Psi_k C C_g F d\Gamma \quad (3.55)$$

Όλοι οι παραπάνω όροι AM, BM, CV1, CV2 είναι διαστάσεων NPOIN×NPOIN. Στην πινακοποίηση των εξισώσεων (3.47) και (3.48) παρατηρούμε ότι όλοι οι όροι έχουν πολλαπλασιαστεί με το -1. Η μετατροπή αυτή γίνεται προκειμένου να προκύψει θετική διαγώνιος του γραμμικού συστήματος (3.51), στην οποία περίπτωση η διακριτοποίηση των εξισώσεων και επίλυση του συστήματος θα γίνει πολύ ταχύτερα. Για τιμές του χωρικού βήματος $\Delta x < 1/k$ ή εναλλακτικά για $\Delta x < L/2\pi$ η διαγώνιος παραμένει θετική. Είναι λοιπόν επιτακτικό η χωρική ανάλυση του πλέγματος να είναι ικανοποιητική, δηλαδή να υπάρχουν τουλάχιστον 7 κόμβοι πεπερασμένων στοιχείων ανά μήκος κύματος (L).

Για την επίλυση του γραμμικού συστήματος γίνεται χρήση της βιβλιοθήκης BIEF που βρίσκεται ενσωματωμένη στην πλατφόρμα open Telemac-Mascaret. Το γραμμικό σύστημα επιλύεται με επαναληπτική διαδικασία. Η διαδικασία επίλυσης δίνεται σχηματικά στο επόμενο διάγραμμα ροής.

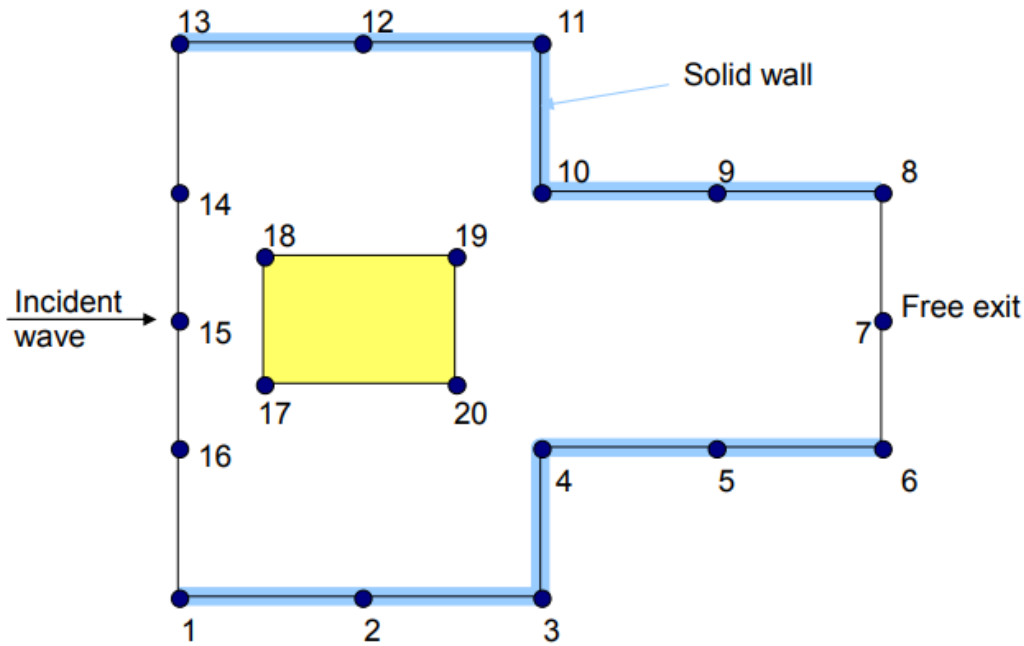


Εικόνα 3.5: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου επίλυσης του ARTEMIS (Τροποποιημένη από το Artemis User's Manual)

Οι διαθέσιμες οριακές συνθήκες στο μοντέλο ARTEMIS είναι οι εξής:

- Υγρό όριο εισόδου προσπίπτοντος κύματος (Incident Wave). Επιτρέπει την είσοδο κυμάτων που προέρχονται από τα ανοιχτά στο υπολογιστικό πεδίο και την έξοδο κυμάτων αντίθετης διεύθυνσης διάδοσης.
- Υγρό όριο ελεύθερης εξόδου κύματος (Free Exit). Επιτρέπει σε κύματα που σχηματίζουν γωνία θ_p με την κάθετη στο όριο να εξέλθουν από το υπολογιστικό πεδίο.
- Στερεά όρια (Solid Wall). Στα στερεά όρια μπορεί να καθοριστεί συντελεστής ανάκλασης R που λαμβάνει τιμές μεταξύ του 0 (πλήρης απορρόφηση) και 1 (ολική ανάκλαση).

Μια σχηματική παρουσίαση των οριακών συνθηκών σε ένα απλοποιημένο υπολογιστικό πεδίο δίνεται στην Εικόνα 3.6.



Εικόνα 3.6: Σχηματική περιγραφή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο ARTEMIS (Artemis User's Manual)

3.3.4 Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου

Αφού ανήκουν στην ίδια πλατφόρμα λογισμικών τα αρχεία εισόδου του ARTEMIS είναι πανομοιότυπα με αυτά του TOMAWAC. Τα βασικότερα αρχεία εισόδου είναι:

- Το αρχείο παραμέτρων της προσομοίωσης (cas/steering file) (υποχρεωτικό) που περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους και μεθόδους υπολογισμού που ορίζονται με τη χρήση λέξεων κλειδιών που περιέχονται στον κώδικα του προγράμματος.
- Το γεωμετρικό αρχείο (geometry file) (υποχρεωτικό) που περιέχει τον κάναβο πεπερασμένων στοιχείων και τη βυθομετρία.
- Το αρχείο των οριακών συνθηκών (boundary conditions file) (υποχρεωτικό) που περιλαμβάνει τα ανοιχτά και τα στερεά όρια της περιοχής μελέτης. Στο ARTEMIS καθορίζονται εδώ οι συντελεστές ανάκλασης στην περίπτωση στερεών ορίων ή γωνίες σχετικές με τη φάση των προσπίπτοντων και ανακλώμενων κυμάτων (θ_p, α_p)
- Το αρχείο FORTRAN (προαιρετικό) που περιλαμβάνει τις υπορουτίνες στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77 που τροποποιούνται από το χρήστη και συμμετέχουν στην προσομοίωση.

Το αρχείο εξόδου είναι σε δισδιάστατη δυαδική μορφή και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις εξής παραμέτρους που δίνονται με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται στο αρχείο εισόδου, όλες υπολογισμένες σε κάθε κόμβο του πλέγματος:

- HS : είναι το χαρακτηριστικό ύψος του κύματος είτε για σύνθετους είτε για μονοχρωματικούς κυματισμούς
- PHAS : Η φάση των κυματισμών (rad)
- C : Η ταχύτητα φάσης των κυματισμών (m/s)
- CG : Η ταχύτητα ομάδας των κυματισμών (m/s)
- K : Ο αριθμός του κύματος (1/rad)
- ZF : είναι η μέση ανύψωση του πυθμένα (m)
- WD : το βάθος του νερού (m)
- T01 : Είναι η μέση περίοδος της πρώτης ροπής, υπολογισμένη από το φάσμα των κυματισμών (sec)

3.4 Μοντέλο υπολογισμού κυματικής διαταραχής WAVE - L

Το μοντέλο κυματικής διάδοσης WAVE-L αποτελεί ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα που έχει αναπτυχθεί από τον Θ. Καραμπά στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης. Το μοντέλο υπολογίζει την κυματική διαταραχή εντός λιμένων και βασίζεται στην επίλυση των υπερβολικών εξισώσεων ήπιας κλίσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Όπως και το μοντέλο ARTEMIS, βασίζεται στη μέθοδο της διακριτοποίησης στη φάση για την χωρική και χρονική ανάλυση των κυματισμών γι' αυτό εφαρμόζεται σε περιοχές όπου η συνολική έκταση δεν ξεπερνά τα 5 km² (Καραμπάς Θ., 2015).

3.4.1 Πεδίο εφαρμογής και φυσικές διεργασίες

Το πεδίο εφαρμογής του είναι κυρίως οι λιμένες, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στις ακόλουθες ενδεικτικές εφαρμογές:

- Μελέτη κυματικής διαταραχής εντός λιμενολεκάνων
- Υπολογισμός ύψους κύματος για το σχεδιασμό παράκτιων έργων
- Αλληλεπίδραση κυματισμών με διαπερατούς κυματοθραύστες
- Αλληλεπίδραση κυματισμών με πλωτούς κυματοθραύστες

Επιπρόσθετα, το WAVE-L μπορεί να περιγράψει τις ακόλουθες φυσικές διεργασίες:

- Διάθλαση και περίθλαση κυματισμών
- Ρήγωση λόγω βαθυμετρικών μεταβολών
- Θραύση κυματισμών λόγω βαθυμετρικών μεταβολών
- Απόσβεση κυματικής ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα
- Ανάκλαση κυματισμών από στερεά όρια
- Αλληλεπίδραση κυματισμών με κατασκευές

3.4.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού

Οι βασικές εξισώσεις στις οποίες βασίζεται το μοντέλο είναι οι μέσες ως προς το βάθος εξισώσεις ήπιας κλίσης υπερβολικού τύπου όπως διατυπώθηκαν από τους Watanabe & Maruyama (1986):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(U_w d)}{\partial x} + \frac{\partial(V_w d)}{\partial y} = 0 \quad (3.56)$$

$$\frac{\partial U_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial y} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial y} = v_h \left(\frac{\partial^2 U_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_w}{\partial y^2} \right) - f_b \sigma U_w \quad (3.57\alpha)$$

$$\frac{\partial V_w}{\partial t} + \frac{1}{d} \frac{\partial(c^2 \eta)}{\partial x} - \frac{1}{d} \frac{g \eta}{\cosh(kd)} \frac{\partial d}{\partial x} = v_h \left(\frac{\partial^2 V_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_w}{\partial y^2} \right) - f_b \sigma V_w \quad (3.57\beta)$$

όπου η είναι η ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας, d είναι το βάθος του νερού, U_w και V_w είναι οι οριζόντια (στη διεύθυνση x) και κατακόρυφη (στη διεύθυνση y) συνιστώσα της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας κύματος, k ο αριθμός του κύματος, c η ταχύτητα φάσης των κυματισμών, f_b γραμμικοποιημένος συντελεστής τριβής και v_h συντελεστής οριζόντιας τυρβώδους συνεκτικότητας.

Η θραύση λόγω ρήγωσης εισάγεται στο μοντέλο μέσω του συντελεστή v_h (Battjes & Jansen, 1978)

$$v_h = 2d \left(\frac{D}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.58)$$

Η απώλεια ενέργειας λόγω θραύσης δίνεται ως:

$$D = \frac{1}{4} Q_b f_s \rho g H_m^2 \quad (3.59)$$

Στη σχέση (3.59) ως Q_b ορίζεται το ποσοστό θραυόμενων κυματισμών που δίνεται από τη σχέση (3.37), f_s είναι η μέση συχνότητα των κυματισμών, και H_m το μέγιστο ύψος κύματος που συνήθως λαμβάνεται ως $0.6d$.

Το φαινόμενο της απόσβεσης κυματικής ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα εισάγεται στο μοντέλο με τη χρήση του γραμμικοποιημένου συντελεστή τριβής ως εξής:

$$f_b \sigma = \frac{\frac{1}{2} f_w \sqrt{(U_w^2 + V_w^2)}}{d} \quad (3.60)$$

Η αλληλεπίδραση με διαπερατούς κυματοθραύστες μπορεί να γίνει με την εισαγωγή στις εξισώσεις (3.57α) και (3.57β) κατάλληλου συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας v_h , όπως προτάθηκε από τους Karambas and Bowers (1996).

$$\sigma^2 - v_h i \sigma K^2 = c^2 K^2 \quad (3.61)$$

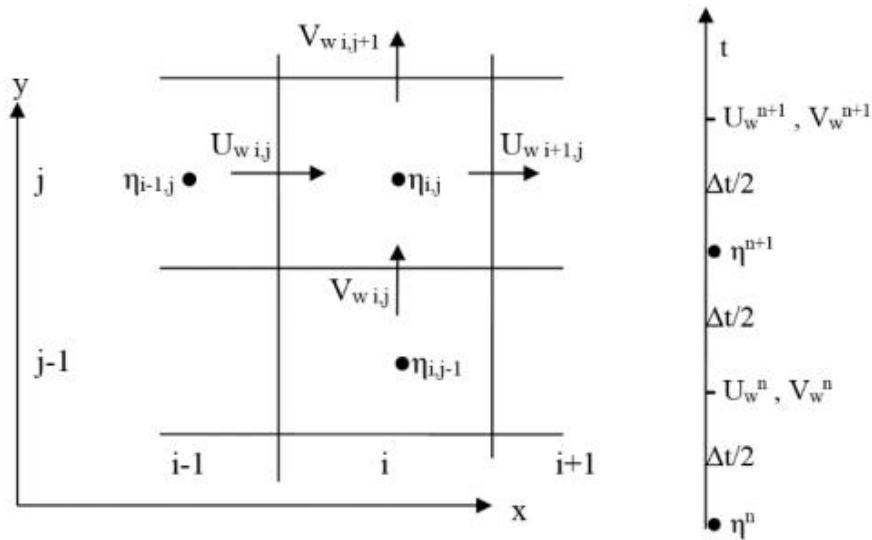
$$R_s = \left| \frac{\frac{K}{k}(1 + e^{-4iKS_w}) - (1 - e^{-4iKS_w})}{\frac{K}{k}(1 + e^{-4iKS_w}) + (1 - e^{-4iKS_w})} \right| \quad (3.62)$$

Στις άνω σχέσεις συμβολίζεται ως K ο φανταστικός (complex) αριθμός του κύματος, ενώ R_s είναι ο συντελεστής ανάκλασης της κατασκευής.

Με επαναληπτικό τρόπο, για δεδομένη τιμή του συντελεστή ανάκλασης R_s , υπολογίζεται από τις σχέσεις (3.61) και (3.62), η τιμή του συντελεστή τυρβώδους συνεκτικότητας που θα εφαρμοστεί στο μοντέλο, συνυπολογίζοντας και την τιμή του v_h που προκύπτει από το φαινόμενο της θραύσης των κυματισμών.

3.4.3 Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες

Για τη διακριτοποίηση του υπολογιστικού πεδίου στο χώρο χρησιμοποιείται έκκεντρο ορθογωνικό πλέγμα (staggered grid) με ενιαίο χωρικό βήμα στις διαστάσεις x και y . Οι βασικές εξισώσεις του μοντέλου διακριτοποιούνται με ένα ρητό σχήμα πεπερασμένων διαφορών (FCFT). Σε κάθε χρονικό βήμα $n\Delta t$, ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και οι συνιστώσες των ταχυτήτων υπολογίζονται στα κελιά του καννάβου ($i\Delta x, j\Delta y$). Σημειώνεται ότι λόγω του έκκεντρου καννάβου, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας υπολογίζεται στο κέντρο των κελιών (cell centers) ενώ οι συνιστώσες των ταχυτήτων στα όρια των κελιών (cell faces). (Copeland, 1985)



Εικόνα 3.7: Υπολογιστικό πλέγμα και διακριτοποίηση μοντέλου Wave-1 (Καραμπάς Θ. 2015)

$$\frac{\eta_i^{n+1} - \eta_i^n}{\Delta t} + \frac{(U_w d)_{i+1,j}^n - (U_w d)_{i,j}^n}{\Delta x} + \frac{(V_w d)_{i,j+1}^n - (V_w d)_{i,j}^n}{\Delta y} = 0 \quad (3.63)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{U_{w i,j}^{n+1} - U_{w i,j}^n}{\Delta t} + \left(\frac{1}{d}\right)_{i,j} \frac{(c^2 \eta)_{i,j}^{n+1} - (c^2 \eta)_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} - \left(\frac{1}{d}\right)_{i,j} \frac{g \eta_{i,j}^n}{\cosh(k_{i,j} d_{i,j})} \frac{d_{i,j} - d_{i-1,j}}{\Delta x} \\
& = v_h \frac{U_{w i+1,j}^n - 2U_{w i,j}^n + U_{w i-1,j}^n}{\Delta x^2} + v_h \frac{U_{w i,j+1}^n - 2U_{w i,j}^n + U_{w i,j-1}^n}{\Delta x^2} \\
& - f_b \sigma U_{w i,j}^n \tag{3.64a}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{V_{w i,j}^{n+1} - V_{w i,j}^n}{\Delta t} + \left(\frac{1}{d}\right)_{i,j} \frac{(c^2 \eta)_{i,j}^{n+1} - (c^2 \eta)_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta x} - \left(\frac{1}{d}\right)_{i,j} \frac{g \eta_{i,j}^n}{\cosh(k_{i,j} d_{i,j})} \frac{d_{i,j} - d_{i,j-1}}{\Delta x} \\
& = v_h \frac{V_{w i+1,j}^n - 2V_{w i,j}^n + V_{w i-1,j}^n}{\Delta x^2} + v_h \frac{V_{w i,j+1}^n - 2V_{w i,j}^n + V_{w i,j-1}^n}{\Delta x^2} \\
& - f_b \sigma V_{w i,j}^n \tag{3.64\beta}
\end{aligned}$$

Πλευρικά εφαρμόζονται οριακές συνθήκες σπογγώδους ζώνης - τεχνικής απορρόφησης των κυματισμών (sponge layer) των Larsen and Dancy, 1983. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται σε ένα διάστημα μήκους x_s από το όριο και προς τα έξω (Εικόνα 3.8). Στο εσωτερικό του διαστήματος αυτού οι μεταβλητές η , U_w και V_w διαιρούνται, σε κάθε χρονικό βήμα, με έναν συντελεστή $\mu(x)$ που ορίζεται:

$$\mu(x) = \exp \left[\left(2^{-\frac{x}{\Delta x}} - 2^{\frac{x_s}{\Delta x}} \right) \ln \beta \right] \tag{3.65}$$

όπου β είναι μία σταθερά η οποία εξαρτάται από τον αριθμό των σημείων του διαστήματος x_s , δηλαδή το $x_s/\Delta x$. Η τιμή του μπορεί να καθορίσει συνθήκες πλήρους απορρόφησης των κυματισμών αλλά και μερικής ανάκλασης

Το σύστημα διεγείρεται από μια χρονοσειρά $\zeta_i^*(t)$ ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας που εφαρμόζεται σε μια γραμμή του εσωτερικού της λιμενολεκάνης παράλληλα σε ένα όριο (Εικόνα 3.8) και σε απόσταση $20dx$ από αυτό (Larsen and Dancy, 1983, Lee and Suh, 1998).

Η χρονοσειρά διέγερσης είναι ημιτονοειδής (γραμμικοί κυματισμοί):

$$\eta_i^* = 2 \frac{H}{2} \sin[\sigma(t - t_f)] \cos a \ c \frac{\Delta t}{\Delta x} \tag{3.67}$$

με:

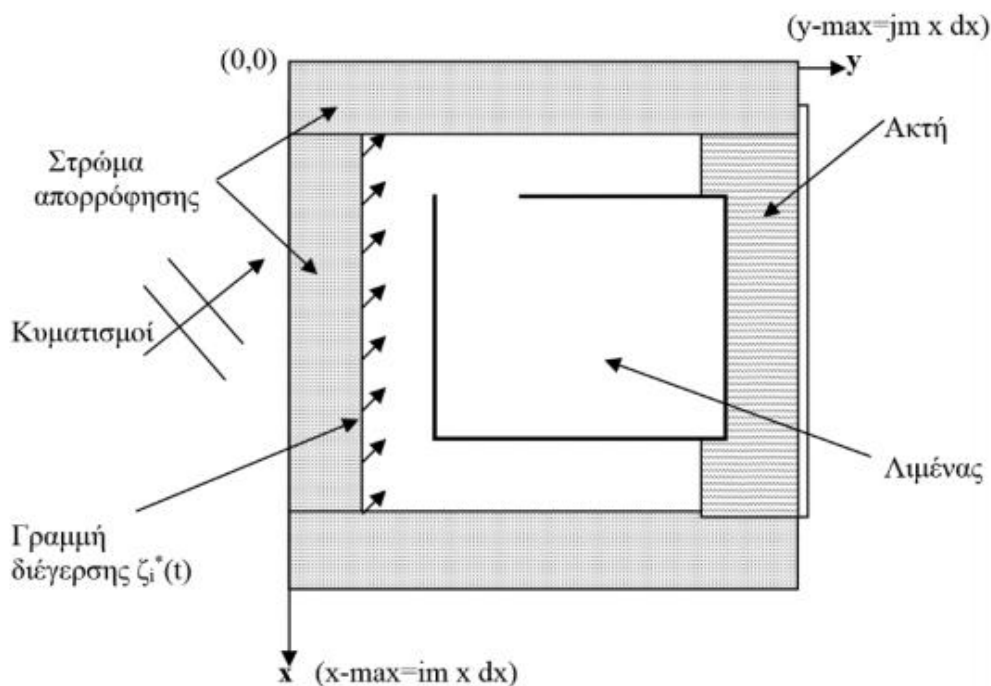
$$t_f = \sin(a) \frac{x}{c} \tag{3.68}$$

όπου H είναι το ύψος του κύματος στην είσοδο του λιμενικού έργου, c η ταχύτητα μετάδοσης, Δt και Δx το χρονικό και το χωρικό βήμα, σ η γωνιακή συχνότητα και a η γωνία πρόσπτωσης.

Η ανύψωση $\eta_i^*(t)$ προστίθεται στην υπολογισμένη ανύψωση στο εσωτερικό του πεδίου, δηλαδή η τελική τιμή της ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας είναι το άθροισμα

του προσπίπτοντος κυματισμού $\eta_i^*(t)$ και του αποτελέσματος που προκύπτει από το εσωτερικό του πεδίου. Στα πρώτα 20 περιμετρικά ($x_s/\Delta x=20$) σημεία, επιβάλλεται η συνθήκη ορίου απορρόφησης (sponge layer), ώστε να απορροφώνται οι ανακλώμενοι κυματισμοί από το εσωτερικό του υπολογιστικού πεδίου.

Στα όρια πλήρους ανάκλασης εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες: $U_w = 0$ ή $V_w = 0$ και $\partial\eta/\partial s = 0$, όπου s ο άξονας κάθετα στο όριο.



Εικόνα 3.8: Υπολογιστικό πεδίο - Συμβολισμοί (Καραμπάς Θ. 2015)

Τέλος, το χωρικό βήμα dx επιλέγεται να είναι περίπου $dx=L_o/20$ (L_o =μήκος κύματος στα βαθιά νερά).

Το χρονικό dt θα πρέπει να ικανοποιεί τη συνθήκη CFL, δηλαδή: $dt < 0.5dx/c$ (όπου c η ταχύτητα μετάδοσης)

3.4.4 Αρχεία εισόδου / εξόδου του μοντέλου

Για την εκτέλεση του μοντέλου, απαιτείται η εισαγωγή των εξής αρχείων παραμέτρων προσομοίωσης :

- Το αρχείο DEPTH.DAT, που περιλαμβάνει τη βυθομετρία του υπολογιστικού πεδίου. Το αρχείο δημιουργείται ως εξής: Στην πρώτη σειρά γράφονται οι μέγιστες τιμές i_m και j_m . Για κάθε μία τιμή του j (αρχίζοντας από $j=1$) σημειώνονται για όλα τα i τα βάθη (θετικές τιμές). Οι θέσεις των κατασκευών δηλώνονται μία αρνητική τιμή. Αρνητικές τιμές έχουν επίσης και τα σημεία της ξηράς. Πριν από κάθε ομάδα i_m σημείων στην αρχή γράφεται και η τιμή του j που αντιστοιχεί σε αυτά.

- Το αρχείο EDDY.DAT που εισάγονται οι τιμές του τεχνητού συντελεστή τυρβώδους ιξώδους που περιγράφεται στις σχέσεις (3.61) και (3.62) για την περιγραφή της απώλειας της ενέργειας από τα τεχνητά πρανή των κατασκευών, αλλά και τα φυσικά βραχώδη πρανή με μεγάλη κλίση. Η απώλεια της ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών που πραγματοποιείται στον πυθμένα με ηπιότερες κλίσεις (μικρότερες του 1/5) περιγράφεται αυτόματα από το πρόγραμμα.
- Το αρχείο ICOD.DAT που εισάγονται οι τιμές 0 και 1. Με το 1 δηλώνονται τα σημεία μιας έξαλης κατασκευής (κατακόρυφο μέτωπο, κυματοθραύστης με πρανή) ή μιας έξαλης βραχώδους έκτασης με πολύ απότομες κλίσεις, ενώ με 0 δηλώνονται τα υπόλοιπα σημεία
- Το αρχείο ICODSB.DAT όπου αντίστοιχα εισάγονται και πάλι οι τιμές 0 και 1. Με το 1 δηλώνονται τα σημεία μιας ύφαλης κατασκευής (κυματοθραύστης) ή μιας ύφαλης βραχώδους έκτασης, σκληρού μη μεταβαλλόμενου πυθμένα. Με 0 δηλώνονται όλα τα υπόλοιπα σημεία της θαλάσσιας επιφάνειας.

Τα δεδομένα της προσομοίωσης που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση του μοντέλου (π.χ. χαρακτηριστικά κύματος στην κυματογεννήτρια) δίνονται με την εντολή DATA και είναι:

- ύψος κύματος στη γραμμή διέγερσης H_0 (m)
- περίοδος T (s)
- χρονικό βήμα της προσομοίωσης Δt (s) και χωρικό βήμα της προσομοίωσης Δx (m)
- Γωνία πρόσπτωσης στη γραμμή κυματικής διέγερσης, σύμφωνα με την καρτεσιανή σύμβαση, fin (rad)
- μια τυπική κλίση πυθμένα: slope (εισάγεται η αντίστροφη κλίση π.χ. 30 για κλίση 1/30)
- συνολικός χρόνος εφαρμογής του μοντέλου: tend. Ο χρόνος αυτός θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από τον χρόνο μετάδοσης των κυματισμών από την είσοδο ως την απέναντι άκρη του υπολογιστικού πεδίου πολλαπλασιασμένου επί 3 (ώστε να περιγραφούν και τα στάσιμα κύματα που τυχόν θα προκύψουν).

Τα αποτελέσματα του μοντέλου εισάγονται στα αρχεία:

-HEIGHT.DAT, με μορφή:
x, y, H(x,y)

-BOTTOM.DAT, με μορφή:
X, y, u_{b-max} , v_{b-max} , v_h , Q_b
όπου u_{b-max} , v_{b-max} οι μέγιστες ταχύτητες του κυματισμού στον πυθμένα, v_h ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας και Q_b το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών.

-SXXYY.DAT, με μορφή
sxx, syy, sxy
όπου sxx, syy, sxy οι τάσεις ακτινοβολίας S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} αντίστοιχα

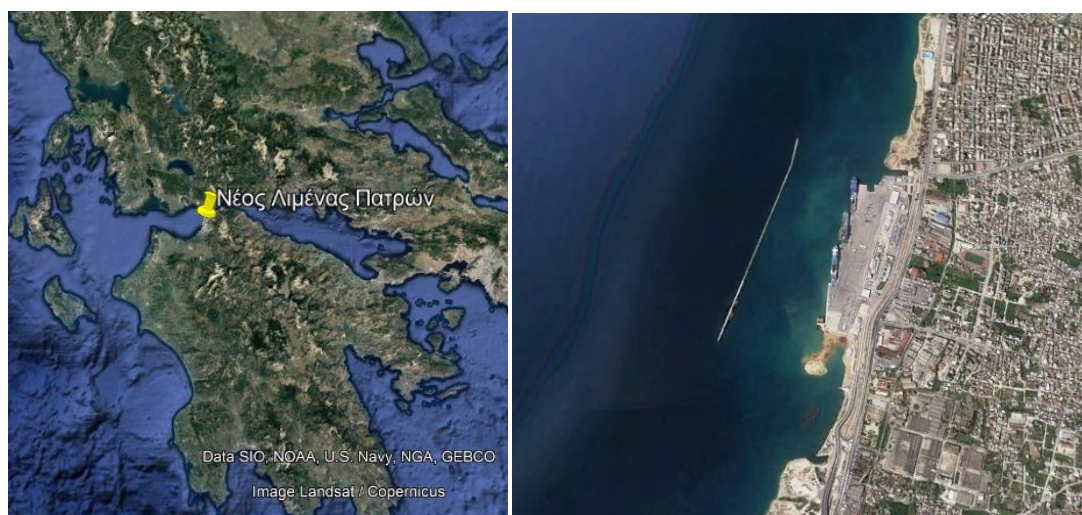
4. Περιοχή Μελέτης – Προετοιμασία προσομοιώσεων

4.1 Παρουσίαση της περιοχής μελέτης

Ο Νέος Νότιος Λιμένας Πατρών (Εικόνα 4.1) βρίσκεται στον Πατραϊκό Κόλπο, είναι το δεύτερο μεγαλύτερο λιμάνι της Ελλάδας μετά τον Πειραιά και το κύριο με επικοινωνία με την Ευρώπη.

Η λειτουργία του Νέου Νότιου Λιμένα Πατρών ξεκίνησε από τις 11 Ιουλίου 2011 για την εξυπηρέτηση των δρομολογίων των γραμμών Πάτρας-Ιταλίας.

Το Νότιο Επιβατικό Λιμάνι διαθέτει μέτωπο λιμένα (κρηπίδωμα) κατασκευασμένο με κυψελωτά κιβώτια (caisson) από οπλισμένο σκυρόδεμα σε πριονωτή διάταξη, συνολικού μήκους 992m. Αποτελείται από 4 νηοδόχους και διαθέτει 15 ράμπες πρόσδεσης σκαφών ώστε να χρησιμοποιούνται 11 ράμπες για πρυμνοδέτηση ή 4 για πλαγιοδέτηση. Επίσης το Νότιο Λιμάνι διαθέτει κυματοθραύστη κατασκευασμένο με κυψελωτά κιβώτια από οπλισμένο σκυρόδεμα συνολικού μήκους 1.236 m.



Εικόνα 4.1: Γεωγραφική θέση του Νέου Λιμένα Πατρών

Το ολοκληρωμένο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής, θα πρέπει να υπολογίζει τα κυματικά χαρακτηριστικά στο διάλυλο προσέγγισης και εντός της λιμενολεκάνης.

Στη συνέχεια δίνεται η περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται για την προετοιμασία των αρχείων εισόδου των μοντέλων, καθώς και της επεξεργασίας των μετεωρολογικών παραμέτρων από τη βάση δεδομένων Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS).

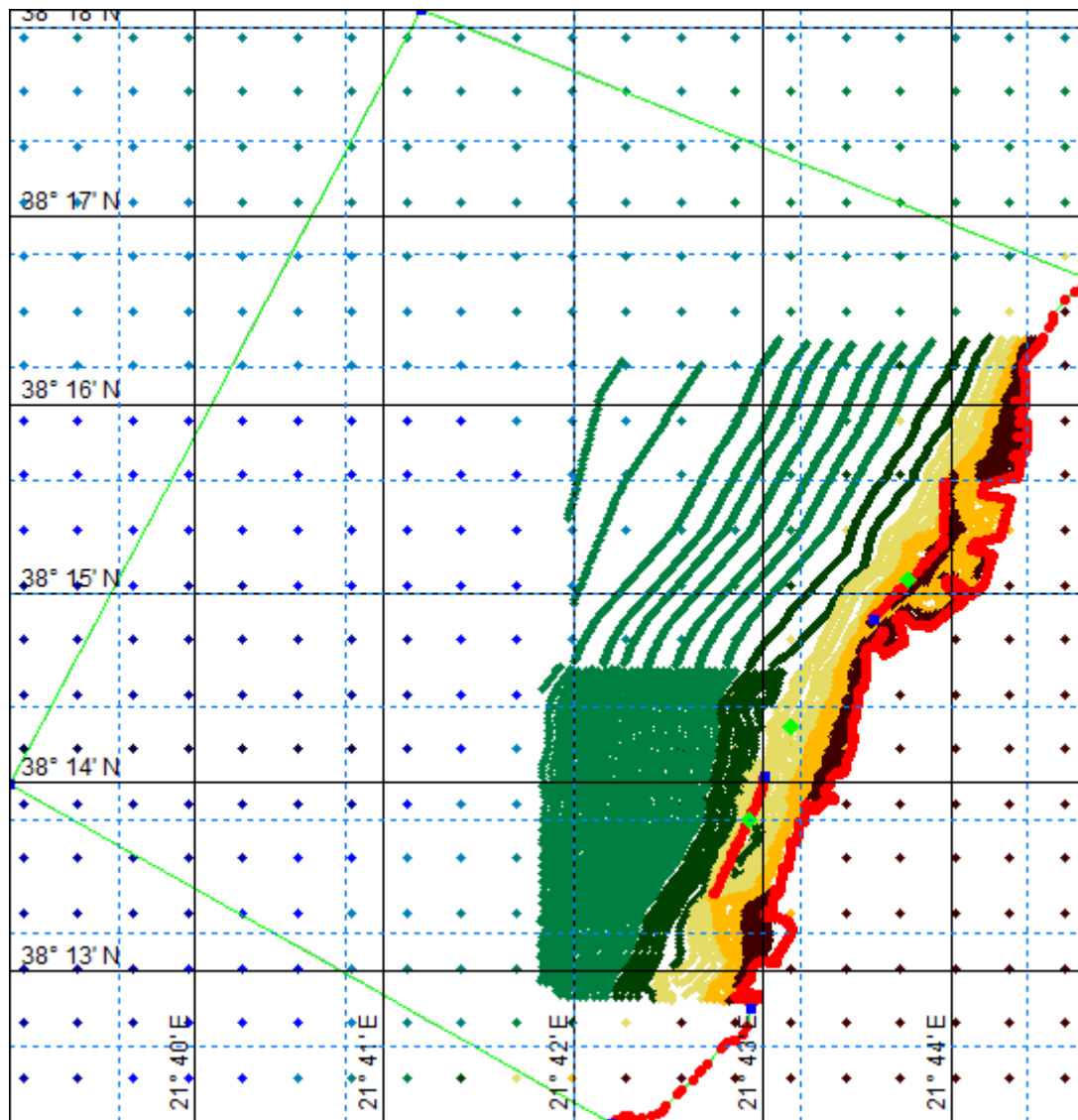
4.2 Προετοιμασία των αρχικών δεδομένων

4.2.1 Κατασκευή της βυθομετρίας στο μοντέλο MIKE ZERO

Οι δύο εναλλακτικές λύσεις που εξετάζονται για να επιτελέσουν το ρόλο της διάδοσης των κυμάτων από τα βαθιά στην είσοδο της λιμενολεκάνης, δηλαδή τα μοντέλα MIKE21 SW και TOMAWAC, εκτελούν τους υπολογισμούς τους σε μη δομημένο πλέγμα τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3. Παρουσιάζεται έτσι το πλεονέκτημα της κατασκευής ενός και μόνο πλέγματος, στο οποίο και τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα θα εκτελέσουν τους υπολογισμούς τους. Επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το γραφικό περιβάλλον του MIKE ZERO – Mesh Generator (mdf), για τους λόγους της φιλικότητας προς το χρήστη, και της προσαρμοστικότητας του αλγόριθμου κατασκευής, συγκεκριμένα τη μείωση της επιφάνειας των πεπερασμένων στοιχείων όσο το βάθος μειώνεται και προσεγγίζεται η ακτογραμμή.

Σαν δεδομένα βαθών επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα γεωχωρικά δεδομένα που προσφέρονται από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού, με τη μορφή Ψηφιακού Μοντέλου Βυθού (DTM) με ανάλυση 15". Επειδή η ανάλυση αυτή δεν θεωρείται ικανοποιητική για την προσομοίωση των κυματικών χαρακτηριστικών εντός της λιμενολεκάνης και στην ακτογραμμή, για μεγαλύτερη ακρίβεια και μέχρι την ισοβαθή των -40 m περίξ της περιοχής του Νέου Λιμένα Πατρών, εισήχθη αρχείο βαθών υψηλότερης ανάλυσης, που προέκυψε από ψηφιοποίηση στο Autocad Ναυτικών Χαρτών από την εφαρμογή NAVIONICS. Η ακτογραμμή επίσης προέκυψε με πανομοιότυπη διαδικασία χρησιμοποιώντας πρωτογενή δεδομένα της εφαρμογής NAVIONICS, για τις περιοχές των κρηπιδωμάτων και έργων προστασίας, ενώ για τα τμήματα που δεν παρουσιάζουν τόσο ενδιαφέρον για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε shapfile της Ακτογραμμής του Ελλαδικού Χώρου σε κλίμακα 1:90000 που παρέχεται ελεύθερα σε ηλεκτρονική μορφή από την Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού.

Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζονται τα σημεία από τα οποία κατασκευάζεται η βυθομετρία. Είναι φανερό η πύκνωση των σημείων κοντά στην ακτογραμμή και ειδικότερα εντός του Νέου και Παλαιού Λιμένα Πατρών.

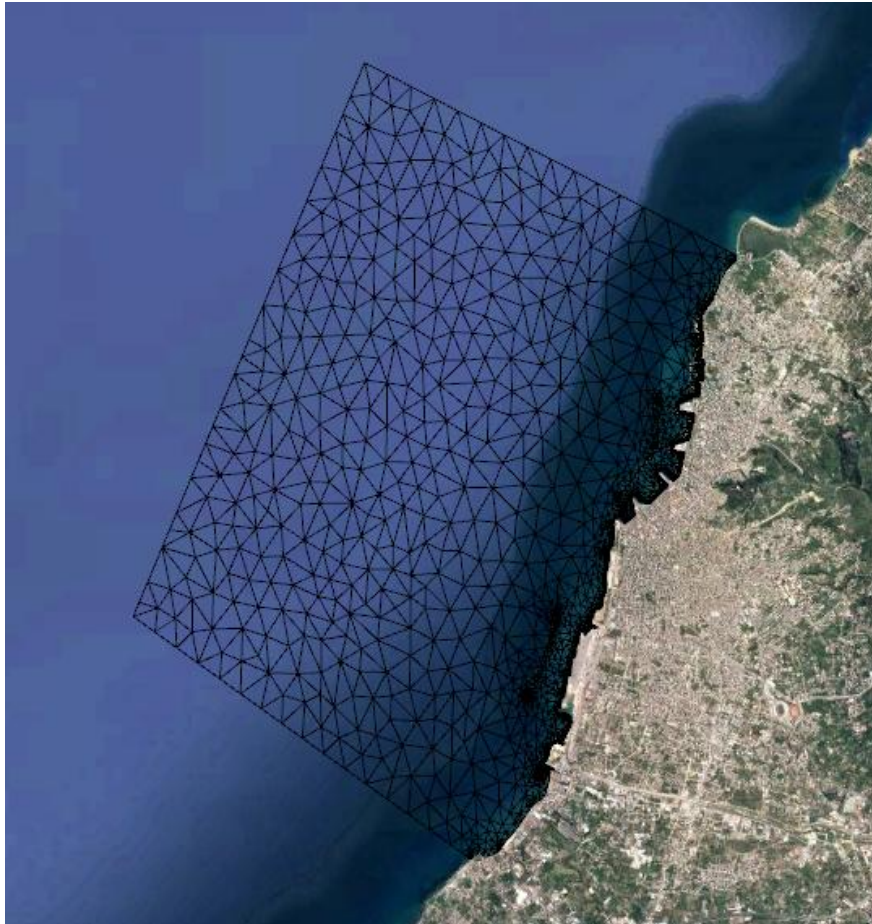


Εικόνα 4.2: Σημεία Βυθομετρίας και όρια της περιοχής μελέτης προς εφαρμογή στα μοντέλα MIKE21 SW και TOMAWAC.

Στο μοντέλο Α χρησιμοποιείται γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων (Geographic coordinate system) οπότε οι μονάδες μήκους θα αναφέρονται σε μοίρες για το συγκεκριμένο μοντέλο.

Για την κατασκευή του καννάβου πεπερασμένων στοιχείων επιλέχθηκε μέγιστη επιφάνεια των τριγώνων να οριστεί ως $9 \times 10^6 \text{ deg}^2$.

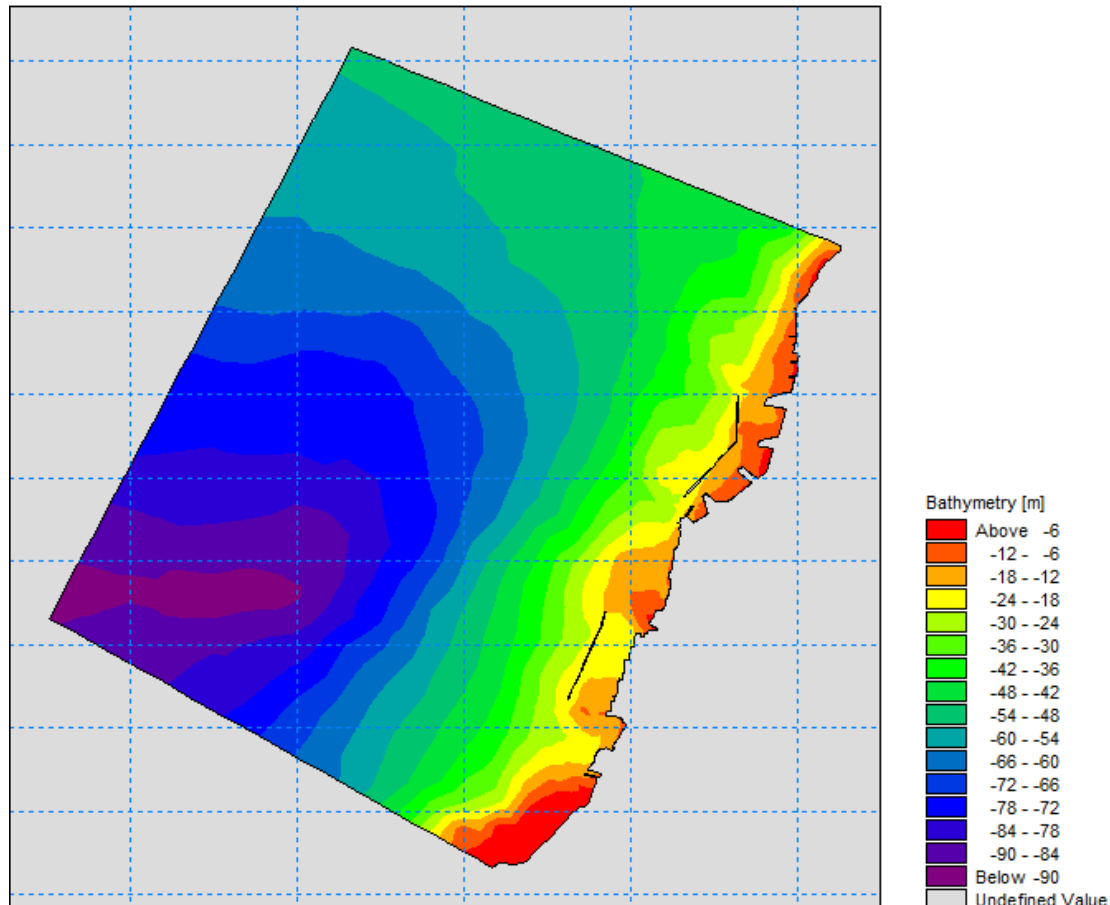
Το περιβάλλον MIKE ZERO, προσφέρει τη δυνατότητα της προσαρμογής των πεπερασμένων στοιχείων στο τοπικό βάθος, χωρίς να απαιτούνται εργασίες πύκνωσης. Για να γίνει λοιπόν κατανοητό το συγκριτικό μέγεθος και η διαβάθμιση των τριγωνικών στοιχείων, στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται ο καννάβος πεπερασμένων στοιχείων αποτυπωμένος στο Google Earth.



Εικόνα 4.3: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων για την ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος

Ο κάνναβος αποτελείται από 4642 στοιχεία και 2843 κόμβους. Ο αριθμός των γειτόνων για τους εξωτερικούς κόμβους κυμαίνεται από 2-6 ενώ για τους εσωτερικούς από 4-9. Είναι επιθυμητό να μην υπάρχουν περισσότεροι των 11 γειτόνων στα εσωτερικά στοιχεία καθώς το μοντέλο TOMAWAC θα είναι αδύνατο να εκτελεστεί για λόγους μνήμης. (Segmentation Fault)

Για να οριστούν τιμές βυθομετρίας σε κάθε κόμβο του καννάβου χρησιμοποιείται η μέθοδος του πλησιέστερου γείτονα, με δεδομένα βαθών αυτά που παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 4.2. Η τελική βυθομετρία του υπολογιστικού πεδίου του μοντέλου A δίνεται στην Εικόνα 4.4 με τη μορφή χρωματιζόμενων περιγραμμάτων.



Εικόνα 4.4: Βυθομετρία υπολογιστικού πεδίου του μοντέλου Α

4.2.2 Λήψη ωκεανογραφικών μεταβλητών από τη βάση δεδομένων CMEMS

Σ' αυτό το σημείο θα δοθεί μια σύντομη περιγραφή για τη βάση δεδομένων Copernicus Marine Environmental Monitoring Service, τα προϊόντα και τις ωκεανογραφικές μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν και τη διαδικασία με την οποία γίνεται η λήψη των δεδομένων.

Οι τιμές των μεταβλητών που ληφθούν από τη βάση CMEMS και θα αφορούν τα κυματικά χαρακτηριστικά, θα χρησιμοποιηθούν σαν οριακές συνθήκες στο υπολογιστικό πεδίο του μοντέλου Α.

Συγκεκριμένα το πακέτο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της διάδοσης των κυματισμών με το μοντέλο Α είναι το εξής:

- [MEDSEA ANALYSIS FORECAST WAV 006 017](#), με χωρική ανάλυση $0.042^\circ \times 0.042^\circ$, και χρονικό βήμα διακριτοποίησης 1 ώρα.

Οι παράμετροι που παρέχονται από το παραπάνω πακέτο είναι αποτέλεσμα προσομοιώσεων του συστήματος πρόβλεψης κυματισμών της Μεσογείου (Med-Waves), που βασίζεται στο φασματικό κυματικό μοντέλο τρίτης γενιάς WAM Cycle

4.5.4 (Günther and Behrens, 2012), που αποτελεί μια νεότερη και τροποποιημένη έκδοση του ευρέως χρησιμοποιημένου μοντέλου WAM Cycle 4 (WAMDI Group, 1988; Komen et al., 1994). Το μοντέλο WAM επιλύει την εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης χωρίς να λαμβάνει υπόψη το σχήμα του φάσματος και ενσωματώνει τους εξής όρους πηγής στους υπολογισμούς: 1) γένεση κυματισμών λόγω της δράσης του ανέμου, 2) απόσβεση κυματικής ενέργειας λόγω whitecapping, 3) μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις κυματισμών και 4) τριβή πυθμένα. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες των προβλέψεων εκτελεί τους υπολογισμούς του σε ένα αραιό ορθογωνικό κάναβο χωρικής ανάλυσης $1/6^\circ$ που καλύπτει τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό και εκτείνεται από 75° W έως 10° E και από 70° N έως 10° S και ένα εμφωλευμένο κάναβο χωρικής ανάλυσης $1/24^\circ$ που καλύπτει τη Μεσόγειο Θάλασσα και εκτείνεται από 18.125° W έως 36.2917° E και από 30.1875° N έως 45.9792° S. Το μοντέλο εμπεριέχει επίσης τεχνικές αφομοίωσης δεδομένων (data assimilation). Το φάσμα των κυματισμών διακριτοποιείται σε 32 συχνότητες που διαχωρίζονται κατά μια λογαριθμική κλίμακα έκτασης από 0.04177 Hz έως 0.8018 Hz σε βήματα $df/f=0.1$, και 24 ισόποσα διακριτοποιημένες διευθύνσεις.

Οι μεταβλητές οι οποίες θα λαμβάνονται από τα παραπάνω πακέτα και θα τίθενται σαν οριακές συνθήκες στο μοντέλο A θα είναι:

- sea_surface_wave_significant_height (SWH)
- sea_surface_wave_period_at_variance_spectral_density_maximum ()
- sea_surface_wave_from_direction (VMDR)

Σημειώνεται σε αυτό το σημείο, ότι από τα παραπάνω πακέτα δεδομένων προσφέρονται και οι ακόλουθες μεταβλητές, που αφορούν το διαχωρισμό σε ανεμογενή κύματα (wind waves) και αποθάλασσες (swell).

- sea_surface_wind_wave_significant_height (WW)
- sea_surface_wind_wave_mean_period (WW)
- sea_surface_wind_wave_from_direction (WW)
- sea_surface_primary_swell_wave_significant_height (SW1)
- sea_surface_primary_swell_wave_mean_period (SW1)
- sea_surface_primary_swell_wave_from_direction (SW1)
- sea_surface_secondary_swell_wave_significant_height (SW2)
- sea_surface_secondary_swell_wave_mean_period (SW2)
- sea_surface_secondary_swell_wave_from_direction (SW2)

Τα αποτελέσματα του μοντέλου WAM αφορούν την εξέλιξη ενός φάσματος (στο εξής θα αναφέρεται ως συνολικό φάσμα) σε κάθε κελί του υπολογιστικού πλέγματος. Ο διαχωρισμός των μεταβλητών σε ομάδες που αφορούν swell ή ανεμογενείς κυματισμούς γίνεται με μια μέθοδο δύο βημάτων όπως περιγράφεται από τους Lionello et al., 1992 εκτιμώντας αν στην κατανομή της κυματικής ενέργειας κυριαρχούν οι ανεμογενείς κυματισμοί ή οι αποθάλασσες.

Όπως σημειώνεται και στο User's Manual, (2018) του Πακέτου MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_006_017, σε ελεύθερη μετάφραση:

«Προκύπτει πρόβλημα σε περίπτωση ταυτόχρονης παρουσίας ανεμογενών κυματισμών και αποθαλασσών. Σε αυτή την περίπτωση ο διαχωρισμός γίνεται θεωρώντας ποια είναι η επικρατούσα από τις δύο διεργασίες, που είναι και περιορισμός της μεθόδου που αναφέρθηκε»

Για να αιτιολογηθεί γιατί επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα εισόδου οι μεταβλητές που αφορούν τη χωροχρονική εξέλιξη του αρχικού φάσματος, παρατίθενται δεδομένα από το Πακέτο MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_006_017 για τις 27/11/2018 στις 9.00 π.μ. , για τις επιμέρους μεταβλητές που αφορούν τα κυματικά χαρακτηριστικά, σε απόσταση περίπου 5800 m από τα κρηπιδώματα, και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1

Πίνακας 4.1: Δεδομένα κυματικών χαρακτηριστικών ανοιχτά του Νέου Λιμένα Πατρών στις 27/11/2018

	Συνολικό Φάσμα	Wind Wave	Pr. Swell	Sec. Swell
Hs (m)	0.276	0.16	0.19	0.101
T(s)	8.39	1.63	2.75	7.49
Mean Wave Dir. from (°)	249.6	212.8	269.4	253.7
Dir. at Spectral Peak (°)	259.3	-	-	-

Από τον παραπάνω Πίνακα 4.1 γίνεται εμφανές ότι ο διαχωρισμός δεν κρίνεται ικανοποιητικός, καθώς η μέση περίοδος για τους ανεμογενείς κυματισμούς και το κυρίαρχο Swell, είναι εξαιρετικά μικρή, χάνοντας τη φυσική της υπόσταση. Για οικονομία χώρου και χρόνου, με τη μείωση των μεταβλητών που απαιτούνται να λαμβάνονται από κάθε πακέτο, αλλά και για την κατά το δυνατόν ακριβέστερη περιγραφή των κυματικών συνθηκών επιλέγεται να λαμβάνονται οι μεταβλητές που αναφέρθηκαν στο πρώτο τμήμα της παρούσης ενότητας, δηλαδή αυτές που αναφέρονται ως :

- Spectral significant wave height (H_{m0})
- Mean wave direction from (Mdir)
- Wave period at spectral peak / peak period (T_p)

Η λήψη των ωκεανογραφικών μεταβλητών, από τη βάση CMEMS γίνεται με την εξής διαδικασία:

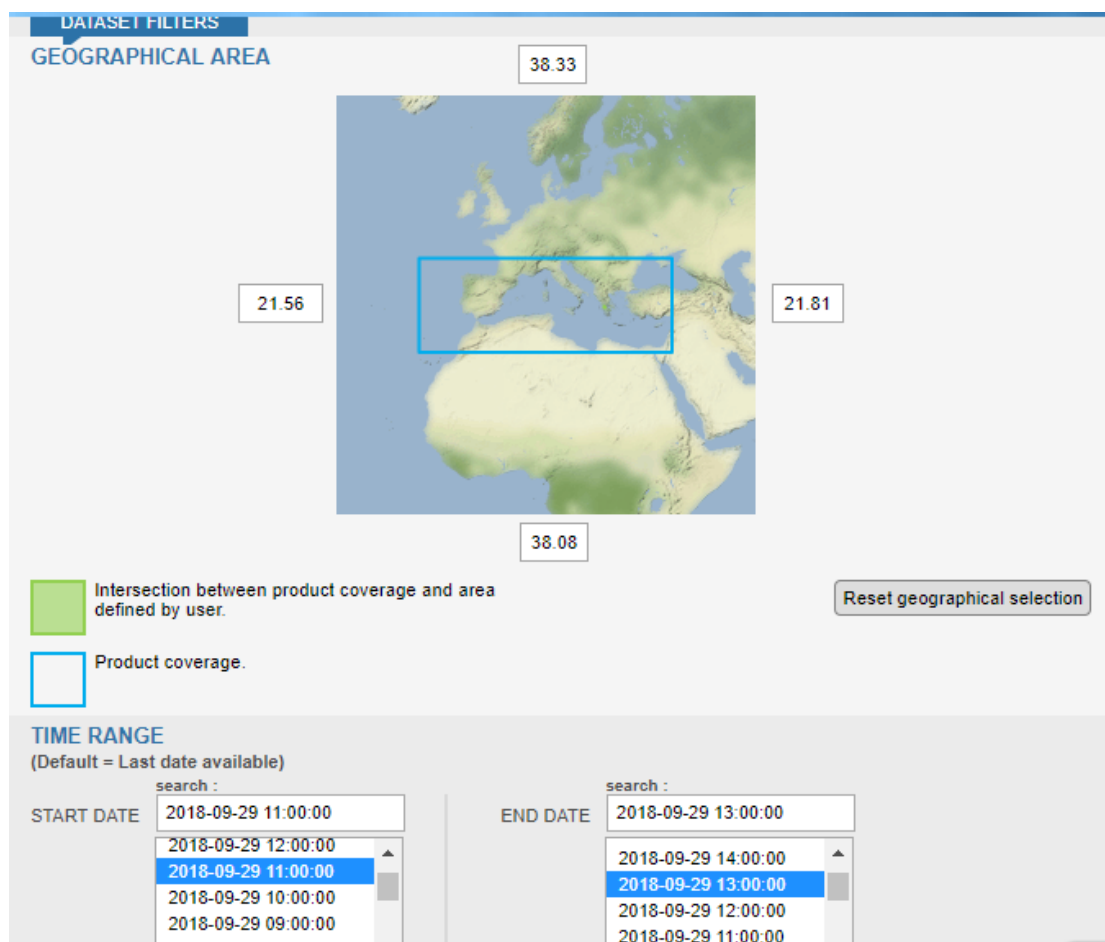
1. Περιορισμός της γεωγραφικής περιοχής πέριξ του λιμένα εντός προκαθορισμένων συντεταγμένων (φ,λ)
2. Καθορισμός της συνολικής χρονικής διάρκειας που θα απαιτούνται δεδομένα πρόβλεψης
3. Επιλογή των κατάλληλων μεταβλητών το πακέτο δεδομένων
4. Λήψη των αρχείων με τις άνω πληροφορίες σε μορφή netcdf (τοποθέτηση μιας ωκεανογραφικής μεταβλητής σε κάθε αρχείο)

Για την περιοχή του Νέου Λιμένα Πατρών επιλέχθηκαν τιμές εντός του συγκεκριμένου πλαισίου:

$(\varphi, \lambda) = (21.56, 38.08) \div (21.81, 38.33)$

Το χρονικό διάστημα για το οποίο γίνεται η λήψη των δεδομένων είναι από τις 29/09/2018 11:00 – 29/09/2018 13:00.

Στην Εικόνα 4.5 δίνεται ο τρόπος ορισμού των γεωγραφικών και χρονικών περιορισμών στο διαδραστικό ιστότοπο του CMEMS



Εικόνα 4.5: Διαδραστική διαδικασία λήψης δεδομένων από τη βάση CMEMS για την περιοχή μελέτης

Για να είναι δυνατή η επεξεργασία των κυματικών χαρακτηριστικών για τη δημιουργία των κατάλληλων αρχείων εισόδου στα αριθμητικά μοντέλα, είναι υποχρεωτικό να γίνεται λήψη μιας μεταβλητής ανά αρχείο netcdf.

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία καθορισμού των οριακών συνθηκών των μοντέλων, και την προετοιμασία για τη μετατροπή των αρχείων netcdf σε κατάλληλη μορφή (ascii) που θα είναι εκμεταλλεύσιμη από τα μοντέλα TOMAWAC και MIKE21 SW.

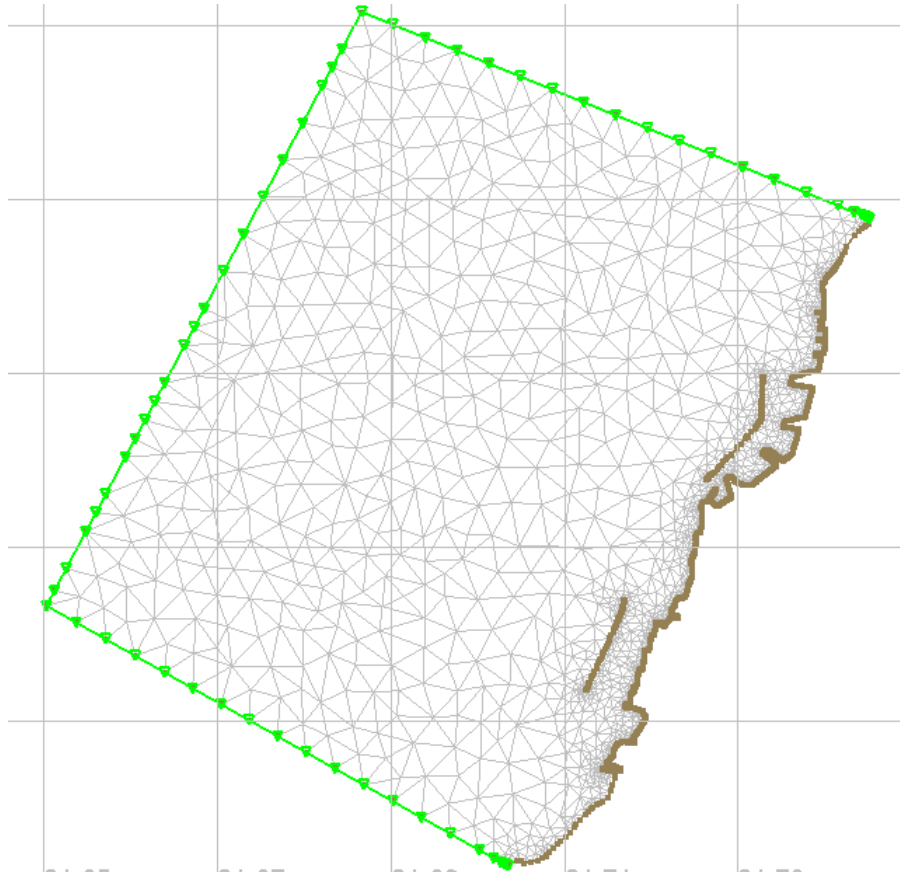
4.2.3 Κατασκευή οριακών συνθηκών των φασματικών μοντέλων και μετατροπή των ωκεανογραφικών παραμέτρων σε κατάλληλη μορφή

Αφού ολοκληρωθεί η κατασκευή του καννάβου προσομοίωσης στο MIKE Zero, το επόμενο βήμα είναι η κατασκευή των απαραίτητων αρχείων εισόδου (αρχείο γεωμετρίας και αρχείο οριακών συνθηκών) για το μοντέλο TOMAWAC.

Η προετοιμασία των προαναφερθέντων αρχείων γίνεται στο λογισμικό ανοιχτού κώδικα Blue Kenue, που έχει αναπτυχθεί από το National Research Center of Canada (NRCC). Το πλεονέκτημα αυτού του λογισμικού, πέρα από την ελευθερία στην προσβασιμότητά του, είναι ότι επιτρέπει την εισαγωγή καννάβων από άλλα εμπορικά λογισμικά (MIKE, SMS κ.α.). Εξασφαλίζεται έτσι ότι εξαλείφονται οι όποιες αβεβαιότητες σχετίζονται με τη γεωμετρία, στις προσομοιώσεις των εναλλακτικών μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν ως μοντέλο Α.

Το αρχείο γεωμετρίας (επέκτασης .slf) είναι ένα δυαδικό αρχείο το οποίο ουσιαστικά περιέχει τον κάνναβο της βυθομετρίας. Απαραίτητη προϋπόθεση για να εκτελεστούν οι υπολογισμοί στο μοντέλο TOMAWAC είναι ο κάνναβος της βυθομετρίας να μετονομαστεί ως BOTTOM ή FOND.

Το αρχείο οριακών συνθηκών κατασκευάζεται επίσης στο λογισμικό Blue Kenue. Σημειώνεται ότι χωρίς τροποποιήσεις στο μοντέλο TOMAWAC το ύψος κύματος στο ανοιχτό όριο της περιοχής μελέτης θεωρείται σταθερό χρονικά και χωρικά. Οι διαφορετικές οριακές συνθήκες στο μοντέλο TOMAWAC παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.6.



Εικόνα 4.6: Οριακές συνθήκες στο μοντέλο TOMAWAC - με πράσινο σημειώνεται το ανοιχτό όριο της περιοχής μελέτης ενώ με καφέ τα στερεά όρια

Ο τρόπος για να καθοριστούν οριακές συνθήκες χωρικά μεταβλητού ύψους κύματος είναι η τροποποίηση της υπορουτίνας `limwac.f`. Η τροποποιημένη υπορουτίνα παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α. Σε εξωτερικό αρχείο δίνεται σε κάθε κόμβο του ανοιχτού ορίου, διαβάζονται οι τιμές του ύψους κύματος, συχνότητας αιχμής και διεύθυνσης διάδοσης των κυματισμών. Στη συνέχεια η υπορουτίνα `limwac.f` καλεί την `Specjon.f` που αρχικοποιεί το φάσμα σε κάθε κόμβο του ανοιχτού ορίου, και τελικώς αναθέτει σε αυτές τις θέσεις τη διακύμανση της φασματικής πυκνότητας δράσης (FBOR).

Η επεξεργασία των δεδομένων που προέρχονται από τη βάση δεδομένων CMEMS, και τελικώς η μετατροπή τους σε κατάλληλη μορφή γίνεται μέσω του ελεύθερου λογισμικού συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών QGIS.

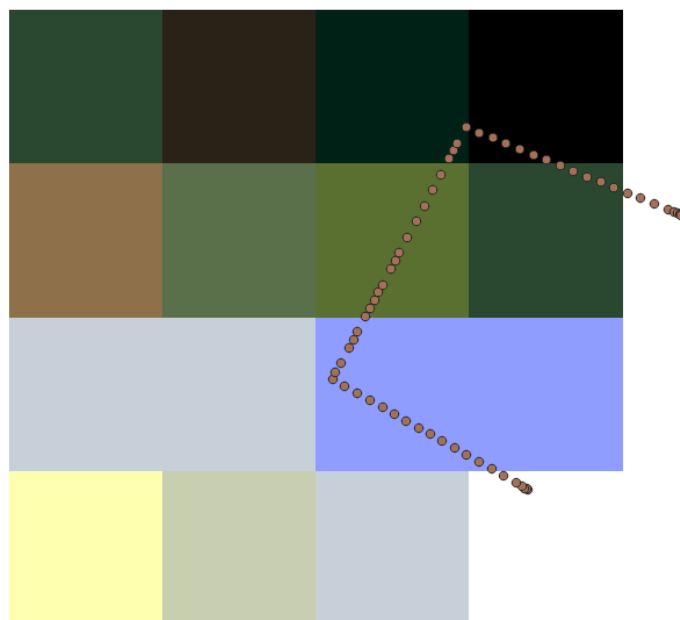
Η πορεία που ακολουθείται για την επεξεργασία του κάθε αρχείου ωκεανογραφικών μεταβλητών είναι η εξής:

- Στο QGIS εισάγεται ένα αρχείο `netcdf (.nc)` για κάθε ωκεανογραφική μεταβλητή με τη μορφή εικονιστικού επιπέδου (Raster)
- Στη συνέχεια εισάγονται σαν επίπεδο από οριοθετημένο κείμενο, οι συντεταγμένες των κόμβων του ανοιχτού ορίου της περιοχής μελέτης
- Με χρήση μιας επέκτασης (Point Sampling Tool), γίνεται δειγματοληψία στις θέσεις (x,y) του ανοιχτού ορίου της περιοχής μελέτης των τιμών της

ωκεανογραφικής μεταβλητής ενδιαφέροντος (π.χ. χαρακτηριστικό ύψος κύματος)

- Οι τιμές για κάθε χρονική στιγμή αποθηκεύονται με τη μορφή εγγράφου κειμένου .csv (comma separated values)

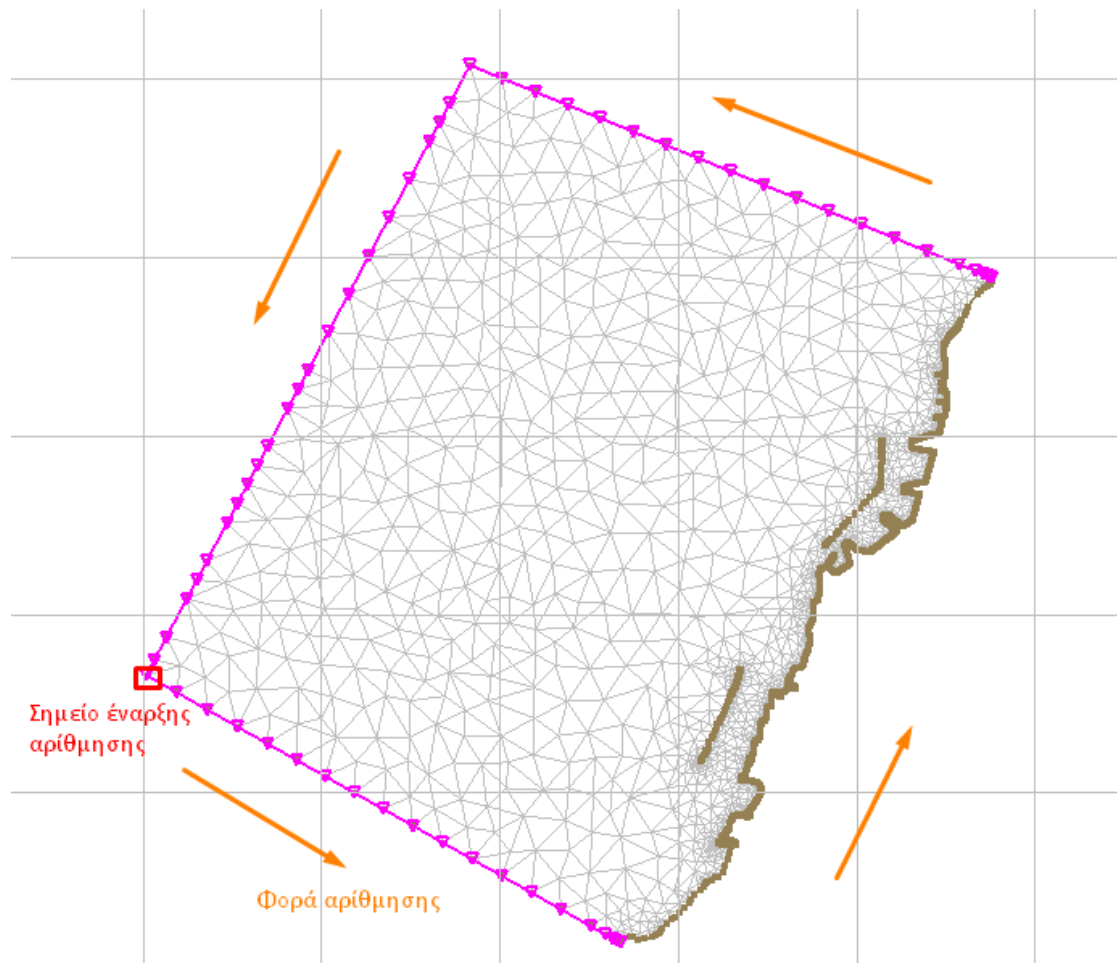
Στην παρακάτω Εικόνα παρουσιάζονται τα δύο επίπεδα που προαναφέρθηκαν στο περιβάλλον QGIS.



Εικόνα 4.7: Εικονιστικό επίπεδο με το πλέγμα τιμών της μεταβλητής χαρακτηριστικό ύψος κύματος από CMEMS, και επίπεδο με τους κόμβους του ανοιχτού ορίου του υπολογιστικού πλέγματος

Αφού γίνει η αποθήκευση των δεδομένων στα κατάλληλα αρχεία .csv για τις μεταβλητές: 1) χαρακτηριστικό ύψος κύματος, 2) περίοδο αιχμής του φάσματος, 3) μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών (από), στη συνέχεια γίνονται οι κατάλληλες τροποποιήσεις των μεταβλητών σε α) Χαρακτηριστικό ύψος κύματος β) Συχνότητα αιχμής του φάσματος γ) διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών (προς), που απαιτούνται σαν μεταβλητές εισόδου από το μοντέλο TOMAWAC.

Κάθε κόμβος του ανοιχτού ορίου λαμβάνει την τιμή της μεταβλητής που του αναλογεί, αντιστοιχίζοντας τις συντεταγμένες (x,y) του κάθε κόμβου με τον αριθμό που λαμβάνει ο κάθε κόμβος στο τοπικό σύστημα αρίθμησης των οριακών συνθηκών. Ο τρόπος αρίθμησης στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.8



Εικόνα 4.8: Αρίθμηση οριακών κόμβων στο τοπικό σύστημα

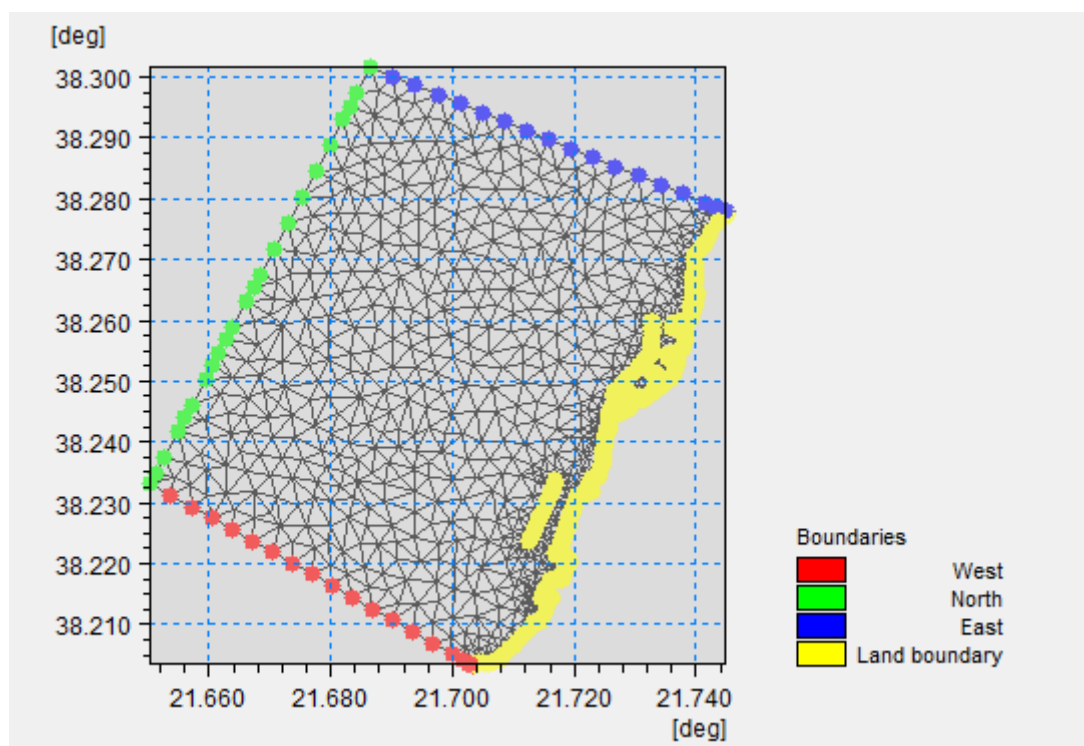
Στη συνέχεια κατασκευάζεται το αρχείο “wav1.txt” το οποίο περιέχει για την πρώτη ώρα της προσομοίωσης τα κυματικά χαρακτηριστικά σε κάθε κόμβο οριακής συνθήκης, με την εξής σειρά:

- Στην πρώτη στήλη αναγράφεται το ύψος κύματος σε κάθε κόμβο του ορίου
- Στη δεύτερη στήλη αναγράφεται η περίοδος αιχμής σε κάθε κόμβο του ορίου
- Στην τρίτη στήλη αναγράφεται η παράμετρος γ του φάσματος Jonswap
- Στην τέταρτη στήλη αναγράφεται η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών (προς) σε κάθε κόμβο του ανοιχτού ορίου
- Στην πέμπτη στήλη αναγράφεται η αδιάστατη παράμετρος του φάσματος (directional spreading)
- Στην έκτη στήλη αναγράφεται ο αριθμός αναγνώρισης του κόμβου στο καθολικό σύστημα αρίθμησης (node number)
- Στην έβδομη στήλη αναγράφεται ο αριθμός αναγνώρισης του κόμβου στο τοπικό σύστημα αρίθμησης (local boundary number)

Για κάθε ώρα προσομοίωσης κατασκευάζεται ένα νέο αρχείο “wav.txt” που περιέχει τα κυματικά χαρακτηριστικά ανά μία ώρα, συμπεριλαμβάνοντας τα πρωτογενή δεδομένα από τη βάση CMEMS. Μέρος του αρχείου που περιγράφηκε παραπάνω παρουσιάζεται και στο Παράρτημα Α.

Σε αυτό το σημείο θα περιγραφεί ο τρόπος κατασκευής των αντίστοιχων οριακών συνθηκών στο μοντέλο MIKE21 SW. Λόγω της φύσης του λογισμικού και του φιλικού προς το χρήστη γραφικού του περιβάλλοντος, δεν απαιτείται η τροποποίηση πηγαίου κώδικα και τα αρχεία οριακών συνθηκών κατασκευάζονται εξωτερικά.

Το ανοιχτό όριο της περιοχής μελέτης χωρίζεται σε 3 υποπεριοχές, που ονοματίζονται σύμφωνα με το γεωγραφικό προσανατολισμό τους, στην περίπτωση που ένας παρατηρητής στεκόταν στην άκρη των κρηπιδωμάτων και κοιτούσε προς τα ανοιχτά, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9



Εικόνα 4.9: Κωδική ονομασία των ανοιχτών ορίων της περιοχής μελέτης στο λογισμικό MIKE21 SW

Οι οριακές συνθήκες στο μοντέλο κατασκευάζονται για κάθε ένα από τα διακριτά ανοιχτά όρια της περιοχής μελέτης, σαν αρχεία κυματικών χαρακτηριστικών μεταβλητά στο χώρο και στο χρόνο.

Τα αρχεία αυτά έχουν την κατάληξη .dfs1 (Παράρτημα) και κατασκευάζονται με την ακόλουθη λογική:

- Ορίζονται οι συντεταγμένες ενός σημείου εκκίνησης, το οποίο συμπίπτει με τον κατώτερο κόμβο του ορίου
- Ορίζεται ένα σταθερό χωρικό βήμα στο οποίο θα τεθούν οι τιμές των κυματικών χαρακτηριστικών. Δεν δίνεται σε αυτό το μοντέλο δυνατότητα σαφούς ορισμού των κυματικών χαρακτηριστικών σε κάθε κόμβο του διακριτού ορίου, παρά μόνο προσεγγιστικά
- Κατασκευάζεται η χρονοσειρά που μεταβάλλεται στο χώρο και στο χρόνο με διάρκεια τη συνολική διάρκεια προσομοίωσης

Σημειώνεται ότι στο παραπάνω αρχείο πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των διαθέσιμων τιμών, τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο.

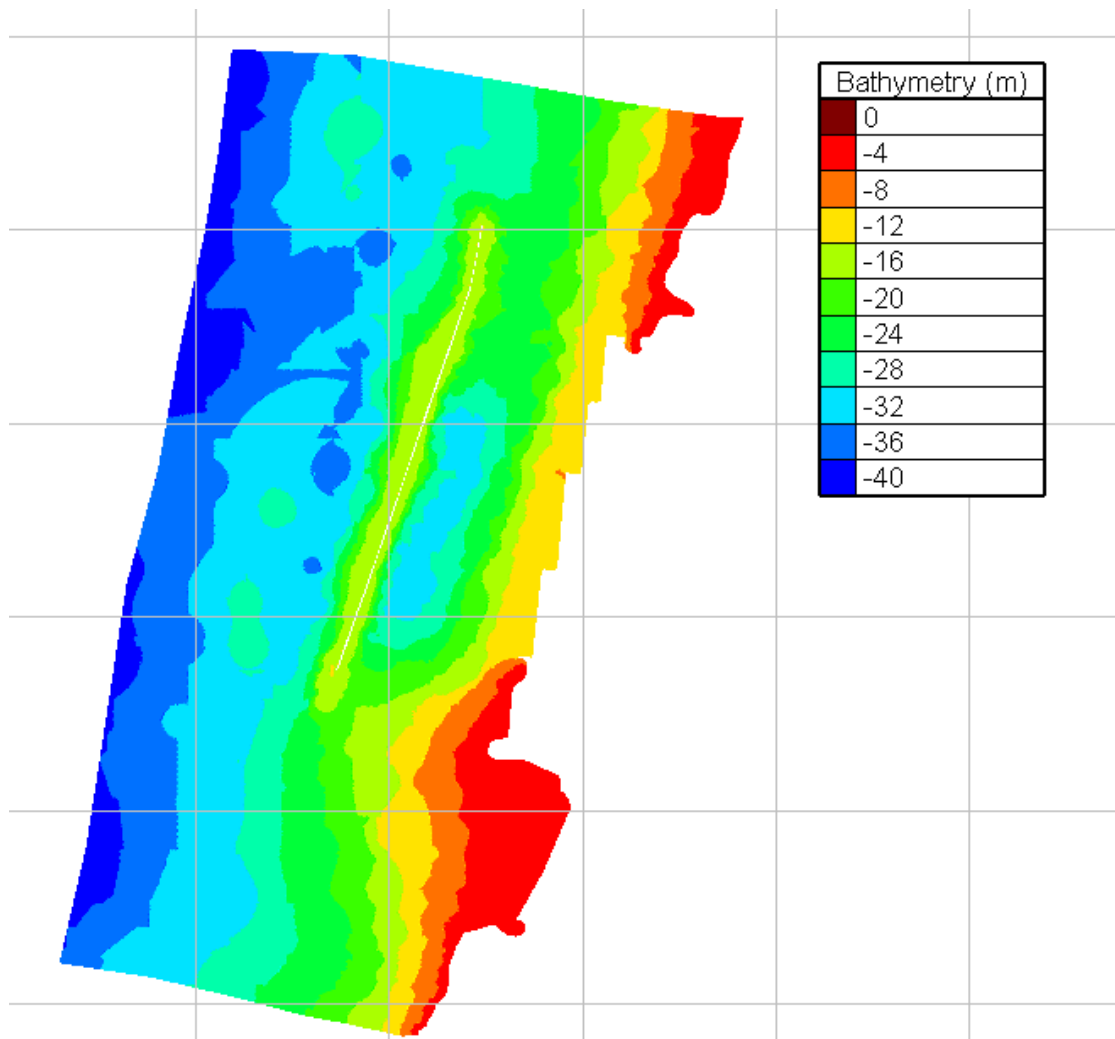
4.2.4 Κατασκευή βυθομετρίας και οριακών συνθηκών στο μοντέλο ARTEMIS

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, το μοντέλο ARTEMIS πραγματοποιεί τις προσομοιώσεις του σε μη δομημένο πλέγμα, βασιζόμενο στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Το πεδίο υπολογισμού του είναι σημαντικά μικρότερο από αυτό του TOMAWAC και MIKE21 SW, καθώς το μοντέλο είναι εστιασμένο για εφαρμογή σε λιμένες. Στην παρούσα μεταπτυχιακή το μοντέλο εκτελεί τους υπολογισμούς σε μια περιοχή περίπου 7 km² που περιλαμβάνει το Νέο Λιμένα Πατρών.

Τα αρχεία εισόδου του μοντέλου (αρχείο γεωμετρίας και αρχείο οριακών συνθηκών) κατασκευάζονται στο λογισμικό Blue Kenue.

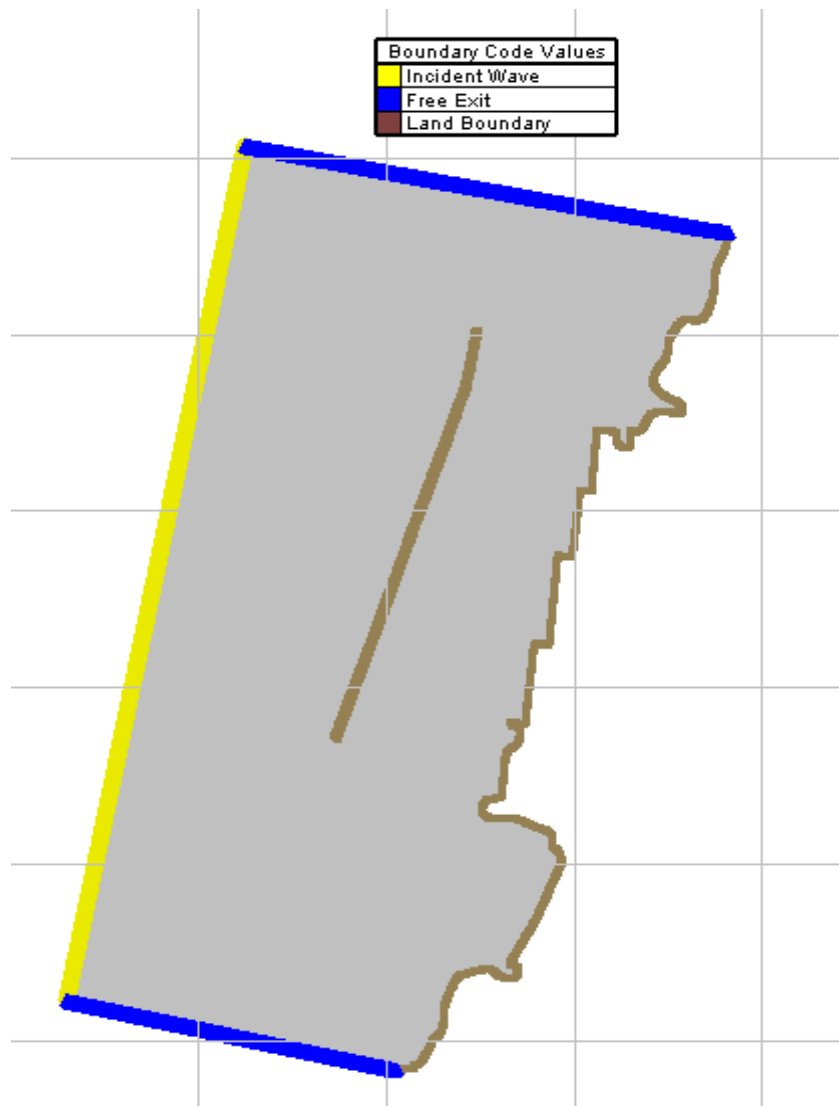
Ο κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων (Εικόνα 4.10) αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία μέσης επιφάνειας 5.42 m² και μέσου χαρακτηριστικού μήκους 3.5 m. Είναι φανερό από τις χαρακτηριστικές διαστάσεις των σημείων ότι ο κάρναβος αυτός είναι σημαντικά πιο πυκνός από τους αντίστοιχους που χρησιμοποιούνται στα φασματικά κυματικά μοντέλα.

Σημειώνεται ότι το μοντέλο ARTEMIS μπορεί να πραγματοποιήσει υπολογισμούς μόνο σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, για το λόγο αυτό, γίνεται μέσω του λογισμικού Blue Kenue η μετατροπή των συντεταγμένων από γεωγραφικό σύστημα σε καρτεσιανό (UTM).



Εικόνα 4.10: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων και βυθομετρία στο μοντέλο ARTEMIS

Το αρχείο οριακών συνθηκών κατασκευάζεται με την ίδια λογική που κατασκευάζεται το αντίστοιχο αρχείο για το μοντέλο TOMAWAC, μόνο που σαν ανοιχτό όριο της περιοχής μελέτης ορίζεται αυτό που βρίσκεται σχεδόν παράλληλα με τον κυματοθραύστη. Τα κάθετα όρια στο ανοιχτό, ορίζονται σαν όρια ελεύθερης εξόδου κυματισμών, ενώ ο κυματοθραύστης και η ακτή ορίζονται σαν στερεά όρια.



Εικόνα 4.11: Σχηματική περιγραφή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο ARTEMIS

Σαν οριακές συνθήκες του μοντέλου θα χρησιμοποιηθούν αποτελέσματα του μοντέλου TOMAWAC για το ύψος κύματος, την περίοδο αιχμής και τη μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται στο τέλος της προσομοίωσης του TOMAWAC, κατά μήκος γραμμής που συμπίπτει με το όριο κυματογένεσης, και τοποθετούνται στο αρχείο οριακών συνθηκών ακολουθώντας τους εξής κανόνες:

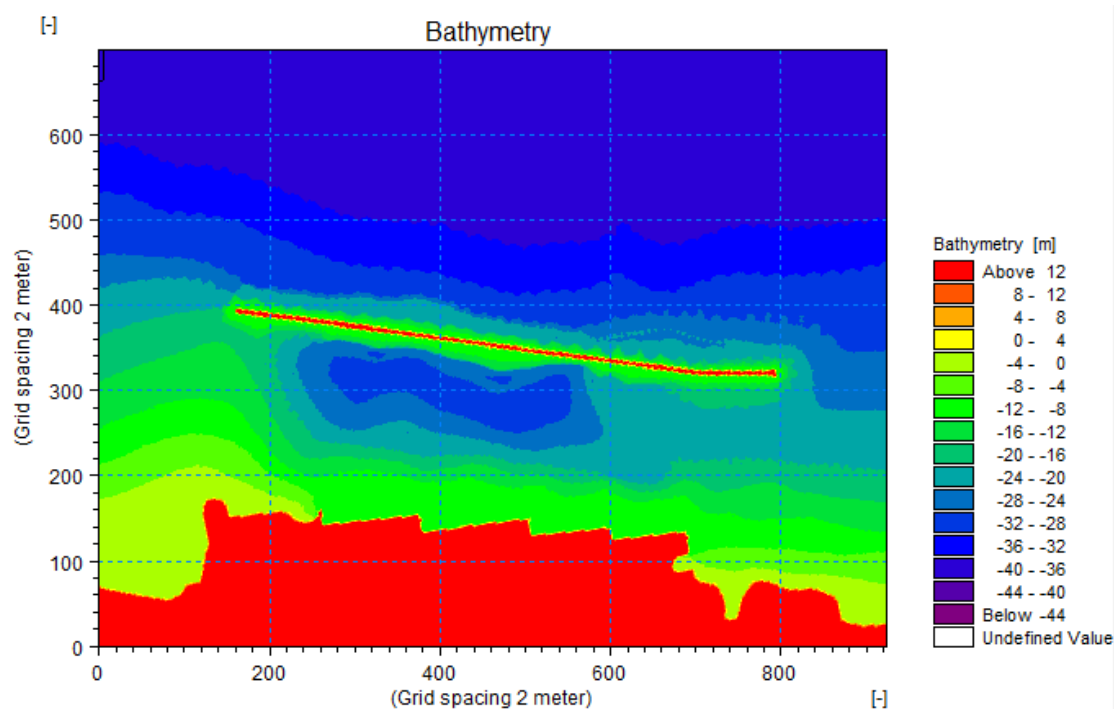
- Στην τέταρτη στήλη του αρχείου σημειώνεται το χαρακτηριστικό ύψος των κυματισμών
- Στην πέμπτη στήλη του αρχείου σημειώνεται η γωνία εξόδου των κυματισμών θ_p
- Στην έκτη στήλη του αρχείου τοποθετείται η γωνία φάσης των κυματισμών (α_p)
- Στην έβδομη στήλη του αρχείου τοποθετείται ο συντελεστής ανάκλασης των στερεών ορίων (θεωρήθηκε $R_p = 1$, δηλαδή ολική ανάκλαση στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής)

4.2.5 Κατασκευή βυθομετρίας και οριακών συνθηκών στο μοντέλο WAVE-L

Το μοντέλο WAVE-L, είναι το μοναδικό από τα μοντέλα που εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής που εκτελεί τους υπολογισμούς του σε ορθογωνικό κάρναβο.

Ο κάρναβος κατασκευάζεται στο λογισμικό MIKE ZERO, χρησιμοποιώντας δεδομένα βαθών από NAVIONICS και την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού.

Στην παρούσα έκδοση του μοντέλου είναι απαιτούμενο οι υπολογισμοί να εκτελούνται σε καρτεσιανές συντεταγμένες και η κυματογεννήτρια να τοποθετείται κατά το δυνατόν κάθετα στο γεωγραφικό Βορρά. Απαιτείται λοιπόν η κατάλληλη περιστροφή του κάρναβου όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.12. Επιλέχθηκε χωρικό βήμα $dx = dy = 2$ m, και διαστάσεις $N_x \times N_y = 900 \times 700$ κελιά.



Εικόνα 4.12: Στραμμένος κάρναβος και βαθυμετρία υπολογιστικού πεδίου στο μοντέλο WAVE-L

Όπως προαναφέρθηκε, η γένεση των κυματισμών πραγματοποιείται σε απόσταση 20 κελιών από το Βόρειο όριο του κάρναβου. Οι οριακές συνθήκες περιγράφονται με την εντολή DATA, στον κώδικα του προγράμματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο μοντέλο WAVE - L ορίζεται ενιαία κατανομή του κυματισμού στο όριο, δεν υπάρχει δηλαδή η δυνατότητα χωρικής μεταβολής των κυματικών χαρακτηριστικών όπως στο μοντέλο ARTEMIS.

4.3 Καθορισμός των παραμέτρων προσομοίωσης

Στην παρούσα ενότητα θα περιγραφεί η διαδικασία καθορισμού των παραμέτρων προσομοίωσης που ακολουθείται σε κάθε μοντέλο.

Επιλέχθηκε οι προσομοιώσεις να εκτελεστούν για τρεις (3) ώρες για τη διάδοση των κυματισμών στο μοντέλο A, ενώ τα εναλλακτικά μοντέλα B εκτελούνται μετά το πέρας του τρίωρου και μέχρι να επέλθουν σταθερές κυματικές συνθήκες (steady state).

Πρέπει να σημειωθεί ότι σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής δεν είναι η κατά τη μεγαλύτερη λεπτομέρεια περιγραφή των κυματικών χαρακτηριστικών στο δίαυλο ναυσιπλοΐας του Νέου Λιμένα Πατρών. Για να εκτιμηθεί άλλωστε ποιο μοντέλο δίνει αποτελέσματα που ανταποκρίνονται περισσότερο στην πραγματικότητα απαιτούνται μετρήσεις των κυματικών χαρακτηριστικών σε πλωτήρες (buoys). Οπότε ο καθορισμός των παραμέτρων προσομοίωσης σε κάθε μοντέλο, (ειδικά σε αυτά που χρησιμοποιούνται σαν μοντέλο A), εστιάζει κυρίως στην χρήση των ίδιων όρων πηγής και φυσικών διεργασιών μεταξύ των δύο εναλλακτικών μοντέλων.

4.3.1 Κατασκευή του αρχείου προσομοίωσης του μοντέλου TOMAWAC

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 3.1.3 της παρούσας μεταπτυχιακής, ο καθορισμός των παραμέτρων εισόδου γίνεται με την χρήση κατάλληλων λέξεων κλειδιών που τοποθετούνται στο αρχείο οδήγησης.

Δεν κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναλυτική περιγραφή της κάθε λέξης κλειδί και σε τί καθεμία από αυτές αναφέρεται, γι' αυτό το λόγο στο Παράρτημα A παρουσιάζεται το αρχείο οδήγησης (tom_patra_1.cas) που αναφέρεται στην πρώτη ώρα προσομοίωσης.

Η εκτέλεση του TOMAWAC θα γίνει τμηματικά, δηλαδή θα γίνεται εκτέλεση της προσομοίωσης για μια ώρα, και στο πέρας αυτής, το στιγμιότυπο του φάσματος πυκνότητας δράσης θα χρησιμοποιείται σαν αρχική συνθήκη στη δεύτερη ώρα προσομοίωσης (hotstart) κ.ο.κ. Ο λόγος που γίνεται ο διαχωρισμός της προσομοίωσης σε τρία μέρη είναι για να υπάρξει απεμπλοκή από το χρόνο ως μεταβλητή στις οριακές συνθήκες, λόγω της χρονικής ανάλυσης των ωκεανογραφικών δεδομένων από τη βάση CMEMS, που μεταβάλλονται ανά διαστήματα μιας ώρας. Αποφεύγονται έτσι μακροσκελή αρχεία που θα περιέχουν τα χαρακτηριστικά των κυματισμών για κάθε χρονικό βήμα, σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πλέγματος.

Οι φυσικές διεργασίες που προσομοιώθηκαν με το TOMAWAC παρουσιάζονται με τη μορφή Πίνακα στη συνέχεια:

Πίνακας 4.2: Φυσικές διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη στο μοντέλο TOMAWAC

Μοντέλο A : TOMAWAC		
Φυσικές διεργασίες	Λαμβάνεται υπόψη	Παραμετροποίηση
Γένεση κυματισμών λόγω ανέμου	OXI	-
Τριβή πυθμένα	NAI	WAM Cycle 4
Θραύση κυματισμών στα αβαθή	NAI	Battjes & Jansen (1978)
Μη-γραμμικές αλληλεπιδράσεις τετράδων	NAI	DIA method
Μη-γραμμικές αλληλεπιδράσεις τριάδων	OXI	-
Θραύση λόγω κλίσης κυματισμών στα βαθιά	OXI	-

Χρησιμοποιήθηκαν 25 συχνότητες και 24 διευθύνσεις για τη διακριτοποίηση του φάσματος πυκνότητας-δράσης, ενώ το χρονικό βήμα της προσομοίωσης ορίστηκε σε 10 sec.

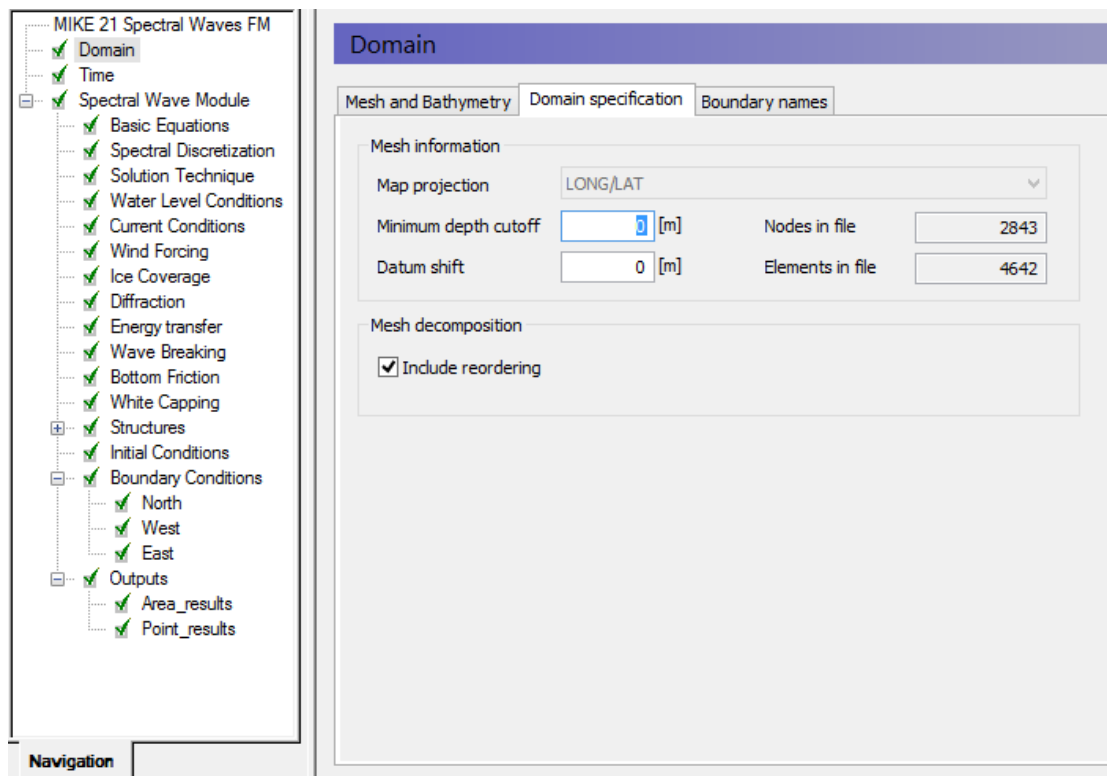
Στο δισδιάστατο αρχείο των αποτελεσμάτων εκτυπώνονται οι ακόλουθες ποσότητες του φάσματος των κυματισμών, σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού πεδίου:

- Χαρακτηριστικό ύψος κύματος (HM0)
- Μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών (DMOY)
- Περίοδος αιχμής του φάσματος (TPR5)
- Βάθος νερού (WD)

4.3.2 Κατασκευή του αρχείου προσομοίωσης του μοντέλου MIKE21 SW

Η κατασκευή του αρχείου που περιέχει τις παραμέτρους προσομοίωσης του μοντέλου MIKE21 SW γίνεται σε γραφικό περιβάλλον, που διευκολύνει σημαντικά τη διαδικασία επιλογής και καθορισμού των κατάλληλων παραμέτρων.

Στην Εικόνα 4.3 παρουσιάζεται το παράθυρο στο οποίο καθορίζονται οι παράμετροι και τελικώς εκτελείται η προσομοίωση



Εικόνα 4.13: Παράθυρο καθορισμού των παραμέτρων προσομοίωσης στο λογισμικό MIKE21 SW

Κάθε καρτέλα που διακρίνεται στην Εικόνα 4.13 αναφέρεται στον καθορισμό των παραμέτρων που δηλώνει το όνομά της. Ενδεικτικά θα περιγραφούν συνοπτικά οι σημαντικότερες από αυτές:

- Στην καρτέλα Domain καθορίζεται το υπολογιστικό πεδίο της περιοχής μελέτης
- Στην καρτέλα Time καθορίζεται η συνολική διάρκεια και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης
- Στην καρτέλα Basic Equations καθορίζεται αν θα χρησιμοποιηθεί η πλήρως φασματική ή η φασματική μόνο ως προς τις συχνότητες μέθοδος, καθώς και αν θα επιλεγεί η μη σταθερή (Instationary) ή η σχεδόν σταθερή (Quasi Stationary) μέθοδος επίλυσης
- Στην καρτέλα Spectral Discretization καθορίζονται οι παράμετροι για τη διακριτοποίηση του φάσματος
- Στις καρτέλες Water Level Conditions, Current Conditions, Wind Forcing, Ice Coverage, Diffraction, Energy Transfer, Wave Breaking, Bottom Friction, White Capping, Structures, καθορίζεται αν θα ληφθούν υπόψη τα παραπάνω φαινόμενα στους υπολογισμούς
- Στην καρτέλα Initial Conditions καθορίζονται οι αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης
- Στην καρτέλα Boundary Conditions καθορίζονται οι οριακές συνθήκες του μοντέλου, εδώ επίσης επιλέγονται τα αρχεία κυματικών χαρακτηριστικών που περιγράφηκαν στην ενότητα 4.2.3
- Στην καρτέλα Outputs καθορίζονται η μορφή του αρχείου αποτελεσμάτων (δισδιάστατη επιφάνεια, σημειακά, κατά μήκος γραμμής) καθώς οι παράμετροι που θα εκτυπωθούν από το μοντέλο

Η προσομοίωση για το Νέο Λιμένα Πατρών με το μοντέλο MIKE21 SW εκτελέστηκε με δύο θεωρήσεις:

- Με τη συνολική εκτέλεση της προσομοίωσης των τριών ωρών, δίχως να ληφθούν υπόψη αρχικές συνθήκες (cold start), με τη θεώρηση οριακών συνθηκών μεταβλητών σε χώρο και χρόνο
- Με το διαχωρισμό των προσομοιώσεων σε τρία τμήματα διάρκειας μιας ώρας και τη χρησιμοποίηση αρχικών συνθηκών, όπως ακριβώς έγινε και στο μοντέλο TOMAWAC (hotstart)

Ο λόγος που το μοντέλο αυτό εκτελέστηκε σε συνθήκες coldstart και hotstart είναι για να διαπιστωθεί εάν υπάρχει κάποια επίδραση στα αποτελέσματα ανάλογα με τη μέθοδο που θα επιλεγεί.

Επιλέχθηκε ο πλήρως φασματικός τρόπος επίλυσης για μη σταθερούς κυματισμούς, με χρονικό βήμα επίλυσης 10 sec. Η διακριτοποίηση του φάσματος ήταν ταυτόσημη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο TOMAWAC για την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στην παραμετροποίηση του.

Οι διεργασίες που προσομοιώθηκαν με το μοντέλο MIKE21 SW παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα. Έμφαση δόθηκε στο να μοντελοποιηθούν οι ίδιες διεργασίες που ελήφθησαν υπόψη και στην προσομοίωση του TOMAWAC.

Πίνακας 4.3: Φυσικές διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη στο μοντέλο MIKE21 SW

Μοντέλο Α : MIKE21 SW		
Φυσικές διεργασίες	Λαμβάνεται υπόψη	Παραμετροποίηση
Γένεση κυματισμών λόγω ανέμου	OXI	-
Τριβή πυθμένα	NAI	WAM Cycle 4
Θραύση κυματισμών στα αβαθή	NAI	Specified gamma $\gamma = 0.78$
Μη-γραμμικές αλληλεπιδράσεις τετράδων	NAI	DIA method
Μη-γραμμικές αλληλεπιδράσεις τριάδων	OXI	-
Θραύση λόγω κλίσης κυματισμών στα βαθιά	OXI	-

Οι μεταβλητές που θα αποθηκεύονται και θα εκτυπωθούν μετά το πέρας της προσομοίωσης θα είναι:

- Χαρακτηριστικό ύψος κύματος (H_{m0})
- Περίοδος αιχμής του φάσματος (T_p)
- Μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών (MWD)

4.3.3 Κατασκευή του αρχείου προσομοίωσης του μοντέλου ARTEMIS

Καθώς το ARTEMIS ανήκει στην ίδια πλατφόρμα λογισμικών με το μοντέλο TOMAWAC, επόμενο είναι η λειτουργία του να βασίζεται στις ίδιες αρχές, επομένως απαιτείται η κατασκευή του αρχείου οδήγησης της προσομοίωσης.

Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα διάδοσης κυματισμών:

- Μονοχρωματικών
- Σύνθετων μονοκατευθυντικών
- Σύνθετων πολυκατευθυντικών

Για τις ανάγκες της παρούσας μεταπτυχιακής εκτελέστηκαν προσομοιώσεις και για τις ανωτέρω τρεις περιπτώσεις κυματισμών. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτό, είναι για να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τις διαφορετικές θεωρήσεις, ειδικά για το φαινόμενο της ανάκλασης, κυρίως λόγω της παρουσίας του κυματοθραύστη.

Το αρχείο προσομοίωσης του ARTEMIS παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α. Σημειώνεται ότι εφόσον απαιτείται λύση σταθερών συνθηκών (steady state), και επιλύονται οι ελλειπτικές εξισώσεις ήπιας κλίσης, ο χρήστης δεν επιλέγει χρονικό βήμα, αλλά αυτό καθορίζεται από το μοντέλο.

Στον επόμενο Πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη στην προσομοίωση με το μοντέλο ARTEMIS

Πίνακας 4.4: Διεργασίες που λήφθηκαν υπόψη στο μοντέλο ARTEMIS

Μοντέλο Β : ARTEMIS		
Διεργασίες	Λαμβάνεται υπόψη	Παραμετροποίηση
Μονοχρωματικοί κυματισμοί	ΝΑΙ	-
Σύνθετοι κυματισμοί	ΝΑΙ	-
Τριβή πυθμένα	ΟΧΙ	-
Θραύση κυματισμών στα αβαθή	ΝΑΙ	Battjes & Jansen (1978)
Period Scanning (Για μελέτη συντονισμού)	ΟΧΙ	-

Τα αποτελέσματα του μοντέλου εκτυπώνονται σε δισδιάστατο αρχείο στο οποίο περιέχονται οι εξής μεταβλητές:

- Χαρακτηριστικό ύψος κύματος – είτε μονοχρωματικών είτε σύνθετων κυματισμών (HS)
- Φάση των κυματισμών (PHAS)
- Ανύψωση πυθμένα (ZF)

- Ανύψωση στάθμης ελεύθερης επιφάνειας – διαθέσιμη μόνο σε μονοχρωματικούς κυματισμούς – (ZS)
- Ταχύτητα φάσης των κυματισμών (C)
- Ταχύτητα ομάδας των κυματισμών (CG)
- Ποσοστό θραυόμενων κυμάτων (QB)

4.3.4 Καθορισμός των παραμέτρων προσομοίωσης του μοντέλου WAVE-L

Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του εισερχόμενου κυματισμού στο μοντέλο WAVE – L, όπως ακριβώς και στο ARTEMIS, απαιτείται πρώτα η ολοκλήρωση των προσομοιώσεων των εναλλακτικών μοντέλων A.

Επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν αποτελέσματα από το TOMAWAC στο πέρας της τρίτης ώρας προσομοίωσης στη θέση με συντεταγμένες:

$x = 21.708^\circ$ (σε γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων) = 561965.39 m (σε σύστημα συντεταγμένων UTM)

$y = 38.231^\circ$ (σε γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων) = 4231682.38 m (σε σύστημα συντεταγμένων UTM)

Το παραπάνω σημείο ανήκει στην ευθεία που ορίζει την κυματογεννήτρια του μοντέλου WAVE – L.

Λαμβάνοντας τις τιμές για το ύψος, περίοδο και μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών από τα αποτελέσματα του TOMAWAC, καθορίζουμε με την εντολή DATA τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου κυματισμού στο μοντέλο WAVE – L. Ο κώδικας υπολογισμού του μοντέλου παρουσιάζεται στο Παράρτημα A.

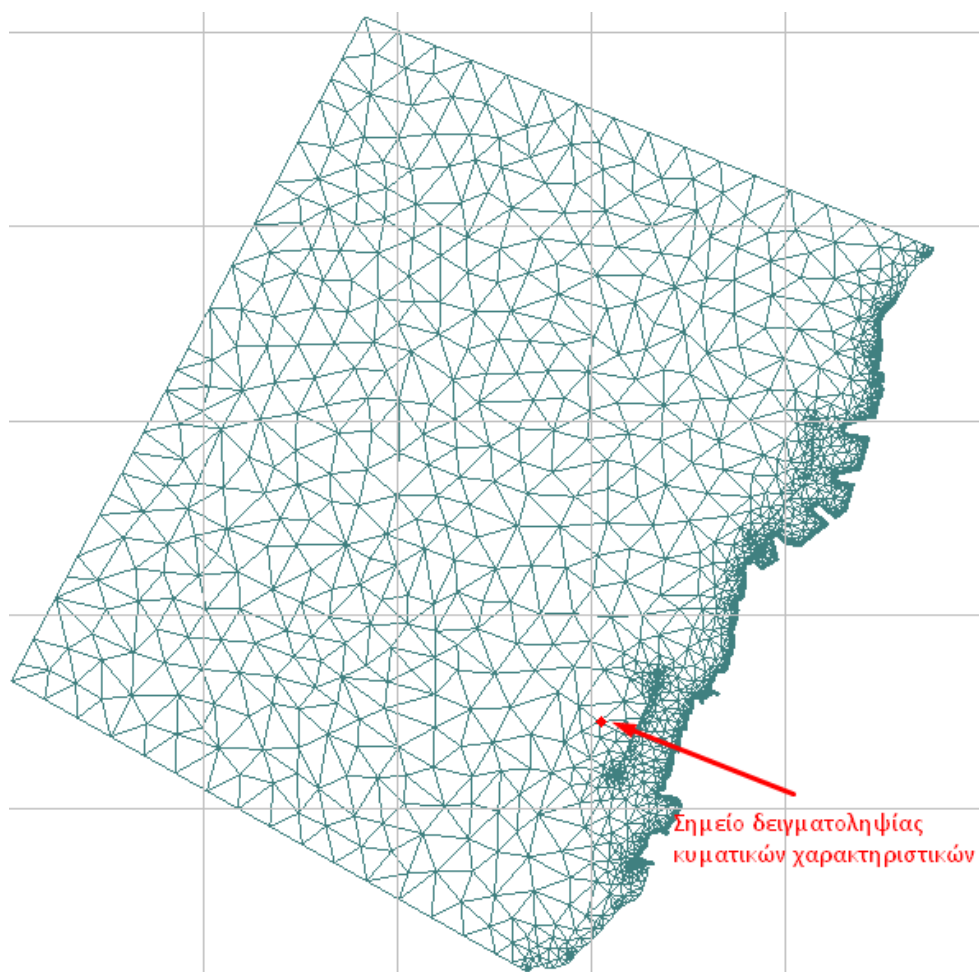
Τα αποτελέσματα για το ύψος κύματος, που είναι η μεταβλητή που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη, δίνονται σε κάθε κελί του υπολογιστικού καννάβου, με τη μορφή πίνακα.

5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα των προσομοιώσεων που προέκυψαν από κάθε λογισμικό για το κυματικό κλίμα, που θα αποτελέσει και την πρόβλεψη της κυματικής κατάστασης μετά από 3 ώρες. Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας δεν είναι η παρουσίαση αποτελεσμάτων για εκτενή χρονική διάρκεια, αλλά να τεθούν οι βάσεις στην οποία θα λειτουργεί το ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης κυματισμών σε διαύλους ναυσιπλοΐας και εντός λιμένων. Γι' αυτό το λόγο, κρίνεται ότι η παρουσίαση αποτελεσμάτων για ένα τρίωρο ικανοποιεί τον παραπάνω σκοπό.

Για κάθε φασματικό μοντέλο θα παρουσιαστεί η χωρική κατανομή του ύψους κύματος στο πεδίο υπολογισμού ανά μία ώρα, καθώς αυτή είναι η κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει την ύπαρξη συνθηκών ηρεμίας λιμενολεκάνης.

Για να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων των φασματικών μοντέλων, και για διευκόλυνση της συγκριτικής αξιολόγησής τους, γίνεται εξαγωγή χρονοσειρών των κυματικών χαρακτηριστικών, σε προκαθορισμένο σημείο, το οποίο θα αναφέρεται στο εξής Σημείο Α, το οποίο επιλέγεται να βρίσκεται ανοιχτά του κυματοθραύστη σε απόσταση περίπου 500 m (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Θέση σημείου δειγματοληψίας (Σημείο Α) κυματικών χαρακτηριστικών στο μοντέλο Α

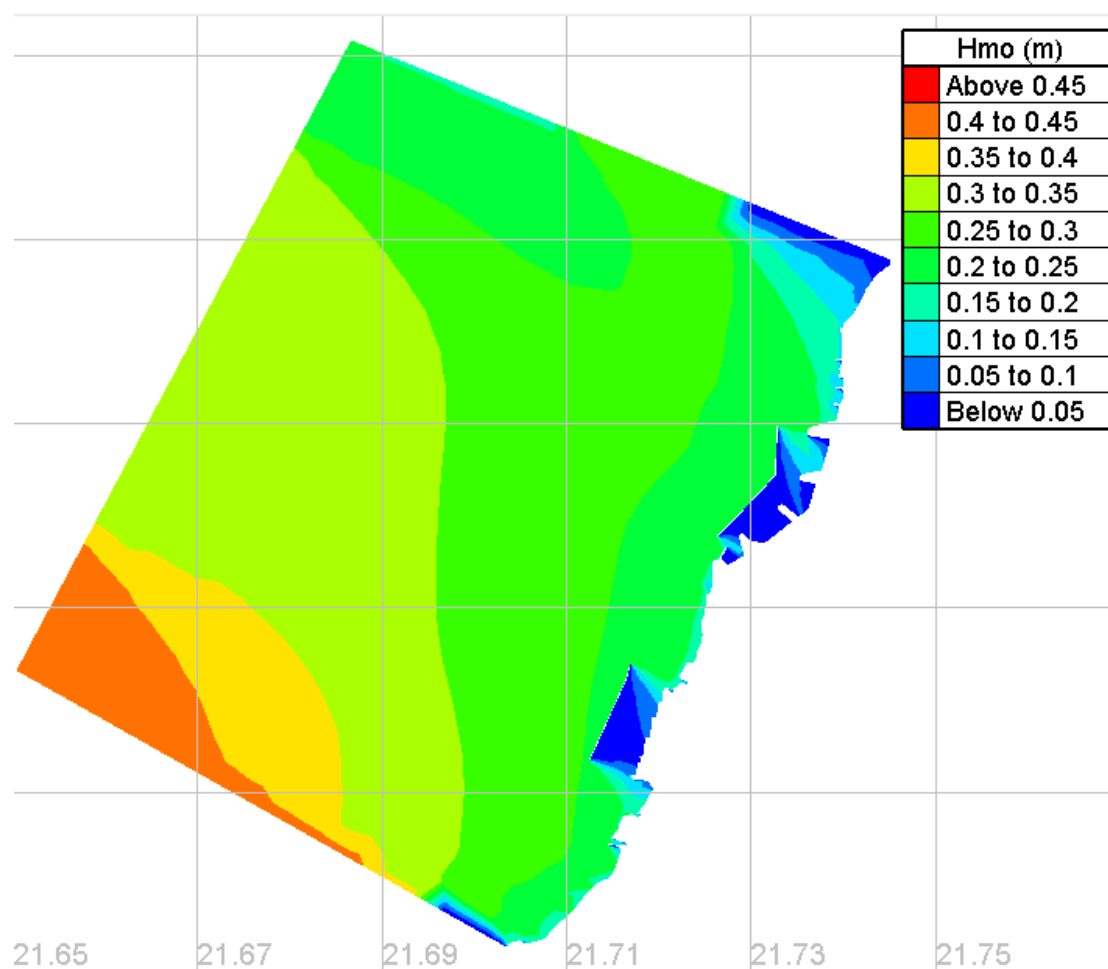
Στο ίδιο σημείο, για το μοντέλο MIKE21 SW θα παρουσιαστεί η χρονοσειρά ύψους κύματος για τις τρεις ώρες προσομοίωσης, με και δίχως hotstart, για να διαπιστωθεί αν προκύπτουν διαφορές στις τιμές του ύψους κύματος.

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των φασματικών μοντέλων θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τα εναλλακτικά μοντέλα Β, με τη μορφή της χωρικής κατανομής του ύψους κύματος, όταν έχουν επέλθει σταθερές συνθήκες. Θα σχολιαστούν πιθανές διαφορές στα αποτελέσματα των μοντέλων, και αν τελικώς για τις δεδομένες κυματικές συνθήκες επιτυγχάνεται η ηρεμία λιμενολεκάνης.

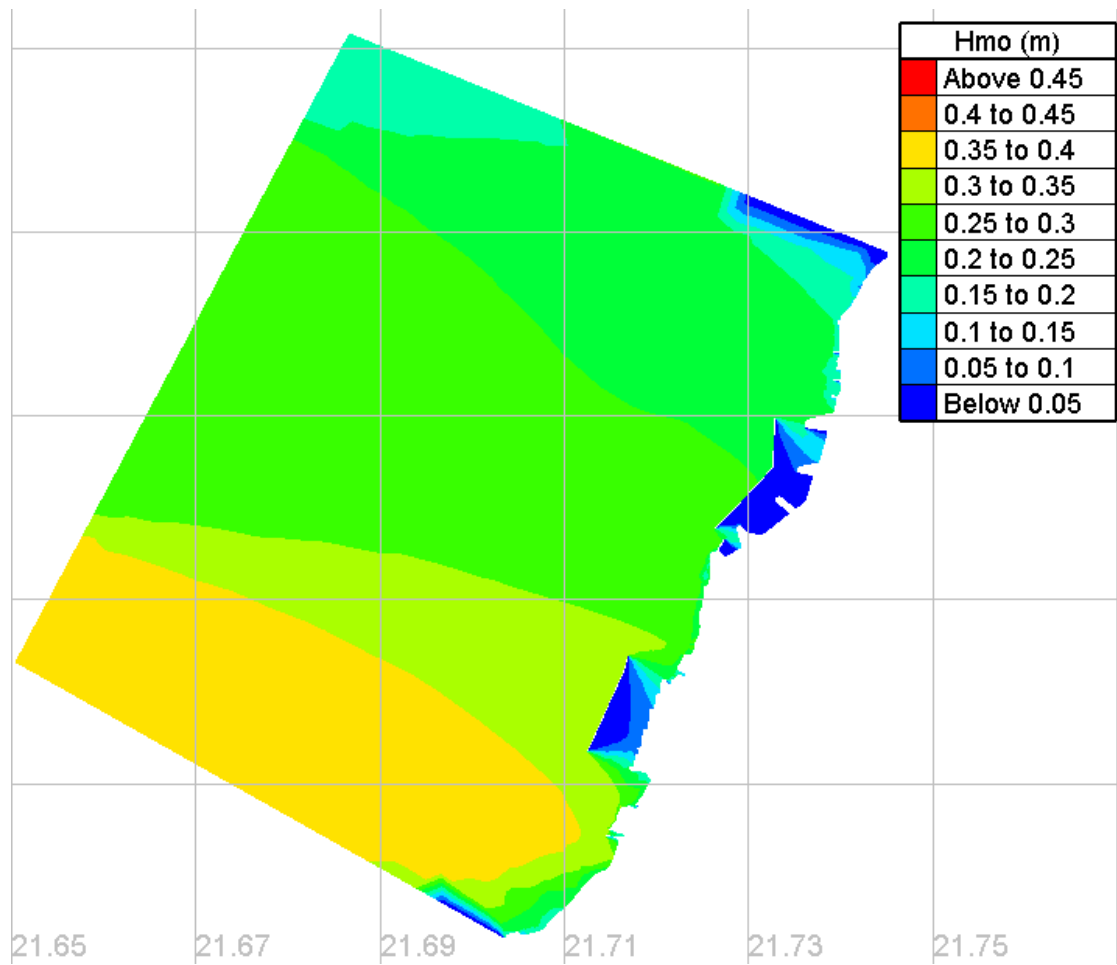
5.1 Αποτελέσματα εναλλακτικών μοντέλων Α

5.1.1 Αποτελέσματα μοντέλου TOMAWAC

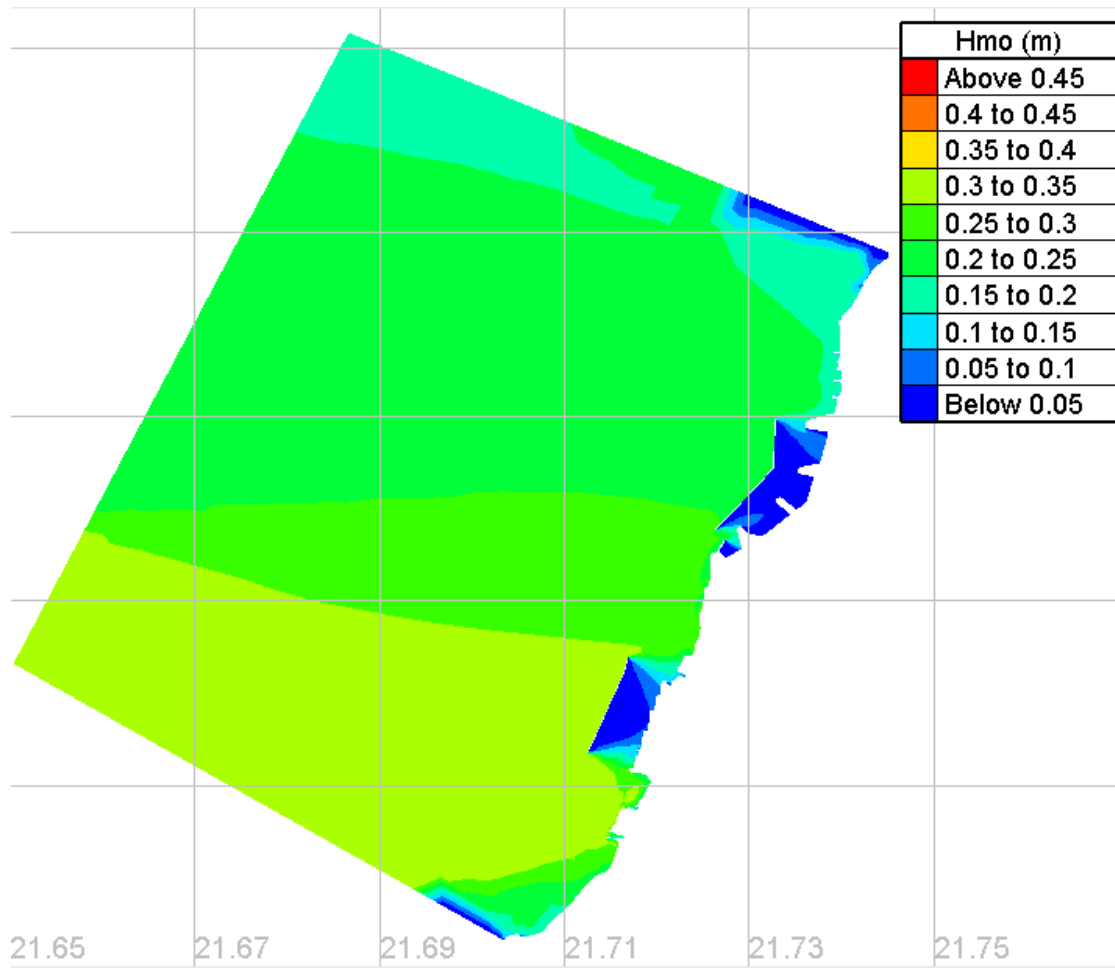
Σ' αυτό το σημείο παρουσιάζονται για κάθε ώρα προσομοίωσης τα αποτελέσματα του φασματικού κυματικού μοντέλου TOMAWAC, με τη μορφή της χωρικής κατανομής υψών κύματος. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται στο λογισμικό Blue Kenue. Ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση της προσομοίωσης των 3 ωρών είναι 6' 42".



Σχήμα 5.1: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της πρώτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο TOMAWAC



Σχήμα 5.2: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της δεύτερης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο TOMAWAC



Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της τρίτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο TOMAWAC

Το μέγιστο ύψος κύματος κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ήταν 0.46 m. Η κατάσταση της θάλασσας δείχνει να μην έχει μονιμοποιηθεί και αυτό μπορεί να αποδοθεί σε 2 κυρίους λόγους.

- Στην πολύ μικρή περίοδο αιχμής των ανεμογενών κυματισμών που κυμαίνεται από 2.4 – 4.3 sec. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα μήκη κύματος των κυματισμών, και κατά συνέπεια και οι ταχύτητες ομάδας, να έχουν σχετικά μικρές τιμές απαιτώντας αρκετό χρόνο για μονιμοποίηση του πεδίου.
- Οι χωρικά μεταβλητές οριακές συνθήκες, με διαφορετικές διευθύνσεις και ύψη κύματος σε κάθε κόμβο προκαλούν μη ομοιόμορφη εικόνα λόγω φαινομένων συμβολής των κυματισμών σε κάθε υπολογιστικό κελί.

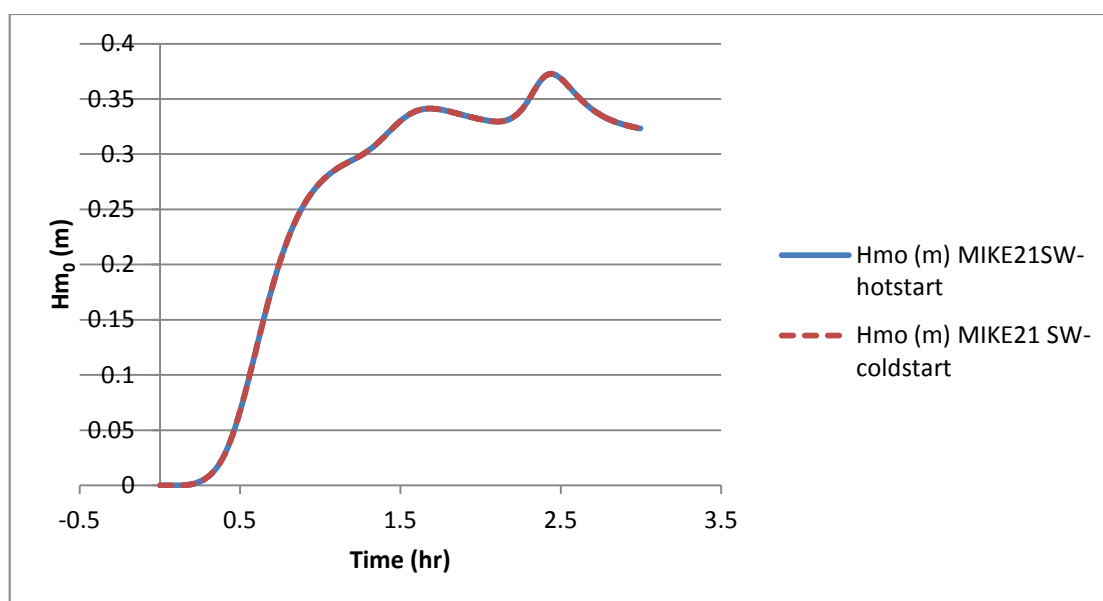
Παρατηρούμε επίσης ότι ακόμη και αν δεν έχει συμπεριληφθεί η περίθλαση στους υπολογισμούς, στη σκιά των έργων διακρίνεται σταδιακή μείωση των υψών κύματος, που οφείλεται κυρίως στον όρο της διάθλασης της κυματικής ενέργειας, που θα μπορούσε να αναφερθεί σαν γενικότερη διασπορά (scattering) των κυματισμών.

5.1.2 Αποτελέσματα μοντέλου MIKE21 SW

Όπως έχει αναφερθεί, στο MIKE21 SW εκτελέστηκε προσομοίωση ενός τρίωρου, τόσο με μηδενικές αρχικές συνθήκες φάσματος (coldstart), όσο και τμηματική προσομοίωση σε διαστήματα μίας ώρας με αρχικοποίηση των συνθηκών του φάσματος (hotstart).

Από την επεξεργασία των παραπάνω, προέκυψε ότι πραγματοποιώντας τμηματικές προσομοιώσεις διάρκειας μιας ώρας με αρχικοποίηση των συνθηκών του φάσματος, τα αποτελέσματα για τη χωρική κατανομή του ύψους κύματος είναι ταυτόσημα με αυτά που εξάγονται όταν η προσομοίωση πραγματοποιηθεί για ένα τρίωρο χωρίς αρχικοποίηση των συνθηκών. Αυτό είναι ένα πολύ σημαντικό αποτέλεσμα, καθώς επιτρέπει την απεμπλοκή από το χρόνο σαν μεταβλητή στη διάρκεια της προσομοίωσης, καθώς τα κυματικά χαρακτηριστικά θεωρούνται σταθερά στο βήμα χρονικής διακριτοποίησης του πακέτου MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_006_017.

Για την επιβεβαίωση του παραπάνω παρατίθεται στο Σχήμα 5.4 η χρονοσειρά του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στη διάρκεια προσομοίωσης στο Σημείο Α, με τη θεώρηση hotstart και coldstart.

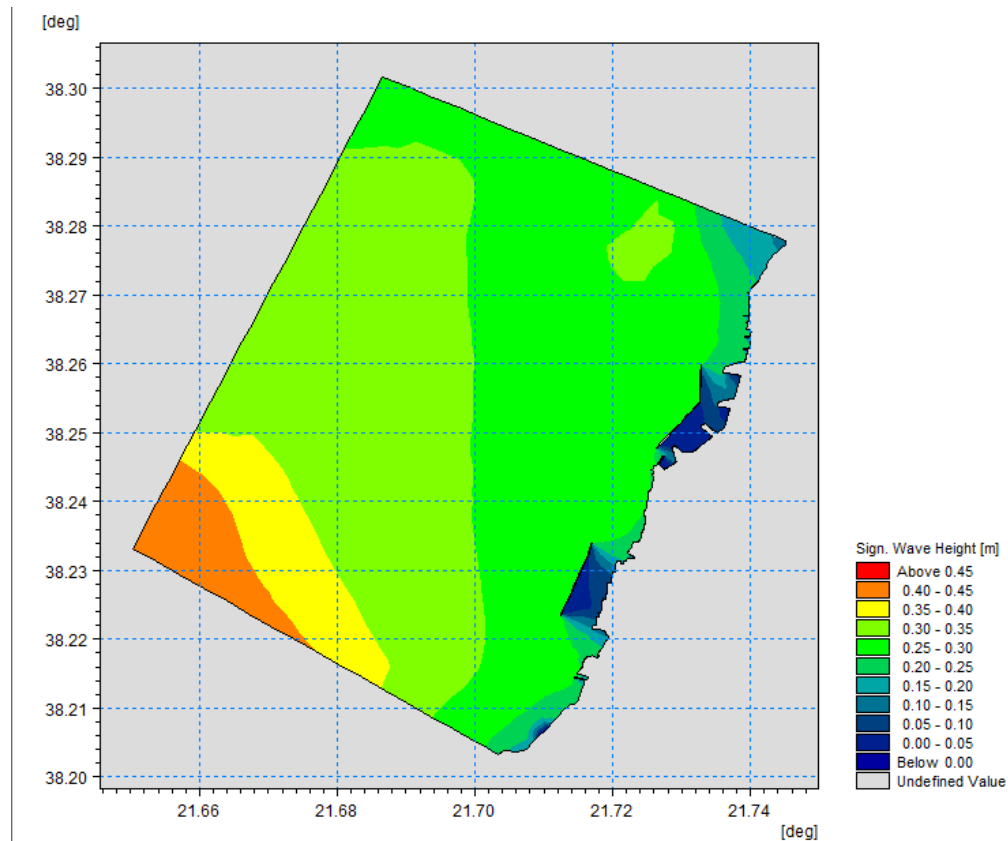


Σχήμα 5.4: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος στο Σημείο Α, με τη θεώρηση hotstart και coldstart

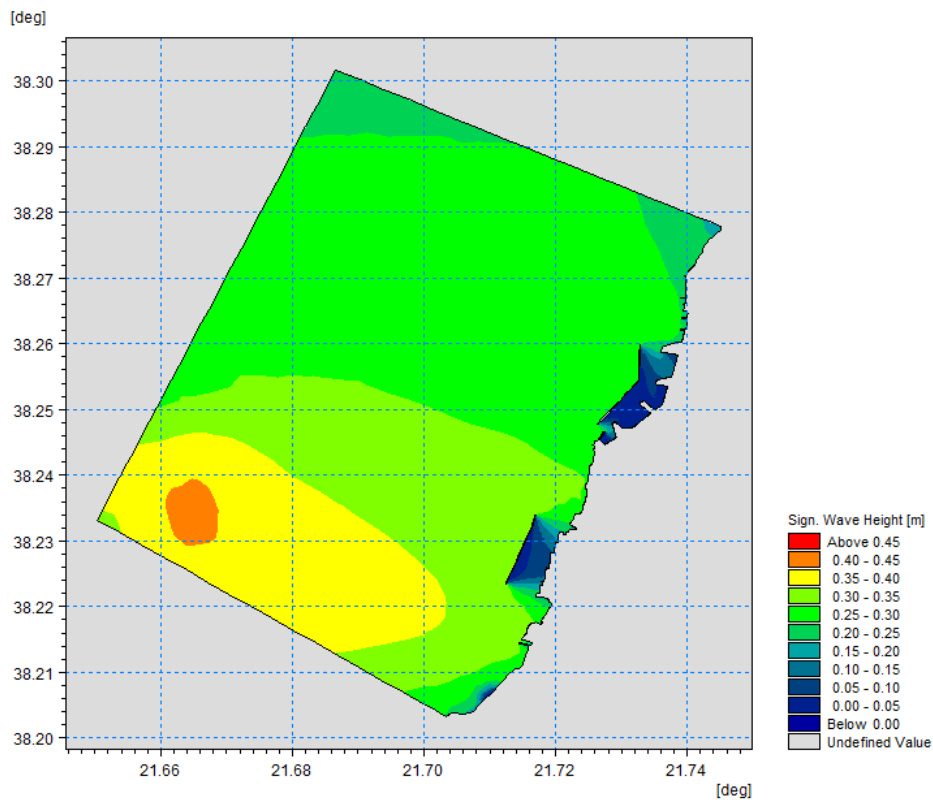
Παρατηρούμε ότι υπάρχει πλήρης ταύτιση των τιμών του χαρακτηριστικού ύψους κύματος με τις δύο θεωρήσεις, έτσι η αρχικοποίηση των συνθηκών μέσω του φάσματος πυκνότητας δράσης της προηγούμενης χρονικής στιγμής, δεν συνδέεται με καμία αλλοίωση πληροφορίας.

Παρουσιάζεται σε αυτό το σημείο η χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος ανά ώρα προσομοίωσης στο λογισμικό MIKE21 SW. Ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση του τρίωρου προσομοίωσης ήταν 38' 20'', με μέγιστο ύψος κύματος περίπου 0.47 m.

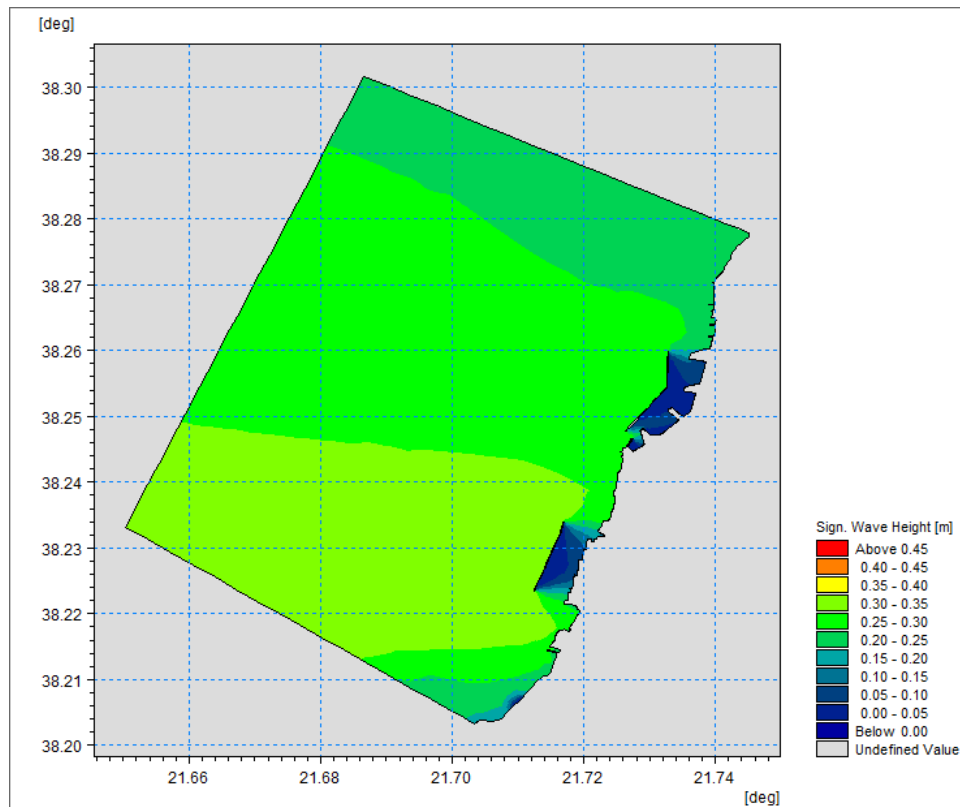
Πολύ σημαντική κρίνεται η διαφορά στο χρόνο εκτέλεσης των μοντέλων TOMAWAC και MIKE21 SW. Ο λόγος που η προσομοίωση στο MIKE21 είναι σημαντικά πιο αργή, δεν είναι η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων διάδοσης των κυματισμών, αλλά η αρχική σύγκλιση του μοντέλου, που οφείλεται στις χωρικά μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες. Το μοντέλο TOMAWAC επομένως, μπορεί να χειριστεί συνεπώς πολύ καλύτερα τις οριακές συνθήκες μεταβλητού χωρικά κύματος, από το μοντέλο MIKE21 SW.



Σχήμα 5.5: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της πρώτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW



Σχήμα 5.6: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της δεύτερης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW



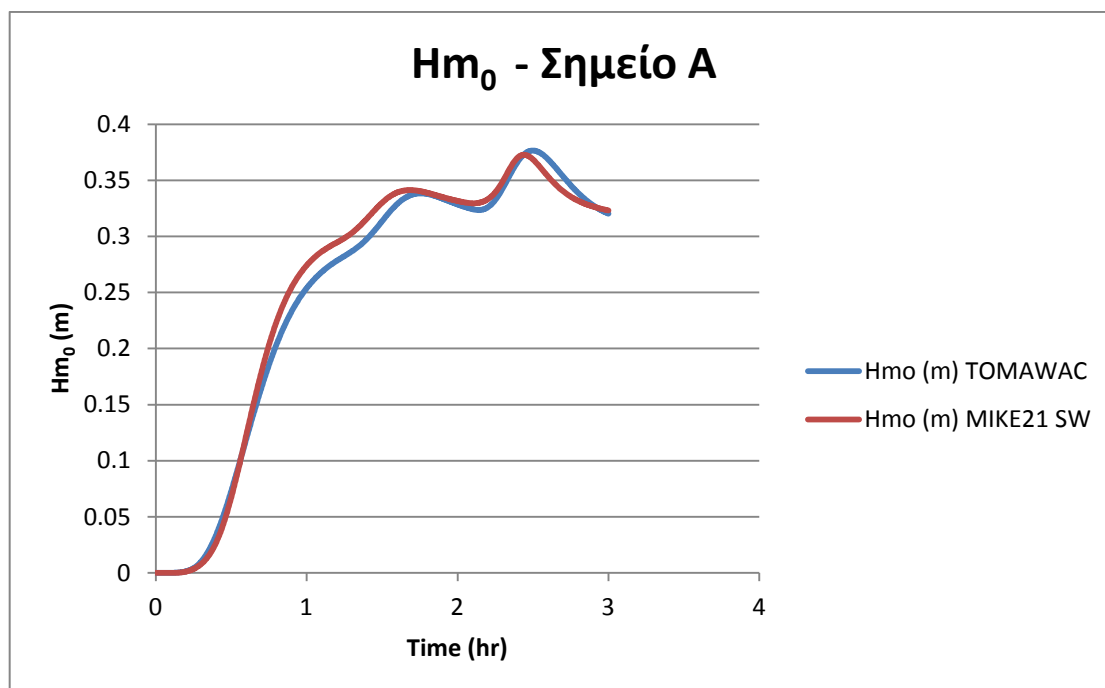
Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της τρίτης ώρας προσομοίωσης στο μοντέλο MIKE21 SW

5.1.3 Συγκριτική ανάλυση TOMAWAC και MIKE21 SW

Η λεπτομερέστερη εξέταση των Σχημάτων 5.1-5.3 και 5.5-5.7, δείχνει τοπικές διαφοροποιήσεις στη χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, που υπολογίζεται από τα μοντέλα TOMAWAC και MIKE21 SW αντίστοιχα. Αυτό είναι αναμενόμενο και πιθανώς οφείλεται στον αλγόριθμο και το σχήμα επίλυσης της εξίσωσης ισορροπίας της κυματικής δράσης του κάθε μοντέλου. Ωστόσο στο πέρας των τριών ωρών η χωρική κατανομή των υψών κύματος στα δύο μοντέλα δείχνει να έχει την τάση μονιμοποίησης και παρουσιάζει παρόμοια εικόνα.

Για την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των ομοιωμάτων θα συγκριθούν οι χρονοσειρές για το ύψος κύματος, την περίοδο και τη διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών που προκύπτουν στο Σημείο Α το οποίο έχει οριστεί στην Εικόνα 5.1. Το Σημείο Α επιλέγεται ως σημείο δειγματοληψίας, καθώς βρίσκεται επαρκώς μακριά από τον κυματοθραύστη, και θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από φαινόμενα ανάκλασης από το μέτωπό του. Συμπίπτει επίσης με το όριο στο οποίο γίνεται η κυματική διέγερση στα μοντέλα Artemis και Wave – L.

Αρχικά στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η χρονοσειρά του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, για το τρίωρο προσομοίωσης, στο Σημείο Α.



Σχήμα 5.8: Χρονοσειρά χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο Σημείο Α

Η κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος μεταξύ των δύο μοντέλων στο Σημείο Α παρουσιάζει παρόμοια εικόνα με μικρές αποκλίσεις. Ορισμένες ενδιαφέρουσες στατιστικές ποσότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1

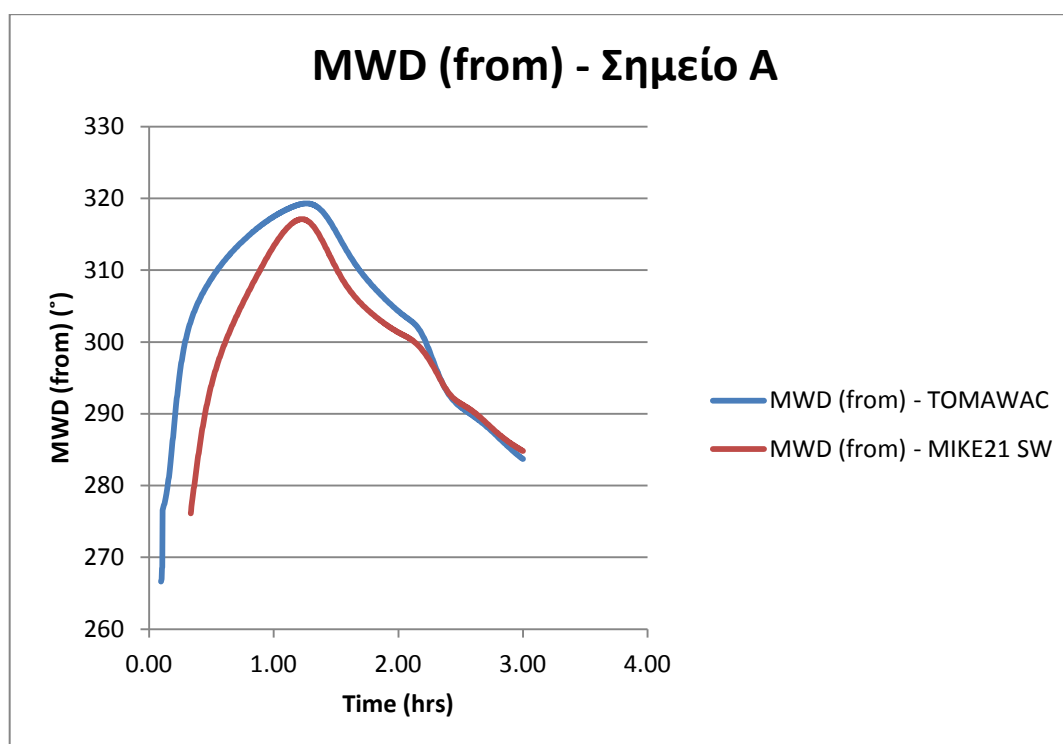
Μεγαλύτερες αποκλίσεις ενδέχεται να παρουσιάζονται αν στην προσομοίωση θεωρηθούν περισσότεροι όροι πηγής (π.χ. αλληλεπίδραση ρευμάτων – κυματισμών, γένεση κυματισμών λόγω ανέμου κ.α.), αποκλίσεις που αναμένεται να οφείλονται

τόσο στην πολυπλοκότητα των παραπάνω φαινομένων, όσο και στους αλγορίθμους επίλυσης που χρησιμοποιεί το κάθε αριθμητικό μοντέλο.

Πίνακας 5.1: Στατιστικές παράμετροι χαρακτηριστικού ύψους κύματος από τις προσομοιώσεις TOMAWAC και MIKE21 SW

	Μέγιστη τιμή H_{m0} (m)	Μέγιστη απόκλιση τιμών (m)	Μέγιστη απόκλιση (%) επί της μικρότερης τιμής
TOMAWAC	0.377	0.022	9.38
MIKE21 SW	0.373		

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η χρονοσειρά της μέσης διεύθυνσης διάδοσης των κυματισμών (προς) που προκύπτει από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων στα εναλλακτικά μοντέλα Α.



Σχήμα 5.9: Χρονοσειρά μέσης διεύθυνσης διάδοσης των κυματισμών (από), στο Σημείο Α

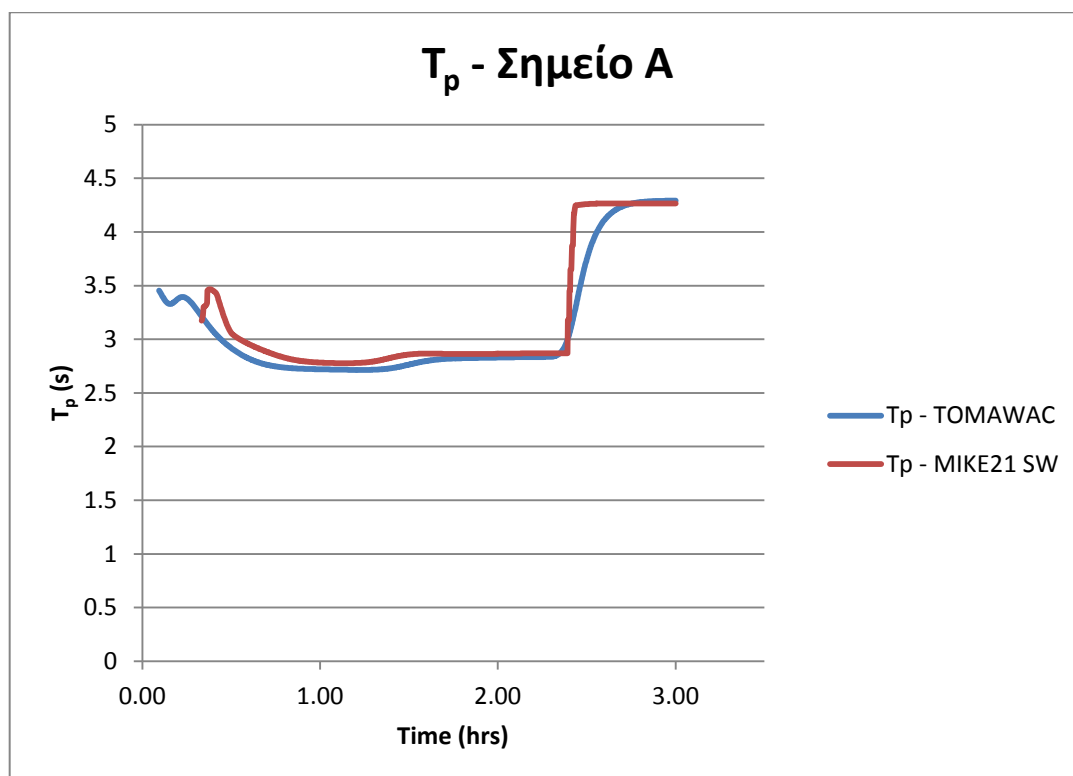
Για τη μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών παρατηρούνται μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των τιμών. Πρέπει να τονιστεί ότι η πρώτη τιμή για το TOMAWAC (σημειώνεται πως όταν ο κυματισμός δεν έχει φτάσει στο σημείο ενδιαφέροντος η διεύθυνση διάδοσης δε λαμβάνει τιμή), συναντάται σε 5' 40'' ενώ στο MIKE21 SW σε 20' 00''. Αυτό πιθανώς οφείλεται σε ανάγκη εξοικονόμησης υπολογιστικού φόρτου με την εφαρμογή φίλτρων που μηδενίζουν τη διεύθυνση διάδοσης κυματισμών, καθώς οι αντίστοιχες τιμές του ύψους κύματος είναι αρκετά μικρές (της τάξης των 0.010 m). Στο MIKE21 SW επομένως εφαρμόζεται κάποια κατώτατο όριο μέχρι το οποίο οι τιμές των κυματικών χαρακτηριστικών θεωρούνται πολύ μικρές και μηδενίζονται.

Στατιστικές ποσότητες για τη μέση διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών δίνονται στον Πίνακα 5.2

Πίνακας 5.2: Στατιστικές παράμετροι μέσης διεύθυνσης διάδοσης των κυματισμών, από τις προσομοιώσεις TOMAWAC και MIKE21 SW

	Μέγιστη τιμή MWD (°)	Ελάχιστη τιμή MWD (°)	Μέγιστη απόκλιση τιμών (°)	Μέγιστη απόκλιση (%) επί της μικρότερης τιμής
TOMAWAC	319.29	266.62	26.71	9.67
MIKE21 SW	317.10	276.14		

Στο Σχήμα 5.10 παρουσιάζεται η χρονοσειρά της περιόδου αιχμής των κυματισμών στο Σημείο Α. Παρατηρούμε αντίστοιχη εικόνα, με αυτή της διεύθυνσης διάδοσης των κυματισμών, δηλαδή την πρώτη εμφάνιση τιμών στο μοντέλο MIKE21 SW στα 20' 00'' από την έναρξη της προσομοίωσης, που οφείλεται στην εφαρμογή κάποιας τιμής κατώτατου ορίου (threshold).



Σχήμα 5.10: Χρονοσειρά περιόδου αιχμής των κυματισμών στο Σημείο Α

Στατιστικές ποσότητες εμφανίζονται συγκεντρωτικά για τη συγκεκριμένη παράμετρο, στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Στατιστικές παράμετροι περιόδου αιχμής των κυματισμών, από τις προσομοιώσεις TOMAWAC και MIKE21 SW

	Μέγιστη τιμή T_p (s)	Ελάχιστη τιμή T_p (s)	Μέγιστη απόκλιση τιμών (s)	Μέγιστη απόκλιση (%) επί της μικρότερης τιμής
TOMAWAC	4.29	2.71	0.96	29.20
MIKE21 SW	4.27	2.77		

Οι υπολογισθείσες τιμές της απόκλισης των τιμών των περιόδων αιχμής που προέκυψαν από τα εναλλακτικά φασματικά μοντέλα στο ίδιο χρονικό βήμα παρουσιάζουν μέγιστη τιμή περίπου 30 %. Η απόκλιση αυτή κρίνεται σημαντική και είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες που εμφάνιζαν οι άλλες κυματικές παράμετροι, που κυμαίνονται στο 10 %.

Συνοψίζοντας, η λειτουργία των δύο εναλλακτικών φασματικών μοντέλων και η ικανότητά τους να περιγράψουν τη διάδοση των κυματισμών για την πρόβλεψη των συνθηκών ναυσιπλοΐας σε λιμένες κρίνεται πολύ ικανοποιητική. Επίσης η εκτίμηση για το ποιο από τα μοντέλα TOMAWAC και MIKE21 ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα, μπορεί να γίνει μόνο με σύγκριση αποτελεσμάτων των μοντέλων με πλωτούς μετρητικούς σταθμούς, οπότε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας δεν μπορεί να ληφθεί σαφής απόφαση γι' αυτό το ζήτημα.

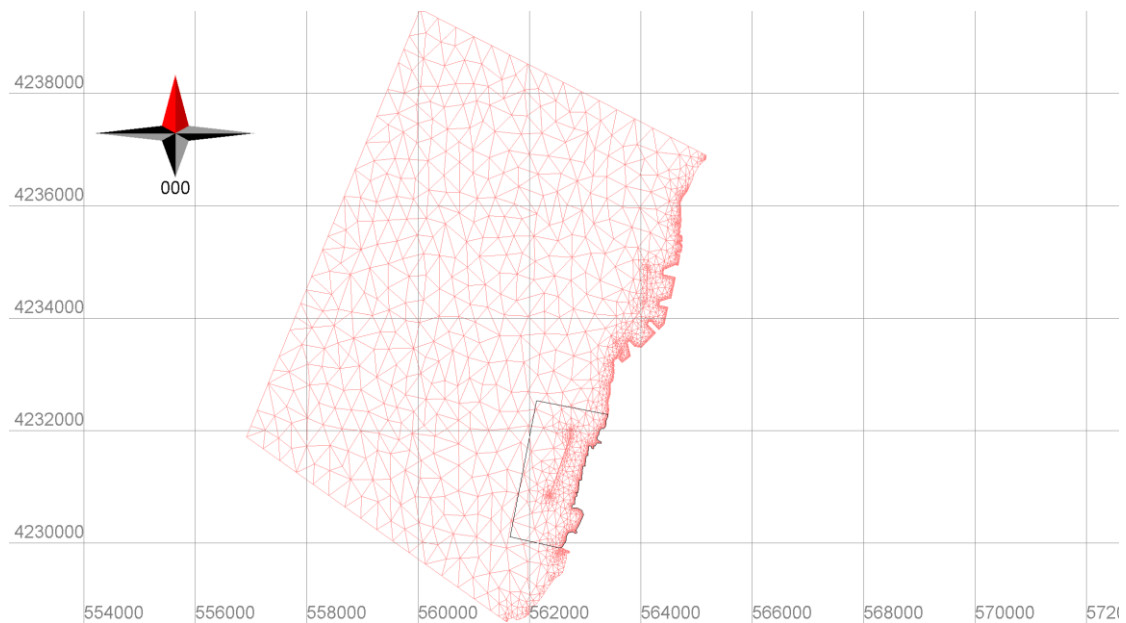
Ωστόσο, για την τροφοδοσία του μοντέλου B επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο TOMAWAC, τόσο για την ταχύτητα εκτέλεσης, όσο και για τη δυνατότητα να προγραμματιστούν από το χρήστη διεργασίες που μπορούν να βελτιώσουν τη σύζευξη μεταξύ των μοντέλων και τη σύνθεση των αποτελεσμάτων.

5.2 Αποτελέσματα εναλλακτικών μοντέλων B

5.2.1 Αποτελέσματα μοντέλου ARTEMIS

Τα αποτελέσματα του μοντέλου TOMAWAC, στο πέρας της προσομοίωσης των τριών ωρών, χρησιμοποιούνται σαν οριακές συνθήκες για την εκτέλεση των προσομοιώσεων στο μοντέλο ARTEMIS. Στην Εικόνα 5.2 παρουσιάζεται το περίγραμμα του υπολογιστικού πλέγματος του μοντέλου ARTEMIS. Η είσοδος των κυματισμών στο υπολογιστικό πεδίο γίνεται από το δυτικό όριο.

Σημειώνεται επίσης, ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα το μοντέλο να εκτελέσει τους υπολογισμούς του σε σφαιρικές συντεταγμένες, γι' αυτό το λόγο τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την ανάλυση του TOMAWAC μετατρέπονται σε σύστημα συντεταγμένων UTM, μέσω του λογισμικού Blue Kenue.



Εικόνα 5.2: Περίγραμμα υπολογιστικού πεδίου μοντέλου ARTEMIS, αναφορικά με το πλέγμα του μοντέλου TOMAWAC

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, έγιναν τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις, συγκεκριμένα, για μονοχρωματικούς κυματισμούς, σύνθετους μονοκατευθυντικούς κυματισμούς με θεώρηση της μέσης διεύθυνσης διάδοσης στο ανοιχτό όριο και σύνθετους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς.

Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν θα αφορούν τη χωρική κατανομή του ύψους κύματος όταν έχουν επέλθει σταθερές συνθήκες. Παράγωγα μεγέθη που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.

Τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου κυματισμού που χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις προσομοιώσεις, και προέρχονται από σημειακά αποτελέσματα του TOMAWAC, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4

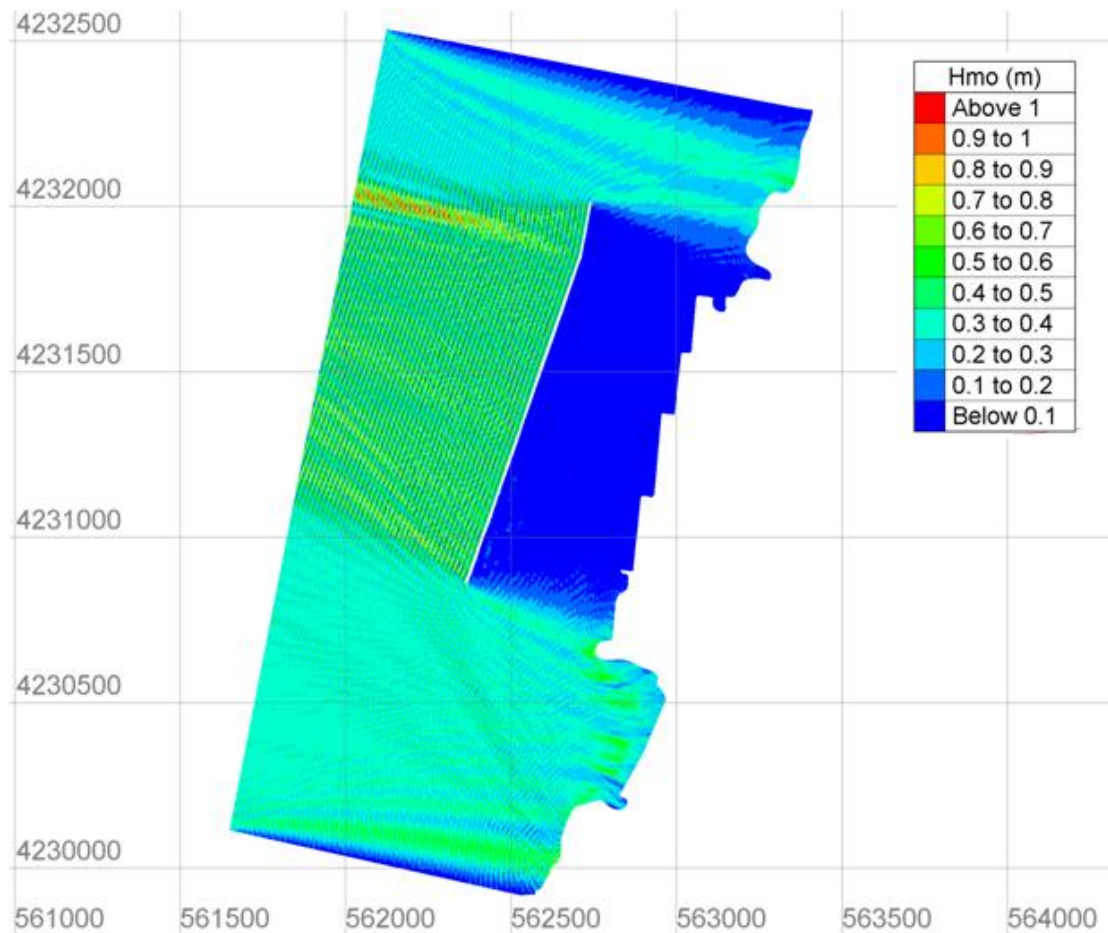
Πίνακας 5.4: Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού στο μοντέλο ARTEMIS

Μέσο χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s (m)	Μέση διεύθυνση διάδοσης κυματισμών (από) MWD (°)	Περίοδος αιχμής κυματισμών T_p (s)
0.35	283.667	4.29

5.2.1.1 Αποτελέσματα διάδοσης μονοχρωματικών κυματισμών

Ο χρόνος που χρειάστηκε για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης των μονοχρωματικών κυματισμών ήταν 400 s. Το μέγιστο ύψος κύματος στο πεδίο είναι $H_{m0} = 1.05$ m.

Η χωρική κατανομή του ύψους κύματος, που προέκυψε από την προσομοίωση, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11.



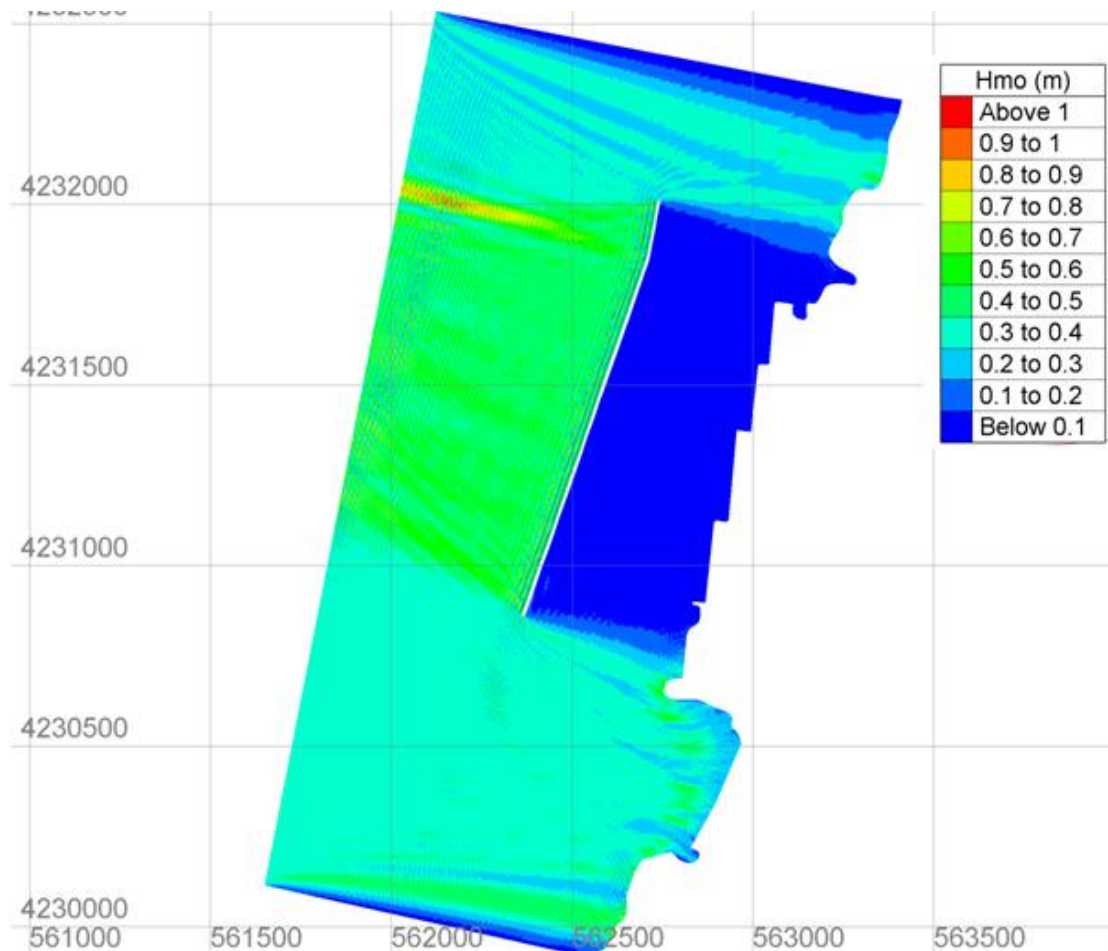
Σχήμα 5.11: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος για μονοχρωματικούς κυματισμούς στο μοντέλο ARTEMIS

Παρατηρούμε σημαντικές ανακλάσεις στο πεδίο που δεν αποσβάνουν λόγω της γραμμικής φύσης των κυματισμών. Το φαινόμενο αυτό θα σχολιαστεί εκτενέστερα σε επόμενη ενότητα. Θραύση κυματισμών παρατηρείται μόνο Νότια των κρηπιδωμάτων, καθώς το ύψος του εισερχόμενου κυματισμού είναι σχετικά μικρό σε σχέση με τα βάθη της περιοχής μελέτης. Δεν παρατηρείται επίσης, σημαντική είσοδος κυματισμών εντός της λιμενολεκάνης λόγω περίθλασης, που οφείλεται πάλι στο μικρό ύψος του εισερχόμενου κυματισμού.

5.2.1.2 Αποτελέσματα διάδοσης σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών

Χρησιμοποιήθηκαν 6 διακριτές περίοδοι, με ελάχιστη 3.99 s και μέγιστη τα 4.31 s. Ο χρόνος της προσομοίωσης ήταν 1936 s, και αυτό οφείλεται στον τρόπο χειρισμού της επίλυσης στην περίπτωση σύνθετων κυματισμών. Συγκεκριμένα αναζητείται λύση για κάθε συνιστώσα μονοχρωματικών κυματισμών, και στο τέλος γίνεται υπέρθεση των αποτελεσμάτων. Το μέγιστο ύψος κύματος στο πεδίο είναι $H_{m0} = 1.02$ m

Η χωρική κατανομή του ύψους κύματος, που προέκυψε από την προσομοίωση σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5.12: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών στο μοντέλο ARTEMIS

Παρατηρούμε ότι οι ανακλάσεις από το μέτωπο του κυματοθραύστη έχουν μειωθεί αρκετά, γεγονός που οφείλεται στη διαφορετική περίοδο των κυματισμών που προσομοιώθηκαν, και θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενη Ενότητα.

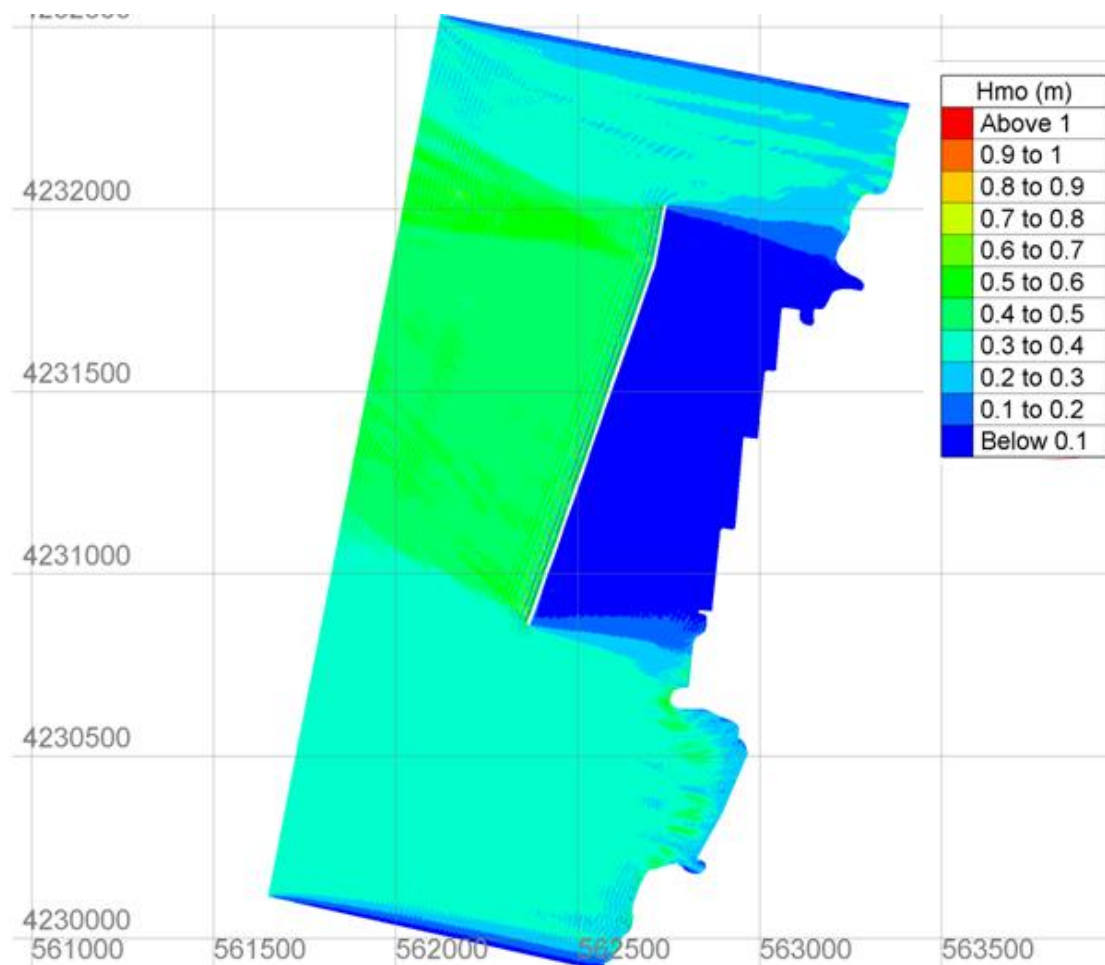
Παρατηρείται επίσης μείωση του κυματισμού που εισέρχεται στο λιμένα λόγω περίθλασης που μπορεί να αποδοθεί στον ίδιο λόγο.

5.2.1.3 Αποτελέσματα διάδοσης σύνθετων πολυκατευθυντικών κυματισμών

Χρησιμοποιήθηκαν 5 διακριτές διευθύνσεις, με ελάχιστη διεύθυνση προέλευσης των κυματισμών τις $265,27^\circ$ και μέγιστη τις $290,67^\circ$. Ο συνολικός χρόνος της προσομοίωσης ήταν 5367 s. Με την αύξηση των επιμέρους μονοχρωματικών συνιστωσών, καθώς τώρα αναζητείται επίλυση για κάθε ζεύγος περιόδου και διεύθυνσης, ο χρόνος προσομοίωσης αυξάνει σημαντικά. Σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να χρησιμοποιηθεί το παρόν μοντέλο για να παρέχει προβλέψεις στο πέρας ενός τρίωρου, ο χρόνος αυτός μπορεί να κριθεί απαγορευτικός, κάνοντας τη θεώρηση πολυκατευθυντικών σύνθετων κυματισμών πρακτικώς αδύνατη.

Το μέγιστο χαρακτηριστικό ύψος κύματος στο υπολογιστικό πεδίο ήταν $H_{m0} = 0.78$ m, σημαντικά μικρότερο από τις προηγούμενες δύο προσομοιώσεις.

Η χωρική κατανομή του ύψους κύματος, που προέκυψε από την προσομοίωση σύνθετων πολυκατευθυντικών κυματισμών, παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Χωρική κατανομή χαρακτηριστικού ύψους κύματος σύνθετων πολυκατευθυντικών κυματισμών στο μοντέλο ARTEMIS

Οι ανακλάσεις έχουν μειωθεί ακόμη περισσότερο, παρατηρείται όμως μια αύξηση του περιθλώμενου κυματισμού που εισέρχεται στη λιμενολεκάνη.

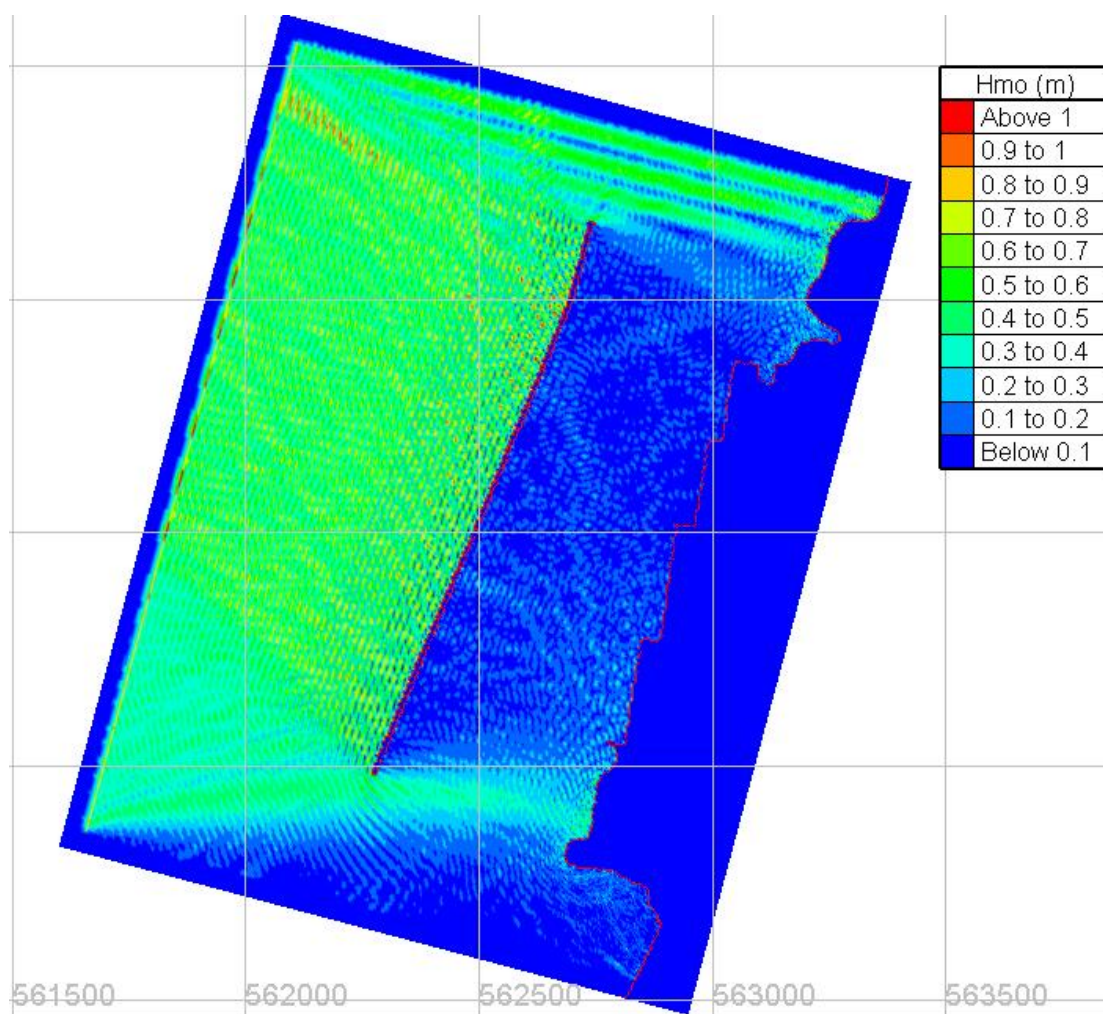
Σε κάθε περίπτωση λειτουργίας του όμως το μοντέλο ARTEMIS κρίνεται ικανό να προσομοιώσει τις κυματικές συνθήκες στην έκταση που απαιτείται να καλύπτει το μοντέλο Β.

5.2.2 Αποτελέσματα μοντέλου Wave – L

Όπως προαναφέρθηκε, το μοντέλο Wave – L μπορεί να διαδώσει μόνο γραμμικούς κυματισμούς στην παρούσα έκδοσή του, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης διάδοσης σύνθετων κυματισμών.

Ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης ήταν 1000 sec, που ολοκληρώθηκαν σε 1400 sec πραγματικού χρόνου. Ωστόσο με τον έλεγχο αν έχουν επέλθει σταθερές συνθήκες σε κάθε χρονικό βήμα, πιθανώς ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της προσομοίωσης να μειωθεί σημαντικά.

Το μέγιστο ύψος κύματος στο μοντέλο είναι 1.65 m, και είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο που προέκυψε από την προσομοίωση του μοντέλου ARTEMIS. Οι μέγιστες τιμές ωστόσο εμφανίζονται σε μεμονωμένα κελιά, και οφείλονται σε τοπικές αριθμητικές αστάθειες, στο σημείο της κυματικής διέγερσης, καθώς όπως είναι φανερό από το Σχήμα 5.14, η χωρική κατανομή του ύψους κύματος στο υπολογιστικό πεδίο εμφανίζει παρόμοια εικόνα με αυτή που προέκυψε από το ARTEMIS. Παράγωγα μεγέθη των προσομοιώσεων του μοντέλου παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β.



Σχήμα 5.14: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Wave – L

Γίνεται φανερό ότι ακόμη και με τη χρήση τεχνητού συντελεστή τυρβώδους διάχυσης, ο ανακλώμενος κυματισμός διαδίδεται μέχρι το όριο απορρόφησης και δεν παρατηρείται κάποια απόσβεσή του. Επίσης δεν παρατηρείται θραύση των κυματισμών, γεγονός που οφείλεται στο μικρό ύψος κύματος του προωθούμενου κυματισμού.

Η περίθλαση δείχνει να προσομοιώνεται ικανοποιητικά από το μοντέλο, με μεγαλύτερο ποσοστό κυματισμού να εισέρχεται από τη νότια πλευρά της λιμενολεκάνης όπως είναι αναμενόμενο και από τη διεύθυνση προέλευσης των εισερχόμενων κυματισμών. Εντός της λιμενολεκάνης παρατηρούνται τοπικά σημεία

με αυξημένο ύψος κύματος, της τάξης των 0.3 m, που οφείλονται στην ανάκλαση κυματισμών από τα πλήρως ανακλαστικά κατακόρυφα κρηπιδώματα. Αν αναλογιστεί κανείς το ύψος του εισερχόμενου κυματισμού, που ορίζεται περί τα 0.35 m, αυτές οι τιμές ύψους κύματος είναι μη ρεαλιστικά αυξημένες, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην ανάκλαση των γραμμικών κυματισμών και θα αναλυθεί εκτενέστερα στην ακόλουθη ενότητα.

5.2.3 Συγκριτική ανάλυση για την ανάκλαση των κυματισμών

Τα εναλλακτικά μοντέλα Β μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά τις κυματικές συνθήκες εντός της λιμενολεκάνης. Είναι προφανές επίσης, ότι οι συνθήκες ηρεμίας λιμενολεκάνης για τις κυματικές συνθήκες που εξετάστηκαν στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ικανοποιούνται, καθώς τα ύψη κύματος εντός του λιμένα είναι ασήμαντα να προκαλέσουν σοβαρές αναταραχές στη λειτουργία του.

Λεπτομερέστερου σχολιασμού χρήζει το φαινόμενο της ανάκλασης, το οποίο είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τη φύση των μοντέλων ήπιας κλίσης. Η διαφορά που προκύπτει στις προσομοιώσεις για τη χωρική κατανομή του ανακλώμενου κυματισμού οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο αν ο κυματισμός είναι μονοχρωματικός ή σύνθετος.

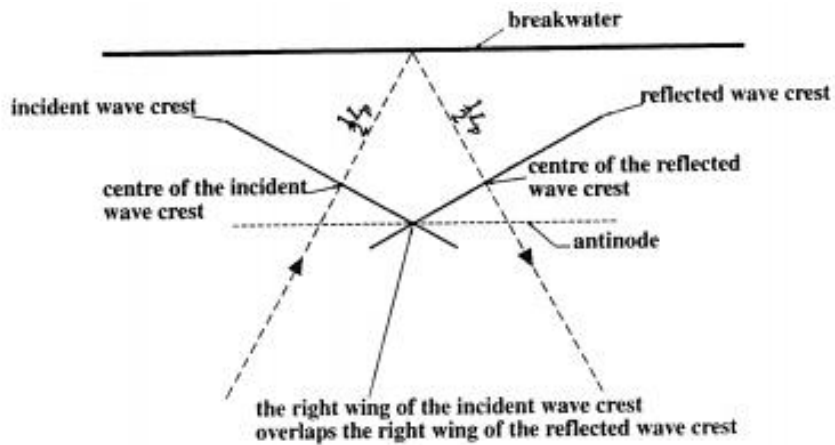
Σύμφωνα με τον Boccoti (2000), το φαινόμενο της ανάκλασης είναι η ουσιαστικότερη διαφορά μεταξύ των περιοδικών και των σύνθετων κυματισμών.

Οι σύνθετοι εξ ανακλάσεως κυματισμοί έχουν διακριτές κορυφές και κοιλίες, που δίνονται επακριβώς από τη γραμμική θεωρία των κυματισμών. Το μέγιστο ύψος κύματος εμφανίζεται πάντα στο μέτωπο του κυματοθραύστη, με την κοιλία να εμφανίζεται σε απόσταση $L/4$ από το ίχνος του έργου.

Όταν έχουμε σύνθετους κυματισμούς, που αποτελούνται από πολλές συνιστώσες με διαφορετική περίοδο, άρα και μήκος κύματος, η διάδοσή τους γίνεται με διαφορά φάσης. Αυτό σημαίνει ότι είναι πιθανό στο σημείο που ο γραμμικός κυματισμός θα εμφάνιζε κοιλία σύμφωνα με τα προηγούμενα, να συμβάλει μια διαφορετική γραμμική συνιστώσα που στο ίδιο σημείο θα εμφανίζει την κορυφή της. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την εξάλειψη των δεσμών και αντιδεσμών που εμφανίζονται σε ανακλώμενους γραμμικούς κυματισμούς, καθαρά λόγω της στοχαστικότητας του φαινομένου της διάδοσης των σύνθετων κυματισμών.

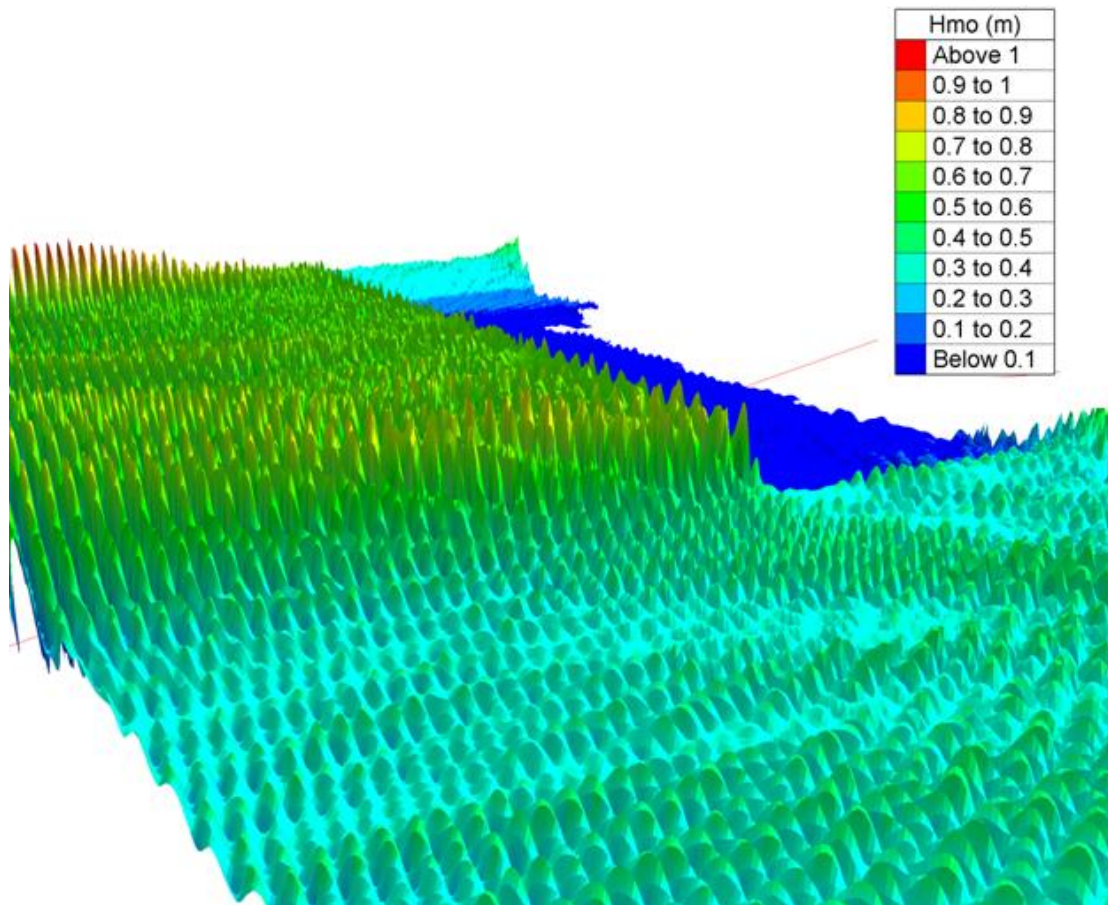
Σε περίπτωση που οι κυματισμοί είναι σύνθετοι και πολυκατευθυντικοί, όπως συνήθως συμβαίνει στη φύση, παίζει ρόλο πέρα από την περίοδο της κάθε συνιστώσας, και η διεύθυνση διάδοσης, καθώς ο κάθε ανακλώμενος κυματισμός διαδίδεται και αυτός με διαφορετική γωνία, ανάλογα με αυτή του προσπίπτοντος κύματος (Εικόνα 5.3), με συνέπεια το ανακλώμενο και το προσπίπτον κύμα που προέρχονται από διαφορετικές κυματικές ομάδες να μην συμβάλουν με το μέγιστο ύψος τους.

Λόγω των παραπάνω επιτυγχάνεται απομείωση των ακραίων τιμών του ύψους κύματος ενός πεδίου σύνθετων κυματισμών.

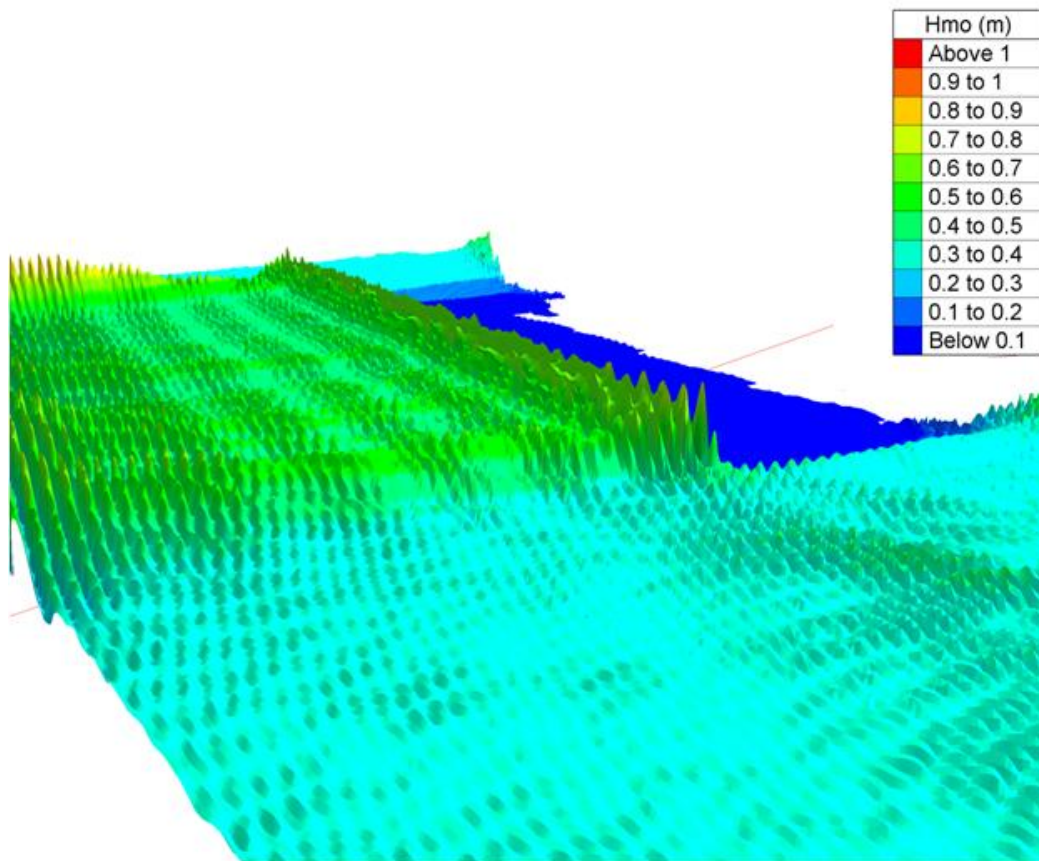


Εικόνα 5.3: Συμβολή ανακλώμενου και προσπίπτοντος κυματισμού για περίπτωση πλάγιας πρόσπτωσης στον κυματοθραύστη (Bocconi, 2000)

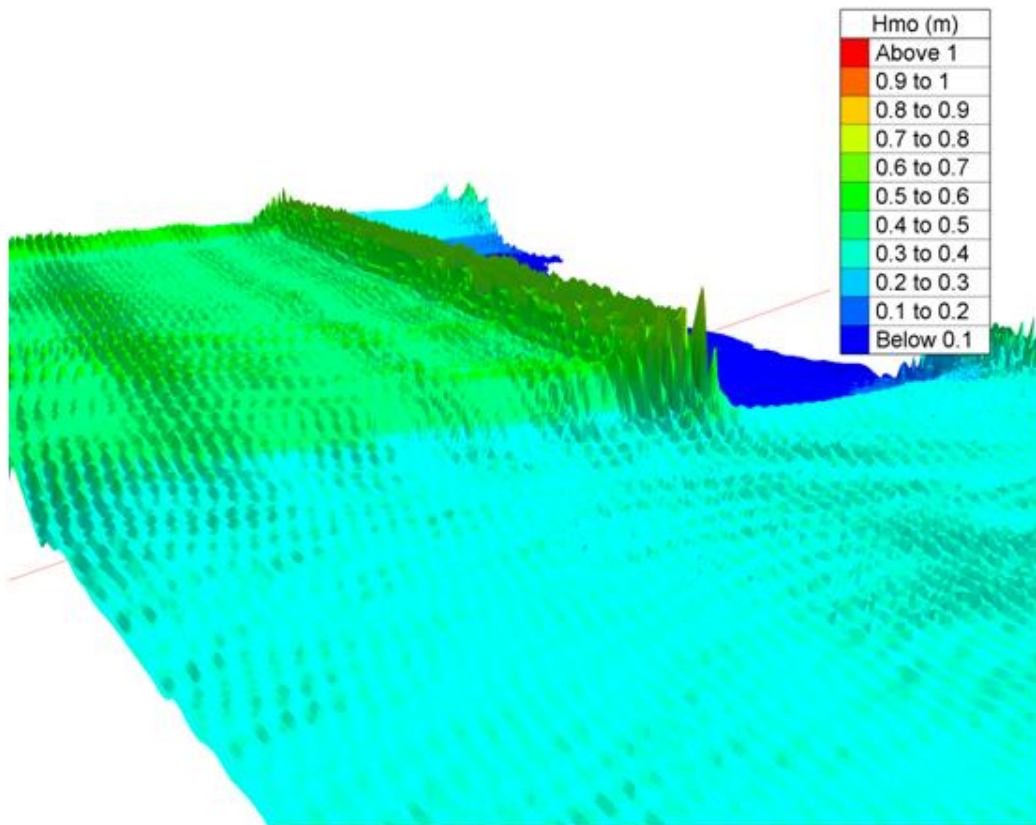
Για την επιβεβαίωση των παραπάνω, παρουσιάζεται τρισδιάστατη χωρική κατανομή του ύψους κύματος από το μοντέλο ARTEMIS, με έμφαση να δίνεται στην περιοχή μεταξύ του κυματοθραύστη και της κυματογεννήτριας, όπου κυριαρχούν οι ανακλώμενοι κυματισμοί στο υπολογιστικό πεδίο. (Σχήματα 5.15 – 5.17)



Σχήμα 5.15: Τρισδιάστατη κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο μοντέλο ARTEMIS - μονοχρωματικοί κυματισμοί



Σχήμα 5.16: Τρισδιάστατη κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο μοντέλο ARTEMIS – σύνθετοι μονοκατευθυντικοί κυματισμοί



Σχήμα 5.17: Τρισδιάστατη κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στο μοντέλο ARTEMIS – σύνθετοι πολυκατευθυντικοί κυματισμοί

Η επίδραση της κατευθυντικότητας στην απομείωση της ενέργειας του ανακλώμενου κυματισμού επιβεβαιώνεται από τη σχέση διασποράς της κυματικής ενέργειας.

Ως γνωστόν οι ανεμογενείς κυματισμοί περιγράφονται ικανοποιητικά μέσω του φάσματος $S(f, \theta)$ συχνότητας f /κατεύθυνσης θ , που συνήθως αναλύεται ως εξής:

$$S(f, \theta) = S(f)G(f, \theta) \quad (5.1)$$

Όπου $G(f, \theta)$ είναι η συνάρτηση διασποράς της ενέργειας ανά κατεύθυνση θ , που μπορεί να εκφρασθεί όπως παρακάτω:

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (5.2)$$

με:

$$G_0 \quad \text{σταθερά που ικανοποιεί τη συνθήκη } \int_{-\pi}^{\pi} G(f, \theta) d\theta = 1$$

s παράμετρος διασποράς που μπορεί να εκφρασθεί σαν συνάρτηση της μέγιστης τιμής του s_{\max} ως εξής: (Mitsuyasu et al., 1975)

$$s = \begin{cases} S_{max} \left(\frac{f}{f_p}\right)^5 & , f \leq f_p \\ S_{max} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-2.5} & , f \geq f_p \end{cases} \quad (5.3)$$

Η συχνότητα στην κορυφή του φάσματος f_p μπορεί να υπολογιστεί με καλή προσέγγιση από τη σχέση:

$$f_p = 1/1.05 T_{1/3} \quad (5.4)$$

Η μέγιστη τιμή της παραμέτρου διασποράς λαμβάνεται σύμφωνα με τους Goda & Suzuki (1976) για βαθιά νερά όπως παρακάτω:

$S_{max} = 10$ για ανεμογενείς κυματισμούς στην περιοχή σχηματισμού τους

$S_{max} = 25$ για κυματισμούς σχετικά κοντά στην περιοχή σχηματισμού οτους και μεγάλη κυρτότητα κύματος

$S_{max} = 75$ για κυματισμούς σε μεγάλη απόσταση από την περιοχή σχηματισμού τους και μικρή κυρτότητα κύματος

Οι παραπάνω τιμές του S_{max} αυξάνονται με τη μείωση του βάθους.

Εάν δεχθούμε μια μορφή πλήρως ανεπτυγμένου φάσματος συχνότητας $S(f)$ όπως η παρακάτω

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} e^{-1.03(T_{1/3} f)^{-4}} \quad (5.5)$$

Τότε μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο D_j της ενέργειας σε κάθε διεύθυνση j ως προς τη συνολική. Για εύρος διασποράς $\pm 90^\circ$ έχουμε τις ακόλουθες τιμές του λόγου αυτού (Πίνακας 5).

Πίνακας 5.5: Ποσοστό κυματικής ενέργειας ανά κατεύθυνση

Διεύθυνση συνιστώστας	S_{max}		
	10	25	75
45°	0.26	0.17	0.06
0°	0.48	0.66	0.88
-45°	0.26	0.17	0.06
Σύνολα	1.00	1.00	1.00

Γίνεται εμφανές ότι η γωνία πρόσπτωσης των πραγματικών κυματισμών είναι από μόνη της ικανή συνθήκη να απομειώσει την κυματική ενέργεια, σε σύγκριση με την κάθετη πρόσπτωση των κυματισμών, έχοντας επίδραση και στην ένταση του φαινομένου της ανάκλασης.

Είναι σαφές από τα παραπάνω, ότι η θεώρηση σύνθετων κυματισμών είναι ικανή να βελτιώσει την εικόνα της χωρικής κατανομής του ύψους κύματος, μειώνοντας τις ανακλάσεις που προκύπτουν στα γραμμικά μοντέλα ήπιας κλίσης. Επειδή η πορεία χειρισμού των σύνθετων κυματισμών στα μοντέλα ήπιας κλίσης, είναι η επίλυση των γραμμικών συνιστωσών και η υπέρθεση των αποτελεσμάτων, αυξάνεται σημαντικά το υπολογιστικό κόστος εκτέλεσης αυτών των μοντέλων για συνθήκες σύνθετων κυματισμών.

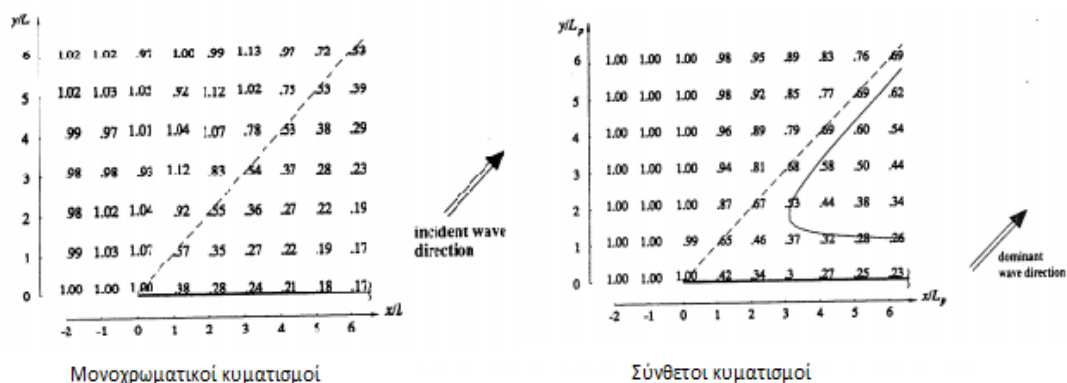
Στο πλαίσιο κατάστρωσης ενός ολοκληρωμένου μοντέλου που θα παρέχει πρόβλεψη της θαλάσσιας κατάστασης εντός λιμένων ανά τρεις ώρες, είναι επιθυμητό οι χρόνοι εκτέλεσης των μοντέλων να είναι οι κατά το δυνατόν μικρότεροι δυνατοί. Η θεώρηση σύνθετων πολυκατευθυντικών κυματισμών αντιβαίνει την παραπάνω απαίτηση. Ωστόσο η θεώρηση σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών, που θα αποτελούνται από λίγες γραμμικές συνιστώσες, μπορεί σε ικανοποιητικό χρόνο να βελτιώσει αρκετά την εικόνα των ανακλώμενων κυματισμών στο υπολογιστικό πεδίο.

5.2.4 Συγκριτική ανάλυση για την περίθλαση των κυματισμών

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μια ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το μοντέλο ARTEMIS, για τις διαφορετικές θεωρήσεις μονοχρωματικών και σύνθετων κυματισμών, με έμφαση να δίνεται στο ύψος κύματος στην «σκιά» του κυματοθραύστη που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην περίθλαση. Μετά την ανάκλαση, η περίθλαση είναι το φαινόμενο που εμφανίζονται οι σημαντικότερες αποκλίσεις στα ύψη κύματος μεταξύ περιοδικών και σύνθετων κυματισμών (Boccotti, 2000).

Ποσοτικά η περίθλαση μπορεί να περιγραφεί από το συντελεστή C_d , που ορίζεται ως ο λόγος του ύψους κύματος σε ένα δεδομένο σημείο, προς το προσπίπτον κύμα, στο άκρο μιας κατασκευής.

Στην Εικόνα 5.4, παρουσιάζονται οι συντελεστές περίθλασης C_d , για την περίπτωση μονοχρωματικών και σύνθετων κυματισμών, στη σκιά ενός κυματοθραύστη, όταν η πρόσπτωση γίνεται υπό γωνία 45° ως προς το κατακόρυφο πέτασμα.



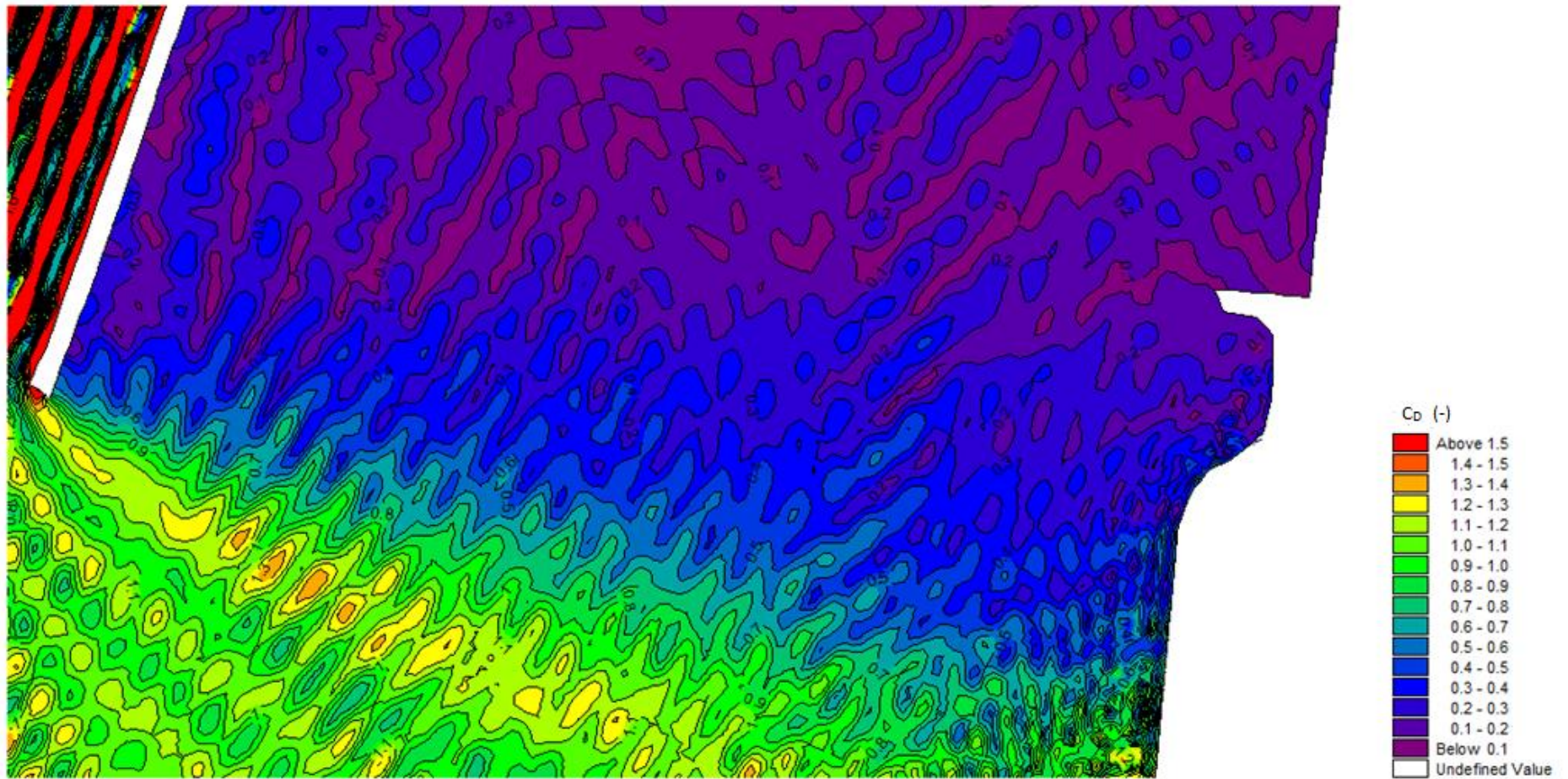
Εικόνα 5.4: Συντελεστής περίθλασης για πλάγια πρόσπτωση κυματισμών σε μονοχρωματικούς (αριστερά) και σύνθετους (δεξιά) κυματισμούς (Boccotti, 2000)

Οι μεγαλύτερες αλλαγές του συντελεστή περίθλασης εμφανίζονται στην «σκοτεινή περιοχή» της προστατευμένης ζώνης (δεξιά της τεθλασμένης γραμμής στην Εικόνα 5.4) όπου ο συντελεστής περίθλασης είναι σχεδόν διπλάσιος για τους σύνθετους κυματισμούς από τον αντίστοιχο των μονοχρωματικών κυματισμών. Στα άλλα σημεία της προστατευμένης περιοχής παρατηρείται ταύτιση μεταξύ των τιμών των συντελεστών περίθλασης για τις δύο εναλλακτικές θεωρήσεις.

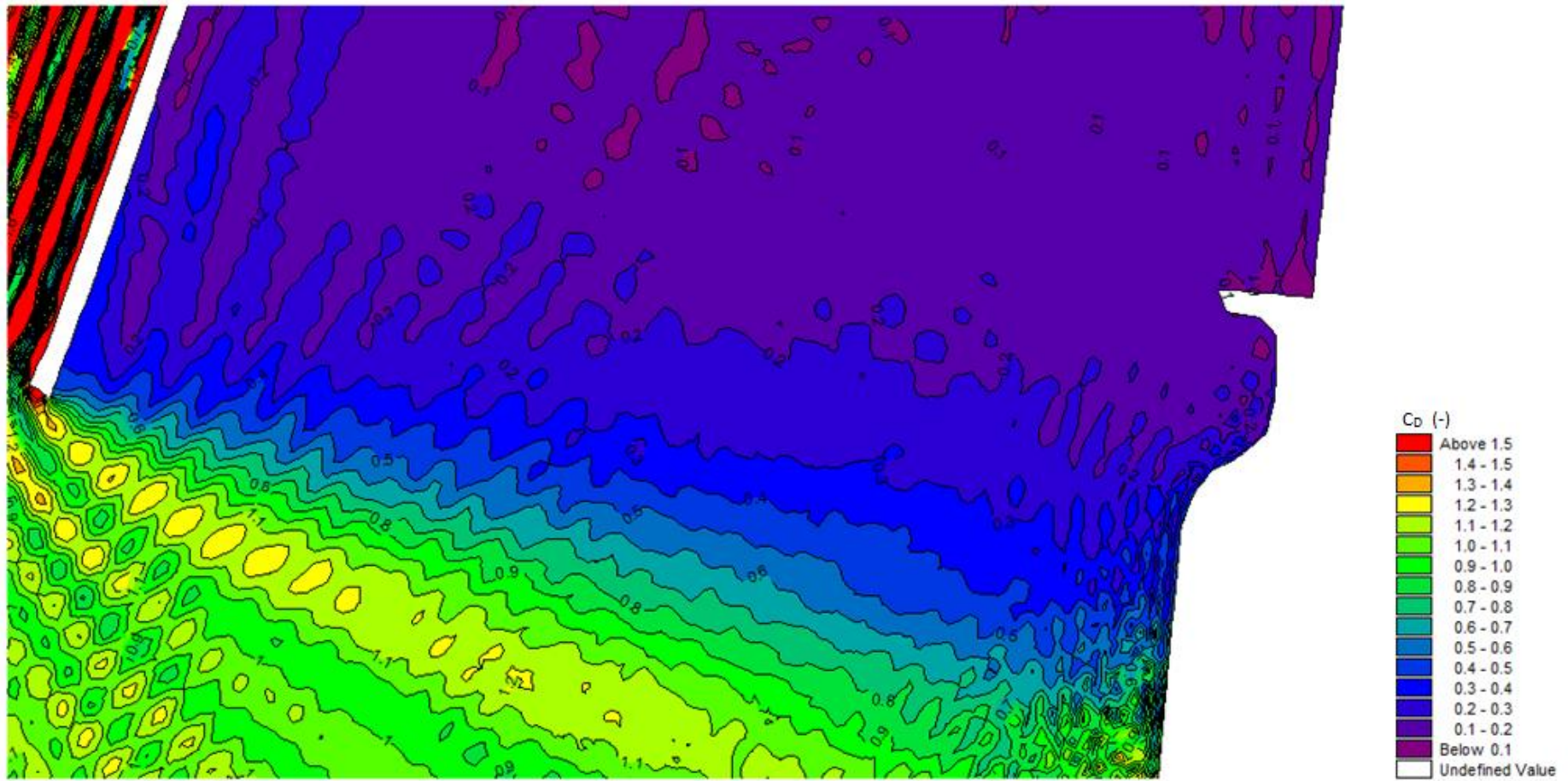
Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου ARTEMIS, εστιασμένα στην προστατευμένη περιοχή του Νότιου άκρου του κυματοθρύστη, για μονοχρωματικούς (Σχήμα 5.18), σύνθετους μονοκατευθυντικούς (Σχήμα 5.19) και σύνθετους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς (Σχήμα 5.20). Τα αποτελέσματα για το ύψος κύματος σε κάθε κελί του καννάβου, έχουν διαιρεθεί με το εισερχόμενο κύμα που συναντάται για την κάθε περίπτωση στο άκρο του κυματοθραύστη (Πίνακας 5.5), παρουσιάζοντας τελικά τον συντελεστή περίθλασης C_d σε επιλεγμένα σημεία εντός της λιμενολεκάνης.

Πίνακας 5.6: Εισερχόμενο χαρακτηριστικό ύψος κύματος στο Νότιο άκρο του κυματοθραύστη

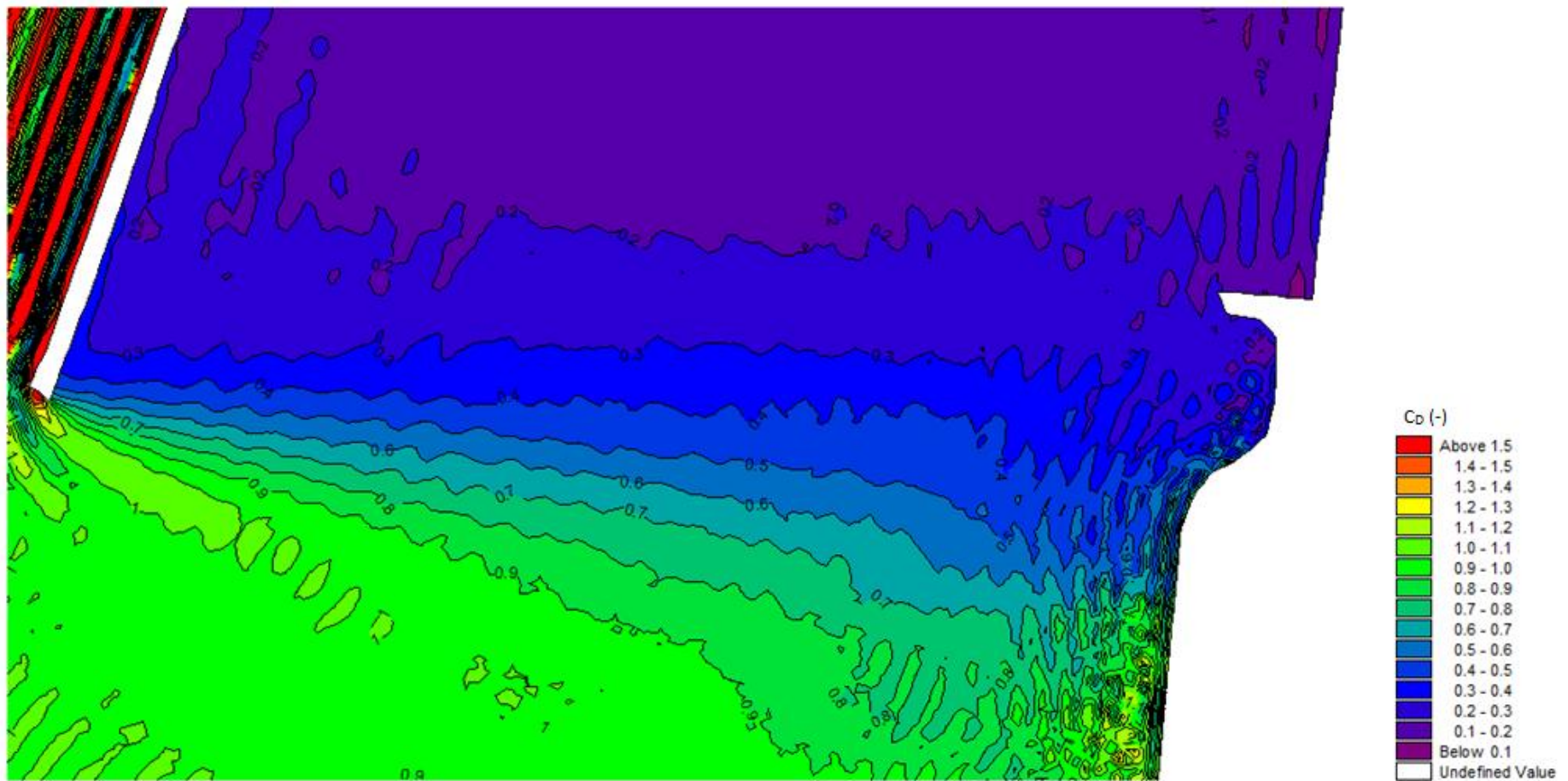
Χαρακτηριστικό ύψος κύματος (H_{m0}) στο άκρο του κυματοθραύστη		
Μονοχρωματικοί κυματισμοί	Σύνθετοι μονοκατευθυντικοί κυματισμοί	Σύνθετοι πολυκατευθυντικοί κυματισμοί
0.328 m	0.326 m	0.358 m



Σχήμα 5.18: Συντελεστής περίθλασης στην προστατευμένη περιοχή του κυματοθραύστη, για μονοχρωματικούς κυματισμούς



Σχήμα 5.19: Συντελεστής περίθλασης στην προστατευμένη περιοχή του κυματοθραύστη, για σύνθετους μονοκατευθυντικούς κυματισμούς



Σχήμα 5.20: Συντελεστής περίθλασης στην προστατευμένη περιοχή του κυματοθραύστη, για σύνθετους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς

Στο Σχήμα 5.18, παρατηρούμε ότι για τους μονοχρωματικούς κυματισμούς στο μοντέλο ARTEMIS, και κατ' επέκταση σε όλα τα μοντέλα ήπιας κλίσης καθώς παρόμοια συμπεριφορά παρουσιάζεται και στο WAVE – L, ενώ προσομοιώνεται ικανοποιητικά το φαινόμενο της περίθλασης, λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας της ανάκλασης των περιοδικών κυματισμών έχουμε αυτή την «αλλοιωμένη» εικόνα στα αποτελέσματα. Παρατηρείται δηλαδή, ότι οι γραμμικοί κυματισμοί παρά το μικρό τους ύψους διαδίδονται στη λιμενολεκάνη, και ανακλώνται διαδοχικά μεταξύ του κυματοθραύστη και των κρηπιδωμάτων προκαλώντας «τεχνητές» εστίες τοπικά αυξημένου ύψους κύματος. Πέραν αυτού του φαινομένου προστίθεται στο περιθλώμενο πεδίο του προσπίπτοντος κυματισμού το περιθλώμενο πεδίο του ανακλώμενου κυματισμού, που στην περίπτωση των μονοχρωματικών κυματισμών συμβαίνει να είναι αυξημένο όπως σχολιάστηκε προηγουμένως.

Στα Σχήματα 5.19 και 5.20 η κατάσταση δείχνει πιο ομαλή, και μπορούμε να παρατηρήσουμε σαφώς τις ισοδυναμικές καμπύλες που προκαλούνται λόγω περίθλασης εντός της λιμενολεκάνης. Είναι εμφανές επίσης ότι στους σύνθετους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς, η κυματική διεύθυνση είναι εντονότερη στην πιο προστατευμένη περιοχή του κυματοθραύστη από την αντίστοιχη των σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών.

Η εξήγηση στο παραπάνω δίνεται από τη θεωρία του ημιντετερμινισμού. Λόγω της πολυκατευθυντικότητας των κυματισμών, κάποιες από τις συνιστώσες του φάσματος διαδίδονται με κατεύθυνση που δεν ταυτίζεται με αυτή της αιχμής του φάσματος, αλλά μπορούν εξίσου να εισδύσουν στην προστατευμένη του περιοχή του κυματοθραύστη και να αυξήσουν τον συντελεστή περίθλασης τοπικά. Σημειώνεται δηλαδή ότι για το φαινόμενο της περίθλασης, η πλέον σημαντική παράμετρος είναι η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών, και ειδικότερα το εύρος της κατευθυντικότητας (F) που ορίζεται σε κάθε περίπτωση.

Συμπερασματικά οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των μονοχρωματικών και των σύνθετων κυματισμών αναφορικά και το φαινόμενο της περίθλασης, οφείλονται κυρίως στην πολυκατευθυντικότητα των τελευταίων, ενώ η χωρική κατανομή των περιθλώμενων κυματισμών επηρεάζεται σημαντικά από τους ανακλώμενους στο πεδίο υπολογισμού, ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου εξετάζεται η διάδοση μονοχρωματικών κυματισμών. Οι τελευταίοι δημιουργούν μη ρεαλιστικά ύψη κύματος εξ ανακλάσεως που συμβάλλουν με τους περιθλώμενους κυματισμούς.

6. Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε ένα ολοκληρωμένο μοντέλο που θα μπορεί να προσφέρει προβλέψεις της κατάστασης της θάλασσας σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Τα εναλλακτικά μοντέλα που παρουσιάστηκαν, κρίνεται ότι μπορούν ικανοποιητικά να περιγράψουν τις φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με τη διάδοση των κυματισμών στην κλίμακα ενός λιμένα.

Η ακρίβεια των προβλέψεων είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, και ιδιαίτερα στηρίζεται στην εγκυρότητα των δεδομένων από τη βάση δεδομένων CMEMS. Προβλέψεις της βάσης που θα απέχουν από την πραγματικότητα, θα μεταφέρουν το σφάλμα και στα αποτελέσματα που θα παρέχονται από το εργαλείο πρόβλεψης των κυματικών συνθηκών στους λιμένες, καθώς οι εσφαλμένες τιμές χρησιμοποιούνται σαν οριακές συνθήκες στα αριθμητικά μοντέλα.

Τα φασματικά κυματικά μοντέλα τρίτης γενιάς που χρησιμοποιήθηκαν σαν εναλλακτικά μοντέλα A, παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη ταύτιση στα αποτελέσματά τους, ειδικά για τη χωρική κατανομή του ύψους κύματος στο πέρας του τριώρου, που είναι και η μεταβλητή που ενδιαφέρει περισσότερο το χρήστη του εργαλείου. Ο χρόνος εκτέλεσης των μοντέλων (ειδικά του μοντέλου TOMAWAC) είναι πολύ μικρός, επιτρέποντας έτσι την παροχή προβλέψεων κυματικών συνθηκών για πολύ μεγάλη χρονική διάρκεια, με αμελητέες απαιτήσεις υπολογιστικής ισχύος.

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου B, που αναλαμβάνει τη διάδοση των κυματισμών εντός της λιμενολεκάνης, είναι πιο σύνθετη διαδικασία. Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, τα γραμμικά μοντέλα ήπιας κλίσης μπορούν ικανοποιητικά να περιγράψουν τα φαινόμενα της περίθλασης και διάθλασης, που κυριαρχούν εντός της λιμενολεκάνης, παρουσιάζουν όμως αβεβαιότητες σχετικές με την έκταση διάδοσης των ανακλώμενων κυματισμών, που λόγω της φύσης τους δεν αποσβαίνουν. Η θεώρηση σύνθετων κυματισμών σαν οριακές συνθήκες του μοντέλου B, είναι ικανή να βελτιώσει τα αποτελέσματα της χωρικής κατανομής του ύψους κύματος στο υπολογιστικό πεδίο, μειώνοντας σημαντικά την περιοχή που εκτείνονται οι ανακλώμενοι κυματισμοί. Όμως η επίλυση σύνθετων κυματισμών συνεπάγεται τη σημαντική αύξηση των υπολογιστικών απαιτήσεων των εν λόγω μοντέλων, ιδίως όταν το πλήθος των κυματικών συνιστωσών αυξηθεί πέραν των 2-3 τέτοιων συνιστωσών.

Για το λιμένα της Πάτρας, και για το τρίωρο που εξετάστηκε, ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για την ηρεμία της λιμενολεκάνης. Αυτό ήταν εμφανές ήδη από την έναρξη της προσομοίωσης, καθώς το ύψος κύματος που χρησιμοποιήθηκε σαν οριακή συνθήκη στα ανοιχτά δεν ξεπερνούσε τα 0.38 m. Λόγω του πολύ μικρού εισερχόμενου κυματισμού, θεωρείται απίθανο να δημιουργηθούν σημαντικές αναταράξεις σε οποιοδήποτε πλοίο που διαπλέι το δίαυλο ναυσιπλοΐας. Ωστόσο το παραπάνω ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από φορείς διαχείρισης λιμένων, ώστε με τις προβλέψεις ύψους κύματος που θα παρέχει, να εκτιμηθεί ο χρόνος διακοπής λειτουργίας των λιμένων και να ανακοινωθούν έγκαιρα

προειδοποιήσεις, σε περίπτωση που βραχυπρόθεσμα αναμένεται να εμφανιστούν σημαντικές αναταράξεις εντός της λιμενολεκάνης.

Συνοψίζοντας, ένα ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης κυματικών συνθηκών στους λιμένες θεωρείται πολύ σημαντικό εργαλείο, με μεγάλο εύρος χρηστών που εκτείνεται από κρατικές υπηρεσίες, μέχρι πλοιοκτήτες, καπετάνιους και επιβάτες πλοίων. Όλα τα εναλλακτικά μοντέλα που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία, μπορούν να επιτελέσουν ικανοποιητικά το σκοπό της παρουσίασης αποτελεσμάτων διαταραχών στη λιμενολεκάνη και έξω από αυτή, σε μια ικανοποιητική χωρική και χρονική κλίμακα.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η επιλογή των καταλληλότερων μοντέλων A και B από τα εναλλακτικά που εξετάστηκαν είναι ένα πολυπαραμετρικό ζήτημα που δεν εξαρτάται μόνο από την ικανότητα του κάθε μοντέλου να περιγράψει τα φαινόμενα της διάδοσης των κυματισμών στην παράκτια ζώνη. Στην επιλογή υπεισέρχονται παράγοντες όπως ο τρόπος διάθεσης του λογισμικού (εμπορικό ή ανοιχτού κώδικα), ο αριθμός τροποποιήσεων που απαιτούνται για να βελτιωθούν τα αποτελέσματα, ο χρόνος προσομοίωσης που απαιτείται για την εκτέλεσή τους, οι απαιτήσεις τους σε υπολογιστική ισχύ (CPU time, RAM usage) κ.τ.λ.

Ιδιαίτερα για το μοντέλο A προτείνεται σε μεταγενέστερο στάδιο να συγκριθούν τα αποτελέσματα για το Νέο Λιμένα Πατρών με μετρήσεις κυματικών χαρακτηριστικών από κατάλληλα τοποθετημένο πλωτήρα. Σε απουσία μετρήσεων σε πραγματικές συνθήκες δεν θα μπορούσε να υπάρξει η κατάλληλη διαδικασία επαλήθευσης και εκτίμησης των αποτελεσμάτων των εναλλακτικών μοντέλων. Η τοποθέτηση ενός μετρητή ανοιχτά και ενός εντός της λιμενολεκάνης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων των μοντέλων A και B αντίστοιχα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η σύγκριση αποτελεσμάτων των μοντέλων με μετρήσεις που θα προέκυπταν κατά τη διάρκεια ακραίων φαινομένων, όπου αναμένονται και μεγαλύτερα σφάλματα στις μετρήσεις των δορυφόρων και στην προσομοίωση του φαινομένου με αριθμητικά μοντέλα.

Όπως σχολιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, σημαντικό ζήτημα που προκύπτει στο μοντέλο B, είναι η διάδοση των ανακλώμενων κυματισμών σε μεγάλη απόσταση από το ίχνος των έργων προστασίας με ανακλαστικές επιφάνειες, όταν οι προσπίπτοντες κυματισμοί είναι γραμμικοί. Η διερεύνηση και κατάστρωση μιας σχέσης για υπολογισμό τροποποιημένου συντελεστή ανάκλασης και τυρβώδους διάχυσης, με κυριότερη εφαρμογή στο μοντέλο WAVE – L, θα μπορούσε δυνητικά να απομειώσει την ενέργεια του ανακλώμενου κυματισμού. Μια τέτοια σχέση για το συντελεστή ανάκλασης θα μπορούσε να είναι η εξάρτησή του από τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου κυματισμού (ύψος και περίοδο) και τον τύπο της διατομής του έργου προστασίας. Όπως προαναφέρθηκε ωστόσο, το παραπάνω είναι ένα εγγενές μειονέκτημα των γραμμικών μοντέλων ήπιας κλίσης, που πρέπει πάραυτα να βελτιωθεί στο πλαίσιο της διερεύνησης των κυματικών συνθηκών και της ηρεμίας λιμενολεκάνης, έστω με τη θεώρηση μονοκατευθυντικών σύνθετων κυματισμών.

Τέλος, θα μπορούσε να εξεταστεί η εφαρμογή ενός εναλλακτικού μοντέλου B που θα βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων Boussinesq. Τα μοντέλα Boussinesq παρουσιάζουν ευρεία εξέλιξη τις τελευταίες δεκαετίες και θεωρούνται από τα πλέον αναλυτικά μοντέλα για την περιγραφή της διάδοσης κυματισμών σε περιβάλλοντα μεταβαλλόμενης βαθυμετρίας. Ωστόσο οφείλει να εξεταστεί κατά πόσον αυτή η οικογένεια μοντέλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο κατάστροφης ενός εργαλείου πρόβλεψης κυματικών συνθηκών σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, καθώς τα μοντέλα Boussinesq είναι πολύ απαιτητικά σε υπολογιστικό χρόνο (απαιτούν διακριτοποίηση $L/70 - L/25$ για την σωστή περιγραφή του ύψους κύματος) και χρησιμοποιούν σχήματα υψηλής τάξεως για την επίλυση των εξισώσεων.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Awk T., 2017, Tomawac User Manual – Version 7.2, France

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, pp 569-587

Benoît M., 1999, Extension of Berkhoff's refraction-diffraction equation for rapidly varying topography (In French) HE-42/99/049/A

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

BS 6349-1:2000, 2000, Maritime structures – Part 1: Code of practice for general criteria, UK

Boccotti P., 2000, Wave Mechanics for Ocean Engineering, Elsevier Oceanography Series, 64

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

Chamberlain, P., and Porter, D., 1995, The modified mild-slope equation. Journal of Fluid Mechanics, 291, pp 393-407.

Christopoulos, S., Avgeris, I., and Karambas, Th. V., 2012, HMAR_HARBOURL: An Integrated Numerical Model for Harbour Layout Design, Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, pp 1243- 1250

CMEMS, 2018, CMEMS-MED-QUID-006-017, France

Copeland, G.J.M., 1985, A Practical Alternative to the Mild-Slope Equation, Coastal Engineering, 9, pp 125-149

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

Dean R.G. and Dalrymple R.A., 1984, Water Mechanics for Engineers and Scientists, Prentice-Hall, Inc., New Jersey

DHI, 2016, MIKE21 SW FM – Spectral Wave Module – Scientific Documentation, Denmark

DHI, 2016, MIKE21 SW FM – Spectral Wave Module – User Guide, Denmark

EDF – R&D, 2009, Telemac Modelling System Theoretical Note and User Manual - Artemis Software Wave agitation Version 6.2, France

Goda Y., 2000, Random Seas and Design of Maritime Structures, Tokyo University Press, Japan

Goda Y. and Suzuki Y., 1976, Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments, Coastal engineering proceedings, 1

Günther H. and Behrens A., 2012, The WAM model. Validation document Version 4.5.4, Intitute of Coastal Research Helmholtz-Zentrum Geesthach (HZG)

Holthuijsen L. H., Herman A. and Booij N., 2003, Phase-decoupled refraction diffraction for spectral wave models, Coastal Engineering, 49, pp 291-305

Holthuijsen L. H., 2007, Waves in Oceaning and Coastal Waters, Cambridge University Press, UK

Karambas, Th.V. and Bowers, E.C., 1996, Representation of partial wave reflection and transmission for rubble mound coastal structures, Hydrosoft 96, Malaysia

Komen G.J, Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S. and Jansen P.A.E.M., 1994, Dynamics and modelling of ocean waves, Cambrigde University Press, UK

Larsen, J., and Dancy, H., 1983, Open Boundaries in Short Wave Simulations – A New Approach, Coastal Engineering, 7, pp 285-297

Lee, C. & Suh, K.D., 1998, Internal generation of waves for time-dependent mild-slope equations, Coastal Engineering, 34, pp 35-57

Lionello, P. Günther H. and Jansen P.A.E.M., 1992, Assimilation of altimeter data in a global third generation wave model, J. Geo-phys. Res., 97, pp 14453–14474

Mitsuyasu H., Tasai F., Suhara T., Mizuno S., Ohkusu M., Honda T. and Rikiishi K., 1975, Observations of the Directional Spectrum Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy, Journal of Physical Oceanography, pp 750-760

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, Trans. A.G.U., V. 30, No. 1

Van Rijn, L.C., 1993, Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications

Vilsmeier R. and Hanel D., 1995, Adaptive Solutions for unsteady laminar flows on unstructured grids, Int. J. Numer. Meth. Fluids., Vol 22,pp 85-101

WAMDI-group, 1988, The WAM model – a third generation ocean wave prediction model, J. Phys. Oceanogr., 18,pp 1775-1810

Watanabe, A. and Maruyama, K., 1986, Numerical modeling of nearshore wave field under combined refraction, diffraction and breaking, Coastal Engineering in Japan, vol. 29, pp. 19-39

Young I.R., 1999, Wind generated Ocean Waves, Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Elsevier

Δασκαλάκης Μ., 2009, Λιμάνια, Θαλάσσια Κύματα, Λιμενικά Έργα, Τόμος Α, Αθήνα

Καραμπάς Θ., Κρεστενίτης Ι. και Κουτίτας Χ., 2015, Ακτομηχανική – Έργα Προστασίας Ακτών, Αθήνα

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

Μέμος Κ., 2008, Λιμενικά Συστήματα, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

Παράρτημα Α – Κώδικες υπολογισμού / Αρχεία εισόδου

- Αρχείο οδήγησης του μοντέλου TOMAWAC

```

/*****
/
/          STEERING FILE
/          TOMAWAC
/
/*****
/-----
/          FILES
/-----
GEOMETRY FILE = 'geo.slf'
BOUNDARY CONDITIONS FILE = 'bounds.cli'
2D RESULTS FILE = 'patra_res1.slf'
FORTRAN FILE = 'user_fortran'
FORMATTED FILE 1= 'wav1.txt'
PUNCTUAL RESULTS FILE = 'patral.spe'
GLOBAL RESULT FILE = 'patra_glo_1.slf'
1D SPECTRA RESULTS FILE = 'patral.txt'
ABSCISSAE OF SPECTRUM PRINTOUT POINTS = 21.706
ORDINATES OF SPECTRUM PRINTOUT POINTS = 38.231
/-----
/ INPUTS - OUTPUTS
/-----
TITLE = 'PATRAS-NEW PORT'
PERIOD FOR GRAPHIC PRINTOUTS = 1
VARIABLES FOR 2D GRAPHIC PRINTOUTS = HM0,DMOY,TPR5,ZF,WD
PERIOD FOR LISTING PRINTOUTS = 10
LIMIT SPECTRUM MODIFIED BY USER = YES
/-----
/ DISCRETISATION
/-----
MINIMAL FREQUENCY = 0.05
FREQUENTIAL RATIO = 1.1007
NUMBER OF FREQUENCIES = 25
NUMBER OF DIRECTIONS = 24
TIME STEP = 10.
NUMBER OF TIME STEP = 360
SPHERICAL COORDINATES = YES
/-----
/ BOUNDARY CONDITIONS
/-----
TYPE OF BOUNDARY DIRECTIONAL SPECTRUM = 6
/BOUNDARY SIGNIFICANT WAVE HEIGHT = 0.35
/BOUNDARY PEAK FREQUENCY = 0.1
/BOUNDARY PEAK FACTOR = 3.3
/BOUNDARY DIRECTIONAL SPREAD 1 = 3.
/BOUNDARY MAIN DIRECTION 1 = 98.
/-----
/ OPTIONS-PARAMETERS
/-----
MINIMUM WATER DEPTH = 0.05
INFINITE DEPTH = NO
CONSIDERATION OF SOURCE TERMS = YES

```



```

CONSIDERATION OF A WIND = NO
BOTTOM FRICTION DISSIPATION = 1
/===== QUADRUPLLET WAVE INTERACTIONS-----
-
NON-LINEAR TRANSFERS BETWEEN FREQUENCIES = 1
/-----
-
/===== BREAKING-----
-
NUMBER OF BREAKING TIME STEPS = 5
/===== 1 : Battjes et Janssen (1978)
/===== 2 : Thornton et Guza (1983)
DEPTH-INDUCED BREAKING DISSIPATION = 1
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 = 0.42
/
&END

```

- Μέρος αρχείου χωρικά μεταβαλλόμενων οριακών συνθηκών στο TOMAWAC

Hmo	Fp	Gamma	Thetal	S1			
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	1	1	
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2791		2
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2550		3
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2676		4
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2258		5
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2603		6
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2545		7
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2606		8
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	968		9
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2634		10
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2256		11
0.425	0.340136054	3.3	147.28	5	2721		12
0.36	0.340136054	3.3	148.81	5	970		13
0.36	0.340136054	3.3	148.81	5	2509		14
0	0	0	0	0	972		15
0	0	0	0	0	975		16
0	0	0	0	0	1197		17
0	0	0	0	0	1399		18
0	0	0	0	0	1439		19
0	0	0	0	0	3		20
0	0	0	0	0	4		21
0	0	0	0	0	6		22
0	0	0	0	0	5		23
0	0	0	0	0	7		24
0	0	0	0	0	8		25
0	0	0	0	0	9		26
0	0	0	0	0	10		27
0	0	0	0	0	11		28
0	0	0	0	0	12		29
0	0	0	0	0	13		30
0	0	0	0	0	14		31
0	0	0	0	0	15		32
0	0	0	0	0	2071		33
0	0	0	0	0	16		34
0	0	0	0	0	17		35
0	0	0	0	0	2266		36
0	0	0	0	0	18		37

```

0 0 0 0 0 19 38
0 0 0 0 0 20 39
0 0 0 0 0 21 40
0 0 0 0 0 1437 41

```

Υπορουτίνα τροποποίησης οριακών συνθηκών στο TOMAWAC – Limwac.f

```

!
! *****
! SUBROUTINE LIMWAC
! *****
!
! &(F      , FBOR  , LIFBOR, NPTFR , NPLAN , NF      , TETA , FREQ
!
! & NPOIN2, NBOR  , AT    , LT    , DDC    , LIMSPE, FPMAXL, FETCHL
!
! & SIGMAL, SIGMBL, GAMMAL, FPICL , HMOL   , APHILL, TETA1L, SPRE1L
!
! & TETA2L, SPRE2L, XLAMD, X ,Y   , KENT   , KSORT , NFO1  , NBI1
!
! & BINBI1, UV    , VV    , SPEULI, VENT   , VENSTA, GRAVIT,
! & PRIVE  , NPRIV , SPEC  , FRA   , DEPTH , FRABL , BOUNDARY_COLOUR
!
! & IMP_FILE)
!
! *****
! ***
! TOMAWAC V6P1 21/06/2011
! *****
! ***
!
! !brief BOUNDARY CONDITIONS.
!
! !warning BY DEFAULT, THE BOUNDARY CONDITIONS SPECIFIED IN THE FILE
! + DYNAM ARE DUPLICATED ON ALL THE DIRECTIONS AND FREQUENC
! IES
!
! !history F. MARCOS (LNH)
! + 01/02/95
! + V1P0
! +
!
! !history N.DURAND (HRW), S.E.BOURBAN (HRW)
! + 13/07/2010
! + V6P0
! + Translation of French comments within the FORTRAN sources into
! + English comments
!
! !history N.DURAND (HRW), S.E.BOURBAN (HRW)
! + 21/08/2010
! + V6P0
! + Creation of DOXYGEN tags for automated documentation and
! + cross-referencing of the FORTRAN sources
!
! !history G.MATTAROLO (EDF - LNHE)
! + 20/06/2011
! + V6P1
! + Translation of French names of the variables in argument
!
! ~~~~~

```

```

~~~~
!| APHILL          |-->| BOUNDARY PHILLIPS CONSTANT
!| AT              |-->| COMPUTATION TIME
!| BINBI1         |-->| BINARY FILE 1 BINARY
!| BOUNDARY_COLOUR|-->| COLOUR OF BOUNDARY POINT (DEFAULT: ITS RANK)
!| DDC            |-->| DATE OF COMPUTATION BEGINNING
!| DEPTH          |-->| WATER DEPTH
!| DEUPI          |-->| 2.PI
!| F              |-->| VARIANCE DENSITY DIRECTIONAL SPECTRUM
!| FBOR           |-->| SPECTRAL VARIANCE DENSITY AT THE BOUNDARIES
!| FETCHL         |-->| BOUNDARY MEAN FETCH VALUE
!| FPICL          |-->| BOUNDARY PEAK FREQUENCY
!| FPMAXL         |-->| BOUNDARY MAXIMUM PEAK FREQUENCY
!| FRA            |-->| DIRECTIONAL SPREADING FUNCTION VALUES
!| FRABL          |-->| BOUNDARY ANGULAR DISTRIBUTION FUNCTION
!| FREQ           |-->| DISCRETIZED FREQUENCIES
!| GAMMAL         |-->| BOUNDARY PEAK FACTOR
!| GRAVIT         |-->| GRAVITY ACCELERATION
!| HM0L           |-->| BOUNDARY SIGNIFICANT WAVE HEIGHT
!| KENT           |--
>| B.C.: A SPECTRUM IS PRESCRIBED AT THE BOUNDARY
!| KSORT          |--
>| B.C.: FREE BOUNDARY: NO ENERGY ENTERING THE DOMAIN
!| LIFBOR         |-->| TYPE OF BOUNDARY CONDITION ON F
!| LIMSPE         |-->| TYPE OF BOUNDARY DIRECTIONAL SPECTRUM
!| LT             |-->| NUMBER OF THE TIME STEP CURRENTLY SOLVED
!| NBI1           |-->| LOGICAL UNIT NUMBER OF THE USER BINARY FILE
!| NBOR           |-->| GLOBAL NUMBER OF BOUNDARY POINTS
!| NF             |-->| NUMBER OF FREQUENCIES
!| NFO1           |--
>| LOGICAL UNIT NUMBER OF THE USER FORMATTED FILE
!| NPLAN          |-->| NUMBER OF DIRECTIONS
!| NPOIN2         |-->| NUMBER OF POINTS IN 2D MESH
!| NPRIV          |-->| NUMBER OF PRIVATE ARRAYS
!| NPTFR          |-->| NUMBER OF BOUNDARY POINTS
!| PRIVE          |-->| USER WORK TABLE
!| SIGMAL         |-->| BOUNDARY SPECTRUM VALUE OF SIGMA-A
!| SIGMBL         |-->| BOUNDARY SPECTRUM VALUE OF SIGMA-B
!| SPEC           |-->| VARIANCE DENSITY FREQUENCY SPECTRUM
!| SPEULI         |--
>| INDICATES IF B.C. SPECTRUM IS MODIFIED BY USER
!| SPRE1L         |-->| BOUNDARY DIRECTIONAL SPREAD 1
!| SPRE2L         |-->| BOUNDARY DIRECTIONAL SPREAD 2
!| TETA          |-->| DISCRETIZED DIRECTIONS
!| TETA1L         |-->| BOUNDARY MAIN DIRECTION 1
!| TETA2L         |-->| BOUNDARY MAIN DIRECTION 2
!| UV, VV         |-->| WIND VELOCITIES AT THE MESH POINTS
!| VENSTA         |-->| INDICATES IF THE WIND IS STATIONARY
!| VENT           |-->| INDICATES IF WIND IS TAKEN INTO ACCOUNT
!| X              |-->| ABSCISSAE OF POINTS IN THE MESH
!| XLAMD         |-->| BOUNDARY WEIGHTING FACTOR FOR ANGULAR
!|                | | DISTRIBUTION FUNCTION
!| Y              |-->| ORDINATES OF POINTS IN THE MESH
!~~~~~
~~~~
!
!   USE INTERFACE_TOMAWAC, EX_LIMWAC => LIMWAC
!   USE DECLARATIONS_TOMAWAC, ONLY : UV2D,VV2D,PROF,FB_CTE,NPB
!   USE DECLARATIONS_SPECIAL
!   IMPLICIT NONE
!

```

```

!      INTEGER LNG, LU
!      COMMON/INFO/ LNG, LU
!
!
!      INTEGER NPLAN, NF, NPOIN2, NPTFR, LT, NPRIV
!      INTEGER, INTENT (IN) :: BOUNDARY_COLOUR (NPTFR)
!
!      DOUBLE PRECISION F (NPOIN2, NPLAN, NF), X (NPOIN2), Y (NPOIN2)
!      DOUBLE PRECISION FBOR (NPTFR, NPLAN, NF), TETA (NPLAN), FREQ (NF)
!      DOUBLE PRECISION UV (NPOIN2), VV (NPOIN2), SPEC (NF), FRA (NPLAN)
!      DOUBLE PRECISION PRIVE (NPOIN2, NPRIV), DDC, DEPTH (NPOIN2)
!      DOUBLE PRECISION HM0L, FPICL, GAMMAL, SIGMAL, SIGMBL, APHILL, FETCHL
!      DOUBLE PRECISION FPMAXL, TETA1L, SPRE1L, TETA2L, SPRE2L, XLAMDL
!      DOUBLE PRECISION GRAVIT, DEUPI, E2FMIN
!
!      DOUBLE PRECISION AT
!
!      LOGICAL SPEULI, VENT, VENSTA
!
!      INTEGER NBOR (NPTFR), LIFBOR (NPTFR), NFO1, NBI1, NPB
!      INTEGER KENT, KSORT, IFF, IPLAN, IPTFR, LIMSPE, FRABL
!
!      DOUBLE PRECISION, ALLOCATABLE :: TRAV (:)
!      DOUBLE PRECISION, ALLOCATABLE :: UV2D (:), VV2D (:), PROF (:)
!      DOUBLE PRECISION, ALLOCATABLE :: FB_CTE (:, :)
!      DOUBLE PRECISION, ALLOCATABLE :: HMOPP (:), FPICPP (:)
!      DOUBLE PRECISION, ALLOCATABLE :: GAMMAPP (:)
!      DOUBLE PRECISION, ALLOCATABLE :: TETA1PP (:), SPRE1PP (:)
!      TYPE (BIEF_FILE), INTENT (IN) :: IMP_FILE
!      LOGICAL FLAG
!
!      CHARACTER*3 BINBI1
!      CHARACTER*10 PPP
!      DOUBLE PRECISION FPMIN, COEF, TET2
!      DOUBLE PRECISION SPR1, SPR2
!      DOUBLE PRECISION XLAM, TET1
!
!      SAVE NPB, UV2D, VV2D, PROF, FB_CTE
!
! *****
! ***
!
!      MODIFIES THE TYPE OF BOUNDARY CONDITION (OPTIONAL)
!
!      TO BE CODED BU THE USER
!
!      LIFBOR (IPTFR) = KENT OR KSORT
!
!      IF (LIMSPE.EQ.0 .AND. .NOT.SPEULI) THEN
!          RETURN
!      ENDIF
!
!      FLAG = .FALSE.
!      IF (VENT .AND. (LIMSPE.EQ.1 .OR. LIMSPE.EQ.2 .OR. LIMSPE.EQ.
3  & .OR. LIMSPE.EQ.5)) THEN
!          FLAG = .TRUE.
!      ENDIF
!
!      THE FIRST TIME, ALLOCATES MEMORY FOR THE USEFUL ARRAYS
!      -----
!      IF (LT.LT.1) THEN

```

```

NPB=1
IF (FLAG) THEN
  ALLOCATE (UV2D(1:NPTFR),VV2D(1:NPTFR))
  NPB=NPTFR
ENDIF
IF (LIMSPE.EQ.7 .OR. SPEULI) THEN
  ALLOCATE (PROF(1:NPTFR))
  NPB=NPTFR
ENDIF
IF (NPB.EQ.1) THEN
  ALLOCATE (FB_CTE(1:NPLAN,1:NF))
ENDIF
ENDIF
IF (.NOT.ALLOCATED(UV2D)) THEN
  ALLOCATE (UV2D(NPTFR))
ENDIF
IF (.NOT.ALLOCATED(VV2D)) THEN
  ALLOCATE (VV2D(NPTFR))
ENDIF
IF (.NOT.ALLOCATED(PROF)) THEN
  ALLOCATE (PROF(NPTFR))
ENDIF
IF (.NOT.ALLOCATED(FB_CTE)) THEN
  ALLOCATE (FB_CTE(1:NPLAN,1:NF))
ENDIF
!
! THE FIRST TIME (AND POSSIBLY SUBSEQUENTLY IF THE WIND IS NOT
! STATIONARY AND IF THE BOUNDARY SPECTRUM DEPENDS ON IT),
! COMPUTES THE BOUNDARY SPECTRUM
! -----
-
IF (LT.LT.1 .OR. (.NOT.VENSTA.AND.FLAG) .OR. SPEULI) THEN
!! IF (LT.LT.1 .OR. (.NOT.VENSTA.AND.FLAG)) THEN
  IF (FLAG) THEN
    DO IPTFR=1,NPTFR
      UV2D(IPTFR)=UV(NBOR(IPTFR))
      VV2D(IPTFR)=VV(NBOR(IPTFR))
    ENDDO
  ENDIF
  IF (LIMSPE.EQ.7 .OR. SPEULI) THEN
! IF(LIMSPE.EQ.7) THEN
    DO IPTFR=1,NPTFR
      PROF(IPTFR)=DEPTH(NBOR(IPTFR))
    ENDDO
  ENDIF
!
! CALLS SPEINI
! -----
-
  E2FMIN = 1.D-30
  DEUPI = 6.283185307D0
  FPMIN = 1.D-4
!
! IF (NPB.EQ.NPTFR) THEN
! CALL SPEINI
! &( FBOR , SPEC , FRA , UV2D , VV2D , FREQ ,
! & TETA , GRAVIT, FPMAXL , FETCHL, SIGMAL, SIGMBL, GAMMAL, FPIC
L,
! & HM0L , APHILL, TETA1L , SPRE1L, TETA2L, SPRE2L, XLAMD,
! & NPTFR , NPLAN , NF , LIMSPE, E2FMIN, PROF , FRABL)

```

```

!      ELSE
!      CALL SPEINI
!      &( FB_CTE, SPEC , FRA , UV2D , VV2D , FREQ ,
!      & TETA , GRAVIT, FPMAXL , FETCHL, SIGMAL, SIGMBL, GAMMAL, FPIC
L,
!      & HM0L , APHILL, TETA1L , SPRE1L, TETA2L, SPRE2L, XLAMDL,
!      & NPB , NPLAN , NF , LIMSPE, E2FMIN, PROF , FRABL )
!      ENDIF
!
!
!      =====
!      TO BE MODIFIED BY USER - RESU CAN BE CHANGED
!      =====
!      IF (SPEULI .AND. (LT.LT.1)) THEN
!      IF (SPEULI) THEN
!      ALLOCATE (HM0PP (NPTFR))
!      ALLOCATE (FPICPP (NPTFR))
!      ALLOCATE (GAMMAPP (NPTFR))
!      ALLOCATE (TETA1PP (NPTFR))
!      ALLOCATE (SPRE1PP (NPTFR))
!      READ (NFO1, *) PPP
!      DO IPTFR=1, NPTFR
!      READ (NFO1, *) HM0PP (IPTFR) , FPICPP (IPTFR) , GAMMAPP (IPTFR)
/
!      &TETA1PP (IPTFR) , SPRE1PP (IPTFR)
!
!      ENDDO
!
!      REWIND (NFO1)
!      EXEMPLE DE MODIFICATION DE FRA -
A MODIFIER SUIVANT VOTRE CAS
!      EXAMPLE OF MODIFICATION OF FRA - TO BE MODIFIED DEPENDING
!      ON YOUR CASE
!      ALLOCATE (TRAV (1:NF))
!
!      DO IFREQ=1, NF
!      IF (FREQ (IFF) .LT. FPIC) THEN
!      TRAV (IFF) = 0.4538D0 * (FREQ (IFF) / FPIC) ** (-2.03D0)
!      ELSE
!      TRAV (IFF) = 0.4538D0 * (FREQ (IFF) / FPIC) ** (1.04D0)
!      ENDIF
!      ENDDO
!
!      DO IPLAN=1, NPLAN
!      DTETA=TETA (IPLAN) -TETA1
!      IF ((TETA (IPLAN) -TETA1) .GT. DEUPI/2) THEN
!      DTETA=DEUPI-DTETA
!      ENDIF
!      DO IFF=1, NF
!      FRA (IPLAN) = 1.D0/SQRT (DEUPI) *TRAV (IFF) *
!      * EXP (-DTETA**2/(2.D0*TRAV (IFF) **2))
!      DO IPTFR=1, NPTFR
!      FBOR (IPTFR, IPLAN, IFF) = SPEC (IFF) *FRA (IPLAN)
!      ENDDO
!      ENDDO
!      ENDDO
!      DEALLOCATE (TRAV)
!
!      PARTIE A SUPPRIMER SI ON FAIT DES MODIFICATIONS
!      DELETE THESE LINES IF MODIFICATIONS HAVE BEEN IMPLEMENTED
!
!      IF (LNG.EQ.1) THEN

```

```

!         WRITE(LU,*) '*****  ERREUR LIMWAC  *****'
!         WRITE(LU,*)
!     &     ' VOUS NE MODIFIEZ PAS LE SPECTRE AUX LIMITES ALORS QUE'
!         WRITE(LU,*) ' VOUS EN DEMANDEZ LA POSSIBILITE'
!     ELSE
!         WRITE(LU,*) '*****  ERROR LIMWAC  *****'
!         WRITE(LU,*)
!     &     ' YOU DID NOT MODIFY THE BOUNDARY SPECTRUM WHEREAS '
!         WRITE(LU,*) ' YOU ASK FOR THAT '
!     ENDIF
!     STOP
! ENDIF
!
!
! =====
! END OF USER MODIFICATIONS
! =====
! ENDIF
!
!
! -----
!
! Duplicates the boundary condition from DYNAM on all the
! directions and frequencies, if liquid boundary
! -----
!
IF (FLAG .OR. LIMSPE.EQ.7 .OR. SPEULI) THEN
  DO IPTFR=1,NPTFR
!     WRITE(LU,*) IPTFR,'je suis dans la deuxieme boucle'
!         IF (LIFBOR(IPTFR).EQ.KENT) THEN
!             HMOL=HMOPP(IPTFR)
!             FPICL=FPICPP(IPTFR)
!             TETA1L=TETA1PP(IPTFR)
!             SPRE1L=SPRE1PP(IPTFR)
!!.....COMPUTES THE FREQUENCY SPECTRUM (JONSWAP)
COEF=0.0624D0/(0.230D0+0.0336D0*GAMMAL-0.185D0/(1.9D0+GAMMAL))
&     *(DEUPI*FPICL)**4*HMOL*HMOL/GRAVIT**2
!
!         CALL SPEJON
& ( SPEC ,  FREQ ,  NF ,  COEF ,  FPICL,  GAMMAL ,  SIGMAL,  SIGMBL,
& DEUPI ,  GRAVIT,  E2FMIN,  FPMIN )
IF(IPTFR .EQ. 251 .AND. (LT.LT.1)) THEN
  write(LU,*) IPTFR
  write(LU,*) 'HMOL :',HMOL,'FPICL :',FPICL,'GAMMAL :',GAMMAL
write(LU,*) 'SIGMAA :',SIGMAL,'SIGMAB :',SIGMBL
  write(LU,*) 'spec :', SPEC
  write(LU,*) 'freq :', FREQ
  ENDIF
!!
!!.....COMPUTES THE DIRECTIONAL SPREADING FUNCTION
!!
!!
SPR1=SPRE1L
TET1=TETA1L*DEUPI/360D0
SPR2=SPRE2L
TET2=TETA2L*DEUPI/360D0
XLAM=XLAMD
IF(FRABL.EQ.2) THEN
  CALL FSPRD2
&(FRA ,  TETA ,  NPLAN ,  SPR1 ,  TET1 ,  SPR2 ,  TET2 ,  XLAM )
ELSEIF(FRABL.EQ.3) THEN
  CALL FSPRD3
&(FRA ,  TETA ,  NPLAN ,  SPR1 ,  TET1 ,  SPR2 ,  TET2 ,  XLAM )

```

```

                ELSE
                    CALL FSPRD1
                    &(FRA , TETA , NPLAN , SPR1 , TET1 , SPR2 , TET2 , XLAM )
                    ENDF
!
!             IF(IPTFR .EQ. 251 .AND. (LT.LT.1)) THEN
!             write(LU,*) IPTFR
! write(LU,*) 'SPR1 :',SPR1,'TET1 :',TET1,'XLAM :',XLAM
!             write(LU,*) 'fra :', FRA
!             write(LU,*) 'teta :', TETA
!             ENDF
                    DO IFF=1,NF
                        DO IPLAN=1,NPLAN
                            F(NBOR(IPTFR),IPLAN,IFF)=SPEC(IFF)*FRA(IPLAN)
                        ENDDO
                    ENDDO
                ENDF
            ENDDO
        ENDF
!-----
!-----
!
        RETURN
        END

```


- Αρχείο οδήγησης μοντέλου ARTEMIS – μονοχρωματικοί κυματισμοί

```

/-----
-
/ ARTEMIS
/ AGITATION IN PORT PATRAS - REGURAL WAVES
/-----
-
/
/-----
-
/ FILES
/-----
-
/
/
RESULTS FILE           ='r2d_patra_full_reg.slf'
/
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='bounds_refl.cli'
/
GEOMETRY FILE          ='geo_utm_2.slf'
/
/TOMAWAC DATA FILE 1   ='patra3_utm.spe'
/
/-----
-
/ INPUTS, GENERALS
/-----
-
/
TITLE = 'WAVE AGITATION IN PORT PATRAS'
/
/LATITUDE OF ORIGIN POINT = 21.711
/LONGITUDE OF ORIGIN POINT = 38.229
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
/
GAMMA = 3.3
/
/
WAVE PERIOD = 4.29
/
DIRECTION OF WAVE PROPAGATION : -13.667
/
S EXPONENT = 10
/
AUTOMATIC CALCULATION OF PHASE : YES
REFERENCE WATER DEPTH FOR AUTOMATIC PHASE = 36.4686
PHASE REFERENCE COORDINATES = 562123.745;4232536.362
/
PRECONDITIONING : 2
DISSIPATION RELAXATION : 0.25

```

- Αρχείο οδήγησης μοντέλου ARTEMIS – μονοκατευθυντικοί σύνθετοι κυματισμοί

```

/-----
-
/ ARTEMIS
/ AGITATION IN PORT PATRAS - MONODIRECTIONAL RANDOM WAVE
/-----
-
/
/-----
-
/ FILES
/-----
-
/
/
RESULTS FILE           ='r2d_patra_full_monodir.slf'
/
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='bounds_refl.cli'
/
GEOMETRY FILE          ='geo_utm_2.slf'
/

```

```

/TOMAWAC DATA FILE 1      ='patra3_utm.spe'
/
/-----
-
/ INPUTS, GENERALS
/-----
-
/
TITLE =' WAVEAGITATION IN PORT PATRAS'
/
/LATITUDE OF ORIGIN POINT = 21.711
/LONGITUDE OF ORIGIN POINT = 38.229
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 : 4.29
/
MINIMUM SPECTRAL PERIOD : 3.99
MAXIMUM SPECTRAL PERIOD : 4.31
NUMBER OF PERIODS : 6
/
GAMMA = 3.3
DIRECTION OF WAVE PROPAGATION : -13.667
/
S EXPONENT = 10
/
AUTOMATIC CALCULATION OF PHASE : YES
REFERENCE WATER DEPTH FOR AUTOMATIC PHASE = 36.4686
PHASE REFERENCE COORDINATES = 562123.745;4232536.362
/
PRECONDITIONING : 2
DISSIPATION RELAXATION : 0.25

```

- Αρχείο οδήγησης μοντέλου ARTEMIS - πολυκατευθυντικοί σύνθετοι κυματισμοί

```

/-----
-
/ ARTEMIS
/ AGITATION IN PORT PATRAS - MULTIDIRECTIONAL RANDOM WAVE
/-----
-
/
/-----
-
/ FILES
/-----
-
/
/
RESULTS FILE           ='r2d_patra_full_multidir.slf'
/
BOUNDARY CONDITIONS FILE ='bounds_refl.cli'
/
GEOMETRY FILE          ='geo_utm_2.slf'
/
/TOMAWAC DATA FILE 1   ='patra3_utm.spe'
/
/-----
-
/ INPUTS, GENERALS
/-----
-
/
TITLE = 'WAVE AGITATION IN PORT PATRAS'
/
/LATITUDE OF ORIGIN POINT = 21.711
/LONGITUDE OF ORIGIN POINT = 38.229
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
/
MULTIDIRECTIONAL RANDOM WAVE = YES
/
GAMMA = 3.3
/
PEAK PERIOD : 4.29
/
MINIMUM SPECTRAL PERIOD : 3.99
MAXIMUM SPECTRAL PERIOD : 4.31
NUMBER OF PERIODS : 6
/
GAMMA = 3.3
/
MINIMUM ANGLE OF PROPAGATION : -20.167
MAXIMUM ANGLE OF PROPAGATION : 4.73
DIRECTION OF WAVE PROPAGATION : -13.667
/
S EXPONENT = 10
/
AUTOMATIC CALCULATION OF PHASE : YES

```

```

REFERENCE WATER DEPTH FOR AUTOMATIC PHASE = 36.4686
PHASE REFERENCE COORDINATES = 562123.745;4232536.362
/
PRECONDITIONING : 2
DISSIPATION RELAXATION : 0.25

```

- Υπολογιστικός κώδικας μοντέλου WAVE – L

```

c      Th. V. Karambas and C. Koutitas
c      Hyperbolic type 'mild slope' equations
c      based on Yu-Isobe-Watanabe paper (CEJ, 1992)
c      refraction-diffraction-reflection inside harbours

```

```
implicit real*8 (a-h,o-z)
```

```
parameter (ijm=2000,iim=2000)
```

```

c      u and v are the velocities
c      z is the elevation
c      d is the depth
c      c is the linear theory celerity

```

```

dimension u(ijm,iim),v(ijm,iim),vn(ijm,iim)
dimension uc(ijm,iim),vc(ijm,iim), thitn(ijm,iim)
dimension dnmax(ijm,iim), H(ijm,iim)
dimension z(ijm,iim),c(ijm,iim),un(ijm,iim)
dimension d(ijm,iim),r(ijm), icod(ijm,iim)
dimension ed(ijm,iim),edr(ijm,iim),frrl(ijm,iim)
dimension umax(ijm,iim),vmax(ijm,iim)
dimension edrl(ijm,iim),fr(ijm,iim)
dimension sumx1(ijm,iim), sumy1(ijm,iim)
dimension sum2(ijm,iim), sum3(ijm,iim),sum4(ijm,iim)
dimension sumz(ijm,iim), sumxy(ijm,iim), an(ijm,iim)
dimension qbm(ijm,iim), qbmax(ijm,iim),ze(ijm,iim)
dimension Hrms(ijm,ijm), sumu(ijm,iim), sumv(ijm,iim)
dimension sigu(ijm,ijm), sigv(ijm,iim), thita(ijm,iim)
dimension amflx(ijm,iim), amfly(ijm,iim)

```

```

c      Ho:      wave height
c      dt, dx:  time and space step
c      per:     the period
c      d        water depth
c      im, jm:  max number of grids (x and y)
c      tend:    time in which the programme stops

```

```

c      c is the celerity
c      dnmax the max elevation
c      at each point

```

```

write (*,*) ' ~~~~~~'
write (*,*) ' ~ Th. V. Karambas and C. Koutitas ~'
write (*,*) ' ~ Hyperbolic type "mild slope" equations ~'
write (*,*) ' ~ Refraction-diffraction-reflection ~'
write (*,*) ' ~ of linear monochromatic waves inside ~'
write (*,*) ' ~ port and harbours ~'
write (*,*) ' ~ ~'
write (*,*) ' ~ Ho:      wave height ~'

```

```

write (*,*) ' ~ dt, dx: time and space step ~'
write (*,*) ' ~ T: the period ~'
write (*,*) ' ~ im, jm: max number of grids (x and y) ~'
write (*,*) ' ~ tend: time in which the programme stops ~'
write (*,*) ' ~ angle: the incident wave angle (in rad) ~'
write (*,*) ' ~ ~'

write (*,*) ' ~ Input file: ~'

write (*,*) ' ~ "depth.dat" (depth and boundary file) ~'
write (*,*) ' ~ ~'
write (*,*) ' ~ Output files: ~'

write (*,*) ' ~ "height.dat" (wave height) ~'

write (*,*) ' ~ "section.dat" (wave height in sections ~'
write (*,*) ' ~ x=im/4, x=im/2 and x=3im/4) ~'

write (*,*) ' ~ "elev.dat" (surface elevation) ~'

write (*,*) ' ~~~~~~'

data Ho,per,dt,dx,fin,tend/0.35,4.292,0.20,2.,0.2385,500/
data slope/50.0/
aLo=9.81*per**2/2./3.14159
gamma=.5+sqrt(Ho/aLo)
c if periodic gamma=.85+sqrt(Ho/aLo)
c gamma=1.5+sqrt(Ho/aLo)
gamma=1.+sqrt(Ho/aLo)

jm=700
im=925
tna=1./slope

a1=(2.2+2.*tanh(55*tna))*tanh((1.6*tna**(-1.5)+25)*Ho/aLo)
& +30*tna**.1*Ho/aLo
a2=9.5*(Ho/aLo)**(-.5)+10

dhr=-.25
dhs=.08

dhr=-.1*Ho
dhs=.25*Ho

pi=3.141593

omega=2.*pi/per
sigma=omega

c read the depth

open (unit=20,file='depth.dat')
open (unit=19,file='eddy.txt')

```

```

open (unit=41,file='depthsout.txt')

write (*,*) 'reading depth.txt file'

c      read(19,*) im,jm
c      do j=1,jm
c          read (19,*) jaa
c          write (*,*) jaa
c          read (19,*) (edrl(i,j),i=1,im)
c          end do
c      close (19)
c      edrl=0
c      read (20,*) im,jm
c      do j=1,jm
c          read (20,*) ja
c          write (*,*) ja
c          read (20,*) (d(i,j),i=1,im)
c      end do

      do j=1,jm
      read (20,*) (d(i,j), i=1,im)
      end do

      d=-d

      do j=1,jm
      do i=1,im
c      write (*,*) j
      write (41,*) float(i)*dx,float(j)*dx, d(i,j)
      end do
      end do

c256      format (800f15.6)
c      OPEN(13,FILE='vel.dat')

      open (unit=71,file='anipsosi.dat')
      open (unit=85,file='heightsurfer.dat')
      open (unit=86,file='depthsurfer.dat')
      open (unit=87,file='heightmatrix.txt')
      open (unit=88,file='depthmatrix.dat')
      open (unit=98,file='elevationmatrix.dat')

      open (unit=89,file='heightmatrix600.txt')
      open (unit=90,file='heightmatrix700.txt')
      open (unit=91,file='heightmatrix800.txt')
      open (unit=92,file='heightmatrix900.txt')

c      do j=21,JM
c      do i=1,IM

c      read (13,*) ai,aj,Uc(i,j),Vc(i,j),ze(i,j)

c      end do
c      end do
c      close (13)

      open (unit=3,file='thita.dat')
c      do j=1,jm
c      read (3,*) ja
c      do i=1,im

```



```

c   read (3,*) ia,thitn(i,j),aa,bb
c       end do
c       end do
c       close (3)

do j=1,jm
do i=1,im
c   edrl(i,j)=0.
    Uc(i,j)=0.
    Vc(i,j)=0.
    ze(i,j)=0.
end do
end do

do j=1,jm
do i=1,im
c   edr(i,j)=edrl(i,j)
c   edr(i,j)=0.
c   frrl(i,j)=edrl(i,j)
end do
end do

c open(unit=18,file='see.dat')
c do i=1,im,3
c do j=1,jm,3
c write (18,6)i*dx,j*dx,d(i,j)
c end do
c end do
c close (18)
c stop

OPEN(13,FILE='icod.txt')

do j=1,jm
read (13,*) (icod(i,j), i=1,im)
end do

c   icod=0.

256 format (440f15.6)
c       DO 200 J=1,JM
c       read (13,*) ija

c       READ(13,*) (icod(I,J),I=1,IM)

c200    continue
c       CLOSE(13)

do i=1,im
do j=1,jm
d(i,j)=d(i,j)
c   +ze(i,j)
if (d(i,j).gt.dhr.and.d(i,j).lt.dhs) d(i,j)=dhs
if (d(i,j).le.dhr) icod(i,j)=1
end do

```

```

end do

do j=1,jm
write (88,211) (d(i,j), i=1,im)
end do

do j=1,jm
do i=1,im
disx=i*dx
disy=j*dx
write (86,211) disx, disy, d(i,j)
end do
end do

c      do j=1,jm
c      write (*,*) d(im/2,j)
c      end do

write (*,*)
write (*,*)
write (*,*) '~~~~~'
write (*,*) '~      the program is now running !!!      ~'
write (*,*) '~'

write (*,*) '~~~~~'
write (*,*) '~~~~~'

write (*,*) '   Time in secs'

do 30 i=1,im
do 30 j=1,jm
u(i,j)=0.0
v(i,j)=0.0
z(i,j)=0.0
un(i,j)=0.0
vn(i,j)=0.0
umax(i,j)=0.
vmax(i,j)=0.
dnmax(i,j)=0.0
qbmmax(i,j) =0.
qbm(i,j)=0.
30      continue

c      lo=aleno
c      aleno=9.81*(per**2)/2.0/3.14

c      solving the linear dispersion relation
c      to estimate celerity c

do 876 j=1,jm
do 876 i=1,im

if (icod(i,j).eq.1) goto 876

aleno=aleno
39      alenp=alen

```

```

akapa=2*3.14/alenp
akd=akapa*d(i, j)
alen = aleno *tanh(akd)
dlen = abs(alen - alenp)
if (dlen.gt.0.001) goto 39

c(i,j)=9.81*per/(2*3.14)*tanh(akd)
an(i,j)=0.5*(1+2*akd/sinh(2*akd))

```

876 **continue**

```

      jst=30
      jfin=2*jst
      delta=.3
      aln=c(im/2,jst)*per
      wa=delta*aln/2.
      bta=80./((delta*aln)**2)

      do j=1,jm-1
      do i=1,im-1

      if (icod(i,j+1).eq.1) then
      c(i,j+1)=c(i,j)
      an(i,j+1)=an(i,j)
      else
      end if

      if (icod(i+1,j).eq.1) then
      c(i+1,j)=c(i,j)
      an(i+1,j)=an(i,j)
      else
      end if

      end do
      end do

      t=0.0
      n=0
40    t=t+dt
      n=n+1

c
c      continuity equation
c
      do 100 j=1,jm-1
      do 100 i=1,im-1

      if (icod(i,j).eq.1) then
      z(i,j)=0.0
      goto 100
      else
      end if

      q1=.5*(d(i,j)+d(i+1,j))*u(i+1,j)
      q2=.5*(d(i,j)+d(i-1,j))*u(i,j)

```

```

ux=(q1-q2)/dx

p1=.5*(d(i,j)+d(i,j+1))*v(i,j+1)
p2=.5*(d(i,j)+d(i,j-1))*v(i,j)
vy=(p1-p2)/dx

z(i,j)=z(i,j)-dt*(ux+vy)

100      continue

c
c      momentum equations (x and y)
c
do 120 j=2,jm-1

do 120 i=2,im-1

if (icod(i,j).eq.1.or.icod(i-1,j).eq.1) then
un(i,j)=0.0
goto 120
else

end if

zcx=(an(i,j)*z(i,j)-an(i-1,j)*z(i-1,j))/dx
cm=.5*(c(i,j)+c(i-1,j))
anm=.5*(an(i,j)+an(i-1,j))
dm=.5*(d(i,j)+d(i-1,j))
edm=.5*(ed(i,j)+ed(i-1,j))

uxx=(u(i+1,j)-2*u(i,j)+u(i-1,j))/dx**2
uyy=(u(i,j+1)-2*u(i,j)+u(i,j-1))/dx**2

un(i,j)=u(i,j)-dt*cm**2*zcx/dm/anm+
! edm*dt*uxx+ed(i,j)*dt*uyy-dt*fr(i,j)*omega*u(i,j)

120      continue

do 121 j=2,jm-1
do 121 i=2,im-1

if (icod(i,j).eq.1.or.icod(i,j-1).eq.1) then
vn(i,j)=0.0
goto 121
else

end if

zcy=(an(i,j)*z(i,j)-an(i,j-1)*z(i,j-1))/dx
cm=.5*(c(i,j)+c(i,j-1))
anm=.5*(an(i,j)+an(i,j-1))
dm=.5*(d(i,j)+d(i,j-1))
edm=.5*(ed(i,j)+ed(i,j-1))

vxx=(v(i+1,j)-2*v(i,j)+v(i-1,j))/dx**2
vyy=(v(i,j+1)-2*v(i,j)+v(i,j-1))/dx**2

```

```

vn(i,j)=v(i,j)-dt*cm**2*zcy/dm/anm+
!   edm*dt*(vxx+vyy)-dt*fr(i,j)*omega*v(i,j)

121   continue

c     do i=1,im
c     do j=1,jm
c     if (d(i,j).gt..01) then
c     uv=(umax(i,j)**2+vmax(i,j)**2)
c     uv1=(.7*c(i,j))**2
c     uv=H(i,j)
c     uv1=d(i,j)
c     Qb=1.-exp(-(uv/uv1)**10)
c     if (Qb.gt.1) Qb=1.
c     dis=Qb*2.*(9.81*(H(i,j)**2)/8.)/per
c     ed(i,j)=edr(i,j)+7.*d(i,j)*dis**.333333
c     ed(i,j)=7.*d(i,j)*dis**.333333
c     else
c     end if
c     end do
c     end do

c     input of the wave surface elevation

do 81 i=25,im-25
c   jv1=int(tan(fin)*(i-20))+20
c   jv1=26
c     write (*,*) i,jv1
c     cel=c(i,jv1)
c     tf=tan(fin)*i*dx/cel
c     tf=0
c     if (icod(i,jv1).eq.1) then
c       zin=0.
c     else
c       zin=Ho/2.*sin(2*pi*(t-tf)/per)*cel*dt/dx*cos(fin)
c     end if

z(i,jv1)=z(i,jv1)+2.0*zin*tanh(t/per/10.)

81   continue
c   do 82 i=2,im-1
c   jv2=int(tan(fin)*(i-20))+21
c   jv2=31
c   cel=c(i,jv2)
c   tf=tan(fin)*i*dx/cel
c   tf=0
c   zin=Ho/2.*sin(2*pi*(t-tf)/per)*cel*dt/dx*cos(fin)
c82   z(i,jv2)=z(i,jv2)+zin

write (*,*) t

do i=1,IM
  if (icod(i,j).eq.0) then
VN(i,1)=(1.-r(i))*V(i,1)+r(i)*V(i,2)
Z(i,1)=-d(i,1)*VN(I,1)/c(i,1)

```

```

else
VN(i,1)=0
Z(i,1)=0
end if

end do
do i=1,IM
UN(i,1)=UN(i,2)
end do
do i=1,IM
dven=V(i,3)-V(i,2)
if (ABS(dven).lt..0001) goto 207
r(i)=(VN(i,2)-V(i,2))/dven
if (r(i).gt..99) r(i)=.99
if (r(i).lt.0.) goto 207
goto 60
207 r(i)=0.0
60 end do

do j=1,jm
un(1,j)=u(2,j)
vn(1,j)=vn(2,j)
end do

c      boundary condition  sponge layer

c      West b. c.
350 do 165 j=1,jm
do 165 i=25,2,-1
ml1=i-25
ml2=-25.0
rm=exp((1.06**(ml1)-1.06**(ml2))*2.)
z(25-i,j)=z(25-i,j)/rm
vn(25-i,j)=vn(25-i,j)/rm
165 un(25-i,j)=un(25-i,j)/rm
ims1=im-10
c      do 175 j=1,jm
c      do 175 i=40,20,-1
c      ml1=20-i
c      ml2=-20.0
c      rm=exp((1.8**(ml1)-1.8**(ml2))*1.6)
cc write(*,*) i,rm
c      z(i,j)=z(i,j)/rm
c      vn(i,j)=vn(i,j)/rm
c175 un(i,j)=un(i,j)/rm

c      South b.c.
do 665 i=1,im
do 665 j=1,25
ml1=j-25
ml2=-25.0
rm=exp((1.06**(ml1)-1.06**(ml2))*2.)
z(i,25-j)=z(i,25-j)/rm
vn(i,25-j)=vn(i,25-j)/rm
665 un(i,25-j)=un(i,25-j)/rm
c do 675 i=1,im
c do 675 j=20,10,-1
c ml1=10-j
c ml2=-10

```

```

c   rm=exp((1.8**(m11)-1.8**(m12))*1.6)
c   z(i,j)=z(i,j)/rm
c   vn(i,j)=vn(i,j)/rm
c675   un(i,j)=un(i,j)/rm

c       North b.c.
c       do 667 i=1,im
c       do 667 j=jm-25,jm
c       m11=j-jm
c       m12=-25.0
c       rm=exp((1.06**(m11)-1.06**(m12))*2.)
c       z(i,j)=z(i,j)/rm
c       vn(i,j)=vn(i,j)/rm
667   un(i,j)=un(i,j)/rm
c       jms1=jm-10
c       do 677 i=1,im
c       do 677 j=jm,jms1,-1
c       m11=j-jm
c       m12=-10
c       rm=exp((1.8**(m11)-1.8**(m12))*1.6)
c       z(i,j)=z(i,j)/rm
c       vn(i,j)=vn(i,j)/rm
c677   un(i,j)=un(i,j)/rm

c       East b.c.
c       do 668 j=1,jm
c       do 668 i=im-25,im
c       m11=i-im
c       m12=-25.0
c       rm=exp((1.06**(m11)-1.06**(m12))*2.)
z(i,j)=z(i,j)/rm
c       vn(i,j)=vn(i,j)/rm
668   un(i,j)=un(i,j)/rm
c       ims1=im-10
c       do 679 j=1,jm
c       do 679 i=im,ims1,-1
c       m11=i-im
c       m12=-10
c       rm=exp((1.8**(m11)-1.8**(m12))*1.6)
c       z(i,j)=z(i,j)/rm
c       vn(i,j)=vn(i,j)/rm
c679   un(i,j)=un(i,j)/rm

c   write (*,*) t

c       do 405 i=1,im
c       do 405 j=1,jm
c       u(i,j)=un(i,j)
405   v(i,j)=vn(i,j)

c       do i=1,im
c       do j=1,jm

c       if (icod(i,j).eq.0) then
c       uv=(umax(i,j)**2+vmax(i,j)**2)
c       uv1=(.7*c(i,j))**2
c       uv=(2.*dnmax(i,j))**2
c       uv1=(gamma*d(i,j))**2
c       Qb=1.-exp(-(uv/uv1)**10)

```

```

c  if (Qb.lt..001) Qb=0.
    if (Qb.gt.1.) Qb=1.

qbm(i,j)=Qb

He=2.*dnmax(i,j)
if (d(i,j).lt.dhs) He=dhs

    dis=Qb*2.*(9.81*(He**2)/8.)/per

hd=d(i,j)
sb=abs(d(i,j+1)-d(i,j-1))/2./dx
alf=2.*.333*sb*per*sqrt(9.81/hd)
if (alf.lt.1.) alf=1.
    alf=1.
dis=dis*alf

c  if (j.le.72) dis=0.

c  aL=c(i,j)*per
c  Hmax=.14*aL*tanh(.91*2.*pi*d(i,j)/aL)
c  Hmax=.8*d(i,j)
c  HeHm=He/Hmax
c  Qb=1.785*HeHm**3-.28*HeHm**2-.738*HeHm+.235
c  if (HeHm.le..43) Qb=0.
c  if (HeHm.ge.1.) Qb=1.
c  dis=Qb*9.81*Hmax**2/4./per

c  Hmax=.55*d(i,j)
c  dis=.4*9.81*(He**2-Hmax**2)/per
c  if (dis.lt.0) dis=0.
c  if (d(i,j).le.dhs) dis=2.*(9.81*(dhs**2)/8.)/per
c  ed(i,j)=edr(i,j)+7.*d(i,j)*dis**.333333

    ed(i,j)=edr1(i,j)+12.*He*dis**.333333

c  if (d(i,j).le.dhs) ed(i,j)=.5*dhs*sqrt(9.81*dhs)
c  if (d(i,j).le.1.1*dhs) ed(i,j)=.3*d(i,j)*sqrt(9.81*d(i,j))
c  ed(i,j)=0.
c  fr(i,j)=frr1(i,j)+2.5/slope*sqrt(9.81/d(i,j))*Qb
c  fr(i,j)=frr1(i,j)+2.5/slope*sqrt(9.81/d(i,j))*Qb
c  fr(i,j)=0.
c  if (edr(i,j).gt.ed(i,j)) ed(i,j)=edr(i,j)
c  if (ed(i,j).gt.18.) ed(i,j)=18.
    else
    end if
    end do
    end do

do j=2,jm-1
do i=2,im-1
ed(i,j)=
    &.25*ed(i-1,j)+.25*ed(i+1,j)+.25*ed(i,j-1)+.25*ed(i,j+1)
end do
end do

do j=2,jm-1

```



```

do i=2,im-1
ed(i,j)=
  &.25*ed(i-1,j)+.25*ed(i+1,j)+.25*ed(i,j-1)+.25*ed(i,j+1)
end do
end do

do 185 j=1,jm
do 185 i=1,im

aL=c(i,j)*per
coef=1.+a1*exp(-a2*d(i,j)/aL)
coef=1.

if (icod(i,j).eq.1) goto 185
  if (coef*z(i,j).gt.dnmax(i,j)) then
    dnmax(i,j) = coef*z(i,j)
  else
    end if

  if (u(i,j).gt.umax(i,j)) then
    umax(i,j) = u(i,j)
  else
    end if
  if (v(i,j).gt.vmax(i,j)) then
    vmax(i,j) = v(i,j)
  else
    end if
185 continue

```

```

nper=int(3.*per/dt)
nendh=int(tend/dt-nper)

if (n.ge.nendh) then
do 110 i=2,im-1
do 110 j=2,jm-1

rx=.5*(u(i,j)+u(i+1,j))*(d(i,j)+z(i,j))
ry=.5*(v(i,j)+v(i,j+1))*(d(i,j)+z(i,j))

rx1=u(i+1,j)*.5*(d(i+1,j)+d(i,j)+z(i+1,j)+z(i,j))
rx2=u(i,j)*.5*(d(i-1,j)+d(i,j)+z(i-1,j)+z(i,j))
ry1=v(i,j+1)*.5*(d(i,j+1)+d(i,j)+z(i,j+1)+z(i,j))
ry2=v(i,j)*.5*(d(i,j-1)+d(i,j)+z(i,j-1)+z(i,j))

drx=(rx1-rx2)/dx
dry=(ry1-ry2)/dx

sumx1(i,j)=sumx1(i,j)+rx**2
sumy1(i,j)=sumy1(i,j)+ry**2

sum2(i,j)=sum2(i,j)+(drx+dry)**2

sum3(i,j)=sum3(i,j)+rx*(drx+dry)
sum4(i,j)=sum4(i,j)+ry*(drx+dry)

sumz(i,j)=sumz(i,j)+z(i,j)**2

```

```

sumxy(i,j)=sumxy(i,j)+rx*ry
all=c(i,j)*per
akd=2*pi*d(i,j)/all
ub=akd*u(i,j)/sinh(akd)
vb=akd*v(i,j)/sinh(akd)
sumu(i,j)=sumu(i,j)+ub**2
sumv(i,j)=sumv(i,j)+vb**2

amflx(i,j)=amflx(i,j)+z(i,j)*u(i,j)*9.81*akd/c(i,j)/sigma**2
amfly(i,j)=amfly(i,j)+z(i,j)*v(i,j)*9.81*akd/c(i,j)/sigma**2

110      continue

else
end if

if(n.eq.6000) then
do j=1,jm
write (89,211) (2*dnmax(i,j), i=1,im)
end do
else
endif

if(n.eq.7000) then
do j=1,jm
write (90,211) (2*dnmax(i,j), i=1,im)
end do
else
endif

if(n.eq.8000) then
do j=1,jm
write (91,211) (2*dnmax(i,j), i=1,im)
end do
else
endif

if(n.eq.9000) then
do j=1,jm
write (92,211) (2*dnmax(i,j), i=1,im)
end do
else
endif

write(71,*) t, z(400,120)
c
c      equalies the grids outside the calculated region
c      with z=2.*Ho in order to have a nice view in the
c      surfer package

nend=int(tend/dt)-1
if (n.lt.nend) then
goto 40
else

```

```

do 321 j=1,jm
do 321 i=1,im
if (icod(i,j).eq.1) then
z(i,j)=Ho
else
end if
321 continue

C *****
C END OF TIME LOOP
C *****

open (unit=3,file='elev.dat')
open (unit=5,file='hei.dat')
open (unit=10,file='sxyy.dat')
open (unit=19,file='bottom.dat')
open (unit=18,file='thita.dat')
open (unit=17,file='sect.dat')
open (unit=21,file='uxut.dat')
open (unit=22,file='untowtest.dat')
open (unit=93,file='Qb_matrix.dat')
open (unit=94,file='C_matrix.dat')

do 355 j=20+1,jm-3
do 355 i=4,im-3
disx=i*dx
disy=j*dx
write (3,7) disx,disy,z(i,j),qbmax(i,j)
355 continue

777 FORMAT (6F12.7)
797 FORMAT (20i3)

do 114 j=2,jm-1
do 114 i=2,im-1

if (icod(i,j).eq.0) then
al=c(i,j)*per
akapa=2*pi/al
akd=d(i,j)*akapa

ro=1000

alfa=ro*akapa*(sinh(2*akd)+2*akd)/4/(sinh(akd))**2
bhta=ro*(sinh(2*akd)-2*akd)/4/akapa/(sinh(akd))**2
di=ro*d(i,j)*((sinh(2*akd))/2/akd-cosh(2*akd))/4/(sinh(akd))**2

```

```

    trx1=alfa*sumx1(i,j)
    trx2=bhta*sum2(i,j)
    trx3=di*(sum3(i+1,j)-sum3(i-1,j))/2/dx
    trx4=di*(sum4(i,j+1)-sum4(i,j-1))/2/dx
    trx5=0.5*ro*9.81*sumz(i,j)
c     u=sxx
    u(i,j)=(trx1-trx2+trx3+trx4+trx5)/nper

    try1=alfa*sumy1(i,j)
    try2=bhta*sum2(i,j)
    try3=di*(sum3(i+1,j)-sum3(i-1,j))/2/dx
    try4=di*(sum4(i,j+1)-sum4(i,j-1))/2/dx
    try5=0.5*ro*9.81*sumz(i,j)
c     v=syy
    v(i,j)=(try1-try2+try3+try4+try5)/nper

c     un=sxy
    un(i,j)=alfa*sumxy(i,j)/nper

    Hrms(i,j)=2.*sqrt(2.)*sqrt(sumz(i,j)/nper)
    sigu(i,j)=2.*sqrt(2.)*sqrt(sumu(i,j)/nper)
    sigv(i,j)=2.*sqrt(2.)*sqrt(sumv(i,j)/nper)

    amflx(i,j)=amflx(i,j)/nper
    amfly(i,j)=amfly(i,j)/nper

    Uh2=abs(sumx1(i,j)/nper)
    Vh2=abs(sumy1(i,j)/nper)
    zc2=abs(sumz(i,j)*(c(i,j)**2)/nper)

    if (Vh2.gt.0.0001) then
        thita(i,j)=atan((Uh2/Vh2)**.5)
c     else if (zc2.gt..0001) then
c     thita(i,j)=asin((Uh2/zc2)**.5)
    else if (Uh2.gt.0.0001) then
        thita(i,j)=0.
    else
        thita(i,j)=1.570796
    end if

    else
        u(i,j)=0.0
        v(i,j)=0.0
        un(i,j)=0.0
    end if

114     continue

do i=1,im
    u(i,1)=u(i,2)
    v(i,1)=v(i,2)
    un(i,1)=un(i,2)
    u(i,jm)=u(i,jm-1)
    v(i,jm)=v(i,jm-1)
    un(i,jm)=un(i,jm-1)
end do
do j=1,jm
    u(1,j)=u(2,j)

```

```

v(1,j)=v(2,j)
un(1,j)=un(2,j)
u(im,j)=u(im-1,j)
v(im,j)=v(im-1,j)
un(im,j)=un(im-1,j)
end do

do j=1,jm
write (18,17) j
do i=1,im

write (18,17) i,thita(i,j),2*dnmax(i,j),c(i,j)

disx=i*dx
disy=j*dx
if (icod(i,j).eq.0.and.vmax(i,j).gt..01) then
th=atan(umax(i,j)/vmax(i,j))
uvmax=sqrt(umax(i,j)**2+vmax(i,j)**2)
ths=asin(vmax(i,j)/uvmax)
else
th=0.0
ths=0.0
end if

if (icod(i,j).eq.0) then
c uvmax=sqrt(umax(i,j)**2+vmax(i,j)**2)

write (5,6) disx,disy,2.*dnmax(i,j)
else
hh=2.*Ho
write (5,6) disx,disy,hh
end if
end do
end do

do i=21,im-20,10
write(17,*) i*dx
do j=1,jm

if (icod(i,j).eq.0.and.vmax(i,j).gt..01) then
th=atan(umax(i,j)/vmax(i,j))
uvmax=sqrt(umax(i,j)**2+vmax(i,j)**2)
ths=asin(vmax(i,j)/uvmax)
write (17,6) j*dx,2*dnmax(i,j),d(i,j),th
else
th=0.0
ths=0.0
end if
end do
end do

do j=1,jm
do i=1,im
dtr=d(i,j)-dnmax(i,j)
write (22,*) i*dx,j*dx,-amflx(i,j)/dtr,-amfly(i,j)/dtr

end do
end do

```

```

open (unit=11,file='sect_H.dat')
do j=21,jm

write (11,6) (126-j)*dx,2*dnmax(im/2,j)*1.41,Hrms(im/2,j)*1.41
& , thita(im/2,j)
end do

do j=1,jm
do i=1,im

write (19,6) sigu(i,j),sigv(i,j),ed(i,j),qbm(i,j)

if (i.ge.2.and.j.ge.2.and.i.le.im-1.and.j.le.jm-1) then
sxx=.5*u(i,j)+.125*u(i-1,j)+.125*u(i+1,j)+
& .125*u(i,j-1)+.125*u(i,j+1)
syy=.5*v(i,j)+.125*v(i-1,j)+.125*v(i+1,j)+
& .125*v(i,j-1)+.125*v(i,j+1)
sxy=.5*un(i,j)+.125*un(i-1,j)+.125*un(i+1,j)+
& .125*un(i,j-1)+.125*un(i,j+1)

else
sxx=u(i,j)
syy=v(i,j)
sxy=un(i,j)
end if
write (10,7) sxx,syy,sxy
end do
end do

do j=1,jm
do i=1,im
disx=i*dx
disy=j*dx
write (85,211) disx, disy, 2*dnmax(i,j)
end do
end do

do j=1,jm
write (87,211) (2*dnmax(i,j), i=1,im)
end do

do j=1,jm
write (98,211) (z(i,j), i=1,im)
end do

do j=1,jm
write (93,211) (qbm(i,j), i=1,im)
end do

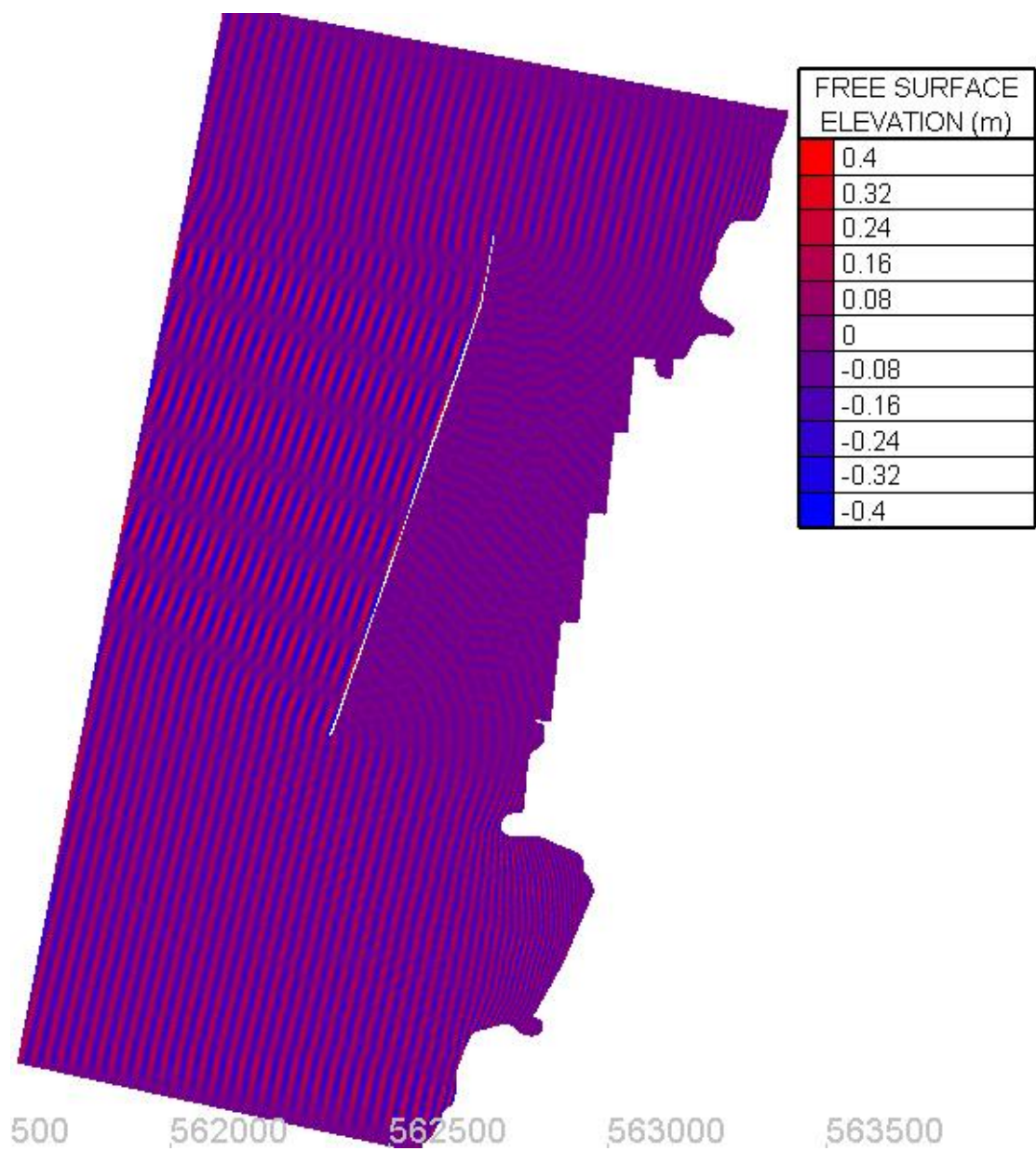
do j=1,jm
write (94,211) (c(i,j), i=1,im)
end do

```

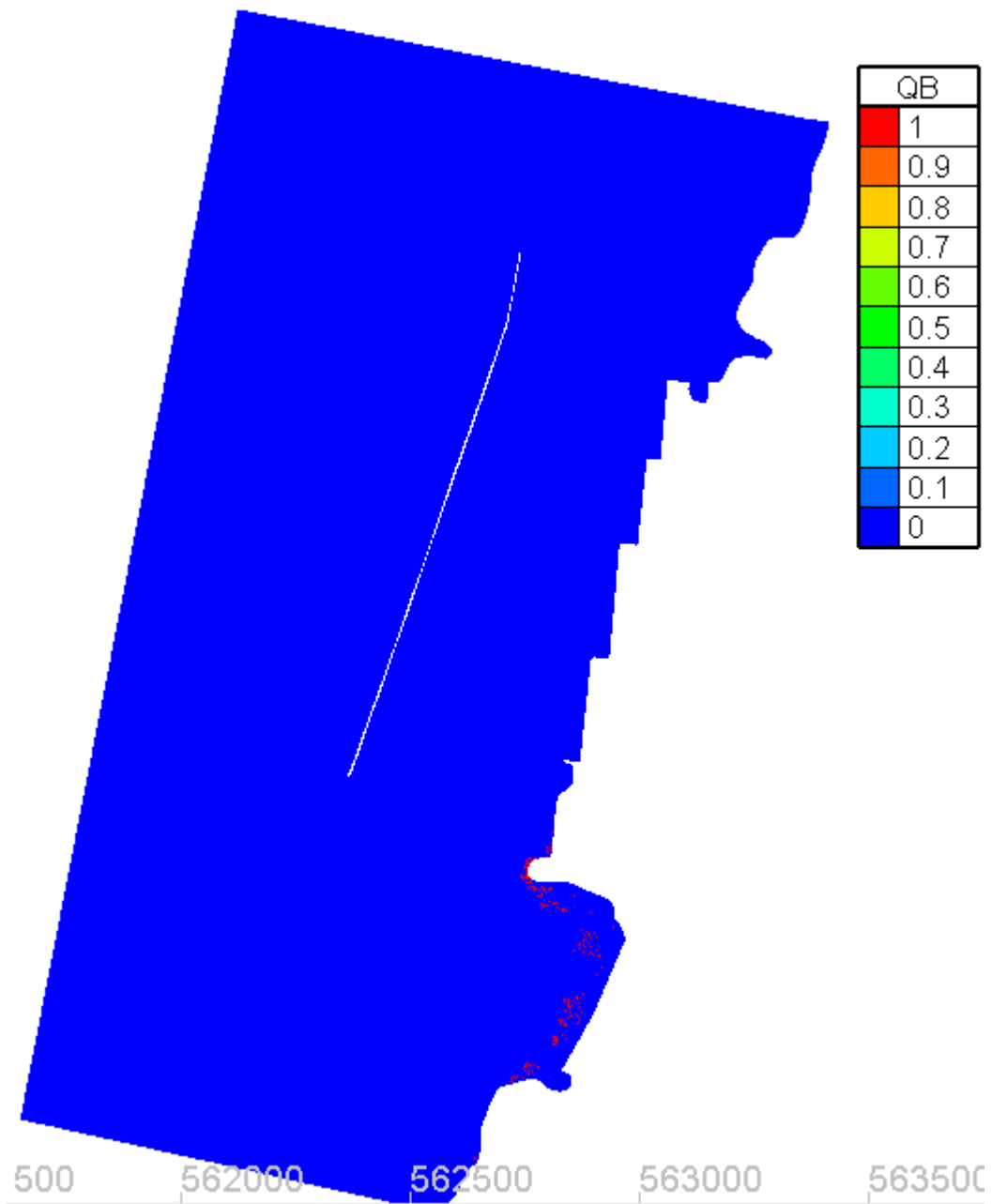
```
211 format (3000f15.6)
    stop
    endif
6 format (4f15.6)
7 format (4f15.6)
17 format (i6,3f12.4)
```

```
end
```

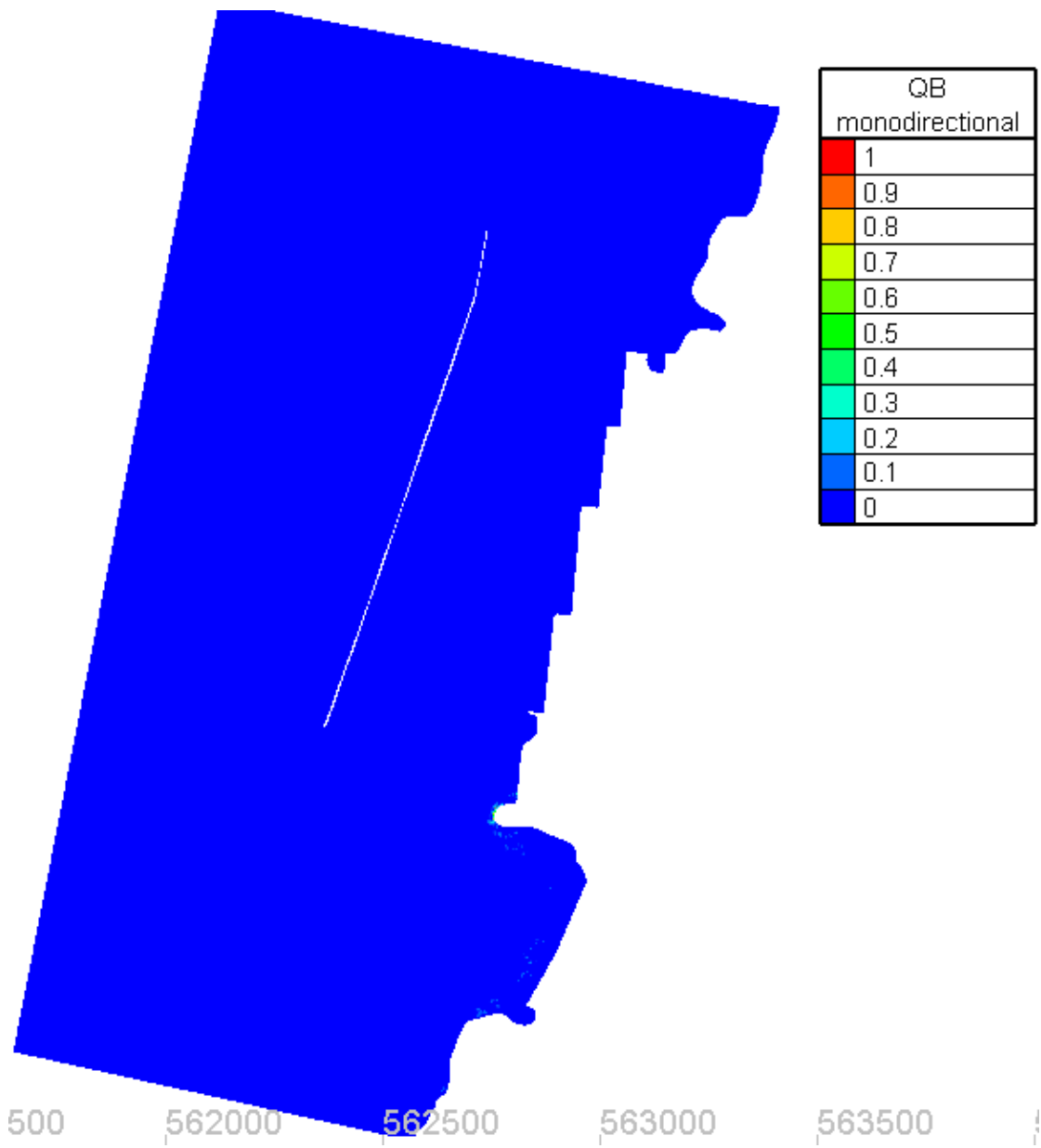
Παράρτημα Β – Παράγωγα μεγέθη των προσομοιώσεων



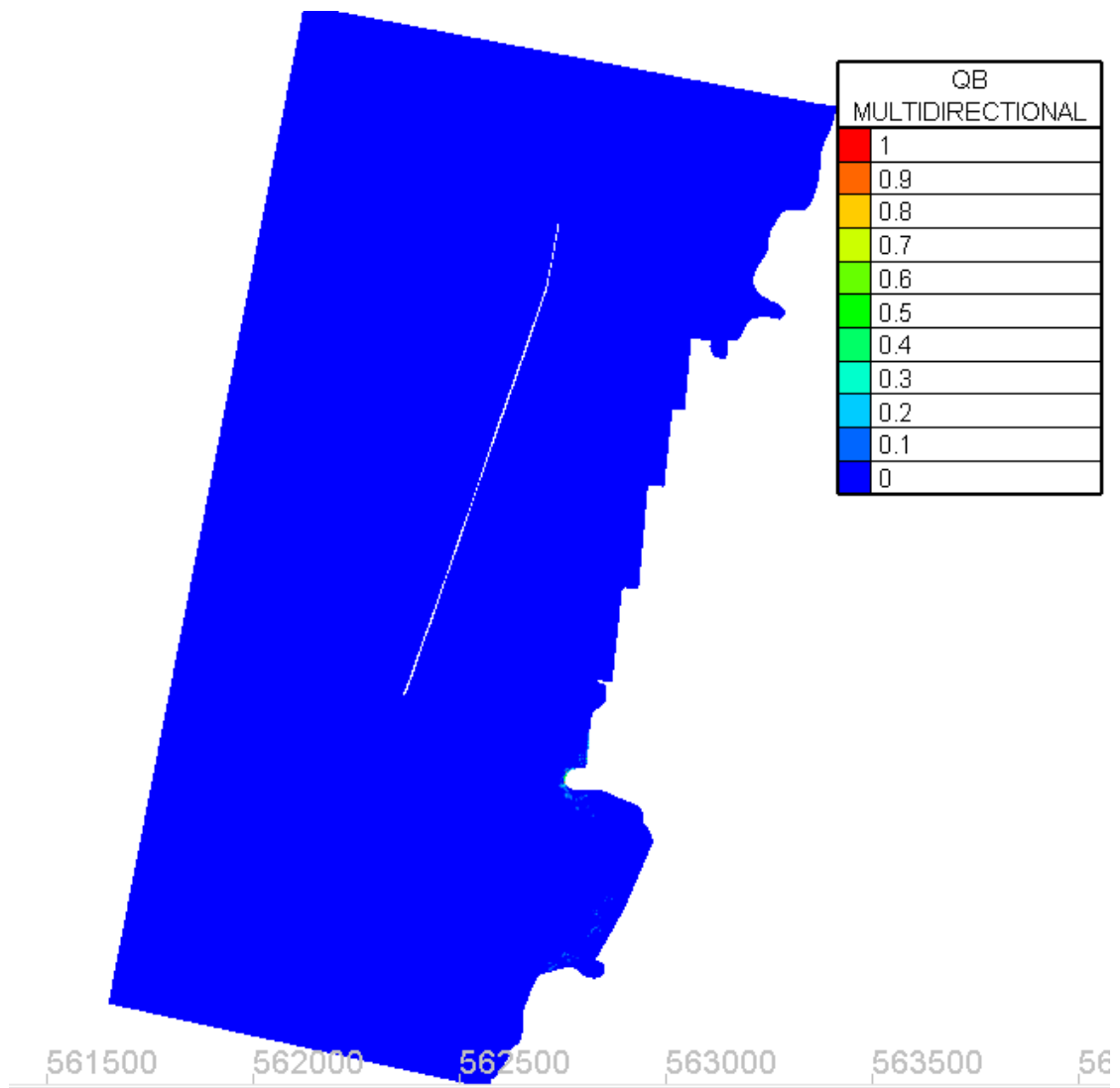
Σχήμα Β.1: Χωρική κατανομή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (m) για μονοχρωματικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS



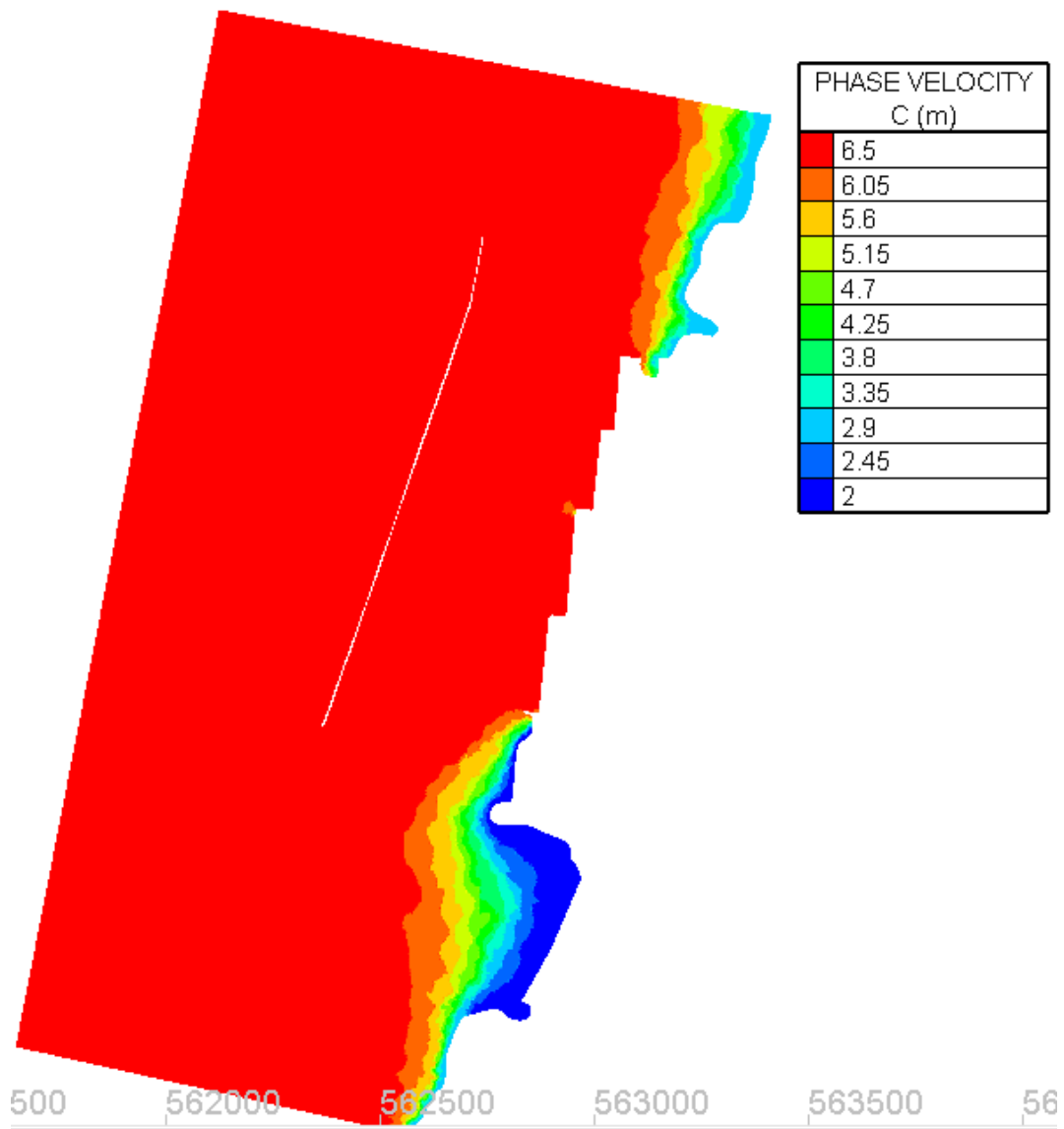
Σχήμα Β.2: Ποσοστό θραυόμενων κυματισμών για μονοχρωματικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS



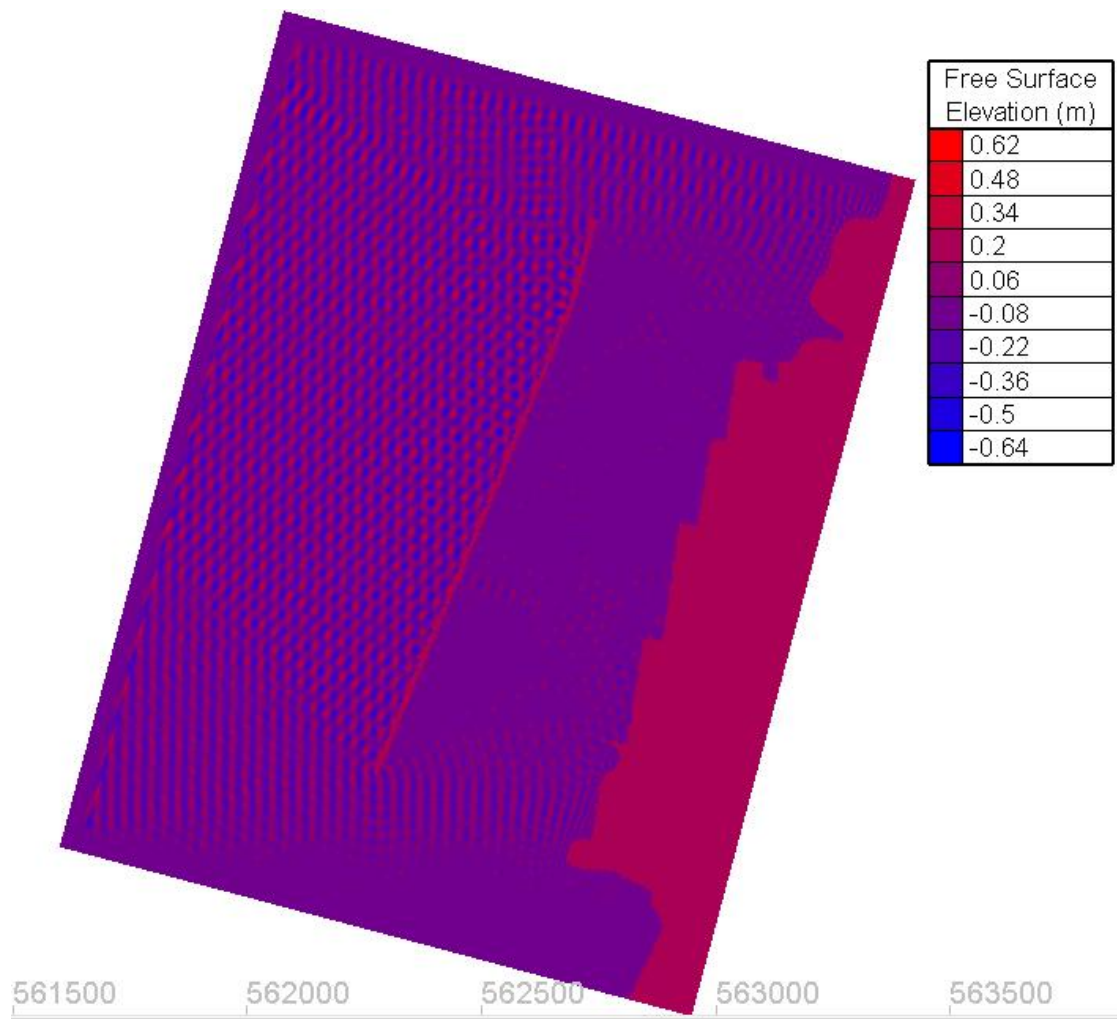
Σχήμα Β.3: Ποσοστό θραυόμενων κυματισμών για σύνθετους μονοκατευθυντικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS



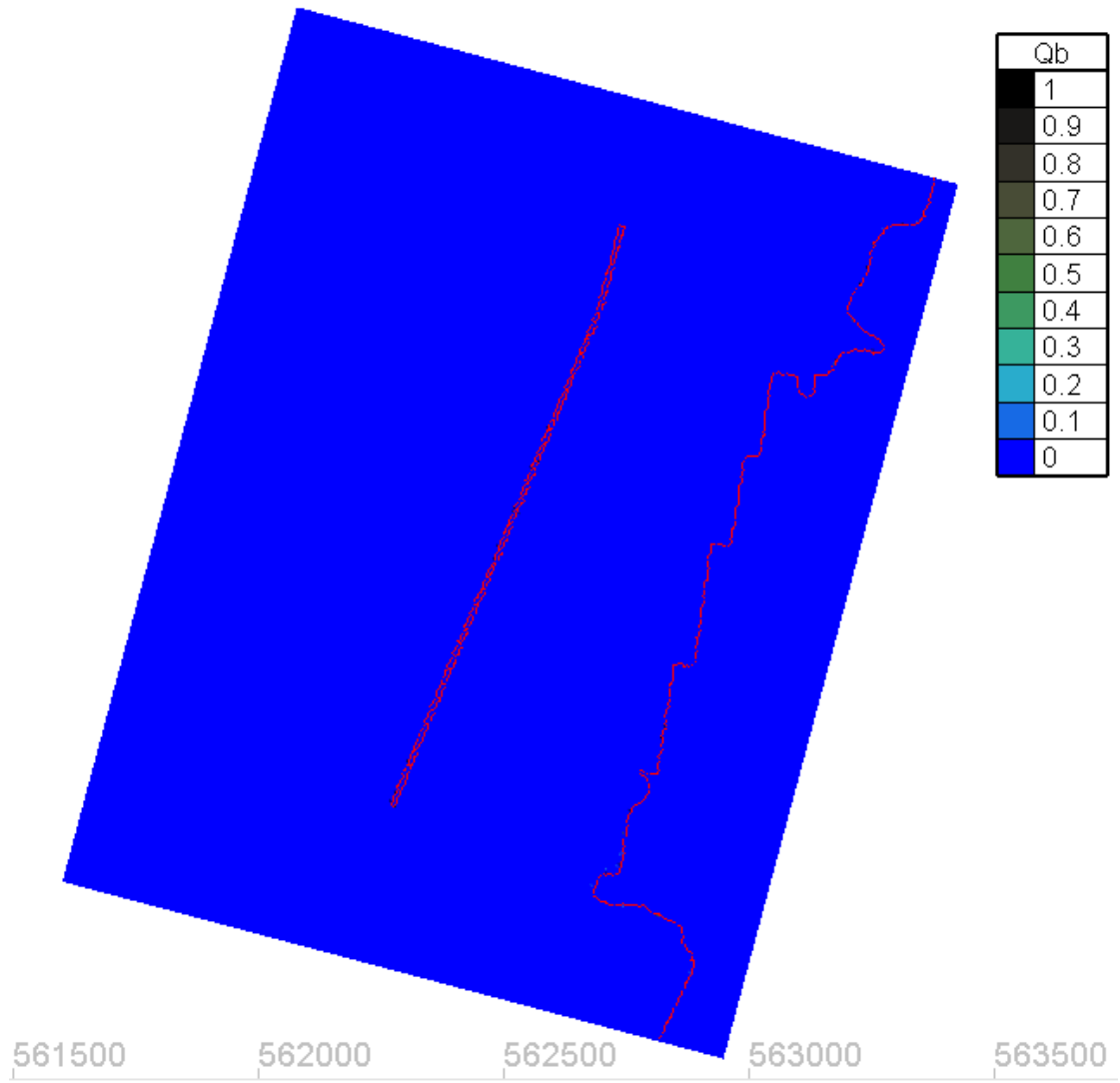
Σχήμα Β.4: Ποσοστό θραυόμενων κυματισμών για σύνθετους πολυκατευθυντικούς κυματισμούς, στο μοντέλο ARTEMIS



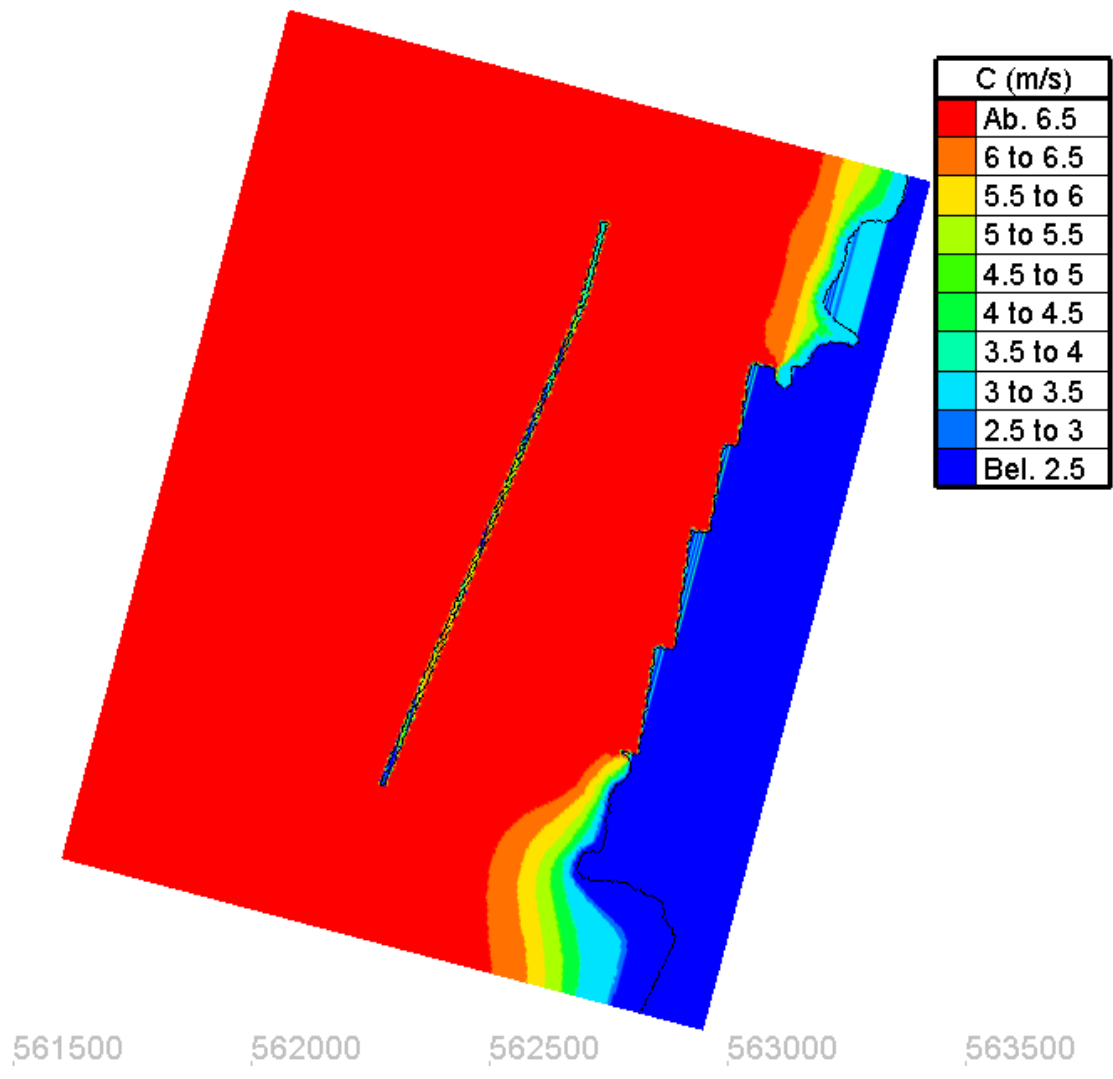
Σχήμα Β.5: Ταχύτητα φάσης (m/s) για όλες τις περιπτώσεις κυματισμών, στο μοντέλο ARTEMIS



Σχήμα Β.6: Χωρική κατανομή της ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας (m), στο μοντέλο WAVE-L



Σχήμα Β.7: Ποσοστό θραυόμενων κυμάτων, στο μοντέλο WAVE-L



Σχήμα Β.8: Ταχύτητα φάσης (m/s) των κυματισμών, στο μοντέλο WAVE-L