



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

*Στερεομεταφορά και Παράκτιες Διεργασίες με μεθόδους σχηματοποίησης
κυματικού κλίματος – Περίπτωση Λιμένα Ρεθύμνου*



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λουκιανός – Ελευθέριος Παναγόπουλος

Επιβλέπουσα: Β.Κ. Τσουκαλά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Α. Παπαδημητρίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2019

***Στερεομεταφορά και Παράκτιες Διεργασίες με μεθόδους σχηματοποίησης
κυματικού κλίματος – Περίπτωση Λιμένα Ρεθύμνου***

Λέξεις – κλειδιά:

παράκτια ζώνη, κυματικό κλίμα, στερεομεταφορά, μέθοδοι σχηματοποίησης, αντιπρόσωποι κλάσεων, μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών, μέθοδος σταθερών κλάσεων, μέθοδος Cerc, μέθοδος Pickup Rate, συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac, MIKE 21 DHI

***Sediment transport and coastal zone processes with methods of wave climate
schematization – Case study of Rethymno***

Key words:

coastal zone, wave climate, sediment transport, schematization methods, class representatives, Energy Flux method, Fixed Bins method, Cerc method, Pickup Rate method, morphological acceleration factor Morfac, MIKE 21 DHI

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λουκιανός – Ελευθέριος Παναγόπουλος

Επιβλέπουσα: Β.Κ. Τσουκαλά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Α. Παπαδημητρίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Copyright © Λουκιανός - Ελευθέριος Παναγόπουλος, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Loukianos - Eleftherios Panagopoulos, 2019

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ευχαριστίες

Φτάνοντας στο τέλος της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνεισέφεραν ουσιαστικά στην ολοκλήρωσή της.

Καταρχάς, απευθύνω ένα θερμό ευχαριστώ στην επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, αναπληρώτρια καθηγήτρια κα Βασιλική Τσουκαλά για την ανάθεση της εργασίας, καθώς και για τη συνεχή καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Εξίσου θερμά ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ κο Ανδρέα Παπαδημητρίου για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε από την πρώτη μέχρι και την τελευταία ώρα που αφιέρωσα στην παρούσα εργασία, επιλύοντας απορίες και συμβάλλοντας καθοριστικά στην αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων που ανέκυπταν στην πορεία.

Τέλος, είμαι βαθύτατα ευγνώμων προς την οικογένειά μου. Ευχαριστώ τους γονείς μου, Νίκο και Μαίρη, καθώς και τους αδερφούς μου, Γιώργο και Στέλιο που όλα αυτά τα χρόνια στηρίζουν τις προσπάθειές μου και με βοηθούν σε όλες τις πτυχές της ζωής μου, δίνοντάς μου τα απαραίτητα ψυχικά αποθέματα, για να εξελίσομαι σε συνεχή βάση.

Με εκτίμηση,

Λουκιανός - Ελευθέριος Παναγόπουλος,

Αθήνα, 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μοντέλα παράκτιας μορφολογίας είναι πολύπλοκα και υπολογιστικά απαιτητικά. Η πολυπλοκότητα των μοντέλων, που οφείλεται εν τέλει στις σύνθετες παράκτιες φυσικές διεργασίες, καθώς και η απαίτηση για μείωση του υπολογιστικού φόρτου εκτέλεσης του μοντέλου είναι οι βασικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη σχηματοποίηση των δεδομένων εισόδου του μοντέλου (μείωση δεδομένων εισόδου). Ως σχηματοποίηση ορίζεται η διαδικασία μείωσης της πλήρους χρονοσειράς του κυματικού κλίματος μιας δεδομένης παράκτιας περιοχής σε ένα σύνολο «αντιπροσωπευτικών» κυματισμών, που ιδανικά επιφέρουν παρόμοια μορφολογική εξέλιξη πυθμένα με την πλήρη χρονοσειρά, εξασφαλίζοντας έτσι τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου εκτέλεσης του μοντέλου και της επεξεργασίας των δεδομένων εισόδου. Η περαιτέρω μείωση του απαιτούμενου χρόνου εκτέλεσης του μοντέλου επιτυγχάνεται με τη χρήση του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης (Morfac) που μετέρχεται την παραδοχή ότι οι μορφοδυναμικές μεταβολές εξελίσσονται πολύ πιο αργά σε σχέση με τις μεταβολές στο υδροδυναμικό πεδίο.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει την αξιοπιστία τεσσάρων διαφορετικών τεχνικών σχηματοποίησης (Energy Flux Method, Fixed Bins Method, Cerc Method, Pickup Rate Method) για την απεικόνιση του συνολικού κυματικού κλίματος ως προς τα αποτελέσματα της χωρικής κατανομής της εξέλιξης του πυθμένα και την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Σημειώνεται πως η τελευταία μέθοδος (Pickup Rate) αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η προαναφερθείσα αξιολόγηση υλοποιείται κατά μήκος της ακτής εκατέρωθεν του λιμένα Ρεθύμνου και επικεντρώνεται κυρίως στη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα μετά το πέρας κάθε προσομοίωσης που πραγματοποιείται με τη χρήση του ολοκληρωμένου μοντέλου FM του πακέτου λογισμικού Mike 21 DHI .

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την υπεροχή των μεθόδων ροής ενέργειας (Energy Flux Method) και Pickup Rate που αντιπροσωπεύουν επαρκώς το αρχικό κυματικό κλίμα, στο βαθμό που μία εξ αυτών των τεχνικών σχηματοποίησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του υπολογιστικού χρόνου με κάποια αναπόφευκτη επίπτωση στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Στην περίπτωση του λιμένα Ρεθύμνου παρατηρείται συγκέντρωση αποθέσεων σε όλο το μήκος της ανατολικής ακτής του ως αποτέλεσμα των κυμάτων με βόρεια και βορειοανατολική διεύθυνση. Παρατηρείται, επίσης, συσσώρευση ιζήματος στον προσήνεμο μώλο, ωστόσο σε σημαντικά μικρότερο βαθμό συγκριτικά με την ανατολική ακτή, λόγω του βραχώδους υποβάθρου δυτικά του λιμένα.

ABSTRACT

Coastal morphology models are complex and computationally demanding. The complexity of the models ultimately due to complex coastal physical processes, as well as the requirement to reduce the computational load of the model, are the main factors to be taken into account, which can be achieved by schematisation of the input data of the model (input data reduction). This is defined as the process of reducing the full time series of the wave climate of a given coastal area into a set of "representative" waves, ideally resulting in a morphological bed level evolution similar to the output of the full time series, thereby ensuring the reduction of the computational load of the model execution and the input data to be processed. The further reduction of the required model execution time is achieved by using the morphological acceleration coefficient (Morfac), which assumes that the morphodynamic changes evolve much more slowly than the changes in the hydrodynamic field.

The aim of the present study is to examine the reliability of four different schematisation methods (Energy Flux Method, Fixed Bins Method, Cerc Method, Pickup Rate Method) in order to illustrate the overall wave climate with respect to the results of the spatial distribution of the evolution of the bed level and the reduction of the total computational time. It is noted that the last method (Pickup Rate) was developed and applied in the context of this diploma thesis. The aforementioned evaluation is implemented along the coast on either side of the port of Rethymnon and focuses mainly on the change of the bed level after the end of each simulation performed using the integrated FM model of the Mike 21 DHI software package.

The results indicate the superiority of the Energy Flux and Pickup Rate methods in sufficiently representing the overall wave climate, in so far as an input reduction method can be utilized for the decrease of the computational time with some unavoidable impact on the precision of the results. The Morphological Acceleration Factor (Morfac) effect is significant in the results, as local instabilities are observed when large coefficient values are used.

In the case of the Port of Rethymno, the accumulation of deposits along the eastern coast of the port as a result of the waves with north and northeast direction was observed. Additionally, sediment accumulation was observed in the windward breakwater, but to a much lesser extent than the east coast due to the rocky background to the west of the port.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	5
ABSTRACT.....	6
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	10
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	14
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	15
2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ, ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ.....	16
2.1 Παράκτια Ζώνη και Φυσικές Διεργασίες.....	16
2.2 Θαλάσσιοι Κυματισμοί.....	21
2.3 Στερεομεταφορά.....	23
2.4 Μέθοδοι σχηματοποίησης.....	29
2.5 Περιγραφή αριθμητικών μοντέλων.....	31
3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	40
3.1 Γενικά Στοιχεία.....	40
3.2 Ιστορικά στοιχεία.....	42
3.3 Μορφολογία Πυθμένα.....	45
3.4 Γεωμορφολογία, ακτογραφία και ιζήματα ακτών.....	45
3.5 Πλημμυρικά φαινόμενα.....	45
4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	46
4.1 Προσδιορισμός Κυματικού Καθεστώτος.....	46
4.2 Προσδιορισμός Ανεμολογικού Καθεστώτος.....	48
4.3 Προετοιμασία υπολογιστικού πεδίου.....	49
4.4 Εφαρμογή μεθόδων σχηματοποίησης.....	50
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	70
5.1 Επαλήθευση σχηματοποίησης.....	70
5.2 Αξιολόγηση μοντέλων (Model Evaluation).....	74
5.3 Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος Energy Flux.....	76

5.4	Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος Fixed Bins	88
5.5	Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος Cerc 100	
5.6	Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος Pickup Rate	111
5.7	Σύγκριση με υφιστάμενες μεθόδους μείωσης δεδομένων εισόδου.....	125
5.8	Εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου (CPU Time).....	129
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	130
6.1	Σύνοψη Συμπερασμάτων.....	130
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	131
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	132

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1: Γεωγραφικός προσδιορισμός Ρεθύμνου Κρήτης	40
Εικόνα 3.2: Περιοχή μελέτης.....	40
Εικόνα 3.3: Περιοχή μελέτης, Ρέθυμνο, Κρήτη (Πηγή:Google Earth)	41
Εικόνα 3.4: Ισοβαθείς καμπύλες των -20, -10, -5m	41
Εικόνα 3.5: Το ιστορικό κάστρο Φορτέτζα	42
Εικόνα 3.6: Αεροφωτογραφία παλαιού ενετικού λιμένα.....	43
Εικόνα 4.1: Χρονοσειρά κυματικών παρατηρήσεων (CMEMS).....	47
Εικόνα 4.2: Χρονοσειρά ανεμολογικών παρατηρήσεων (CMEMS).....	48
Εικόνα 4.3: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση (directional bins) - Μέθοδος Energy Flux	51
Εικόνα 4.4: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος (directional & height bins) - Μέθοδος Energy Flux.....	51
Εικόνα 4.5: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Energy Flux.....	52
Εικόνα 4.6: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Energy Flux	53
Εικόνα 4.7: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου ανεμολογικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Energy Flux	54
Εικόνα 4.8: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα - Μέθοδος Energy Flux	54
Εικόνα 4.9: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Fixed Bins	56
Εικόνα 4.10: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Fixed Bins.....	56
Εικόνα 4.11: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα - Μέθοδος Fixed Bins.....	57
Εικόνα 4.12: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Cerc	59
Εικόνα 4.13: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Cerc.....	60
Εικόνα 4.14: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα - Μέθοδος Cerc	60
Εικόνα 4.15: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Pickup Rate	65
Εικόνα 4.16: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος - Μέθοδος Pickup Rate	65
Εικόνα 4.17: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα – Μέθοδος Pickup Rate ..	66
Εικόνα 5.1: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά καταγεγραμμένου κυματικού καθεστώτος – 2 μέρες -Μέθοδος Energy Flux.....	72
Εικόνα 5.2: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος – 2 μέρες -Μέθοδος Energy Flux.....	72

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Energy Flux.....	52
Πίνακας 4.2: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Fixed Bins	55
Πίνακας 4.3: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Cerc	59
Πίνακας 4.4: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Pickup Rate	64
Πίνακας 4.5: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους – Συγκεντρωτικός πίνακας.....	67
Πίνακας 4.6: Μέσα ύψη κυμάτων ανά κατακόρυφη κλάση (m)	68
Πίνακας 5.1: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Energy Flux - 2 μέρες	71
Πίνακας 5.2: Κατηγοριοποίηση μεθόδων με βάση το δείκτη σφάλματος (Sutherland J., 2003, “Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth”).....	75
Πίνακας 5.3: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Σύγκριση μεθόδων	123
Πίνακας 5.4: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Ανατολική ακτή	128
Πίνακας 5.5: Συνολικοί χρόνοι εκτέλεσης μοντέλου	129

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Χωρισμός ζωνών κατά πλάτος μίας ακτής (Μέμος, 2009).....	17
Σχήμα 2.2: Υποδιαιρέσεις παράκτιας ζώνης (Μουντζούρης, 2005).....	18
Σχήμα 2.3: Τυπικό προφίλ ακτής, που διαμορφώνεται από την κυματική ενέργεια και που δείχνει την παρουσία ενός ύφαλου αναβαθμού στην ζώνη θραύσης	18
Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση διαδικασίας σχηματισμού βελοειδούς ρεύματος σε ακτή τύπου θύλακα (The Comet Program, 2015)	20
Σχήμα 2.5: Δυνάμεις που δρουν πάνω στο στοιχειώδη κόκκο	23
Σχήμα 2.6: Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς κ.α., 2015).....	24
Σχήμα 2.7: Φορτίο αιωρήσεως (Καραμπάς κ.α., 2015	24
Σχήμα 2.8: Προφίλ ισορροπίας.....	27
Σχήμα 4.1: Βαθυμετρία του υπολογιστικού πεδίου	49

Σχήμα 4.2: Απεικόνιση του πυκνωμένου τριγωνικού κανάβου σε flexible mesh.....	49
Σχήμα 5.1: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux – Πλήρης χρονοσειρά 2 ημερών.....	73
Σχήμα 5.2: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux – Σχηματοποιημένη χρονοσειρά 2 ημερών.....	73
Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Energy Flux.....	76
Σχήμα 5.4: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Energy Flux.....	77
Σχήμα 5.5: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Energy Flux - Λεπτομέρεια.....	78
Σχήμα 5.6: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Energy Flux.....	79
Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Energy Flux - Λεπτομέρεια.....	80
Σχήμα 5.8: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux – Ανατολική Ακτή.....	81
Σχήμα 5.9: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	82
Σχήμα 5.10: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος Energy Flux – Ανατολική Ακτή.....	83
Σχήμα 5.11: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος Energy Flux – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	84
Σχήμα 5.12: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος Energy Flux – Ανατολική Ακτή.....	85
Σχήμα 5.13: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος Energy Flux – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	86
Σχήμα 5.14: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Fixed Bins (Χρονικό βήμα: 28/144).....	88
Σχήμα 5.15: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Fixed Bins (Χρονικό βήμα: 144/144).....	89
Σχήμα 5.16: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Fixed Bins.....	90
Σχήμα 5.17: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Fixed Bins - Λεπτομέρεια.....	91
Σχήμα 5.18: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Fixed Bins.....	92

Σχήμα 5.19: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Fixed Bins - Λεπτομέρεια.....	93
Σχήμα 5.20: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Fixed Bins – Ανατολική Ακτή	94
Σχήμα 5.21: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Fixed Bins – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	95
Σχήμα 5.22: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος Fixed Bins – Ανατολική Ακτή	96
Σχήμα 5.23: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος Fixed Bins – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	97
Σχήμα 5.24: : Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος Fixed Bins – Ανατολική Ακτή	98
Σχήμα 5.25: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος Fixed Bins – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	99
Σχήμα 5.26: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc.....	101
Σχήμα 5.27: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc.....	102
Σχήμα 5.28: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc - Λεπτομέρεια.....	103
Σχήμα 5.29: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc.....	104
Σχήμα 5.30: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc – Λεπτομέρεια.....	105
Σχήμα 5.31: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης – Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή	106
Σχήμα 5.32: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης – Μέθοδος Cerc – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	107
Σχήμα 5.33: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή	108
Σχήμα 5.34: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	109
Σχήμα 5.35: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y - Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή	110
Σχήμα 5.36: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y - Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	111
Σχήμα 5.37: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate.....	112

Σχήμα 5.38: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate	113
Σχήμα 5.39: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate - Λεπτομέρεια.....	114
Σχήμα 5.40: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate	115
Σχήμα 5.41: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate – Λεπτομέρεια	116
Σχήμα 5.42: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης – Μέθοδος Pickup Rate – Ανατολική Ακτή	117
Σχήμα 5.43: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης – Μέθοδος Pickup Rate – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	118
Σχήμα 5.44: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Pickup Rate – Ανατολική Ακτή	119
Σχήμα 5.45: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Pickup Rate – Λεπτομέρεια Λιμένα	120
Σχήμα 5.46: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y - Μέθοδος Pickup Rate – Ανατολική Ακτή	121
Σχήμα 5.47: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y - Μέθοδος Pickup Rate – Λεπτομέρεια Λιμένα	122
Σχήμα 5.48: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Ισοδύναμο κυματικό κλίμα – Ανατολική Ακτή	128
Σχήμα 5.49: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Ισοδύναμο κυματικό κλίμα – Λεπτομέρεια Λιμένα.....	128

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η Παράκτια Ζώνη αποτελεί μια σύνθετη παραθαλάσσια περιοχή η οποία οριοθετείται μεταξύ της ακτογραμμής και της ισοβαθούς στην οποία γίνεται αισθητή η επίδραση του πυθμένα. Πρόκειται για μία περιοχή στην οποία συντελείται πλήθος διεργασιών που οφείλονται στη μεταφερόμενη ενέργεια από κυματισμούς και παράκτια ρεύματα. Η πιο σημαντική εξ αυτών είναι η στερεομεταφορά ιζήματος, η οποία διαμορφώνει τη μορφή της ακτογραμμής σε μακροχρόνια βάση. Η μεταβλητότητα της παράκτιας ζώνης καθιστά την πολιτική για τη διαχείρισή της ένα ιδιαίτερος σύνθετο εγχείρημα με κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές προεκτάσεις.

Οι ακτομηχανικές μελέτες που εκπονούνται σε συνεχή βάση για την ορθή επιστημονικά διαχείριση των παρακτίων ζωνών απαιτούν την ανάπτυξη μοντέλων και την εκτέλεση προσομοιώσεων για την κατά το δυνατόν πιστή αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης. Τα μοντέλα με τη σειρά τους βασίζονται στη συγκέντρωση πλήθους πραγματικών δεδομένων / παρατηρήσεων για να επιτύχουν τον παραπάνω στόχο. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποτελούνται από κυματικά χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος κύματος, διεύθυνση εισερχόμενου κύματος, κα.), καθώς και τη χωρική διάσταση αυτών. Επιπλέοντα όργανα (waveriders), ειδικοί πλωτήρες (buoys), ραντάρ και συσκευές υπερύθρων ακτινοβολιών χρησιμοποιούνται για την καθημερινή καταγραφή των προαναφερθέντων στοιχείων (μετρήσεις πεδίου), ενώ συχνή είναι και η εκτίμηση στοιχείων των ανεμογενών κυματισμών με βάση ανεμολογικά στοιχεία που συλλέγονται από μετεωρολογικές υπηρεσίες.

Ωστόσο, ο μεγάλος αριθμός των δεδομένων εισόδου στα υπολογιστικά μοντέλα που απαιτείται για την ορθή αναπαράσταση δυσχεραίνει σημαντικά την υπολογιστική διαδικασία, αυξάνοντας το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για μία περίοδο 5 ετών και ημερήσια ωριαία καταγραφή των κυματικών χαρακτηριστικών προκύπτει μια χρονοσειρά με συνολικά 43800 στοιχεία. Αν ένα υπολογιστικό πακέτο όπως το Mike 21 DHI (το οποίο χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία) δεχόταν ολόκληρη τη χρονοσειρά ως είσοδο, θα χρειαζόταν 5 χρόνια για να ολοκληρώσει μια προσομοίωση, κάτι που είναι προφανώς μη αποδεκτό.

Στο πλαίσιο αυτό, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση μεθόδων για τη μείωση των δεδομένων εισόδου (input reduction), ομαδοποιώντας τα στοιχεία σε κλάσεις με κοινά χαρακτηριστικά και υπολογίζοντας αντιπροσωπευτικές τιμές κυμάτων. Έτσι, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική μείωση αρχικών δεδομένων με συνεπακόλουθη μείωση στο χρόνο προσομοίωσης του μοντέλου. Σκοπός είναι να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου σχηματοποίησης μέσω ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Χρησιμοποιείται το υπολογιστικό πακέτο MIKE 21 DHI.

1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει πέραν της εισαγωγής τα εξής κεφάλαια:

- Κεφάλαιο 2, το οποίο περιλαμβάνει μια σύντομη ανασκόπηση των βασικών εννοιών της Θαλάσσιας Υδραυλικής και της Ακτομηχανικής, των μεθόδων σχηματοποίησης κυματικού κλίματος, που αναλύονται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4, καθώς και την περιγραφή του υπολογιστικού πακέτου MIKE 21 DHI και των επιμέρους αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την εκτέλεση προσομοιώσεων.
- Κεφάλαιο 3, όπου γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των βασικών γεωγραφικών, γεωμορφολογικών, καθώς και ιστορικών στοιχείων της περιοχής μελέτης του Ρεθύμνου.
- Κεφάλαιο 4, το οποίο περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του αρχικού κυματικού και ανεμολογικού κλίματος, καθώς και τη σχηματοποίησή τους σύμφωνα με 4 διαφορετικές μεθόδους (Energy Flux, Fixed Bins, Cerc, Pickup Rate). Στη συνέχεια, ακολουθεί η εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων του MIKE 21 DHI για την περιοχή μελέτης και το σχηματοποιημένο κυματικό και ανεμολογικό κλίμα .
- Κεφάλαιο 5, όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Ειδικότερα, απεικονίζεται η χωρική κατανομή των κυματικών και υδροδυναμικών μεγεθών, καθώς και των μεγεθών στερεομεταφοράς για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα και την καθεμία εκ των 4 μεθόδων σχηματοποίησης στην περιοχή μελέτης. Για την εκάστοτε μέθοδο παρατίθενται η χωρική κατανομή του ύψους κύματος, της ταχύτητας του κύματος κατά x και y διευθύνσεις, η αλλαγή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης και, τέλος, η αθροιστική στερεομεταφορά κατά διευθύνσεις x και y. Παράλληλα, γίνεται μια σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους, αλλά και σε σχέση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση των 2 ημερών για ολόκληρη τη χρονοσειρά. Με βάση αυτά και στατιστικά μεγέθη (model performance statistics) γίνεται η αξιολόγηση της εκάστοτε μεθόδου. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των μεθόδων σχηματοποίησης με τη μέθοδο του ισοδύναμου κυματικού κλίματος., ενώ παρατίθεται η εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου για την κάθε μέθοδο.
- Κεφάλαιο 6, όπου διατυπώνονται τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ενώ δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα, σε ό,τι αφορά την αξιοπιστία της εκάστοτε μεθόδου σχηματοποίησης και του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac.

2 ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ, ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ

2.1 Παράκτια Ζώνη και Φυσικές Διεργασίες

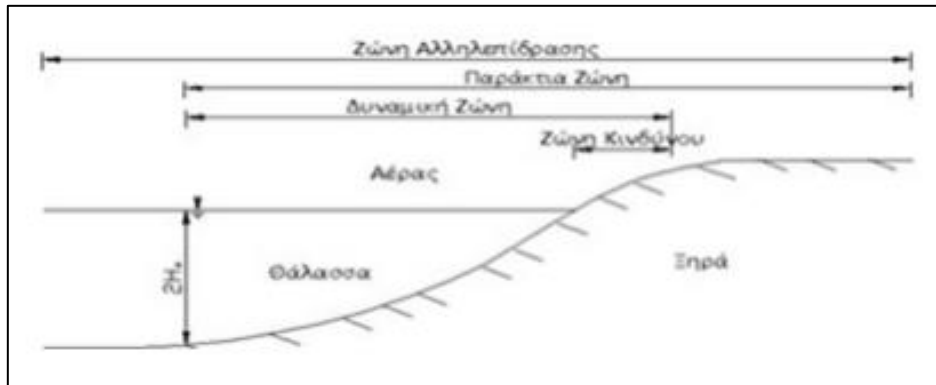
Με τον όρο ακτογραμμή ονομάζουμε τη γραμμή που ορίζεται από τη τομή της θαλάσσιας επιφάνειας με την ξηρά. Η παράκτια ζώνη περιλαμβάνει ένα υποθαλάσσιο (από την ακτογραμμή μέχρι την ισοβαθή καμπύλη των -10m) και ένα χερσαίο τμήμα (Καρύμπαλης, 2010). Οι παράκτιοι χώροι αποτελούνται συνήθως από ένα ιδιαίτερο ποικιλόμορφο περιβάλλον που φιλοξενεί αρκετό πληθυσμό, πλήθος ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και σημαντικό αριθμό οικοσυστημάτων (Παπανίκα & Σέρβου, 2012). Παράλληλα, η ανθρώπινη παρέμβαση αυξάνεται συνεχώς, λόγω της υψηλής κοινωνικό-οικονομικής σημασίας της παράκτιας ζώνης. Συνέπεια του πλήθους των φυσικών θαλάσσιων μηχανισμών αλλά και των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων – παρεμβάσεων που προαναφέρθηκαν, είναι οι παράκτιες ζώνες να χαρακτηρίζονται από εντονότατη μεταβλητότητα ως προς τη μορφολογία τους, τις συνιστώσες τους και τη γενικότερη χωροχρονική τους εξέλιξη. Η παράκτια ζώνη και η ακτή (παραθαλάσσια ζώνη της ξηράς) αποτελούν έκφραση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ προσφοράς ιζημάτων από τη λιθόσφαιρα και απομάκρυνσης ή συσσώρευσης τους από την υδρόσφαιρα, υπό τη δράση των κυματισμών και των ρευμάτων, τα οποία εξαρτώνται από την ατμόσφαιρα (Παναγιωτίδης & Χατζημίρος, 2004), ενώ οι εν λόγω περιοχές αντιμετωπίζουν πολλές φορές σημαντικά προβλήματα λόγω της ευαισθησίας τους και κυρίως λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων και των φυσικών διεργασιών που δρουν στον άμεσο παράκτιο χώρο.

Πιο συγκεκριμένα, η μορφή των ακτών επηρεάζεται τόσο από τις φυσικές διεργασίες όπως είναι ο κυματισμός, τα παράκτια ρεύματα, η άνοδος της θαλάσσιας στάθμης και οι καιρικές συνθήκες, όσο και από τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως είναι η οικιστική και τουριστική ανάπτυξη, η κατασκευή έργων για την προστασία από την διάβρωση των εδαφών και η κατασκευή φραγμάτων (Καρύμπαλης, 2010). Οι διεργασίες αυτές σε συνδυασμό με τη δράση του υδάτινου στοιχείου έχουν ως αποτέλεσμα τη διάβρωση των παράκτιων περιοχών η οποία τείνει να εξομαλύνει το ανάγλυφο της γης. Ο βαθμός της διάβρωσης δεν είναι σταθερός σε όλες τις περιοχές, αλλά ποικίλει σύμφωνα με διάφορους παράγοντες όπως η τοπογραφία, η γεωλογία, η μορφολογία της ακτής, οι επικρατούσες κλιματικές και κυματικές συνθήκες, η συχνότητα και η ένταση ακραίων καιρικών και κυματικών φαινομένων και τα αποθέματα ιζημάτων στην περιοχή (κοντά σε ποτάμι ή όχι) (Κωτόπουλος 2012). Αντίθετα, η θάλασσα με την αέναη κίνησή της καθώς και τα ιζήματα από τις εκβολές των ποταμών, ενισχύουν την παράκτια ζώνη ή δημιουργούν νέα εδάφη (Βαβιάς, 2011). Η διάβρωση είναι μια φυσική διεργασία, όμως οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις τείνουν να επιταχύνουν πολύ τη διαδικασία, προκαλώντας προβλήματα στις υποδομές των παράκτιων περιοχών.

2.1.1 Υποδιαιρέσεις Παράκτιας Ζώνης

Οι ζώνες που έχουν οριστεί κατά πλάτος μιας ακτής (Μέμος, 2009) διακρίνονται σε:

- ζώνη αλληλεπίδρασης (interactive zone), όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζονται ή μπορούν να επηρεαστούν από την παράκτια ζώνη
- δυναμική ζώνη (dynamic zone), η οποία επηρεάζεται άμεσα από φυσικές διεργασίες όπως η διάβρωση
- ζώνη κινδύνου (hazard zone)

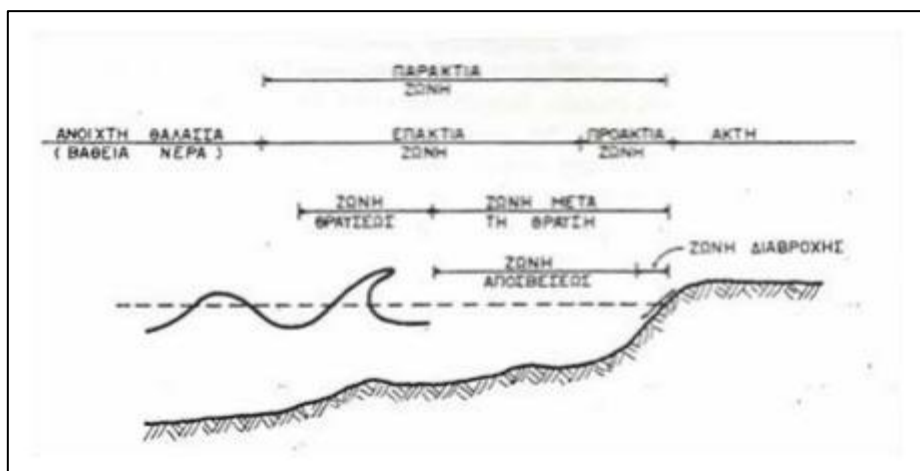


Σχήμα 2.1: Χωρισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής (Μέμος, 2009)

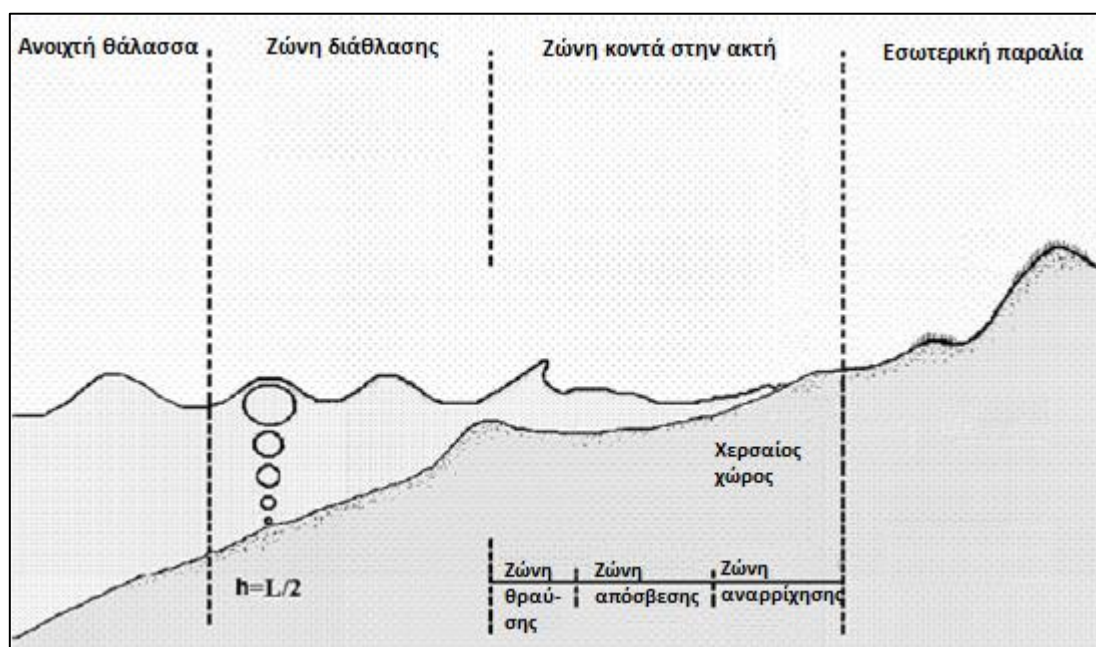
Πιο συγκεκριμένα, η παράκτια ζώνη υποδιαιρείται στην επάκτια (inshore) και στην προάκτια (foreshore) ζώνη ή μέτωπο ακτής, οι οποίες έχουν ως όριο τη γραμμή κατώτατης ρηχίας. Το μέτωπο είναι το τμήμα εκείνο της διατομής της ακτής που χαρακτηρίζεται από μεγάλη κλίση πυθμένα, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και από την κοκκομετρία των ιζημάτων.

Ενδιάμεσα, μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες υποζώνες (Μουτζούρης, 2005):

- Βαθύτερη ζώνη ή ζώνη πριν από τη θραύση (before-breaker zone), όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυματισμών που τελικά καταλήγουν σε θραύση
- Ζώνη θραύσεως (breaker zone), το κατ' εξοχήν δυναμικό τμήμα ολόκληρης της παράκτιας ζώνης, όπου στην ουσία λαμβάνει χώρα το φυσικό φαινόμενο της θραύσεως των κυμάτων και το οποίο αποτελεί γενεσιουργό μηχανισμό της πλειοψηφίας των διεργασιών που αφορούν την επιστήμη της ακτομηχανικής
- Ζώνη μετά τη θραύση (after-breaker zone), η οποία με τη σειρά της χωρίζεται στη ζώνη απόσβεσης (surf zone), όπου εκτονώνεται η ενέργεια του κύματος (τύρβη, θερμότητα, κλπ.) και δημιουργούνται τα κυματογενή ρεύματα, και στη ζώνη διαβροχής (swash zone) με όρια την κατώτερη και ανώτερη θέση της ακτογραμμής. Η θέση των δύο παραπάνω ζωνών επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, την κλίση του πυθμένα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και την παλίρροια.



Σχήμα 2.2: Υποδιαιρέσεις παράκτιας ζώνης (Μουντζούρης, 2005)



Σχήμα 2.3: Τυπικό προφίλ ακτής, που διαμορφώνεται από την κυματική ενέργεια και που δείχνει την παρουσία ενός ύψαλου αναβαθμού στην ζώνη θραύσεως

2.1.2 Παράκτια ρεύματα και ζώνες κυματικής δράσης

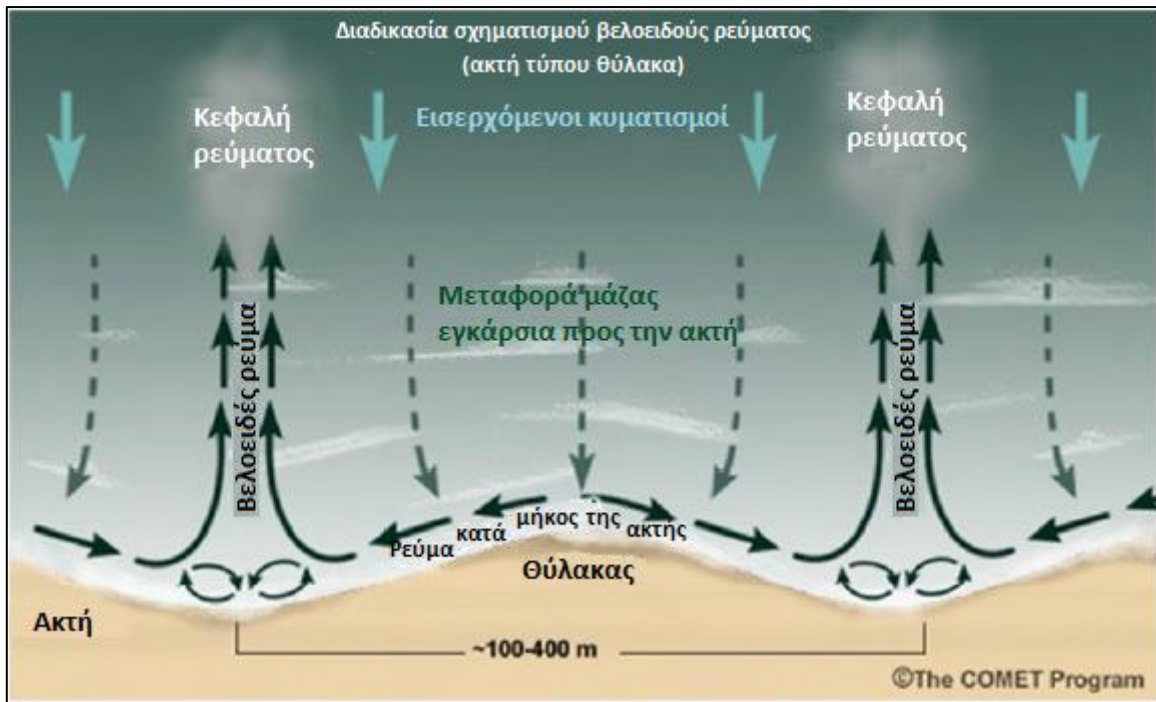
Η απώλεια της ενέργειας των κυματισμών, κυρίως λόγω της θραύσης τους, σε συνδυασμό με την επίδραση των φαινομένων της διάθλασης και περίθλασης, έχει ως επακόλουθο τη δημιουργία παράκτιων κυματογενών ρευμάτων. Κατά το φαινόμενο αυτό, ένα υλικό σημείο εκτελεί ταυτόχρονα και την παλινδρομική κυματική κίνηση, αλλά και μετακίνηση λόγω του ρεύματος. Η αιτία της δημιουργίας αυτών των ρευμάτων είναι οι μεταβολές κατά την οριζόντια έκταση των μέσων ροών ποσότητας κίνησης την οποία προκαλούν οι κυματισμοί. Τα μεγέθη αυτά των μέσων κατά το βάθος «ροών ποσοτήτων κίνησης» του νερού λόγω των κυματισμών ονομάζονται τάσεις ακτινοβολίας και είναι συναρτήσεις των στοιχείων του κυματισμού σε κάθε θέση. Οι τάσεις ακτινοβολίας ορίζονται σαν την περίσσια μεταφορά ορμής λόγω της παρουσίας κυματισμών (Καραμπάς, 2015).

Τα ρεύματα που συναντώνται στη παράκτια ζώνη χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής (longshore currents) και τα βελοειδή ρεύματα (rip currents). Ο διαχωρισμός τους έχει να κάνει με τη μορφή τους και τη διεύθυνση που δρουν. Οι γενεσιουργίες δυνάμεις των παράκτιων ρευμάτων είναι η τριβή στον πυθμένα, η διατμητική τάση ακτινοβολίας και η θραύση κυματισμών υπό κλίση σε σχέση με την ακτή. Η συμβολή δύο παράκτιων ρευμάτων αντίθετης φοράς εκτρέπει τη ροή προς τα βαθιά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου ρεύματος, που ονομάζεται βελοειδές ρεύμα (Μουτζούρης, 2005). Το ρεύμα αυτό είναι στενό και ισχυρό ρεύμα επιστροφής μάζας, διότι διασχίζει τη ζώνη θραύσεως και εκφυλίζεται στη ζώνη πριν από τη θραύση. Το ρεύμα αυτό μπορεί να δημιουργηθεί επίσης λόγω τοπογραφικής ανωμαλίας του πυθμένα. Το βελοειδές ρεύμα έχει κάθετη σχεδόν διεύθυνση ως προς την ακτογραμμή, μόνο όταν τα δύο παράλληλα ρεύματα που συμβάλλουν είναι παρόμοιας έντασης. Σε αντίθετη περίπτωση το βελοειδές ρεύμα εκτρέπεται με κλίση μικρότερη της καθέτου και παράλληλα μειώνεται και η ταχύτητά του.

Η ζώνη θραύσεως είναι η πιο ενεργή περιοχή της παράκτιας ζώνης, καθώς μέσα σε αυτή αναπτύσσονται έντονα ρεύματα τόσο κατά μήκος της ακτής, όσο και κάθετα προς αυτή. Στην περίπτωση λοξής θραύσης των κυματισμών η κάθετη συνιστώσα της κυματικής ενέργειας αναλύεται στην ανάπτυξη τύρβης, ενώ η παράλληλη συνιστώσα παράγει ρεύματα κατά μήκος της ακτής, μεταφέροντας ίζημα παράλληλα σε αυτή.

Η αύξηση των τάσεων ακτινοβολίας εντός της ζώνης θραύσης των κυματισμών αντισταθμίζεται με την δημιουργία ενός ρεύματος επαναφοράς (undertow) όσο το βάθος του νερού μειώνεται, που είναι υπεύθυνο για την μεταφορά ιζημάτων προς τα ανοιχτά.

Το αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών είναι η μεταφορά και η απόθεση ιζήματος στην ακτή. Τα κύματα μεγάλου ύψους κατά κύριο λόγο προκαλούν μεταφορά ιζημάτων του πυθμένα προς τα ανοιχτά με συνέπεια τη διάβρωση της ακτογραμμής.



Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση διαδικασίας σχηματισμού βελοειδούς ρεύματος σε ακτή τύπου θύλακα (The Comet Program, 2015)

2.2 Θαλάσσιοι Κυματισμοί

2.2.1 Κατηγορίες κυματισμών

Στο θαλάσσιο χώρο συνυπάρχουν ταυτόχρονα συνήθως πολλά είδη κυματισμών, τα οποία δεν είναι καθόλου εύκολο να διακριθούν με γυμνό μάτι από έναν απλό παρατηρητή, διότι ουσιαστικά η κίνηση των υγρών σωματιδίων της θαλάσσιας μάζας είναι αποτέλεσμα υπέρθεσης όλων των παραπάνω κυμάτων. Ενδεικτικά, θα παρουσιαστεί η κατάταξη κατά Holthuijsen 2007, που αφορά τους πιο σημαντικούς για τις ανθρώπινες δραστηριότητες κυματισμούς:

- 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)
- Ανεμογενή κύματα 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).
- Στάσιμα κύματα (Seiches), 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.
- Τσουνάμις, 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.

2.2.2 Χαρακτηριστικά και μετασχηματισμοί επιφανειακών κυματισμών

Τα βασικά χαρακτηριστικά των κυμάτων που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς είναι το ύψος κύματος H , το μήκος κύματος L και η διεύθυνση διάδοσης θ . Τα μεγέθη αυτά για περιοχές βαθιών νερών, δηλαδή σε βάθη $d > 0.5 L$, όπου d το βάθος του νερού, παραμένουν σταθερά, καθώς η επίδραση του πυθμένα είναι ασήμαντη σε αυτή την περιοχή. Αντίθετα, σε ενδιάμεσα και ρηγά νερά, όπου $d < 0.5 L$, η επιρροή του πυθμένα καθίσταται ολοένα και σημαντικότερη και οι κυματισμοί χάνουν την κανονικότητά τους και αποκτούν μη – γραμμική μορφή.

Στις περιοχές αυτές η δυναμική των επιφανειακών κυματισμών είναι πιο πλούσια σε φυσικά φαινόμενα, και ως εκ τούτου παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον εξέτασης (Massel, 1989). Στην περιοχή αυτή συναντώνται όλα τα χαρακτηριστικά κυματικά φαινόμενα, και συγκεκριμένα:

- Ανάκλαση (reflection), διάθλαση (refraction), καθώς και ρήχωση (shoaling) των κυματισμών που οδηγούν σε τροποποιήσεις των χαρακτηριστικών τους
- Αλληλεπίδραση με την τρισδιάστατη βαθυμετρία και φαινόμενα περίθλασης ή σκέδασης των κυματισμών (diffraction)
- Διασπορά των κυματισμών (dispersion)
- Απόσβεση ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα (bottom friction)
- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών, και μεταφορά ενέργειας από μια αρχική ζώνη συχνοτήτων του φάσματος των κυματισμών προς μικρότερες και μεγαλύτερες συχνότητες (non-linear interactions)
- Δημιουργία κυματογενών ρευμάτων (wave induced currents) και μεταφορά μάζας
- Θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτή (wave breaking).

Στη ζώνη θραύσεως και στη ζώνη μετά τη θραύση η ένταση της κυματικής κυκλοφορίας και των φαινομένων είναι σημαντικά μεγαλύτερη, καθώς εκλύονται τεράστιες ποσότητες ενέργειας που διοχετεύονται στην ακτή με διάφορους τρόπους. Η ενέργεια αυτή όταν με τη σειρά της φτάσει στην ακτή δημιουργεί προβλήματα, φορτία και βλάβες στις κατασκευές μηχανικού, συνεπώς η θωράκισή τους κρίνεται απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία.

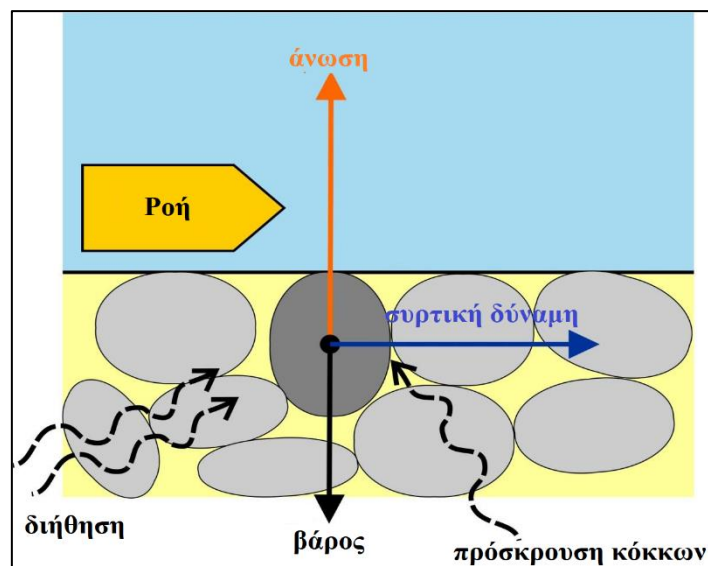
2.3 Στερεομεταφορά

Η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στον πυθμένα από τις κινήσεις των υγρών σωματιδίων προκαλεί την έναρξη κινήσεως ιζημάτων. Η κίνηση συνεχίζεται έως ότου εκλείψουν τα γενεσιουργά αίτια ή/και να συναντηθούν παράκτια εμπόδια. Η έναρξη κινήσεως ενός κόκκου ιζήματος στον πυθμένα εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη διατμητική τάση στον κόκκο. Οι τροχιές των σωματιδίων της διαταραγμένης θάλασσας λόγω κυματικής κίνησης διαφέρουν ριζικά από τις τροχιές σε μια μόνιμη ροή, δεδομένου ότι οι επιταχύνσεις έχουν συνιστώσες παράλληλες και κάθετες στον πυθμένα. Οι επιταχύνσεις στη διάρκεια των τροχιακών κινήσεων δημιουργούν αδρανειακές δυνάμεις στους κόκκους. Οι δυνάμεις αυτές προστίθενται στις συρτικές και ανυψωτικές δυνάμεις, που δρουν στους ίδιους κόκκους, με αποτέλεσμα την παράσυρση και κίνηση των κόκκων σε αιώρηση ή σε επαφή με τον πυθμένα. Η τροχιακή κίνηση των υγρών σωματιδίων θέτει σε κίνηση το ίζημα, που στη συνέχεια μεταφέρεται από το ρεύμα. Οι δυνάμεις που δρουν πάνω σε έναν στοιχειώδη κόκκο φαίνονται στο Σχήμα (2.5).

Μέχρι σήμερα δεν έχει επιτευχθεί ένας αναλυτικός υπολογισμός της δυναμικής των κόκκων του θαλασσίου πυθμένα στο διαταραγμένο θαλάσσιο περιβάλλον. Σχεδόν όλες οι θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε εμπειρικές σχέσεις και παραδοχές και στη θεωρία της κινήσεως των κόκκων σε συνθήκες μη θραυόμενων κυματισμών.

Η ισορροπία δυνάμεων σε επίπεδο κόκκου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Οι βασικές παράμετροι που την επηρεάζουν είναι:

- Η διατμητική τάση του πυθμένα $[\tau_b]$, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα ροής (ρεύμα – κύμα) και από την τριβή του πυθμένα.
- Η κρίσιμη διατμητική τάση του πυθμένα $[\tau_{b,cr}]$, η οποία εξαρτάται από τη διάμετρο του κόκκου και τα χαρακτηριστικά του θαλάσσιου αποδέκτη.

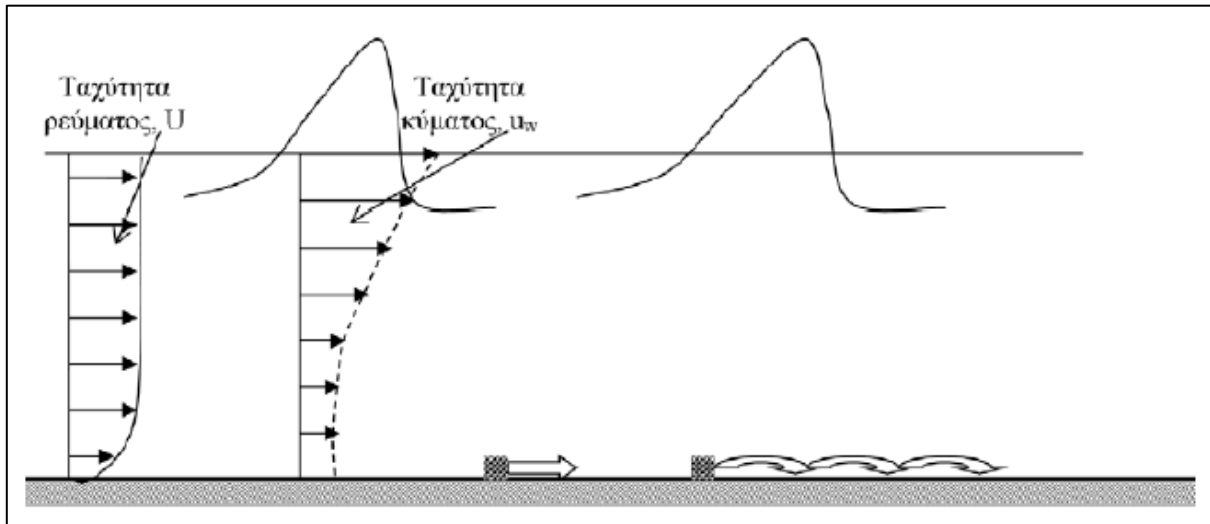


Σχήμα 2.5: Δυνάμεις που δρουν πάνω στο στοιχειώδη κόκκο

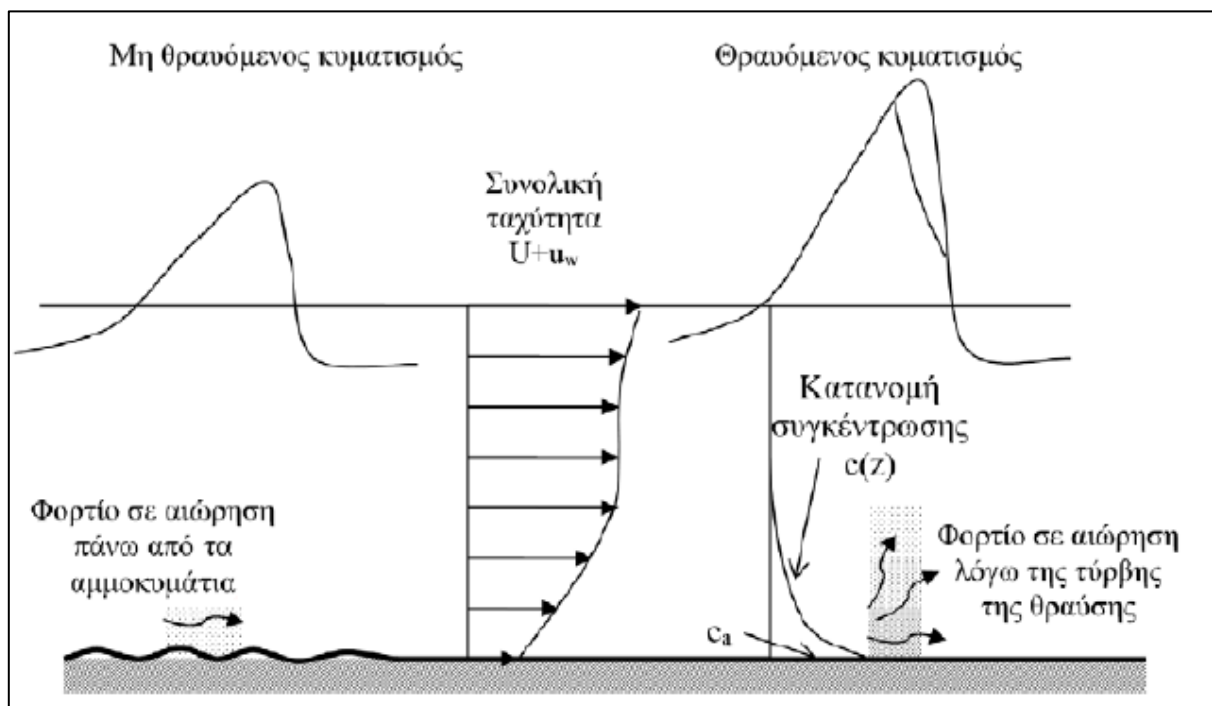
Αν $\tau_b > \tau_{b,cr}$, τότε έχουμε έναρξη κίνησης ιζήματος.

Μετά από την ενεργοποίηση του ιζήματος το υλικό μπαίνει σε αιώρηση είτε κοντά στον πυθμένα ή στη στήλη. Εν γένει έχουμε ανταλλαγές μεταξύ φορτίου πυθμένα και φορτίου αιωρήσεως.

Φορτίο πυθμένα: Όταν η κίνηση των κόκκων γίνεται με κύλιση στον πυθμένα ή διαδοχικά άλματα που συνεπάγονται περιοδική επαφή με τον πυθμένα, τότε η μεταφορά φερτών χαρακτηρίζεται ως φορτίο πυθμένα (bed load transport).



Σχήμα 2.6: Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς κ.α., 2015)



Σχήμα 2.7: Φορτίο αιωρήσεως (Καραμπάς κ.α., 2015)

Φορτίο αιωρήσεως: Όταν οι κόκκοι των ιζημάτων βρίσκονται σχεδόν συνέχεια σε αιώρηση στη στήλη του νερού λόγω της τύρβης, του οριακού στρώματος και των θραυόμενων κυματισμών, τότε η μεταφορά φερτών χαρακτηρίζεται ως φορτίο σε αιώρηση (suspended transport).

Καθώς μεγαλώνει η διάμετρος των κόκκων, τόσο πιο σημαντικό γίνεται το φορτίο πυθμένα. Η συνολική παροχή q_{tot} του φορτίου φερτών υλών είναι το άθροισμα των δύο επιμέρους φορτίων, δηλ.

$$q_{tot} = q_b + q_s \quad (2.1)$$

Συνήθως οι κυματισμοί είναι οι κύριοι παράγοντες που οδηγούν στην αποσταθεροποίηση των κόκκων. Στη συνέχεια τα θαλάσσια ρεύματα αναλαμβάνουν τη μεταφορά σε μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις.

Η θέση όπου οι δυνάμεις που ασκούνται στον κόκκο (βαρύτητα λόγω του κεκλιμένου πυθμένα και κυματική δύναμη) βρίσκονται σε ισορροπία, ονομάζεται ουδέτερη γραμμή. Η θέση της ουδέτερης γραμμής είναι συνάρτηση της τοπογραφίας του πυθμένα και των χαρακτηριστικών των κυμάτων, ωστόσο πάντα βρίσκεται προς τα ανοιχτά της ζώνης θραύσης. Τα ιζήματα που βρίσκονται στα πιο βαθιά σε σχέση με την ουδέτερη γραμμή κινούνται προς τα ανοιχτά, ενώ τα ιζήματα που βρίσκονται πιο ρηχά κινούνται με κατεύθυνση την ακτή.

Υπάρχουν δύο είδη στερεομεταφοράς ανάλογα με τη διεύθυνση κίνησης των ιζημάτων σε σχέση με τη διεύθυνση της ακτής, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

2.3.1 Στερεομεταφορά παράλληλα στην ακτογραμμή

Οι μακροχρόνιες αλλαγές οφείλονται κυρίως σε αυτού του είδους τη μεταφορά ιζημάτων. Λαμβάνει χώρα σε όλο το πλάτος της ζώνης επίδρασης των κυματισμών. Μεγιστοποιείται ωστόσο μέσα στη ζώνη θραύσης, καθώς εκεί διαμορφώνεται το παράκτιο κυματογενές ρεύμα.

Η μορφολογία της ακτογραμμής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από αυτή τη συνιστώσα της στερεομεταφοράς. Η εν λόγω στερεομεταφορά συναρτάται από τη γωνία προσπτώσεως των κυματισμών και την ενέργειά τους και μεγιστοποιείται για γωνίες πρόσπτωσης της τάξεως των 45° . Επιπροσθέτως, επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, όπως το ύψος και η περίοδος του κύματος, η κλίση, καθώς και οι ιδιότητες του υλικού του πυθμένα.

Η μέθοδος που εφαρμόζεται ως επί το πλείστον στο σχεδιασμό για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής είναι η μέθοδος CERC (Corps of Engineers Research Center), με βάση την οποία υπολογίζεται το ολικό φορτίο, δηλαδή αθροιστικά τα φορτία πυθμένα και αιωρήσεως που διακινούνται στις ζώνες θραύσεως και αποσβέσεως. Η μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή ότι η παροχή Q_1 εξαρτάται από τη συνιστώσα P_1 της ροής ενέργειας –δηλ. της ισχύος– στη ζώνη μετά τη θραύση.

Ειδικότερα, ο ρυθμός στερεομεταφοράς παράλληλα στην ακτή υπολογίζεται ως:

$$Q_l = \frac{K}{(\rho_s - \rho)g(1 - n)} * P_l \quad (2.2)$$

Όπου P_l η ροή ενέργειας ως:

$$P_l = \frac{1}{16} \rho g H_b^2 C_{gb} \sin 2\alpha_b \quad (2.3)$$

Και:

Q_l : η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής σε m^3 /έτος

P_l : η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής σε $J/m/s$

K : εμπειρικός αδιάστατος συντελεστής

ρ_s : ($=2650 \text{ kg/m}^3$) η μέση πυκνότητα ιζήματος

ρ : ($= 1025 \text{ kg/m}^3$) η μέση πυκνότητα θαλασσινού νερού

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

n ($\approx 0,40$) το πορώδες του ιζήματος

H_b : το ύψος κύματος στη θραύση (σε m)

α_b : η γωνία θραύσης

C_{gb} ($= (gd_b)^{0.5}$) η ταχύτητα φάσης των κυματισμών στη θραύση σε m/s

2.3.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτογραμμή

Οι κυματισμοί που προσπίπτουν κάθετα στην ακτή κατά τη διάρκεια ενός κυματικού επεισοδίου, μετακινούν τα ιζήματα και προκαλούν μορφολογικές μεταβολές του εγκάρσιου προφίλ. Οι μεταβολές αυτές τείνουν να διαμορφώσουν ένα συγκεκριμένο προφίλ ισορροπίας. Τα χαρακτηριστικά του προφίλ αυτού εξαρτώνται από την κοκκομετρία του ιζήματος του πυθμένα και τα χαρακτηριστικά των κυματισμών (ύψος και περίοδος) και σε γενικές γραμμές είναι τα ακόλουθα:

- τείνουν να διαμορφωθούν καμπύλες με τα κοίλα προς τα πάνω,
- οι κλίσεις είναι ήπιες όσο πιο λεπτόκοκκο είναι ιζήμα,
- οι κλίσεις τείνουν να είναι πιο επίπεδες για μεγάλου ύψους κυματισμούς.

Το υποθαλάσσιο τμήμα του προφίλ σε ισορροπία μπορεί σε γενικές γραμμές να εκφραστεί με τη σχέση του Dean (Dean, 1991):

$$d(y) = A_p y^m \quad (2.4)$$

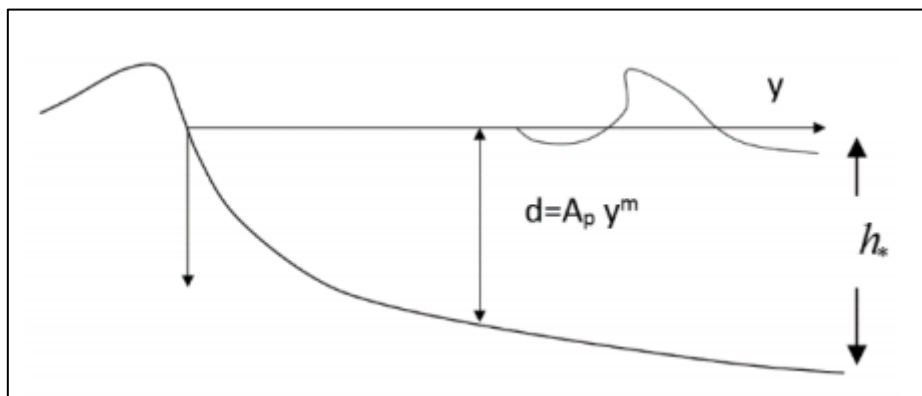
όπου: d : βάθος νερού,

A_p : παράμετρος που σχετίζεται με το μέγεθος του κόκκου,

y : απόσταση από την ακτογραμμή.

Για το τμήμα της στάθμης που βρίσκεται πάνω από την ίσαλο γραμμή υιοθετείται ένα προφίλ με σταθερή κλίση (U.S. Army Corps of Engineers, 2002). Ο εκθέτης m λαμβάνεται συνήθως ίσως με $2/3$ ενώ ο συντελεστής A_p ισούται με (Dean, 1983):

$$A_p = 0.5 w_f^{0.44} \quad (2.5)$$



Σχήμα 2.8: Προφίλ ισορροπίας

Σύμφωνα με την εξίσωση (2.4) για μεγάλες τιμές του y το βάθος αυξάνεται σημαντικά, λαμβάνοντας μη ρεαλιστικές τιμές. Στην πραγματικότητα το προφίλ της εξίσωσης (6.21) ισχύει έως ένα βάθος h_* . Το βάθος αυτό ονομάζεται κρίσιμο βάθος ή βάθος αιώρησης (closure depth). Βαθύτερα από αυτό, οι κυματικές συνθήκες δεν είναι ικανές να μεταβάλουν τη μορφολογία (επειδή η ταχύτητα του πυθμένα μειώνεται και η διατμητική τάση παίρνει τιμές κάτω από την κρίσιμη τιμή αποκόλλησης των κόκκων). Το βάθος αιώρησης h_* (closure depth) υπολογίζεται από τη σχέση (Hallermeier, 1981, 1983):

$$h_* = 2.28H_e - 68.5 \left(\frac{H_e^2}{gT_e^2} \right) \quad (2.6)$$

όπου H_e είναι το σημαντικό ύψος κύματος για ετήσια πιθανότητα υπέρβασης 0.137 % (δηλ. 12 ώρες το έτος) και T_e η αντίστοιχη περίοδος.

Η εγκάρσια συνιστώσα της θραύσης των κυμάτων οδηγεί σε ενεργοποίηση και μεταφορά υλικού κατά την διεύθυνση αυτή (εγκάρσια). Σημαντικό να αναφερθεί ότι κάτω από εξαιρετικές κλιματολογικές συνθήκες οι μεταβολές στη διεύθυνση αυτή μπορούν να εξελιχθούν ραγδαία. Μία ακτή υπό την επίδραση μεγάλων κυματισμών (θύελλα) μπορεί να υποχωρήσει κατά δεκάδες μέτρα. Αντίθετα, με την εμφάνιση κυματισμών μικρότερης καμπυλότητας (λόγος H_o/L_o) και ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα την πρόσχωση του μετώπου της ακτής. Η εμφάνιση κυματισμών υψηλής καμπυλότητας λαμβάνει χώρα συνήθως κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ αντίθετα οι μικρής καμπυλότητας κυματισμοί εμφανίζονται κατά τους εαρινούς και κυρίως κατά τους θερινούς μήνες. Το φαινόμενο της εγκάρσιας στερεομεταφοράς έχει συνήθως εποχικό χαρακτήρα, ήτοι τη χειμερινή περίοδο οι ακτές συνήθως υποχωρούν διαμορφώνοντας απότομες κλίσεις εγκάρσια προς το μέτωπο τους, ενώ κατά την θερινή περίοδο αντίστοιχα ενισχύονται (προώθηση προς τη θάλασσα του μετώπου τους) με την κλίση τους να διαμορφώνεται αντίστοιχα εμφανώς πιο ήπια.

2.4 Μέθοδοι σχηματοποίησης

Ένα θεμελιώδες πρόβλημα που προκύπτει από την πραγματοποίηση βασισμένης σε διαδικασίες (process-based) μορφολογικής μοντελοποίησης είναι η ακριβής προσομοίωση των παράκτιων διεργασιών και μορφοδυναμικών φαινομένων σε χρονικές κλίμακες αρκετών ετών. Ειδικότερα, η εξέλιξη των μορφολογικών μεταβολών που ενδιαφέρει τον μηχανικό συνήθως συμβαίνει σε χρονικές κλίμακες αρκετών τάξεων μεγέθους μεγαλύτερες από τη χρονική κλίμακα των υδροδυναμικών διεργασιών που προκαλούν τη στερεομεταφορά (Lesser, 2009). Αυτή τη διαφορά στην κλίμακα εκμεταλλεύεται ο μηχανικός για την επιτάχυνση της μορφολογικής μοντελοποίησης. Όπως προτάθηκε από τον de Vriend et al. (1993), αυτή η πιθανή διαφοροποίηση στις χρονικές κλίμακες προσφέρει μια βάση για μια σειρά από προσεγγίσεις μορφολογικών τεχνικών επιτάχυνσης, τρεις εκ των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια. Η δεύτερη και η τρίτη θα παρουσιαστούν επιγραμματικά, ενώ για την πρώτη γίνεται εκτενέστερη ανάλυση, καθώς αποτελεί τη μέθοδο που υιοθετήθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία.

- Μείωση δεδομένων εισαγωγής (input reduction) η οποία βασίζεται στην ιδέα ότι οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις των διαδικασιών μικρότερης κλίμακας μπορούν να επιτευχθούν εφαρμόζοντας μοντέλα των εν λόγω διαδικασιών με μειωμένα δεδομένα εισόδου, τα λεγόμενα «αντιπροσωπευτικά» (representative) (wave schematization, morphological tide).
- Μείωση υπολογιστικού μοντέλου (model reduction), η οποία βασίζεται στην ιδέα ότι το ίδιο το μοντέλο μπορεί να αναδιατυπωθεί στην επιθυμητή κλίμακα, δίχως την περιγραφή των λεπτομερειών των διαδικασιών μικρότερης κλίμακας. (συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης - Morfac)
- Μοντελοποίηση προσανατολισμένη στη συμπεριφορά (behaviour-oriented modelling), η οποία επιχειρεί να μοντελοποιήσει το φαινόμενο ενδιαφέροντος χωρίς να προσπαθεί να κατανοήσει ή να περιγράψει τις υποκείμενες διαδικασίες. (διεργασίες ιζημάτων στις ακτές, υπόγεια ρεύματα, διαβροχή-ξηρανση κ.λπ.)

Ο στόχος της μείωσης των κυματικών δεδομένων εισόδου είναι ο καθορισμός ενός συγκεκριμένου αριθμού κυματικών κλάσεων οι οποίες στο σύνολό τους παράγουν τα ίδια μοτίβα και ποσοστά στερεομεταφοράς με τις πλήρεις χρονοσειρές για μία δεδομένη χρονική περίοδο. Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για τη μείωση των κυματικών δεδομένων εισαγωγής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω μέθοδοι:

- Μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών (Energy Flux Method)
- Μέθοδος σταθερών κλάσεων (Fixed Bins Method)
- Μέθοδος CERC
- Μέθοδος Pick-up Rate

Η βασική ιδέα πίσω από τη σχηματοποίηση κυματικού κλίματος είναι ότι στις μακροχρόνιες μορφοδυναμικές μεταβολές τον κυριότερο ρόλο παίζει η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, η οποία συνδέεται πρωταρχικά με τη ροή ενέργειας των κυματισμών.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει σαφές ότι στην προσπάθεια μείωσης της πολυπλοκότητας ενός συστήματος φυσικών διεργασιών χρειάζεται μεγάλη προσοχή, καθότι η μείωση

δεδομένων εισαγωγής μέσω μεθόδων σχηματοποίησης ενδεχομένως δεν μπορεί να εφαρμοσθεί σε ορισμένες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, αν ο μελετητής ενδιαφέρεται να ερευνήσει μια δεδομένη μορφολογική μεταβολή της ακτής που σχετίζεται με ένα μεμονωμένο ακραίο γεγονός (πχ. Καταιγίδα), οι μέθοδοι σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος δεν μπορούν να εφαρμοσθούν.

Η μείωση υπολογιστικού μοντέλου ή/και δεδομένων εισαγωγής δεν έχει νόημα, εκτός κι αν είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη διαμόρφωση συγκεκριμένου στόχου. Αυτό συνεπάγεται την αναγκαιότητα να διευκρινιστούν εκ των προτέρων ποιοι παράγοντες θα θεωρηθούν βασικοί και ποιοι αμελητέοι στην ανάλυση που θα ακολουθήσει. (De Vriend et al. 1993).

Συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης (Morfac)

Σε ό,τι αφορά τώρα το συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac, αυτός αυξάνει το ρυθμό μεταβολής του πυθμένα μέσω ενός σταθερού παράγοντα N. Το νέο βάθος πυθμένα που προκύπτει κατ' αυτόν τον τρόπο αντιπροσωπεύει μία χρονική περίοδο προσομοίωσης N χρονικών βημάτων. Για παράδειγμα, για μία παλίρροια διάρκειας 12 ωρών με έναν συντελεστή Morfac ίσο με 10, θα προκύψει αποτέλεσμα με αντίστοιχο χρόνο προσομοίωσης 120 ωρών.

Η σχέση (5.1) εκφράζει την επιρροή του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης στο βάθος πυθμένα.

$$H_{new} = H + \frac{DT}{1-n} * \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) * Morfac \quad (2.7)$$

όπου: $\frac{\partial q_x}{\partial x}$: ο ρυθμός μεταβολής της στερεομεταφοράς κατά διεύθυνση x

$\frac{\partial q_y}{\partial y}$: ο ρυθμός μεταβολής της στερεομεταφοράς κατά διεύθυνση y

DT : το χρονικό βήμα

2.5 Περιγραφή αριθμητικών μοντέλων

Πεδία εφαρμογών και φυσικές διεργασίες

Για τη προσομοίωση του κυματικού και υδροδυναμικού πεδίου και της παράκτιας στερεομεταφοράς στην περιοχή του Ρεθύμνου χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο MIKE 21 DHI, το οποίο αναπτύχθηκε από το Danish Hydraulic Institute.

Τα παρακάτω μοντέλα με την κατάληξη FM (flexible mesh) επιλέχθηκαν αντί των MIKE 21 PMS και MIKE 21 EMS διότι επιτρέπουν την εισαγωγή της βαθυμετρίας σε τριγωνικό κάναβο πεπερασμένων στοιχείων (flexible mesh). Παράλληλα, τα μοντέλα PMS και EMS δεν παρέχονται πλέον από τη DHI. Αυτή η μεθοδολογία επιτρέπει τη δημιουργία ακριβέστερου κανάβου, καθώς και τη προσομοίωση σύνθετων αλληλοσχετιζόμενων διεργασιών, όπως αυτών μεταξύ ρευμάτων, κυμάτων και ιζημάτων.

Ειδικότερα, έγινε χρήση των εξής τριών (3) μοντέλων:

2.5.1 MIKE 21 Spectral Waves Module FM

Χρησιμεύει στον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών καθώς και των τάσεων ακτινοβολίας (radiation stresses). Το μοντέλο περιγράφει τη γένεση, διάδοση, απόσβεση και μετασχηματισμό των ανεμογενών κυματισμών (wind waves και swell). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο σε εφαρμογές πρόβλεψης κυματικού κλίματος όσο και της αντίστροφης διαδικασίας (hindcast).

Το εν λόγω μοντέλο περιλαμβάνει τις ακόλουθες φυσικές διεργασίες:

- Γένεση κυματισμών από τη δράση του ανέμου
- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις κυμάτων
- Απόσβεση ενέργειας λόγω κλίσης κυματισμών στα βαθιά (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

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 σχέση μεταξύ

της σχετικής γωνιακής συχνότητας και της απόλυτης γωνιακής συχνότητας ω δίνεται από τη γραμμική σχέση διασποράς:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - k * U \quad (2.8)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, d το βάθος του νερού, U το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος και k το διάνυσμα του κύματος με μέτρο k και διεύθυνση θ .

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

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (2.9)$$

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:

$$\sigma_{cut-off} = \min[\sigma_{max}, \max(2.5\bar{\sigma}, 4\sigma_{PM})] \quad (2.10)$$

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

Η ενεργειακή πυκνότητα δράσης περιγράφεται τελικώς από τη σχέση:

$$E(\sigma, \theta) = E(\sigma_{max}, \theta) \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma} \right)^{-m} \quad (2.11)$$

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.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2.12)$$

όπου $N(x,y,t,\theta,\sigma)$ είναι το φάσμα της πυκνότητας δράσης, $(cx,cy,c\theta,c\sigma)$ 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 (2.12) είναι εναλλακτικός τρόπος γραφής της σχέσης (2.11), ενώ οι όροι μεταφοράς $(cx,cy,c\theta,c\sigma)$ δίνονται από τις σχέσεις (2.1)

Οι φυσικές διεργασίες που προσομοιώνει το μοντέλο MIKE21 SW συμμετέχουν σαν όροι πηγής στο δεξί μέλος της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης () αθροιστικά ως εξής:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (2.13)$$

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 (θραύση κυματισμών στα βαθιά λόγω κλίσης)

S_{bot} : Απόσβεση λόγω τριβής πυθμένα

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

Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες

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 διάδοσης 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_t . Ο συντελεστής ανάκλασης λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 (πλήρης απορρόφηση κυματικής ενέργειας) και 1 (ολική ανάκλαση του εισερχόμενου κυματισμού).

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:

$$\sigma_1 = \sigma_{min} \quad (2.14)$$

$$\sigma_i = f_\sigma \sigma_{i-1} \quad (2.15)$$

$$i = 2, N_\sigma \quad (2.16)$$

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:

$$\theta_m = (m - 1)\Delta\theta \quad (2.17)$$

$$\Delta\theta_m = \frac{2\pi}{N_\theta} \quad (2.18)$$

$$m = 1, N_\theta \quad (2.19)$$

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 1ης 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) η οποία περιλαμβάνει:

- 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:

$$N_{i,l,m}^* = N_{i,l,m}^n + \Delta t \left(\frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} \right)^n \quad (2.20)$$

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

$$Cr_{i,l,m} = \left| \frac{c_x \Delta t}{\Delta x_i} \right| + \left| \frac{c_y \Delta t}{\Delta y_i} \right| + \left| \frac{c_\sigma \Delta t}{\Delta \sigma_l} \right| + \left| \frac{c_\theta \Delta t}{\Delta \theta_m} \right| < 1 \quad (2.21)$$

Προκειμένου να ξεπεραστεί ο αυστηρός περιορισμός ευστάθειας, εκτελείται μια μέθοδος πολλαπλών επαναλήψεων που βασίζεται στους Vilsmeier and Hanel (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:

$$N_{i,l,m}^{n+1} = N_{i,l,m}^* + \Delta t \left[\frac{(1 - \chi) S_{i,l,m}^* + \chi S_{i,l,m}^{n+1}}{\sigma_l} \right] \quad (2.22)$$

2.5.2 MIKE 21 Hydrodynamic Module FM

Χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του κυματογενούς ρεύματος. Το εν λόγω υδρολογικό μοντέλο προσομοιώνει τη μεταβολή της στάθμης του νερού και τη ροή, υπολογίζοντας στοιχεία που χρησιμοποιούνται έπειτα ως δεδομένα για το μοντέλο SW που παρουσιάστηκε παραπάνω.

Το Hydrodynamic Module FM δίνει ως αποτελέσματα για κάθε στοιχείο του υπολογιστικού κανάβου και για κάθε χρονικό βήμα το βάθος νερού, τη στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας, καθώς και τις ταχύτητες κατά x και y (u και v αντιστοίχως).

2.5.3 MIKE 21 Sand Transport Module FM

Το μοντέλο Sand Transport Module (ST) FM υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων (άμμος) και των σχετικών αρχικών ρυθμών μεταβολής της στάθμης του πυθμένα σε περιπτώσεις αμιγούς ρεύματος ή σε συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος. Το MIKE 21 FM ST υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς στο χωρικό πλέγμα flexible mesh, βασιζόμενα σε υδροδυναμικά δεδομένα τα οποία προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου MIKE 21 FM HD και σε συνδυασμό με τα στοιχεία που αφορούν το ίζημα της περιοχής μελέτης. Επιπλέον είναι εφικτό να συμπεριληφθεί η ανάδραση μεταξύ βαθυμετρίας και του ρυθμού μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα.

Το συγκεκριμένο μοντέλο δίνει ως αποτελέσματα το συνολικό φορτίο στερεομεταφοράς κατά x και y, το ρυθμό μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, την αλλαγή της στάθμης του πυθμένα καθώς και τη στιγμιαία στάθμη πυθμένα.

Η μέθοδος υπολογισμού της στερεομεταφοράς σε κάθε κελί του μη δομημένου πλέγματος γίνεται με τη μέθοδο SDT που έχει αναπτυχθεί στο Danish Hydraulic Institute (DHI) και αποτελεί μια παραλλαγή της μεθόδου του Bijker (1977) για τον υπολογισμό του ρυθμού στερεομεταφοράς υπό την παράλληλη δράση κύματος και ρεύματος.

Εξισώσεις υπολογισμού

Η πιθανότητα κίνησης ενός ιζήματος μπορεί να υπολογισθεί από τον παρακάτω τύπο (Engelund and Fredsoe, 1976):

$$p = \left(1 + \left(\frac{\pi}{6} \frac{\mu_d}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right)^{\frac{1}{4}}, \theta' > \theta_c \quad (2.23)$$

Ο συντελεστής δυναμικής τριβής μ_d (dynamic friction coefficient) θεωρείται ίσος με $\mu_d = 0.51 = \tan 27^\circ$. Η αδιάστατη επιφανειακή διατμητική τάση (non-dimensional skin shear stress) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\theta' = \frac{u_f'^2}{(s-1)gd_{50}} \quad (2.24)$$

Όπου η ταχύτητα τριβής που σχετίζεται με την επιφανειακή τριβή υπολογίζεται θεωρώντας λογαριθμικό προφίλ ταχυτήτων:

$$u_f' = \frac{V}{6 + 2.5 \ln\left(\frac{h}{2.5d_{50}}\right)} \quad (2.25)$$

Ο ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα (bed load transport rate) υπολογίζεται προσεγγιστικά από τη σχέση:

$$s_{bl} = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (2.26)$$

Η συγκέντρωση αναφοράς (reference concentration) κοντά στον πυθμένα υπολογίζεται από την εξής εμπειρική σχέση (Zyserman and Fredsoe, 1994):

$$c_b = \frac{0.331(\theta - \theta_c)^{1.75}}{1 + \frac{0.331}{0.46}(\theta - \theta_c)^{1.75}} \quad (2.27)$$

Η εμπειρική σχέση καθιερώθηκε μέσω ανάλυσης πειραματικών δεδομένων των Guy et. al (1966) και καλύπτει το εύρος από φορτίο πυθμένα μέχρι και φορτίο αιώρησης. Η επιρροή της πλευρικής κλίσης πυθμένα συμπεριλαμβάνεται στη σχέση μέσω μείωσης της κρίσιμης τάσης Shields για την έναρξη κίνησης ιζήματος.

Η αριθμητική ολοκλήρωση πραγματοποιείται σε κατακόρυφη λογαριθμική κλίμακα, διότι κοντά στον πυθμένα απαιτείται μεγαλύτερη διακριτοποίηση στοιχείων (περισσότερα στοιχεία). Ο λόγος είναι ότι στον πυθμένα εμφανίζονται οι μεγαλύτερες κλίσεις ταχυτήτων. Η αδιάστατη κατακόρυφη συνιστώσα υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$\eta_j = \eta_{j-1} + \Delta * 1.06^{j-1} \quad (2.28)$$

Όπου το βήμα Δ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta = \frac{1}{\frac{1 - 1.06^{99}}{1 - 1.06} - 1} \quad (2.29)$$

Το βάθος χωρίζεται σε 99 τμήματα. Το προφίλ της ταχύτητας θεωρείται ίσο με:

$$u(\eta) = \frac{\sqrt{g}}{0.4C} \ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) \quad (2.30)$$

Το επίπεδο η_0 (no-slip level) υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$\eta_0 = \exp\left(\eta_0 - 1 - \frac{0.4C}{\sqrt{g}}\right) \quad (2.31)$$

και λύνεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας.

Το κανονικοποιημένο κατακόρυφο προφίλ συγκέντρωσης (normalised vertical concentration profile) δίνεται από τον τύπο:

$$c(\eta) = \left(\frac{1-\eta}{\eta} * \frac{\alpha}{1-\alpha}\right)^Z \quad (2.32)$$

όπου το πεδίο αναφοράς (reference level) α προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{2d_{50}}{h} \quad (2.33)$$

Η παράμετρος αιώρησης (Rouse suspension parameter) Z ορίζεται ως:

$$Z = \frac{w_s}{\kappa u_f} \quad (2.34)$$

Ο ρυθμός μεταφοράς του φορτίου αιώρησης (suspended load transport rate) S_{sl} υπολογίζεται μέσω του τύπου:

$$S_{sl} = c_b V h \int_{\eta_0}^1 u(\eta) c(\eta) d\eta \quad (2.35)$$

Η συγκέντρωση μάζας ισορροπίας (equilibrium mass concentration) c_e δίνεται από τη σχέση:

$$c_e = \frac{S_{sl}}{Vh} s * 10^6 \quad (2.36)$$

2.5.4 MIKE 21/3 Coupled Model FM

Τα μοντέλα Hydrodynamic FM και Spectral Wave FM αποτελούν τα βασικότερα υπολογιστικά στοιχεία του λογισμικού. Μέσω του MIKE 21/3 Coupled Model FM καθίσταται δυνατή η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κυμάτων και ρευμάτων, ενώ επιπροσθέτως εμπεριέχει δυναμική σύζευξη (dynamic coupling) μεταξύ του μοντέλου στερεομεταφοράς (Sand Transport) και των Hydrodynamic και Spectral Waves μοντέλων. Κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικής σημασίας για την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος, καθώς συμβάλλει στην ορθότερη αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης, όπου τα προαναφερθέντα δυναμικά φαινόμενα χαρακτηρίζονται από συνεχή αλληλεπίδραση.

3 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

3.1 Γενικά Στοιχεία

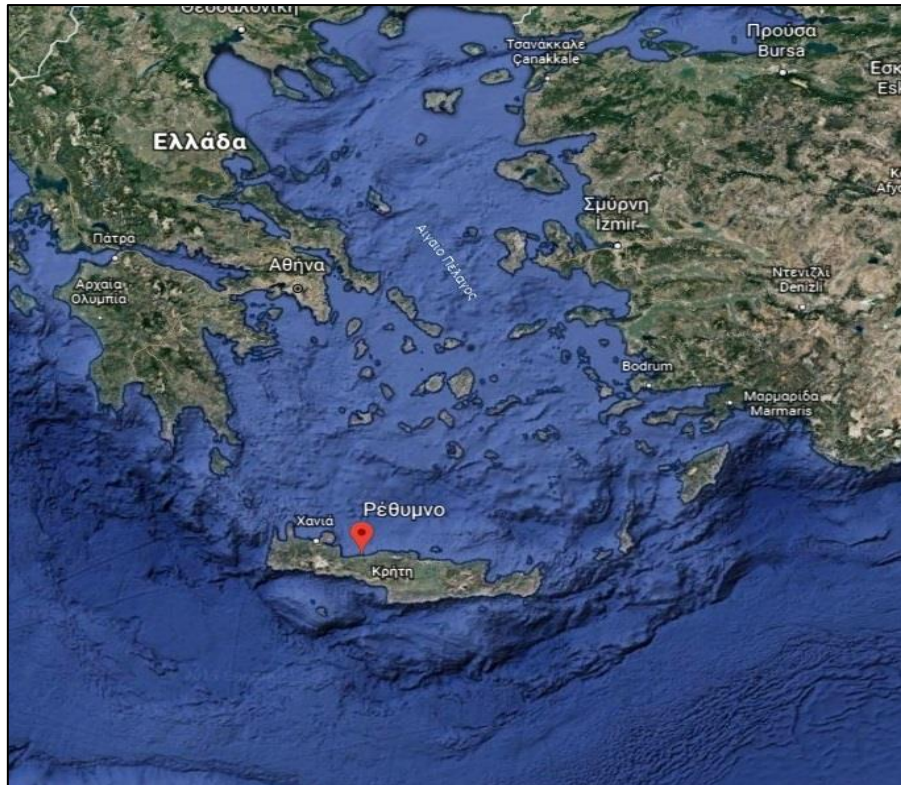
Το Ρέθυμνο είναι πρωτεύουσα του ομώνυμου νομού (περιφερειακής ενότητας) της Κρήτης και έδρα του μητροπολιτικού ομώνυμου Δήμου της περιφέρειας Κρήτης (πρόγραμμα Καλλικράτης) με τον πληθυσμό του να ανέρχεται σε 32.468 κατοίκους (Census 2011) με πυκνότητα 140.12 πληθυσμού / km² και έκταση 26.777 km². Αποτελώντας την τρίτη πιο πυκνοκατοικημένη αστική περιοχή στο νησί της Κρήτης (μετά από Ηράκλειο και Χανιά), στο Ρέθυμνο αναπτύσσονται εμπορικές, διοικητικές, πολιτιστικές και τουριστικές δραστηριότητες κατά μήκος της βόρειας ακτής όπου βρίσκεται η πόλη. Το μέσο απόλυτο ύψος είναι 15 m. '



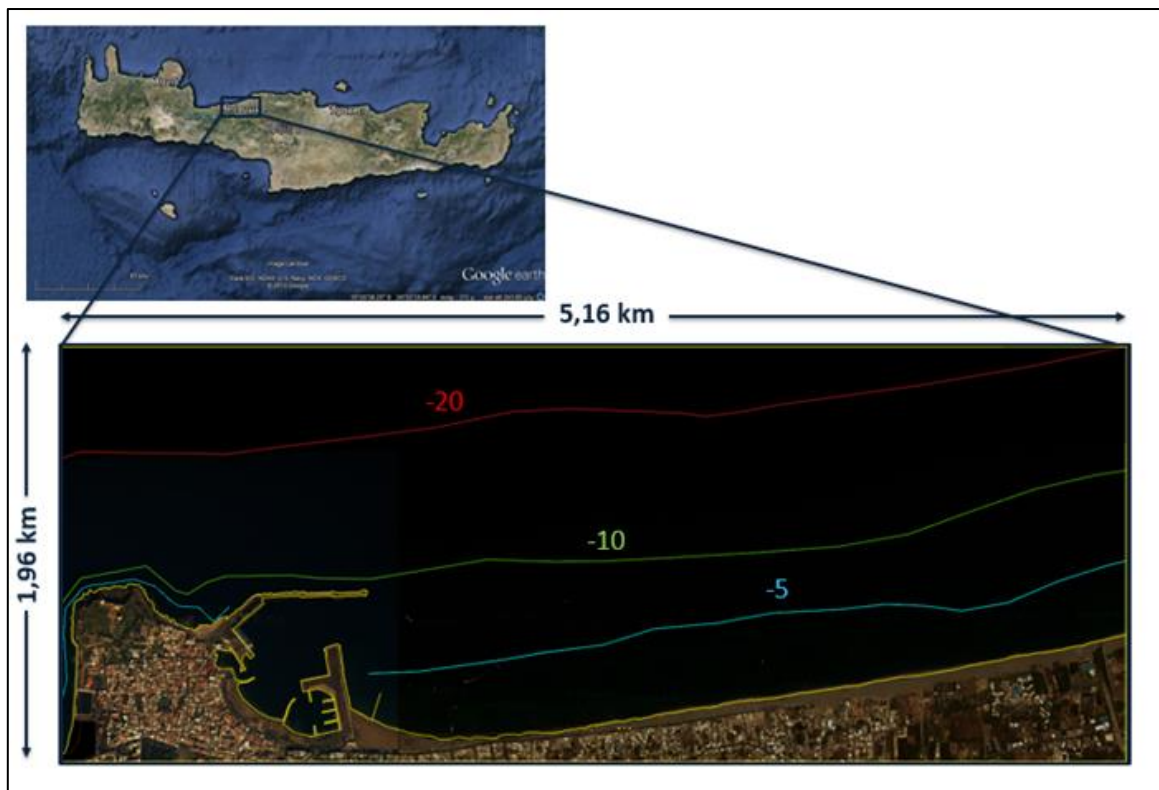
Εικόνα 3.1: Γεωγραφικός προσδιορισμός Ρεθύμνου Κρήτης



Εικόνα 3.2: Περιοχή μελέτης



Εικόνα 3.3: Περιοχή μελέτης, Ρέθυμνο, Κρήτη (Πηγή: Google Earth)



Εικόνα 3.4: Ισοβαθείς καμπύλες των -20, -10, -5m

3.2 Ιστορικά στοιχεία

Τα πρώτα στοιχεία ύπαρξης ζωής στο Ρέθυμνο χρονολογούνται από την υστερομινωική περίοδο (1350-1250 π.Χ.). Σαν πόλη, η αρχαία "Ρίθυμνα" έφτασε στην ακμή της τον 4ο και 3ο π.Χ. αιώνα, όπως δείχνουν τα χρυσά και ασημένια νομίσματα αυτής της περιόδου. Σταδιακά όμως άρχισε να παρακμάζει, για να φτάσει στα ρωμαϊκά χρόνια να θεωρείται ένα άσημο χωριό. Για τις επόμενες ιστορικές περιόδους (Αραβική και Α" Βυζαντινή), οι πληροφορίες για την περιοχή είναι ελάχιστες έως ανύπαρκτες. Για τη Β" Βυζαντινή περίοδο (961-1204 μ.Χ.), υπάρχουν ενδείξεις ότι υπήρχε ένας μικρός οχυρωμένος οικισμός, με την ονομασία "Castell Vecchio".

Μετά τη Δ' Σταυροφορία (1204), η Κρήτη παραχωρήθηκε στο Βονιφάτιο το Μομφερατικό, ο οποίος την πούλησε σχεδόν αμέσως στους Βενετούς. Μετά από μια ολιγόχρονη κυριαρχία του νησιού από τους Γενουάτες, λόγω ολιγωρίας των Βενετών που άργησαν να την καταλάβουν, η Κρήτη καταλαμβάνεται το 1211 από τους δεύτερους.

Οι Βενετοί σύντομα κατάλαβαν τη σπουδαιότητα της θέσης του Ρεθύμνου, αφού το λιμάνι του διακινούσε σημαντικές ποσότητες εμπορευμάτων. Το 1540, λόγω της επέκτασης της πόλης έξω από τον οικισμό του Castell Vecchio και του επικείμενου τουρκικού κινδύνου, οι βενετικές αρχές αποφάσισαν να περιβάλουν την πόλη με νέο οχυρό περίβολο. Οι αδυναμίες των νέων οχυρωματικών έργων φάνηκαν το 1571, κατά την πειρατική επιδρομή του Ουλούτζ-Αλή, ο οποίος χωρίς την παραμικρή αντίσταση μπήκε στην πόλη και την κατέστρεψε ολοκληρωτικά πυρπολώντας την. Δυο χρόνια αργότερα, το 1573, θεμελιώθηκε η «Φορτέτζα» πάνω στο λόφο του Παλαιόκαστρου, για να μπορεί η πόλη να αντιμετωπίσει καλύτερα επικείμενες επιδρομές και πολιορκίες. Η Φορτέτζα είναι ορατή από κάθε γωνία της πόλης, ενώ παράλληλα έχει πανοραμική θέα σε όλο το Ρέθυμνο και στην δυτική ακτή, κρύβοντας μέσα της ολόκληρη ιστορία αιώνων.



Εικόνα 3.5: Το ιστορικό κάστρο Φορτέτζα

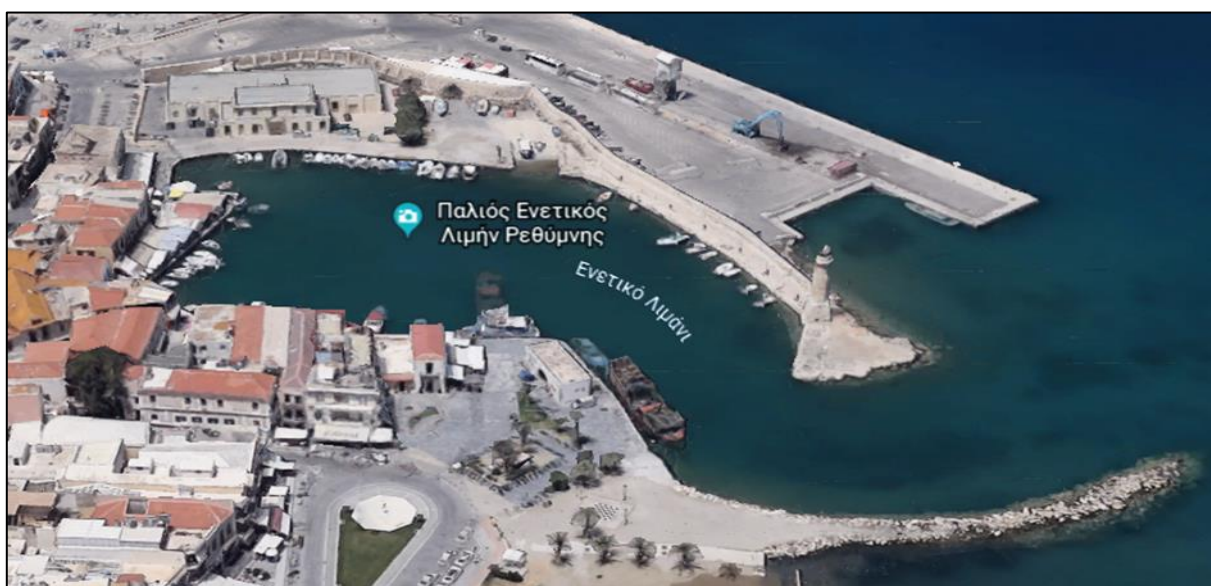
Τελικά το 1646 το Ρέθυμνο έπεσε στα χέρια των Τούρκων, για να ακολουθήσει, μερικά χρόνια αργότερα, η ολοκληρωτική κατάληψη του νησιού. Αυτή θα διαρκέσει μέχρι το 1897, διακοπόμενη από μια μικρή αιγυπτιακή κατοχή (1830-1840). Σε όλη τη διάρκεια της τουρκικής κατάκτησης, πολλές επαναστάσεις συγκλόνισαν το νησί με αποκορύφωμα την επανάσταση του 1866 και το ολοκαύτωμα του Αρκαδίου.

Το 1897, οι Μεγάλες Δυνάμεις αποφάσισαν την κατοχή του νησιού. Το Ρέθυμνο καταλήφθηκε από τα ρωσικά και πολωνικά στρατεύματα, τα οποία αποχώρησαν το 1907. Το 1908, οι Κρητικοί επωφελούμενοι από τις διεθνείς εξελίξεις κήρυξαν την ένωση της Κρήτης με την Ελλάδα. Αίσιο τέλος δόθηκε στο Κρητικό Ζήτημα το 1913, μετά τους νικηφόρους Βαλκανικούς Πολέμους, οπότε και υπογράφηκε η επίσημη ένωση. Το 1924, οι Τουρκοκρητικοί αναχώρησαν για τη Μικρά Ασία, στο πλαίσιο της Συνθήκης της Λωζάννης, που προέβλεπε την ανταλλαγή των πληθυσμών ανάμεσα στις δύο χώρες. Στη Θέση τους ήρθαν Έλληνες πρόσφυγες από τη Μικρά Ασία.

Κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, το Ρέθυμνο βομβαρδίστηκε από τους Γερμανούς και πολλά κτήρια καταστράφηκαν. Μετά το τέλος του πολέμου, η φτώχεια και οι κακές συνθήκες διαβίωσης ώθησαν πολλούς Ρεθυμνιώτες να αναζητήσουν την τύχη τους στην Αθήνα και το εξωτερικό.

3.2.1 Ο Ενετικός Λιμένας

Στο βορειοδυτικό τμήμα του λιμένα διασώζεται ο λιμενοβραχίονας που κάποτε προστάτευε το λιμάνι και φτιάχτηκε από τους Ενετούς τον 13ο αιώνα. Ο μικρός βενετσιάνικος λιμενοβραχίονας με τον ψηλό τοίχο κατάφερε με αξιοπρέπεια να αντιμετωπίσει τα αγριεμένα κύματα του Κρητικού Πελάγους και να βγει αλώβητος από την δύσκολη μάχη. Σήμερα εξωτερικά από αυτόν υπάρχει ένας πολύ μεγαλύτερος λιμενοβραχίονας κι ένα νέο λιμάνι, απ' όπου φεύγουν τα επιβατικά πλοία από το Ρέθυμνο για Πειραιά και Σαντορίνη.



Εικόνα 3.6: Αεροφωτογραφία παλαιού ενετικού λιμένα

3.2.2 Λιμένας Ρεθύμνου

Ο Λιμένας Ρεθύμνου, που βρίσκεται στη Βόρεια Κρήτη εντός του ομώνυμου κόλπου (συντεταγμένες: πλάτος φ 35ο 21' 57'' Β και μήκος: λ 24ο 28' 23'' Α), είναι λιμάνι μεικτής χρήσης και χωρίζεται σε δύο τμήματα:

Στο δυτικό τμήμα (με εμπορική και επιβατική χρήση) όπου εκτελούνται όλες οι φορτοεκφορτώσεις κάθε είδους εμπορεύματος. Στο τμήμα αυτό προσδένουν περιστασιακά και τουριστικά σκάφη, είναι εγκατεστημένη γεφυροπλάστιγγα 80τ. και περιλαμβάνονται πέντε (5) κρηπιδώματα φορτοεκφόρτωσης με δυνατότητα εξυπηρέτησης μέχρι επτά πλοίων, ανάλογα με το μέγεθός τους.

Οι προαναφερθείσες αποβάθρες εξυπηρετούν κυρίως την εμπορική κίνηση του λιμανιού ωστόσο όταν υπάρχει ανάγκη για την εξυπηρέτηση τουριστικού σκάφους, άνω των 150μ. LOO, η πρόσδεση γίνεται στη θέση D, λόγω του μεγάλου μήκους και βάθους του κρηπιδώματος.

Ο εμπορικός σταθμός διαθέτει συνολικό μήκος κρηπιδωμάτων 810 m, ωφέλιμο βάθος από -6,00 έως -8,00 m καθώς και χερσαία ζώνη συνολικού εμβαδού 26.500 m²:

Στο ανατολικό τμήμα (με επιβατική και τουριστική χρήση) γίνεται η πρόσδεση των κρουαζιερόπλοιων και των επιβατικών οχηματαγωγών πλοίων. Το τμήμα αυτό του λιμανιού έχει μεγαλύτερους χερσαίους χώρους, συνολικής έκτασης 33.500 m², που μπορούν να εξυπηρετήσουν κάθε επιβατική, τουριστική κίνηση και διακίνηση φορτηγών και Ι.Χ. οχημάτων. Διαθέτει γεφυροπλάστιγγα 80 m., περιλαμβάνει 2 θέσεις φορτοεκφόρτωσης (F-G) και τα κρηπιδώματα έχουν βύθισμα -8,00 m..

Οι θέσεις (F) και (G) έχουν χαρακτηριστεί ως θέσεις για την πρόσδεση Ο/Γ Ε/Γ (οχηματαγωγών-επιβατικών) και T/P (τουριστικών) πλοίων. Έχουν μήκος 125 m και 140 m αντίστοιχα, είναι τοποθετημένα κυλινδρικά παραβλήματα μήκους δύο μέτρων, έχουν πλάτος καταστρώματος 35 και 60 μέτρων αντίστοιχα και ύψος από την μέση στάθμη θαλάσσης περίπου τα 1,80 m ενώ το μέσο βύθισμα είναι στα -9,00 m. Τέλος έχουν άπλετο φωτισμό και πίνακα για την ηλεκτροδότηση πλοίων με ασφάλεια 3x25 A, νερό και πυρασφάλεια.

3.3 Μορφολογία Πυθμένα

Η υποθαλάσσια περιοχή της παραλιακής ζώνης της πόλης του Ρεθύμνου χαρακτηρίζεται από ομαλές κλίσεις του πυθμένα της. Το υφαλόγιο, το οποίο αποτελεί το φυσικό όριο της υφαλοκρηπίδας, βρίσκεται σε βάθος 200 μέτρων και σε μέση απόσταση 7km από την ακτογραμμή. Πάνω στη υφαλοκρηπίδα οι κλίσεις είναι μικρές, της τάξης των 6°. Η ισοβαθής των 20 μέτρων βρίσκεται σε μέση απόσταση 1200m. Κοντά στην ακτογραμμή ο πυθμένας εμφανίζει ομαλές κλίσεις, σταθερές για όλη την περιοχή, με την ισοβαθή των 10 m να είναι παράλληλη στην ακτογραμμή σε μέση απόσταση 700m. Οι κλίσεις που πυθμένα στο δυτικό μέρος, μετά την ισοβαθή των 10m, γίνονται μεγαλύτερες από ότι στο ανατολικό τμήμα.

3.4 Γεωμορφολογία, ακτογραφία και ιζήματα ακτών

Το έδαφος της Περιφερειακής Ενότητας Ρεθύμνης κατά ποσοστό 65% είναι ορεινό, ένα ποσοστό περίπου 19% είναι ημιορεινό και το υπόλοιπο 16% είναι πεδινό. Τα πεδινά εδάφη περιορίζονται στα βόρεια και νότια παράλια. Ανατολικά των ορίων της, παρά τα όρια των επαρχιών Αμαρίου και Μυλοποτάμου, δεσπόζει το όρος Ίδη, γνωστότερο ως Ψηλορείτης, με υψόμετρο 2.458m. Ειδικότερα για την περιοχή μελέτης, δυτικά του λιμένα Ρεθύμνου το υπόβαθρο είναι βραχώδες, ενώ η ανατολική ακτή είναι ως επί το πλείστον αμμώδης.

Σημαντικότερος ποταμός της Π.Ε. Ρεθύμνης είναι ο Γεροπόταμος, που πηγάζει από την Ίδη και διαρρέοντας με τους παραποτάμους του σχεδόν όλο το ανατολικό τμήμα αυτής, εκβάλλει στο Κρητικό πέλαγος. Άλλοι ποταμοί είναι το ρέμα Σφοκορύακο, στο κεντρικό τμήμα, και ο Πετρές στο δυτικό, ενώ το ΝΑ. τμήμα διαρρέουν οι ποταμοί Ακουμιανός και Πλατύς. Επιπρόσθετα, συναντάται η τεχνητή λίμνη του φράγματος Ποταμών.

Ο Νομός παρουσιάζει δύο εκτεταμένες ακτογραμμές. Η βόρεια στο Κρητικό πέλαγος που αρχίζει δυτικά από το μέσον του μυχού του Όρμου Αλμυρού όπου συνεχίζοντας χωρίς εγκοπώσεις, μέχρι τον λιμένα Ρεθύμνου, στρέφεται στη συνέχεια Β.ΒΑ. σχηματίζοντας τα ακρωτήρια Λιανός Κάβος, Χονδρός Κάβος και Κορακιάς καθώς και τον όρμο του Μπαλίου καταλήγοντας ανατολικά στον όρμο Φόδελε.

3.5 Πλημμυρικά φαινόμενα

Ένα σοβαρό πρόβλημα στην περιοχή του Ρεθύμνου αποτελούν οι πλημμύρες οι οποίες είναι μια συνεχή απειλή τόσο για τους κατοίκους της, όσο και για τις περιουσίες και τις υποδομές της. Τα έντονα πλημμυρικά γεγονότα, που εκδηλώθηκαν όλα αυτά τα χρόνια, είχαν ως αποτέλεσμα σοβαρές και εκτεταμένες υλικές ζημιές, κυρίως στην παλιά πόλη του Ρεθύμνου και τις πεδινές περιοχές στα ανατολικά. Επιπλέον, οι αλλαγές στις συνθήκες του ανέμου, γεγονός που πιθανά αποδίδεται στην κλιματική αλλαγή, είχαν ως αποτέλεσμα την πρόκληση θυελλωδών φαινομένων που παρουσιάζονται συχνότερα σε σχέση με το παρελθόν. Πιο συγκεκριμένα, ακραία καιρικά φαινόμενα με ισχυρούς ανέμους (κυρίως Βορείων και Βορειοδυτικών) προκάλεσαν τη δημιουργία κυμάτων καταιγίδας συνοδευόμενα κάποιες φορές από έντονες πλημμύρες που διαδόθηκαν μέσω εφήμερων ρευμάτων (Σκαρλάτου Ε., 2016).

4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

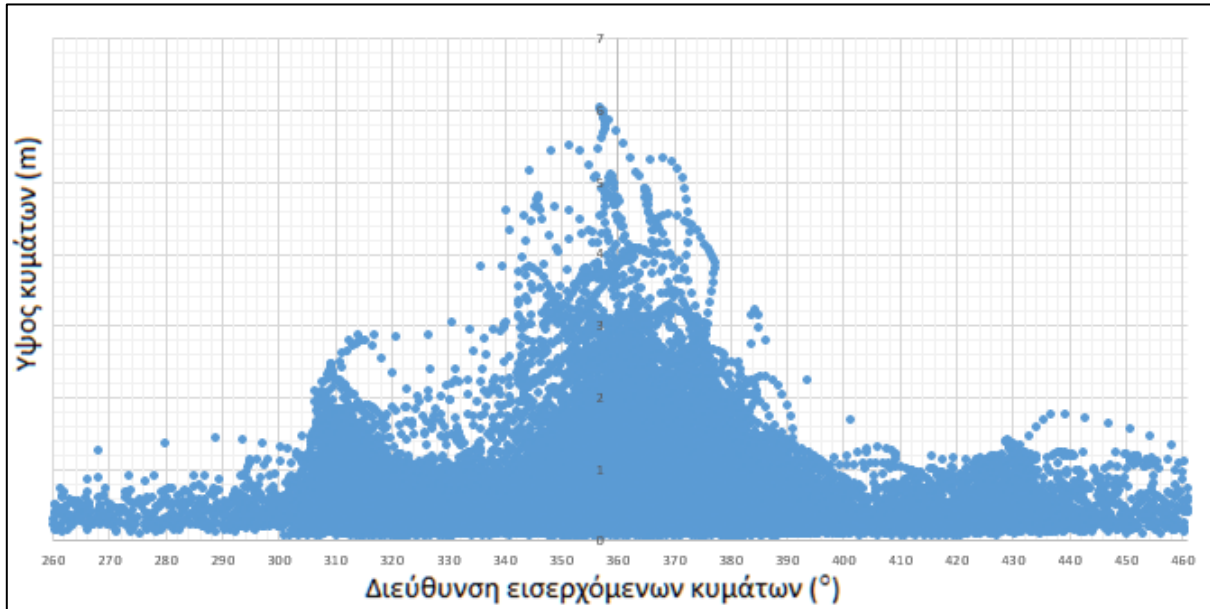
4.1 Προσδιορισμός Κυματικού Καθεστώτος

4.1.1 Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS)

Για τον προσδιορισμό του κυματικού καθεστώτος έγινε χρήση της βάσης δεδομένων Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συγκεκριμένα, ελήφθησαν στοιχεία από το πακέτο *MEDSEA_ANALYSIS_FORECAST_WAV_006_017*, το οποίο συγκροτείται από ωριαίες παρατηρήσεις σε $1/24^\circ$ οριζόντια ανάλυση καλύπτοντας τη Μεσόγειο Θάλασσα και εκτεινόμενο μέχρι και -18.125 W στον Ατλαντικό Ωκεανό. Το μοντέλο κυματικής πρόβλεψης (waves forecast / Med-Waves system) βασίζεται στο αναθεωρημένο WAM Cycle 4.6.2. Στο εν λόγω μοντέλο το συνεχές κυματικό φάσμα προσεγγίζεται μέσω κλιμακωτών συναρτήσεων, οι οποίες είναι σταθερές σε ένα τμήμα συχνοτήτων-διευθύνσεων. Το Med-Waves μοντέλο επιλύει το προγνωστικό τμήμα του κυματικού φάσματος με 24 κατευθυντήρια και 32 λογαριθμικώς καταναμημένα τμήματα συχνοτήτων, ενώ οι λύσεις του μοντέλου διορθώνονται μέσω ενός βέλτιστου συστήματος παρεμβολής συγκεντρωμένων δεδομένων όλων των διαθέσιμων παρατηρήσεων χαρακτηριστικού ύψους κύματος από δορυφόρους. Το μοντέλο Med Waves περιέχει αδρομερή κানাβο με ανάλυση $1/6^\circ$, καλύπτοντας το Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό από 75° W έως και 10° E και από 70° N έως 10° S, καθώς και έναν ένθετο κানাβο με ανάλυση $1/24^\circ$, καλύπτοντας τη Μεσόγειο από 18.125° W έως 36.2917° E και από 30.1875° N έως 45.9792° N. Το σύστημα παρέχει κυματική ανάλυση για τη Μεσόγειο Θάλασσα, καθώς και κυματικές προγνώσεις 10 ημερών για τη Μεσόγειο, οι οποίες ανανεώνονται σε καθημερινή βάση.

Για τη λήψη περισσότερων δεδομένων (χρονολογίες 2012-2014) έγινε χρήση του πακέτου *MEDSEA_HINDCAST_WAV_006_012* του προγράμματος Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS). Το εν λόγω μοντέλο, που εκτείνεται σε 12 έτη (Φεβρουάριος 2006-Δεκέμβριος 2017), αποτελείται από ωριαίες παρατηρήσεις σε οριζόντια ανάλυση $1/24^\circ$, καλύπτοντας τη Μεσόγειο Θάλασσα και φτάνοντας μέχρι και -18.125 W στον Ατλαντικό Ωκεανό. Παράγεται από το σύστημα πρόβλεψης κυμάτων της Μεσογείου (Mediterranean Sea Waves forecasting system), το οποίο με τη σειρά του βασίζεται στο WAM Cycle 4.5.4 το οποίο αναπτύχθηκε ως ένθετο δύο υπολογιστικών κανάβων (αδρομερής και πυκνός) για την εξασφάλιση της ορθής εισόδου της αποθαλασσίας (swell) στη Μεσόγειο (MED), η οποία προέρχεται από το Βόρειο Ατλαντικό (NA), διέρχεται από τον πορθμό του Γιβραλτάρ και καταλήγει στη Μεσόγειο. Ο αδρομερής κানাβος καλύπτει το Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό από 75° W έως 10° E και από 70° N έως 10° S σε ανάλυση $1/6^\circ$, ενώ ο ένθετος πυκνός κানাβος καλύπτει τη Μεσόγειο από 18.125° W έως 36.2917° E και από 30.1875° N έως 45.9792° N με ανάλυση $1/24^\circ$ (~ 4.6 km). Το μοντέλο αυτό επιλύει το προγνωστικό κομμάτι του κυματικού φάσματος μέσω 24 κατευθυντήριων και 32 λογαριθμικώς καταναμημένων τμημάτων συχνοτήτων.

Εν τέλει ελήφθησαν στοιχεία για την περίοδο, τη διεύθυνση και το ύψος των κυμάτων στο διάστημα 2012-2017 (4.64 έτη). Σημαντικό να τονισθεί ότι εν τέλει αξιοποιήθηκαν μόνο κυματισμοί με διευθύνσεις 0° - 100° και 260° - 360° (ή αλλιώς 260° - 460°), καθώς ο προσανατολισμός του υφιστάμενου λιμένα καθιστά κρίσιμες αυτές τις διευθύνσεις σε ό,τι αφορά παράκτια στερεομεταφορά.

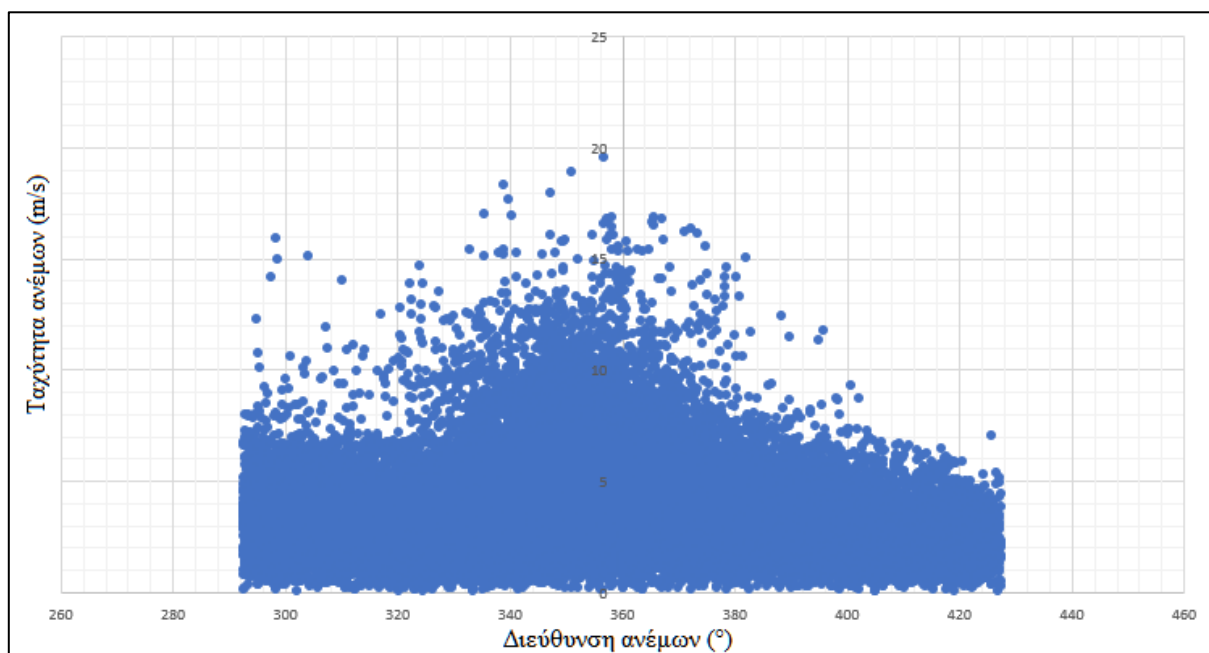


Εικόνα 4.1: Χρονοσειρά κυματικών παρατηρήσεων (CMEMS)

Σε πρώτη φάση παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό κυμάτων είναι βόρειας και βορειοδυτικής διεύθυνσης, ενώ από το βόρειο τομέα προέρχονται και τα κύματα με τα μεγαλύτερα ύψη.

4.2 Προσδιορισμός Ανεμολογικού Καθεστώτος

Για τον προσδιορισμό του ανεμολογικού καθεστώτος ελήφθησαν δεδομένα από την αμερικανική υπηρεσία National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), που επικεντρώνεται στη συλλογή δεδομένων ωκεανογραφικού και μετεωρολογικού χαρακτήρα. Ειδικότερα, ελήφθησαν ωριαίες παρατηρήσεις έντασης πνοής και διεύθυνσης ανέμου στο σημείο με συντεταγμένες 24.48333 και 35.43333 για την περίοδο Ιανουάριος 2012 - Δεκέμβριος 2018. Αυτά τοποθετήθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο Excel όπου ταξινομήθηκαν με βάση τη διεύθυνση πνοής. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον προσανατολισμό του λιμένα Ρεθύμνου, εν τέλει ελήφθησαν μόνο οι παρατηρήσεις με διευθύνσεις 0° - 100° και 260° - 360° (Βορειοδυτικοί, Βόρειοι, Βορειοανατολικοί).

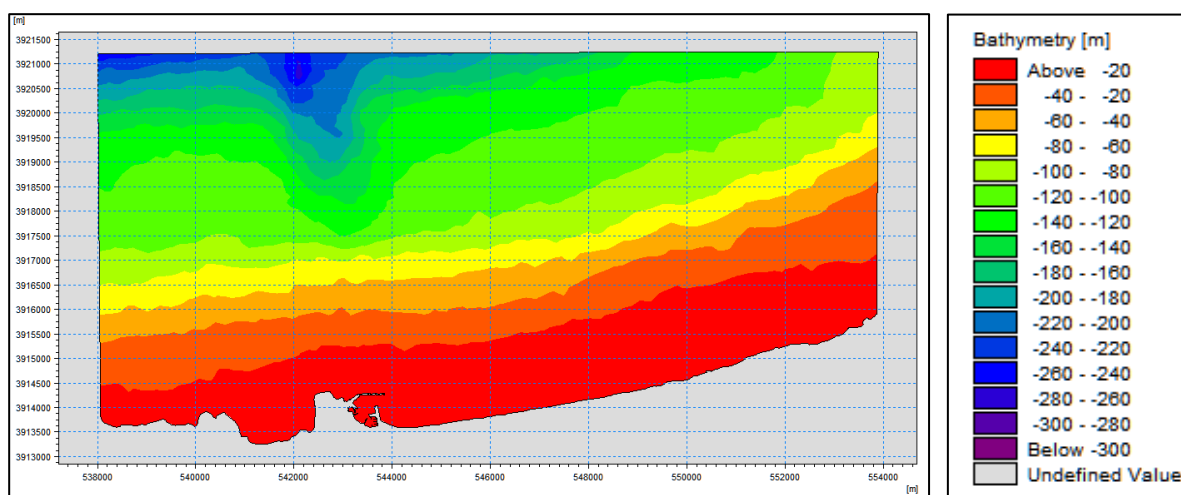


Εικόνα 4.2: Χρονοσειρά ανεμολογικών παρατηρήσεων (CMEMS)

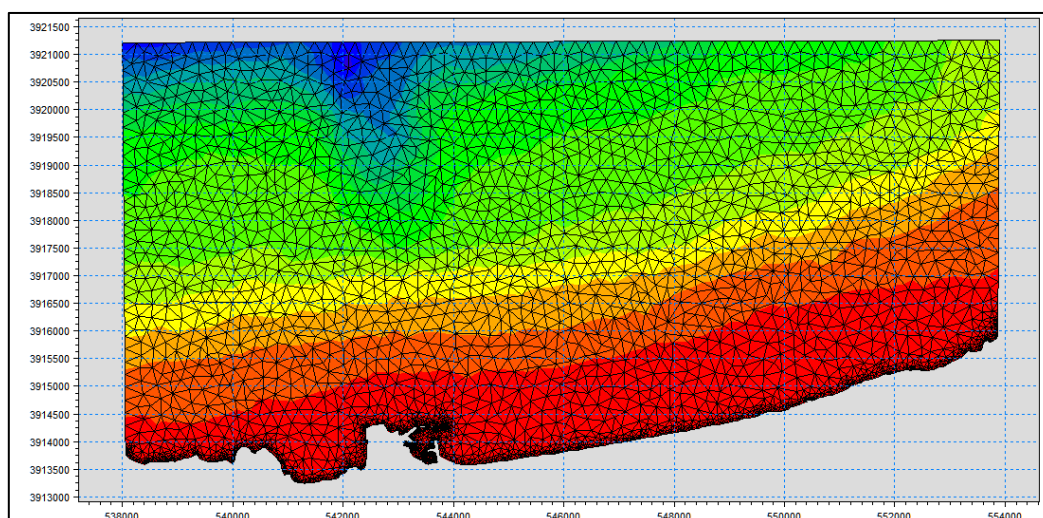
Άνεμοι βορειοδυτικής και βόρειας διεύθυνσης είναι οι εντονότεροι, το οποίο αποτελεί μια χρήσιμη πρώτη παρατήρηση για τη πρόβλεψη της παράκτιας στερεομεταφοράς. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η ύπαρξη βραχώδους υποβάθρου στο δυτικό τμήμα της ακτής, κάτι που περιορίζει την ποσότητα ιζήματος.

4.3 Προετοιμασία υπολογιστικού πεδίου

Για τη δημιουργία του τριγωνικού μη δομημένου πλέγματος (flexible mesh) εισήχθη στο εργαλείο Mesh Generator του MIKE Zero, το X,Y,Z αρχείο που αποτυπώνει τις βαθυμετρικές καμπύλες και την ακτογραμμή από τον ψηφιοποιημένο σε Autocad χάρτη της περιοχής. Ορίζοντας τα όρια της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε ο κανάβος που είναι ανεξάρτητος της βαθυμετρίας. Ακολούθως, σχεδιάστηκε ένα πολύγωνο και ορίστηκε ένα σημείο του στο κέντρο περίπου του κανάβου που βάσει των ιδιοτήτων του επιτυγχάνεται το είδος της πύκνωσης και η λεπτομέρεια που επιθυμείται. Τέλος, παράχθηκε η τελική βαθυμετρία σε αρχείο με πύκνωση κοντά στη ξηρά και με επαρκή λεπτομέρεια για να πληροί τις ανάγκες της εργασίας (βλ. Σχήματα 4.1 και 4.2).



Σχήμα 4.1: Βαθυμετρία του υπολογιστικού πεδίου



Σχήμα 4.2: Απεικόνιση του πυκνωμένου τριγωνικού κανάβου σε flexible mesh

4.4 Εφαρμογή μεθόδων σχηματοποίησης

4.4.1 Μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών (Energy Flux Method)

Σε πρώτο χρόνο έγινε η τοποθέτηση των δεδομένων (40667 ωριαίες παρατηρήσεις -ύψος κύματος, περίοδος κύματος, διεύθυνση εισερχόμενων κυμάτων-) σε υπολογιστικό φύλλο Excel, όπου υπολογίστηκε για κάθε διακριτό ύψος κύματος η ροή ενέργειας των κυματισμών (Energy Flux) μέσω του τύπου:

$$E_f = \left(\frac{\rho g H_{mo}^2}{8} \right) C_g \quad (4.1)$$

όπου: ρ : μέση πυκνότητα θαλάσσιου νερού ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$)

g : επιτάχυνση βαρύτητας ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

H_{mo} : παρατηρούμενο ύψος κύματος

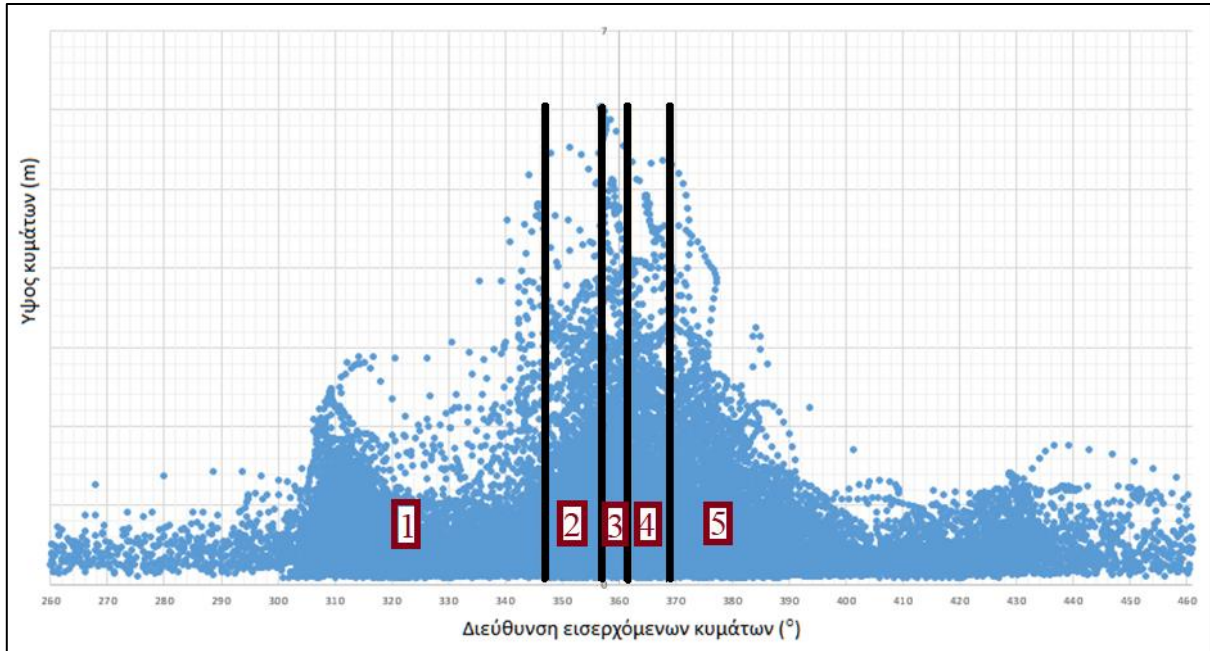
C_g : ταχύτητα ομάδας των κυματισμών

Στο σύνολο υπολογίστηκε η ροή ενέργειας για 40667 ωριαίες παρατηρήσεις διακριτών υψών κυμάτων. Έπειτα έγινε σχηματοποίηση των δεδομένων με βάση τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρακάτω (Πηγή: Benedet L., Dobrochinski J.P.F., Walstra D.J.R., Kleine A.H.F., Ranasinghe R. (2016) 'A morphological modeling study to compare different methods of wave climate schematization and evaluate strategies to reduce erosion losses from a beach nourishment project'). Αξίζει να αναφερθεί ότι στο επιστημονικό άρθρο των Benedet et al, (2016), είχε προκύψει η μέθοδος ροής ενέργειας ως καλύτερη μέθοδος σχηματοποίησης, συγκρινόμενη με Fixed Bins και Cerc. Στις μακροχρόνιες μορφοδυναμικές μεταβολές τον κυριότερο ρόλο παίζει η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, η οποία συνδέεται πρωταρχικά με τη ροή ενέργειας των κυματισμών, κάτι που καθιστά τη μέθοδο Energy Flux ιδανική για την αναπαράσταση φαινομένων στερεομεταφοράς.

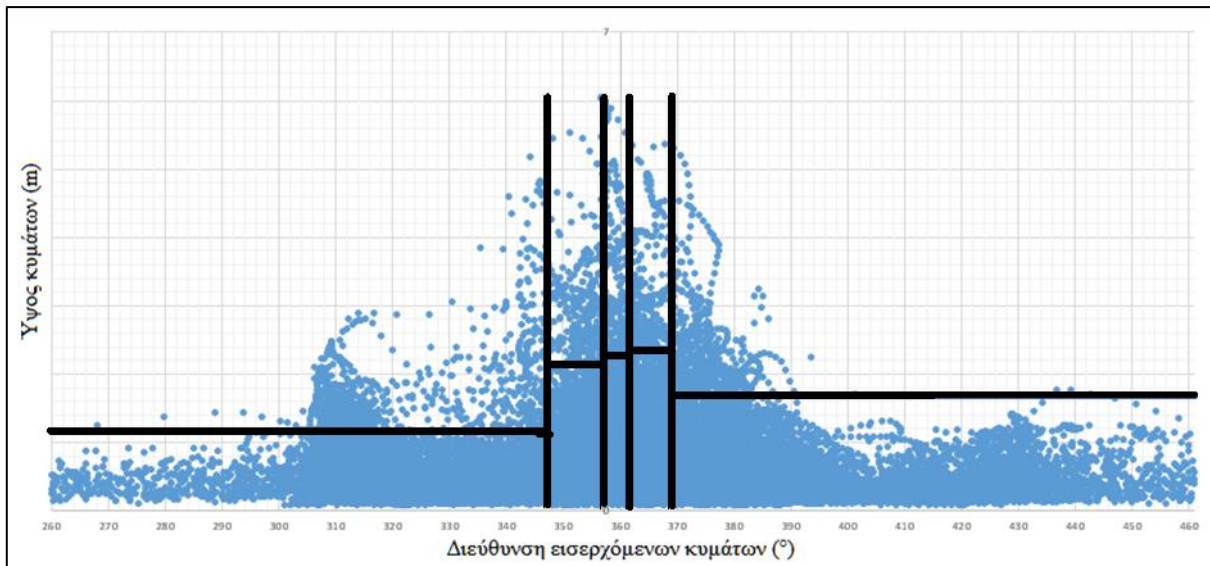
Μεθοδολογία:

- Κατασκευάστηκε γραφική παράσταση του ύψους κύματος ως προς τις διευθύνσεις των κυμάτων. Για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, στα κύματα με διεύθυνση $<101^\circ$ προστέθηκαν 360° .
- Η χρονοσειρά των κυμάτων διαχωρίστηκε σε 5 ομάδες κατά τη διεύθυνση των κυμάτων (directional bins) με βάση τη ροή ενέργειας. Συγκεκριμένα, ο διαχωρισμός έγινε έτσι ώστε κάθε κλάση να έχει ροή ενέργειας ίση με $\text{sum}(E)/5$ (βλ. Εικόνα 4.3), όπου $\text{sum}(E)$ η συνολική ροή ενέργειας για τις 40667 παρατηρήσεις. Οι κλάσεις ονομάστηκαν από το 1 έως το 5 με φορά από τα αριστερά προς τα δεξιά.
- Η κάθε μία εκ των 5 κλάσεων διαχωρίστηκε κατά το ύψος κύματος σε δύο υπο-κλάσεις ώστε η καθεμία να έχει ροή ενέργειας ίση με $\text{sum}(E)/10$. Προέκυψαν έτσι συνολικά 10

κλάσεις (βλ. Εικόνα 4.4). Οι κλάσεις ονομάστηκαν με a,b με φορά από τα χαμηλότερα ύψη κυμάτων προς τα υψηλότερα, καθώς και τον αριθμό της κατακόρυφης κλάσης στην οποία ανήκουν (βλ. Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.3: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση (directional bins) - Μέθοδος Energy Flux

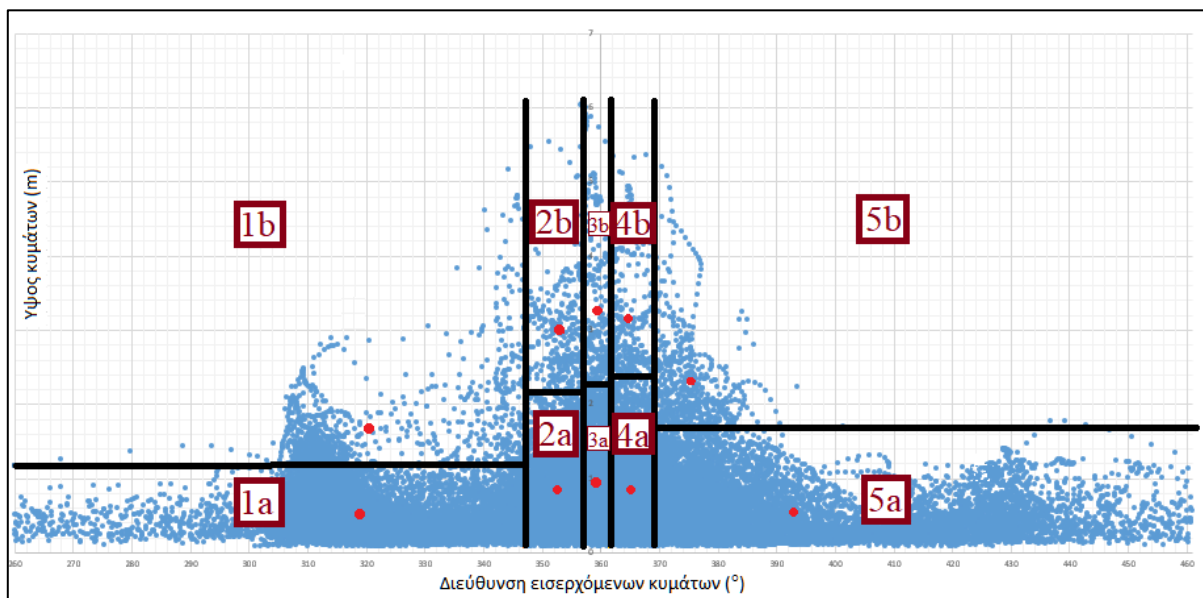


Εικόνα 4.4: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος (directional & height bins) - Μέθοδος Energy Flux

- Υπολογίστηκε ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης ως το μέσο όρο όλων των στοιχείων που ανήκουν σε αυτήν κατά διεύθυνση, ύψος κύματος και περίοδο (βλ. Πίνακα 4.1) και τοποθετήθηκε ως σημείο στην υπάρχουσα γραφική παράσταση ύψους κύματος / διεύθυνσης εισερχόμενων κυμάτων (βλ. Εικόνα 4.5).
- Υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής με βάση τον αριθμό στοιχείων της κάθε κλάσης ως προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων (βλ. Πίνακα 4.1).

Πίνακας 4.1: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Energy Flux

Κλάση	Αντιπρόσωπος				Συχνότητα εμφάνισης (%)
	H _{mo} (m)	T _p (s)	Διεύθυνση (°)	Σύνολο	
1a	0.51	4.83	319.00	14731	36.22
1b	1.65	6.83	320.49	1129	2.78
2a	0.84	5.35	352.81	4438	10.91
2b	3.00	8.26	352.99	324	0.80
3a	0.94	5.50	359.35	3370	8.29
3b	3.26	8.39	359.41	259	0.64
4a	0.84	5.28	365.22	4299	10.57
4b	3.14	8.18	364.84	300	0.74
5a	0.54	4.67	392.76	11229	27.61
5b	2.32	7.33	375.52	588	1.45
				40667	



Εικόνα 4.5: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Energy Flux

Σε επόμενο στάδιο δημιουργήθηκε χρονοσειρά στο Mike Zero συνολικής διάρκειας 1 ημέρας. Στόχος είναι η αναπαραγωγή ενός κυματικού καθεστώτος απαρτιζόμενου από τους 10 προαναφερθέντες αντιπροσώπους, ο αριθμός των οποίων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη

συχνότητα εμφάνισης που υπολογίστηκε σε προγενέστερο στάδιο στο φύλλο Excel. Σε ό,τι αφορά το χρονικό βήμα, αυτό θα καθοριστεί από την ανάγκη να εμφανίζεται τουλάχιστον μία φορά ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης, έτσι ώστε να θεωρηθεί αξιόπιστο το μοντέλο. Θεωρούμε για μεγάλη ακρίβεια χρονικό βήμα ίσο με 30 δευτερολέπτων (σύνολο 2881 παρατηρήσεις). Για παράδειγμα, ο αντιπρόσωπος της έκτης κλάσης που όπως φαίνεται και στον πίνακα (4.1) έχει τη χαμηλότερη συχνότητα εμφάνισης, ίση με 0,6369%, θα τοποθετηθεί $0,006369 \cdot 2881 \approx 18$ φορές στη χρονοσειρά. Όμοια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες κλάσεις.

Σε ό,τι αφορά τις στήλες, αυτές χωρίζονται στο ύψος κύματος (Wave Height), την κυματική περίοδο (Wave Period), τη διεύθυνση κύματος (Wave Direction) και τον αδιάστατο συντελεστή διασποράς (Dimensionless Spreading Index), ο οποίος αποτελεί στατιστικό μέγεθος και απαιτείται ως παράμετρος εισόδου για το φάσμα του κύματος από το Mike 21 DHI.

	Time	1:Wave Height	2:Wave Period	3:Wave Directi	4:Dimensionles
1682	16/04/2019 07:01:00	0.9382	5.5004	359.35	5
1683	16/04/2019 07:01:30	0.9382	5.5004	359.35	5
1684	16/04/2019 07:02:00	0.9382	5.5004	359.35	5
1685	16/04/2019 07:02:30	0.9382	5.5004	359.35	5
1686	16/04/2019 07:03:00	0.9382	5.5004	359.35	5
1687	16/04/2019 07:03:30	0.9382	5.5004	359.35	5
1688	16/04/2019 07:04:00	0.9382	5.5004	359.35	5
1689	16/04/2019 07:04:30	0.9382	5.5004	359.35	5

Εικόνα 4.6: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Energy Flux

Για τη σχηματοποίηση των ανεμολογικών στοιχείων έγινε διαχωρισμός με βάση τις διευθύνσεις που είχαν προκύψει κατά τη σχηματοποίηση των κυμάτων, δίνοντας έτσι συνολικά 5 κλάσεις και 5 αντιπροσώπους αυτών ως το μέσο όρο ταχυτήτων ανέμου (Wind Speed) και διευθύνσεων ανέμου (Wind Direction). Ωστόσο, σε ό,τι αφορά τη συχνότητα εμφάνισης της κάθε κλάσης αυτή ελήφθη ίση με την αθροιστική των συχνοτήτων των κυματικών κλάσεων ανά δυάδες, δηλαδή:

- Η πρώτη κυματική κλάση είχε πιθανότητα εμφάνισης 36,2%, η δεύτερη 2,78%. Οπότε η πρώτη εκ των πέντε στο σύνολο ανεμολογική κλάση έχει συχνότητα εμφάνισης ίση με το άθροισμα των παραπάνω, δηλαδή $\approx 39\%$ ή αλλιώς, θα εμφανιστεί $0,39 \cdot 2881 \approx 1123$ φορές (χρονικό βήμα: 30 secs).

	Time	1:Wind Speed [meter/sec]	2:Wind Direction [degree]
0	15/04/2019 17:00:00	4.00992	323.738
1	15/04/2019 17:00:30	4.00992	323.738
2	15/04/2019 17:01:00	4.00992	323.738
3	15/04/2019 17:01:30	4.00992	323.738
4	15/04/2019 17:02:00	4.00992	323.738
5	15/04/2019 17:02:30	4.00992	323.738
6	15/04/2019 17:03:00	4.00992	323.738
7	15/04/2019 17:03:30	4.00992	323.738

Εικόνα 4.7: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου ανεμολογικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Energy Flux

Σε ό,τι αφορά το χρόνο προσομοίωσης αυτός καθορίστηκε από την απόφαση να εκτελεστεί το μοντέλο για διάρκεια προσομοίωσης ίσης με 1 ημέρας, με αντίστοιχο χρονικό βήμα 10 δευτερολέπτων.

Time

Simulation period

No. of time steps

Time step interval [sec]

Simulation start date [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Simulation end date [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Εικόνα 4.8: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα - Μέθοδος Energy Flux

Η συχνότητα εμφάνισης επιλέχθηκε ίση με 60, το οποίο συνεπάγεται εκτύπωση εξόδων του μοντέλου ανά 600 δευτερόλεπτα ή 10 λεπτά. Δεδομένου ότι έχει επιλεγθεί συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων ίσος με 8640, η προσομοίωση θα αναπαραστήσει 86400 δευτερόλεπτα ή 1 μέρα. Δεδομένου ότι η μία μέρα έχει $24 \cdot 60 = 1440$ λεπτά, αυτός θα είναι και ο τελικός αριθμός που θα αναπαραστήσει το μοντέλο μετά το πέρας της προσομοίωσης.

Τέλος, σε ό,τι αφορά το συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac αυτός έχει επιλεγεί ίσος με 365, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει 1 μέρα, ωστόσο στόχος είναι τα αποτελέσματα να αναχθούν σε ετήσια βάση.

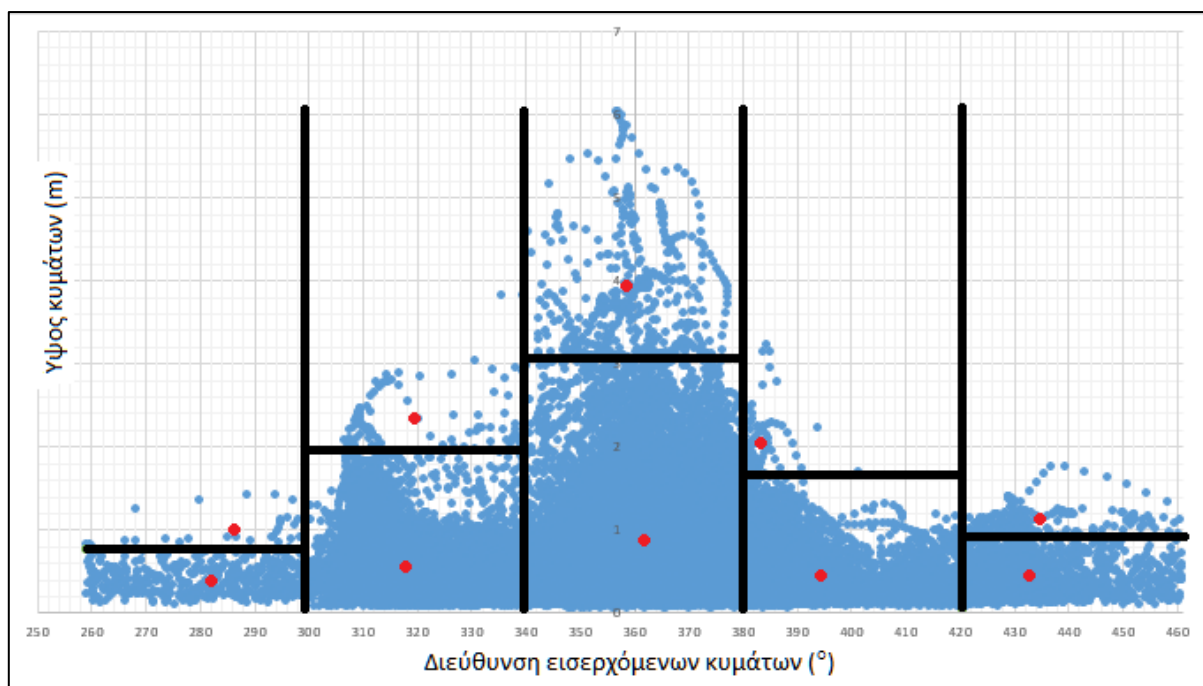
4.4.2 Μέθοδος σταθερών κλάσεων (Fixed Bins Method)

Σε αυτή τη μέθοδο καθορίστηκε αυθαίρετα ο αριθμός των κλάσεων τόσο κατά τη διεύθυνση όσο και κατά το ύψος κύματος. Ειδικότερα, εφαρμόστηκε η εξής μεθοδολογία:

- Κατασκευάστηκε γραφική παράσταση του ύψους κύματος ως προς τις διευθύνσεις των κυμάτων. Για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, στα κύματα με διεύθυνση $<101^\circ$ προστέθηκαν 360° .
- Καθορίστηκε το εύρος των διευθύνσεων (directional range), ίσο με $\approx 202^\circ$.
- Οι παρατηρήσεις χωρίστηκαν σε 5 κλάσεις ίσου πλάτους $\approx 40,36^\circ$.
- Η καθεμία εκ των κλάσεων χωρίστηκε περαιτέρω σε δύο κλάσεις ως εξής: Υπολογίστηκε το εύρος των υψών (wave height range) στην κάθε κλάση (το ελάχιστο καταγεγραμμένο ύψος αφαιρέθηκε από το μέγιστο καταγεγραμμένο ύψος). Εν συνεχεία η κλάση χωρίστηκε σε 2 κλάσεις ίσων υψών. Προέκυψαν συνολικά 10 κλάσεις (βλ. Εικόνα 4.9).
- Υπολογίστηκε ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης ως το μέσο όρο όλων των στοιχείων που ανήκουν σε αυτήν κατά διεύθυνση, ύψος κύματος και περίοδο. (βλ. Πίνακα 4.2) και τοποθετήθηκε ως σημείο στην υπάρχουσα γραφική παράσταση ύψους κύματος / διεύθυνσης εισερχόμενων κυμάτων (βλ. Εικόνα 4.9).
- Υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής με βάση τον αριθμό στοιχείων της κάθε κλάσης ως προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων. (βλ. Πίνακα 4.2)

Πίνακας 4.2: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Fixed Bins

Κλάση	Αντιπρόσωπος				Συχνότητα εμφάνισης (%)
	H _{m0} (m)	T _p (s)	Διεύθυνση (°)	Σύνολο	
1a	0.40	6.00	282.17	468	1.15
1b	1.00	9.92	286.20	33	0.08
2a	0.56	4.90	317.79	13777	33.88
2b	2.34	7.69	319.44	102	0.25
3a	0.88	5.31	361.82	19029	46.79
3b	3.87	8.91	359.53	454	1.12
4a	0.46	4.29	394.33	4829	11.87
4b	2.06	6.92	383.28	84	0.21
5a	0.44	5.18	432.81	1693	4.16
5b	1.13	7.27	434.57	198	0.49
				40667	



Εικόνα 4.9: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Fixed Bins

Σε επόμενο στάδιο δημιουργήθηκε χρονοσειρά στο Mike Zero συνολικής διάρκειας 1 ημέρας. Στόχος είναι η αναπαραγωγή ενός κυματικού καθεστώτος απαρτιζόμενου από τους 10 προαναφερθέντες αντιπροσώπους, ο αριθμός των οποίων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης που υπολογίστηκε σε προγενέστερο στάδιο στο φύλλο Excel. Σε ό,τι αφορά το χρονικό βήμα, αυτό θα καθοριστεί από την ανάγκη να εμφανίζεται τουλάχιστον μία φορά ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης, έτσι ώστε να θεωρηθεί αξιόπιστο το μοντέλο. Προκύπτει έτσι χρονικό βήμα 3 λεπτών (σύνολο 480 παρατηρήσεις), αναγκαιότητα η οποία πηγάζει από τη δεύτερη κλάση, καθώς έχει συχνότητα εμφάνισης ίση με 0,081%, δηλαδή ο αντιπρόσωπός της εμφανίζεται συνολικά $0,00081 \cdot 480 \approx 0.4$ φορές, εν τέλει με μια προσαύξηση εμφανίζεται μία φορά στη χρονοσειρά.

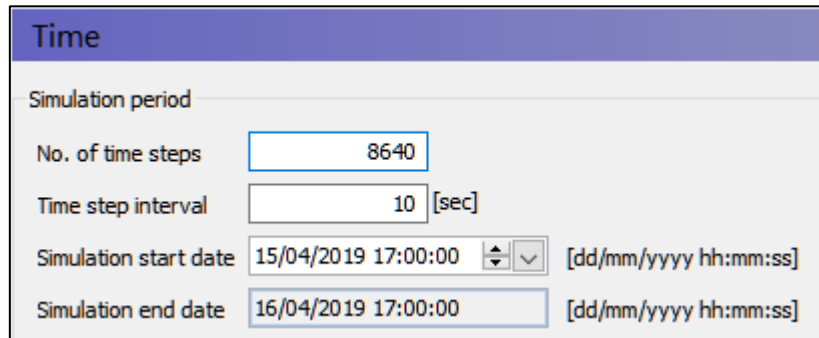
Σε ό,τι αφορά τις στήλες, αυτές χωρίζονται στο ύψος κύματος (Wave Height), την κυματική περίοδο (Wave Period), τη διεύθυνση κύματος (Wave Direction) και τον αδιάστατο συντελεστή διασποράς (Dimensionless Spreading Index), ομοίως με την προηγούμενη μέθοδο.

	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless Spreading In
0	15/04/2019 17:00:00	0.4012	5.996	282.167	5
1	15/04/2019 17:03:00	0.4012	5.996	282.167	5
2	15/04/2019 17:06:00	0.4012	5.996	282.167	5
3	15/04/2019 17:09:00	0.4012	5.996	282.167	5
4	15/04/2019 17:12:00	0.4012	5.996	282.167	5
5	15/04/2019 17:15:00	1.0023	9.9239	286.199	5
6	15/04/2019 17:18:00	0.5645	4.8985	317.792	5
7	15/04/2019 17:21:00	0.5645	4.8985	317.792	5

Εικόνα 4.10: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματισμένου κυματικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Fixed Bins

Για τον άνεμο χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά που είχε προκύψει από Energy Flux Method, καθώς η αντίστοιχη της Fixed Bins μεθόδου είχε πολύ μικρή διαφορά.

Σε ό,τι αφορά το χρόνο προσομοίωσης αυτός καθορίστηκε από την απόφαση να εκτελεστεί το μοντέλο για διάρκεια προσομοίωσης ίσης με 1 ημέρας, με αντίστοιχο χρονικό βήμα 10 δευτερολέπτων, όπως και με τη μέθοδο ροής ενέργειας.



Time	
Simulation period	
No. of time steps	8640
Time step interval	10 [sec]
Simulation start date	15/04/2019 17:00:00 [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]
Simulation end date	16/04/2019 17:00:00 [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Εικόνα 4.11: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα - Μέθοδος Fixed Bins

Η συχνότητα εμφάνισης επιλέχθηκε ίση με 60, το οποίο συνεπάγεται εκτύπωση εξόδων του μοντέλου ανά 600 δευτερόλεπτα ή 10 λεπτά. Δεδομένου ότι έχει επιλεγθεί συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων ίσος με 8640, η προσομοίωση θα αναπαραστήσει 86400 δευτερόλεπτα ή 1 μέρα. Δεδομένου ότι η μία μέρα έχει $24 \cdot 60 = 1440$ λεπτά, αυτός θα είναι και ο τελικός αριθμός που θα αναπαραστήσει το μοντέλο μετά το πέρας της προσομοίωσης.

Τέλος, σε ό,τι αφορά το συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac αυτός έχει επιλεγεί ίσος με 365, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει 1 μέρα, ωστόσο στόχος είναι τα αποτελέσματα να αναχθούν σε ετήσια βάση.

4.4.3 Μέθοδος Cerc

Η μέθοδος αυτή είναι παρόμοια με την Energy Flux Method με τη διαφορά ότι εδώ βασική παράμετρος καταμερισμού των παρατηρήσεων σε ομάδες είναι η παροχή στερεομεταφοράς, αντί για την εξίσωση ενεργειακού δυναμικού για την κάθε μεμονωμένη παρατήρηση. Ο υπολογισμός του κάθε όγκου παροχής έγινε μέσω του τύπου:

$$Q_l = 0.014H_{mo}^2 * 4\sqrt{H_{mo}} \sin(\theta) \cos(\theta) \quad (4.2)$$

όπου:

H_{mo} : ύψος κύματος στα βαθιά (m)

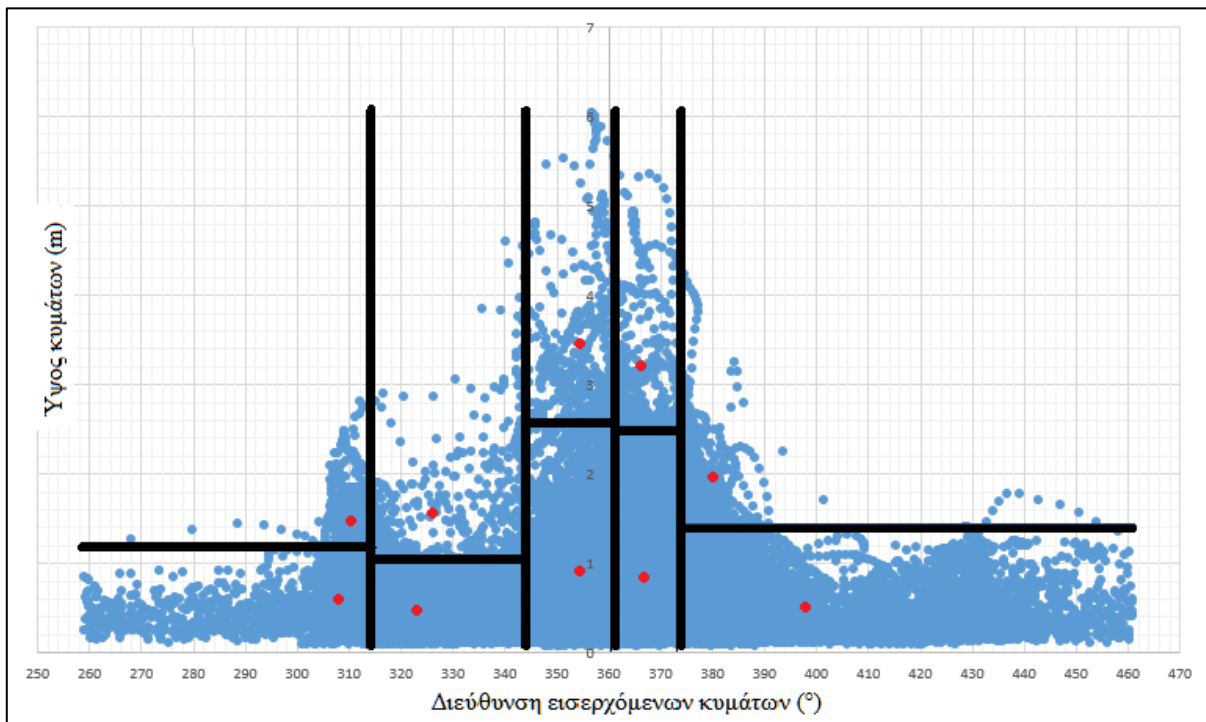
θ : Διεύθυνση εισερχόμενων κυμάτων (rad)

Εν συνεχεία εφαρμόστηκε η εξής μεθοδολογία:

- Κατασκευάστηκε γραφική παράσταση του ύψους κύματος ως προς τις διευθύνσεις των κυμάτων. Για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, στα κύματα με διεύθυνση $<101^\circ$ προστέθηκαν 360° .
- Η χρονοσειρά των κυμάτων διαχωρίστηκε σε 5 ομάδες κατά τη διεύθυνση των κυμάτων (directional bins) με βάση την παροχή στερεομεταφοράς. Συγκεκριμένα, ο διαχωρισμός έγινε έτσι ώστε κάθε κλάση να έχει συνολικό όγκο παροχής $Q_l/5$. (βλ. Εικόνα 4.12)
- Η κάθε μία εκ των 5 κλάσεων διαχωρίστηκε κατά το ύψος κύματος σε δύο υπο-κλάσεις ώστε η καθεμία να έχει όγκο στερεομεταφοράς ίσο με $Q_l/2$. Προέκυψαν έτσι συνολικά 10 κλάσεις. (βλ. Εικόνα 4.12)
- Υπολογίστηκε ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης ως το μέσο όρο όλων των στοιχείων που ανήκουν σε αυτήν κατά διεύθυνση, ύψος κύματος και περίοδο. (βλ. Πίνακα 4.3) και τοποθετήθηκε ως σημείο στην υπάρχουσα γραφική παράσταση ύψους κύματος / διεύθυνσης εισερχόμενων κυμάτων (βλ. Εικόνα 4.12).
- Υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής με βάση τον αριθμό στοιχείων της κάθε κλάσης ως προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων. (βλ. Πίνακα 4.3)

Πίνακας 4.3: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Cerc

Κλάση	Αντιπρόσωπος				Συχνότητα εμφάνισης (%)
	Ημο (m)	Τρ (s)	Διεύθυνση (°)	Σύνολο	
1a	0.58	5.36	308.14	4931	12.13
1b	1.46	6.59	310.61	632	1.55
2a	0.46	4.52	323.18	9011	22.16
2b	1.55	6.57	326.40	591	1.45
3a	0.90	5.42	354.60	8288	20.38
3b	3.45	8.65	354.73	427	1.05
4a	0.83	5.22	367.06	6993	17.20
4b	3.20	8.24	366.43	395	0.97
5a	0.49	4.59	398.11	8904	21.89
5b	1.95	7.00	380.39	495	1.22
				40667	



Εικόνα 4.12: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Cerc

Σε επόμενο στάδιο δημιουργήθηκε χρονοσειρά στο Mike Zero συνολικής διάρκειας 1 ημέρας. Ομοίως με τις προηγούμενες μεθόδους, στόχος είναι η αναπαραγωγή ενός κυματικού καθεστώτος απαρτιζόμενου από τους 10 προαναφερθέντες αντιπρόσωπους, ο αριθμός των οποίων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης που υπολογίστηκε σε προηγούμενο στάδιο στο φύλλο Excel. Σε ό,τι αφορά το χρονικό βήμα, αυτό θα καθοριστεί από την ανάγκη να εμφανίζεται τουλάχιστον μία φορά ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης, έτσι ώστε να θεωρηθεί αξιόπιστο το μοντέλο. Προκύπτει έτσι χρονικό βήμα 3 λεπτών (σύνολο 480 παρατηρήσεις), αναγκαιότητα η οποία πηγάζει από τη όγδοη κλάση, καθώς έχει συχνότητα εμφάνισης ίση με 0,9713%, δηλαδή ο αντιπρόσωπός της εμφανίζεται συνολικά $0,009713 \cdot 480 \approx 5$ φορές.

Σε ό,τι αφορά τις στήλες, αυτές χωρίζονται στο ύψος κύματος (Wave Height), την κυματική περίοδο (Wave Period), τη διεύθυνση κύματος (Wave Direction) και τον αδιάστατο συντελεστή διασποράς (Dimensionless Spreading Index), ομοίως με την προηγούμενη μέθοδο.

	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless Spreading In
0	15/04/2019 17:00:00	0.577052	5.36439	308.139	5
1	15/04/2019 17:03:00	0.577052	5.36439	308.139	5
2	15/04/2019 17:06:00	0.577052	5.36439	308.139	5
3	15/04/2019 17:09:00	0.577052	5.36439	308.139	5
4	15/04/2019 17:12:00	0.577052	5.36439	308.139	5
5	15/04/2019 17:15:00	0.577052	5.36439	308.139	5
6	15/04/2019 17:18:00	0.577052	5.36439	308.139	5
7	15/04/2019 17:21:00	0.577052	5.36439	308.139	5

Εικόνα 4.13: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος (Mike Zero – 1 ημέρα) – Μέθοδος Cerc

Για τον άνεμο χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά που είχε προκύψει από Energy Flux Method, καθώς η αντίστοιχη της Cerc μεθόδου είχε πολύ μικρή διαφορά.

Σε ό,τι αφορά το χρόνο προσομοίωσης αυτός καθορίστηκε από την απόφαση να εκτελεστεί το μοντέλο για διάρκεια προσομοίωσης ίσης με 1 ημέρας, με αντίστοιχο χρονικό βήμα 10 δευτερολέπτων.

Time

Simulation period

No. of time steps

Time step interval [sec]

Simulation start date [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Simulation end date [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Εικόνα 4.14: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα - Μέθοδος Cerc

Η συχνότητα εμφάνισης επιλέχθηκε ίση με 60, το οποίο συνεπάγεται εκτύπωση εξόδων του μοντέλου ανά 600 δευτερόλεπτα ή 10 λεπτά. Δεδομένου ότι έχει επιλεγθεί συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων ίσος με 8640, η προσομοίωση θα αναπαραστήσει 86400 δευτερόλεπτα ή 1 μέρα. Δεδομένου ότι η μία μέρα έχει $24 \cdot 60 = 1440$ λεπτά, αυτός θα είναι και ο τελικός αριθμός που θα αναπαραστήσει το μοντέλο μετά το πέρας της προσομοίωσης.

Τέλος, σε ό,τι αφορά το συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac αυτός έχει επιλεγεί ίσος με 365, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει 1 μέρα, ωστόσο στόχος είναι τα αποτελέσματα να αναχθούν σε ετήσια βάση.

4.4.4 Μέθοδος Pickup Rate

Η μέθοδος Pickup Rate αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Βασίζεται στην εξίσωση που διατυπώθηκε το 1984 από τον Van Rijn για τον υπολογισμό του ρυθμού διάβρωσης (erosion rate), μέσω της λεγόμενης συνάρτησης pickup:

$$P = \frac{0.015d_{50}}{\alpha} ((\tau_b - \tau_{cr})/\tau_{cr})^{1.50} d_*^{-0.3} w_s \quad (4.3)$$

όπου d_{50} : διάμετρος του στοιχειώδους κόκκου ($d_{50} = 0.00015\text{m}$) και

$$\alpha = 0,01doc \quad (4.4)$$

όπου d_{oc} : depth of closure, το οποίο προσδιορίζεται ως εξής:

$$doc = 8.9 * H_s \quad (4.5)$$

όπου H_s : το μέσο χαρακτηριστικό ύψος στην περιοχή μελέτης

Σε ό,τι αφορά τη τριβή του πυθμένα αυτή δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho f_w \left(U_{rms} \sqrt{(U_{rms}^2 + V^2)} \right) \approx \frac{1}{2} \rho f_w U_{rms}^2 \quad (4.6)$$

όπου: ρ : η μέση πυκνότητα του θαλασσινού νερού ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$),

V : ταχύτητα ρεύματος ($V \approx 0$)

U_{rms} : ταχύτητα κύματος, δίνεται από τον τύπο:

$$U_{rms} = \frac{0.25H_s}{T_n(1 + At^2)^3} \quad (4.7)$$

όπου:

$$A = (6500 + (0.56 + 15.54t)^6)^{\frac{1}{6}} \quad (4.8)$$

$$T_n = \sqrt{\frac{h}{g}} \quad (4.9)$$

$$t = \frac{1.28T_n}{T_p} \quad (4.10)$$

όπου:

g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$)

h το βάθος του νερού με τη θεώρηση ότι ταυτίζεται με το βάθος αιώρησης, το οποίο ισούται με:

$$h = 8.9H_s \quad (4.11)$$

T_p η περίοδος του κύματος (T_{peak})

H_s το (διακριτό) ύψος του κύματος

Η τριβή λόγω κύματος δίνεται από τη σχέση του Swart (1974):

$$f_w = 0,064 / \log\left[\left(\frac{30k_s}{d_{50}}\right)^2\right] \quad (4.12)$$

όπου:

$$k_s = 2.50d_{50} \quad (4.13)$$

$$\tau_{cr} = \rho \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) g d_{50} \theta_{cr} \quad (4.14)$$

η οριακή τριβή πυθμένα

$$d_* = d_{50} \left(\frac{g(s-1)}{v^2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.15)$$

η αδιάστατη διάμετρος κόκκου

όπου: θ_{cr} η κρίσιμη παράμετρος Shields ($\theta_{cr} \approx 0.047$)

Η σχετική πυκνότητα των στερεών κόκκων του ιζήματος δίνεται από τη σχέση:

$$s = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (4.16)$$

το πηλίκο πυκνοτήτων ιζήματος και νερού ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$)

και v η κινηματική συνεκτικότητα του νερού ($v = 1.36 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)

Η ταχύτητα καθίζησης των ιζημάτων (settling velocity) δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$w_s = \frac{v}{d_{50}} \left(\sqrt{10.36^2 + 1.049d_*^3} - 10.36\right) \quad (4.17)$$

Προϋπόθεση για την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης του Van Rijn (pickup function) αποτελεί η ικανοποίηση της συνθήκης $\tau_b > \tau_{cr}$. Αν και εφόσον αυτή ισχύει, η τριβή πυθμένα υπερνικά την κρίσιμη τιμή της και έχουμε έναρξη κίνησης ιζήματος.

Εν συνεχεία εφαρμόστηκε παρόμοια μεθοδολογία με τις προηγούμενες μεθόδους σχηματοποίησης, ειδικότερα:

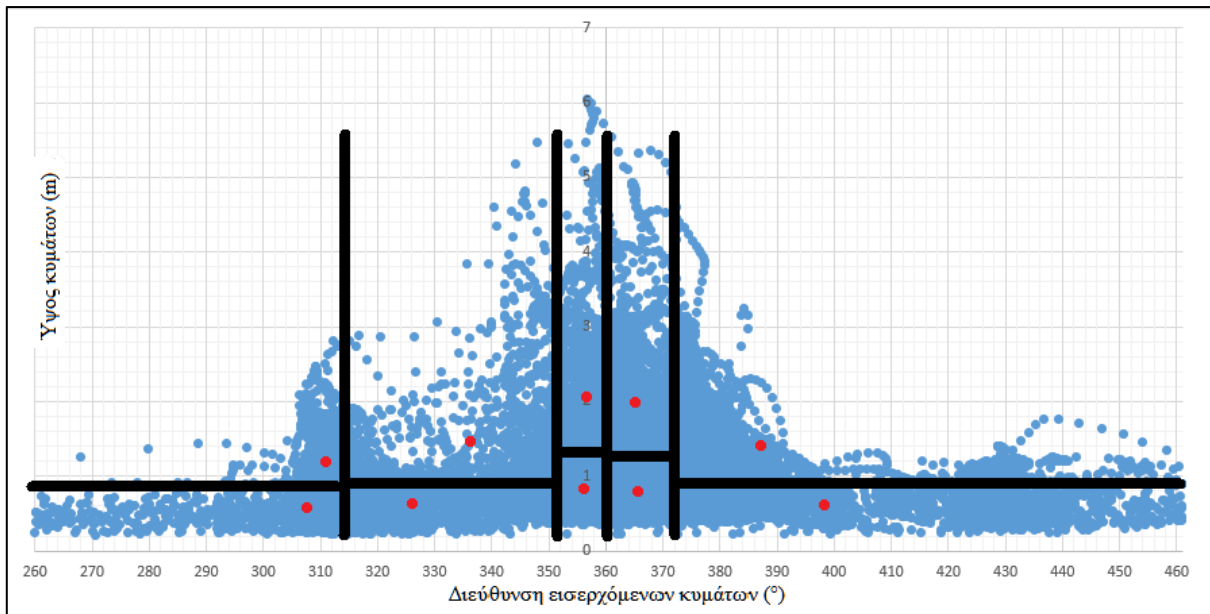
- Κατασκευάστηκε γραφική παράσταση του ύψους κύματος ως προς τις διευθύνσεις των κυμάτων. Για την καλύτερη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, στα κύματα με διεύθυνση $<101^\circ$ προστέθηκαν 360° .

Ένα βασικό σημείο, στο οποίο αυτή η μέθοδος διαφέρει από τις προηγούμενες είναι η μείωση των αρχικών δεδομένων πριν την περαιτέρω μείωση λόγω σχηματοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, οι παρατηρήσεις που δίνουν μηδενική στερεομεταφορά (για τις οποίες δηλαδή η διατμητική τάση πυθμένα δεν υπερνικά την κρίσιμη τιμή της) δε λαμβάνονται υπ' όψιν στη διαδικασία της σχηματοποίησης. Αναφέρεται ενδεικτικά ότι από τις αρχικά 40667 παρατηρήσεις μετά από αυτή τη διαδικασία παραμένουν 24459 παρατηρήσεις, ποσοστό $\approx 60\%$ επί του αρχικού. Αυτό αποτελεί και σημαντικό στοιχείο διαφοροποίησης αυτής της μεθόδου σχηματοποίησης σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, καθ' ότι η μείωση δεδομένων (input reduction) γίνεται σε πρωταρχικό στάδιο.

- Η χρονοσειρά των κυμάτων στη συνέχεια διαχωρίστηκε σε 5 ομάδες κατά τη διεύθυνση των κυμάτων (directional bins) με βάση την παροχή στερεομεταφοράς. Συγκεκριμένα, ο διαχωρισμός έγινε έτσι ώστε κάθε κλάση να έχει συνολικό όγκο παροχής P/5. (βλ. Εικόνα 4.15)
- Η κάθε μία εκ των 5 κλάσεων διαχωρίστηκε κατά το ύψος κύματος σε δύο υπο-κλάσεις ώστε η καθεμία να έχει όγκο στερεομεταφοράς ίσο με P/2. Προέκυψαν έτσι συνολικά 10 κλάσεις. (βλ. Εικόνα 4.15)
- Υπολογίστηκε ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης ως το μέσο όρο όλων των στοιχείων που ανήκουν σε αυτήν κατά διεύθυνση, ύψος κύματος και περίοδο. (βλ. Πίνακα 4.4) και τοποθετήθηκε ως σημείο στην υπάρχουσα γραφική παράσταση ύψους κύματος / διεύθυνσης εισερχόμενων κυμάτων (βλ. Εικόνα 4.15).
- Υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής με βάση τον αριθμό στοιχείων της κάθε κλάσης ως προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων. (βλ. Πίνακα 4.4)

Πίνακας 4.4: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Pickup Rate

Κλάση	Αντιπρόσωπος				
	Hmo (m)	Tp (s)	Διεύθυνση (°)	Σύνολο	Συχνότητα εμφάνισης (%)
1a	0.58	5.84	307.72	2489	10.18
1b	1.19	6.40	311.12	1524	6.23
2a	0.62	5.41	326.24	3727	15.24
2b	1.46	6.59	336.40	1674	6.84
3a	0.83	5.55	356.35	2955	12.08
3b	2.06	7.28	356.51	1625	6.64
4a	0.79	5.43	365.81	3474	14.20
4b	1.98	7.07	365.14	1885	7.71
5a	0.61	5.45	398.37	3291	13.46
5b	1.40	6.47	387.19	1815	7.42
				24459	



Εικόνα 4.15: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Pickup Rate

Σε επόμενο στάδιο δημιουργήθηκε χρονοσειρά στο Mike Zero συνολικής διάρκειας 14 ωρών και 42 λεπτών. Η διάρκεια αυτή αποτελεί περίπου το 60% μίας ημέρας και πηγάζει από τη μείωση των παρατηρήσεων από 40667 σε 24459 στα πρώτα βήματα εφαρμογής της μεθόδου. Στόχος είναι η αναπαραγωγή ενός κυματικού καθεστώτος απαρτιζόμενου από τους 10 προαναφερθέντες αντιπροσώπους, ο αριθμός των οποίων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης που υπολογίστηκε σε προηγούμενο στάδιο στο φύλλο Excel. Σε ό,τι αφορά το χρονικό βήμα, αυτό επιλέχθηκε 18 λεπτά (σύνολο 50 παρατηρήσεις).

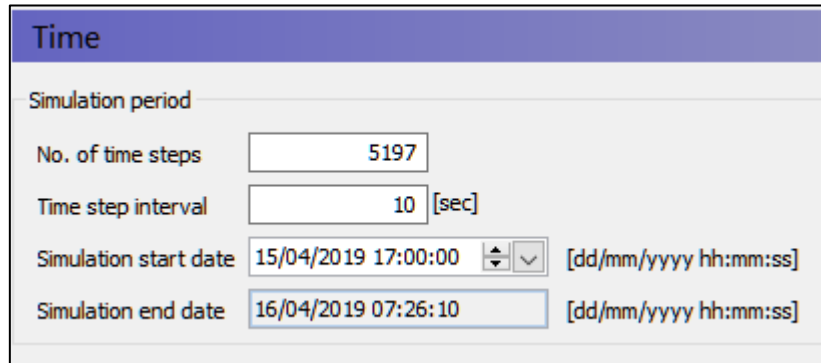
Σχετικά με τις στήλες, αυτές χωρίζονται στο ύψος κύματος (Wave Height), την κυματική περίοδο (Wave Period), τη διεύθυνση κύματος (Wave Direction) και τον αδιάστατο συντελεστή διασποράς (Dimensionless Spreading Index), ομοίως με τις προηγούμενες μεθόδους.

	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless
0	15/04/2019 17:00:00	0.57636	5.83919	307.719	5
1	15/04/2019 17:18:00	0.57636	5.83919	307.719	5
2	15/04/2019 17:36:00	0.57636	5.83919	307.719	5
3	15/04/2019 17:54:00	0.57636	5.83919	307.719	5
4	15/04/2019 18:12:00	0.57636	5.83919	307.719	5
5	15/04/2019 18:30:00	1.18619	6.40265	311.123	5
6	15/04/2019 18:48:00	1.18619	6.40265	311.123	5
7	15/04/2019 19:06:00	1.18619	6.40265	311.123	5

Εικόνα 4.16: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματισμένου κυματικού καθεστώτος - Μέθοδος Pickup Rate

Για τον άνεμο χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά που είχε προκύψει από Energy Flux Method, καθώς η αντίστοιχη της μεθόδου Pickup Rate είχε πολύ μικρή διαφορά.

Σε ό,τι αφορά το χρόνο προσομοίωσης αυτός καθορίστηκε με διαφορετικό τρόπο στην παρούσα μέθοδο, λόγω μειωμένων δεδομένων εισόδου (24459 από 40667). Αυτή η διαφορά στα αρχικά δεδομένα εισόδου οδηγεί σε συνολικό χρόνο εκτέλεσης ίσο με $24459/40667 * 86400 \approx 51965$ δευτερόλεπτα.



Εικόνα 4.17: Συνολικός χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα – Μέθοδος Pickup Rate

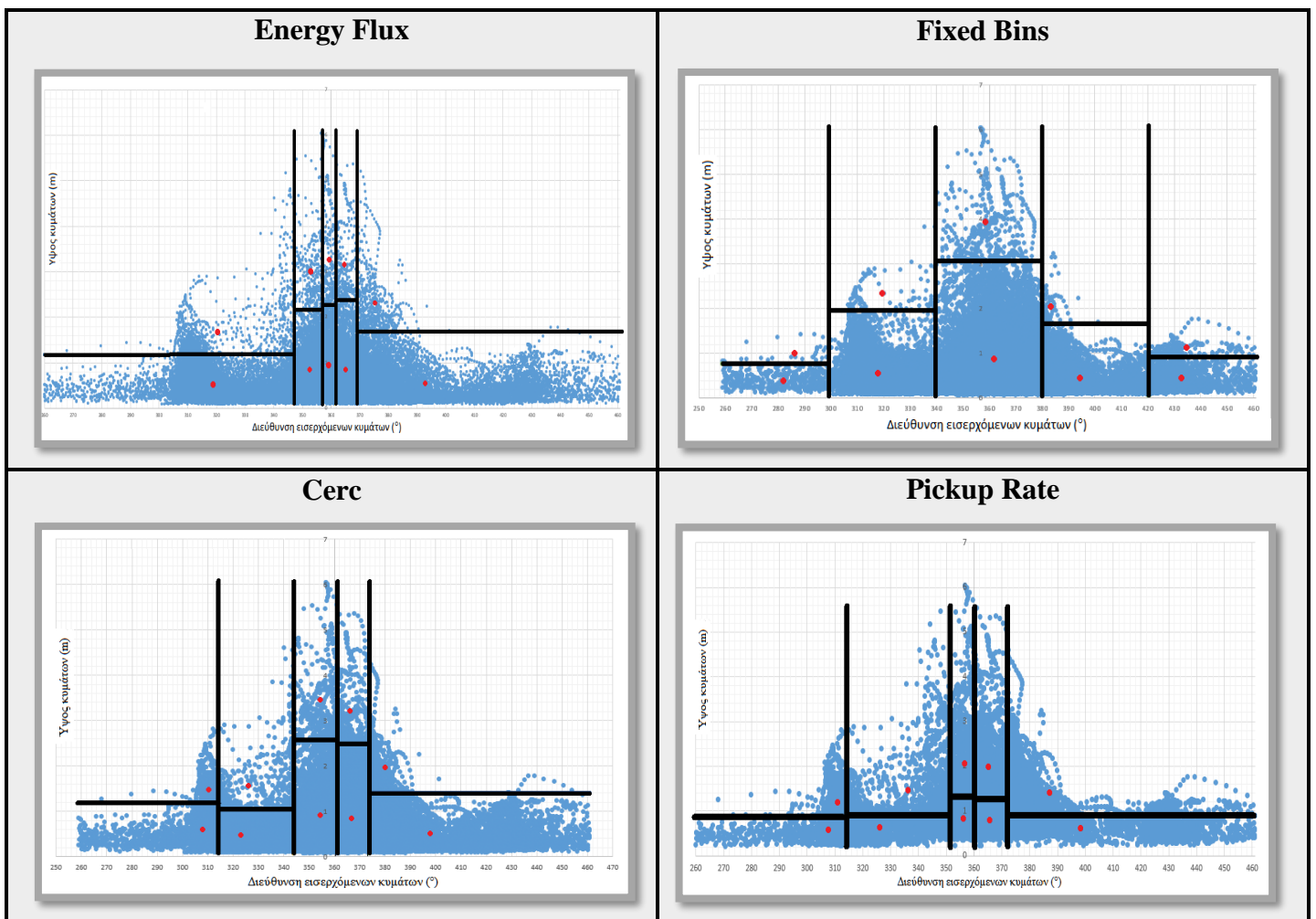
Η συχνότητα εμφάνισης επιλέγεται ίση με 50, το οποίο συνεπάγεται εκτύπωση εξόδων του μοντέλου ανά 500 δευτερόλεπτα ή περίπου 8.3 λεπτά. Δεδομένου ότι έχει επιλεγεί συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων ίσος με 5197, η προσομοίωση θα αναπαραστήσει 51970 δευτερόλεπτα. Δεδομένου ότι τα 51970 δευτερόλεπτα έχουν $51970/500 \approx 103$, αυτός θα είναι και ο τελικός αριθμός που θα αναπαραστήσει το μοντέλο μετά το πέρας της προσομοίωσης.

Τέλος, σε ό,τι αφορά το συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac αυτός έχει επιλεγεί ίσος με 365, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει 1 μέρα, ωστόσο στόχος είναι τα αποτελέσματα να αναχθούν σε ετήσια βάση.

4.4.5 Σύγκριση μεθόδων σχηματοποίησης

Πριν από την έναρξη των προσομοιώσεων, παρατηρήθηκαν ορισμένες διαφορές μεταξύ των παραπάνω μεθόδων κατά τη διαδικασία χωρισμού σε κλάσεις και του υπολογισμού των αντιπροσώπων, οι οποίες και παρουσιάζονται στη συνέχεια. Πρόκειται για μια σημαντική πρώτη εικόνα και οδηγεί σε μια πρώτη συσχέτιση μεταξύ των αντιπροσώπων της κάθε μεθόδου.

Πίνακας 4.5: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους – Συγκεντρωτικός πίνακας



Πίνακας 4.6: Μέσα ύψη κυμάτων ανά κατακόρυφη κλάση (m)

Κλάση \ Μέθοδος	Energy Flux	Fixed Bins	Cerc	Pickup Rate
1	0.59	0.44	0.68	0.81
2	0.99	0.58	0.52	0.88
3	1.10	0.95	1.02	1.26
4	0.99	0.48	0.95	1.21
5	0.62	0.51	0.56	0.89

Στον Πίνακα 4.5 παρατηρούνται τα εξής:

Σε ό,τι αφορά το διαχωρισμό κατά διεύθυνση (5 -κατακόρυφες- κλάσεις):

- Στη μέθοδο Energy Flux οι διευθύνσεις 259°-347° έχουν μέσο όρο 0.59 m σε ύψος κύματος, το οποίο με βάση την εξίσωση (4.1) για τον υπολογισμό της ροής ενέργειας συνεπάγεται τη συσσώρευση πολλών στοιχείων στην 1^η κλάση, για να φτάσει αθροιστικά η ροή ενέργειας $\text{sum}(E)/5$. Σε ό,τι αφορά τις επόμενες κλάσεις αυτές έχουν σημαντικά μεγαλύτερα ύψη κυμάτων, (η 2^η, η 3^η και η 4^η έχουν μέσα ύψη κυμάτων 0.99, 1.10 και 0.99 m αντιστοίχως), με αποτέλεσμα να απαιτούνται λιγότερα στοιχεία για να δώσουν αθροιστική ροή ενέργειας $\text{sum}(E)/5$. Ομοίως με την 1^η κλάση, η 5^η έχει μέσο ύψος κύματος 0.62m κι άρα απαιτεί αρκετά στοιχεία για τη συγκέντρωση της επιθυμητής ροής ενέργειας.
- Από την άλλη οι κλάσεις κατά διεύθυνση της μεθόδου Fixed Bins είναι εξ ορισμού ισοπλατείς (40.36° η καθεμία), συνεπώς ο διαχωρισμός δεν επηρεάζεται από τα διαφορετικά ύψη κυμάτων και τις διαφορετικές διευθύνσεις.
- Στη μέθοδο Cerc παρατηρούνται, ομοίως με την πρώτη μέθοδο, η 1^η και η 5^η κλάση με μεγαλύτερο πλάτος λόγω κατά κανόνα μικρότερων υψών κυμάτων (βλ. Πίνακα 4.3). Ωστόσο, η 2^η κλάση έχει μεγάλο πλάτος σε σχέση με την 3^η και την 4^η, το οποίο παρατηρούμε και στην μέθοδο Pickup Rate και οφείλεται στο γεγονός ότι η 1^η κλάση είναι μικρότερη σε πλάτος σε σχέση με αυτή της μεθόδου ροής ενέργειας. Ειδικότερα, οριοθετείται από τη διεύθυνση 315°, ενώ η Energy Flux από τη διεύθυνση 340°. Ως αποτέλεσμα η 2^η κλάση εμπεριέχει και μικρότερα ύψη κυμάτων (βλ. Πίνακα 4.3) στη μέθοδο Cerc κι άρα εκτείνεται για μεγαλύτερο πλάτος.
- Στη μέθοδο Pickup Rate παρατηρείται όμοια εικόνα με αυτή της μεθόδου Cerc, με μεγαλύτερη σε πλάτος τη δεύτερη κλάση. Σε αυτή τη μέθοδο, βέβαια, δεν είναι εξίσου απλή η τεκμηρίωση του χωρισμού των κλάσεων, καθώς οι σχέσεις υπολογισμού (4.3) – (4.17) είναι πιο σύνθετες. Παρ' όλα αυτά παρατηρείται εκ νέου μια συσχέτιση με το ύψος κύματος, καθώς κλάσεις με μεγάλα ύψη κυμάτων έχουν μικρό πλάτος. Δεδομένου, λοιπόν, ότι ο διαχωρισμός καθορίζεται από τον όγκο παροχής P/5,

προκύπτει το συμπέρασμα της αναλογικής σχέσης μεταξύ ύψους κύματος και όγκου παροχής στερεομεταφοράς.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονισθεί ότι οι σχέσεις υπολογισμού που καθορίζουν το διαχωρισμό ανά κλάσεις στις παραπάνω μεθόδους επηρεάζονται από αρκετές παραμέτρους, ωστόσο παρατηρείται ότι το ύψος κύματος είναι το βασικότερο μέγεθος. Εξαιρείται η μέθοδος σταθερών κλάσεων (Fixed Bins), η οποία εξ ορισμού αποτελείται από κλάσεις ίσου πλάτους.

Σε ό,τι αφορά το διαχωρισμό καθ' ύψος κύματος:

- Στη μέθοδο Energy Flux η κλάση a έχει σε όλες τις περιπτώσεις περισσότερα στοιχεία από την κλάση b, το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού η συγκεντρώνει δεδομένα που έχουν μικρότερο ύψη κυμάτων σε σχέση με τη δεύτερη. Οπότε δεδομένου ότι και καθ' ύψος ο διαχωρισμός εξαρτάται από τη ροή ενέργειας $\text{sum}(E)/5$, η οποία χωρίζεται ισόποσα στις δύο κλάσεις, είναι λογικό η κλάση b να απαιτεί λιγότερα δεδομένα σε σχέση με την a, ώστε να συγκεντρώσει ροή ενέργειας ίση με $\text{sum}(E)/10$.
- Στη μέθοδο Fixed Bins ο διαχωρισμός καθ' ύψος εξαρτάται από το εύρος υψών (height range) της κάθε κατακόρυφης κλάσης, συνεπώς ακολουθεί την πορεία της συνάρτησης. Σύμφωνα με αυτήν, το εύρος είναι μεγαλύτερο προς το κέντρο της γραφικής παράστασης (360°) και μικρότερο κοντά στα άκρα.
- Στη μέθοδο Cerc παρατηρείται όμοια εικόνα με τη μέθοδο ροής ενέργειας σε ό,τι αφορά το διαχωρισμό, με τις κλάσεις a να έχουν λιγότερα στοιχεία σε σχέση με τις b.
- Στη μέθοδο Pickup Rate παρατηρείται εκ νέου παρόμοια εικόνα με τη μέθοδο ροής ενέργειας σχετικά με το διαχωρισμό, καθώς οι κλάσεις a έχουν λιγότερα στοιχεία σε σχέση με τις b.

Τέλος, σε ό,τι αφορά τους αντιπροσώπους των κλάσεων η σύγκριση μεταξύ των μεθόδων είναι σημαντικότερη, καθώς το υπολογιστικό μοντέλο δέχεται ως δεδομένο τη χρονοσειρά που αποτελείται από τους εκάστοτε αντιπροσώπους, επηρεάζοντας καθοριστικά το αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

- Σε πρώτο επίπεδο παρατηρείται η διαφορά της μεθόδου Fixed Bins σε σχέση με τις υπόλοιπες. Λόγω μεγάλου εύρους κλάσεων, προκύπτει μεγάλη διαφορά μεταξύ των αντιπροσώπων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος κύματος. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τα κύματα που δέχεται η προσομοίωση ως δεδομένα εισόδου να έχουν σημαντική διαφορά στις διευθύνσεις.
- Σε δεύτερο επίπεδο τονίζεται ότι οι βορειοανατολικοί και ανατολικοί κυματισμοί (διευθύνσεις 400° - 460°) που είναι κατά κύριο λόγο οι πιο αδύναμοι του κυματικού κλίματος (μικρά ύψη κυμάτων) ανήκουν στις τελευταίες κλάσεις των σχηματοποιήσεων, επομένως στις προσομοιώσεις που αναφέρονται στο πέρας του χρόνου (Time Step: 144/144) θα εμφανίζονται τα εκάστοτε στοιχεία και θα είναι κατά κανόνα μειωμένα.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το εκάστοτε σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα, σε συνδυασμό με έναν πρώτο σχολιασμό αυτών. Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην Παράγραφο 5.6.4, όπου γίνεται η σύγκριση των 4 μεθόδων με βάση τη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης. Παράλληλα, γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της εγκυρότητας της κάθε μεθόδου, με βάση:

- την ακρίβεια της εκάστοτε μεθόδου
- το χρόνο εκτέλεσης και κατά πόσο αυτός μειώθηκε

Ο συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης (Morfac) έχει ληφθεί ίσως με 365, ώστε η ημερήσια εικόνα να αναχθεί σε ετήσια βάση, λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι οι μορφοδυναμικές μεταβολές λαμβάνουν χώρα σε πολύ μεγαλύτερη χρονική κλίμακα από ότι οι υδροδυναμικές.

5.1 Επαλήθευση σχηματοποίησης

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία των παραπάνω μεθόδων, προκύπτει ο προβληματισμός που σχετίζεται με τη σημαντική μείωση των δεδομένων και κατά πόσο 10 στοιχεία θα δώσουν αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά των αρχικών 40667 παρατηρήσεων.

Για την εξακρίβωση της αξιοπιστίας των μεθόδων, εφαρμόστηκε η παραπάνω μεθοδολογία για χρονικό ορίζοντα 2 ημερών για τη μέθοδο Energy Flux. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο MIKE 21/3 Coupled Model FM έχοντας ως χρονοσειρά εισόδου για το κυματικό καθεστώς 2 ημέρες από τα συνολικά 4,6 έτη. Οι μέρες αυτές επιλέχθηκαν με κριτήρια το ύψος κύματος (να είναι μεταξύ 1.50m και 4.00m, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι αντιπροσωπευτικές του συνόλου της χρονοσειράς) και τη διεύθυνση (να είναι βόρειας διεύθυνσης, καθώς αυτή εκτιμάται ότι θα προκαλέσει με βάση τη γεωμορφολογία σημαντική στερεομεταφορά). Εν συνεχεία, εφαρμόστηκε η μέθοδος σχηματοποίησης με βάση ροή ενέργειας για τις 2 μέρες.

Αν και εφόσον προκύψουν ίδια αποτελέσματα μεταξύ ολόκληρης της χρονοσειράς των 2 ημερών και της σχηματοποιημένης, μπορεί να θεωρηθεί με ένα περιθώριο σφάλματος λόγω μεγαλύτερης κλίμακας (στη μία περίπτωση είναι 2 μέρες, στην άλλη 4.6 έτη) ότι η εν λόγω μεθοδολογία είναι έγκυρη και το σχηματοποιημένο κυματικό και ανεμολογικό κλίμα θα δώσουν αποδεκτά αποτελέσματα που θα μπορέσουν να αναχθούν σε υπερετήσια βάση.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία είχε ως εξής:

- Δημιουργία χρονοσειράς στο Mike Zero με ωριαία δεδομένα από τις 2 μέρες (από 8 Νοεμβρίου 2015 μέχρι 10 Νοεμβρίου 2015) και 4 στήλες (ύψος κύματος, περίοδος κύματος, διεύθυνση εισερχόμενου κύματος, αδιάστατος συντελεστής μετάδοσης - dimensionless spreading index) με συνολικά 49 διακριτά στοιχεία (βλ. Εικόνα 5.1).
- Διαχωρισμός των στοιχείων σε 5 ομάδες κατά τη διεύθυνση των κυμάτων (directional bins) με βάση τη ροή ενέργειας, ώστε κάθε κλάση να έχει συνολική ροή ενέργειας ίση με $\text{sum}(E)/5$, όπου $\text{sum}(E)$ η συνολική ροή ενέργειας για τα 49 διακριτά ύψη κυμάτων.
- Διαχωρισμός των 5 κλάσεων κατά το ύψος κύματος σε δύο υπο-κλάσεις ώστε η καθεμία να έχει ροή ενέργειας ίση με $\text{sum}(E)/10$ (σύνολο 10 κλάσεις).
- Υπολογισμός του αντιπροσώπου της κάθε κλάσης ως το μέσο όρο όλων των στοιχείων που ανήκουν σε αυτήν κατά διεύθυνση, ύψος κύματος και περίοδο.
- Υπολογισμός των συχνοτήτων εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής με βάση τον αριθμό στοιχείων της κάθε κλάσης ως προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων (βλ. Πίνακα 5.1).
- Δημιουργία χρονοσειράς στο Mike Zero. Στόχος είναι η αναπαραγωγή ενός κυματικού καθεστώτος απαρτιζόμενου από τους 10 προαναφερθέντες αντιπροσώπους, ο αριθμός των οποίων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης που υπολογίστηκε παραπάνω. (βλ. Πίνακα 5.1) Τέλος, ελήφθησαν τα διακριτά ύψη κυμάτων για τις 2 εν λόγω μέρες αυτούσια και τοποθετήθηκαν σε χρονοσειρά Mike Zero (βλ. Εικόνα 5.2).

Πίνακας 5.1: 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους - Μέθοδος Energy Flux - 2 μέρες

Κλάση	Αντιπρόσωπος				
	Hmo (m)	Tp (s)	Διεύθυνση (°)	Σύνολο	Συχνότητα εμφάνισης (%)
1a	1.89	7.17	358.30	5	10.20
1b	2.23	7.63	358.25	5	10.20
2a	1.97	7.35	358.83	5	10.20
2b	2.30	7.63	358.85	4	8.16
3a	1.94	7.07	359.15	4	8.16
3b	2.29	7.63	359.27	5	10.20
4a	1.97	7.21	359.63	5	10.20
4b	2.29	7.63	359.67	4	8.16
5a	1.76	6.93	360.44	6	12.24
5b	2.11	7.35	361.30	6	12.24
				49	

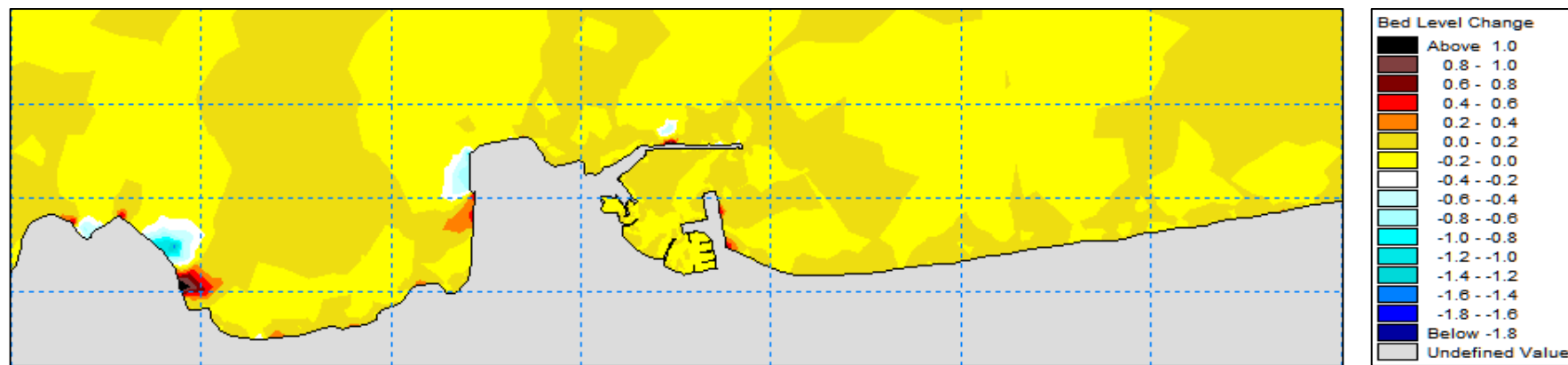
	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless
0	15/04/2019 17:00:00	1.50618	6.93433	1.7403	5
1	15/04/2019 18:00:00	1.53318	6.93433	1.15393	5
2	15/04/2019 19:00:00	1.5664	6.93433	0.473724	5
3	15/04/2019 20:00:00	1.60526	6.93433	359.77	5
4	15/04/2019 21:00:00	1.64823	6.93433	359.098	5
5	15/04/2019 22:00:00	1.6865	6.93433	358.594	5
6	15/04/2019 23:00:00	1.71937	6.93433	358.295	5
7	16/04/2019 00:00:00	1.74958	6.93433	358.184	5

Εικόνα 5.1: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά καταγεγραμμένου κυματικού καθεστώτος – 2 μέρες - Μέθοδος Energy Flux

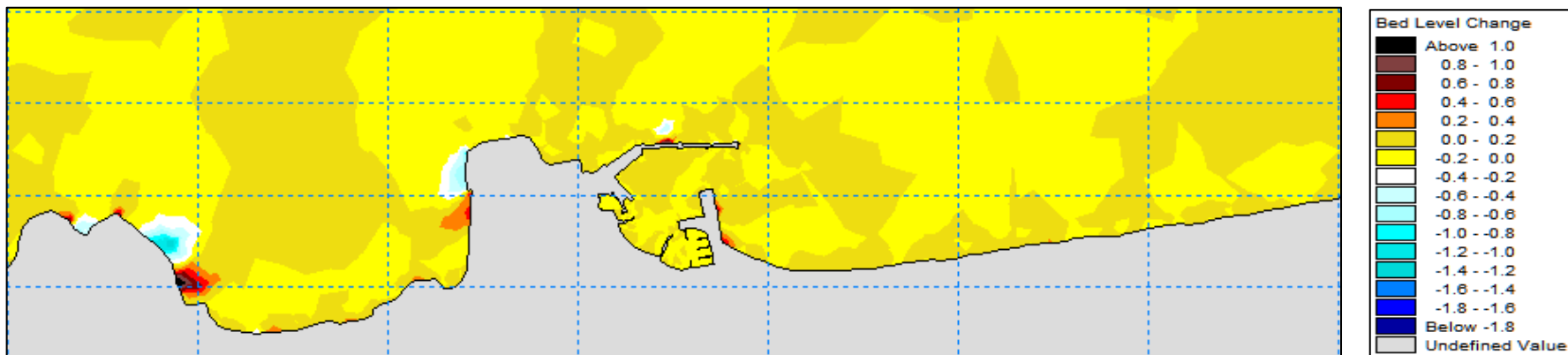
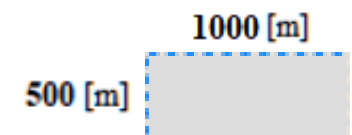
	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless
0	15/04/2019 17:00:00	1.89383	7.16548	358.299	5
1	15/04/2019 18:00:00	1.89383	7.16548	358.299	5
2	15/04/2019 19:00:00	1.89383	7.16548	358.299	5
3	15/04/2019 20:00:00	1.89383	7.16548	358.299	5
4	15/04/2019 21:00:00	1.89383	7.16548	358.299	5
5	15/04/2019 22:00:00	2.22897	7.62777	358.249	5
6	15/04/2019 23:00:00	2.22897	7.62777	358.249	5
7	16/04/2019 00:00:00	2.22897	7.62777	358.249	5

Εικόνα 5.2: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος – 2 μέρες - Μέθοδος Energy Flux

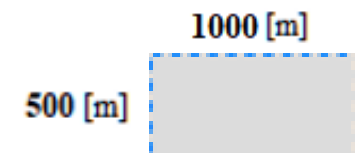
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα των δύο παραπάνω προσομοιώσεων. Θεωρήθηκε ότι η μεταβολή της στάθμης του πυθμένα, ως το πιο κρίσιμο στοιχείο σε ό,τι αφορά τη στερεομεταφορά, θα κρίνει εν τέλει και την αξιοπιστία της εκάστοτε μεθόδου.



Σχήμα 5.1: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux - Πλήρης χρονοσειρά 2 ημερών



Σχήμα 5.2: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux - Σχηματοποιημένη χρονοσειρά 2 ημερών



Σε πρώτο επίπεδο παρατηρείται η ομοιότητα μεταξύ των δύο σχημάτων, ωστόσο απαιτείται μια λεπτομερέστερη σύγκριση, ώστε να μπορεί να θεωρηθεί εν τέλει αξιόπιστη η εκάστοτε μέθοδος σχηματοποίησης (εν προκειμένω Energy Flux), η οποία παρουσιάζεται στην Παράγραφο 5.3).

5.2 Αξιολόγηση μοντέλων (Model Evaluation)

Δεύτερο στάδιο αποτελεί η αξιολόγηση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που δίνουν και την αναπόφευκτη απόκλιση που έχουν από την πραγματική κατάσταση. Βασικός άξονας, με βάση τον οποίο έγινε η αξιολόγηση είναι το κατά πόσο η μείωση των δεδομένων (input reduction) επηρέασε το αποτέλεσμα της εκάστοτε προσομοίωσης.

Για την ποσοτικοποίηση της εγκυρότητας του εκάστοτε μοντέλου έγινε χρήση στατιστικών μεγεθών (model performance statistics). Σημαντικό να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει κατά την επαλήθευση της σχηματοποίησης για τη μέθοδο ροής ενέργειας (βλ. Κεφάλαιο 5.1). Ειδικότερα, σε ό,τι αφορά τη μεταβολή του πυθμένα (η οποία αποτελεί το βασικό κριτήριο αξιολόγησης μεθόδων που αποσκοπούν στην αναπαράσταση παρακτίων διεργασιών) ελήφθησαν δεδομένα από τα αρχεία Mike Zero ST, τα οποία έπειτα τοποθετήθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο Excel.

Στις παρακάτω σχέσεις η μεταβλητή X εκφράζει την πραγματική μεταβολή του πυθμένα μετά το τέλος της προσομοίωσης (ολόκληρη χρονοσειρά 2 ημερών) και η μεταβλητή Y τη μεταβολή του πυθμένα μετά το πέρας της προσομοίωσης (σχηματοποιημένη χρονοσειρά 2 ημερών).

$$\langle |X| \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n| \quad (5.1)$$

$$\langle |Y| \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_n| \quad (5.2)$$

Έπειτα υπολογίστηκε το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error - MAE) μέσω της σχέσης:

$$MAE = \langle |Y - X| \rangle \quad (5.3)$$

καθώς και το σχετικό μέσο απόλυτο σφάλμα (adjusted relative mean absolute error – ARMAE) μέσω της σχέσης:

$$ARMAE = \langle |Y - X| \rangle / \langle |X| \rangle \quad (5.4)$$

Μια θεωρητική τιμή για το ARMAE ίση με το 0 θα εξέφραζε απόλυτη - 100% ομοιότητα μεταξύ μοντέλου και πραγματικότητας, το οποίο εξ ορισμού είναι ανέφικτο, καθώς το RMAE εμπεριέχει σφάλματα μετρήσεων.

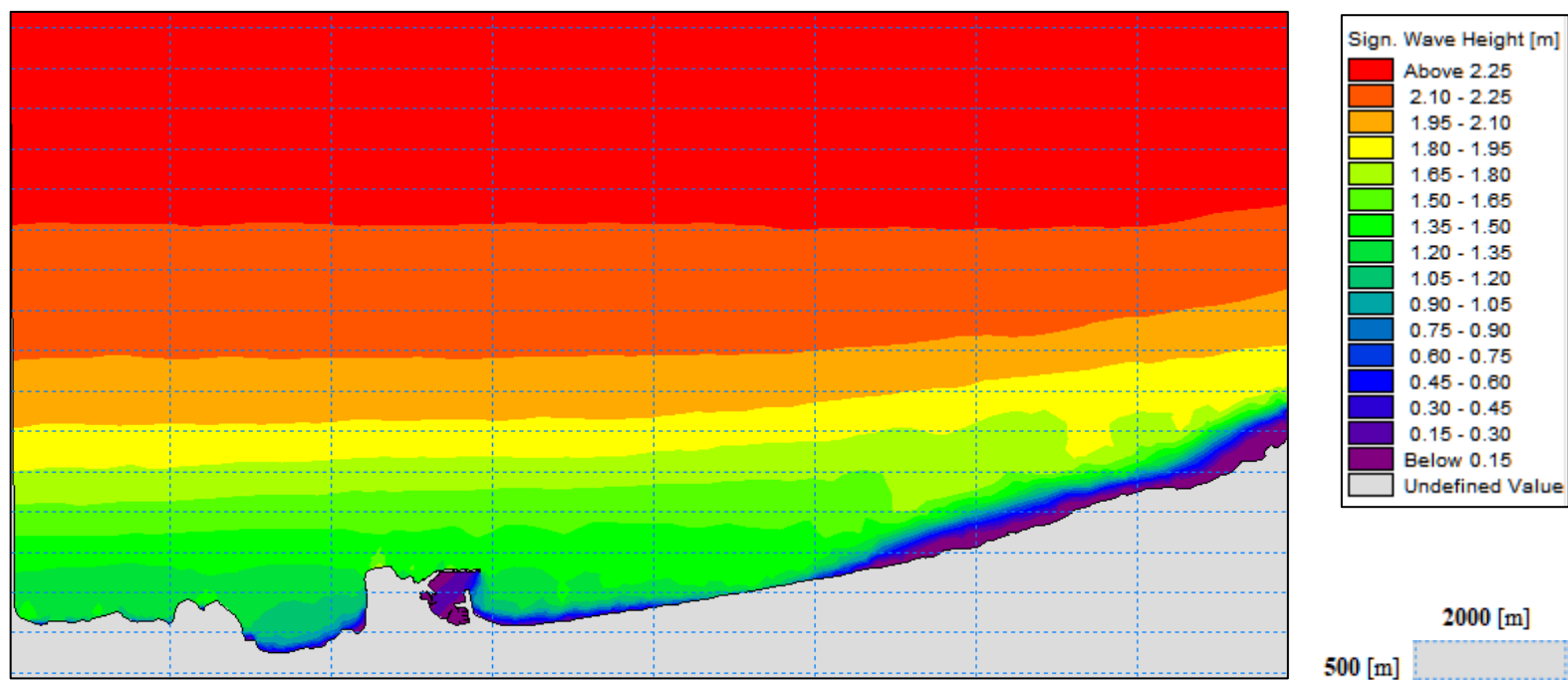
Για τη μέθοδο ροής ενέργειας προέκυψε ο δείκτης ARMAE ίσος με $0,019 < 0,20$ το οποίο σύμφωνα με τον πίνακα (6.1) (*“Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth”* - J. Sutherland) καθιστά τη μέθοδο “Excellent” – εξαιρετική σε σχέση με τη συνολική χρονοσειρά.

Πίνακας 5.2: Κατηγοριοποίηση μεθόδων με βάση το δείκτη σφάλματος (Sutherland J., 2003, *“Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth”*)

Κατηγοριοποίηση	Εύρος τιμών του ARMAE
Εξαιρετική	< 0.2
Καλή	$0.2 - 0.4$
Ικανοποιητική	$0.4 - 0.7$
Ανεπαρκής	$0.7 - 1.0$
Κακή	> 1.0

5.3 Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος *Energy Flux*

5.3.1 SW (*Spectral Waves*)

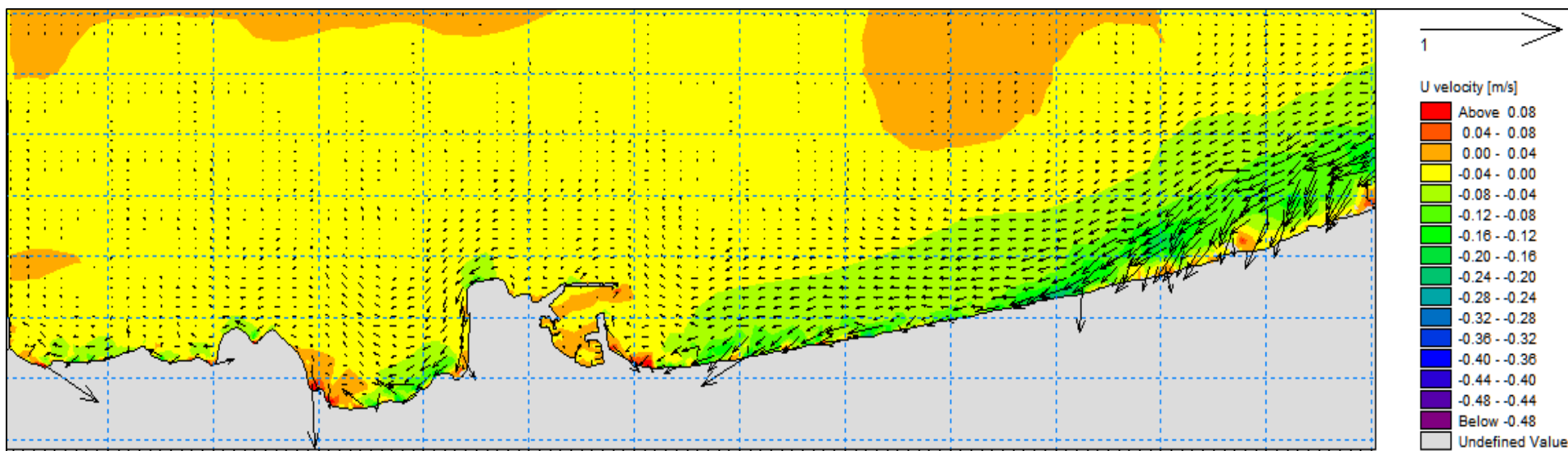


Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Energy Flux*

Το παραπάνω σχήμα αντιστοιχεί στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 144/144). Απεικονίζει το κύμα που αντιστοιχεί στον τελευταίο αντιπρόσωπο, 5b (βλ. Πίνακα 4.1) με ύψος κύματος 2.3153 m και διεύθυνση 375,52° κατά τη δημιουργία του στο όριο του υπολογιστικού πεδίου.

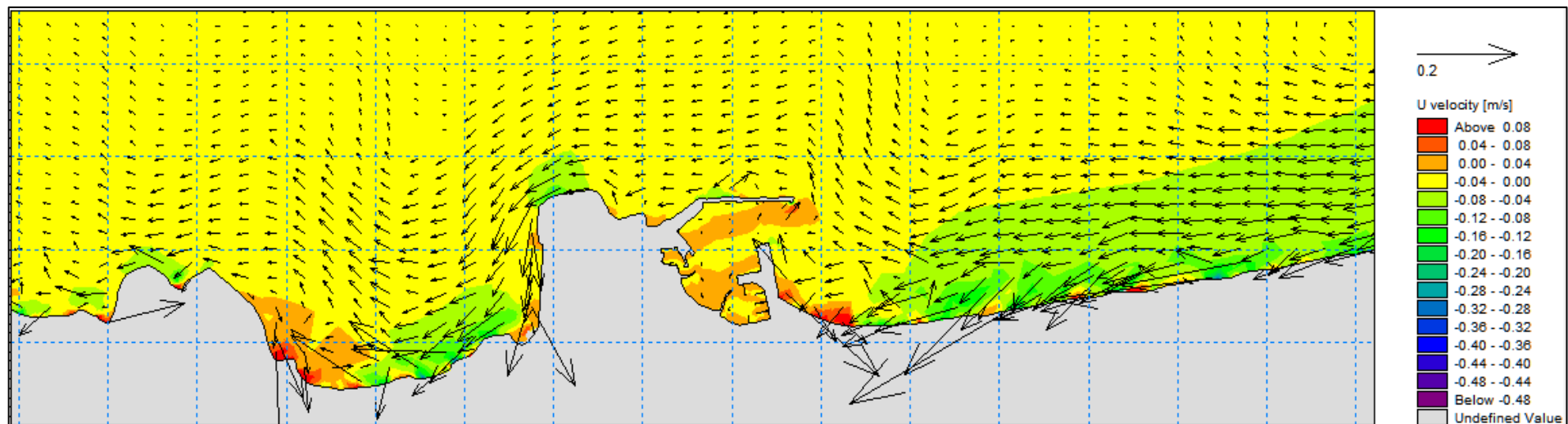
Σημειώνεται ότι το παρόν μοντέλο δεν ενδείκνυται για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών στο μώλο του έργου, καθώς δε λαμβάνει υπ' όψιν το συντελεστή ανάκλασης των κυμάτων.

5.3.2 HD (Hydrodynamic)

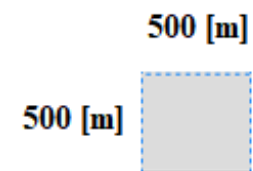


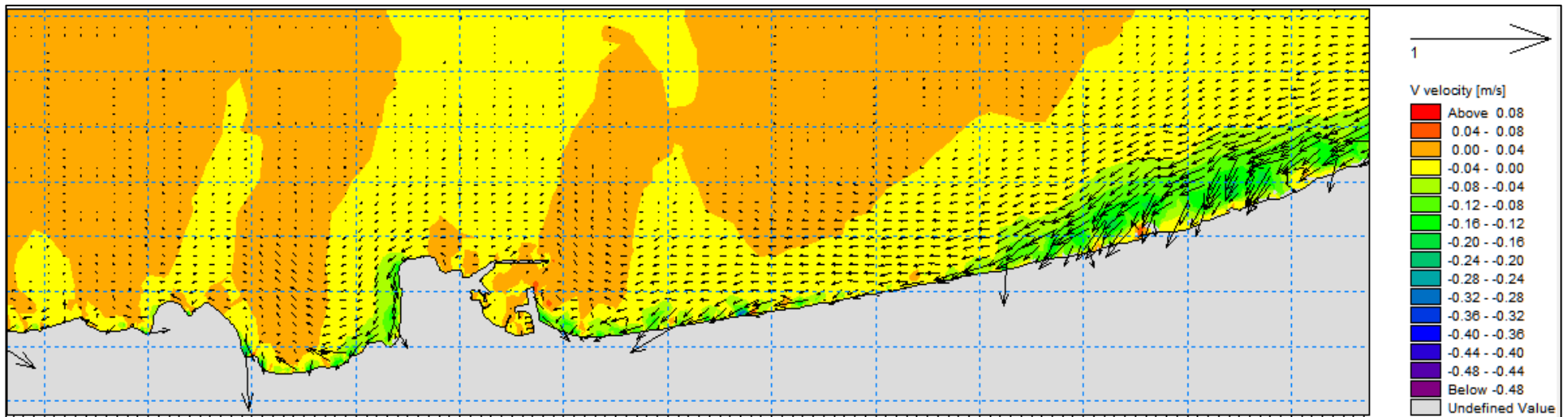
Σχήμα 5.4: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματισμένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Energy Flux

1000 [m]
500 [m]



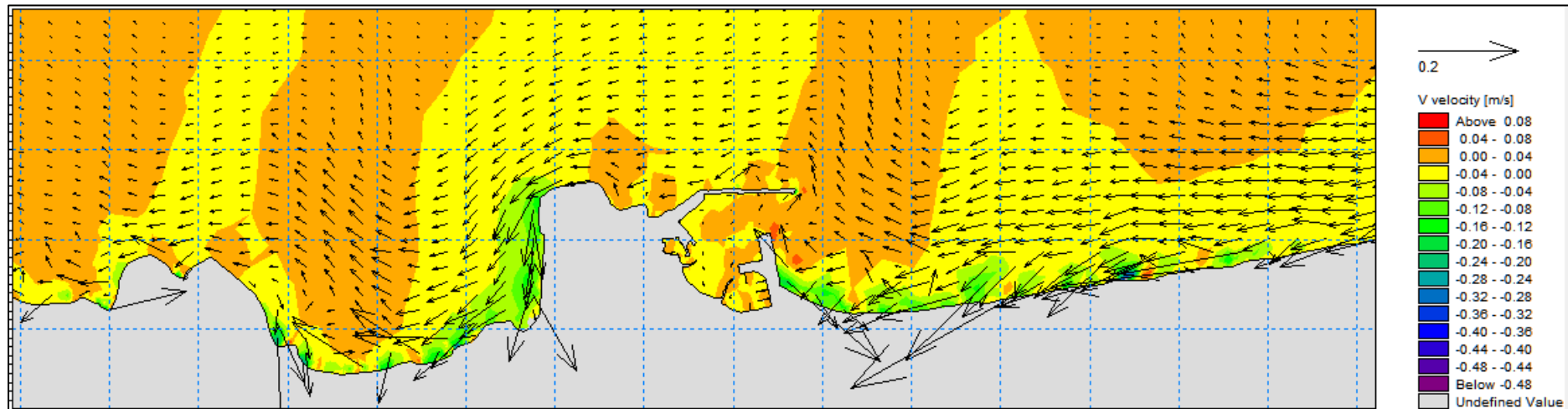
Σχήμα 5.5: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Energy Flux - Λεπτομέρεια





Σχήμα 5.6: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Energy Flux*

1000 [m]
500 [m]



Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Energy Flux* - Λεπτομέρεια

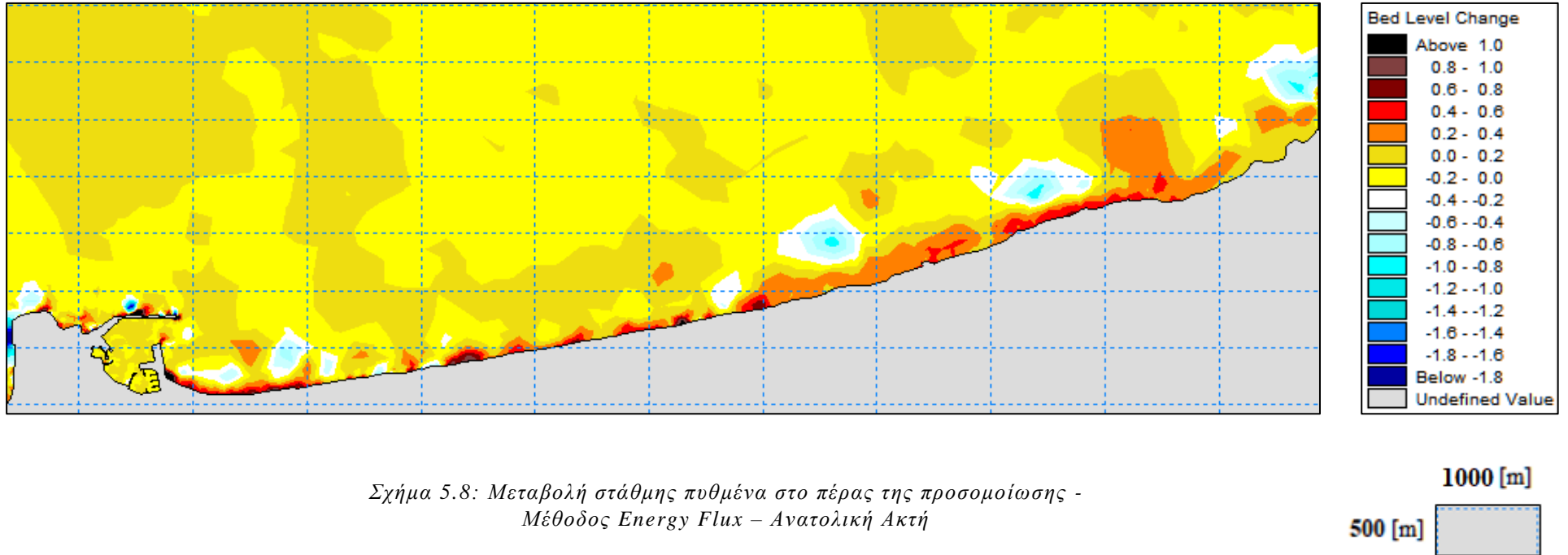
500 [m]

500 [m]

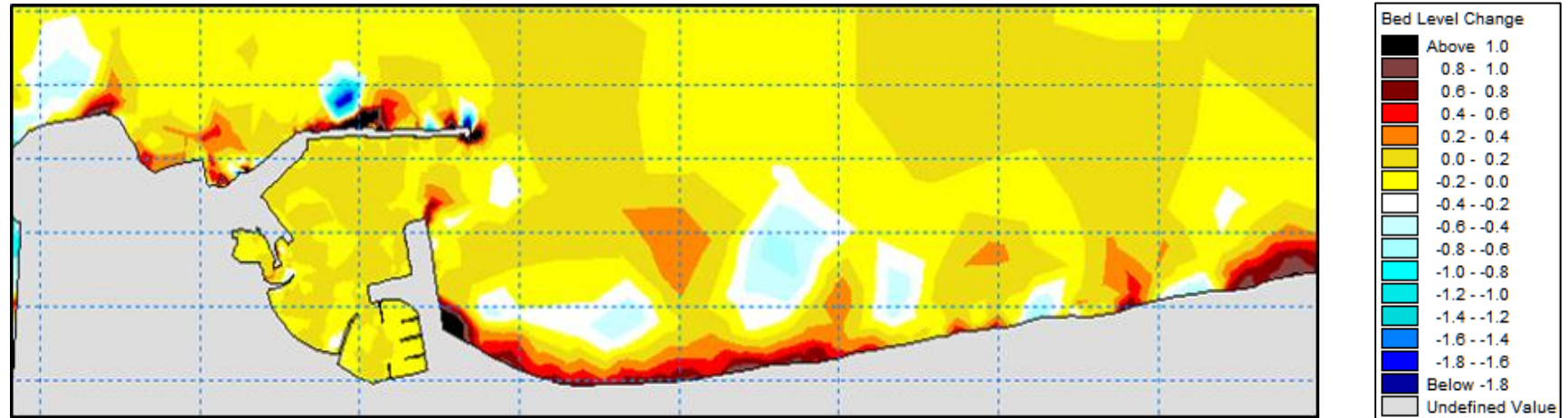
Παρατηρούνται αυξημένες ταχύτητες ρεύματος τόσο κατά την οριζόντια διεύθυνση όσο και την κατακόρυφη σε ορισμένα σημεία ανατολικά του λιμένα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι ταχύτητες φθάνουν μία μέγιστη τιμή 0.80 – 1.00 m/s, ενώ η μέση τιμή κυμαίνεται στα 0.05 m/s.

Στο σχήμα διακρίνονται διανύσματα στην ακτή, τα οποία έχουν μεγάλο μέτρο συγκριτικά με τα υπόλοιπα και διαφορετική διεύθυνση. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι τα διανύσματα αυτά δεν έχουν φυσική σημασία, ενώ οφείλονται στο γεγονός ότι σε εκείνα τα σημεία υπάρχει απότομη μεταβολή του βάθους (λόγω πλευρικών ορίων – lateral boundaries), το οποίο οδηγεί, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συνθήκη Courant–Friedrichs–Lewy για δισδιάστατο πεδίο, σε μεγάλες ταχύτητες τοπικά, το οποίο απεικονίζεται μέσω των προαναφερθέντων διανυσμάτων.

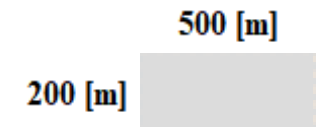
5.3.3 Sediment Transport (ST)



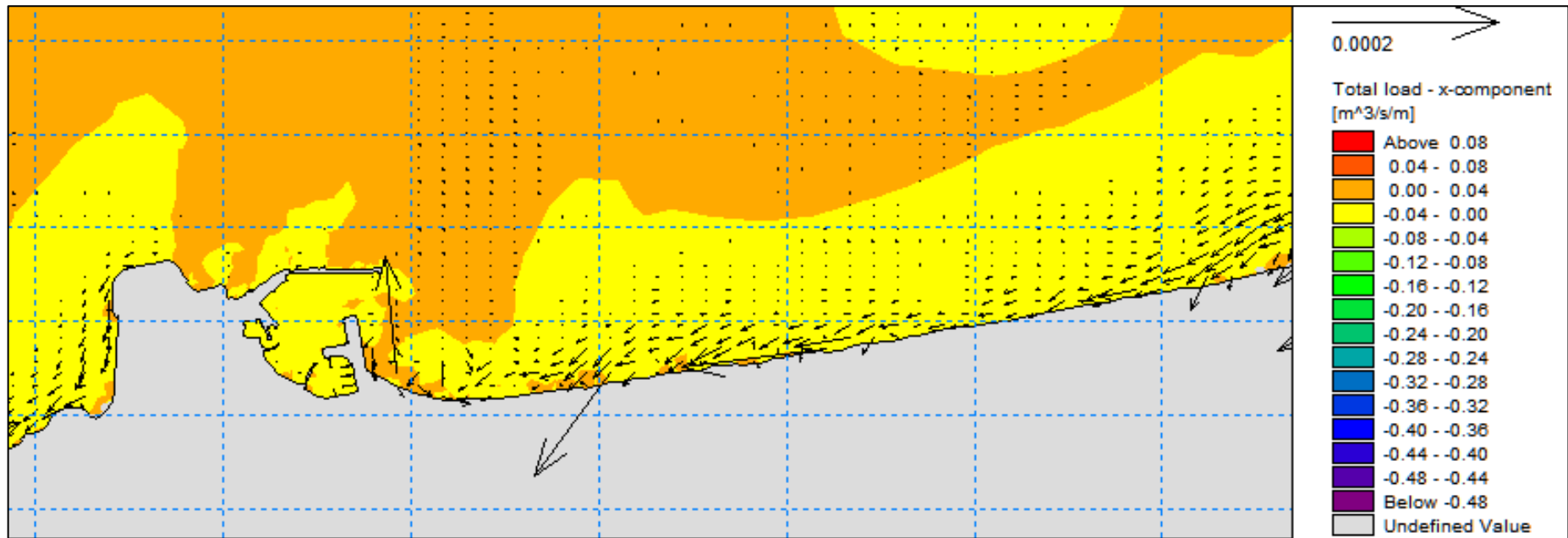
Σχήμα 5.8: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux – Ανατολική Ακτή



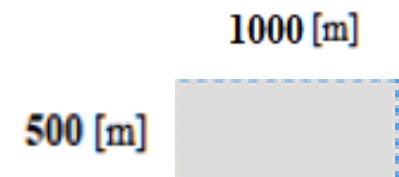
Σχήμα 5.9: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Energy Flux – Λεπτομέρεια Λιμένα

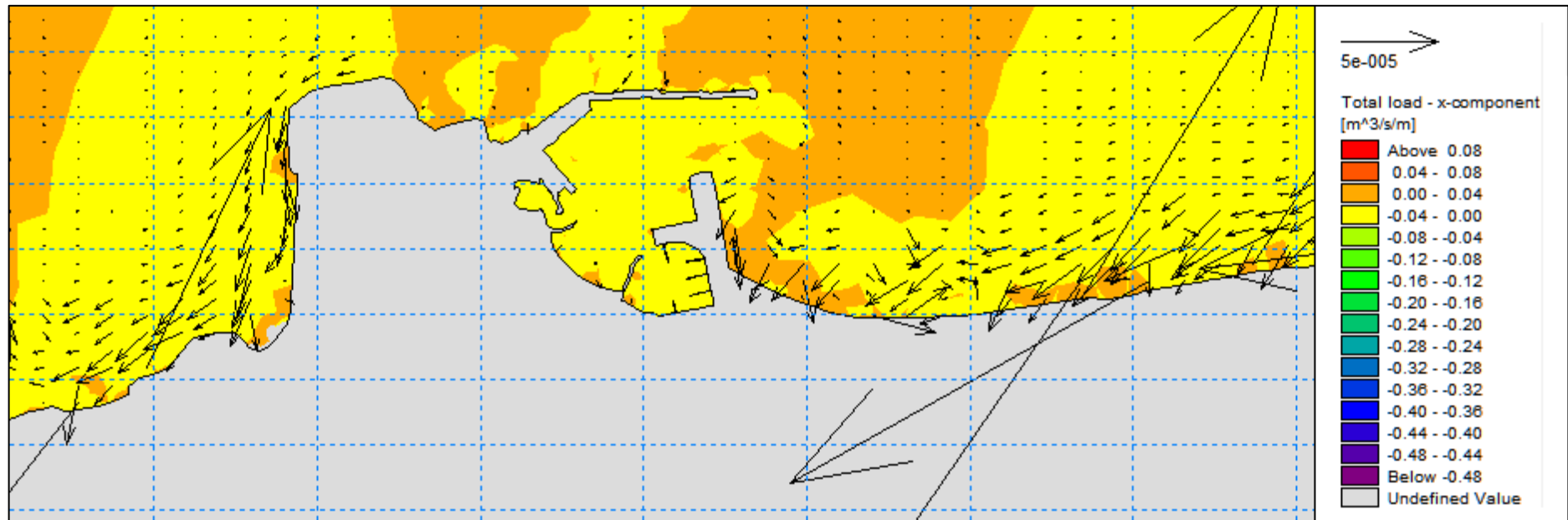


Είναι εμφανής η συσσώρευση αποθέσεων εκατέρωθεν του λιμένα. Ωστόσο, λόγω βραχώδους υποβάθρου στο δυτικό τμήμα της ακτής, εν τέλει η ανάλυση επικεντρώνεται στο ανατολικό αμμώδες τμήμα της ακτής.



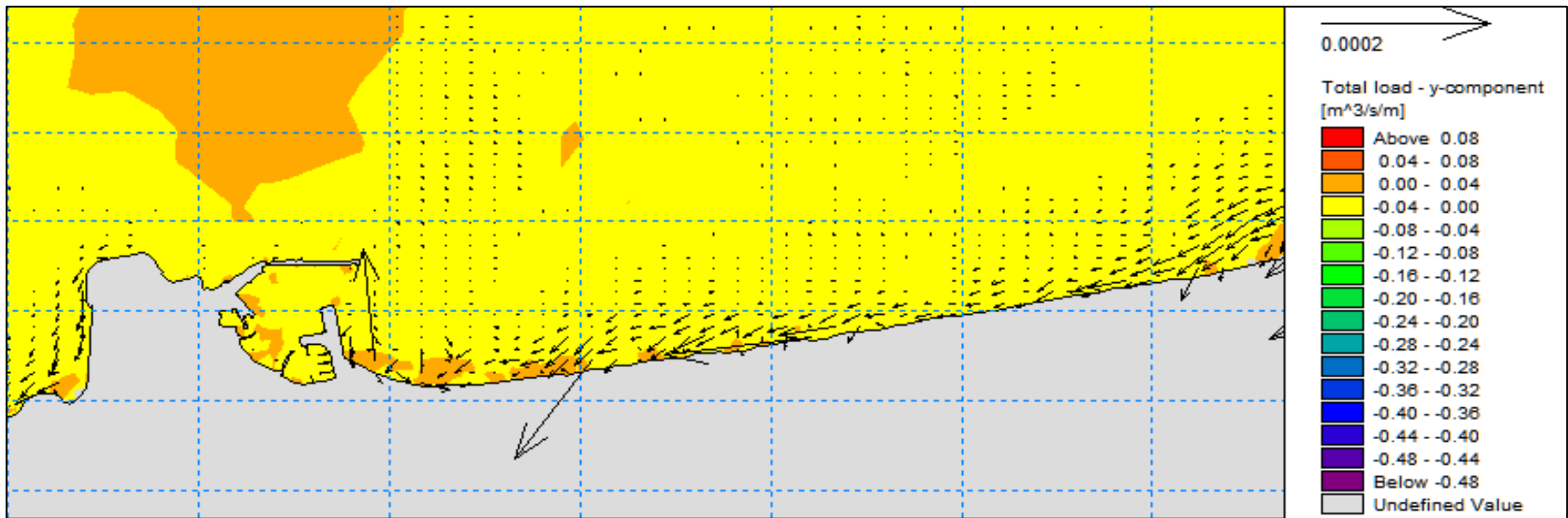
Σχήμα 5.10: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος Energy Flux – Ανατολική Ακτή



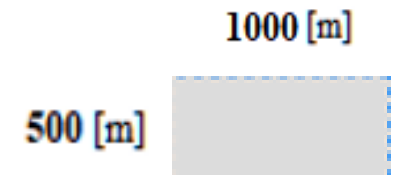


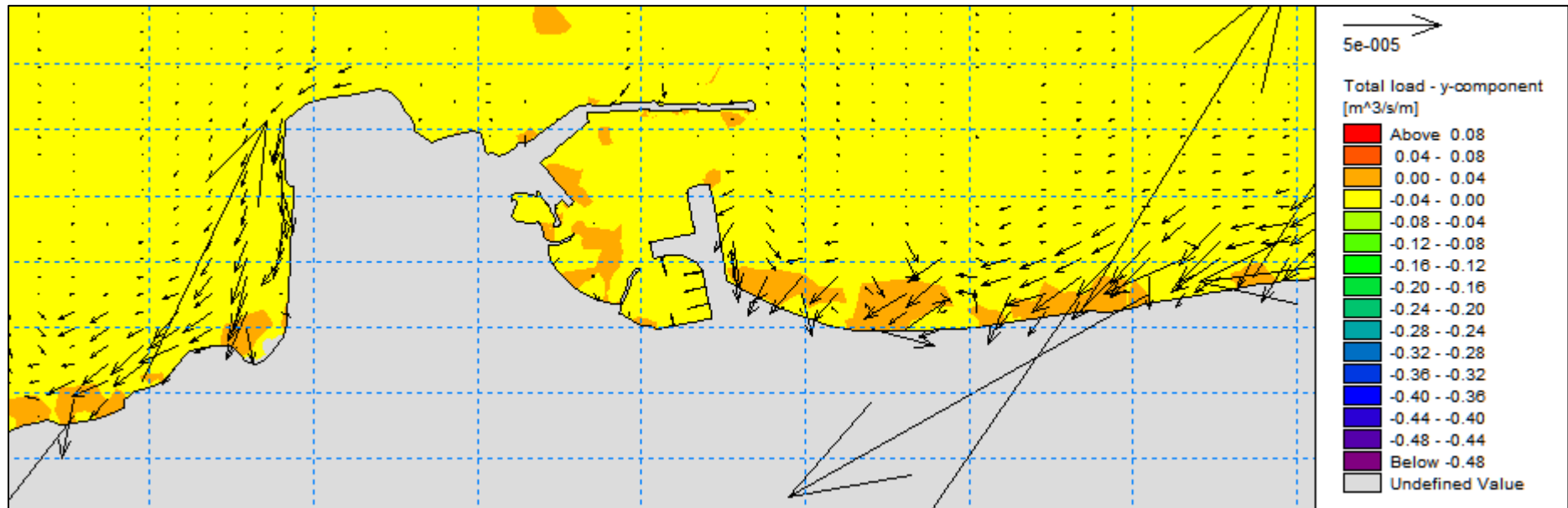
Σχήμα 5.11: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος Energy Flux – Λεπτομέρεια Λιμένα

500 [m]
200 [m]

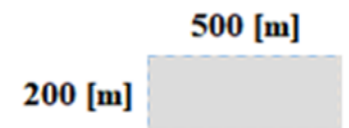


Σχήμα 5.12: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος Energy Flux – Ανατολική Ακτή





Σχήμα 5.13: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος Energy Flux – Λεπτομέρεια Λιμένα



Όλα τα παραπάνω σχήματα αντιστοιχούν στο πέρας της προσομοίωσης, καθώς ενδιαφέρει η συνολική στερεομεταφορά.

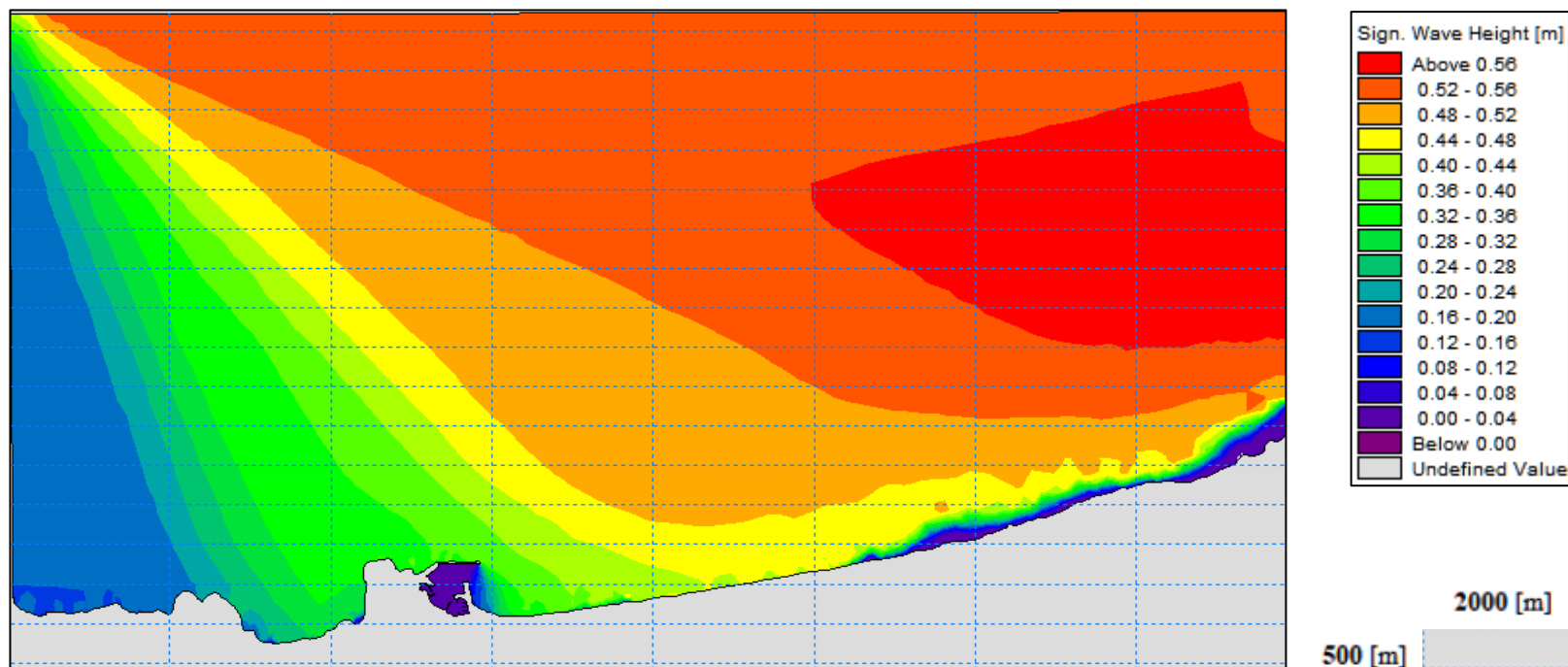
Παρατηρούνται μεγάλες τιμές της χωρικής κατανομής κατά x και y σε σημεία κατ' αντιστοιχία με τις ταχύτητες κατά x και y , το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς μεγάλες ταχύτητες συνεπάγονται κατά κανόνα μεγάλους όγκους στερεομεταφοράς Q_i . Ενδεικτικά εμφανίζονται τιμές

Επίσης, τα διανύσματα των χωρικών κατανομών δείχνουν την τελική κατεύθυνση που θα έχουν εν τέλει τα ιζήματα, καθώς και πού θα έχουμε αποθέσεις και πού διαβρώσεις. Έτσι, στα μεγεθυμένα στιγμιότυπα (Σχήμα 5.6 και 5.7) παρατηρούνται:

- Η διάβρωση της ακτής βόρεια του λιμένα και η κατεύθυνση των ιζημάτων προς τα νοτιοδυτικά, όπου και εν τέλει εναποτίθενται. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι η δυτική ακτή είναι κυρίως βραχώδους υποβάθρου, οπότε η μεταφορά του ιζήματος είναι περιορισμένη.
- Η διάβρωση της ανατολικής ακτής της περιοχής και η κατεύθυνση των ιζημάτων προς τα δυτικά. Η τελική εναπόθεσή τους γίνεται στον υπήνεμο μώλο του λιμένα. (βλ. Σχήμα 5.7)

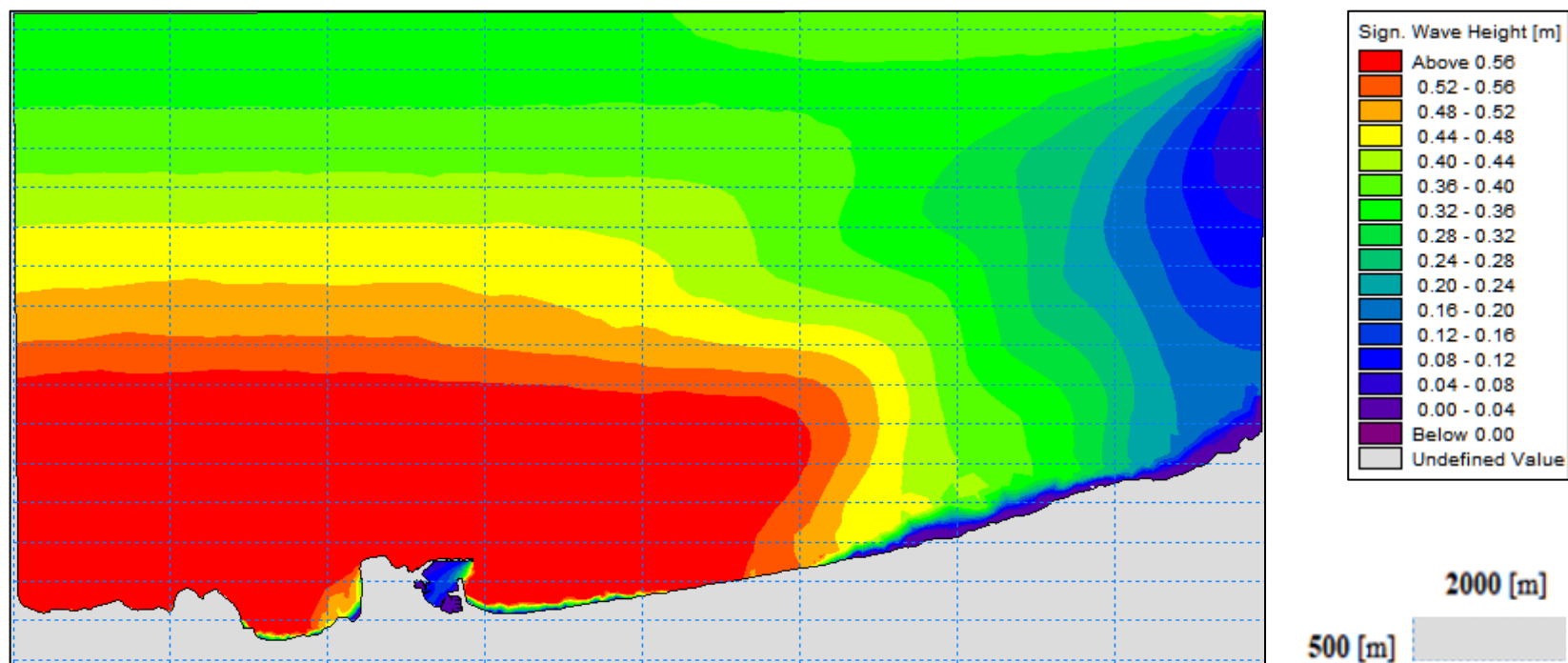
5.4 Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος *Fixed Bins*

5.4.1 SW (Spectral Waves)



15/04/2019 21:40:00 Time Step 28 of 144.

Σχήμα 5.14: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Fixed Bins* (Χρονικό βήμα: 28/144)

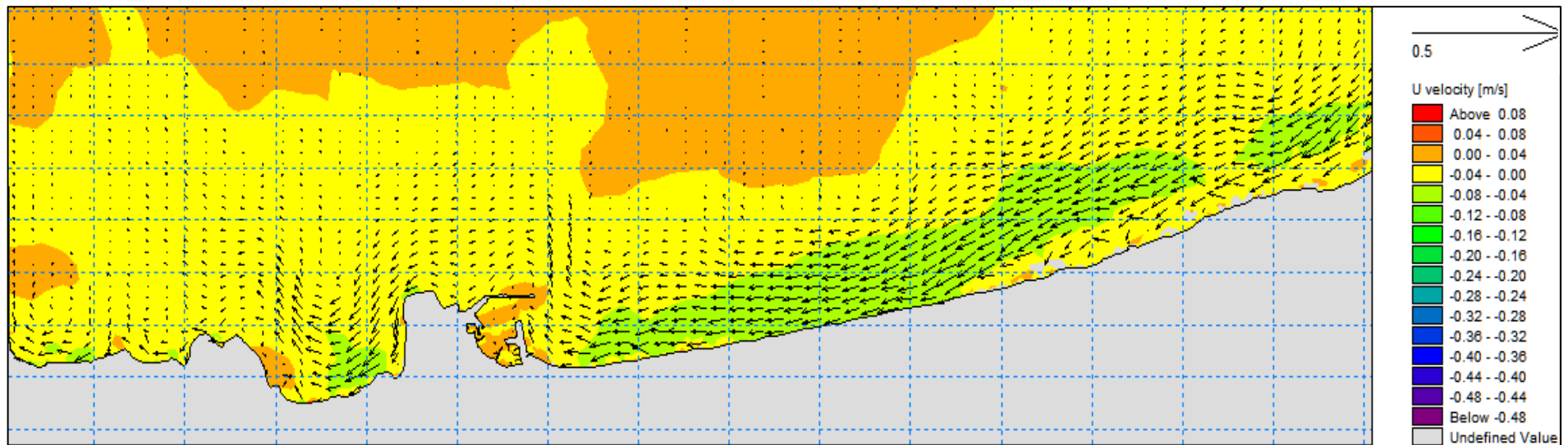


Σχήμα 5.15: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματισμένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Fixed Bins* (Χρονικό βήμα: 144/144)

Επιλέχθηκαν δύο στιγμιότυπα από διαφορετικές στιγμές της ημέρας, ώστε να φανεί η βασική διαφορά της μεθόδου *Fixed Bins* από τις υπόλοιπες. Συγκεκριμένα, το πρώτο σχήμα έχει ληφθεί σε χρονικό βήμα ίσο με 28 από τα συνολικά 144, σε αρχικό στάδιο δηλαδή της προσομοίωσης. Ο αντιπρόσωπος για την εν λόγω χρονική στιγμή έχει ύψος κύματος 0,56 m και διεύθυνση 318° (βλ. Πίνακα 4.2), δηλαδή προέρχεται από τα βορειοδυτικά. Από την άλλη ο αντιπρόσωπος που έχει ληφθεί στο δεύτερο σχήμα (time step = 140/144) αντιστοιχεί στην κλάση 5a (βλ. Πίνακα 4.2) με ύψος κύματος 0,44 m και διεύθυνση $\approx 433^\circ$, δηλαδή ανατολικά.

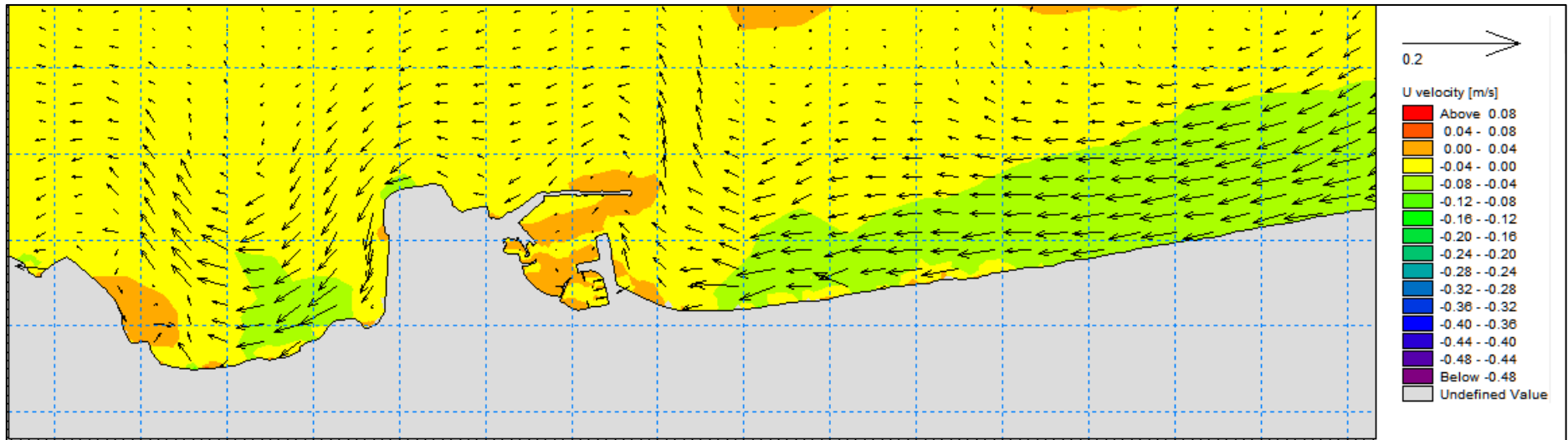
Η διαφορά λοιπόν έγκειται στις διευθύνσεις εισερχομένων κυματισμών, καθώς οι μέθοδοι Energy Flux και Pickup Rate, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5 έχουν κλάσεις μικρότερου πλάτους (δεδομένου ότι η ροή ενέργειας και η παροχή στερεομεταφοράς αντιστοίχως είναι εντονότερες στη βόρεια διεύθυνση, καθώς από εκεί προέρχονται τα μεγάλα ύψη κυμάτων). Έτσι και οι αντιπρόσωποι έχουν διευθύνσεις κατά κύριο λόγο $\pm 20^\circ$ από τις 360°, με αποτέλεσμα κύματα από δυτικά και ανατολικά πρακτικά να αμελούνται.

5.4.2 HD (Hydrodynamic)

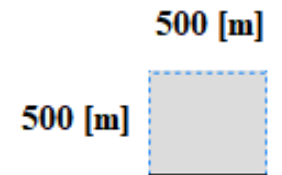


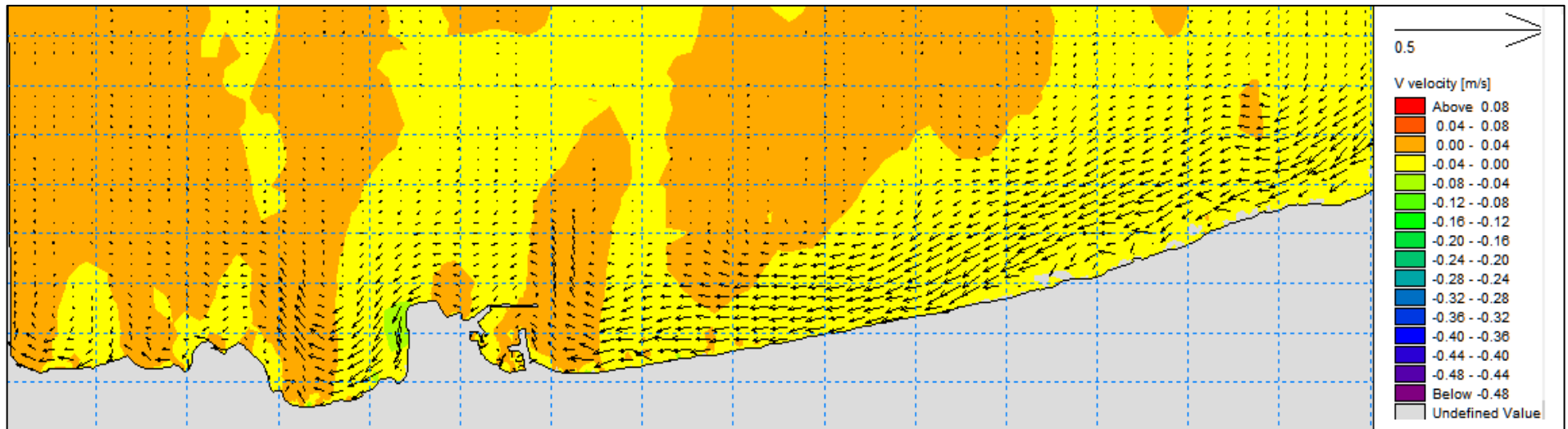
Σχήμα 5.16: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Fixed Bins

500 [m]
500 [m]

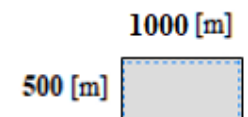


Σχήμα 5.17: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Fixed Bins* - Λεπτομέρεια

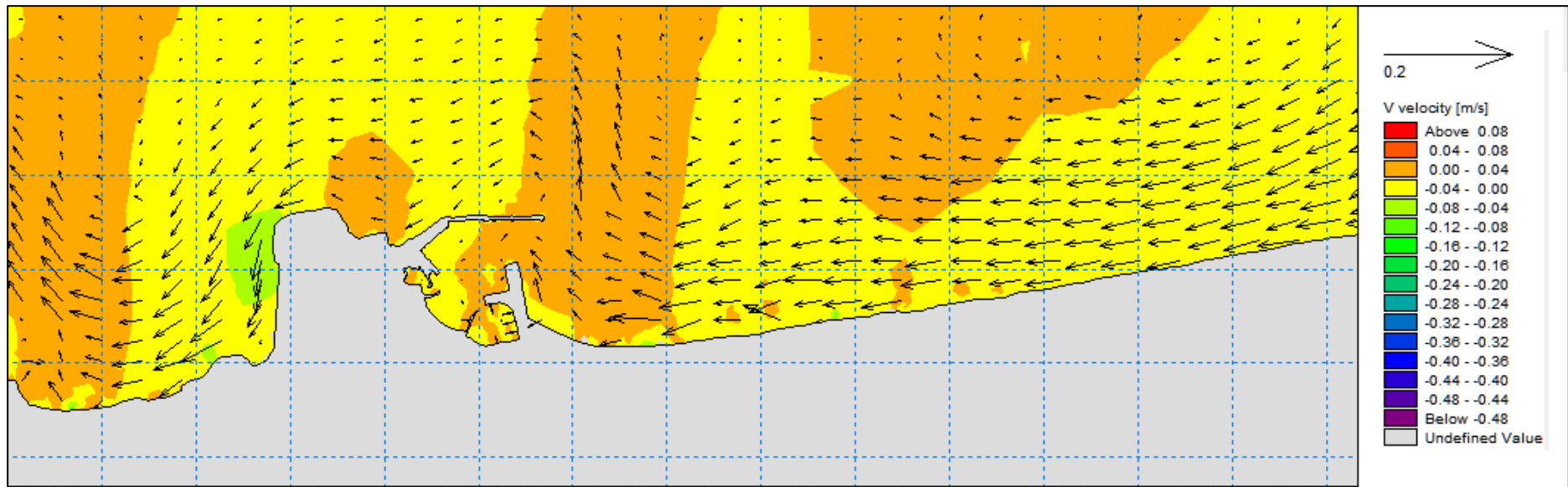




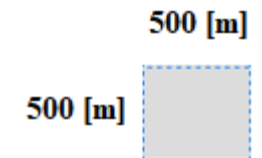
Σχήμα 5.18: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματισμένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Fixed Bins*



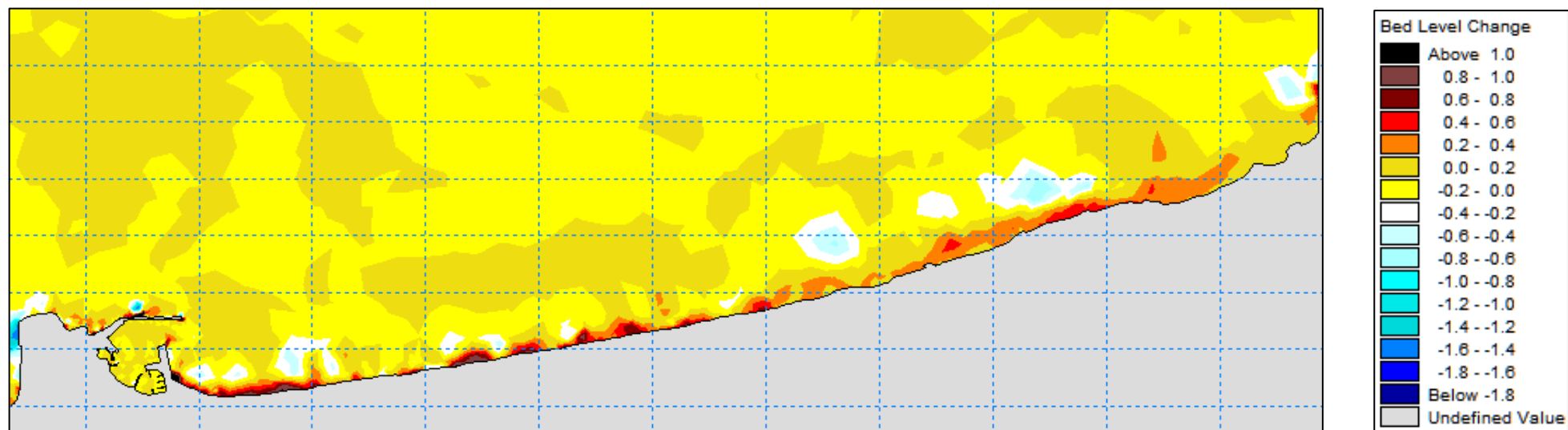
Παρατηρείται μια ομοιόμορφη εικόνα στην κατανομή των οριζοντίων και των κατακόρυφων ταχυτήτων σε αντίθεση με τη μέθοδο ροής ενέργειας, καθώς στην εν λόγω μέθοδο δεν παρουσιάζονται ακραίες τιμές κοντά στην ακτή. Μέγιστες τιμές της τάξεως των 0.05 m/s εμφανίζονται κοντά στην ανατολική ακτή.



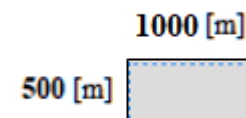
Σχήμα 5.19: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματισμένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος *Fixed Bins* - Λεπτομέρεια

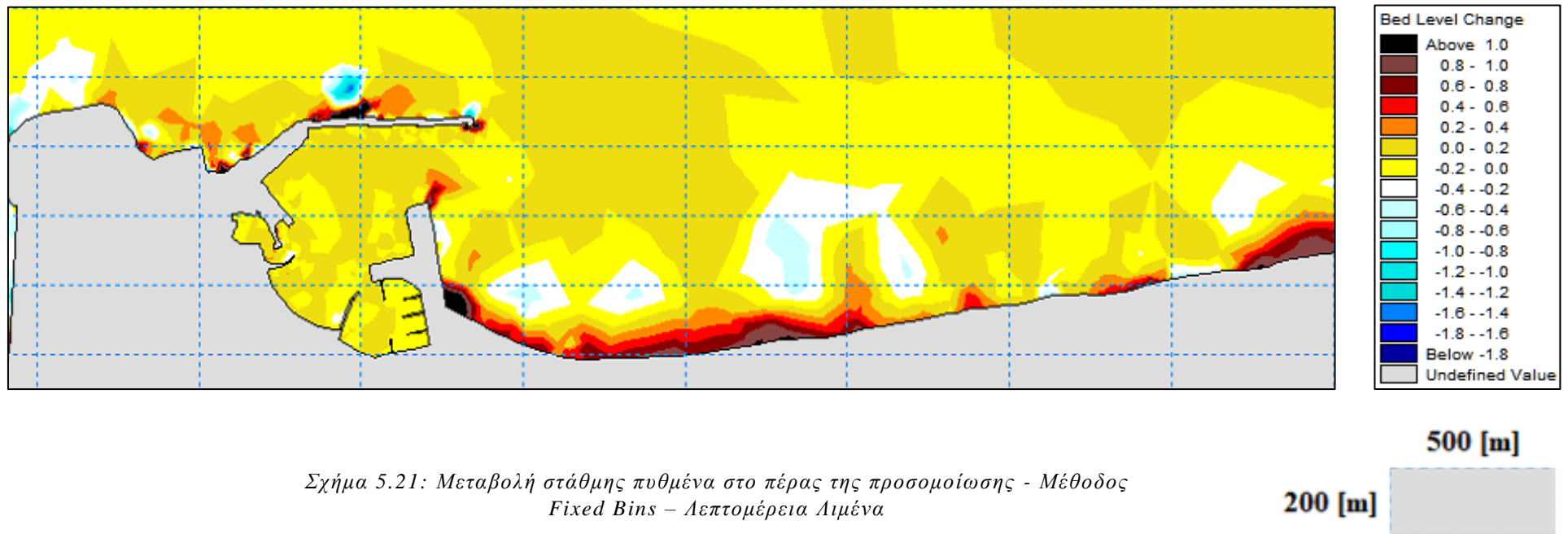


5.4.3 ST (Sediment Transport)

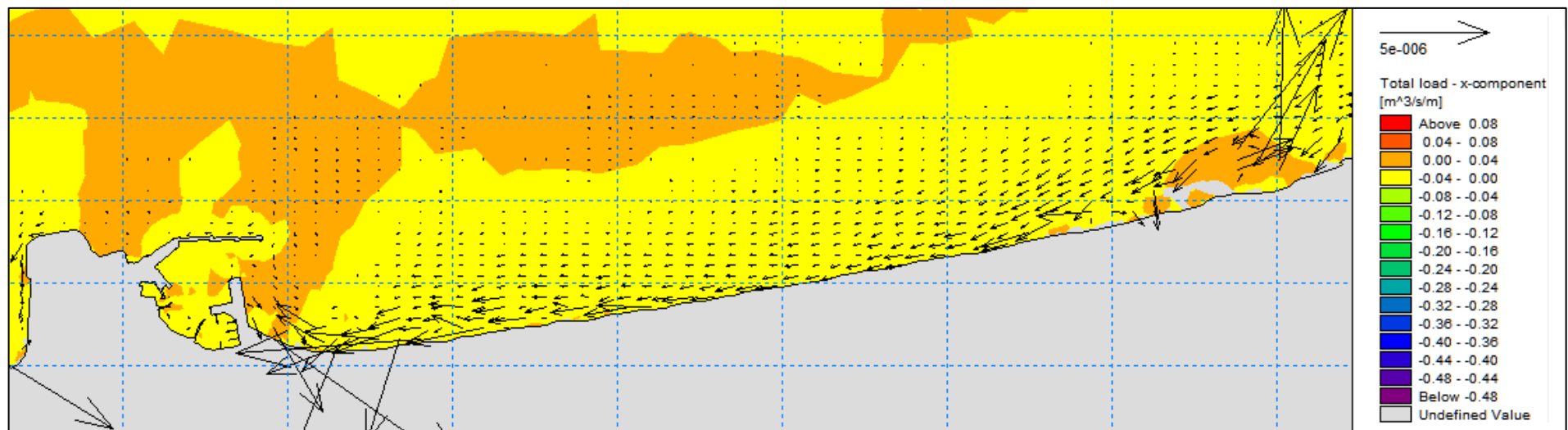


Σχήμα 5.20: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Μέθοδος Fixed Bins – Ανατολική Ακτή



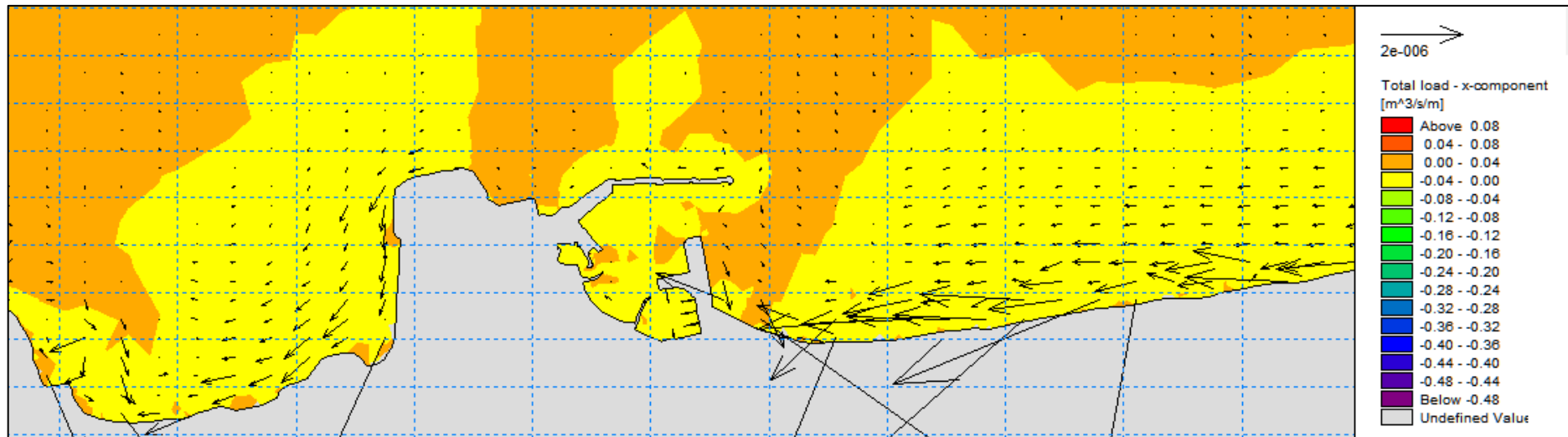


Παρατηρείται συσσώρευση ιζημάτων στην ανατολική ακτή και συγκεκριμένα στη ρίζα του υπήνεμου μώλου. Σε σύγκριση με τη μέθοδο ροής ενέργειας, οι αποθέσεις είναι περισσότερες, το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη περισσότερων κυμάτων βορειοανατολικής και ανατολικής διεύθυνσης σε αυτή τη μέθοδο. Ο λόγος είναι ότι τα βόρεια κύματα, που υπερτερούν στις υπόλοιπες μεθόδους, εμφανίζονται στην παρούσα μέθοδο με ίδια συχνότητα με αυτή των ανατολικών και βορειοανατολικών, καθώς ο διαχωρισμός των κλάσεων δεν επηρεάζεται από φυσικά χαρακτηριστικά, όπως είναι το ύψος κύματος.



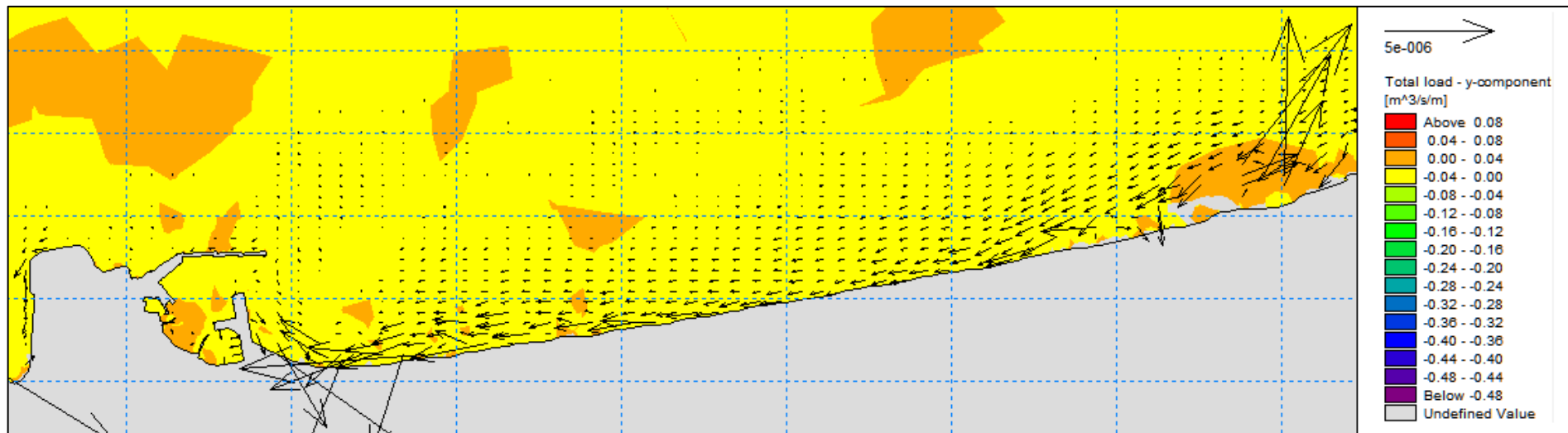
Σχήμα 5.22: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος Fixed Bins – Ανατολική Ακτή

1000 [m]
500 [m]

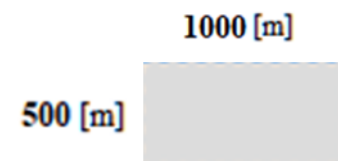


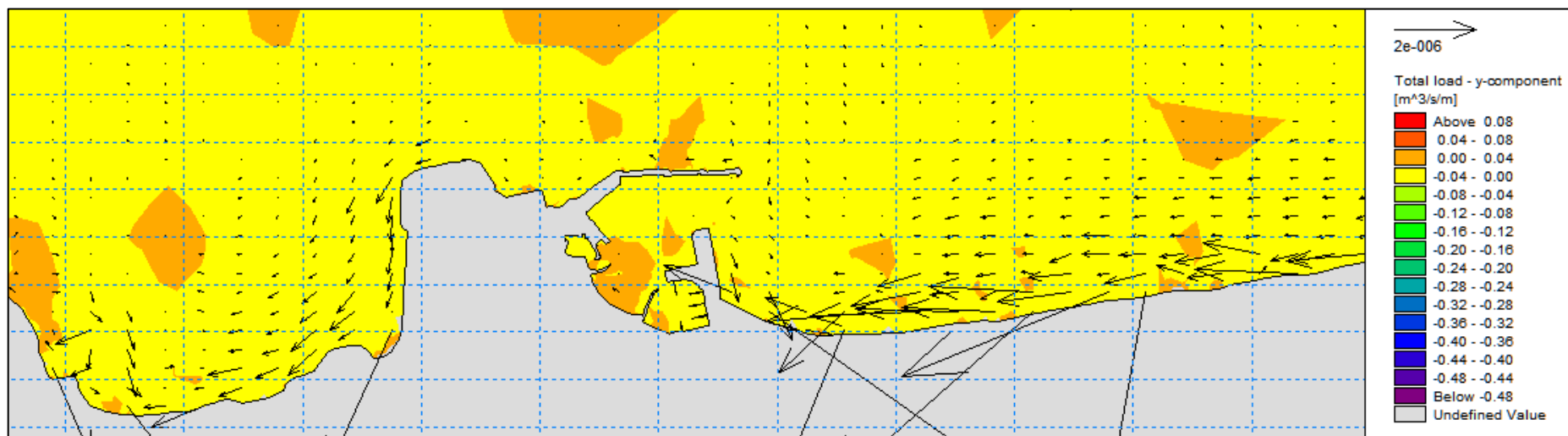
Σχήμα 5.23: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x – Μέθοδος *Fixed Bins* – Λεπτομέρεια Λιμένα

500 [m]
200 [m]



Σχήμα 5.24: : Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος
Fixed Bins – Ανατολική Ακτή





Σχήμα 5.25: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y – Μέθοδος *Fixed Bins* – Λεπτομέρεια Λιμένα

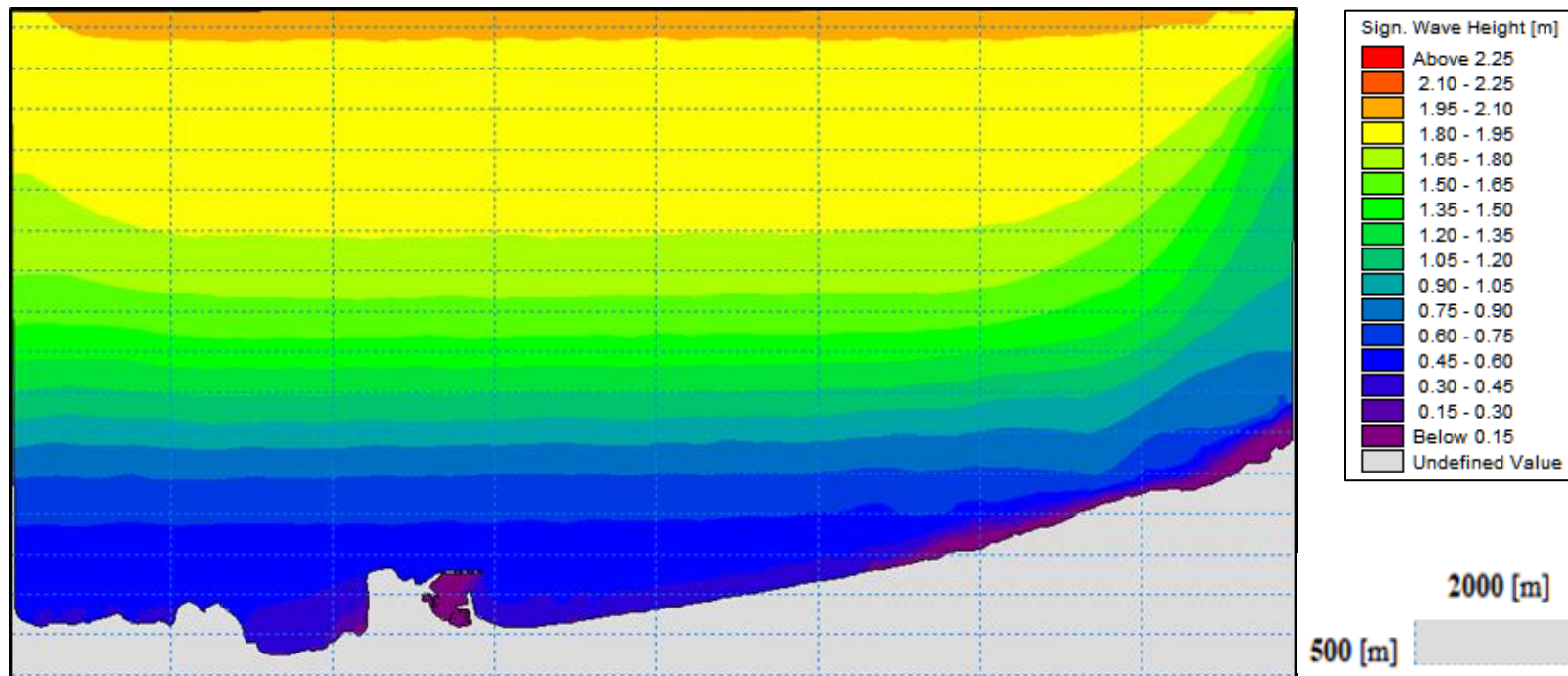
500 [m]
200 [m]

Ομοίως με τη μέθοδο *Energy Flux*, τα διανύσματα δείχνουν την τελική διεύθυνση του φορτίου στερεομεταφοράς. Σε ό,τι αφορά την ανατολική ακτή, τα ιζήματα κατευθύνονται δυτικά ως υπό την επίδραση κυματισμών με βορειοανατολική και βόρεια διεύθυνση, και εναποτίθενται στη ρίζα του υπήνεμου μώλου. Στο σχήμα διακρίνονται διανύσματα στην ακτή, τα οποία έχουν μεγάλο μέτρο συγκριτικά με τα υπόλοιπα και διαφορετική διεύθυνση. Όπως προαναφέρθηκε, τα διανύσματα αυτά δεν έχουν φυσική σημασία. Η εμφάνισή τους οφείλεται στο γεγονός ότι σε εκείνα τα σημεία υπάρχει απότομη μεταβολή του βάθους, οδηγώντας κατ' αυτό το τρόπο σε μεγάλες ταχύτητες τοπικά.

Επιπροσθέτως, παρατηρείται η διάβρωση της ακτής βόρεια του λιμένα και η κατεύθυνση των ιζημάτων προς τα νοτιοδυτικά, όπου και εν τέλει εναποτίθενται. Υπενθυμίζεται ότι η δυτική ακτή είναι κυρίως βραχώδους υποβάθρου, οπότε η μεταφορά του ιζήματος είναι περιορισμένη.

5.5 Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος Cerc

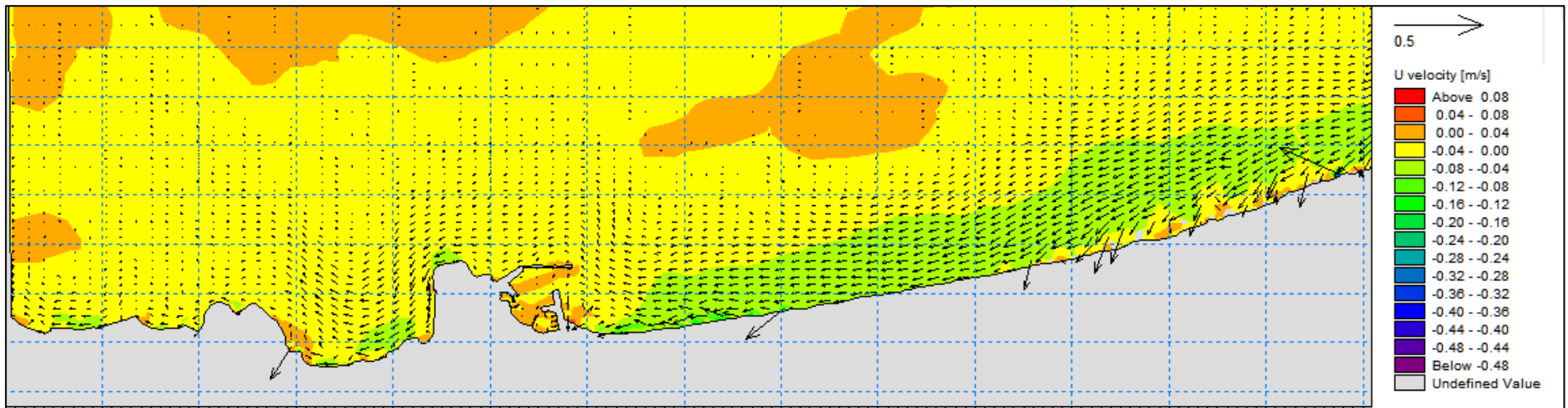
5.5.1 SW (Spectral Waves)



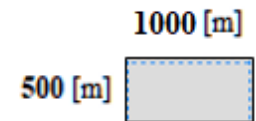
Σχήμα 5.26: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc

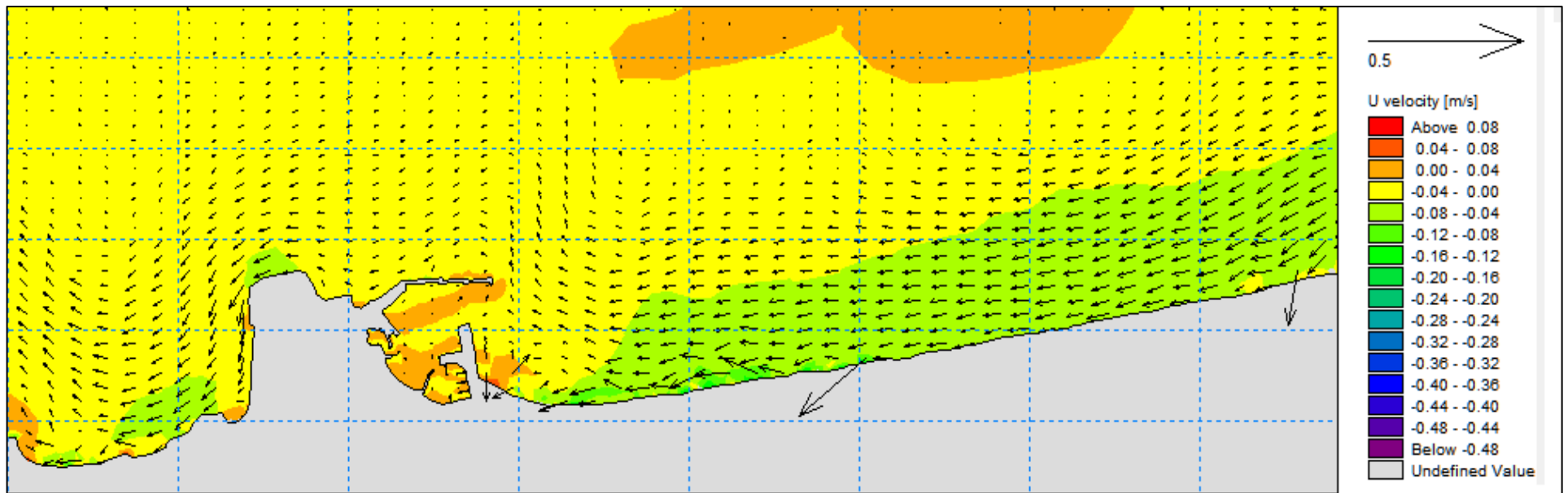
Ομοίως με τη μέθοδο ροής ενέργειας, έχει ληφθεί στιγμιότυπο από το πέρας της προσομοίωσης. Ο αντιπρόσωπος ανήκει στην τελευταία κλάση, έχοντας βόρεια – βορειοδυτική διεύθυνση. Παρατηρείται εκ νέου η διαφορά και αυτής της μεθόδου με τη μέθοδο Fixed Bins, όπου το πέρας της προσομοίωσης αντιστοιχούσε σε κλάση με κύματα ανατολικής διεύθυνσης.

5.5.2 HD (Hydrodynamic)

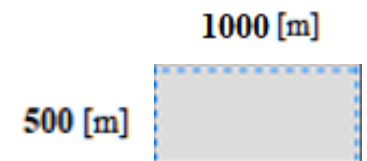


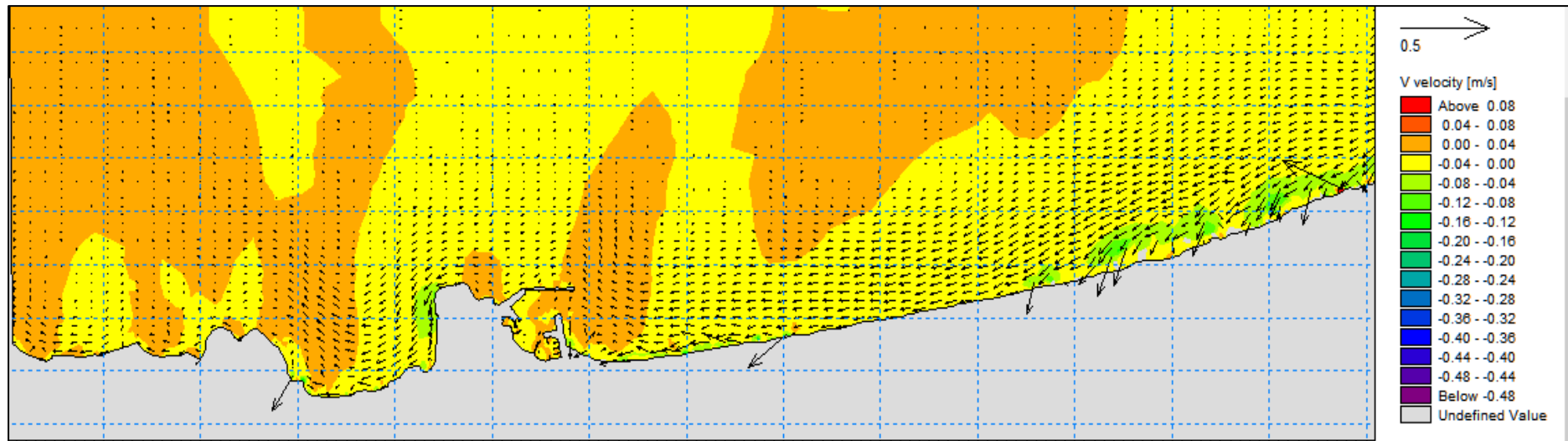
Σχήμα 5.27: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc



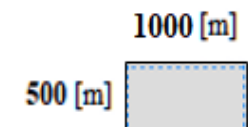


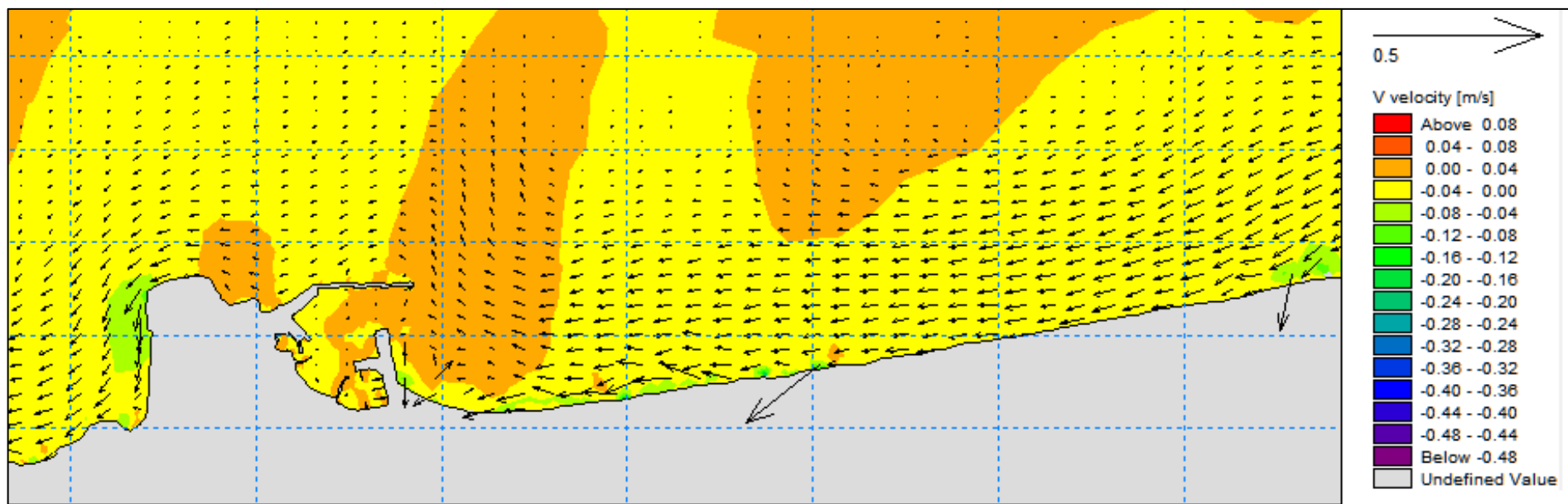
Σχήμα 5.28: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc - Λεπτομέρεια



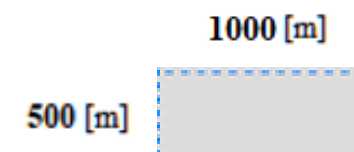


Σχήμα 5.29: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc



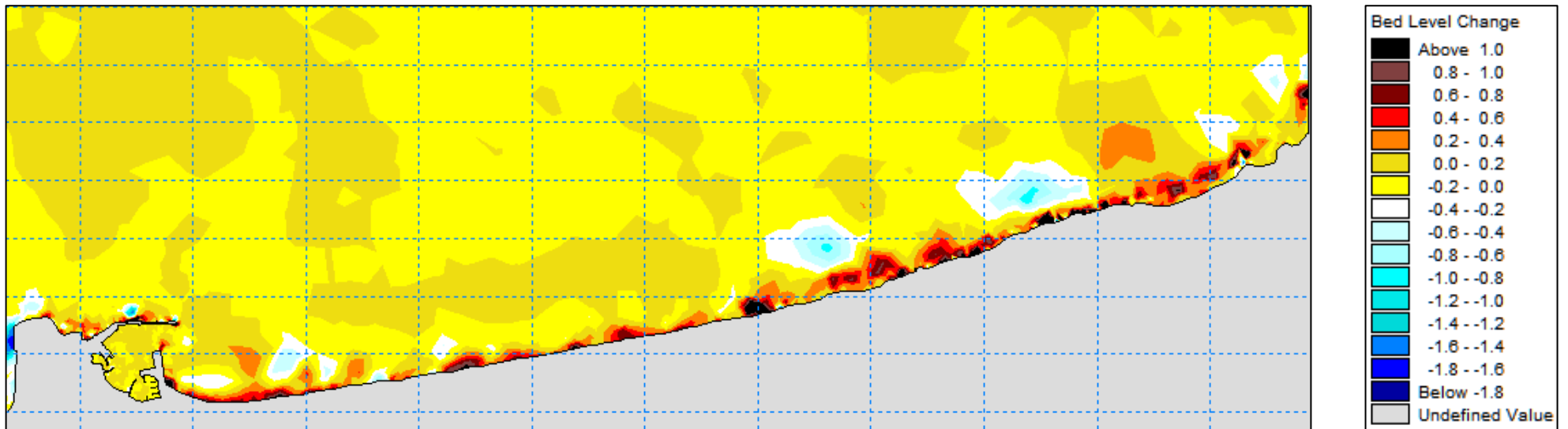


Σχήμα 5.30: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Cerc – Λεπτομέρεια

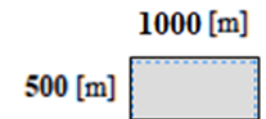


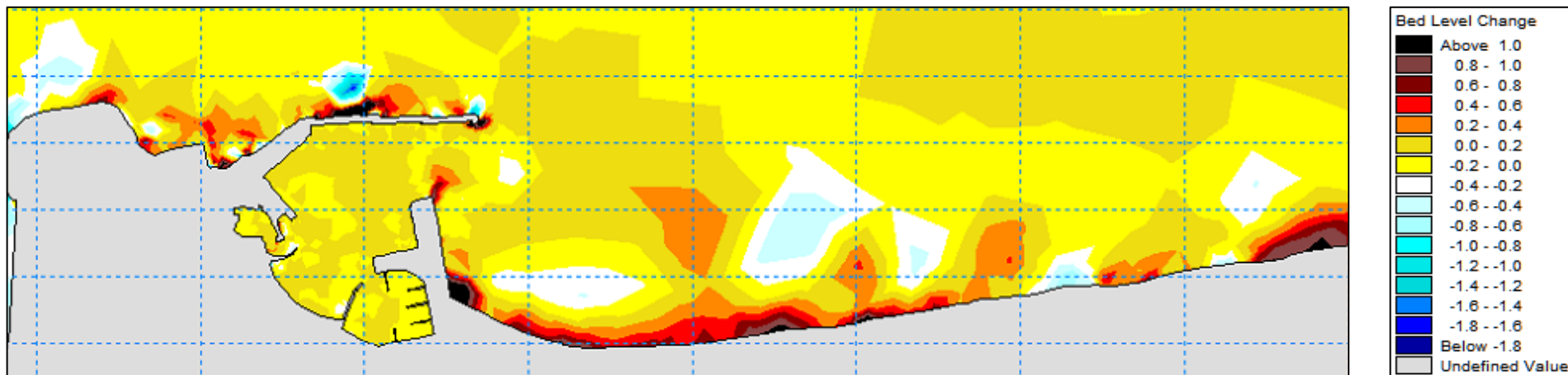
Παρατηρείται μια ομοιόμορφη εικόνα στην κατανομή των οριζοντίων και των κατακόρυφων ταχυτήτων ομοίως με τη μέθοδο σταθερών κλάσεων, καθώς στην εν λόγω μέθοδο δεν παρουσιάζονται ακραίες τιμές κοντά στην ακτή. Μέγιστες τιμές της τάξεως των 0.05 m/s εμφανίζονται κοντά στην ανατολική ακτή, ενώ όπως και στις προηγούμενες μεθόδους διακρίνονται διανύσματα στην ακτή, τα οποία έχουν μεγάλο μέτρο συγκριτικά με τα υπόλοιπα και διαφορετική διεύθυνση. Όπως προαναφέρθηκε, τα διανύσματα αυτά δεν έχουν φυσική σημασία και η εμφάνισή τους οφείλονται στο γεγονός ότι σε εκείνα τα σημεία υπάρχει απότομη μεταβολή του βάθους.

5.5.3 ST (Sediment Transport)



Σχήμα 5.31: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης
– Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή

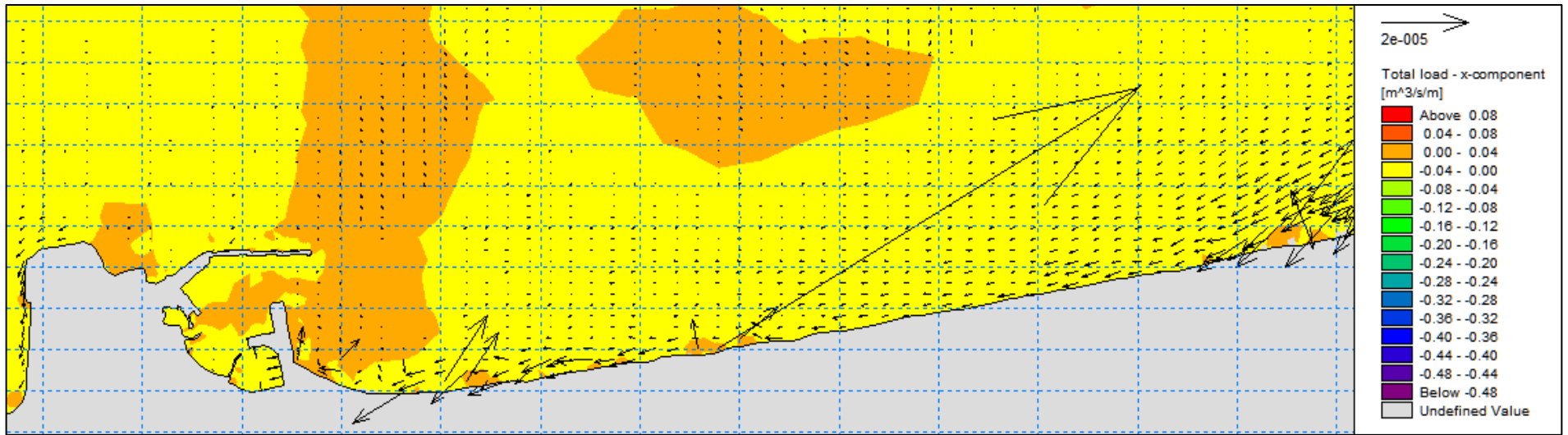




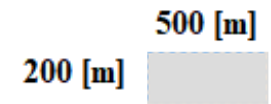
Σχήμα 5.32: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης – Μέθοδος Cerc – Λεπτομέρεια Λιμένα

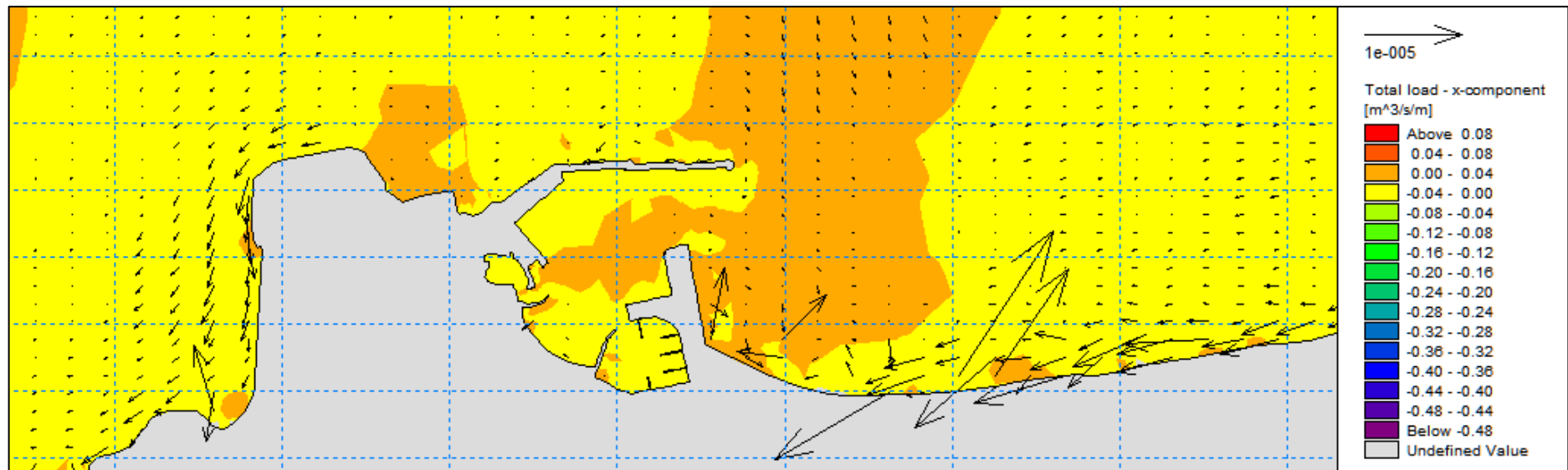
500 [m]
200 [m]

Παρατηρείται όμοια εικόνα σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους, ωστόσο οι αποθέσεις είναι λιγότερες συγκριτικά με τη μέθοδο Fixed Bins, καθώς τα κύματα ανατολικής και βορειοανατολικής διεύθυνσης έχουν λιγότερους αριθμούς εμφάνισης στη χρονοσειρά λόγω μικρών τελευταίων κλάσεων (βλ. Πίνακα 4.5). Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην Παράγραφο 5.6.4, όπου γίνεται η σύγκριση των 4 μεθόδων με βάση τη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης.

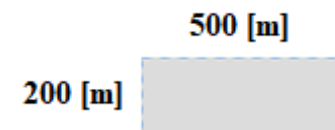


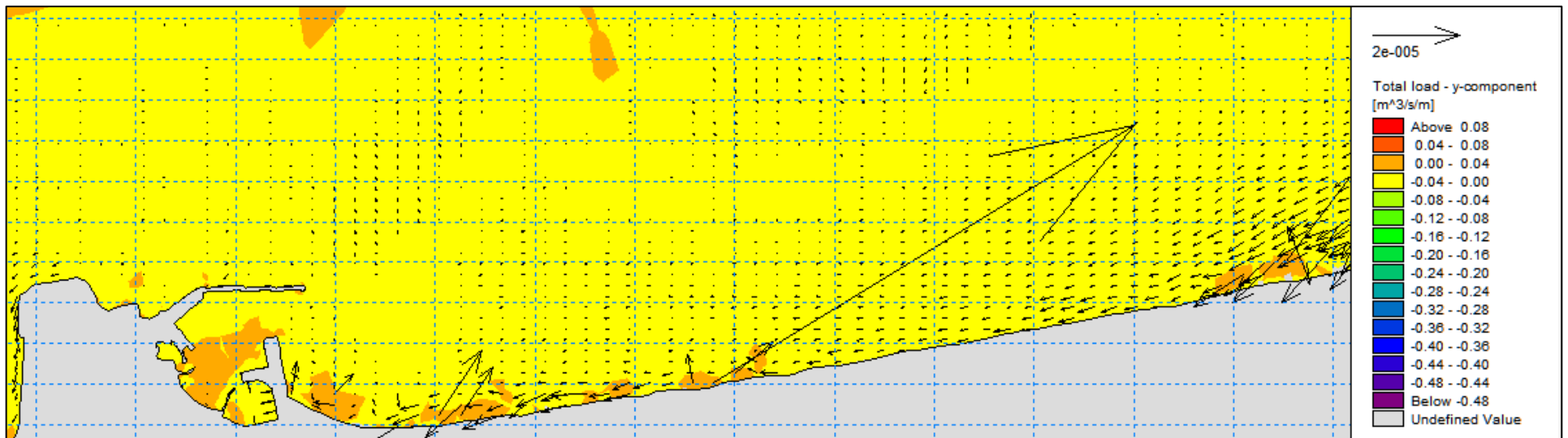
Σχήμα 5.33: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή





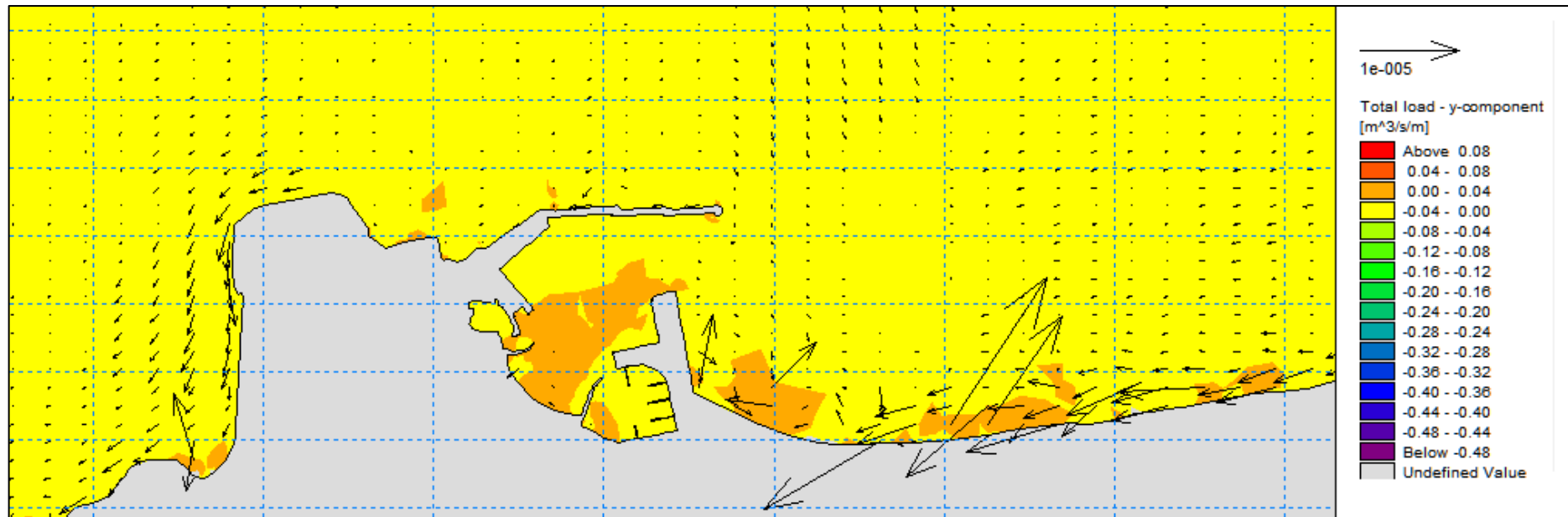
Σχήμα 5.34: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Cerc - Λεπτομέρεια Λιμένα



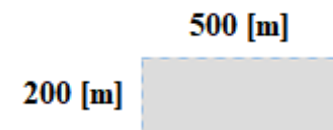


Σχήμα 5.35: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y -
Μέθοδος Cerc – Ανατολική Ακτή

500 [m]
200 [m]



Σχήμα 5.36: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y
 - Μέθοδος Cerc – Λεπτομέρεια Λιμένα

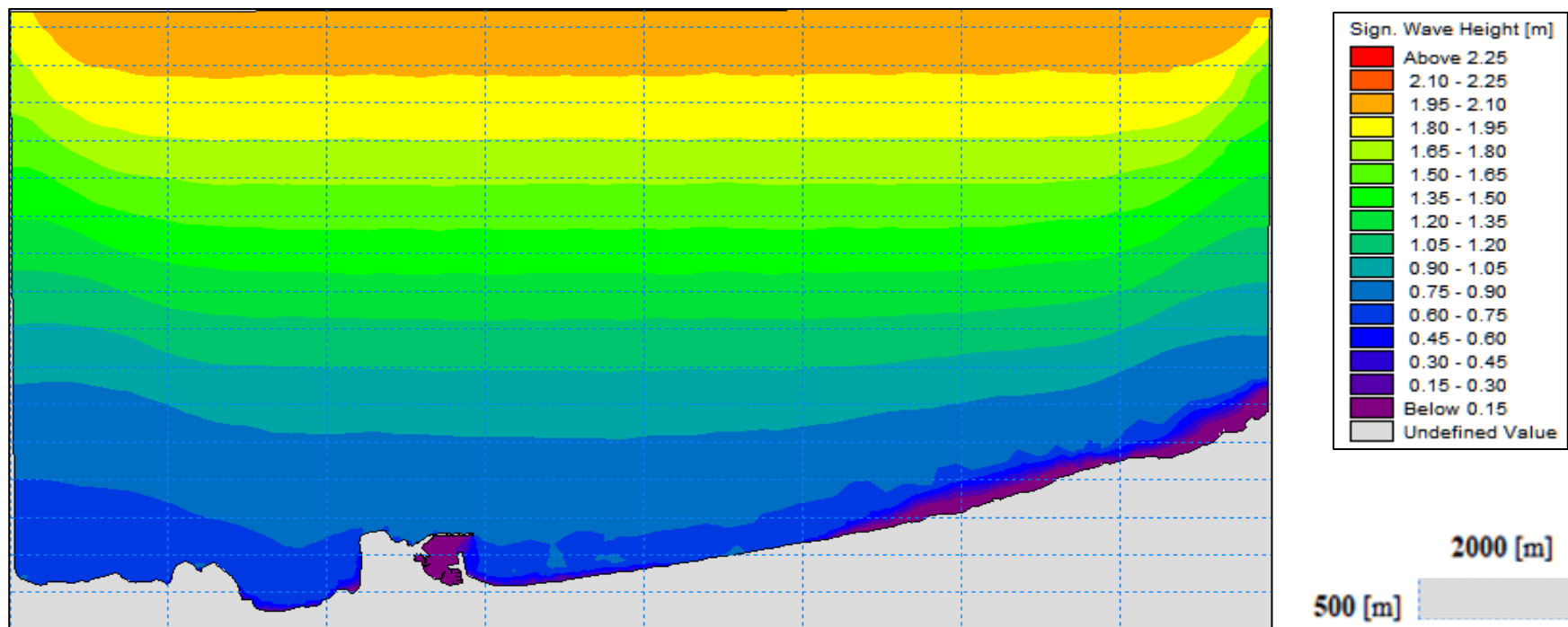


Παρατηρείται η μετακίνηση του ιζήματος προς τη ρίζα του υπήνεμου μόλου, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα των Σχημάτων 5.29 και 5.30 για την ανατολική ακτή. Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, εμφανίζονται ακραίες τιμές διανυσμάτων δίχως φυσική σημασία κοντά στην ακτή.

Όπως και στις προηγούμενες μεθόδους, εμφανίζεται διάβρωση της ακτής βόρεια του λιμένα και κατεύθυνση των ιζημάτων προς τα νοτιοδυτικά, όπου και εν τέλει εναποτίθενται. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι η δυτική ακτή είναι κυρίως βραχώδους υποβάθρου, οπότε η μεταφορά του ιζήματος είναι περιορισμένη.

5.6 Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής – Μέθοδος Pickup Rate

5.6.1 SW (Spectral Waves)

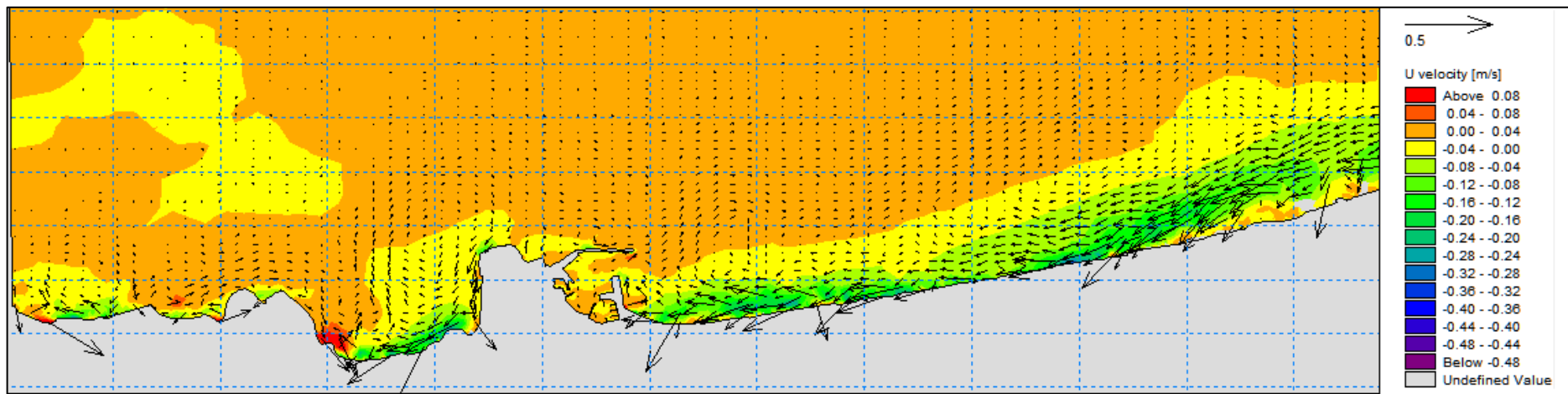


16/04/2019 03:33:20 Time Step 76 of 103.

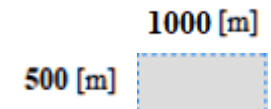
Σχήμα 5.37: Χωρική κατανομή του ύψους κόματος του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate

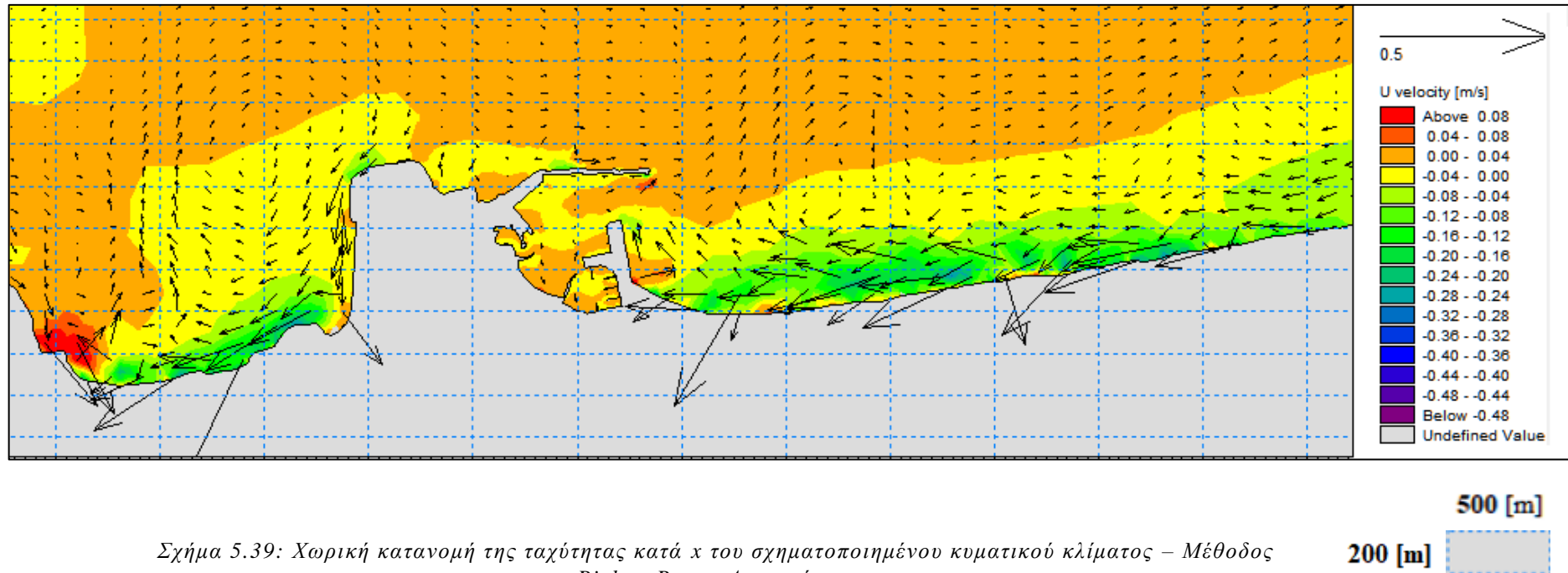
Ομοίως με τη μέθοδο ροής ενέργειας και τη μέθοδο Cerc, έχει ληφθεί στιγμιότυπο από το πέρας της προσομοίωσης. Ο αντιπρόσωπος ανήκει στην τελευταία κλάση, έχοντας βόρεια – βορειοδυτική διεύθυνση. Παρατηρείται εκ νέου η διαφορά και αυτής της μεθόδου με τη μέθοδο Fixed Bins, όπου το πέρας της προσομοίωσης αντιστοιχούσε σε κλάση με κύματα ανατολικής διεύθυνσης.

5.6.2 HD (Hydrodynamic)

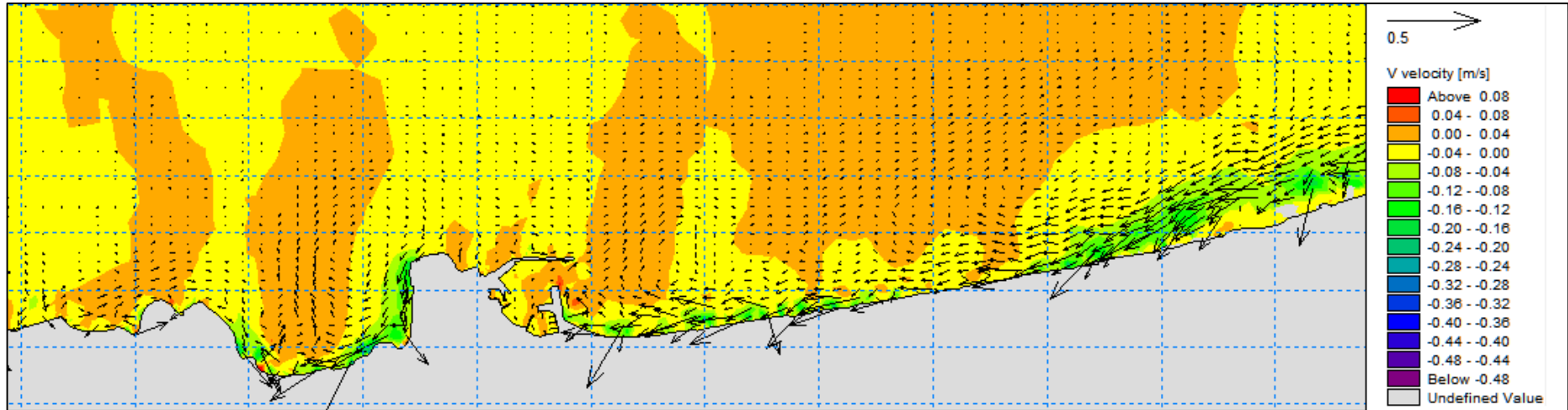


Σχήμα 5.38: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματισμένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate



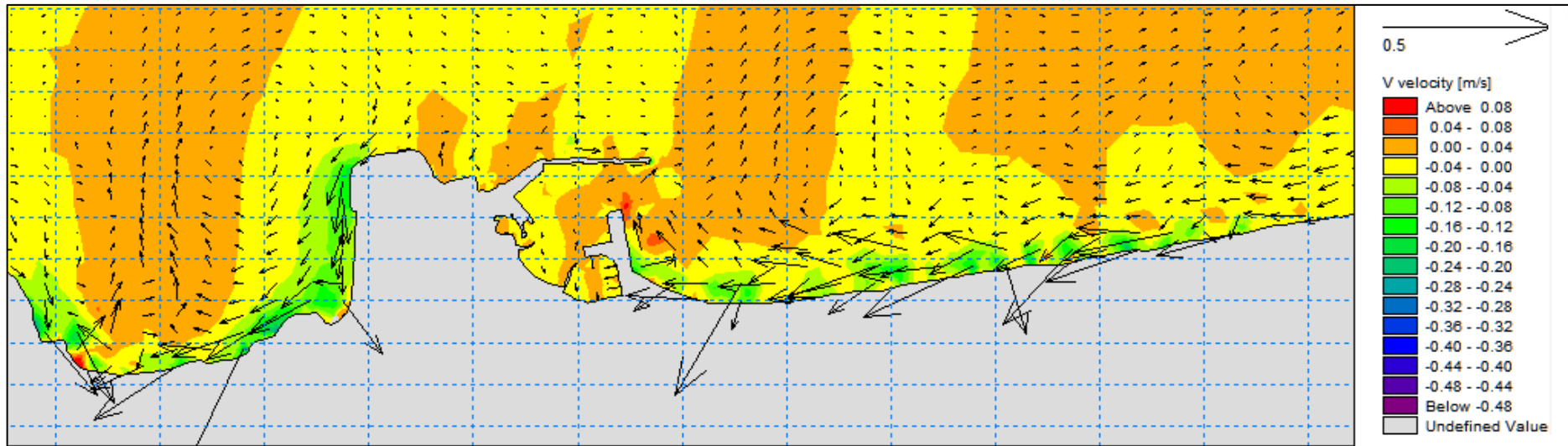


Σχήμα 5.39: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά x του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate - Λεπτομέρεια



Σχήμα 5.40: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά γ του σχηματοποιημένου κοματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate

1000 [m]
500 [m]



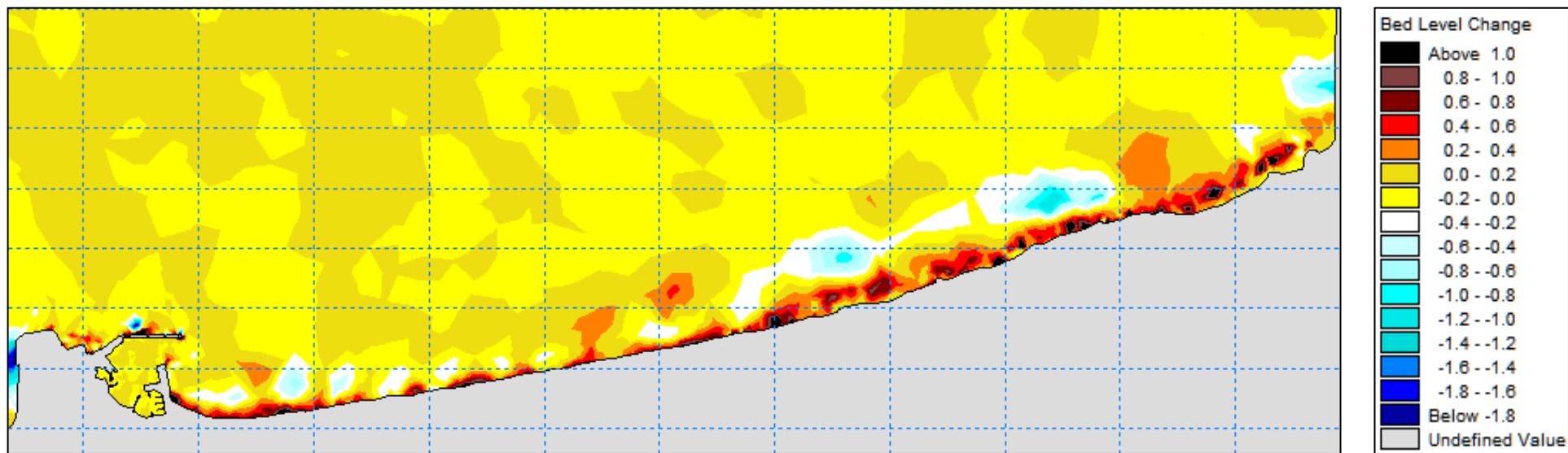
Σχήμα 5.41: Χωρική κατανομή της ταχύτητας κατά y του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος – Μέθοδος Pickup Rate – Λεπτομέρεια

500 [m]
200 [m]

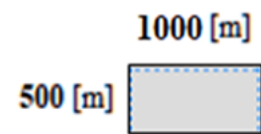
Παρατηρείται παρόμοια εικόνα με αυτή της μεθόδου ροής ενέργειας. Εκ νέου διακρίνονται διανύσματα στην ακτή, τα οποία έχουν μεγάλο μέτρο συγκριτικά με τα υπόλοιπα και διαφορετική διεύθυνση. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι τα διανύσματα αυτά δεν έχουν φυσική σημασία, ενώ οφείλονται στο γεγονός ότι σε εκείνα τα σημεία υπάρχει απότομη μεταβολή του βάθους (λόγω πλευρικών ορίων – lateral boundaries), το οποίο οδηγεί, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη συνθήκη Courant–Friedrichs–Lewy για δισδιάστατο πεδίο, σε μεγάλες ταχύτητες τοπικά, το οποίο απεικονίζεται μέσω των προαναφερθέντων διανυσμάτων.

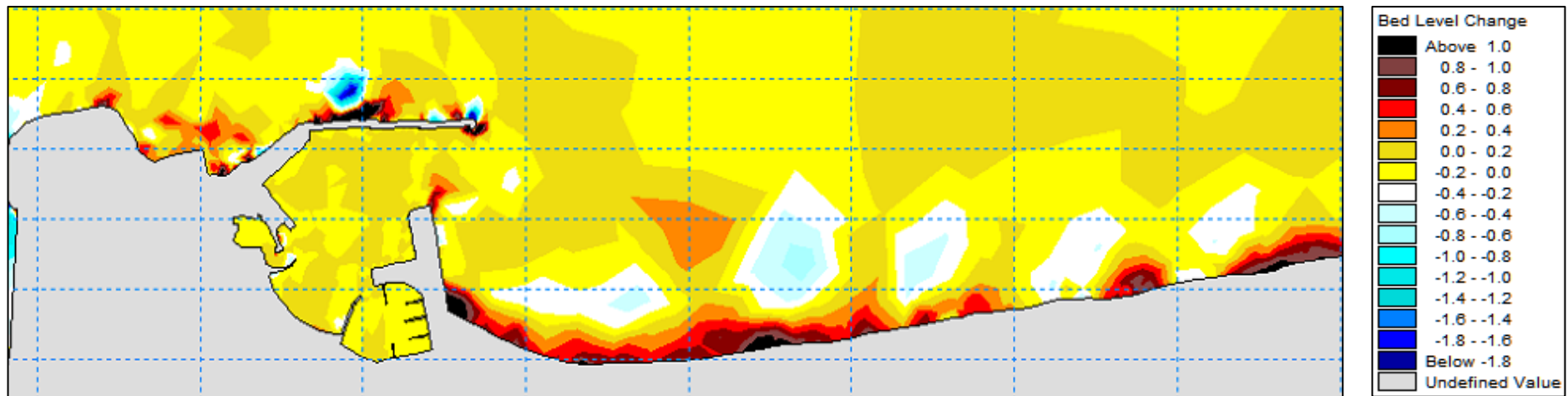
Παρατηρούνται αυξημένες ταχύτητες ρεύματος τόσο κατά την οριζόντια διεύθυνση όσο και την κατακόρυφη σε ορισμένα σημεία εκατέρωθεν του λιμένα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι ταχύτητες φθάνουν μία μέγιστη τιμή 0.70 m/s, ενώ η μέση τιμή κυμαίνεται στα 0.10 m/s.

5.6.3 ST (Sediment Transport)

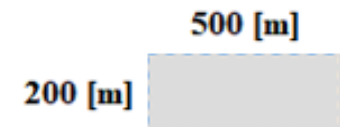


Σχήμα 5.42: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης – Μέθοδος Pickup Rate – Ανατολική Ακτή

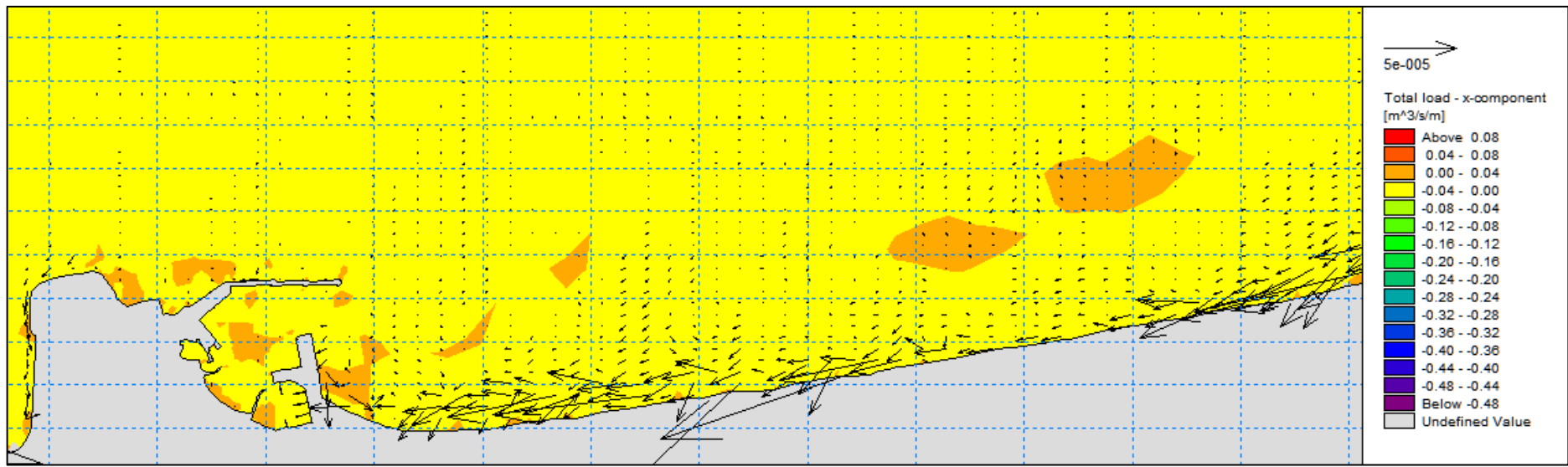




Σχήμα 5.43: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης – Μέθοδος Pickup Rate – Λεπτομέρεια Λιμένα

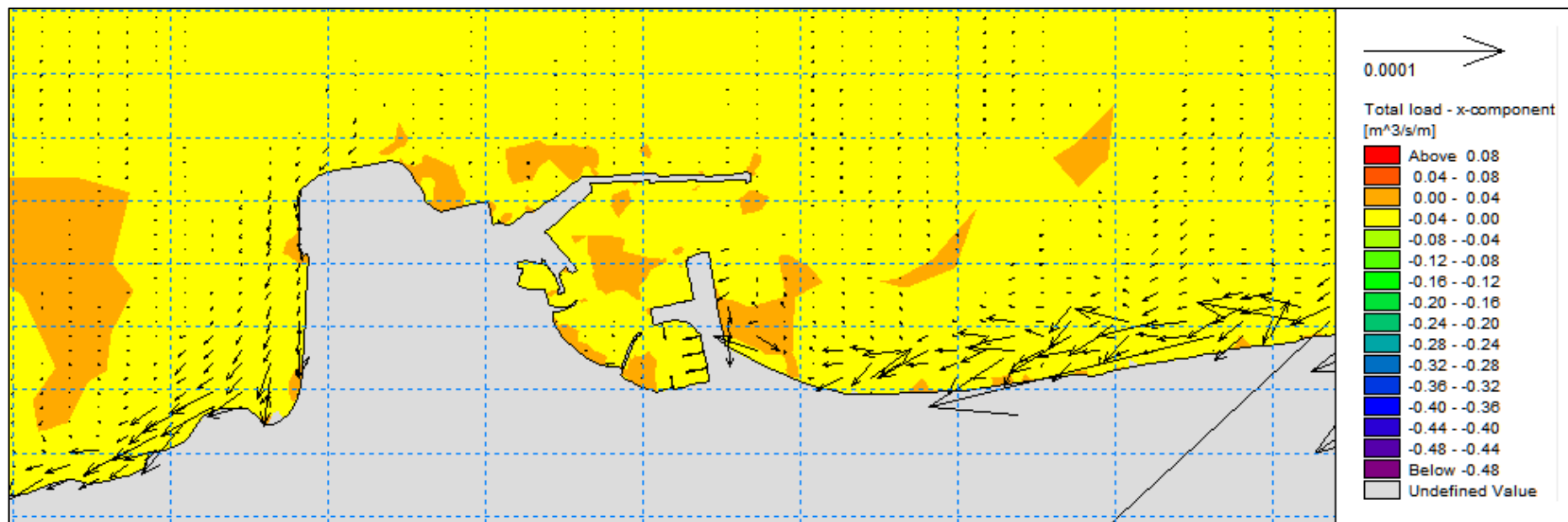


Παρατηρείται όμοια εικόνα σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους, ωστόσο οι αποθέσεις είναι λιγότερες συγκριτικά με τη μέθοδο Fixed Bins, καθώς τα κύματα ανατολικής και βορειοανατολικής διεύθυνσης έχουν λιγότερους αριθμούς εμφάνισης στη χρονοσειρά λόγω μικρών τελευταίων κλάσεων (βλ. Πίνακα 4.5). Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στην Παράγραφο 5.6.4, όπου γίνεται η σύγκριση των 4 μεθόδων με βάση τη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης.



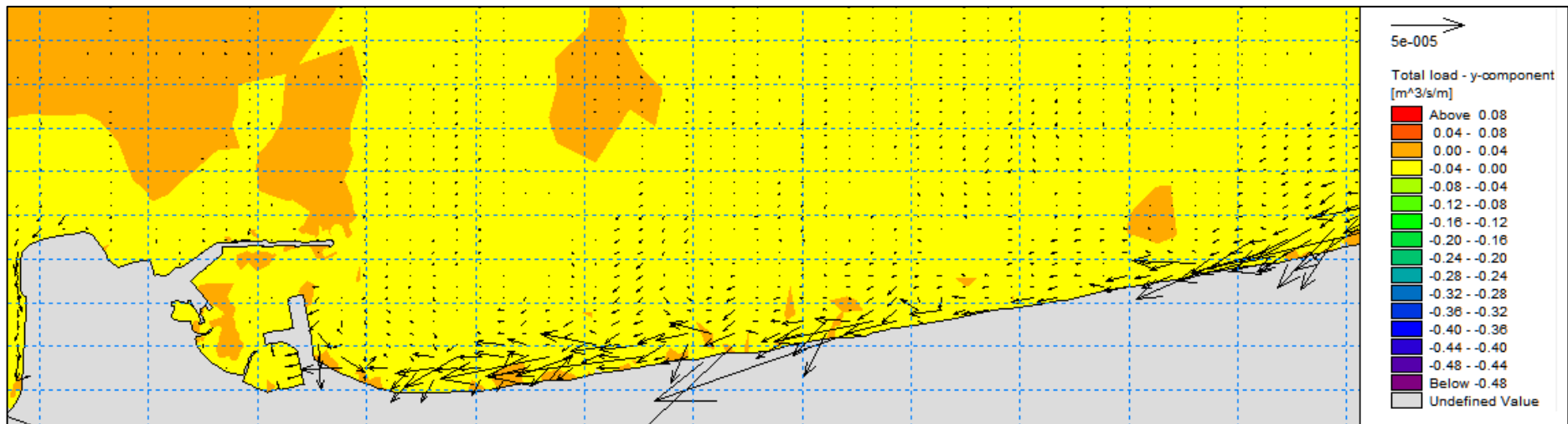
Σχήμα 5.44: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Pickup Rate – Ανατολική Ακτή

500 [m]
200 [m]



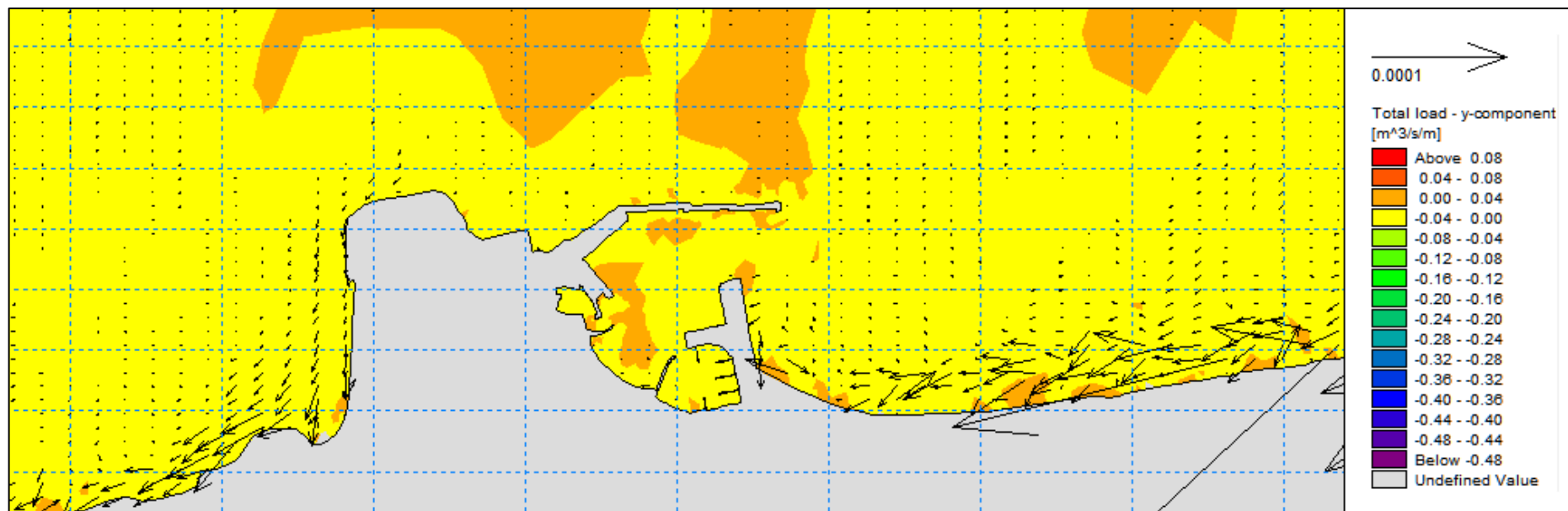
Σχήμα 5.45: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά x - Μέθοδος Pickup Rate - Λεπτομέρεια Λιμένα

500 [m]
200 [m]



Σχήμα 5.46: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y - Μέθοδος Pickup Rate – Ανατολική Ακτή

500 [m]
200 [m]



Σχήμα 5.47: Χωρική κατανομή της παροχής στερεομεταφοράς κατά y - Μέθοδος Pickup Rate –
Λεπτομέρεια Λιμένα

500 [m]
200 [m]

Όπως στις προηγούμενες μεθόδους, είναι εμφανής η κατεύθυνση μετακίνησης του ιζήματος. Ειδικότερα, ο συνδυασμός της γεωμορφολογίας της περιοχής μελέτης με τη δράση κυμάτων με βόρεια και βορειοανατολική διεύθυνση οδηγεί στη συγκέντρωση αποθέσεων στη ρίζα του υπήνεμου μώλου.

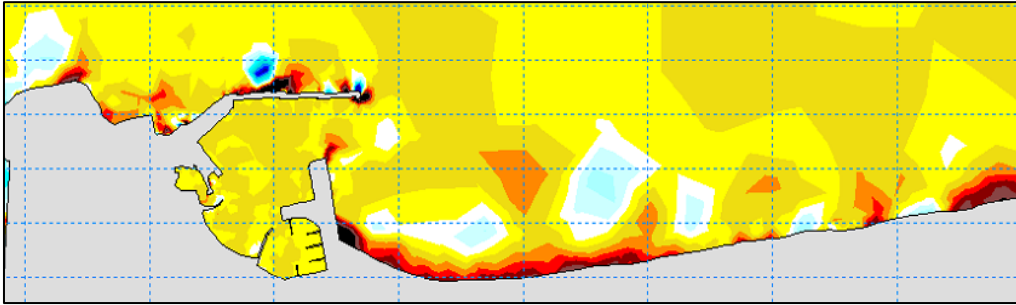
Αξιολόγηση μοντέλου

Επαναλήφθηκε η διαδικασία που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο μεταξύ της μεθόδου Energy Flux και της Pickup Rate. Χρησιμοποιήθηκε, δηλαδή, το στατιστικό μέγεθος ARMAE για να εκτιμηθεί η απόκλιση μεταξύ των δύο αυτών μεθόδων σχηματοποίησης, ανεξάρτητα από την απόκλισή τους από την πραγματικότητα, η οποία καθορίστηκε στο προηγούμενο στάδιο. Εν τέλει προέκυψε $ARMAE = 0,0038 < 0,20$, συνεπώς είναι εξαιρετική (“Excellent”) η απόδοση της μεθόδου στη σχηματοποίηση της πλήρους χρονοσειράς.

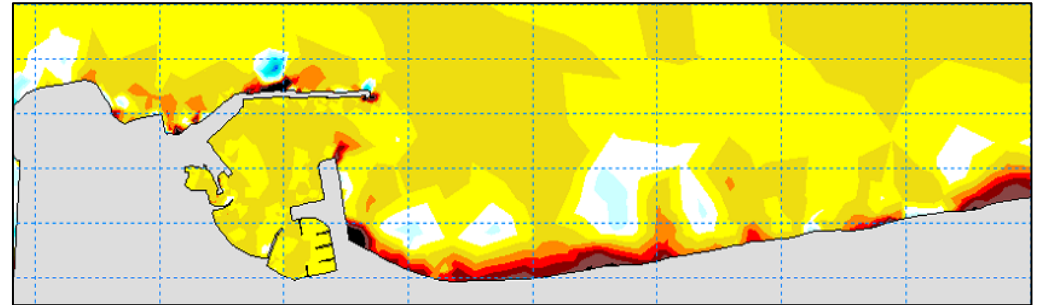
5.6.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα / Σύγκριση μεθόδων

Πίνακας 5.3: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Σύγκριση μεθόδων

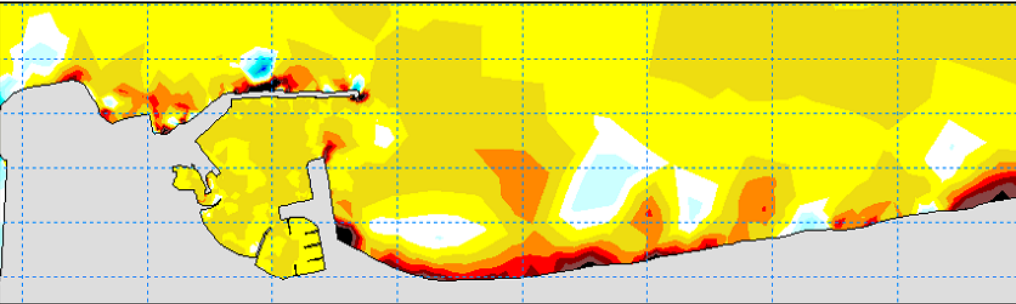
Energy Flux



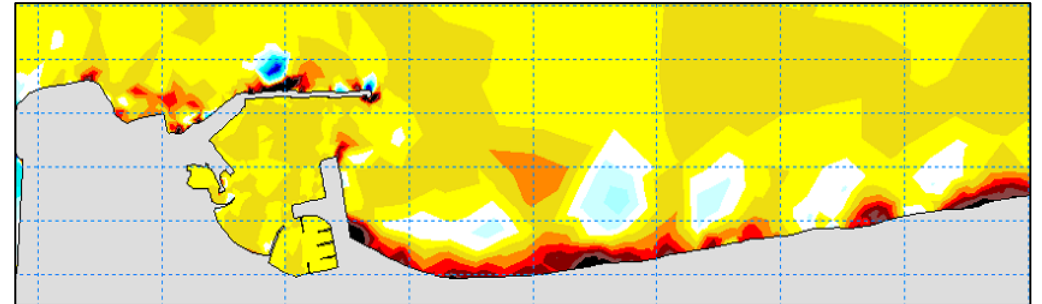
Fixed Bins



Cerc



Pickup Rate



Στον πίνακα 5.3 είναι εμφανής η συσσώρευση αποθέσεων στο ανατολικό τμήμα της ακτής (ανατολικά του υπήνεμου μώλου) της τάξεως των 0.60 – 1.00 m για ένα μήκος περίπου 5 km. Η συσσώρευση ιζήματος στην ακτή συνεχίζεται για άλλα 5 km προς τα ανατολικά με μεγέθη που κυμαίνονται από 0.25 έως 0.40 m.

Διαβρώσεις κατά μήκος της ακτής παρατηρούνται καθ' όλο το μήκος των 10 km με τις μεγαλύτερες (της τάξεως των 0.40 – 0.60 m) να εκδηλώνονται σε μια μέση απόσταση 200 m από την ακτή σε μια ζώνη 2 χιλιομέτρων από τον υπήνεμο μώλο. Πέραν τούτου, διαβρώσεις της τάξεως των 0.05 – 0.10 m εμφανίζονται καθ' όλο το μήκος των 10 χιλιομέτρων της ανατολικής ακτής σε ένα βάθος (250 – 2500 m εγκάρσια απόσταση από την ακτογραμμή), ενώ μικρότερες (0.00005 – 0.05 m) παρατηρούνται σε αποστάσεις 3 km και άνω από την ακτή.

Στον προσήνεμο μώλο παρατηρείται η συγκέντρωση ιζήματος σε επιφάνεια 3000 m² με μέγιστη συσσώρευση 2.50 m, ενώ αποθέσεις της τάξεως 0.20 – 1.00 m συγκεντρώνονται και στην είσοδο του λιμένα σε μια ακτίνα 20 m από το ακρομώλιο λόγω και του φαινομένου της διάθλασης των κυματισμών. Το υλικό δείχνει να προέρχεται από τα δυτικά, ενώ εκτεταμένη διάβρωση πυθμένα (0.20 – 1.50m) παρατηρείται σε μια απόσταση 100 m από τον προσήνεμο μώλο.

Σημειώνεται ότι η εικόνα της μεταβολής του πυθμένα είναι συνεπής με το υπάρχον ανεμολογικό και κυματικό κλίμα, καθώς και με τη γεωμορφολογία της ακτής. Κύματα με βόρεια και βορειοανατολική διεύθυνση ευθύνονται για τη μετακίνηση του ιζήματος από τα βαθιά προς τη ρίζα του υπήνεμου μώλου και την απόθεσή του εκεί. Σε ό,τι αφορά τον προσήνεμο μώλο είναι εμφανής η συνεισφορά των βορείων – βορειοδυτικών κυμάτων στη συσσώρευση υλικού κατά μήκος του έργου, ωστόσο σε σημαντικά μικρότερο βαθμό από την ανατολική ακτή, λόγω του βραχέδους υποβάθρου στην περιοχή δυτικά του λιμένα.

Παρατηρείται η ομοιότητα των τεσσάρων μεθόδων σχηματοποίησης σε ό,τι αφορά τη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης, με τη βασική διαφορά να παρατηρείται στη μέθοδο Fixed Bins, όπου η μετακίνηση του ιζήματος από τα βαθιά ακολουθεί ελαφρώς διαφορετική πορεία σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Συνεπώς, από άποψη αποτελεσμάτων είναι αποδεκτές οι μέθοδοι, οπότε η απόδοσή τους θα κριθεί στην εξοικονόμηση χρόνου που επιτυγχάνουν, η οποία παρουσιάζεται στην Παράγραφο (5.8).

Τέλος, είναι σημαντικό να ληφθεί υπ' όψιν η γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης. Αν και θα περίμενε κανείς την κατεύθυνση των ιζημάτων προς τα ανατολικά λόγω των κυρίαρχων κυμάτων βόρειας και βορειοδυτικής διεύθυνσης, η μορφή της ανατολικής ακτής και η θέση του λιμένα καθιστούν δυσχερή τη μετακίνηση προς αυτήν την κατεύθυνση.

5.7 Σύγκριση με υφιστάμενες μεθόδους μείωσης δεδομένων εισόδου

Η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος του ισοδύναμου κυματισμού για κάθε διεύθυνση πνοής κάνει χρήση της αντιπροσωπευτικής περιόδου T_e , όπου:

$$T_e = \frac{\sum T_i f_i}{\sum f_i} \quad (5.5)$$

και του ύψους του ισοδύναμου κυματισμού H_e το οποίο προκύπτει από τη μέση τετραγωνική τιμή των Borah και Balloffet (1985):

$$H_e^2 T_e = \frac{\sum H_i^2 T_i f_i}{\sum f_i} \quad (5.6)$$

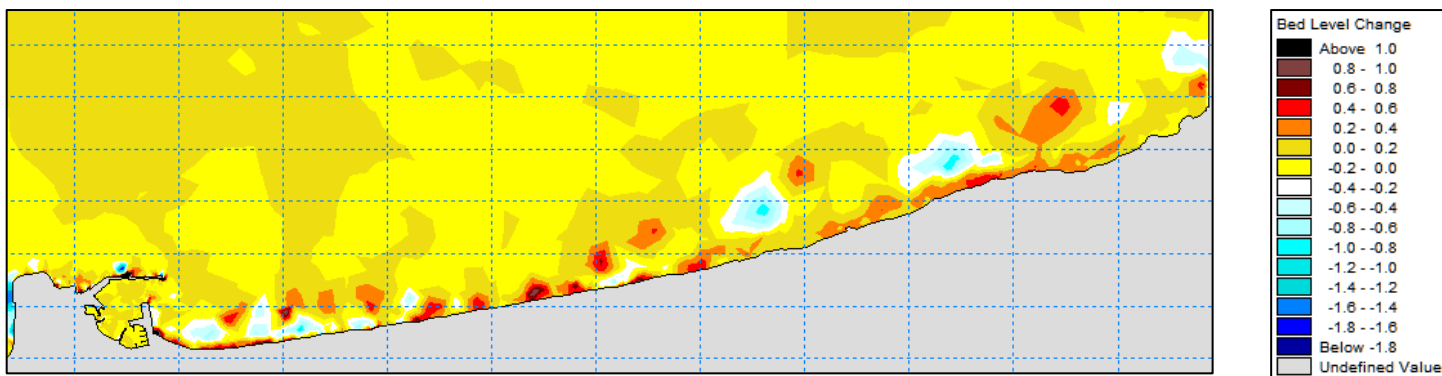
όπου H_i , T_i , f_i τα ύψη, οι περίοδοι και οι συχνότητες εμφάνισης των κυμάτων που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα έντασης του ανέμου από την σχετική διεύθυνση. Σε αυτή τη μέθοδο ο ισοδύναμος κυματισμός είναι ο κυματισμός που εμφανίζεται με συχνότητα $f = \sum f_i$ και έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με το σύνολο των κυματισμών των διαφόρων εντάσεων του σχετικού τομέα (διεύθυνσης πνοής ανέμου). Πρόκειται, λοιπόν, για μία μέθοδο που κατά τη διαδικασία μείωσης των δεδομένων εισόδου λαμβάνει υπ' όψιν μόνο το ύψος κύματος, την περίοδο και τη συχνότητα εμφάνισής του. Αντιθέτως, η Energy Flux Method συμπεριλαμβάνει τη ροή ενέργειας, η οποία αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό των κυμάτων, στο στάδιο της σχηματοποίησης, ενώ όπως προαναφέρθηκε, η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά εξαρτάται από αυτή.

Ειδικότερα, λαμβάνεται η συνολική συχνότητα των ανέμων που θεωρούνται κρίσιμοι για την περιοχή μελέτης ($\approx 68\%$ επί των συνολικών) και χωρίζεται ισάριθμα στην κάθε παρατήρηση. Έπειτα, λαμβάνονται 5 τομείς (Δ , $B\Delta$, B , BA , A) και για την κάθε ωριαία παρατήρηση υπολογίζεται η σχέση 5. Προκύπτει έτσι ένα χαρακτηριστικό ύψος κύματος και μία χαρακτηριστική περίοδος για τον κάθε τομέα, ενώ ως διεύθυνση λαμβάνεται η μέση τιμή του κάθε τομέα.

Αντιθέτως, η Energy Flux Method συμπεριλαμβάνει τη ροή ενέργειας, η οποία αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό των κυμάτων, στο στάδιο της σχηματοποίησης, ενώ όπως προαναφέρθηκε, η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά εξαρτάται από αυτή.

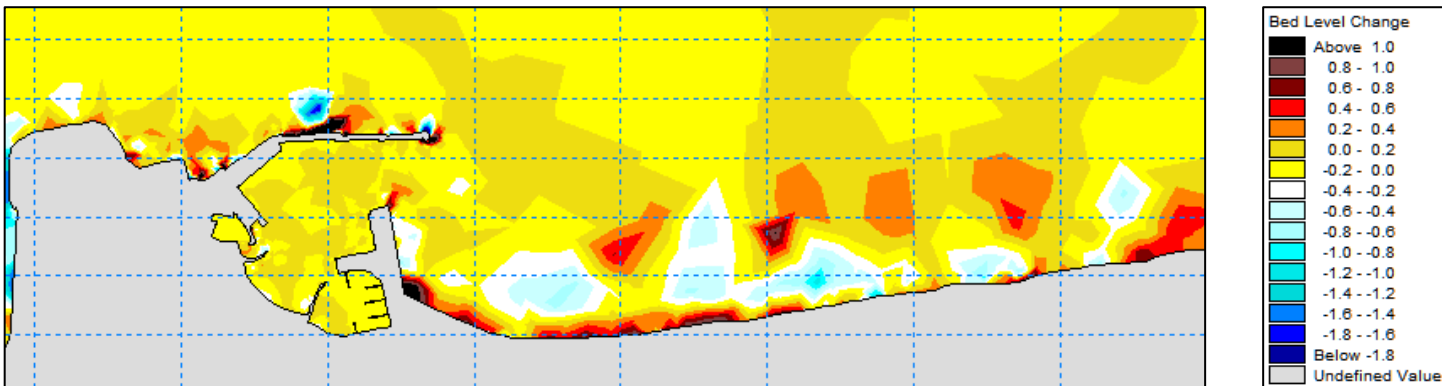
Επιπροσθέτως, οι μέθοδοι σχηματοποίησης που παρουσιάστηκαν στην παρούσα εργασία καταλήγουν σε 10 κλάσεις και ισάριθμους αντιπροσώπους. Αντιθέτως, το ισοδύναμο κυματικό κλίμα που προκύπτει με βάση την παραπάνω μεθοδολογία οδηγεί σε τόσες κλάσεις όσοι και οι τομείς των διευθύνσεων που επιλέγονται. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την περίπτωση του λιμένα Ρεθύμνου, θα προέκυπταν συνολικά 5 κλάσεις (Δυτικός, Βορειοδυτικός, Βόρειος, Βορειοανατολικός, Ανατολικός τομέας). 10 έναντι 5 κλάσεων συνεπάγεται λεπτομερέστερη χρονοσειρά δεδομένων εισόδου στο Mike κι άρα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Επίσης, η διεύθυνση παίζει πρωταρχικό ρόλο στη στερεομεταφορά, το ισοδύναμο κυματικό κλίμα, ωστόσο, δεν την λαμβάνει πολύ υπόψιν, διότι οι τομείς διευθύνσεων χωρίζονται σε καθορισμένα σημεία (όπως και η μέθοδος Fixed Bins). Αντιθέτως, στη σχηματοποίηση (πέρα από το πλεονέκτημα των 10 έναντι 6 μαξ αντιπροσώπων) η διεύθυνση λαμβάνεται υπόψιν, καθώς οι περισσότεροι αντιπρόσωποι συγκεντρώνονται στη βόρεια διεύθυνση, όπου και έχουμε τόσο την πλειοψηφία όσο και τα μεγαλύτερα ύψη κυμάτων, τα οποία θα οδηγήσουν (σε συνδυασμό με τη κλίση της ακτής) στη μετακίνηση των μεγαλύτερων ποσοτήτων ιζήματος.

Εν συνεχεία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου στερεομεταφοράς ST για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.48: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Ισοδύναμο κυματικό κλίμα – Ανατολική Ακτή

500 [m]
500 [m]



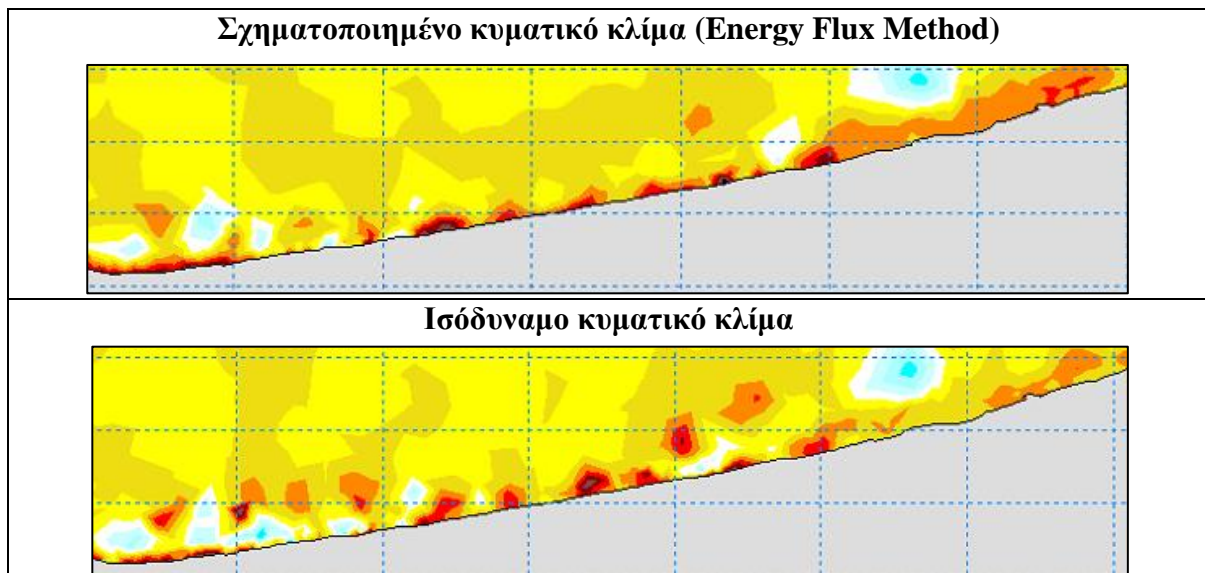
Σχήμα 5.49: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Ισοδύναμο κυματικό κλίμα – Λεπτομέρεια Λιμένα

500 [m]
200 [m]

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 5.46 και 5.47 με τον Πίνακα 5.3 παρατηρείται ομοιότητα σε ό,τι αφορά την τελική μεταβολή της στάθμης του πυθμένα.

Ωστόσο, στο συγκριτικό πίνακα 5.4 απεικονίζεται η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διαφορετικών μεθοδολογιών στην ακρίβεια του αποτελέσματος. Ειδικότερα, η μετακίνηση του ιζήματος για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα δεν ακολουθεί ομαλή πορεία συγκρινόμενη με αυτή του σχηματοποιημένου, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται απότομες μεταβολές στη συσσώρευση του ιζήματος κατά μήκος της ακτής. Αντιθέτως, η μεθοδολογία του σχηματοποιημένου κυματικού κλίματος οδηγεί σε ομαλές μεταβολές της στάθμης του πυθμένα, αναπαριστώντας έτσι ακριβέστερα τη σταδιακή μετακίνηση του ιζήματος σε επίπεδο ενός έτους.

Πίνακας 5.4: Μεταβολή στάθμης πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης - Ανατολική ακτή



Εξαίρεση αποτελεί η μέθοδος Fixed Bins, η οποία έδειξε παρομοίου επιπέδου ακρίβεια με τη μέθοδο ισοδύναμου κυματικού κλίματος. Αναμενόμενο αποτέλεσμα, καθώς ο υπολογισμός των αντιπροσώπων στην εν λόγω μέθοδο γίνεται για σταθερό πλάτος κλάσεων όσον αφορά τη διεύθυνση, το οποίο αποτελεί κοινό στοιχείο της μεθόδου με αυτή του ισοδύναμου κυματικού κλίματος.

5.8 Εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου (CPU Time)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο συνολικός χρόνος που μεσολάβησε από την έναρξη μέχρι το πέρας της κάθε προσομοίωσης για την εκάστοτε μέθοδο.

Πίνακας 5.5: Συνολικοί χρόνοι εκτέλεσης μοντέλου

Μέθοδος	Σύνολο χρονικών βημάτων	Χρονικό βήμα (s)	Χρόνος CPU (s)	Χρόνος CPU (hr)	Συνολικός χρόνος (s)	Συνολικός χρόνος (hr)
Energy Flux	8640	10	24101.35	6.69	24408.12	6.78
Fixed Bins	8640	10	23987.28	6.66	24382.39	6.77
Cerc	8640	10	22918.78	6.37	23217.76	6.45
Pickup Rate	5197	10	14223.52	3.95	14490.97	4.03
Ισοδύναμου κυματικού κλίματος	8640	10	23457.08	6.52	23742.21	6.60

Σημειώνεται ότι οι χρόνοι εκτέλεσης έχουν διακυμάνσεις ανάλογα με τις δυνατότητες του κάθε υπολογιστή, τις υπόλοιπες εφαρμογές που εκτελεί ταυτόχρονα, κλπ. Οι χρόνοι που παρουσιάζονται στον πίνακα είναι ενδεικτικοί.

Στον πίνακα (5.5) φαίνεται η σαφής μείωση του συνολικού υπολογιστικού χρόνου. Η μέθοδος Pickup Rate είναι η πιο σύντομη από όλες τις υπόλοιπες, απαιτώντας περίπου 40% λιγότερο χρόνο για την εκτέλεση του μοντέλου, το οποίο αποδίδεται στην ήδη μειωμένη χρονοσειρά που έχει από την αρχή (24459 έναντι 40669 παρατηρήσεων). Μάλιστα, παρατηρείται ότι 40% λιγότερα δεδομένα δίνουν 40% λιγότερο χρόνο εκτέλεσης.

Σε ό,τι αφορά το συνολικό υπολογιστικό χρόνο, η μέθοδος ροής ενέργειας απαιτεί περίπου ίδιο χρόνο με τη μέθοδο ισοδύναμου κυματικού κλίματος. Ωστόσο, όπως παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 4.4.4, η μέθοδος Pickup Rate, μειώνοντας τα δεδομένα σε δύο φάσεις (απομάκρυνση των στοιχείων που δίνουν μηδενική στερεομεταφορά και έπειτα σχηματοποίηση) απαιτεί περίπου 40% λιγότερο χρόνο για την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων.

Παρατηρείται, λοιπόν, μια υπεροχή των μεθόδων σχηματοποίησης και ειδικότερα της μεθόδου Pickup Rate έναντι της επικρατούσας μεθόδου ισοδύναμου κυματικού κλίματος, λόγω μεγαλύτερης ακρίβειας και σημαντικά λιγότερου χρόνου εκτέλεσης.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων

Ως Παράκτια Ζώνη ορίζεται η σύνθετη παραθαλάσσια περιοχή μεταξύ της ακτογραμμής και της ισοβαθούς όπου γίνεται αισθητή η επίδραση του πυθμένα. Η μεταβλητότητά της ως αποτέλεσμα φυσικών διεργασιών, με σημαντικότερη εξ αυτών τη στερεομεταφορά ιζήματος, αποτελεί βασικότατη παράμετρο σχεδιασμού παράκτιων έργων, ο οποίος επιτυγχάνεται μέσω των μοντέλων παράκτιας μορφολογίας. Ωστόσο, το πλήθος υδροδυναμικών και γεωμορφολογικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στα εν λόγω μοντέλα και τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, οδηγεί σε μεγάλη πολυπλοκότητα και υπολογιστική δυσχέρεια. Συνεπακόλουθα, δημιουργείται η απαίτηση για μείωση του υπολογιστικού φόρτου εκτέλεσης του μοντέλου, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί με τη σχηματοποίηση των δεδομένων εισόδου του μοντέλου (μείωση δεδομένων εισόδου). Ως σχηματοποίηση ορίζεται η διαδικασία μείωσης της πλήρους χρονοσειράς του κυματικού κλίματος μιας δεδομένης παράκτιας περιοχής σε ένα σύνολο «αντιπροσωπευτικών» κυματισμών, που ιδανικά επιφέρουν παρόμοια μορφολογική εξέλιξη πυθμένα με την πλήρη χρονοσειρά, εξασφαλίζοντας έτσι τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου εκτέλεσης του μοντέλου και της επεξεργασίας των δεδομένων εισόδου.

Αξιολογήθηκαν 4 μέθοδοι σχηματοποίησης (Energy Flux, Fixed Bins, Cerc, Pickup Rate), εκ των οποίων οι 3 πρώτες προϋπήρχαν ενώ η τελευταία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Ως βασική παράμετρος σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των μεθόδων επιλέχθηκε η μεταβολή της στάθμης του πυθμένα μετά από το πέρας ενός έτους (1 ημέρας στο μοντέλο, η οποία ανήχθη σε 365 μέρες μέσω του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac). Για την εξακρίβωση της αξιοπιστίας των μεθόδων, εφαρμόστηκε η μεθοδολογία για χρονικό ορίζοντα 2 ημερών για τη μέθοδο Energy Flux. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκε η πλήρης χρονοσειρά ως δεδομένο εισόδου για το κυματικό καθεστώς και έπειτα η σχηματοποιημένη χρονοσειρά και έγινε σύγκριση αποτελεσμάτων. Οι αποκλίσεις ήταν αμελητέες, ενώ η αξιολόγηση των μεθόδων επαληθεύτηκε στη συνέχεια μέσω στατιστικών μεγεθών. Για όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο MIKE 21 DHI και ειδικότερα το πακέτο MIKE 21/3 Coupled Model FM.

Οι αποκλίσεις των μοντέλων σε σχέση με την πραγματική κατάσταση ως προς τη μεταβολή του πυθμένα στο πέρας των προσομοιώσεων προέκυψαν μικρές και εκρίθησαν αποδεκτές δεδομένου ότι επιτυγχάνεται ουσιαστική μείωση χρόνου προσομοίωσης σε σχέση με τη πλήρη χρονοσειρά. Ειδικότερα, αν εκτελείτο το μοντέλο με την πλήρη χρονοσειρά των 40667 κυματικών στοιχείων θα απαιτούνταν περίπου 5 έτη για την ολοκλήρωσή του, ενώ μέσω της σχηματοποίησης των δεδομένων και του συντελεστή Morfac οι προσομοιώσεις ολοκληρώθηκαν σε διάστημα περίπου 7 ωρών. Συγκρινόμενες οι μέθοδοι Energy Flux, Fixed Bins και Cerc με την επικρατούσα μέθοδο ισοδύναμου κυματικού κλίματος, προέκυψαν πρακτικά μηδενικές διαφορές στην εξοικονόμηση του υπολογιστικού χρόνου, ωστόσο οι μέθοδοι Energy Flux, Cerc και Pickup Rate έδωσαν ακριβέστερα αποτελέσματα για τη

μετακίνηση του ιζήματος κατά μήκος της ανατολικής ακτής. Σημαντικότερο σημείο διαφοροποίησης της νέας μεθόδου Pickup Rate αποτέλεσε η εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου, καθώς έδωσε εξίσου αξιόπιστα αποτελέσματα με τις υπόλοιπες μεθόδους σχηματοποίησης και της μεθόδου ισοδύναμου κυματικού κλίματος σε 40% λιγότερο χρόνο.

Εν τέλει, προτείνονται οι μέθοδοι ροής ενέργειας (Energy Flux Method) και Pickup Rate. Η μέθοδος ροής ενέργειας υπερτερεί σε χρόνο προετοιμασίας της χρονοσειράς, καθώς απαιτεί μία μόνο σχέση υπολογισμού για τη σχηματοποίηση των δεδομένων, ενώ λαμβάνει υπ' όψιν ότι τις μακροχρόνιες μορφοδυναμικές μεταβολές τον κυριότερο ρόλο παίζει η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, η οποία συνδέεται πρωταρχικά με τη ροή ενέργειας των κυματισμών. Αντιθέτως, η μέθοδος Pickup Rate αποτελείται από περισσότερες σχέσεις υπολογισμού, δεσμεύοντας έτσι περισσότερο χρόνο για τη σχηματοποίηση των δεδομένων. Ωστόσο, η μέθοδος Pickup Rate υπερτερεί όλων των άλλων σε υπολογιστικό χρόνο, όπως προαναφέρθηκε.

Στην περίπτωση του λιμένα Ρεθύμνου, είναι εμφανής η συγκέντρωση αποθέσεων σε όλο το μήκος της ανατολικής ακτής του λιμένα ως αποτέλεσμα των κυμάτων με βόρεια και βορειοανατολική διεύθυνση. Παρατηρείται επίσης συσσώρευση ιζήματος στον προσήνεμο μώλο, ωστόσο σε σημαντικά μικρότερο βαθμό από την ανατολική ακτή, λόγω του βραχέδους υποβάθρου στην περιοχή δυτικά του λιμένα.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η συνεισφορά του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δεν είναι σαφής. Αν και εκτελέστηκαν προσομοιώσεις με διαφορετικές τιμές του συντελεστή, η διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων δεν έδειξε να ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο. Εν τέλει, όλες οι προσομοιώσεις εκτελέστηκαν με τιμή του συντελεστή Morfac ίση με 365 για την αναγωγή των ημερήσιας κλίμακας αποτελεσμάτων σε ετήσια βάση. Συνεπώς, προτείνεται περαιτέρω έρευνα για τη συσχέτιση του συντελεστή Morfac με τη στερεομεταφορά.

Επίσης, συνιστάται περαιτέρω έρευνα για την ευαισθησία των παραμέτρων της μεθόδου Pickup Rate, δεδομένου ότι διαφορετικές παραδοχές κατά τη διαδικασία της σχηματοποίησης ενδεχομένως να οδηγούσαν σε διαφορετικά αποτελέσματα.

Στην παρούσα εργασία επαληθεύτηκαν οι μέθοδοι σχηματοποίησης για διάστημα 2 ημερών. Προτείνεται να γίνει επαλήθευση των μεθόδων σχηματοποίησης για διάστημα μηνών, ώστε η αναγωγή σε ετήσια βάση να γίνεται με μεγαλύτερη αξιοπιστία.

Τέλος, συνιστάται η διερεύνηση της συνεισφοράς των ακραίων κυματικών φαινομένων, που δε λήφθηκαν υπ' όψιν στην παρούσα εργασία, και πώς θα μπορούσαν να εισαχθούν στις προτεινόμενες μεθοδολογίες.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Βικιπαίδεια, Ρέθυμνο
- Ιστοσελίδα Δήμου Ρεθύμνης, Γενικά Ιστορικά Στοιχεία
- Ιστοσελίδα Δήμου Ρεθύμνης, Λιμενικό Ταμείο Ρεθύμνου
- Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης - Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα, Παράκτια Στερεομεταφορά Και Μορφολογία Των Ακτών

ΔΙΕΘΝΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Benedet L. , Dobrochinski J.P.F., Walstra D.J.R., Kleine A.H.F.,Ranasinghe R. (2016) *'A morphological modeling study to compare different methods of wave climate schematization and evaluate strategies to reduce erosion losses from a beach nourishment project'*
- Lesser G.R. (2009) *'An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling'*, Dissertation
- Sutherland J., Walstrab D.J.R., Cheshera T.J., van Rijnb L.C., Southgate H.N. (2003) *'Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth'*
- Guide to Modeling Coastal Morphology, downloaded from www.worldscientific.com by DEAKIN UNIVERSITY on 01/01/16. For personal use only
- Knaapen Michiel. A.F., Joustra R. (2012) *'Morphological acceleration factor: usability, accuracy and run time reductions'*
- Soulsby R. L. (2016) *'Simplified Calculation of wave orbital velocities'*
- Soulsby R. L. (1997) *'Dynamics of Marine Sands, a manual for practical applications'*
- DHI, 2016, MIKE21 SW FM – Spectral Wave Module – Scientific Documentation, Denmark
- DHI, 2016, MIKE21 SW FM – Spectral Wave Module – User Guide, Denmark
- MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Sand Transport Module, Scientific Documentation

- The Comet Program, 2015
- Kragiopoulou E.V., Skarlatou E.S. , Afentoulis V.C., Tsoukala V.K., 2016, ‘*Assessing coastal zone response under extreme storm events for flood risk management-the case study of Rethymno, Greece*’
- Copernicus Marine Mediterranean Sea Waves Analysis And Forecast, Overview

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σκαρλάτου Ε., 2016, Διπλωματική εργασία: ‘*Διερεύνηση ακτομηχανικών διεργασιών λαμβάνοντας υπόψη ακραίες κυματικές συνθήκες -Εφαρμογή περιοχή Ρεθύμνου*’
- Κρητικός Σ. Κ., 2015, Διπλωματική εργασία: ‘*Αντιμετώπιση της διάβρωσης ακτογραμμής κοντά σε μαρίνα*’
- Ανζουλάτου Α., 2015, Διπλωματική εργασία: ‘*Διάβρωση ακτών και χρήσεις γης της παράκτιας ζώνης της Αχαΐας*’
- Παπαδημητρίου Α., 2019, Μεταπτυχιακή εργασία: ‘*Εκτίμηση συνθηκών ναυσιπλοΐας σε λιμένες με αριθμητικά μοντέλα – Η περίπτωση του Λιμένα Πατρών*’
- Χριστοδούλου Χ. Ι., 2015, Διεπιστημονικό – Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: ‘*Κυματική Αναρρίχηση Στην Παράκτια Περιοχή Του Ρεθύμνου υπό Ακραίες Κυματικές Συνθήκες*’
- Ρομπογιαννάκης Δ, Ψαλτάκης Μ., Αλεξανδράκης Γ., 2016, ‘*Ακτομηχανική Μελέτη Προτεινόμενων Λιμενικών Έργων Βόρεια, Βορειοδυτικά Του Προσήμεμου Μόλου Λιμένος Ρεθύμνου*’
- Δουκάκης Ε., 2017, ‘*Εκτίμηση Των Επιπτώσεων Της Ανόδου Της Θαλάσσιας Στάθμης Και Των Κυματικών Καταιγίδων Στην Ελληνική Παράκτια Ζώνη*’
- Καραμπάς Θ., 2015, ‘*Αλληλεπίδραση Ακτών / Παράκτιων Έργων - Έργα Και Μέθοδοι Προστασίας Ακτών*’
- Μέμος Κ., 2008, ‘*Εισαγωγή στα λιμενικά έργα*’

