



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Μαθηματική προσομοίωση της εξέλιξης παράκτιας μορφολογίας με  
μεθόδους σχηματοποίησης κυματικού κλίματος - Σύγκριση με μετρήσεις  
πεδίου στη Σκάλα Ερεσού της Λέσβου**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Χρυσή Βαρβάρα**

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2023

# **Μαθηματική προσομοίωση της εξέλιξης παράκτιας μορφολογίας με μεθόδους σχηματοποίησης κυματικού κλίματος - Σύγκριση με μετρήσεις πεδίου στη Σκάλα Ερεσού της Λέσβου**

Λέξεις – κλειδιά:

παράκτια ζώνη, κυματικό κλίμα, θαλάσσια ρεύματα, στερεομεταφορά, μέθοδοι σχηματοποίησης, αντιπρόσωποι κλάσεων, μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών, μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών, μοντέλα παράκτιας μορφολογίας, MIKE 21 DHI, αξιολόγηση απόδοσης μοντέλου, Brier Skill Score

## **Mathematical simulation of coastal morphology evolution with use of wave climate schematization methods - Comparison with field measurements at Skala Eresos, Lesvos**

Key words:

coastal zone, wave climate, currents, sediment transport, schematization methods, class representatives, Energy Flux Method, Equivalent Waves Method, coastal morphology models, MIKE 21 DHI, evaluation of model performance, Brier Skill Score

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Χρυσή Βαρβάρα**

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Μάρτιος 2023

Copyright © Χρυσή Βαρβάρα, 2023

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 © Chrysi Varvara, 2023

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 organization (L. 5343/1932, art. 202).

Φωτογραφία εξωφύλλου: Σκάλα Ερεσού – πηγή: wikipedia.org

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

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

Καταρχάς, ευχαριστώ την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου, καθηγήτρια ΕΜΠ κα Βασιλική Τσουκαλά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση της εργασίας και την καθοδήγησή καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησής της.

Εξίσου, ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ κ. Ανδρέα Παπαδημητρίου, για την πολύτιμη βοήθεια του, την συνεχή διαθεσιμότητα και την αμεσότητα στην επικοινωνία. Ήταν πάντα παρόν και πρόθυμος να συζητήσει οποιοδήποτε προβληματισμό μου, και συνέβαλε καθοριστικά στην επίλυση των ζητημάτων που προέκυψαν στην πορεία.

Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου, που στηρίζουν τις προσπάθειες και τα όνειρά μου.

Με εκτίμηση,

Χρυσή Βαρβάρα

Αθηνά, 2023



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|   |     |
|---|-----|
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ.....  | ix  |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....  | xii |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....   | xiv |
| ABSTRACT.....   | xv  |
| 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....   | 1   |
| 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....  | 1   |
| 1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....   | 2   |
| 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....   | 3   |
| 2.1 Γενεσιουργά αίτια μορφολογικών αλλαγών.....   | 4   |
| 2.1.1 Ανεμογενή κύματα.....   | 4   |
| 2.1.2 Θαλάσσια ρεύματα.....   | 5   |
| 2.1.3 Στερεομεταφορά.....   | 6   |
| 2.1.4 Κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά (longshore transport).....  | 8   |
| 2.2 Μοντελοποίηση παράκτιας μορφολογίας.....  | 10  |
| 2.2.1 Μοντέλα εξέλιξης προφίλ ακτής (Coastal profile models).....   | 10  |
| 2.2.2 Μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής (Coastline models).....  | 11  |
| 2.2.3 Μοντέλα παράκτιων περιοχών (Coastal area models).....   | 12  |
| 2.3 Μέθοδοι σχηματοποίησης.....   | 14  |
| 2.3.1 Ιστορική εξέλιξη μεθόδων σχηματοποίησης.....  | 14  |
| 2.3.2 Μέθοδοι μείωσης δεδομένων εισόδου μέσω σχηματοποίησης σε κλάσεις (Binning Input Reduction Methods)..... | 16  |
| 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....              | 21  |
| 3.1 Μέθοδος ροής ενέργειας (Energy Flux Method).....  | 21  |
| 3.2 Μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών (Equivalent Waves Method).....  | 26  |
| 3.3 Σύστημα μοντελοποίησης MIKE 21 Coupled Model FM.....  | 29  |

|   |    |
|---|----|
| 3.3.1 MIKE 21 Spectral Waves Module FM.....   | 30 |
| 3.3.2 Hydrodynamic Module FM.....   | 34 |
| 3.3.3 Sand Transport Module.....  | 37 |
| 4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....   | 41 |
| 4.1 Το νησί της Λέσβου.....   | 41 |
| 4.1.1 Γενικά και ιστορικά στοιχεία.....   | 41 |
| 4.1.2 Ιστορικά στοιχεία.....  | 43 |
| 4.2 Ερεσός Λέσβου.....  | 45 |
| 4.2.1 Γενικά στοιχεία.....  | 45 |
| 4.2.2 Κλιματικές συνθήκες.....  | 46 |
| 4.2.3 Μορφολογικά στοιχεία ακτής πυθμένα.....   | 47 |
| 4.3 Διαθέσιμες μετρήσεις - Δημιουργία υπολογιστικού πεδίου.....                               | 49 |
| 4.4 Διαθέσιμα κυματικά δεδομένα στα ανοιχτά.....  | 53 |
| 4.4.1 Copernicus Marine Service – CMEMS.....  | 53 |
| 4.4.2 Προσδιορισμός κυματικού κλίματος.....   | 54 |
| 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....   | 57 |
| 5.1 Κυματικοί αντιπρόσωποι μεθόδων σχηματοποίησης.....  | 57 |
| 5.1.1 Κυματικοί αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....                                      | 57 |
| 5.1.2 Κυματικοί αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών.....                               | 61 |
| 5.1.3 Σύγκριση αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας και μεθόδου των ισοδύναμων κυματισμών..... | 62 |
| 5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου MIKE 21.....  | 65 |
| 5.2.1 Αποτελέσματα μεθόδου ροής ενέργειας: επιλογή 6 αντιπροσώπων.....                        | 67 |
| 5.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου ροής ενέργειας: επιλογή 12 αντιπροσώπων.....                       | 69 |
| 5.2.3 Αποτελέσματα μεθόδου ροής ενέργειας: επιλογή 18 αντιπροσώπων.....                       | 72 |
| 5.2.4 Αποτελέσματα μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών: επιλογή 12 αντιπροσώπων.....                | 75 |
| 5.3 Τελικές βαθυμετρίες προσομοιώσεων – Σύγκριση με βαθυμετρίες μετρήσεων.....                | 78 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.1 Τελικές βαθυμετρίες προσομοιώσεων – Επιλογή 6 αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας.....  | 79  |
| 5.3.2 Τελικές βαθυμετρίες προσομοιώσεων – Επιλογή 12 αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας..... | 82  |
| 5.3.3 Τελικές βαθυμετρίες προσομοιώσεων – Επιλογή 18 αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας..... | 84  |
| 5.4 Αξιολόγηση προσομοίωσης μοντέλου.....   | 87  |
| 5.4.1 Επιλογή βέλτιστου συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης (ΣΜΕ) μεθόδου ροής ενέργειας..... | 89  |
| 5.4.2 Επιλογή βέλτιστου αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας.....                      | 91  |
| 5.4.3 Επιλογή βέλτιστης μεθόδου μεταξύ ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών.....          | 94  |
| 5.4.4 Αβεβαιότητες αποτελεσμάτων.....   | 97  |
| 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....  | 99  |
| 6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων.....   | 99  |
| 6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....   | 101 |
| 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....  | 103 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ.....  | 105 |



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 2.1: Επίδραση του πυθμένα σε βαθιά, ενδιάμεσα και ρηχά νερά – πηγή: Karow κ.α., 2020.....                                     | 5  |
| Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση παράκτιου κυματογενούς ρεύματος – πηγή: Καραμπάς κ.α., 2015.....                                  | 6  |
| Εικόνα 2.3: Φορτίο πυθμένα και φορτίο αιωρήσεως – πηγή: Bosboom & Stive, 2020.....   | 8  |
| Εικόνα 2.4: Συγκριτική παρουσίαση διαχωρισμού σε κλάσεις με βάση την επιλογή μεθόδου BIR - πηγή: Benedet κ.α., 2016.....             | 18 |
| <br>   |    |
| Εικόνα 3.1: Παράδειγμα χρονοσειράς κυματικών παρατηρήσεων.....   | 22 |
| Εικόνα 3.2: Παράδειγμα κατακόρυφου διαχωρισμού κυμάτων κατά διεύθυνση - Μέθοδος ροής ενέργειας.....                                  | 23 |
| Εικόνα 3.3: Παράδειγμα οριζόντιου διαχωρισμού κυμάτων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος - Μέθοδος ροής ενέργειας.....                     | 24 |
| Εικόνα 3.4: Παράδειγμα διαχωρισμού χρονοσειράς σε 12 κλάσεις και επιλογή 12 αντιπροσώπων - Μέθοδος ροής ενέργειας.....               | 25 |
| Εικόνα 3.5: Παράδειγμα κατακόρυφου διαχωρισμού κυμάτων κατά διεύθυνση - Μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών.....                       | 26 |
| Εικόνα 3.6: Παράδειγμα διαχωρισμού χρονοσειράς σε 12 κλάσεις και επιλογή 12 αντιπροσώπων - Μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών.....    | 28 |
| Εικόνα 3.7: Περιβάλλον χρήση του MIKE 21 - Spectral Waves Module.....  | 34 |
| Εικόνα 3.8: Περιβάλλον χρήση του MIKE 21 - Hydrodynamic Module.....  | 36 |
| Εικόνα 3.9: Ταξινόμηση μεταφοράς ιζημάτων - πηγή: Jansen κ.α., 1979.....   | 37 |
| Εικόνα 3.10: Περιβάλλον χρήση του MIKE 21 - Sand Transport Module.....   | 38 |
| <br>   |    |
| Εικόνα 4.1: Το νησί της Λέσβου – πηγή: wikipedia.org.....  | 41 |
| Εικόνα 4.2: Απολιθωμένο δάσος Λέσβου – πηγή: lesvosmuseum.gr.....  | 42 |
| Εικόνα 4.3: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδος – πηγή: ΕΑΚ 2003.....   | 42 |
| Εικόνα 4.4: Χάρτης της Λέσβου από τον Κριστόφορο Μπουοντελμόντι (1420) – πηγή: Wikipedia.org.....                                    | 43 |
| Εικόνα 4.5: Αεροφωτογραφία Λέσβου - πηγή: Google maps.....   | 45 |
| Εικόνα 4.6: Σκάλα Ερεσού – πηγή: travel.gr.....  | 46 |
| Εικόνα 4.7: Παρουσίαση του συνολικού αριθμού μετρήσεων των ανέμων 1999-2003 - πηγή: Αδαμάκης, 2005.....                              | 47 |
| Εικόνα 4.8: Άνεμος επιφανείας (10μ) - πηγή: Poseidon System.....   | 48 |
| Εικόνα 4.9: Τοπογραφία βαθυμετρίας Ερεσού 14/02/2015.....  | 49 |
| Εικόνα 4.10: Τοπογραφία βαθυμετρίας Ερεσού 19/11/2015.....   | 50 |
| Εικόνα 4.11: Κάναβος υπολογιστικού πεδίου.....   | 51 |
| Εικόνα 4.12: Λεπτομέρειες πύκνωσης κανάβου υπολογιστικού πεδίου.....   | 51 |
| Εικόνα 4.13: Μετρήσεις βαθυμετρίας Ερεσού 14/02/2015.....  | 52 |
| Εικόνα 4.14: Μετρήσεις βαθυμετρίας Ερεσού 19/11/2015.....  | 52 |
| Εικόνα 4.15: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος στην λεκάνη της Μεσογείου Mediterranean Sea Waves Reanalysis – πηγή: copernicus.eu..... | 54 |
| Εικόνα 4.16: Ύψος κύματος-Διεύθυνση διάδοσης - Δεδομένα Copernicus.....  | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Εικόνα 4.17: Ύψος κύματος-Διεύθυνση διάδοσης - Δεδομένα μετά την επιλογή κρίσιμων διευθύνσεων.....  | 55 |
| Εικόνα 5.1: 6 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας.....  | 58 |
| Εικόνα 5.2: 12 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας.....   | 59 |
| Εικόνα 5.3: 18 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας.....   | 60 |
| Εικόνα 5.5: 12 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών.....  | 61 |
| Εικόνα 5.6: 12 Αντιπρόσωποι -Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας (EFM) και ισοδύναμων κυματισμών (EWM).....   | 63 |
| Εικόνα 5.7: Χρόνος προσομοίωσης - Χρονικό βήμα προσομοίωσης.....  | 65 |
| Εικόνα 5.8: Υπολογιστικό πλέγμα βαθυμετρίας Ερεσού 14/02/2015.....  | 66 |
| Εικόνα 5.9: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10) - 6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....  | 67 |
| Εικόνα 5.10: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) - 6 αντιπρόσωποι...67   |    |
| Εικόνα 5.11: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής κατανομής ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) - 6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....       | 68 |
| Εικόνα 5.12: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....   | 68 |
| Εικόνα 5.13: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....          | 69 |
| Εικόνα 5.14: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....  | 69 |
| Εικόνα 5.15: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....   | 70 |
| Εικόνα 5.16: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής κατανομής ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....      | 70 |
| Εικόνα 5.17: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....  | 71 |
| Εικόνα 5.18: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....         | 71 |
| Εικόνα 5.19: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10) - 18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....  | 72 |
| Εικόνα 5.20: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) - 18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....   | 73 |
| Εικόνα 5.21: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής κατανομής ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) - 18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....      | 73 |
| Εικόνα 5.22: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....  | 74 |
| Εικόνα 5.23: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας.....         | 74 |
| Εικόνα 5.24: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών.....   | 75 |
| Εικόνα 5.25: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών.....  | 76 |
| Εικόνα 5.26: Λεπτομέρεια στροβιλισμών ρευμάτων βορειοδυτικού τμήματος περιοχής μελέτης (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών..... | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Εικόνα 5.27: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών.....  | 77 |
| Εικόνα 5.28: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) - 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών..... | 77 |
| Εικόνα 5.29: Θέσεις κάθετων στην ακτή τομών, στην περιοχή των υπάρχοντων μετρήσεων.....  | 79 |
| Εικόνα 5.30: Τομή θέση 1 - 6 αντιπρόσωποι EFM.....   | 80 |
| Εικόνα 5.31: Τομή θέση 2 - 6 αντιπρόσωποι EFM.....   | 80 |
| Εικόνα 5.32: Τομή θέση 3 - 6 αντιπρόσωποι EFM.....   | 81 |
| Εικόνα 5.33: Τομή θέση 4 - 6 αντιπρόσωποι EFM.....   | 81 |
| Εικόνα 5.34: Τομή θέση 1 - 12 αντιπρόσωποι EFM.....  | 82 |
| Εικόνα 5.35: Τομή θέση 2 - 12 αντιπρόσωποι EFM.....  | 83 |
| Εικόνα 5.36: Τομή θέση 3 - 12 αντιπρόσωποι EFM.....  | 83 |
| Εικόνα 5.37: Τομή θέση 4 - 12 αντιπρόσωποι EFM.....  | 84 |
| Εικόνα 5.38: Τομή θέση 1 - 18 αντιπρόσωποι EFM.....  | 85 |
| Εικόνα 5.39: Τομή θέση 2 - 18 αντιπρόσωποι EFM.....  | 85 |
| Εικόνα 5.40: Τομή θέση 3 - 18 αντιπρόσωποι EFM.....  | 86 |
| Εικόνα 5.41: Τομή θέση 4 - 18 αντιπρόσωποι EFM.....  | 86 |
| Εικόνα 5.42: Τομή θέση 1 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας.....   | 92 |
| Εικόνα 5.43: Τομή θέση 2 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας.....   | 92 |
| Εικόνα 5.44: Τομή θέση 3 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας.....   | 93 |
| Εικόνα 5.45: Τομή θέση 4 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας.....   | 93 |
| Εικόνα 5.46: Τομή θέση 1 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδυνάμων κυματισμών.....  | 95 |
| Εικόνα 5.47: Τομή θέση 2 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδυνάμων κυματισμών.....  | 95 |
| Εικόνα 5.48: Τομή θέση 3 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδυνάμων κυματισμών.....  | 96 |
| Εικόνα 5.49: Τομή θέση 4 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδυνάμων κυματισμών.....  | 96 |

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

|  |    |
|--|----|
| Πίνακας 5.1: Κυματικά χαρακτηριστικά 6 αντιπροσώπων - Μέθοδος ροής ενέργειας.....  | 58 |
| Πίνακας 5.2: Κυματικά χαρακτηριστικά 12 αντιπροσώπων - Μέθοδος ροής ενέργειας.....   | 59 |
| Πίνακας 5.3: Κυματικά χαρακτηριστικά 18 αντιπροσώπων - Μέθοδος ροής ενέργειας.....   | 60 |
| Πίνακας 5.4: Κυματικά χαρακτηριστικά 12 αντιπροσώπων - Μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών.....  | 62 |
| Πίνακας 5.5: Κυματικά χαρακτηριστικά 12 αντιπροσώπων μεθόδων ροής ενέργειας (EFM) και ισοδύναμων κυματισμών (EWM).....                 | 64 |
| Πίνακας 5.6: Προτεινόμενος ταξινόμηση τιμών Brier Skill Score – πηγή Sutherland κ.α. (2004).....                                       | 88 |
| Πίνακας 5.7: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς συντελεστές μορφολογικής επιτάχυνσης - 6 αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας.....  | 89 |
| Πίνακας 5.8: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς συντελεστές μορφολογικής επιτάχυνσης - 12 αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας..... | 90 |
| Πίνακας 5.9: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς συντελεστές μορφολογικής επιτάχυνσης - 18 αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας..... | 90 |
| Πίνακας 5.10: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς αριθμούς αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας.....                               | 91 |
| Πίνακας 5.11: Σύγκριση τιμών BSS για 12 κυματικούς αντιπροσώπους των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδυνάμων κυματισμών.....             | 94 |



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προσομοίωση της μεταβολής της παράκτιας μορφολογίας, με την εφαρμογή πολύπλοκων συστημάτων μοντελοποίησης θεωρείται μια διαδικασία απαιτητική υπολογιστικά και χρονικά ασύμφορη, λόγω των σύνθετων φυσικών διεργασιών που συντελούνται στην παράκτια ζώνη και τους μεγάλους όγκους των δεδομένων εισόδου. Με την ανάπτυξη μεθόδων σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος, επιτυγχάνεται η μείωση των δεδομένων εισόδου σε ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών κυματικών καταστάσεων, οι οποίες προσομοιάζουν όσο το δυνατόν ακριβέστερα την μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα της πλήρους χρονοσειράς. Για την περαιτέρω μείωση του υπολογιστικού χρόνου, οι προσομοιώσεις των αντιπροσωπευτικών κυματικών καταστάσεων εκτελούνται για περιορισμένο χρόνο, ο οποίος αντιστοιχίζεται σε μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες με την χρήση ενός εμπειρικού συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης.

Εξετάσθηκε η απόδοση της μεθόδου ροής ενέργειας, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της για διαφορετικές τιμές συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης και διαφορετικό αριθμό κυματικών αντιπροσώπων, καθώς και την συγκριτική απόδοση της σε σχέση με την μέθοδο ισοδύναμων κυματισμών. Η προαναφερθείσα διερεύνηση εκτελέσθηκε στην ακτή της Σκάλας Ερεσού, της Λέσβου, όπου ως παράμετρος σύγκρισης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η μεταβολή της στάθμης του πυθμένα σε σχέση με την αρχική βαθυμετρία εξαγόμενη από μετρήσεις πεδίου. Όλες οι προσομοιώσεις εκτελέσθηκαν με την χρήση του συζευγμένου υπολογιστικού πακέτου MIKE 21/3 DHI, και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με βάση τον στατιστικό δείκτη ικανότητας Brier Skill Score.

Τα αποτελέσματα αξιολόγησης των μεθόδων σχηματοποίησης υποδεικνύουν την υπεροχή του μέγιστου συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης και την ικανοποιητική απόδοση κάθε αριθμού αντιπροσωπευτικών κυματικών καταστάσεων, ως προς την βέλτιστη προσομοίωση της τελικής βαθυμετρίας των μετρήσεων πεδίου, με την χρήση της μεθόδου ροής ενέργειας. Όσον αφορά στην συγκριτική αξιολόγηση των δυο μεθόδων σχηματοποίησης, η μέθοδος ροής ενέργειας αναδείχθηκε ως η πιο αποδοτική.

## ABSTRACT

The simulation of the coastal morphological change, by application of intricate modeling systems, is considered as a computationally demanding and time unprofitable process, due to the complex physical processes performed in the coastal zone and the large input data series. The development of wave climate schematization methods, aim to reduce the input data, to a set of representative wave states, in order to simulate as accurately as possible, the morphological bed level evolution of the full time series. Further reduction of the computational time can be achieved by running the simulations of representative wave states for finite time, which is corresponded to longer time scales with an empirical morphological acceleration factor.

The performance of the Energy Flux Method has been examined, comparing the occurring results for different values of the morphological acceleration factor and different number of wave representatives, as well as the comparative performance in relation to the Equivalent Waves Method. The aforementioned tests were executed at the coast of Skala Eresou, Lesbos, where the bottom level change in relation to the initial bathymetry extracted from field measurements, has been used as the comparison parameter of the results. The simulations were performed using the MIKE 21/3 DHI coupled computing package, and the results were evaluated using the Brier Skill Score.

The evaluation of the results of the modeling methods indicates superiority of the maximum used value of the morphological acceleration coefficient and reasonable performance of every number of representative wave states, in terms of the optimal simulation of the final field measurements bathymetry, using the Energy Flux Method. Regarding the comparative evaluation of the two schematization methods, Energy Flux Method appeared as the most efficient.

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παράκτια ζώνη είναι η παραθαλάσσια περιοχή, η οποία ορίζεται μεταξύ της ακτογραμμής και της ισοβαθούς από την οποία θεωρείται πως γίνεται αισθητή η επίδραση του πυθμένα στην κυματική δράση. Η μορφολογία της παράκτιας ζώνης δέχεται επιρροές από πληθώρα φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η φυσική της εξέλιξη οφείλεται στην μεταφερόμενη ενέργεια από τους εκβάλλοντες ποταμούς, τους κυματισμούς, τα θαλάσσια ρεύματα και τον άνεμο, προκαλούν μετακινήσεις ιζημάτων, οι οποίες διαμορφώνουν την μορφή της ακτής σε μακροχρόνια βάση. Καθώς μεγάλο μέρος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων τοποθετείται σε ακτίνα μερικών δεκάδων χιλιομέτρων από την ακτή, η παράκτια ζώνη έχει οικονομική, περιβαλλοντική και κοινωνική αξία. Έτσι, η παρατήρηση και η συνεχής μελέτη της εξέλιξής της, με απώτερο σκοπό, μελλοντικά να μπορεί να εξαχθεί μια ασφαλής πρόβλεψη της διαμόρφωσής της σε βάθος κάποιων ετών, είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Η ακτομηχανική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς, απαιτεί την χρήση υπολογιστικών μοντέλων προσομοίωσης. Στην υπό μελέτη περιοχή, εισάγονται από το ορισμένο ανοικτό όριο πραγματικές κυματικές παρατηρήσεις, τα κυματικά χαρακτηριστικά των οποίων (όπως το ύψος, η περίοδος και η διεύθυνση διάδοσης), λαμβάνονται συνήθως από ωκεανογραφικές βάσεις δεδομένων και πλωτήρες καταγραφής, αλλά και από την επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων που λαμβάνονται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες. Έτσι, συλλέγεται ένας τεράστιος όγκος καθημερινών κυματικών καταγραφών, ο οποίος είναι εξαιρετικά χρονοβόρο να εισαχθεί στην υπολογιστική διαδικασία και να προσομοιωθεί.

Ο μεγάλος όγκος των δεδομένων εισόδου, οδηγεί στην ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος, και προσδιορισμού ενός μειωμένου αριθμού κυματικών συνθηκών συνολικής αντιπροσώπευσής του. Ο στόχος της παρούσας εργασίας, είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης μεθόδου μείωσης των δεδομένων εισόδου και του βέλτιστου αριθμού αντιπροσωπευτικών κυματικών καταστάσεων, ώστε να προσομοιώνεται όσο το δυνατόν καλύτερα η πραγματική κατάσταση της ακτής. Ως περιοχή αναφοράς για την παραπάνω διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε η ακτή της Σκάλας Ερεσού, στο νησί της Λέσβου, και οι μετρήσεις πεδίου βαθυμετρίας για το έτος 2015. Σημειώνεται ότι η σύγκριση προβλέψεων αριθμητικών μοντέλων με μετρήσεις πεδίου παράκτιου πυθμένα σε μια τόσο εκτεταμένη έκταση έχει πραγματοποιηθεί ελάχιστες φορές, όπως αποτυπώνεται και στη διεθνή βιβλιογραφία (βλ. Luijendijk κ.α., 2017), λόγω, μεταξύ άλλων, της πολυπλοκότητας των παράκτιων διεργασιών και του αυξημένου κόστους πραγματοποίησης των μετρήσεων πεδίου.



## 1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκτός της εισαγωγής, περιλαμβάνει άλλα πέντε κεφάλαια, τα οποία θα αναπτυχθούν συνοπτικά στη συνέχεια.

Στο *Κεφάλαιο 2*, πραγματοποιείται μια συνοπτική ανασκόπηση των κύριων γενεσιουργών αιτιών των παράκτιων μορφολογικών μεταβολών. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα ανεμογενή κύματα, τα θαλάσσια ρεύματα και η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά. Έπειτα, περιγράφονται οι διαθέσιμοι τύποι μοντέλων της παράκτιας μορφολογίας (Μοντέλα εξέλιξης προφίλ ακτής, Μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής, Μοντέλα παράκτιων περιοχών), από τα οποία τελικά επιλέγεται ο τύπος παράκτιων περιοχών, μέσω του υπολογιστικού πακέτου MIKE 21 DHI, το οποίο αναπτύσσεται εκτενέστερα στο *Κεφάλαιο 3*. Ακολουθεί μια εισαγωγή στις μεθόδους σχηματοποίησης, με εστίαση στις μεθόδους μείωσης των δεδομένων εισόδου μέσω σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος σε κλάσεις.

Στο *Κεφάλαιο 3*, αναλύονται εκτενέστερα οι δυο μέθοδοι μείωσης των δεδομένων εισόδου που επιλέχθηκαν προς διερεύνηση (Μέθοδος ροής ενέργειας, Μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών) και τα τρία συζευγμένα μοντέλα του συστήματος MIKE 21 DHI που επιλέχθηκαν να εφαρμοστούν στις προσομοιώσεις (Hydrodynamic, Sand Transport, Spectral Wave Module).

Στο *Κεφάλαιο 4*, παρουσιάζεται η περιοχή της Σκάλας Ερεσού, Λέσβου, ως προς γεωγραφικά, γεωμορφολογικά, ιστορικά και κλιματολογικά της χαρακτηριστικά. Έπειτα, παρουσιάζονται οι βαθυμετρίες των μετρήσεων πεδίου για το έτος 2015, που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα αναφοράς. Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία προσδιορισμού του κυματικού κλίματος στα βαθιά νερά, μέσω της υπηρεσίας θαλάσσιων δεδομένων Κοπέρνικος - Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS).

Στο *Κεφάλαιο 5*, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Ειδικότερα, απεικονίζεται για την εκάστοτε προσομοίωση, η χωρική κατανομή του ύψους κύματος, της ταχύτητας του κύματος και η αλλαγή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης. Μετά την σύζευξη των μεταβολών του πυθμένα για τον εκάστοτε αριθμό αντιπροσώπων, απεικονίζεται η τελική προβλεπόμενη βαθυμετρία της περιοχής μελέτης. Ακολουθεί μια αναφορά στους τρόπους αξιολόγησης της απόδοσης των προσομοιώσεων, και τελικά μέσω του κριτηρίου ικανότητας του μοντέλου (BSS), συγκρίνονται οι διαφορετικές, ως προς την μέθοδο σχηματοποίησης ή των αριθμό των αντιπροσωπευτικών κυματισμών, προσομοιώσεις.

Στο *Κεφάλαιο 6*, παρουσιάζονται τα βασικά συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα του *Κεφαλαίου 5*, και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Με τον όρο ακτογραμμή ορίζεται η νοητή γραμμή τομής της θαλάσσιας επιφάνειας με την ξηρά, η οποία μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου. Οι μεταβολές αυτές ενδέχεται να αφορούν βραχυχρόνια διαστήματα, όπως ένα εικοσιτετράωρο, αλλά και μεγάλες χρονικές κλίμακες της τάξης των χιλιάδων ετών. Τα αίτια που μπορεί να οδηγούν στις μεταβολές μικρής κλίμακας είναι η παλιρροιακή δράση, ή κάποιο ακραίο σεισμικό ή μετεωρολογικό φαινόμενο. Στις μακροχρόνιες μεταβολές επιδρούν οι κλιματικές συνθήκες, οι τεκτονικές αλλαγές, η μεταβολή της θαλάσσιας στάθμης, οι κυματισμοί και τα παράκτια ρεύματα.

Πέραν των φυσικών διεργασιών που μεταβάλλουν το προφίλ της ακτογραμμής, σημαντική επίδραση στην διαμόρφωση του έχει και η ανθρώπινη δραστηριότητα, η οποία περιλαμβάνει τεχνικές παρεμβάσεις (όπως φράγματα, παράκτια λατομεία και αμμοληψίες), αλλά και την οικιστική και τουριστική δραστηριότητα (Καρύμπαλης, 2010). Λόγω της υψηλής οικονομικής και κοινωνικής σημασίας της παράκτιας ζώνης, οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις φαίνεται αυξάνονται συνεχώς. Σημειώνεται πως, η παράκτια ζώνη περιλαμβάνει ένα υποθαλάσσιο και ένα χερσαίο τμήμα. Το υποθαλάσσιο τμήμα εκτείνεται από την ακτογραμμή μέχρι την ισοβαθή καμπύλη των -10m, ενώ το χερσαίο τμήμα ορίζεται, θεωρητικά, ως το υψόμετρο στο οποίο σταματά η επίδραση των θαλάσσιων διεργασιών, το οποίο διαφέρει ανά περίπτωση.

Το ενδιαφέρον ως προς την μελέτη της εξέλιξης της παράκτιας μορφολογίας, προκύπτει λοιπόν, από την ανάγκη προστασίας των παράκτιων δραστηριοτήτων από το πολυπαραγοντικό φαινόμενο της διάβρωσης. Η διάβρωση είναι μια φυσική διαδικασία, ή οποία όμως επιταχύνεται λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας. Αντίθετα, η θαλάσσια κίνηση καθώς και τα ιζήματα από τις εκβολές των ποταμών, ενισχύουν την παράκτια ζώνη ή δημιουργούν νέα εδάφη (Βαβιάς, 2011). Η ενδελεχής μελέτη αυτών των φαινομένων, λόγω της πληθώρας των παραγόντων και των μεγάλων χρονικών κλιμάκων που συντελούν στην ενεργοποίησή τους, είναι ιδιαίτερα περίπλοκη και ασύμφορη υπολογιστικά. Γι' αυτό επιλέγεται η μελέτη ορισμένων κύριων γενεσιουργών αιτιών που οδηγούν σε μορφολογικές μεταβολές, είτε ως μεμονωμένες διαδικασίες, είτε ως συζευγμένες.

Στις υπολογιστικές διαδικασίες που θα ακολουθήσουν, η περιγραφή του φαινομένου των παράκτιων μορφολογικών αλλαγών θα περιοριστεί στην συσχέτιση με τα ανεμογενή κύματα, των οποίων η θραύση, σε συνδυασμό με την επίδραση των φαινομένων της διάθλασης και περίθλασης οδηγεί στην δημιουργία παράκτιων ρευμάτων (Καραμπάς, 2015). Η συνδυαστική δράση των δυο παραπάνω φαινομένων προκαλεί την κίνηση των ιζημάτων και συνεπώς τις κύριες μακροχρόνιες μορφολογικές μεταβολές.

## 2.1 Γενεσιουργά αίτια μορφολογικών αλλαγών

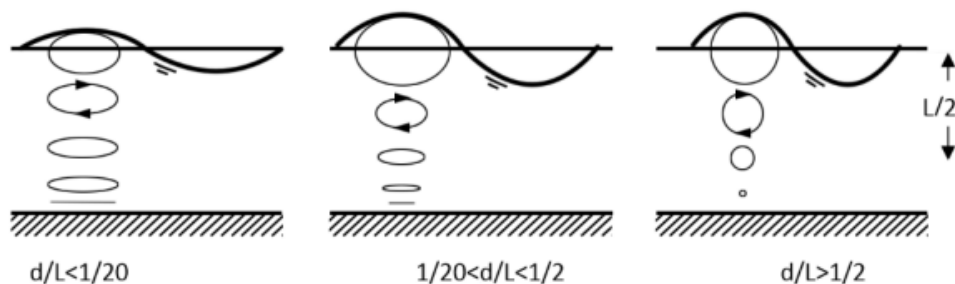
### 2.1.1 Ανεμογενή κύματα

Τα κύματα δημιουργούν μεταφορά ιζημάτων που μπορεί να αλλοιώσει εκτεταμένες παράκτιες περιοχές, και έτσι επιδρούν σημαντικά στην διαμόρφωση της παράκτιας ζώνης. Τα κυριότερα αίτια γένεσης των κυματικών ταλαντώσεων είναι, μεταξύ άλλων, ο άνεμος, οι σεισμικές δονήσεις, οι γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πιέσεως και η έλξη της σελήνης, ενώ οι κυριότερες δυνάμεις επαναφοράς προέρχονται από την βαρύτητα, την δύναμη Coriolis και την επιφανειακή τάση.

Στους κυματισμούς μικρής περιόδου, που καλούνται επιφανειακοί κυματισμοί ( $T < 30 \text{ sec}$ ), η γενεσιουργός δύναμη προέρχεται από τον άνεμο και η δύναμη επαναφοράς από την βαρύτητα. Τα κύματα δημιουργούνται λόγω της ανταλλαγής ορμής ανάμεσα στον άνεμο και την επιφάνεια του νερού. Η κυματική συνθήκη στην περιοχή γένεσης των κυματισμών, θεωρείται πως χαρακτηρίζεται από κύματα μικρού μήκους (short waves) που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις, τα οποία λόγω της αλληλεπίδρασης με τον άνεμο, αυξάνουν τον ρυθμό ανάπτυξης τους και τελικά ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του. Παρόλου που οι αλληλεπιδράσεις είναι αρκετά ασθενείς, οι μεγάλες αποστάσεις που διανύει το κύμα και η συνεχής μεταφορά ενέργειας αυξάνει σταδιακά το κυματικό ύψος και την ταχύτητα.

Ο φυσικός μηχανισμός διακοπής της συνεχούς αύξησης των κυματικών χαρακτηριστικών είναι η θραύση των κυμάτων στην ανοικτή θάλασσα, η οποία εκδηλώνεται στην κορυφή των κυμάτων και δημιουργεί το χαρακτηριστικό λευκό χρώμα του αεριζόμενου νερού και έντονα τυρβώδες στρώμα στην διαταραγμένη θαλάσσια επιφάνεια. Καθώς το κύμα διαδίδεται από τα βαθιά (όπου  $d > 0.5 L$ ) στα πιο ρηχά νερά ( $d < 0.5 L$ ), ξεκινά να δέχεται επίδραση από τον πυθμένα, η οποία συντελεί στην μείωση της ταχύτητας διάδοσης του κυματισμού και την απώλεια ενέργειας, λόγω τριβής. Στην περίπτωση των λοξά προσπιπτόντων κυματισμών, το κύμα διαθλάται λόγω της διαφοράς των ταχυτήτων διάδοσης μεταξύ των κορυφών των κυμάτων. Σε ακόμα πιο ρηχά νερά, παρατηρείται το φαινόμενο της ρήχωσης (shoaling), μέχρι το σημείο που το κύμα γίνεται ασταθές και καταλήγει σε θραύση του κυματισμού. Η θραύση είναι από τις πιο σημαντικές διαδικασίες στην παράκτια ζώνη, καθώς μεταφέρει ενέργεια και ορμή από τα ανεμογενή κύματα, στα κυματογενή ρεύματα, τα κύματα υποβαρύτητας, τις τύρβες και δημιουργεί ταυτόχρονη μεταφορά ιζημάτων.

Στην *Εικόνα 2.1* παρουσιάζεται σχηματικά η τροχιακή κίνηση των σωματιδίων του νερού, όπου από κυκλική στα βαθιά νερά ( $d < 0.5 L$ ) νερά, γίνεται ελλειπτική καθώς μειώνεται το βάθος του πυθμένα. Η παραπάνω μεταβολή, επηρεάζει την ταχύτητα διάδοσης του κυματισμού, και κατ' επέκταση τις ενεργειακές απώλειες και την κίνηση των ιζημάτων.



Εικόνα 2.1: Επίδραση του πυθμένα σε βαθιά, ενδιάμεσα και ρηχά νερά – πηγή: Καραμπάς κ.α., 2015

Οι τοπικές συνθήκες κυμάτων αλλάζουν συνεχώς λόγω των μεταβολών σε συνθήκες του περιβάλλοντος, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η παλιρροιακή ανύψωση και τα παλιρροιακά ρεύματα. Ως αποτέλεσμα, οι κυματικές συνθήκες αντιπροσωπεύονται από τις πιθανοτικές κατανομές της συχνότητας εμφάνισης των διάφορων κυματισμών έχουν συλλεχθεί ανά τα χρόνια, σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η λήψη δεδομένων περιορίζονται γενικά στα βαθιά νερά, όπου οι πληροφορίες θεωρούνται ακριβέστερες, και λαμβάνεται από ωκεανογραφικές βάσεις δεδομένων ή κυματικούς πλωτήρες. Για την πρόβλεψη των μεταβολών της μορφολογίας κοντά στην ακτή, πρέπει οι κυματικές συνθήκες στα βαθιά να μεταφερθούν στα ρηχά νερά, μέσω υπολογιστικών διαδικασιών, ώστε να αφορούν την περιοχή ενδιαφέροντος.

### 2.1.2 Θαλάσσια ρεύματα

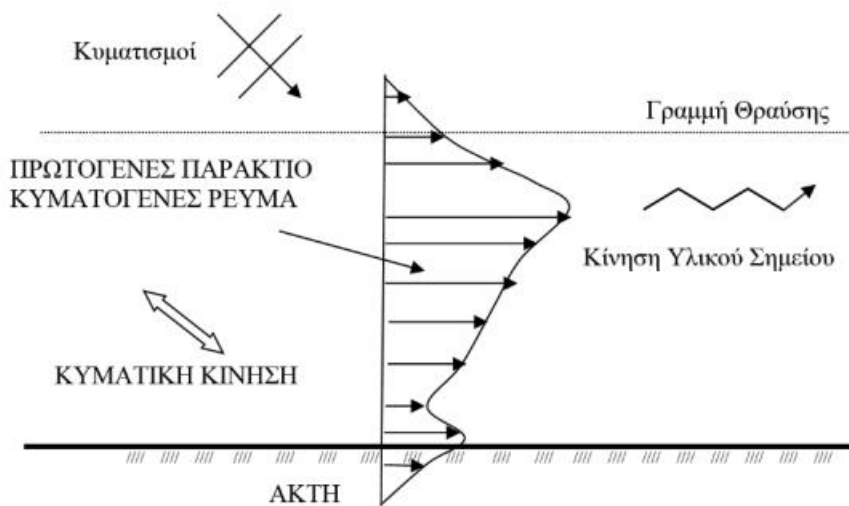
Οι μεταβολές της μορφολογίας λόγω ρευμάτων συνήθως συμβαίνει συνδυαστικά με της μεταβολές λόγω κυμάτων, και είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Σε σύγκριση με τη μεταφορά ιζημάτων που οφείλεται μόνο στα ρεύματα (όπως στα ποτάμια), τα κύματα ενισχύουν την μεταφορά ιζημάτων και προκαλούν κατά κύριο λόγο την έναρξη της κίνησής τους.

Τα κύρια γενεσιουργά αίτια των ρευμάτων είναι ο άνεμος, οι διαφορές πυκνότητας του νερού, η παλίρροια και το κύμα. Τα βασικά τους στοιχεία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Παλιρροιακά ρεύματα:** Η παλίρροια δημιουργεί ρεύματα στους ωκεανούς, τα οποία είναι ισχυρότερα κοντά στην ακτή, και σε όρμους και εκβολές ποταμών. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη βαρυτική έλξη της Σελήνης, αλλά και του Ήλιου, πάνω στη Γη, καθώς και στην περιστροφή των ουρανίων σωμάτων αυτών.
- **Ανεμογενή ρεύματα:** Το αιολικό παραθαλάσσιο ρεύμα, κατά μήκος μιας περίπου ομοιόμορφης ακτής, διέπεται από την ισορροπία μεταξύ της παραθαλάσσιας διατμητικής τάσης ανέμου, της τριβής του πυθμένα και της αδράνειας. Οι άνεμοι «οδηγούν» ρεύματα που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του νερού. Κοντά σε παράκτιες περιοχές, τα ανεμογενή ρεύματα αφορούν στην τοπική κλίμακα και μπορεί να οδηγήσουν σε φαινόμενα όπως η παράκτια ανύψωση.
- **Πυκνοκλινη ρεύματα:** Καθοδηγούνται από τις διαφορές πυκνότητας του νερού, λόγω των διακυμάνσεων της ως προς το βάθος και της αλατότητας. Τα ρεύματα αυτά, που

εμφανίζονται τόσο σε βαθιά όσο και σε ρηχά νερά, κινούνται πολύ πιο αργά από τα παλιρροιακά ή επιφανειακά ρεύματα.

- **Παράκτια κυματογενή ρεύματα:** 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 (Εικόνα 2.2). Η αιτία της δημιουργίας αυτών των ρευμάτων είναι οι μεταβολές, κατά την οριζόντια διεύθυνση, των μέσων ροών ποσότητας κίνησης, τις οποίες προκαλούν οι κυματισμοί. Τα μεγέθη αυτά ονομάζονται τάσεις ακτινοβολίας και ορίζονται ως η περίσσια μεταφορά ορμής λόγω της επίδρασης των κυματισμών. Τα κυματογενή ρεύματα θεωρούνται απλουστευτικά παράλληλα προς στην ακτογραμμή, και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της σημαντικής στερεομεταφοράς που προκαλούν κατά μήκος της ακτής.



Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση παράκτιου κυματογενούς ρεύματος – πηγή: Καραμπάς κ.α., 2015

### 2.1.3 Στερεομεταφορά

Οι αλλαγές στη μορφολογία των ακτών είναι συνέπεια των χωρικών κλίσεων στους ρυθμούς μεταφοράς ιζημάτων. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση μεταξύ υδροδυναμικής και ιζήματος είναι πολύ περίπλοκη και ελάχιστα κατανοητή, και βασίζεται κυρίως σε εμπειρικά κριτήρια. Η μεταφορά ιζήματος μπορεί να οριστεί ως η κίνηση των σωματιδίων του, σε ένα καθορισμένο επίπεδο, για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η κίνηση των σωματιδίων του ιζήματος εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του μεταφερόμενου υλικού (μέγεθος κόκκων, ταχύτητα πτώσης). Η έναρξη της κίνησης των σωματιδίων καθορίζεται από την στιγμή υπέρβασης της κρίσιμης διατμητικής τάσης, η οποία είναι το αποτέλεσμα της συνδυασμένης κίνησης κύματος-ρεύματος.

Οι τύποι στερεομεταφοράς μπορούν να διακριθούν σε:

- Φορτίου πυθμένα (bedload), όπου η κίνηση των σωματιδίων ιζήματος εκτελείται σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα. Τα σωματίδια μπορεί να βρίσκονται σε περισσότερο ή λιγότερο συνεχή επαφή με τον πυθμένα. Σε υψηλότερες διατμητικές τάσεις, ένα ολόκληρο το στρώμα του ιζήματος κινείται σε επίπεδο στρώμα. Αυτό ονομάζεται φύλλο ροής (sheet flow) και θεωρείται συχνά ως το φορτίο του πυθμένα, από τη στιγμή που οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων παίζουν ρόλο.
- Φορτίο σε αιώρηση (suspended load), όπου αφορά την μεταφορά των σωματιδίων που αιωρούνται στο νερό, χωρίς οποιαδήποτε επαφή με τον πυθμένα. Τα σωματίδια υποστηρίζονται από δυνάμεις τυρβώδους διάχυσης.

Το άθροισμα του φορτίου πυθμένα ( $S_b$ ) και του αιωρούμενου φορτίου ( $S_s$ ) ονομάζεται συνολικό φορτίο στερεομεταφοράς ( $S_t$ ).

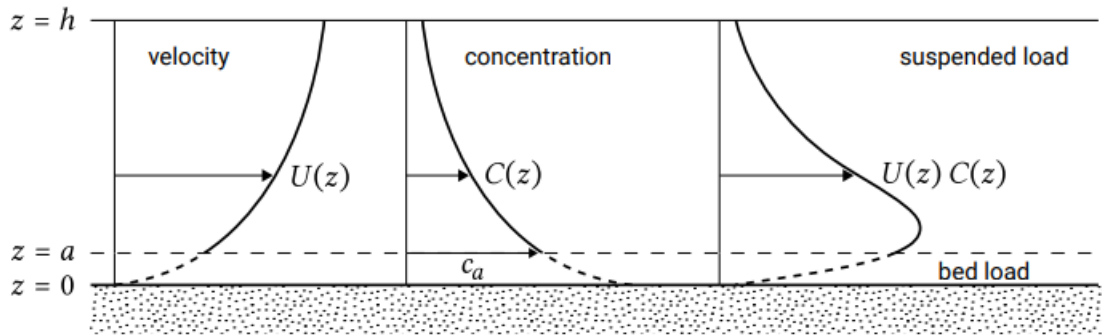
$$S_t = S_b + S_s \quad (2.1)$$

Επιπλέον, υπάρχει μια τρίτη κατηγορία που ονομάζεται φορτίο απόπλυσης (wash load). Το φορτίο απόπλυσης αποτελείται από πολύ μικροσωματίδια που καθιζάνουν μόνο σε ακίνητο νερό και δεν βρίσκονται στον πυθμένα. Αφού αυτά τα σωματίδια δεν συνεισφέρουν στις αλλαγές της στάθμης του πυθμένα, το φορτίο απόπλυσης δεν λαμβάνεται υπόψη στη συνολική μεταφορά φορτίου.

Οι μηχανισμοί πίσω από το φορτίο πυθμένα και το αιωρούμενο φορτίο είναι αρκετά διαφορετικοί. Η μεταφορά φορτίου πυθμένα καθορίζεται, σχεδόν αποκλειστικά, από τη διατμητική τάση του πυθμένα που επενεργεί στα σωματίδια ιζήματος, τα οποία κινούνται κατά μήκος του. Ως εκ τούτου, το φορτίο πυθμένα εκφράζεται συχνά σε όρους τάσης διάτμησης λόγω ρευμάτων και κυμάτων, με ένα επιπρόσθετο κριτήριο που περιγράφει την έναρξη της κίνησης. Στην περίπτωση στιγμιαίας διατμητικής τάσης, το ίζημα θεωρείται ότι αποκρίνεται στιγμιαία στις υδροδυναμικές συνθήκες.

Η μεταφορά αιωρούμενου φορτίου πραγματοποιείται πάνω από το στρώμα φορτίου πυθμένα. Η αιωρούμενη ροή ιζήματος σε ένα ορισμένο ύψος πάνω από την κλίση μοντελοποιείται συχνά ως το γινόμενο της συγκέντρωσης ιζήματος  $c$  και της οριζόντιας ταχύτητας  $u$  του νερού που μεταφέρει το ίζημα. Η μεταφορά αιωρούμενων ιζημάτων μπορεί να υπολογιστεί με την ενσωμάτωση του αιωρούμενου ιζήματος  $uc$  από το βάθος του πυθμένα ως τη στάθμη του νερού. Δεδομένου ότι τα σωματίδια ιζήματος έχουν χρόνο να καθιζάνουν, το αιωρούμενο φορτίο δεν ανταποκρίνεται στιγμιαία στις υδροδυναμικές συνθήκες.

Στην *Εικόνα 2.3* φαίνεται σχηματικά πως η στερεομεταφορά φορτίου πυθμένα γίνεται σε ένα λεπτό στρώμα κοντά στην επιφάνεια του πυθμένα (μεταξύ  $z = 0$  και  $z = a$ ).



Εικόνα 2.3: Φορτίο πυθμένα και φορτίο αιωρήσεως – πηγή: Bosboom & Stive, 2021

### 2.1.4 Κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά (longshore transport)

Η κατά μήκος της ακτής μεταφορά ιζήματος είναι η καθαρή κίνηση των σωματιδίων του ιζήματος, με κατεύθυνση παράλληλη με την ακτογραμμή και τις ισοβαθείς, η οποία συχνά αποτελεί την κύρια αιτία των μακροχρόνιων μορφολογικών αλλαγών. Εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από την υδροδυναμική της ζώνης θραύσης και στις ιδιότητες του ιζήματος. Ωστόσο, ανεξάρτητα από την ισχύ των υδραυλικών δυνάμεων που παράγουν μεταφορά, η μεταφορά θα πραγματοποιηθεί μόνο εάν υπάρχει διαθέσιμο ίζημα στον πυθμένα της εξεταζόμενης περιοχής.

Όταν οι εξισώσεις της στερεομεταφοράς εφαρμόζονται για τον υπολογισμό των ρυθμών μεταφοράς ιζημάτων κατά μήκος της ακτής, το πρόβλημα μπορεί να απλοποιηθεί αρκετά υποθέτοντας ότι η μεταφορά στην παράκτια κατεύθυνση προκαλείται από ένα αμετάβλητο κατά το χρόνο παραθαλάσσιο ρεύμα. Τα μοντέλα περιγραφής της στερεομεταφοράς (αιωρούμενων) ιζημάτων, που βασίζονται στην επίλυση της κατανομής ταχύτητας και συγκέντρωσης μπορούν απλοποιηθούν ώστε να σχετίζονται μόνο με το ρεύμα:

$$\langle s_y \rangle = \int_a^h V(z)C(z)dz \quad (2.2)$$

Όπου  $s_y$  η καθαρή μεταφορά ιζημάτων κατά μήκος της ακτής,  $V(z)$  η ταχύτητα κατά μήκος της ακτής ρεύματος σε ένα ύψος  $z$  πάνω από τον πυθμένα,  $C(z)$  η χρονικά μέση συγκέντρωση ιζήματος σε ένα ύψος  $z$  πάνω από τον πυθμένα,  $h$  το τοπικό βάθος και  $a$  το πάχος του στρώματος φορτίου πυθμένα.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τρεις εξισώσεις υπολογισμού της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς οι οποίες βασίστηκαν στην στερεομεταφορά χερσαίου ιζήματος κατά μήκος της ακτής (bulk longshore transport).

### 1. Εξίσωση CERC (Komar and Inman, 1970)

Η εξίσωση περιγράφει την στερεομεταφορά των ιζημάτων κατά μήκος της ακτής λόγω της δράσης κυμάτων διαδιδόμενων υπό γωνία. Ως εκ τούτου, περιλαμβάνεται μόνο η επίδραση των παραθαλάσσιων ρευμάτων που δημιουργούνται από τα κύματα. Παλιρροιακά ρεύματα ή άλλα παραθαλάσσια ρεύματα δεν λαμβάνονται υπόψη.

$$S = \frac{K \cdot P_l}{(\rho_s - \rho)g(1-n)} \quad (2.3)$$

Όπου  $\rho_s$  είναι η πυκνότητα των κόκκων ιζήματος,  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $g$  η επιτάχυνση της ταχύτητας,  $n$  το πορώδες του ιζήματος ( $n \approx 0.4$ ),  $K$  ένας εμπειρικός αδιάστατος συντελεστής και  $P_l$  η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής.

### 2. Εξίσωση Kamphuis (1991)

Η εξίσωση περιγράφει την στερεομεταφορά των ιζημάτων κατά μήκος της ακτής συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους των κόκκων και της κλίσης του πυθμένα. Η διατύπωσή για τη βυθισμένη μάζα του μεταφερόμενου ιζήματος (Immersed mass of transported sediment) είναι:

$$I_m = 2.27 H_{s,b}^2 T_p^{1.5} (\tan a_b)^{0.75} D^{-0.25} (\sin 2\varphi_b)^{0.6} \quad (2.4)$$

Όπου  $I_m$  η βυθισμένη μάζα μεταφερόμενου ιζήματος,  $a_b$  η κλίση του πυθμένα στη θραύση,  $D$  η διάμετρος των κόκκων και  $H_{s,b}$ ,  $T_p$ ,  $\varphi_b$  τα κυματικά χαρακτηριστικά στη θραύση.

### 3. Εξίσωση Bayram κ.α. (2007)

Η εξίσωση βασίζεται στην έννοια της ενέργειας, και βασίζεται στο μοντέλο των Inman και Bagnold. Υποθέτοντας ότι η ισχύς υγρού που διατηρεί το φορτίο ιζήματος χάνεται από την τριβή του πυθμένα, οι Inman και Bagnold θεώρησαν ότι το ίζημα μεταφέρεται ως φορτίο πυθμένα. Αντίθετα, οι Bayram κ.α. θεώρησαν την αιωρούμενη μεταφορά ιζημάτων είναι τον κυρίαρχο τρόπο μεταφοράς στην ζώνη θραύσης. Η εξίσωση που περιγράφει τον ρυθμό μεταφοράς της βυθισμένη μάζας του ιζήματος είναι:

$$I = WV = \frac{\varepsilon(Ec_g)_b \cos \varphi_b}{w_s} V \quad (2.5)$$

Όπου  $\varepsilon(Ec_g)_b$  η ισχύς ρευστού, ανά μονάδα μήκους ακτής, που χρησιμοποιείται για την αιώρηση ιζημάτων στη ζώνη θραύσης,  $w_s$  η ταχύτητα πτώσης,  $V$  η μέση ταχύτητα κατά μήκος στη ακτή ρεύματος.



## 2.2 Μοντελοποίηση παράκτιας μορφολογίας

Για την αποτύπωση των μορφολογικών αλλαγών έχουν αναπτυχθεί τριών ειδών μοντέλα παράκτιας μορφολογίας, τα οποία βασίζονται σε διαφορετικές παραδοχές:

- Μοντέλα εξέλιξης προφίλ ακτής (Coastal profile models),
- Μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής (Coastline models),
- Μοντέλα παράκτιων περιοχών (Coastal area models).

Τα μοντέλα αυτά υποδιαιρούνται σε περεταίρω δισδιάστατα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούν εξισώσεις μέσου όρου βάθους ή τρισδιάστατα μοντέλα, τα οποία επιλύουν τις κάθετες στην ροή διακυμάνσεις και την στερεομεταφορά.

Η δομή αυτών των μοντέλων συνοψίζεται στα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ορισμός αρχικών συνθηκών ακτογραμμής ή δισδιάστατης βαθυμετρίας.
- Ορισμός οριακών συνθηκών κυμάτων και ροής, συζευγμένα μοντέλα κυμάτων και ροής, που εκτελούν υπολογισμούς για ορισμένη χρονική περίοδο, κατά την οποία η βαθυμετρία διατηρείται σταθερή.
- Υπολογισμός πεδίου μεταφοράς ιζήματος.
- Καθορισμός βαθυμετρίας και σύνθεσης ιζήματος του πυθμένα με βάση την κλίση της μεταφοράς του ιζήματος (sediment transport gradients).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο τύπος μοντέλου παράκτιων περιοχών, ωστόσο θα ακολουθήσει μια σύντομη περιγραφή των τριών τύπων μοντέλων παράκτιας μορφολογίας.

### 2.2.1 Μοντέλα εξέλιξης προφίλ ακτής (Coastal profile models)

Τα μοντέλα εξέλιξης του προφίλ ακτής, κυρίως εστιάζουν σε κάθετες στην ακτή διαδικασίες (cross-shore) και όχι τόσο στις μεταβολές κατά μήκος αυτής (longshore) όπως αναφέρεται στις μελέτες των Roelvink and Broker (1993) και Schoonees and Theron (1995). Εφαρμόζονται σε περιπτώσεις:

- Αξιολόγησης των επιπτώσεων καταιγίδας σε κάποιο παράκτιο προφίλ,
- Αξιολόγησης της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς των αμμοθινών και των συστημάτων τροφοδοσίας στην ακτή.

Η πρώτη περίπτωση, αποτελεί την παλαιότερη απόπειρα μοντελοποίησης μιας κατάστασης στην οποία η κυρίαρχη συνθήκη είναι η θαλάσσια μεταφορά. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζει αυτή η πρόβλεψη αφορούν τον καθορισμό της σωστής ταχύτητας διάβρωσης και στην επίτευξη του σωστού προφίλ ακτογραμμής μετά την καταιγίδα. Οι περισσότερες αλλαγές προφίλ πραγματοποιούνται στις πρώτες εκατοντάδες μέτρα από την ακτή, και το φαινόμενο της καταιγίδας μπορεί να διαρκέσει από κάποιες ώρες έως μερικές μέρες.

Η δεύτερη περίπτωση, περιλαμβάνει όλο το χιλιομετρικό εύρος του ενεργού τμήματος της ακτής, σε βάθος 6-15 m, ανάλογα με το κυματικό κλίμα και την διάρκεια της προσομοίωσης. Οι αλλαγές στην μορφολογία των ύφαλων αναβαθμών (bars) πραγματοποιούνται με την

πάροδο των ετών, όπου σε ορισμένες περιπτώσεις, ένας και μόνο αναβαθμός κινείται «μπρος-πίσω», σε άλλες παρατηρείται δημιουργία αναβαθμών κοντά στην ακτή, ή η μετακίνησή τους προς την θάλασσα, ενώ αυξάνουν τον όγκο τους επαναλαμβάνοντας αυτόν τον κύκλο. Αυτή η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από μερικά χρόνια έως περισσότερο από μια δεκαετία και είναι δύσκολο να προσομοιωθούν με μεγάλη ακρίβεια. Ο Roelvink κ.α. (1995), διατύπωσαν μια σχετικά ρεαλιστική, σχεδόν περιοδική, γραμμική συμπεριφορά σε χρονική κλίμακα περίπου μιας δεκαετίας, ενώ οι Ruessink κ.α. (2007), μελετώντας την ευαισθησία του μοντέλου και έπειτα από εκτεταμένη βαθμονόμηση, παρήγαγε τη συμπεριφορά αναβαθμών σε χρονοδιάγραμμα μηνών. Τα συστήματα αυτά επηρεάζονται από παραθαλάσσιες ανατροφοδοτήσεις παρόμοιας κλίμακας και αλληλεπιδρούν με το μοτίβο ύφαλων αναβαθμών. Έτσι, μόνο όταν η φυσική συμπεριφορά των αναβαθμών μοντελοποιείται κάπως ρεαλιστικά μπορούμε να έχουμε κάποια εμπιστοσύνη στην ικανότητα του μοντέλου να προβλέψει τη σχετική επίδραση μετακίνησης του ιζήματος.

### *2.2.2 Μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής (Coastline models)*

Στα μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής, θεωρείται πως το κάθετο στην ακτή προφίλ διατηρεί το σχήμα του ακόμα και όταν η ακτή επεκτείνεται ή υποχωρεί (Szymtkiewicz κ.α., 2000). Τα μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής υιοθετούν συνθήκες βαθμιαία μεταβαλλόμενης ροής και σχεδόν παράλληλες διαβαθμίσεις βάρους. Έτσι, η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά αντιμετωπίζεται, τοπικά, ως πλήρως προσαρμοσμένη στις τοπικές συνθήκες προσπίπτοντος κύματος σε σχέση με τον προσανατολισμό της ακτής. Δεδομένου ότι συνήθως χρειάζονται εκατοντάδες μέτρα για να αναπτυχθεί η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, τα μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής αντιστοιχούν σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, για αποστάσεις πολλών χιλιομέτρων. Παραδείγματα εφαρμογών στις οποίες επιλέγονται τα εν λόγω μοντέλα είναι η εξέλιξη των δέλτα των ποταμών, η εξέλιξη της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς μεγάλων παραλιών, η εξέλιξη των επιχώσεων των ακρωτηρίων και η αναδιάταξη των ακτών λόγω αλλαγών στο κυματικό κλίμα.

Ωστόσο, τα μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε εφαρμογές μικρής κλίμακας, με την χρήση επιπρόσθετων τεχνικών, όπως σε αναδυόμενους ή βυθισμένους κυματοθραύστες στα ανοικτά, γύρω από προβόλους τύπου «Τ» και κοντά σε παλιρροϊκές εισόδους. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας ένα μοντέλο εξέλιξης ακτογραμμής με ένα δισδιάστατο μοντέλο κύματος, για την πρόβλεψη του κυματικού κλίματος κοντά στην ακτή, με επιπλέον όρους εξισώσεων κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς. Σημειώνεται πως τα μοντέλα εξέλιξης ακτογραμμής σε μικρές κλίμακες πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσοχή, καθώς πολλές διαδικασίες δεν αντιπροσωπεύουν αυτή την προσέγγιση. Ακόμα και όταν εμφανίζεται μια επιτυχημένη βαθμονόμηση, η αξία της μπορεί να είναι περιορισμένη αν είναι λάθος οι διαδικασίες συνδυάστηκαν.

### 2.2.3 Μοντέλα παράκτιων περιοχών (Coastal area models)

Τα μοντέλα παράκτιων περιοχών εφαρμόζονται σε περιπτώσεις στις οποίες δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός της κατά μήκος και της κάθετης ως προς την ακτή στερεομεταφοράς, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα διαφόρων κλιμάκων. Επίσης, λόγω της ικανότητας τους να περιγράφουν με ακρίβεια τις παράκτιες διεργασίες, είναι σχεδόν αποκλειστική η επιλογή τους για τη διερεύνηση της επίδρασης των παράκτιων έργων ή λιμένων στην μορφολογική εξέλιξη του παράκτιου πυθμένα.

Στις μικρές κλίμακες το ενδιαφέρον προσανατολίζεται στις λεπτομέρειες των κυματικών και κυματογενών ρευμάτων και τις μορφολογικές αλλαγές που προκύπτουν γύρω από μικρές δομές, όπως πρόβολοι και κυματοθραύστες ή την διάβρωση σχηματισμών άμμου. Τα μικρά μεγέθη κελιών πλέγματος που απαιτούνται για την επίλυση των κύριων διεργασιών και τα σχετικά μικρά χρονικά βήματα καθιστούν τέτοια προβλήματα υπολογιστικά απαιτητικά. Έτσι, καθίσταται σημαντική η επιλογή αντιμετώπισης του προβλήματος ως δισδιάστατο, που εστιάζει στην επίδραση της οριζόντιας κυκλοφορίας ή ως ψευδό-τρισδιάστατο, όπου λαμβάνονται υπόψη τα ρεύματα επαναφοράς (undertow). Στην πρώτη περίπτωση η διαμόρφωση της παραλίας μπορεί να εξελιχθεί αποκλίνοντας αρκετά από το προφίλ ισορροπίας. Στην δεύτερη περίπτωση, υπάρχει τάση για την διατήρηση ενός συγκεκριμένου σχήματος ακτής, αλλά πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στον συντονισμό των διασυνοριακών ώστε η διαμόρφωση που αναπτύσσεται ή διατηρείται να ανταποκρίνεται στην λογική.

Σε πολύ μεγάλες κλίμακες τα μοντέλα παράκτιων περιοχών, χρησιμοποιούνται για την μελέτη της μακροχρόνιας εξέλιξης παλιρροϊκών λεκανών και των εκβολών ποταμών. Σε μελέτες με μεγάλες εισόδους, η επίδραση των κυμάτων δεν είναι πρωτεύουσας σημασίας, λόγω του μεγάλου μεγέθους των παλιρροϊκών καναλιών, τα οποία έχουν συνήθως πλάτος εκατοντάδων μέτρων έως χιλιομέτρων. Επομένως ακόμη και σχετικά λιγότερο λεπτομερή μοντέλα, με αναλύσεις πλέγματος της τάξης των 100 m, μπορεί να έχουν αποδώσει αρκετά καλά. Λόγω των μεγάλων χωρικών και χρονικών βημάτων, με τη βοήθεια τεχνικών επιτάχυνσης, είναι δυνατή η περάτωση προσομοιώσεων για χρονικά διαστήματα αιώνων. Έτσι, είναι δυνατή η μελέτη της εξέλιξης των παλιρροϊκών λεκανών και η προσομοίωση των επιπτώσεων της ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Wang κ.α. (1995), Hibma et al. (2003), Van der Wegen and Roelvink (2008), Dastgheib κ.α. (2008) και Dissanayake κ.α. (2009)). Σημειώνεται πως πρόσφατη έρευνα δείχνει ότι επιτυγχάνεται καλύτερη αποτύπωση του προφίλ καναλιών λαμβάνουν υπόψη τη χωρική διακύμανση στα μεγέθη των κόκκων και την τάση ιζήματος να τραχύνεται με την αύξηση της μέσης διατμητικής τάσης.

Στις ενδιάμεσες κλίμακες, οι οποίες έχουν ιδιαίτερη σημασία για τους ακτομηχανικούς, όπως σε μελέτες επέκτασης λιμανιών ή στην σταθεροποίηση στις εξυγίανσης ακτών μεγάλης έκτασης, οι λεπτομερείς διεργασίες εντός της ζώνης θραύσης δεν μπορούν να επιλυθούν, αλλά η ζώνη θραύσης πρέπει να διακριτοποιηθεί επισταμένα, ώστε να παράγει επαρκή υπεράκτια ρεύματα και μεταφορά ιζήματος. Αυτό σημαίνει τουλάχιστον 5-10 κελιά πλέγματος σε όλη τη ζώνη θραύσης. Μέρος της εξέλιξης της ακτής εξαρτάται από την αλληλεπίδραση με τους αμμόλοφους, όσον αφορά τη διάβρωση και την ενίσχυσή τους, λόγω της μεταφοράς άμμου από τον άνεμο. Τέτοιες διεργασίες συνήθως απαιτούν προσεγγίσεις ανταλλαγής άμμου μεταξύ της περιοχής του υδάτινου μοντέλου, της παραλίας και των αμμόλοφων, χάριν καλύτερης αποτύπωσης.

Ο χρόνος που απαιτείται για την περάτωση των προσομοιώσεων, μέσω ωριαίων μεταβαλλόμενων συνθηκών, είναι σχεδόν απαγορευτικός. Αυτό συμβαίνει λόγω του μεγάλου όγκου των διαθέσιμων κυματικών δεδομένων, τα οποία συνήθως αφορούν σε περιόδους 1 έως 5 έτη, και της περιπλοκότητας των κυματικών φαινομένων σε περιπτώσεις ακτών και εκβολών ποταμών. Στις προσομοιώσεις που αποβλέπουν στην πρόβλεψη, και η ακολουθία των δεδομένων εισαγωγής είναι άγνωστη, ο αριθμός των εισαγόμενων συνθηκών πρέπει αν περιοριστεί αρκετά, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης μεγάλων χρονικών περιόδων. Έτσι, δημιουργείται η ανάγκη για εφαρμογή μεθόδων σχηματοποίησης των δεδομένων εισόδου, με σκοπό την μείωση του αριθμού των συνθηκών που εν συνεχεία θα προσομοιωθούν.

## 2.3 Μέθοδοι σχηματοποίησης

### 2.3.1 Ιστορική εξέλιξη μεθόδων σχηματοποίησης

Τα περισσότερα μοντέλα προσομοίωσης της μορφολογίας που διαμορφώθηκαν τα τελευταία τριάντα χρόνια βασίζονται σε δισδιάστατα υδροδυναμικά μοντέλα μέσου όρου βάθους (πχ Fleming and Hunt (1976), Watanabe κ.α. (1986), Andersen κ.α. (1991), Tuong (1999)), στα οποία η υπεράκτια μεταφορά που δημιουργείται από τα υποθαλάσσια ρεύματα δεν αναπαράγεται. Συνεπώς η από ξηράς (cross-shore) στερεομεταφορά πρέπει να προσομοιωθεί με εμπειρικά ή ημι-εμπειρικά μέσα και έπειτα να προστεθεί στην στερεομεταφορά που προέρχεται από τα ρεύματα μέσου βάθους. Τα τελευταία χρόνια δοκιμάζονται οιονεί τρισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα σχηματοποίησης (πχ De Vrined and Stive (1987), Briand and Kamphuis (1993), Pechon and Teisson (1996), Kuroiwa κ.α. (2000)), τα οποία αναπαράγουν την υποθαλάσσια και από ξηράς μεταφορά ιζήματος αυτόματα. Ωστόσο, τα δισδιάστατα μοντέλα προσφέρουν μεγαλύτερα πλεονεκτήματα, σε σύγκριση με τα πλήρως τρισδιάστατα μοντέλα, εξοικονομώντας υπολογιστικό χρόνο και μέσα. Ως εκ τούτου, μπορεί να αποδειχθεί καταλληλότερη η χρήση ενός 2D μοντέλου, συνδυαστικά με την από ξηράς στερομεταφορά, από ότι ενός πλήρως τρισδιάστατου μοντέλου.

Η χρήση ενός μορφολογικού μοντέλου για τον υπολογισμό της μεταβολής της τοπογραφίας απαιτεί δύο κύριους τύπους δεδομένων εισόδου: την αρχική τοπογραφία και το κυματικό κλίμα. Εφόσον το κυματικό κλίμα περιλαμβάνει δεδομένα που μεταβάλλονται χρονικά, το μοντέλο πρέπει να επαναλαμβάνει τους υπολογισμούς εκ νέου κάθε φορά, σύμφωνα με τις αλλαγές του κλίματος. Ανάλογα με τον αριθμό των επανυπολογισμών, ο χρόνος που καταναλώνει το μοντέλο μπορεί να είναι σημαντικός. Για την εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου, εισήχθη η χρήση αντιπροσώπων, αντί για χρονικά μεταβαλλόμενα κύματα. Στο παρελθόν, το αντιπροσωπευτικό κύμα είχε οριστεί ως το υψηλότερο κύμα, το υψηλότερο κύμα ενός δέκατου, το σημαντικό κύμα ή το μέσο κύμα. Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, που εισήχθη από τους Sverdrup και Munk (1947) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο. Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος και η περίοδος κύματος ισούνται με τον μέσο όρο του υψηλότερου ενός τρίτου από τα κύματα, ως προς το ύψος και την περίοδο αντίστοιχα, σε μια ομάδα κυμάτων.

Για την αναπαράσταση των κυματικών δεδομένων, που έχουν εγγραφεί για μεγάλες χρονικές περιόδους, οι Chesher και Miles (1992), πρότειναν μια μέθοδο για τη σχηματοποίηση κυμάτων. Η μέθοδος συνίστατο στον προσδιορισμό του βέλτιστου κύματος από κάθε κατεύθυνση, σε όρους μεταφοράς ιζήματος, και τον συνδυασμό αυτών σε ένα ενιαίο αντιπροσωπευτικό πεδίο, λαμβάνοντας υπόψιν την συχνότητά τους, για χρήση σε προβλέψεις μακροχρόνιας μεταφοράς άμμου.

Οι Dean και Yoo (1992) ανέπτυξαν μια μέθοδο, βάσει της οποίας ο υπολογισμός των αντιπροσωπευτικών κυμάτων βασίζεται στη διατήρηση της μάζας, χρησιμοποιώντας έναν τύπο μεταφοράς ιζημάτων και υποθέτοντας σταθερή γωνία κύματος στα βαθιά νερά. Η εν λόγω μέθοδος περιελάμβανε τον υπολογισμό αντιπροσωπευτικού ύψους και περιόδου κύματος χωρίς καμία αναφορά σε αντιπροσωπευτική γωνία κύματος.

Ο Chonwattana (2000), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο που πρότειναν οι Dean και Yoo (1992), εξήγαγε από την γραφική αναπαράστασή ύψους κύματος και περιόδου μια σχέση που συνήστα μια γραμμική συνάρτηση σε ημι-λογαριθμικής κλίμακας μεταξύ τους. Ωστόσο, εξακολουθεί η χρήση μακροχρόνιας μεταφοράς ιζημάτων για τον υπολογισμό της αντιπροσωπευτικής κατεύθυνσης κύματος.

Οι Rattanapitikon κ.α. (2003) πρότειναν τον υπολογισμό του μετασχηματισμού του ύψους μη κανονικού κύματος χρησιμοποιώντας μια αντιπροσωπευτική κυματική προσέγγιση (ισοδύναμα κανονικά κύματα με βάση το ύψος κύματος rms και την μέγιστη φασματική περίοδο). Βρήκαν ότι χρησιμοποιώντας ένα κατάλληλο μοντέλο διασποράς ενέργειας με νέους συντελεστές, η προσέγγιση των κυματικών αντιπροσώπων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού του rms ύψους κύματος με πολύ καλή ακρίβεια. Τελικά, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η προσέγγιση των κυματικών αντιπροσώπων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του μετασχηματισμού μη κανονικού ύψους κύματος. Βέβαια, η μέθοδος δεν εμπεριέχει τον υπολογισμό της αντιπροσωπευτικής κυματικής κατεύθυνσης στην περίπτωση που τα κύματα προέρχονται από πολλές κατευθύνσεις.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν από της παραπάνω έρευνες ήταν επιτυχείς ως προς την μείωση των κύκλων υπολογισμού μοντέλων κυμάτων, ρευμάτων και μεταφοράς ιζημάτων αντικαθιστώντας τα δεδομένα πραγματικών κυμάτων με υπολογισμένους αντιπροσώπους. Προκύπτει, λοιπόν, το συμπέρασμα πως για την εφαρμογή της προσέγγισης των κυματικών αντιπροσώπων απαιτείται:

1. Η ανάπτυξη μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των αντιπροσώπων.
2. Η επιλογή του κατάλληλου αριθμού αντιπροσώπων για την χρήση σε τρισδιάστατα μορφολογικά μοντέλα.
3. Η εφαρμογή της μεθόδου σε πραγματικές καταστάσεις, για την επαλήθευση της.

Σημειώνεται ακόμα πως και μετά των αποκλεισμό των μη κύριων διευθύνσεων των κυματισμών ο αριθμός δεδομένων παραμένει μεγάλος και δύσχρηστος. Έτσι, για να μειωθούν οι διαστάσεις του προβλήματος σχηματοποίησης και για να υπάρξει οπτικοποιημένο αποτέλεσμα εντός πεπερασμένου χρόνου, είναι απαραίτητη η επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος δεδομένων, θεωρώντας ως σημαντικές παραμέτρους, για την μεταφορά των ιζημάτων, το ύψος κύματος και την διεύθυνση διάδοσης. Το μοντέλο «τρέχει» για αυτές οι αντιπροσωπευτικές συνθήκες κύματος στη σειρά, για μικρότερη χρονική περίοδο (δηλαδή για λίγους παλιρροιακούς κύκλους), και η επίδρασή τους στη μορφολογία της ακτής πολλαπλασιάζεται με μια τιμή  $Morfac$ , που σχετίζεται με τη συχνότητα εμφάνισης αυτής της συνθήκης κύματος στη φύση ή το βάρος του στο συνολικό κυματικό κλίμα. Η αθροιστική επαλληλία των επιδράσεων αυτών δίνει και την τελική προβλεπόμενη βαθυμετρία.

### 2.3.2 Μέθοδοι μείωσης δεδομένων εισόδου μέσω σχηματοποίησης σε κλάσεις (Binning Input Reduction Methods)

Τα τελευταία χρόνια, για την μείωση των δεδομένων εισόδου των κυματικών συνθηκών που απαιτούνται για την μοντελοποίηση, εφαρμόζονται μέθοδοι σχηματοποίησης σε κλάσεις (binning methods), οι οποίες αποσκοπούν στην επιτάχυνση των προσομοιώσεων του μοντέλου και στην διευκόλυνση της μετέπειτα επεξεργασίας και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Οι μέθοδοι σχηματοποίησης αυτού του τύπου, χαρακτηρίζονται από μη προκαθορισμένες κατευθυντήρες κλάσεις ανόμοιων διαστάσεων. Η διαδικασία που ακολουθείται απαιτεί τον διαχωρισμό του εκάστοτε κυματικού κλίματος με βάση το ύψος κύματος και την μέση γωνία διάδοσης του κυματισμού σε κλάσεις, ώστε να περιέχουν ίσο μέρος μιας αντιπροσωπευτικής ποσότητας, όπως η ενέργεια του κυματισμού ή η κατά μήκος της ακτής στρεομεταφορά.

Για να αναπτυχθεί το κυματικό κλίμα χρησιμοποιώντας τις μεθόδους σχηματοποίησης που θα αναπτυχθούν στην συνέχεια, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα, χρησιμοποιώντας κριτήρια που καθορίζονται από την εκάστοτε μέθοδο:

1. Δημιουργία διαγράμματος διασποράς σημαντικού ύψους κύματος ( $H_s$ ) και μέσης διεύθυνσης κυματισμού ( $MWD$ ).
2. Κατακόρυφος διαχωρισμός της χρονοσειράς του συνόλου των κυματικών χαρακτηριστικών σε προκαθορισμένο αριθμό διαστημάτων με βάση την κατεύθυνση των κυματισμών.
3. Οριζόντιος διαχωρισμός κάθε κατευθυντικού διαστήματος σε καθορισμένο αριθμό διαστημάτων, με βάση το κυματικό ύψος.
4. Ορισμός του αριθμού των κυματικών κλάσεων ως αποτέλεσμα των τομών μεταξύ των κατακόρυφων και των οριζόντιων διαστημάτων, χρησιμοποιώντας μια αντιπροσωπευτική ποσότητα, η οποία παραμένει σταθερή σε κάθε κλάση και καθορίζεται από την εκάστοτε μέθοδο σχηματοποίησης.

Παρακάτω θα γίνει μια συνοπτική αναφορά στις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους σχηματοποίησης σε κλάσεις, οι οποίες είναι:

- Η μέθοδος σταθερών κλάσεων (*Fixed Bins Method*), κατά την οποία ορίζεται αυθαίρετα ο αριθμός των διαστημάτων κατεύθυνσης κύματος και των διαστημάτων ύψους κύματος. Αρχικά, η χρονοσειρά χωρίζεται σε ορισμένο αριθμό κατακόρυφων διαστημάτων, ως προς την διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού. Στην συνέχεια, κάθε ένα από τα παραπάνω διαστήματα, χωρίζεται σε καθορισμένο αριθμό οριζόντιων διαστημάτων, με βάση το ύψος κύματος. Ως αποτέλεσμα, ενώ συνολικός αριθμός των οριζόντιων διαστημάτων παραμένει σταθερός, ενδέχεται υπάρξει διαφοροποίηση ως προς το εύρος ύψους, από κατακόρυφο διάστημα σε κατακόρυφο διάστημα.
- Η μέθοδος ροής ενέργειας (*Energy Flux Method*), κατά την οποία ο επιμερισμός της χρονοσειράς του κυματικού κλίματος σε κλάσεις γίνεται με βάση την διατήρησης ίσης ενέργειας κύματος. Η ενέργεια του κυματισμού υπολογίζεται από την εξίσωση (η εν λόγω μέθοδος θα αναπτυχθεί περαιτέρω στο Κεφάλαιο 3.1):

$$E_f = (\rho \cdot g \cdot H_s / 8) \cdot C_g \quad (2.6)$$

Ακολουθεί παράδειγμα για την περίπτωση επιλογής του χωρισμού σε συνολικά 12 κυματικές κλάσεις, από τις οποίες οι 4 έχουν ως βάση την διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού και οι 3 το κυματικό ύψος. Αρχικά το δείγμα χωρίζεται σε κατακόρυφα διαστήματα τα οποία διαθέτουν το 1/4 της συνολικής ενέργειας των κυματισμών και έπειτα, κάθε ένα από αυτά χωρίζεται σε επιμέρους οριζόντια διαστήματα τα οποία διαθέτουν το 1/20 της συνολικής ενέργειας έκαστο.

- Η μέθοδος ροής ενέργειας για ακραία μεγέθη κυματικών συνθηκών, που βασίζεται επίσης στην διατήρησης ίσης ενέργειας κύματος, με την προσθήκη μιας ακραίας κυματικής συνθήκης, ώστε να προσομοιάζεται μια συνθήκη καταιγίδας σένα μέσο κυματικό κλίμα. Η κλάση των ακραίων κυματικών συνθηκών περιέχει την καταγραφή που σημειώνει την μεγαλύτερη ενέργεια κυματισμού, σε κάθε κατακόρυφο διάστημα κατεύθυνσης κύματος. Τα ακραία κυματικά φαινόμενα μπορεί να αντιπροσωπεύουν ένα μικρό μέρος κυματικών καταγραφών (χαμηλή συχνότητα εμφάνισης), τα οποία όμως επηρεάζουν σημαντικά την μεταφορά των ιζημάτων και κατά συνέπεια την αλλαγή της μορφολογίας.
- Η μέθοδος σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος με χρήση της εξίσωσης CERC, η οποία βασίζει τον διαχωρισμό σε κλάσεις με βάση την δυνατότητα μεταφοράς ιζημάτων, η οποία υπολογίζεται με βάση τον εμπειρικό τύπο CERC (USACE, 1984). Η μεταφορά του όγκου του ιζήματος κάθε κυματικής καταγραφής λαμβάνεται από την ακόλουθη εξίσωση (USACE, 1984, USACE, 2002):

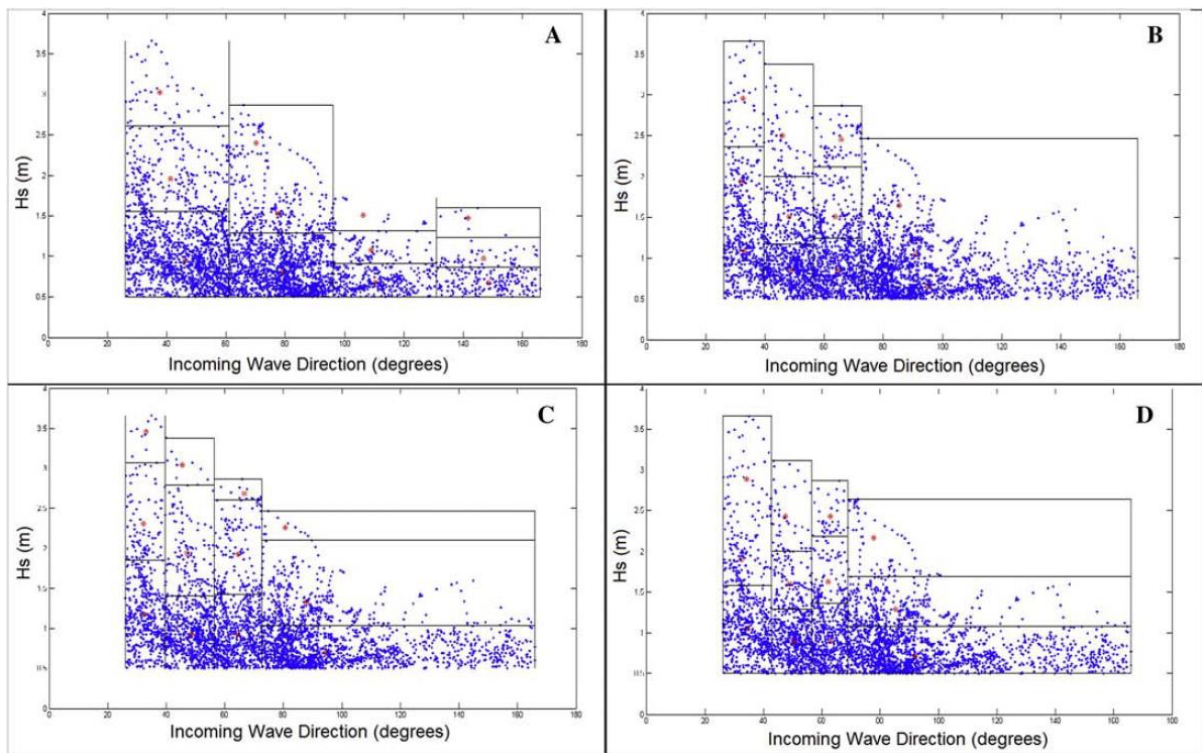
$$Q_l = K \left( \frac{\rho \sqrt{g}}{16\kappa^{1/2}(\rho_s - \rho)(1-n)} \right) H_b^{5/2} \sin(2a_b) \quad (2.7)$$

Όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του ρευστού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\kappa$  ο δείκτης διακοπής που ορίζεται από τον λόγο  $\frac{H_b}{d_b}$  στην τιμή 0.78,  $\rho_s$  η πυκνότητα ιζήματος,  $n$  είναι το πορώδες (0.4),  $H_b$  το σημαντικό ύψος κύματος στο σημείο εισόδου του κυματισμού,  $a_b$  η γωνία θραύσης του κύματος σε σχέση με την ακτογραμμή και  $K$  μια σταθερά, που χρησιμοποιείται ως συντελεστής βαθμονόμησης.

Τα διαστήματα κυματικής κατεύθυνσης και ύψους κύματος ορίζουν κλάσεις ίσων μεταφορών ιζήματος, ώστε για κυματικό κλίμα με  $n$  αριθμό κλάσεων, η κάθε κλάση να περιέχει το  $1/n$  της πιθανής μεταφοράς ιζήματος για το σύνολο των κυματικών καταστάσεων. Σημειώνεται πως τα κύματα με γωνία θραύσης κοντά στις 0 ή 90°, σε σχέση με την ακτογραμμή, προκαλούν μικρότερες μεταφορές και εκπροσωπούνται λιγότερο κυματικό κλίμα που προκύπτει, σε σχέση με κύματα ίδιου ύψους και γωνία θραύσης κοντά στις 45°.

Στην *Εικόνα 2.4* παρουσιάζονται, για την επιλογή των 12 αντιπροσωπευτικών κυματισμών, οι διαφορετικοί διαχωρισμοί σε κλάσεις με βάση την εκάστοτε μέθοδο σχηματοποίησης. Στο σχήμα A απεικονίζονται τα αποτελέσματα της σχηματοποίησης από την μέθοδο σταθερών κλάσεων (FBM), στο σχήμα Β από την μέθοδο ροής ενέργειας (EFM), στο σχήμα C από την μέθοδο ροής ενέργειας για ακραία μεγέθη κυματικών συνθηκών και το σήμα D από την μέθοδο CERC.





Εικόνα 2.4: Συγκριτική παρουσίαση διαχωρισμού σε κλάσεις με βάση την επιλογή μεθόδου BIR - πηγή: Benedet κα, 2016

Ως μέθοδος BIR, αξίζει να σημειωθεί και η μέθοδος σχηματοποίησης κυματικού κλίματος *Opti-Routine*, η οποία διαφέρει σημαντικά από τις προαναφερθείσες μεθόδους. Βασίζεται στην εκτέλεση βραχυπρόθεσμων προσομοιώσεων, για κάθε καταγραφή του πλήρους κυματικού κλίματος, με σκοπό την διατήρηση ενός πρότυπου μοτίβου απόθεσης/διάβρωσης. Στην συνέχεια, μέσω μιας αυτόματης διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος, μειώνεται ο αριθμός των κυματικών αντιπροσώπων, διατηρώντας τις κυματικές καταστάσεις με την μεγαλύτερη συμβολή στην διαμόρφωση της μεταφοράς των ιζημάτων. Η μέθοδος, η οποία βασίστηκε σε κώδικα του D. Roelvink και βελτιώθηκε περαιτέρω από τον Roelvink κα (Lesser, 2009, Mol, 2007; Roelvink and Reniers, 2012), βασίζεται στα ακόλουθα βήματα:

1. Διεξαγωγή προσομοίωσης Delft3D, με μεγάλο αριθμό κυματικών περιπτώσεων (συνήθως > από 50 περιπτώσεις), και δημιουργία μιας καμπύλης μεταφοράς ιζημάτων, με τα αποτελέσματα να προστίθενται βάση της συχνότητα εμφάνισης της κάθε θαλάσσιας κατάστασης, ώστε να καθοριστεί ο σταθμισμένος μέσος όρος του μοτίβου στόχου.
2. Μείωση του κυματικού κλίματος σε ένα υποσύνολο αυτού, με τον υπολογισμό του σταθμισμένου μέσου όρου για κάθε αποτέλεσμα της προσομοίωσης, και εφαρμογή μιας αυτόματης διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος, ώστε να διατηρείται καμπύλη μεταφοράς ιζημάτων παρόμοια με την αρχική.
3. Για την μείωση του κυματικού κλίματος η *Opti-Routine* λαμβάνει υπόψιν την συχνότητα εμφάνισης κάθε αντιπροσωπευτικής συνθήκης. Η συνθήκη κύματος με τη χαμηλότερη συμβολή στην τελική καμπύλη μεταφοράς ιζήματος εξαιρείται και ακολουθεί ανακατανομή των εναπομενόντων συνθηκών,  $\nu$  φορές, ώστε να παρεκκλίνουν όσο το δυνατόν λιγότερο από την καμπύλη-στόχο ( $\nu$  ο αριθμός των επαναλήψεων που ορίζεται από τον χρήστη).

4. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έτσι ώστε ένα μικρό υποσύνολο περιπτώσεων κυμάτων να μπορεί να αντιπροσωπεύει τη συνολική μεταφορά ιζημάτων.

Η Orti-Routine έχει ισχυρή θεωρητική βάση και μπορεί να εφαρμοστεί για οποιονδήποτε τύπο διαμόρφωσης ακτών, ωστόσο συνδέεται με σημαντική επιπρόσθετη υπολογιστική επιβάρυνση, σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους BIR, δεδομένου ότι απαιτεί την διαδοχική εκτέλεση μεγάλου αριθμού αριθμητικών προσομοιώσεων.

Στην αξιολόγηση των Benedet κα. (2016) για τους διαφορετικούς τύπους μεθόδων BIR, πραγματοποιήθηκε για ένα έργο επίχωσης στην παραλία της Φλόριντα των ΗΠΑ. Εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για 6, 12, 20 και 30 αντιπροσωπευτικούς εκπροσώπους κυματικού κλίματος, με χρήση πολλαπλασιαστικού συντελεστή Morfac, για τους οποίους έγινε ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον αριθμό των αντιπροσώπων. Η σύγκριση της απόδοσης των μεθόδων BIR έγινε μέσω υπολογισμού του ριζικού μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), και καταλήγει πως για την επιλογή των 12 αντιπροσώπων αποδίδει καλύτερα η μέθοδος ροής ενέργειας (EFM) και η μέθοδος Orti. Σημειώνεται πως η μέθοδος ροής ενέργειας, λόγω της πρακτικότητας και της ευκολίας στην εφαρμογή της προτιμάται, ακόμα και όταν συγκρίνεται με πιο σύνθετες και χρονοβόρες μεθοδολογίες, όπως η μέθοδος Orti. Η μέθοδος Orti, αποδίδει καλύτερα από όλες τις άλλες μεθόδους όταν υπάρχει πολύ μικρός αριθμός κυμάτων που να αναπαριστούν το ετήσιο κυματικό κλίμα (πχ 6 περιπτώσεις κυμάτων). Αντίθετα η μέθοδος ροής ενέργειας για ακραία μεγέθη κυματικών συνθηκών, αποδίδει καλά μόνο όταν χρησιμοποιείται μεγάλος αριθμός αντιπροσώπων του κυματικού κλίματος. Η μέθοδος των σταθερών κλάσεων δεν παρήγαγε καλά αποτελέσματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους και επιπρόσθετα, περιέχει την προκατάληψη της υποκειμενικότητας. Η μέθοδος CERC δείχνει επίσης αποδεκτά αποτελέσματα αλλά είναι, ως προς την απόδοση, ελαφρώς κατώτερη σε σύγκριση με την μέθοδο ροής ενέργειας ή την μέθοδο Orti. Επίσης, οι δοκιμές που διεξήχθησαν, οδηγούν στο συμπέρασμα πως ένας αριθμός 12 αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων είναι αρκετές για να αναπαραστήσουν το ετήσιο κυματικό κλίμα, σε σύγκριση με μια πιο λεπτομερή προσέγγιση. Αυτός ο αριθμός των κυματικών περιπτώσεων μπορεί προσφέρει ταχύτητα στην εκτέλεση των προσομοιώσεων και διευκολύνει την ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.



### 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΧΗΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Για να βελτιστοποιηθεί ο χρόνος προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου, και για την διευκόλυνση της μετέπειτα επεξεργασίας και της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων του μοντέλου, καθίσταται πιο διαχειρίσιμη η αξιολόγηση ενός μικρού αριθμού κυματικών καταστάσεων, έναντι 2000+. Οι μέθοδοι σχηματοποίησης, γενικότερα συνίστανται στην διαίρεση της κυματικής χρονοσειράς σε κλάσεις, σύμφωνα με την κατεύθυνση και το ύψος κύματος και την επιλογή ενός αντιπροσώπου κάθε τμήμα. Η διαφορά μεταξύ των μεθόδων επικεντρώνεται στο κριτήριο που χρησιμοποιείται για τον χωρισμό του κύματος σε τμήματα ή τάξεις, και τον τρόπο επιλογής του αντιπροσώπου.

Στην εν λόγω εργασία θα χρησιμοποιηθούν η μέθοδος ροής ενέργειας (Energy Flux Method) των Benedet κ.α. (2016) και η μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών (Equivalent Waves Method) των Chonwattana κ.α. (2005), για τις περιπτώσεις των 6, 12 και 18 αντιπροσωπευτικών κυματικών καταστάσεων, αξιολογώντας τα αποτελέσματα των παραπάνω μεθόδων σε σύγκριση με τις μετρήσεις πεδίου.

#### 3.1 Μέθοδος ροής ενέργειας (Energy Flux Method)

Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε με βάση την μεθοδολογία των Benedet κ.α. (2016), όπου πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων πέντε διαφορετικών μεθόδων σχηματοποίησης (Μέθοδος των σταθερών κλάσεων, Μέθοδος ροής ενέργειας, Μέθοδος ροής ενέργειας για ακραία μεγέθη κυματικών συνθηκών, Μέθοδος CERC, Μέθοδος Opti), μεταξύ των οποίων η Energy Flux προκύπτει η πιο πρακτική και η πιο εύκολα εφαρμόσιμη, δεδομένου ότι τα κύματα επιλέγονται ως συνάρτηση της κατανομής της κυματικής ενέργειας. Επιπλέον, παρατηρείται καλύτερη απόδοση σε αριθμό 12 κυματικών αντιπροσώπων, ακόμη και όταν συγκρίνεται με πιο σύνθετες και χρονοβόρες μεθοδολογίες.

Η Energy Flux Method βασίζεται στην έννοια της ροής ενέργειας των κυμάτων, η οποία υπολογίζεται για κάθε καταγεγραμμένο κύμα μιας χρονοσειράς κάνοντας χρήση της παρακάτω εξίσωσης:

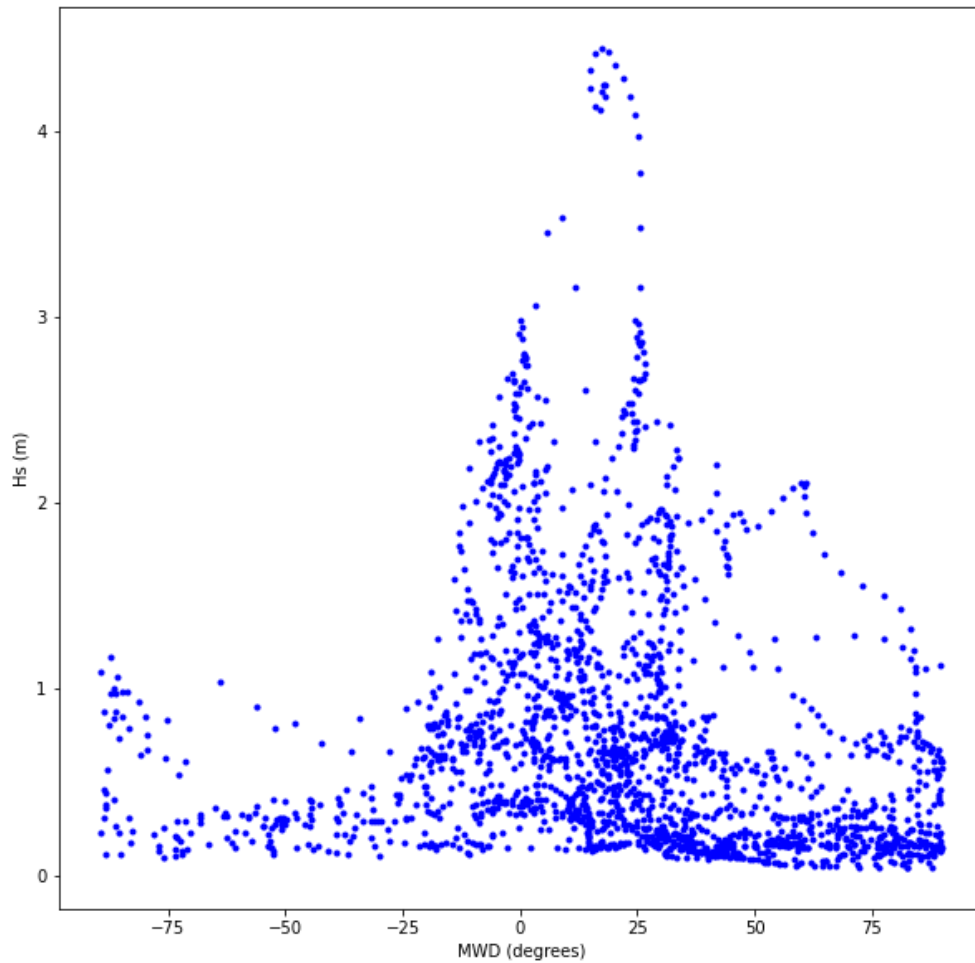
$$E_f = (\rho \cdot g \cdot H_s / 8) \cdot C_g \quad (3.1)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του νερού ( $1025 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ),  $H_s$  το σημαντικό ύψος κύματος και  $C_g$  η ταχύτητα ομάδας κυματισμών, σε βαθιά νερά.

Στην EFM ο υπολογισμός των επιμέρους κλάσεων γίνεται με την θεώρηση διαστημάτων «ίσης ενέργειας κύματος», με βάση τον παραπάνω τύπο. Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη ανάπτυξη της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε με την θεώρηση των 12 αντιπροσώπων:

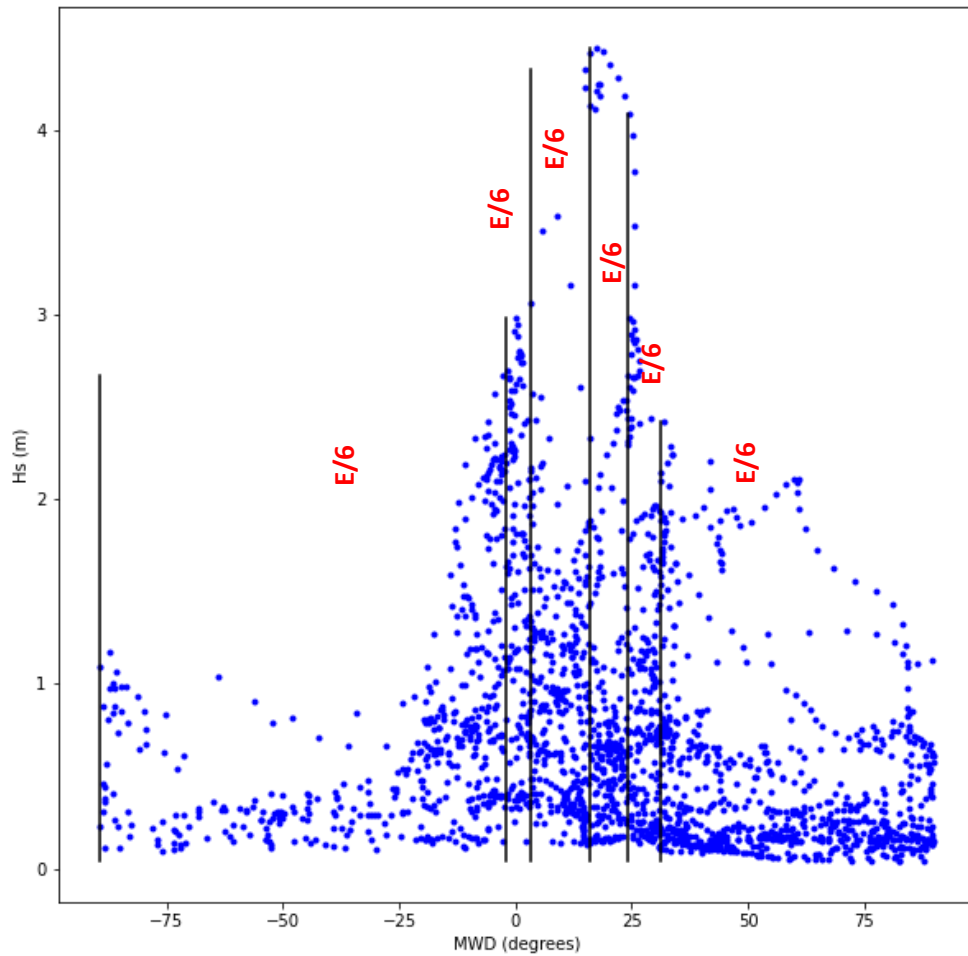
- Από το σύνολο των ωριαίων παρατηρήσεων, ως αρχικά δεδομένα, θα διατηρηθούν τα ύψη κύματος που έχουν διεύθυνση προσπίπτουσα κάθετα στην εκάστοτε ακτή ( $\pm 90^\circ$ ).

- Για το σύνολο των παρατηρήσεων κατασκευάζεται διάγραμμα ύψους κύματος ( $H_s$ ) και διεύθυνσης διάδοσης (MWD), όπως φαίνεται την εικόνα *Εικόνα 3.1*.



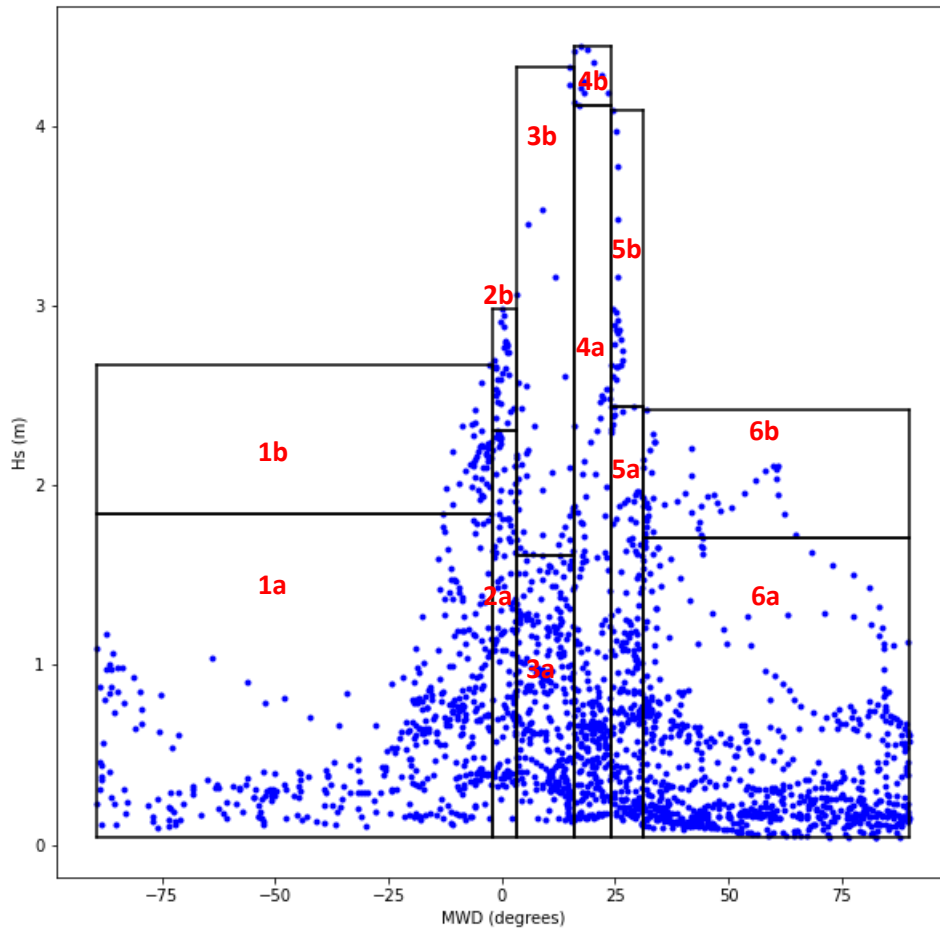
*Εικόνα 3.1: Παράδειγμα χρονοσειράς κυματικών παρατηρήσεων*

- Το διάγραμμα χωρίζεται σε 6 κατακόρυφες κλάσεις ενέργειας ίσης με  $E/6$ , όπου  $E$  η συνολική ροή ενέργειας στις χρονοσειρές του κύματος (*Εικόνα 3.2*).



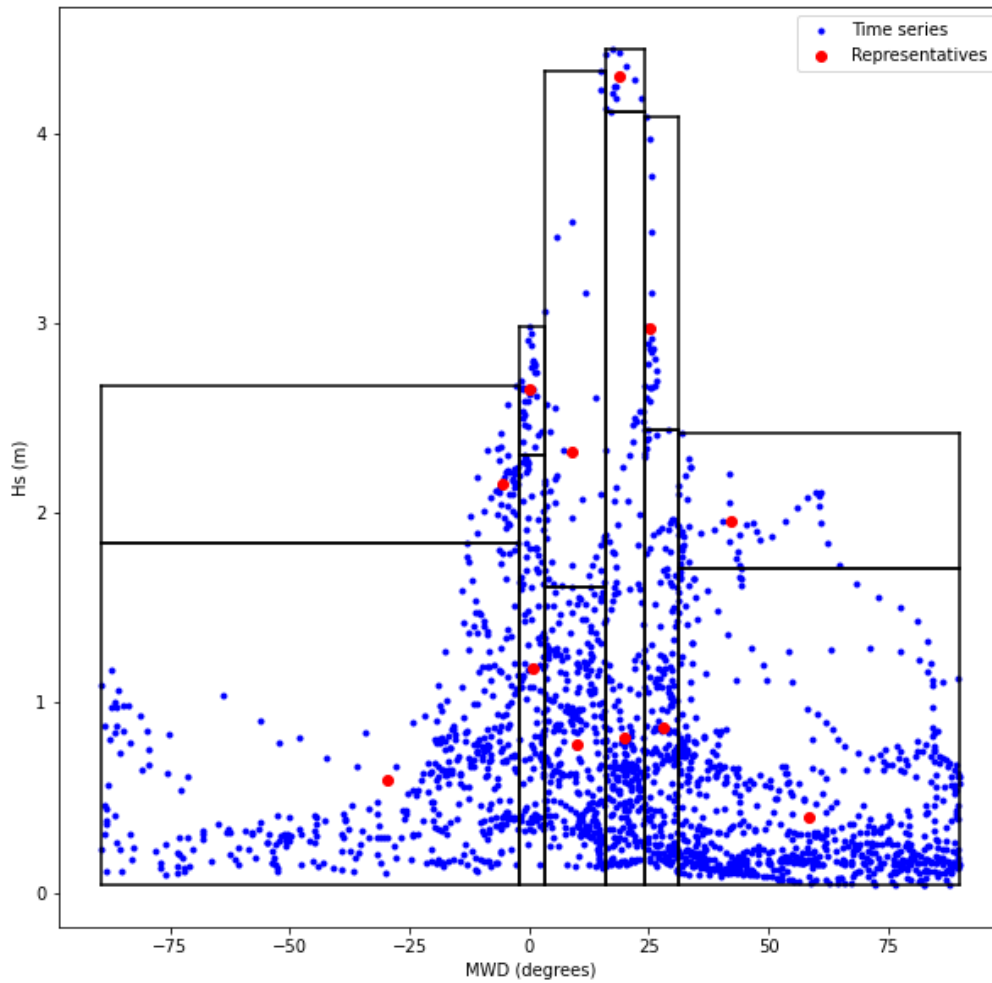
Εικόνα 3.2: Παράδειγμα κατακόρυφου διαχωρισμού κυμάτων κατά διεύθυνση Μέθοδος ροής ενέργειας

- Κάθε μια από τις παραπάνω κλάσεις χωρίζεται σε δύο επιμέρους οριζόντιες κλάσης ενέργειας ίσης με  $E/12$  (Εικόνα 3.3). Ως α ορίζεται η κλάση με τα μικρότερα ύψη κύματος και ως b η κλάση με τα μεγαλύτερα.



Εικόνα 3.3: Παράδειγμα οριζόντιου διαχωρισμού κυμάτων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος  
Μέθοδος ροής ενέργειας

- Αφού έχουν οριοθετηθεί οι 12 κλάσεις, ο αντιπρόσωπος της κάθε μιας υπολογίζεται ως μέσος όρος των παρατηρήσεων του κάθε κυματικού χαρακτηριστικού ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $MWD$ ), που αντιστοιχούν στην εκάστοτε κλάση (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα διαχωρισμού χρονοσειράς σε 12 κλάσεις και επιλογή 12 αντιπροσώπων  
Μέθοδος ροής ενέργειας

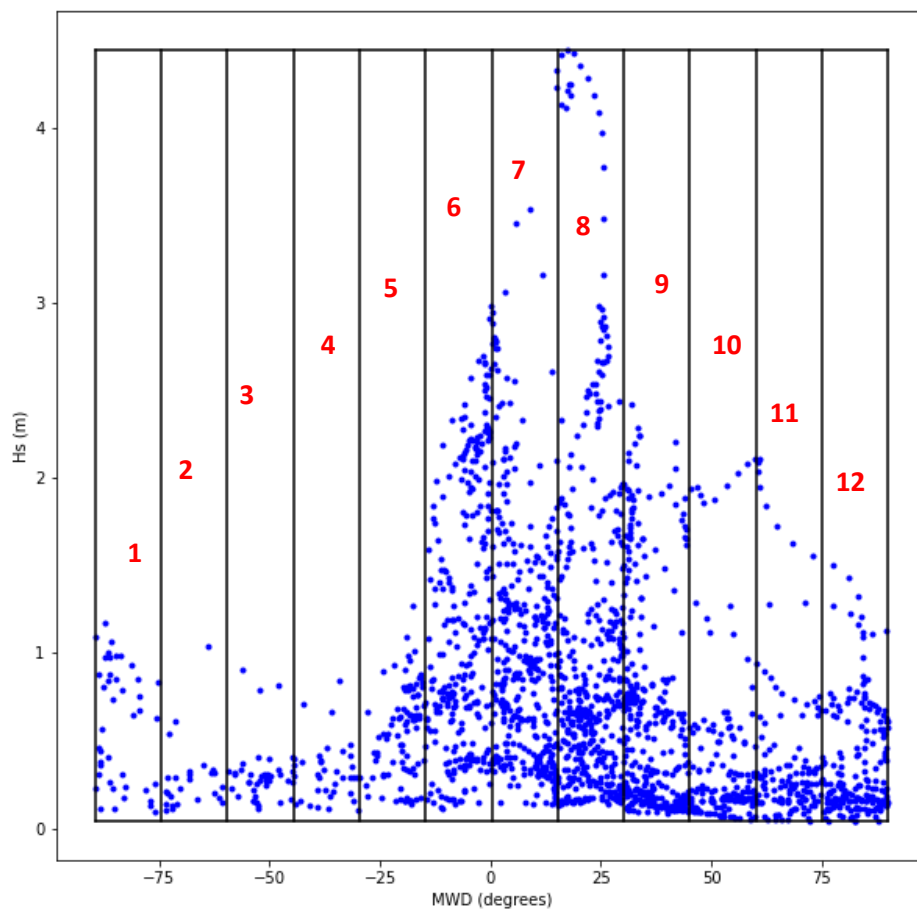
Παρόμοια διαδικασία ακολουθείται και για τις περιπτώσεις των και 6 των 18 αντιπροσώπων, διατηρώντας 2 τις οριζόντιες κλάσεις, με 3 και 9 κατακόρυφες κλάσεις αντίστοιχα.



### 3.2 Μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών (Equivalent Waves Method)

Η μέθοδος βασίζεται στην εργασία των Chonwattana κ.α. (2005) και Plecha κ.α. (2007), όπου κριτήριο για τον καθορισμό των αντιπροσώπων είναι να βρεθεί ένα απλοποιημένο κυματικό καθεστώς, το οποίο να προκαλεί μεταφορά ιζήματος κατά μήκος της ακτής, ισοδύναμη με αυτή που προκαλείται από το πλήρες κυματικό κλίμα. Για τον υπολογισμό των απλοποιημένων αντιπροσωπευτικών κυματικών συνθηκών εφαρμόζεται, τροποποιημένη, η μεθοδολογία των Chonwattana κ.α. (2005), όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω.

- Επαναλαμβάνεται η διαδικασία επιλογή κυμάτων με κατεύθυνση διάδοσης  $\pm 90^\circ$  ως προς τον προσανατολισμό της υπό μελέτη ακτής.
- Έπειτα, το διδιάστατο κυματικό κλίμα, χωρίζεται σε επιμέρους κλάσεις σταθερού βήματος, ως προς τη διεύθυνση των κυματισμών. Ο αριθμός των κλάσεων ορίζεται από τον επιθυμητό αριθμό αντιπροσώπων. Συνήθως επιλέγεται μικρός αριθμός αντιπροσώπων (κάτω από 10 στο σύνολο). Στην συγκεκριμένη δοκιμή, και για την συμπόρευση με την μέθοδο ροής ενέργειας (EFM), επιλέγεται η περίπτωση των 12 αντιπροσώπων, αρά το δείγμα επιμερίζεται σε 12 κατακόρυφα τμήματα ίσων διαστάσεων (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Παράδειγμα κατακόρυφου διαχωρισμού κυμάτων κατά διεύθυνση Μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών

- Σε κάθε κλάση υπολογίζονται, για κάθε κυματική καθεστώς, οι σταθερές:

$$C_1 = H_0^2 \cdot T \cdot \cos a_0 \quad (3.2)$$

$$C_2 = H_0^2 \cdot T \cdot \sin a_0 \quad (3.3)$$

$$C_3 = H_0^{5/2} \cdot (\cos a_0)^{1/4} \cdot \sin 2a_0 \quad (3.4)$$

Με  $H_0$  το ύψος κύματος,  $T$  την περίοδο και  $a_0$  την διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού, για κάθε πραγματικό κυματικό καθεστώς

Ως  $C_1$  ορίζεται η δύναμη στην κάθετη στην διεύθυνση της ακτής. Ως  $C_2$  ορίζεται η δύναμη κατά μήκος της διεύθυνση της ακτής. Με την θεώρηση πως η συνολική μεταφορά ιζημάτων κατά μήκος της ακτής παραμένει σταθερή, όσο στο πραγματικό κυματικό καθεστώς, τόσο και στο απλοποιημένο, τότε η εξίσωση  $C_3$  ορίζεται ως σταθερή.

- Για κάθε κλάση υπολογίζονται τρεις συντελεστές ισοδύναμου κύματος, συναρτήσει της πιθανότητας εμφάνισης το κάθε κυματικού καθεστώτος ( $p_i$ ), εντός της εκάστοτε κλάσης:

$$(C_{1,eq}, C_{2,eq}, C_{3,eq}) = \left( \frac{\sum p_i C_{1,i}}{\sum p_i}, \frac{\sum p_i C_{2,i}}{\sum p_i}, \frac{\sum p_i C_{3,i}}{\sum p_i} \right) \quad (3.5)$$

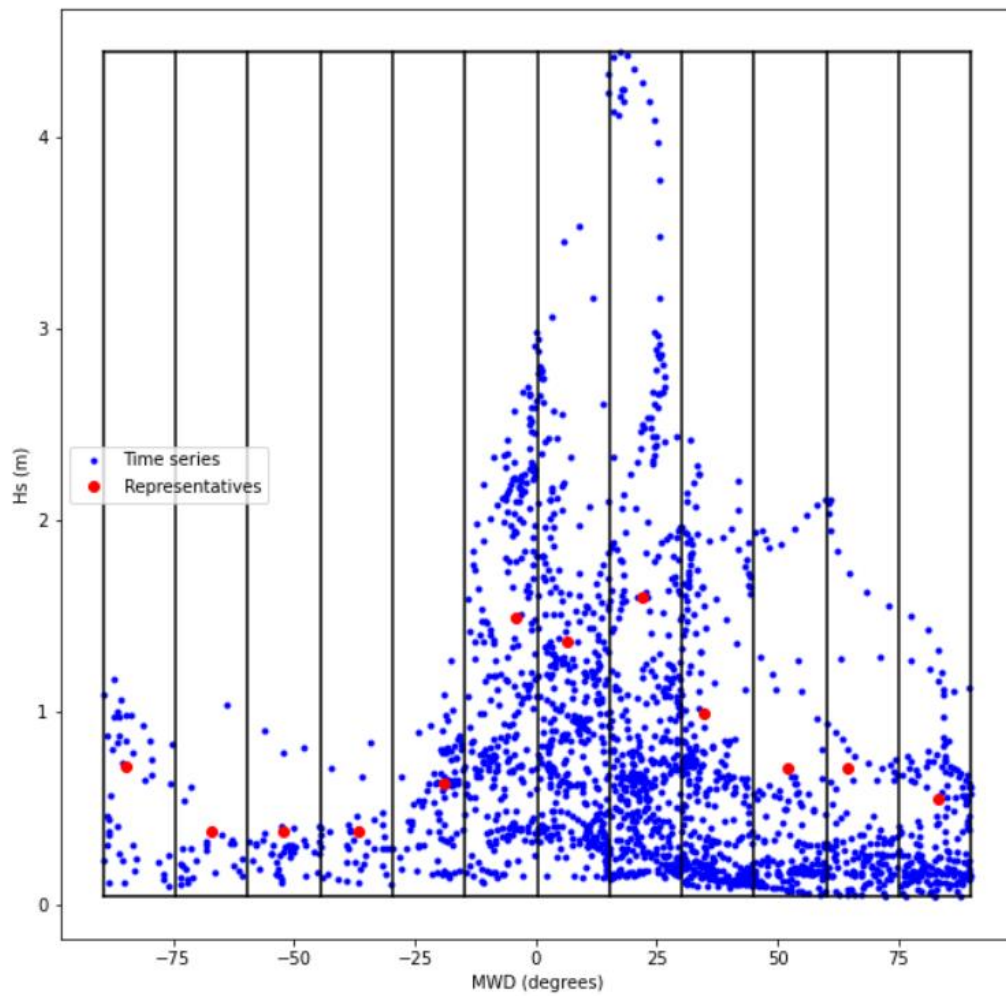
- Υπολογίζεται, για κάθε κλάση, ένα ισοδύναμο, αντιπροσωπευτικό κύμα:

$$a_{0,eq} = \arctan \frac{C_{2,eq}}{C_{1,eq}} \quad (3.6)$$

$$H_{0,eq} = \left( \frac{C_{3,eq}}{(\cos a_{0,eq})^{1/4} \cdot \sin 2a_{0,eq}} \right)^{2/5} \quad (3.7)$$

$$T_{0,eq} = \frac{C_{1,eq}}{H_{0,eq}^2 \cdot \cos a_{0,eq}} \quad (3.8)$$

Στην *Εικόνα 3.6* παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα διαχωρισμού σε 12 κλάσεις και σχηματοποίησης κυματικού κλίματος με τη μέθοδο των ισοδύναμων κυματισμών.



Εικόνα 3.6: Παράδειγμα διαχωρισμού χρονοσειράς σε 12 κλάσεις και επιλογή 12 αντιπροσώπων  
Μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών

### 3.3 Σύστημα μοντελοποίησης MIKE 21 Coupled Model FM

Στην εν λόγω εργασία, για την προσομοίωση της διάδοσης των κυματισμών, των κυματογενών ρευμάτων και τις στερεομεταφορές, για κάθε επιλεγμένο κυματικό αντιπρόσωπο χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο MIKE 21 Coupled Model FM που αναπτύχθηκε από το Danish Hydraulic Institute (DHI). Το Coupled Model FM είναι ένα συζευγμένο σύστημα μοντελοποίησης για δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα νερού, όπου με την προσθήκη “FM”, γίνεται αναφορά στον τύπο του πλέγματος του μοντέλου (πλέγμα με τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία). Στο συζευγμένο μοντέλο περιλαμβάνονται τα ακόλουθα υπομοντέλα:

- Hydrodynamic Module, HD
- Transport Module, TR
- Ecology Module, ECO Lab
- Oil Spill Module, ELOS
- Sand Transport Module, ST
- Mud Transport Module, MT
- Particle Tracking Module, PT
- Spectral Wave Module, SW

Για τις προσομοιώσεις που ακολούθησαν εφαρμόστηκε η σύζευξη τριών μοντέλων: Hydrodynamic, Sand Transport και Spectral Wave Module.

#### 3.3.1 MIKE 21 Spectral Waves Module FM

Το MIKE 21 Spectral Waves Module FM είναι ένα, τρίτης γενιάς, φασματικό μοντέλο κύματος-ανέμου, που προσομοιώνει ανάπτυξη και τον μετασχηματισμό των ανεμογενών κυματισμών σε υπεράκτιες και παράκτιες περιοχές. Το μοντέλο συμπεριλαμβάνει δύο ειδών αναπτύγματα:

- Το πλήρως φασματικό ανάπτυγμα (Fully spectral formulation), το οποίο βασίζεται στην εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης, όπως περιγράφεται από τους Komen κ.α. (1994) και Young (1999).
- Το αποσυζευγμένο ως προς την κατεύθυνση παραμετρικό ανάπτυγμα (Directional decoupled parametric formulation), με βάση μια παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της δράσης του κύματος. Η παραμετροποίηση γίνεται ως προς την συχνότητα, εισάγοντας το μηδέν και την πρώτη στιγμή της δράσης του κύματος. Οι βασικές εξισώσεις διατήρησης είναι διατυπωμένες σε καρτεσιανές συντεταγμένες, για εφαρμογές μικρής κλίμακας, και σε πολικές, σφαιρικές, συντεταγμένες, για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

Το πλήρως φασματικό ανάπτυγμα συμπεριλαμβάνει τα φυσικά φαινόμενα:

- Ανάπτυξη κυμάτων λόγω της επίδρασης του ανέμου.
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση κυμάτων.
- Διασπορά λόγω white-capping ή θραύση κυματισμών λόγω μεγάλης κλίσης.
- Διασπορά λόγω τριβής με τον πυθμένα.
- Διασπορά λόγω θραύσης σχετιζόμενης με τον πυθμένα.
- Διάθλαση και ρήχωση λόγω επιδράσεων βάθους.
- Αλληλεπίδραση κύματος-ρεύματος.
- Επίδραση του χρονικά μεταβαλλόμενου βάθους νερού.
- Επίδραση κάλυψης πάγου στο κυματικό πεδίο.

### Εξισώσεις Υπολογισμού πλήρους φασματικού αναπτύγματος

Στο MIKE 21 SW, τα ανεμογενή κύματα αντοπροσωπεύονται από το φάσμα της πυκνότητας της κυματικής δράσης  $N(\sigma, \theta)$ . Ως ανεξάρτητες παράμετροι είναι η σχετική, γωνιακή συχνότητα  $\sigma = 2\pi f$ , και η γωνιά διάδοσης του κυματισμού  $\theta$ , των οποίων η συσχέτιση προκύπτει μέσω της γωνιακής συχνότητας  $\omega$ , και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma = \sqrt{g \cdot k \cdot \tanh(kd)} = \omega - \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (3.9)$$

Όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $d$  το βάθος,  $\bar{U}$  το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος και  $\bar{k}$  το κυματικό διάνυσμα της ταχύτητας με μέγεθος  $k$  και κατεύθυνση  $\theta$ . Η πυκνότητα δράσης (action density),  $N(\sigma, \theta)$ , συσχετίζεται με την ενεργειακή πυκνότητα  $E(\sigma, \theta)$  μέσω της σχέσης:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (3.10)$$

Όσον αφορά το πλήρως φασματικό μοντέλο, το φάσμα των συχνοτήτων χωρίζεται σε δυο μέρη, το προγνωστικό μέρος συχνοτήτων μικρότερων από ένα κατώφλι (cut-off frequency),  $\sigma_{max}$  και το αναλυτικό μέρος για το τμήμα υψηλής συχνότητας του φάσματος (ουρά).

$$E(\sigma, \theta) = E(\sigma_{max}, \theta) \left( \frac{\sigma}{\sigma_{max}} \right)^{-m} \quad (3.11)$$

Όπου το  $m$  είναι σταθερό και ίσο με 5 (Komen κ.α, 1994).

Η κύρια εξίσωση που χρησιμοποιεί το μοντέλο MIKE 21 SW είναι η εξίσωση ισοζυγίου κυματικής δράσης (wave action balance equation), η οποία διατυπώνεται είτε σε καρτεσιανές είτε σε σφαιρικές συντεταγμένες. Σε καρτεσιανές συντεταγμένες η εξίσωση διατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3.12)$$

Όπου  $N(\bar{x}, \sigma, \theta, t)$  είναι η πυκνότητα της δράσης,  $t$  είναι ο χρόνος,  $\bar{x} = (x, y)$  το διάνυσμα των καρτεσιανών συντεταγμένων και  $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  είναι η ταχύτητα διάδοσης μιας ομάδας κυματισμών σε τετρα-διάστατο χώρο  $\bar{x}$ ,  $\sigma$  και  $\theta$ . Ως  $S$  ορίζεται ο όρος της πηγής της εξίσωσης ενεργειακού ισοζυγίου και το  $\nabla$  είναι ο τετρα-

διάστατος διαφορικός τελεστής στον χώρο  $\bar{x}$ ,  $\sigma$  και  $\theta$ . Οι χαρακτηριστικές ταχύτητες διάδοσης δίνονται από τις γραμμικές κινηματικές σχέσεις:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U} \quad (3.13)$$

$$c_\sigma = \frac{dx}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} \left[ \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} \cdot d \right] - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial \sigma} \quad (3.14)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right] \quad (3.15)$$

Με  $s$  την χωρική συντεταγμένη κατεύθυνσης του κύματος  $\theta$ , και  $m$  είναι μια συντεταγμένη κάθετη στην  $s$ .  $\nabla_{\bar{x}}$  είναι ο δισδιάστατος διαφορικός τελεστής στον χώρο  $\bar{x}$ .

Όσον αφορά την εξίσωση της πηγής, δίνεται από τον τύπο:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3.16)$$

Με τις παραμέτρους της εξίσωσης να αντιπροσωπεύουν:

- $S_{in}$ : την μεταφορά ορμής της ενέργειας του ανέμου στην γένεση του κυματισμού, [Janssen (1989, 1991), όπου η μεταφορά ορμής από τον άνεμο στην θάλασσα εξαρτάται από την πίεση του ανέμου και την θαλάσσια κατάσταση].
- $S_{nl}$ : την μεταφορά ενέργειας, λόγω μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των κυμάτων [DIA, Hasselmann κ.α., 1985].
- $S_{ds}$ : την απόσβεση της κυματικής ενέργειας λόγω white-capping [Hasselmann, 1974, και Janssen, 1989].
- $S_{bot}$ : την απόσβεση λόγω τριβής με τον πυθμένα [Johnson και Kofoed-Hansen, 2000].
- $S_{surf}$ : την απόσβεση της ενέργειας του κυματισμού λόγω θραύσης που προκαλείται από το βάθος του πυθμένα (Battjes and Janssen, 1978).

Οι προεπιλεγμένες παράμετροι της εξίσωσης της πηγής στο MIKE 21 SW είναι παρόμοιες με τις του μοντέλου WAM Cycle 4 (Komen κ.α., 1994).

Η χωρική διακριτοποίηση, σε γεωγραφικό και φασματικό χώρο, γίνεται με την μέθοδο των κέντρων κελιών πεπερασμένου όγκου. Στο γεωγραφικό πεδίο χρησιμοποιείται ένα αδόμητο πλέγμα, το οποίο διακρίνεται από την υποδιαίρεση του συνεχούς χώρου σε μη επικαλυπτόμενα στοιχεία. Στο μοντέλο MIKE 21 SW υποστηρίζονται τρίγωνα και τετράγωνα τέτοια στοιχεία. Η πυκνότητα της δράσης  $N(\sigma, \theta)$ , αναπαρίσταται ως τμηματική σταθερά και αποθηκεύεται στο γεωμετρικό κέντρο του κάθε στοιχείου. Στο φασματικό πεδίο χρησιμοποιείται είτε ισόποση, είτε λογαριθμική διακριτοποίηση. Στο πεδίο των κατευθύνσεων επιλέγεται ισόποση διακριτοποίηση. Στο πεδίο του φάσματος και της κατεύθυνσης, η πυκνότητα της δράσης  $N(\sigma, \theta)$ , αναπαρίσταται ως τμηματική σταθερά στα διακριτά διαστήματα  $\Delta\sigma$  και  $\Delta\theta$ .

Η ενσωμάτωση της διατήρησης της κυματική δράσης σε μια περιοχή  $A_i$ , στο διάστημα συχνοτήτων και κατευθύνσεων  $\Delta\sigma_i$  και  $\Delta\theta_i$ , αντίστοιχα, δίνει :

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_i} \int_{A_i} N d\Omega d\sigma d\theta - \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_i} \int_{A_i} \frac{S}{\sigma} d\Omega d\sigma d\theta = \int_{\Delta\theta_m} \int_{\Delta\sigma_i} \int_{A_i} \nabla \cdot (\bar{v}N) d\Omega d\sigma d\theta \quad (3.17)$$

Όπου  $\Omega$  είναι η μεταβλητή ολοκλήρωσης που ορίζεται στο  $A_i$ .

Χρησιμοποιώντας το θεώρημα της απόκλισης, εισάγεται η έννοια της συναγωγικής ροής (convective flux)  $\bar{F} = \bar{v}N$ , η οποία προκύπτει χρησιμοποιώντας ένα ανοδικό (upwind) σχήμα επίλυσης πρώτης τάξης. Σε αυτό:

$$F_n = c_n \left( \frac{1}{2} (N_i + N_j) - \frac{1}{2} \frac{c}{|c|} (N_i + N_j) \right) \quad (3.18)$$

Όπου  $c_n$  είναι η ταχύτητα διάδοσης στην επιφάνεια του κελιού.

Η ολοκλήρωση στον χρόνο βασίζεται στην προσέγγιση κλασματικού βήματος (fractional step), κατά την οποία:

- Αρχικά, εκτελείται ένα βήμα διάδοσης, υπολογίζοντας μια κατά προσέγγιση λύση  $N^*$  στο επόμενο χρονικό βήμα ( $n + 1$ ), επιλύοντας της εξίσωση διατήρησης της δράσης του ομογενούς κύματος, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι όροι της πηγής.
- Έπειτα, εκτελείται ένα βήμα διάδοσης, υπολογίζοντας μια νέα λύση  $N^{n+1}$  από την εκτιμώμενη, λαμβάνοντας υπόψιν τους όρους της πηγής.

Τα βήματα διάδοσης πραγματοποιούνται με το ρητό σχήμα Euler:

$$N^*_{i,l,m} = N^n_{i,l,m} + \Delta t \left( \frac{\partial N_{i,l,m}}{\partial t} \right)^n \quad (3.19)$$

Για να ξεπεραστεί ο περιορισμός της σταθερότητας, χρησιμοποιείται ένα σχήμα ολοκλήρωσης πολλαπλών ακολουθιών. Έτσι αυξάνεται το μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας μια σειρά βημάτων τοπικής ολοκλήρωσης, όπου ο αριθμός των βημάτων μπορεί να διαφέρει από σημείο σε σημείο.

Όσον αφορά τα βήματα του όρου της πηγής χρησιμοποιείται ένα πεπλεγμένο σχήμα (Komen κ.α., 1994):

$$N^{n+1}_{i,l,m} = N^n_{i,l,m} + \Delta t \left[ \frac{(1-a)S^*_{i,l,m} + aS^{n+1}_{i,l,m}}{\sigma_l} \right] \quad (3.20)$$

Όπου  $a$  είναι ένας συντελεστής στάθμισης που καθορίζει τον τύπο της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών.

Ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο MIKE 21 SW εισέρχονται:

- Το υπολογιστικό πλέγμα,
- Το επιλεγόμενο σύστημα συντεταγμένων,
- Το μήκος και το χρονικό βήμα της προσομοίωσης,
- Προσδιορισμός εξισώσεων
- Διακριτοποίηση συχνότητας και κατεύθυνσης,
- Αριθμός ομάδων χρονικών βημάτων και χρονικών βημάτων πηγής,
- Δεδομένα βαθυμετρίας, ρευμάτων, ανέμου, παγετού,
- Παράμετροι πηγής,
- Γεωγραφική τοποθεσία περιοχής,
- Αρχικές συνθήκες,
- Οριακές συνθήκες (κλειστά και ανοικτά όρια).

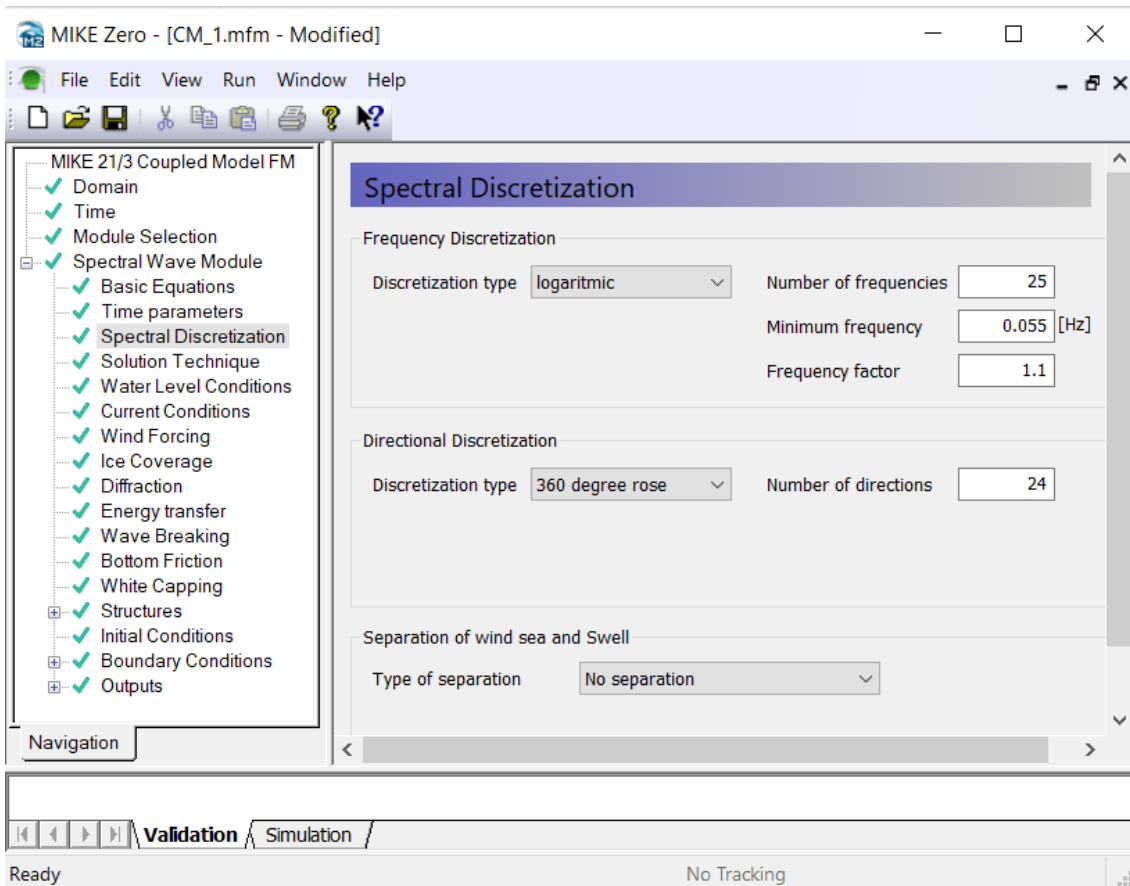
Για κάθε σημείο του πλέγματος και για κάθε χρονικό βήμα το μοντέλο MIKE 21 SW μπορεί να υπολογίσει τους παρακάτω τύπους δεδομένων εξόδου:

- Κυματικές παραμέτρους, όπως το σημαντικό ύψος κύματος, η περίοδος κορυφής και η διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού.
- Παραμέτρους εισόδου, όπως η στάθμη του νερού, το βάθος και η ταχύτητα του ανέμου.
- Παραμέτρους του μοντέλου, όπως ο συντελεστής τριβής με τον πυθμένα και η παράμετρος θραύσης.
- Φάσματα κύματος κατευθυντικής συχνότητας, σε επιλεγμένα σημεία ή περιοχές του πλέγματος, φάσματα κατεύθυνσης και φάσματα συχνότητας.

Για την επεξεργασία και την οπτικοποίηση των δεδομένων εξόδου γίνεται χρήση του εργαλείου Data Viewer, μέσω του οποίου προβάλλονται πλέγματα, φάσματα, βαθυμετρίες και άλλα γραφικά στοιχεία.

Στην *Εικόνα 3.7* παρουσιάζεται το περιβάλλον χρήση του MIKE 21 για το μοντέλο Spectral Waves Module.





Εικόνα 3.7: Περιβάλλον χρήση του MIKE 21 - Spectral Waves Module

### 3.3.2 Hydrodynamic Module FM

Το μοντέλο του MIKE 21, Hydrodynamic Module FM, προσομοιώνει τις διαφοροποιήσεις της στάθμης του νερού και τη δημιουργία ρευμάτων ανταποκρινόμενο σε μια ποικιλία από διαφορετικές περιπτώσεις φορτίσεων (forcing functions) σε πλημμυρικές πεδιάδες, σε λίμνες, εκβολές ποταμών και παράκτιες περιοχές.

Το υδροδυναμικό μοντέλο συνδυάζεται με το μοντέλων ιζημάτων, για να προσομοιαστεί η μεταφορά μη συνεκτικών και συνεκτικών ιζημάτων. Στην παράκτια ζώνη η μεταφορά καθορίζεται κυρίως από την κυματικές συνθήκες και τα θαλάσσια ρεύματα. Τα προερχόμενα από το κύμα ρεύματα παράγονται από τις κλίσεις στις τάσεις ακτινοβολίας που εμφανίζονται εντός της ζώνης θραύσης, οι οποίες υπολογίζονται από το Spectral Wave Module.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται σε προσομοιώσεις με το μοντέλο MIKE 21 & MIKE 3 Flow FM – Hydrodynamic Module είναι τα ακόλουθα:

- Πλημμύρες και ξήρανση,
- Διασπορά ορμής,
- Διατμητική τάση πυθμένα,
- Δύναμη Coriolis,
- Διατμητική τάση ανέμου,
- Βαρομετρικές διαβαθμίσεις πίεσης,
- Κάλυψη πάγου,
- Παλιρροιακό δυναμικό,
- Κατακρήμνιση/εξάτμιση,
- Τάσεις ακτινοβολίας κυμάτων,
- Πηγές και καταβόθρες.

Το σύστημα μοντελοποίησης βασίζεται στην αριθμητική επίλυση του δισδιάστατου ή τρισδιάστατου Reynolds, τις εξισώσεις Navier Stokes, τις παραδοχές Boussinesq και την υδροστατική πίεση. Έτσι, το μοντέλο αποτελείται από τις εξισώσεις της συνέχειας, της ορμής, της θερμοκρασίας, της αλατότητας, της πυκνότητας και ολοκληρώνεται από ένα τυρβώδες τελικό σχήμα. Η πυκνότητα δεν εξαρτάται από το πίεση, αλλά μόνο στη θερμοκρασία και την αλατότητα. Για το τρισδιάστατο μοντέλο, λαμβάνεται η ελεύθερη επιφάνεια λαμβάνεται υπόψιν χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματισμό sigma συντεταγμένων ή χρησιμοποιώντας συνδυασμό ενός συστήματος συντεταγμένων sigma και zlevel.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι κύριες εξισώσεις, με την χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων:

- Εξίσωση συνέχειας:  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$  (3.21)

- Εξίσωση ορμής x:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$
 (3.22)

- Εξίσωση ορμής y:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \rho_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^{\eta} \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$
 (3.23)

- Θερμοκρασία:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{H} + T_s S$$
 (3.24)

- Αλατότητα:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s - \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + \bar{H} + s_s S$$
 (3.25)

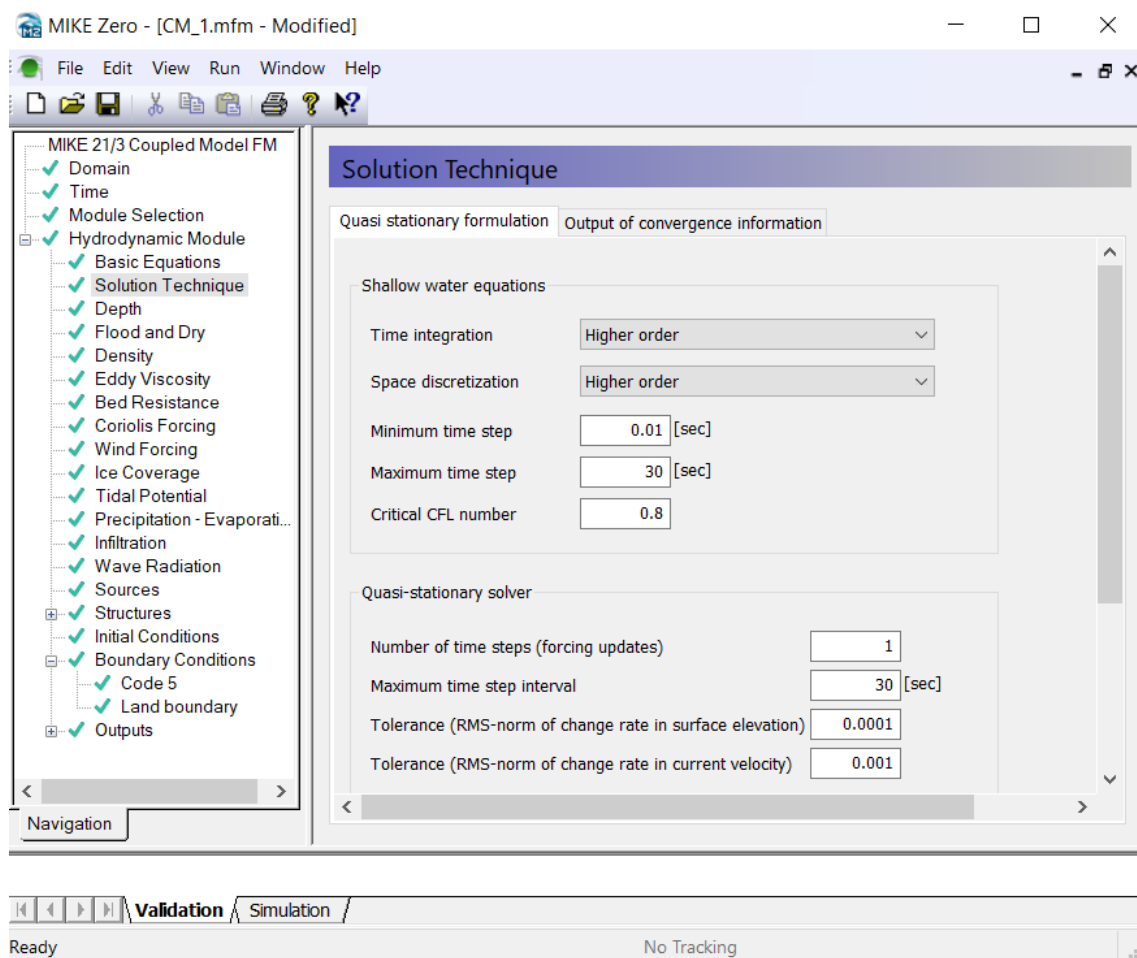
- Οριζόντια διάχυση:

$$(F_T, F_s) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$
 (3.26)

Η χωρική διακριτοποίηση των εξισώσεων εκτελείται χρησιμοποιώντας μια κυτταροκεντρική μέθοδο πεπερασμένου όγκου, όπου ο χωρικός τομέας διακρίνεται σε υποδιαίρέσεις του που σχηματίζουν μη επικαλυπτόμενα στοιχεία/κελιά. Στο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιείται ένα αδόμητο πλέγμα, ενώ στο κατακόρυφο χρησιμοποιείται δομημένο πλέγμα του τρισδιάστατου μοντέλου. Στο 2D μοντέλο τα στοιχεία μπορεί να είναι τρίγωνα ή τετράπλευρα, ενώ στο τρισδιάστατο μοντέλο τα ενδέχεται να είναι πρίσματα ή πολύπλευρα, των οποίων οι οριζόντιες όψεις είναι τρίγωνα και τετράπλευρα στοιχεία.

Ως δεδομένα εισόδου το μοντέλο δέχεται, μεταξύ άλλων, το υπολογιστικό πλέγμα, την βαθυμετρία, τις αρχικές συνθήκες της στάθμης του νερού και των συνιστωσών της ταχύτητας, τις οριακές συνθήκες ως προς τα κλειστά όρια και την ροή του νερού. Τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα εξόδου σε κάθε στοιχείο πλέγματος και για κάθε χρονικό βήμα αποτελούνται από βασικές μεταβλητές, όπως το βάθος και η ανύψωση της επιφάνειας του νερού και η πυκνότητα ροής στις κύριες διευθύνσεις, και πρόσθετες μεταβλητές, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ρεύματος και η ταχύτητα του ανέμου. Τα αποτελέσματα εξόδου μπορούν να αποθηκευτούν σε καθορισμένα σημεία, γραμμές και περιοχές του πλέγματος. Στην περίπτωση των τρισδιάστατων μοντέλων τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε μια επιλογή επιπέδων.

Στην *Εικόνα 3.8* παρουσιάζεται το περιβάλλον χρήση του MIKE 21 για το μοντέλο Hydrodynamic Module.



*Εικόνα 3.8: Περιβάλλον χρήση του MIKE 21 - Hydrodynamic Module*

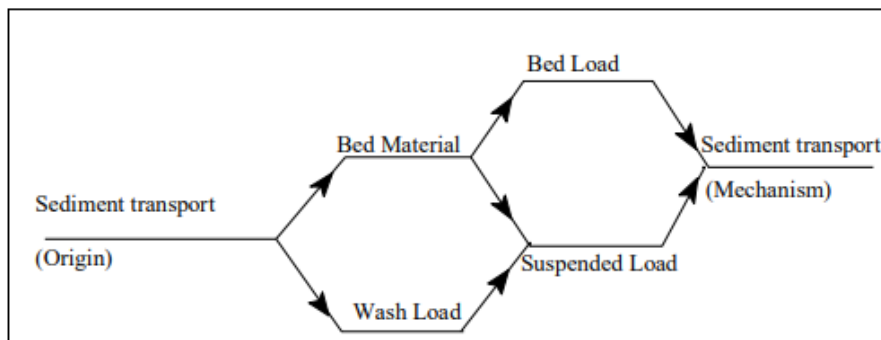
### 3.3.3 Sand Transport Module

Η μεταφορά ιζημάτων ορίζεται σε τρεις τρόπους μεταφοράς:

- Φορτίο πυθμένα (bedload).
- Αιωρούμενο φορτίο (suspended load), το οποίο ορίζεται ως το φορτίο το οποίο αιωρείται στο υγρό για κάποιο χρονικό διάστημα.
- Φορτίο απόπλυσης (wash load), το οποίο ορίζεται ως το φορτίο που κινείται κατά μήκος του πυθμένα, το οποίο θεωρείται λεπτότερο του φορτίου κλίνης.

Στην *Εικόνα 3.9* παρουσιάζεται σχηματικά η ταξινόμηση των ιζημάτων, σύμφωνα με Jansen κ.α. (1979).

Συνήθως, μια διάμετρος κόκκου περίπου 0,06mm χωρίζει την περιοχή του φορτίου πλύσης και του φορτίου κλίνης. Στο συγκεκριμένο μοντέλο λαμβάνεται υπόψη μόνο το φορτίο κλίνης. Παρακάτω περιγράφονται σχηματικά οι σχέσεις των ιζημάτων κατά τους Engelund & Hansen (1967) and Jansen κ.α. (1979).



Εικόνα 3.9: Ταξινόμηση μεταφοράς ιζημάτων -πηγή: Jansen κ.α., 1979

Το MIKE 21 Sand Transport Module, υπολογίζουν την μεταφορά του ιζήματος με τέσσερις τύπους μοντέλων:

- Καθαρό ρεύμα,
- Καθαρό ρεύμα – πολλαπλών κλασμάτων/ πολλαπλών στρώσεων (Multi fraction/Multi layer),
- Συνδυασμός κύματος-ρεύματος,
- Πεδίο τρισδιάστατης ροής (3D Flow Field).

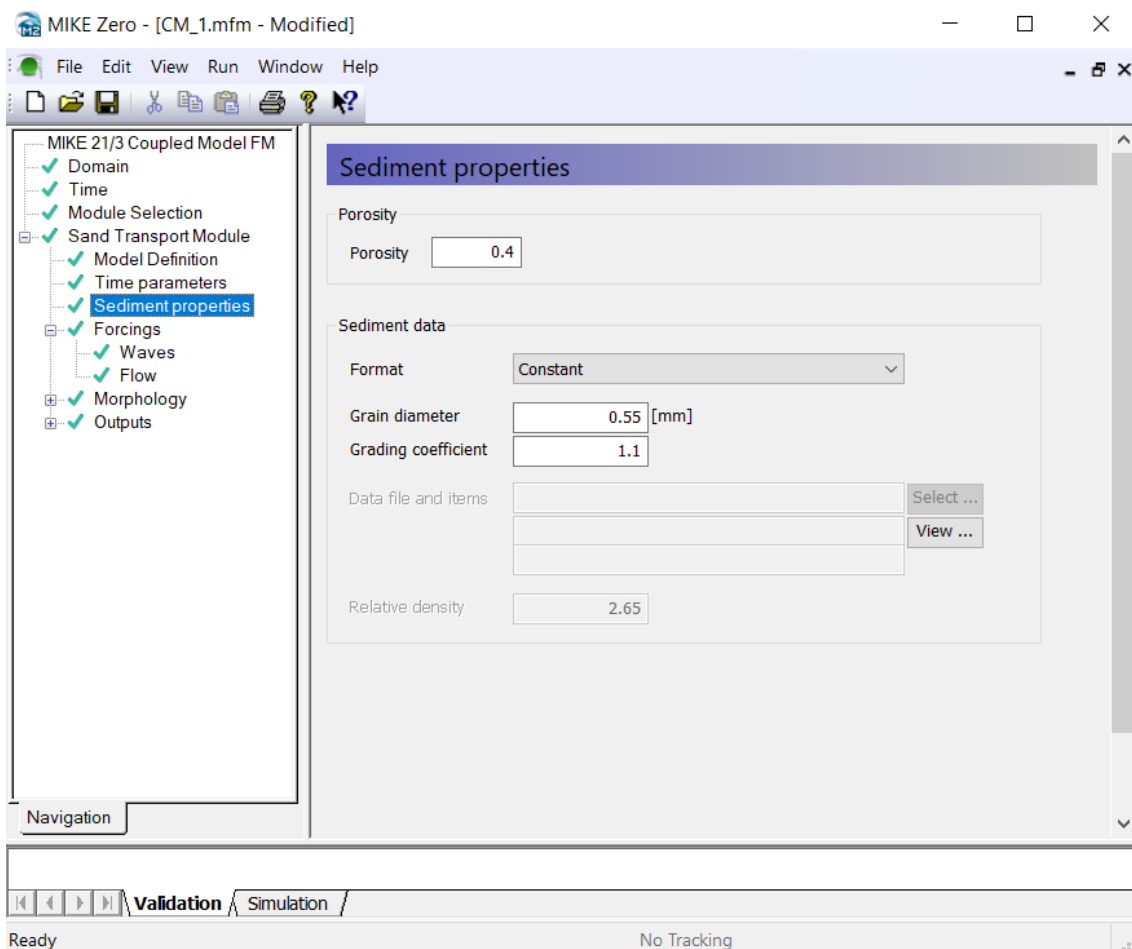
Στους τρεις πρώτους τύπους μοντέλων πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί μεταφοράς του ιζήματος χρησιμοποιώντας μια συνιστώσα μέσης οριζόντιας ταχύτητας. Η μεταφορά του ιζήματος σε πεδίο ροής γίνεται κυρίως κοντά στον πυθμένα, ακόμα και για το τμήμα του ιζήματος που αποτελεί το αιωρούμενο φορτίο. Έτσι, οι υπολογισμοί μεταφοράς ιζήματος με αυτούς τους τύπους μοντέλων δεν είναι πραγματικά τρισδιάστατοι, αλλά εκτελείται σε δύο διαστάσεις στην οριζόντια κατεύθυνση. Ωστόσο, περιλαμβάνονται οι εξισώσεις που μπορούν να δώσουν ένα πιο λεπτομερές τρισδιάστατο μοντέλο για τις ίδιες υδροδυναμικές συνθήκες. Όταν χρησιμοποιείται το μοντέλο MIKE 3 Flow Model FM, με εξισώσεις Navier-Stokes ή το MIKE 3 Wave Model FM, οι πραγματικοί τρισδιάστατοι υπολογισμοί μεταφοράς του ιζήματος

μπορούν να γίνουν με το πεδίο τρισδιάστατης ροής, το οποίο χρησιμοποιεί το τρισδιάστατο διάνυσμα διατμητικής τάσης του πυθμένα, από το υδροδυναμικό μοντέλο, για τον υπολογισμό της μεταφοράς ιζήματος.

Για τις επιλογές «Καθαρό ρεύμα» ή «Καθαρό ρεύμα - Multi fraction/Multi layer» ο ρυθμός μεταφοράς ιζήματος υπολογίζεται απευθείας κατά την προσομοίωση με βάση την πραγματικές συνθήκες. Για την επιλογή «Συνδυασμός κύματος-ρεύματος», ο ρυθμός μεταφοράς ιζήματος υπολογίζεται από γραμμική παρεμβολή, μέσω ενός πίνακα μεταφοράς ιζημάτων. Αυτός ο πίνακας δημιουργείται εκ των προτέρων από το βοηθητικό πρόγραμμα MIKE 21 Toolbox «Generation of Q3D Sediment Tables». Για την επιλογή «Πεδίο τρισδιάστατης ροής», ο ρυθμός μεταφοράς ιζήματος υπολογίζεται απευθείας κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, με βάση τις πραγματικές συνθήκες.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο ρυθμός μεταφοράς του ιζήματος υπολογίζεται χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι επιπτώσεις της αδράνειας, και συνεπώς υπάρχει υπερεκτίμηση των τιμών της μεταφοράς σε περιπτώσεις μεγάλων κόκκων.

Στην *Εικόνα 3.9* παρουσιάζεται το περιβάλλον χρήση του MIKE 21 για το μοντέλο Sand Transport Module.



*Εικόνα 3.10: Περιβάλλον χρήση του MIKE 21 - Sand Transport Module*

Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι εξισώσεις υπολογισμού της στερεομεταφοράς που χρησιμοποιεί το μοντέλο πεδίου τρισδιάστατης ροής (3D Flow Field).

- *Στερεομεταφορά φορτίου πυθμένα*

Το μοντέλο των Kovacs και Parker (1994) χρησιμοποιεί μια εναλλακτική προσέγγιση για την εκτίμηση της μεταφοράς φορτίου πυθμένα σε επικλινείς πυθμένες, κατά την οποία θεωρείται πως μια ισορροπία δυνάμεων ενός σωματιδίου μειώνονται σε:

$$|u_r|u_r = (s - 1)gd_{50}a_f^2 \frac{\theta_{c0}}{2} \left( |k_n| \frac{v_p}{|v_p|} - \frac{k_t}{\mu_d} \right) \quad (3.26)$$

Όπου

$u_r$ : η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στην ταχύτητα κοντά στην περιοχή του πυθμένα ( $u_b$ ) και το διάνυσμα της ταχύτητας των σωματιδίων ιζήματος ( $v_p$ ).

$k_n$  και  $k_t$ : διανύσματα κανονικά και εφαπτομενικά στο επίπεδο της κλίνης.

$\mu_d$ : δυναμικός συντελεστής τριβής κίνησης του ιζήματος.

$a_f$ : συντελεστής ταχύτητας τριβής.

Η κρίσιμη παράμετρος Shields τροποποιείται από την κλίση του πυθμένα:

$$\left| \frac{\theta_c}{\theta_{c0}} \hat{s} + \frac{k_t}{\mu_d} \right| = |k_n| \quad (3.27)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο αδιάστατος όγκος του ιζήματος φορτίου πυθμένα ανά μονάδα επιφάνειας πυθμένα:

$$\xi = \frac{\theta' - \theta_c}{\left( \mu_d |k_n| \frac{v_p}{|v_p|} - k_t \right) \hat{s}} \quad (3.28)$$

Όπου η συνιστώσα τριβής επιφάνειας, της παραμέτρου  $\theta'$  Shields, εκτιμάται από της σχέση Engelund & Fredsøe (1982):

$$\theta' = \begin{cases} \min(0.06 + 0.3\theta^{1.5}, \theta), & \theta_c \leq \theta \leq 0.55 \\ \theta, & \theta \geq 0.55 \end{cases} \quad (3.29)$$

Έτσι, ο διανυσματικός όγκος του ρυθμού μεταφοράς φορτίου πυθμένα, ανά μονάδα κανονικού πλάτους, υπολογίζεται από:

$$S_{bl} = \xi d_{50} v_p \quad (3.30)$$

- *Στερεομεταφορά φορτίου σε αιώρηση*

Το τρισδιάστατο μοντέλο μεταφοράς ιζήματος χρησιμοποιεί την εξίσωση τρισδιάστατης κίνησης-διασποράς:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + (w - w_s) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad (3.31)$$

Η συγκέντρωση του πυθμένα υπολογίζεται από την ταχύτητα τριβής της κλίνης ( $U_f$ ), με βάση τη διατμητική τάση του πυθμένα, που προέρχεται από το υδροδυναμικό μοντέλο. Η συγκέντρωση του πυθμένα  $c_b$  θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει την συγκέντρωση σε ύψος  $2d_{50}$  από τον πυθμένα. Η τιμή της συγκέντρωσης του πυθμένα μπορεί να υπολογιστεί από δύο εμπειρικούς τύπους:

1. Engelund και Fredsøe:

$$c_b = \frac{0.65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)^3} \quad (3.32)$$

$$\text{Όπου } \lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_{c0} - \frac{\pi}{6}\mu_d p}{0.0275\theta'}} \quad (3.33)$$

Και  $p$  η πιθανότητα κίνησης ενός κόκκου ιζήματος, σύμφωνα με τους Engelund και Fredsøe (1976), προσδιορίζεται από την έκφραση:

$$p = \left[ 1 + \left( \frac{\frac{\pi}{6}\mu_d}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}}, \quad \theta' > \theta_c \quad (3.34)$$

2. Zyserman και Fredsøe:

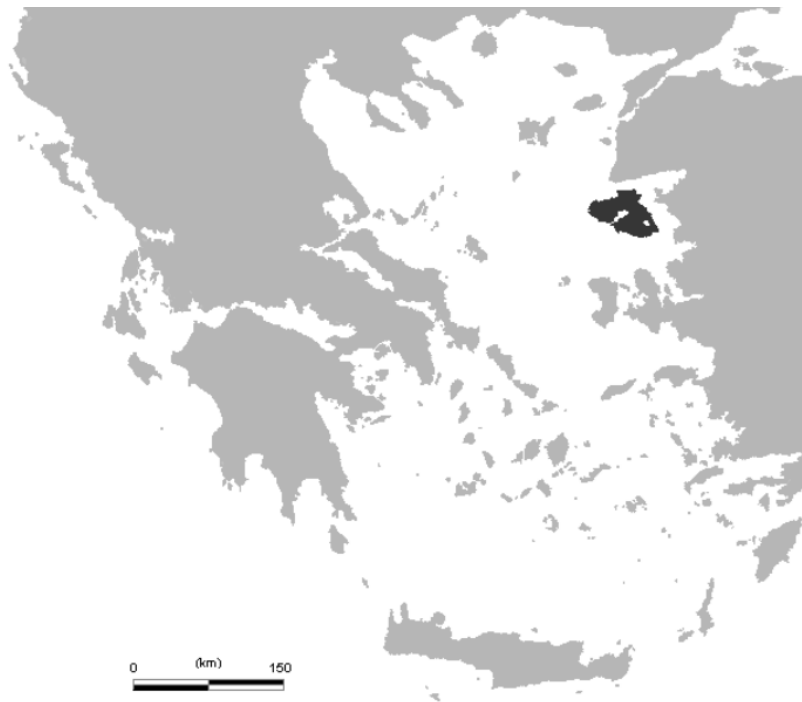
$$c_b = \frac{0.331(\theta - \theta_c)^{1.75}}{1 + \frac{0.331}{0.46}(\theta - \theta_c)^{1.75}} \quad (3.35)$$

## 4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

### 4.1 Το νησί της Λέσβου

#### 4.1.1 Γενικά και ιστορικά στοιχεία

Η Λέσβος βρίσκεται στο βορειοανατολικό Αιγαίο, απέναντι από τις τουρκικές ακτές (Εικόνα 4.1), και αποτελεί το τρίτο σε μεγαλύτερο νησί της Ελλάδας, μετά την Κρήτη και την Εύβοια. Έχει έκταση 1636 km<sup>2</sup> και μήκος ακτογραμμής 459 km. Σύμφωνα με την απογραφή του 2021, καταγράφηκε πως διαθέτει πληθυσμό 83068 κατοίκων, με την πλειονότητα αυτών να συγκεντρώνονται στην πόλη της Μυτιλήνης, στο νοτιοανατολικό άκρο του νησιού.



Εικόνα 4.1: Το νησί της Λέσβου – πηγή: wikipedia.org

Τον Σεπτέμβριο του 2012 ολόκληρο το νησί της Λέσβου εντάχθηκε στο Παγκόσμιο Δίκτυο Γεωπάρκων της UNESCO, λόγω της ιδιαίτερης γεωλογικής αξίας του Απολιθωμένου Δάσους (Εικόνα 4.2), το οποίο έχει χαρακτηριστεί διατηρητέο φυσικό μνημείο. Γενικότερα, η ποικιλότητα του φυσικού περιβάλλοντος είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της Λέσβου. Η μορφολογία της ενδοχώρας είναι κυρίως ημιορεινή, τραχιά και ανώμαλη, με τους προεξέχοντες βράχους να μην είναι ασβεστολιθικοί, αλλά κυρίως ηφαιστειακοί, με μια ροπή προς τα περισσότερο όξινα εδάφη. Αυτό περιορίζει ελαφρώς τη χλωρίδα του νησιού, η οποία αποτελείται κυρίως από πευκώνες και ελαιώνες.

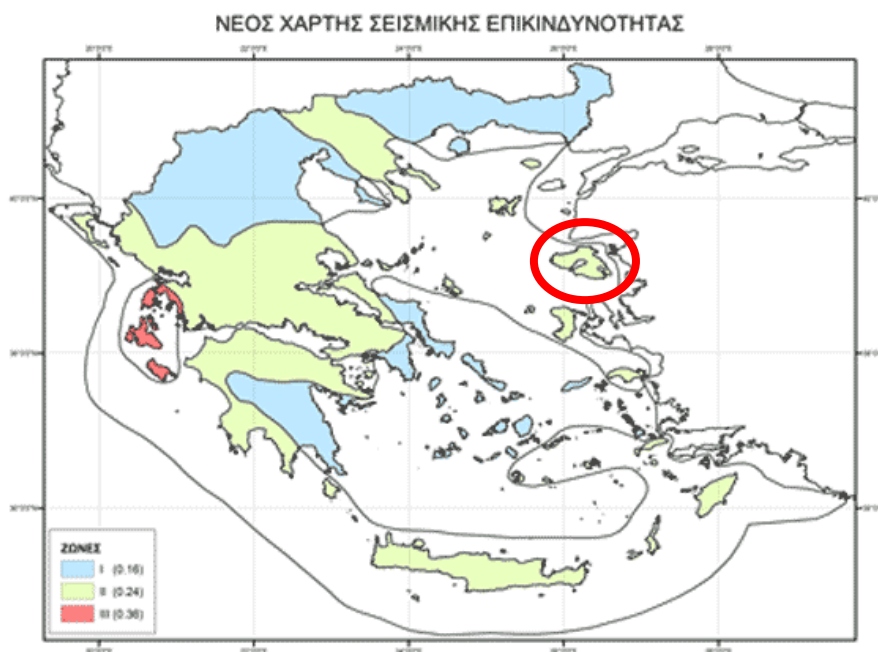




Εικόνα 4.2: Απολιθωμένο δάσος Λέσβου – πηγή: lesvosmuseum.gr

Το κλίμα, στο ανατολικό τμήμα του νησιού παρατηρείται ξηρό, αποκλίνον προς το ημίυγρο, με τιμές του δείκτη υγρασίας από  $-20$  έως  $0$  και παρουσιάζει μεγάλο σχετικά πλεόνασμα νερού κατά το χειμώνα. Στα δυτικά επικρατεί ημίξηρο κλίμα, με μικρό πλεόνασμα νερού κατά το χειμώνα, και χαμηλή εξατμισοδιαπνοή από  $855$  έως  $995\text{mm}$  (Λειβαδίτης Γ. κ.α., 2004).

Η Λέσβος βρίσκεται στη μικροπλάκα του Αιγαίου, κοντά στον νοτιοδυτικό κλάδο του βόρειου ρήγματος της Ανατολίας, και τοποθετείται σε ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας II (Εικόνα 4.3) για τον Ελλαδικό χώρο. Έχουν παρατηρηθεί τρία κύρια συστήματα ρηγμάτων: ένα βορειοανατολικής διεύθυνσης (BA), ένα βορειοδυτικής (BD), κατά την οποία συναντάται το μεγαλύτερο μήκος ρηγμάτων και ένα με διεύθυνση B-N (Κατσικάτσος κ.α., 1993).



Εικόνα 4.3: Χάρτης ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας Ελλάδος – πηγή: ΕΑΚ 2003



Μετά την άλωση της Κωνσταντινούπολης, το νησί πολιορκείται από τον Μωάμεθ Β' και τον στόλο του και η Μυτιλήνη παραδίδεται ύστερα από 14 ημέρες (1462 μ.Χ.). Κατά τη διάρκεια της Τουρκοκρατίας το νησί δέχτηκε αρκετές επιδρομές από Ενετούς, Γάλλους, Ιωαννίτες Ιππότες της Ρόδου και Σαρακηνούς.

Η Λέσβος απελευθερώθηκε από τους Οθωμανούς στις 8 Νοεμβρίου του 1912 από τον στόλο του ναυάρχου Παύλου Κουντουριώτη κατά τη διάρκεια του Α' Βαλκανικού Πολέμου. Ωστόσο, η Λέσβος γίνεται επίσημο κομμάτι της Ελλάδας το 1920, στη συνθήκη των Σεβρών. Στον Α' Παγκόσμιο Πόλεμο στο νησί εγκαθίστανται μονάδες του αγγλογαλλικού στόλου με εγκαταστάσεις.

Μετά τη Μικρασιατική Καταστροφή το 1922, καταφεύγουν στη Λέσβο πολλές οικογένειες Μικρασιατών. Μετέπειτα, η Λέσβος δέχεται Έλληνες πρόσφυγες της Μικράς Ασίας, ενώ ο πληθυσμός των μουσουλμάνων αναγκάζεται να φύγει. Το νησί καταλαμβάνεται από τον γερμανικό στρατό το 1941, η οποία κράτησε ως το 1944.

Λόγω της μικρής απόστασης του νησιού από τα τουρκικά παράλια (περίπου 10 χιλιόμετρα), η Λέσβος σήμερα δέχεται μεγάλο αριθμό προσφύγων, και αποτελεί ενδιάμεσο πέρασμα των προσφύγων προς την Αθήνα και μετά προς την υπόλοιπη Ευρώπη. Το 2015 παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του αριθμού των μεταναστών προς την Ευρώπη και δημιουργήθηκαν κέντρα υποδοχής στη Μόρια και στον Καρά Τεπέ.



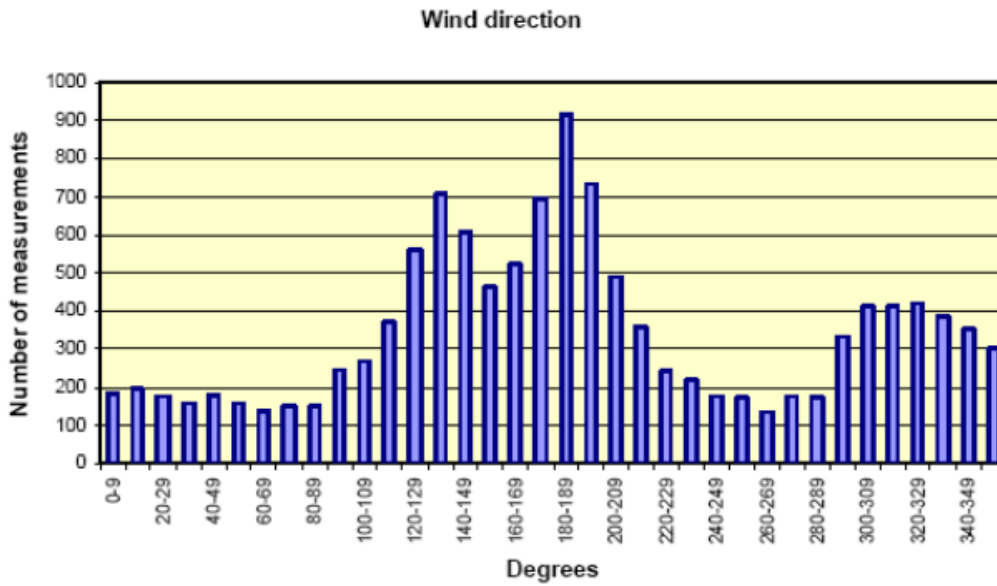


Εικόνα 4.6: Σκάλα Ερεσού – πηγή: travel.gr

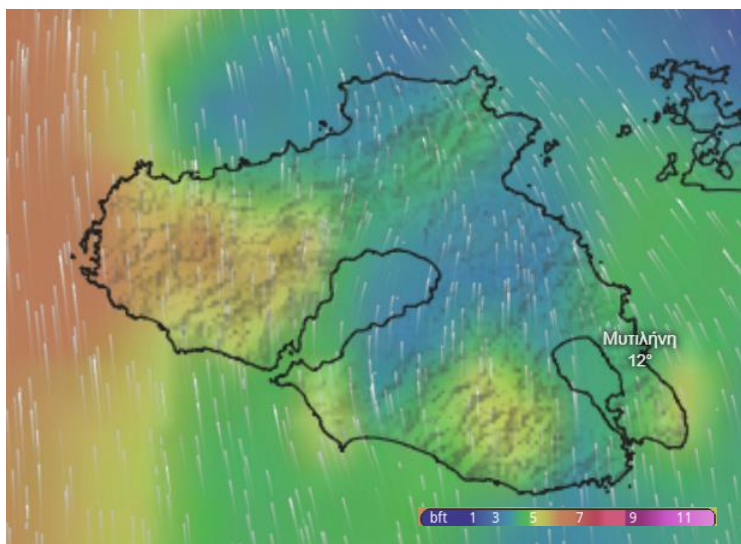
#### 4.2.2 Κλιματικές συνθήκες

Όσον αφορά τις χαρακτηριστικές κλιματολογικές συνθήκες της Ερεσού, το ετήσιο εύρος θερμοκρασίας είναι μικρότερο των 20°C, το μέσο θερμομετρικό εύρος είναι 17°C και η μέση ετήσια θερμοκρασία 17.6°C. Η θερμοκρασία παρουσιάζει ακραίες τιμές τους μήνες Ιανουάριο και Αύγουστο, ενώ έντονες βροχοπτώσεις παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του χειμώνα και ξηρά καλοκαίρια. Το ύψος της βροχής μεγιστοποιείται το Δεκέμβριο και ελαχιστοποιείται τον Ιούλιο (Πασακαλίδου, 2007).

Η παραλία της Ερεσού είναι εκτεθειμένη σε νοτιοανατολικούς (ΝΑ), νότιους (Ν), νοτιοδυτικούς (ΝΔ), και δυτικούς (Δ) ανέμους, όπως παρουσιάζεται και στο γράφημα της *Εικόνας 4.7*, για το σύνολο ανεμολογικών μετρήσεων που εκτελέστηκαν την περίοδο 1999-2003 (Αδαμάκης, 2005). Οι ισχυρότεροι άνεμοι στην περιοχή είναι κυρίως ΒΑ διεύθυνσεως και ταχύτητας  $\leq 20\text{m/s}$ . Σε μεγαλύτερη συχνότητα όμως, παρατηρούνται ΝΑ και Ν άνεμοι, οι οποίοι επηρεάζουν σημαντικά την διαμόρφωση του προφίλ της παραλίας. Στην *Εικόνα 4.8*, παρουσιάζεται, ενδεικτικά, άνεμος νότιας διεύθυνσης και μέσης ταχύτητας 11 m/s, από το σύστημα παρακολούθησης και πρόβλεψης θαλάσσιου περιβάλλοντος, Poseidon System.



Εικόνα 4.7: Παρουσίαση του συνολικού αριθμού μετρήσεων των ανέμων 1999-2003 - πηγή: Αδαμάκης, 2005



Εικόνα 4.8: Άνεμος επιφανείας (10μ) - πηγή: Poseidon System

#### 4.2.3 Μορφολογικά στοιχεία ακτής πυθμένα

Η βαθυμετρία του κόλπου χαρακτηρίζεται από μικρές κλίσεις κοντά στην ακτή (5m βάθος μέχρι και 300m από την ακτή), ενώ παρατηρούνται μεγαλύτερες κλίσεις (100m βάθος σε απόσταση 0.9 -1.4km) στην συνέχεια (Αδαμάκης, 2005). Σημαντική για την διαμόρφωση της βαθυμετρίας και της υδροδυναμικής της θαλάσσιας περιοχής είναι η ύπαρξη μικρών βραχονησίδων, ανατολικά της ακτής. Στην παραλία εμφανίζεται μεγάλη ζώνη απόσβεσης, για αυτόν τον λόγο η κυματική διάθλαση επηρεάζει σημαντικά στην υδροδυναμική συμπεριφορά της περιοχής. Η περιοχή δεν δέχεται πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας, γεγονός που οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της διάθλασης και στον προσανατολισμό της ακτής.

Η παραλία έχει κυρτό σχήμα και τα κύρια μορφολογικά χαρακτηριστικά που παρατηρούνται είναι τα εξής:

- Ύφαλοι αναβαθμοί (longshore bars), που εντοπίζονται κυρίως στο σημείο της θραύσης των κυματισμών.
- Έξαλλοι αναβαθμοί (berms), στο χερσαίο τμήμα της παραλίας.
- Ημισελινοειδείς σχηματισμοί (beach cusps), στο μέτωπο της παραλίας.
- Εσωτερική παραλία (backshore). Η συμπεριφορά της εσωτερικής παραλίας, ελέγχεται κυρίως από την παράκτια αεροδυναμική και από την παρουσία ή μη θινών (sand dunes).

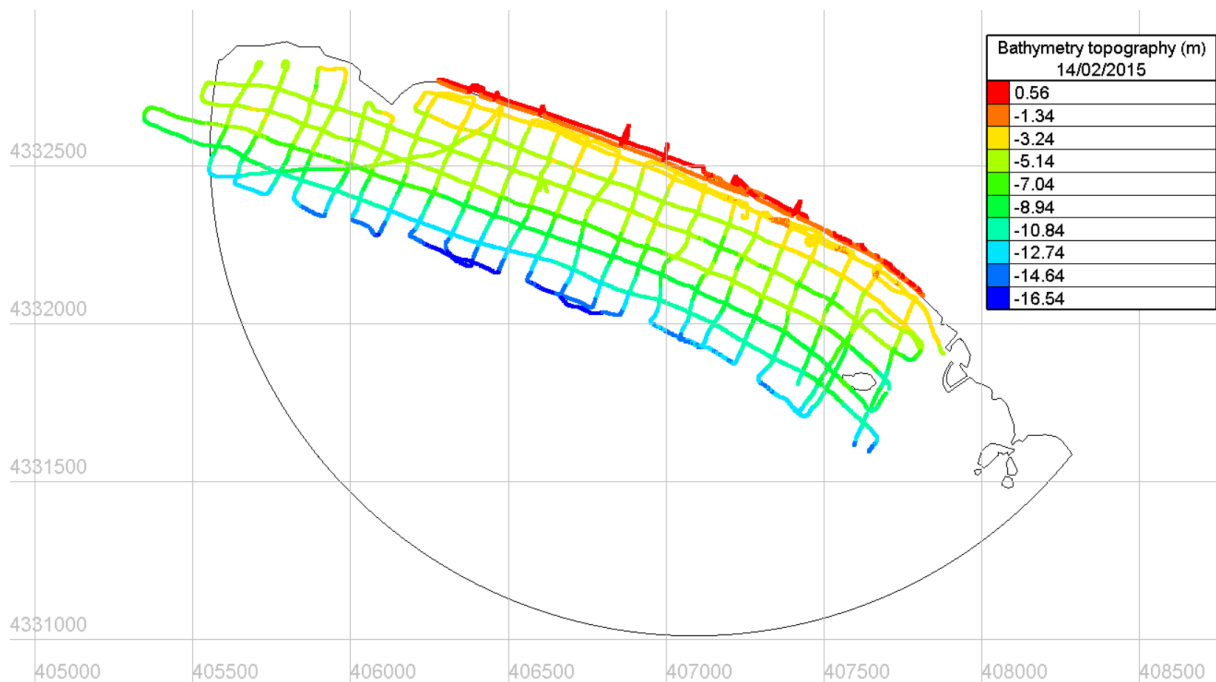
Το νότιο και ανατολικό τμήμα του νησιού καλύπτεται από μεταμορφωσιγενή πετρώματα περιδοτίτες και σερπεντινίτες, φυλλίτες και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους με ενδιαστρώσεις μαρμάρων ανωπαλαιοζωικής-τριαδικής ηλικίας (Παπάκης, 1966). Στο βόρειο, δυτικό και νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού, μεταξύ των οποίων ανήκει και η παραλία της Ερεσού, έχει παρατηρηθεί η ανάπτυξη παράκτιων σωρών άμμου (θίνες). Στην περιοχή μελέτης, το ύψος τους κυμαίνεται από 1.5m έως 2m και εκτείνονται σε πλάτος περίπου 500m από την ακτή. Το μέσο μέγεθος της άμμου κυμαίνεται από 0.3-1.3mm (Λειβαδίτης Γ. κ.α., 2004).

Η παραλία της Σκάλας (μήκους ακτογραμμής περίπου 2km) και ιδίως το κομμάτι του οικισμού, σύμφωνα με μελέτη του Τμήματος Επιστημών Θάλασσας του Πανεπιστημίου Αιγαίου, έχει υποστεί καταστροφική διάβρωση. Κάποια από τα βασικά αίτια της διάβρωσης είναι η έκθεση σε ΝΑ ανέμους, οι οποίοι ενισχύουν την κυματική δράση προς τα δυτικά και άρα και την μετακίνηση ιζημάτων προς το δυτικό τμήμα της παραλίας. Ένας ακόμα παράγοντας που επηρεάζει την διαμόρφωση της ακτής είναι το χωμάτινο φράγμα της τεχνίτης λίμνης της Ερεσού, το οποίο συγκρατεί μεγάλο ποσοστό των φερτών υλικών και τροφοδοτεί το ρέμα της Χαλάνδρας.

#### 4.3 Διαθέσιμες μετρήσεις - Δημιουργία υπολογιστικού πεδίου

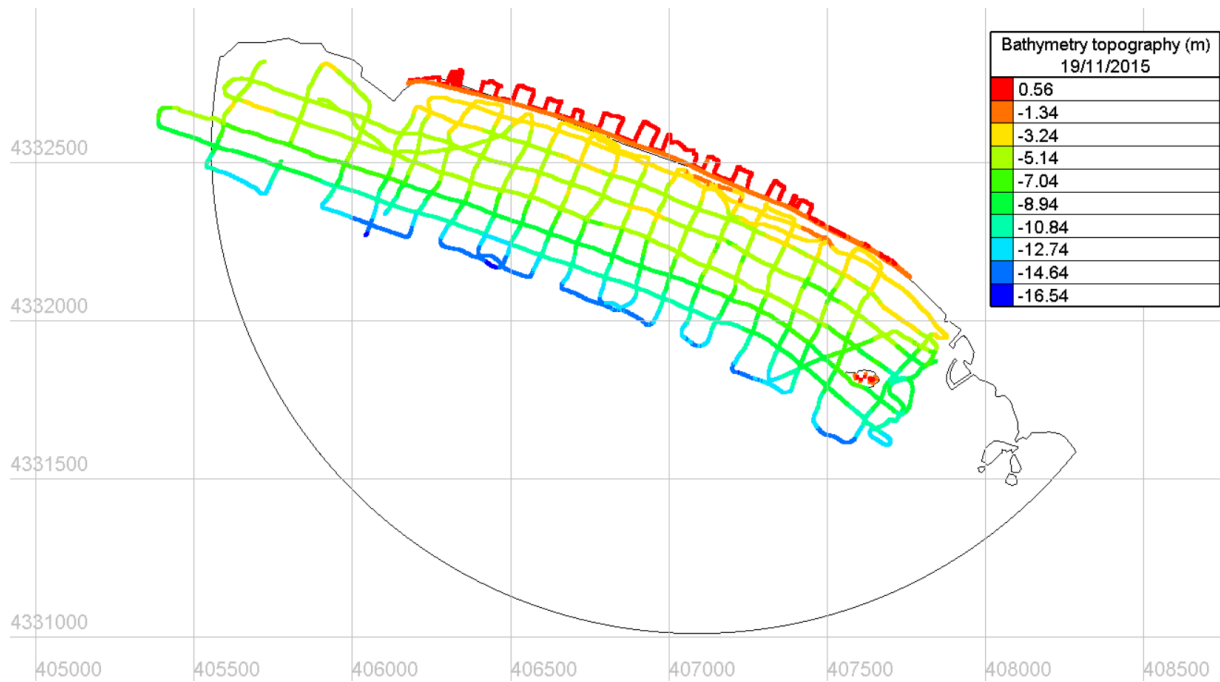
Για την χάραξη της ακτογραμμής μέσω του προγράμματος QGIS, χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη αεροφωτογραφία της περιοχής, η οποία ήταν διαθέσιμη στο Google Earth (2021). Η ακτογραμμή σχεδιάστηκε με λεπτομέρεια, σε έκταση μεγαλύτερη της περιοχής ενδιαφέροντος, και έπειτα ορίστηκε τοξωτό ανοικτό όριο το οποίο να συμπεριλαμβάνει την ισοβαθή των 50 m, όπως αποτυπώνεται στους ηλεκτρονικούς χάρτες πλοήγησης Navionics. Με χρήση των εργαλείων του προγράμματος ArcMap, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των συντεταγμένων και των βαθών στο Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Συντεταγμένων WGS 84/UTM zone 35N, και ακολούθησε η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης δεδομένων για υδραυλικά μοντέλα, BlueKenue.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν δυο μετρήσεις πεδίου βαθυμετρίας και τοπογραφίας εντός του έτους 2015 (Ανδρεάδης, 2022). Οι μετρήσεις εκτελέστηκαν στις 14/02/2015 (Εικόνα 4.9) και στις 19/11/2015 (Εικόνα 4.10), και οπτικοποιήθηκαν μέσω της χρήσης του προγράμματος BlueKenue.



Εικόνα 4.9: Τοπογραφία βαθυμετρίας Ερεσού 14/02/2015

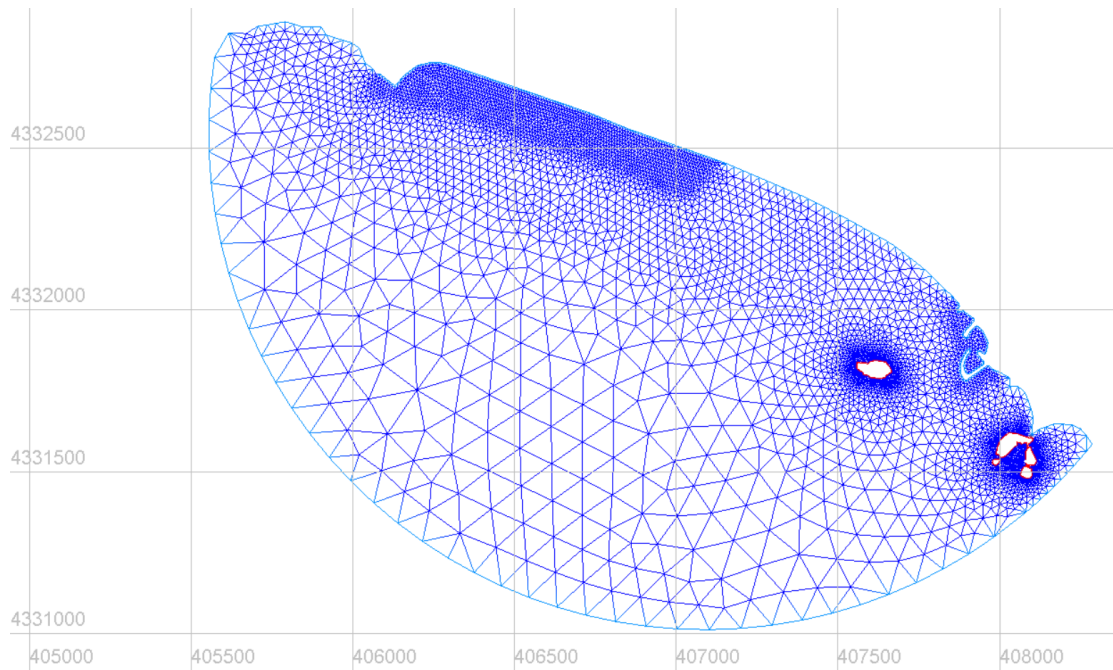




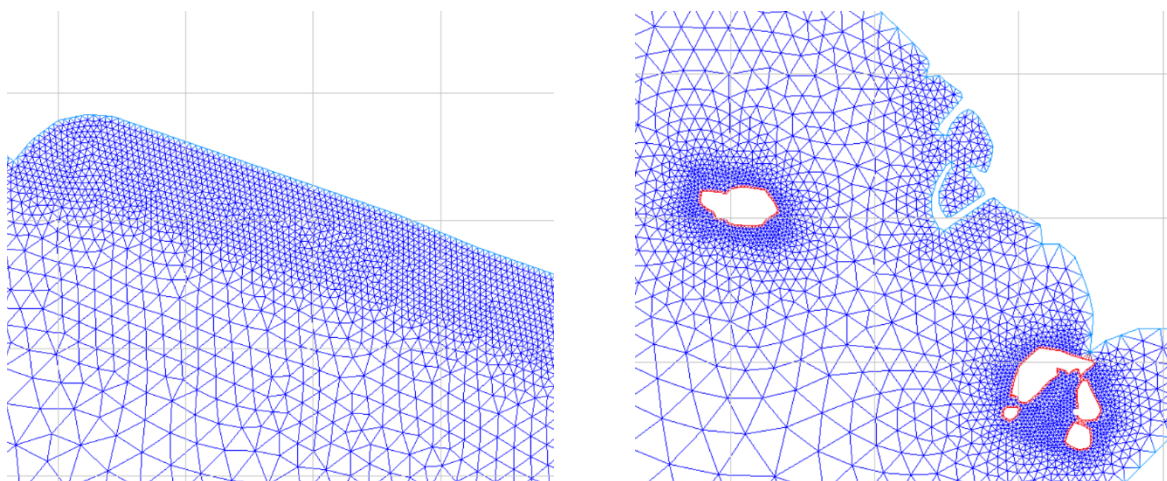
Εικόνα 4.10: Τοπογραφία βαθυμετρίας Ερεσού 19/11/2015

Για την ενίσχυση των υπάρχουσών μετρήσεων με μεγαλύτερα βάθη, προστέθηκαν, μέσω του προγράμματος QGIS, οι ισοβαθείς των -20, -30 και -50m, οι οποίες εξήχθησαν από τους ηλεκτρονικούς χάρτες πλοήγησης Navionics.

Στη συνέχεια, δημιουργείται το τριγωνικό πλέγμα (Εικόνα 4.11), το οποίο πυκνώνεται, σε διαφορετικό βαθμό, σε σημεία όπου απαιτείται περισσότερη λεπτομέρεια, όπως στα όρια της ακτογραμμής, κοντά στις βραχονησίδες, στην περιοχή του λιμένα και στην περιοχή των μετρήσεων πεδίου, όπως φαίνεται στις λεπτομέρειες της Εικόνας 4.12.

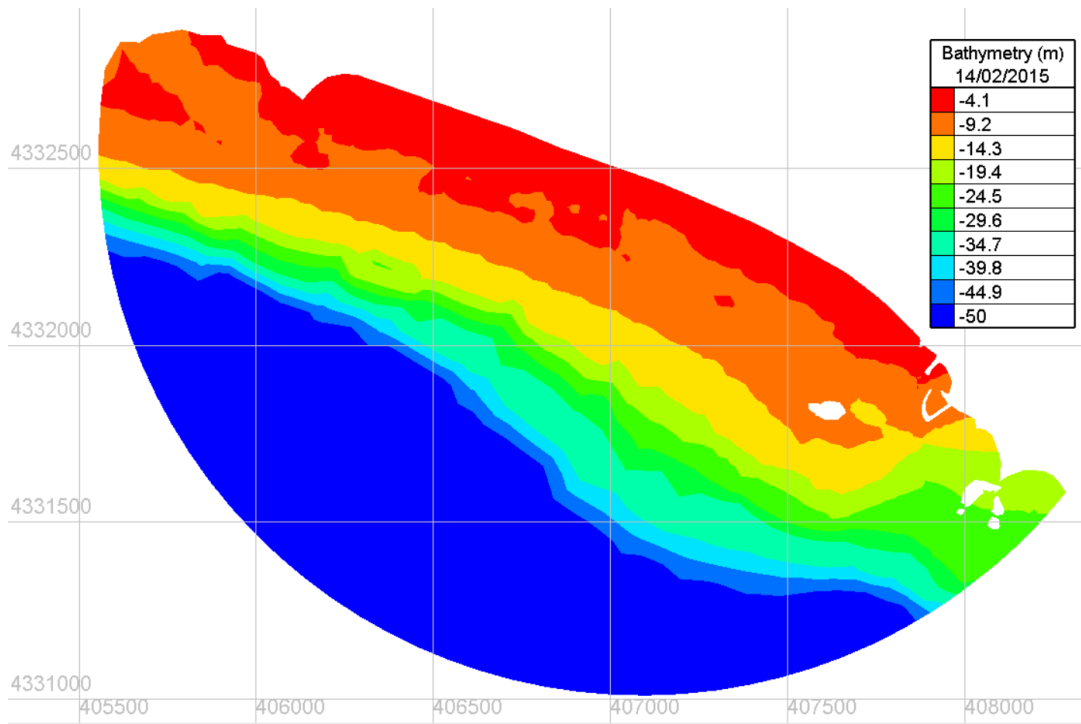


Εικόνα 4.11: Κανάθος υπολογιστικού πεδίου

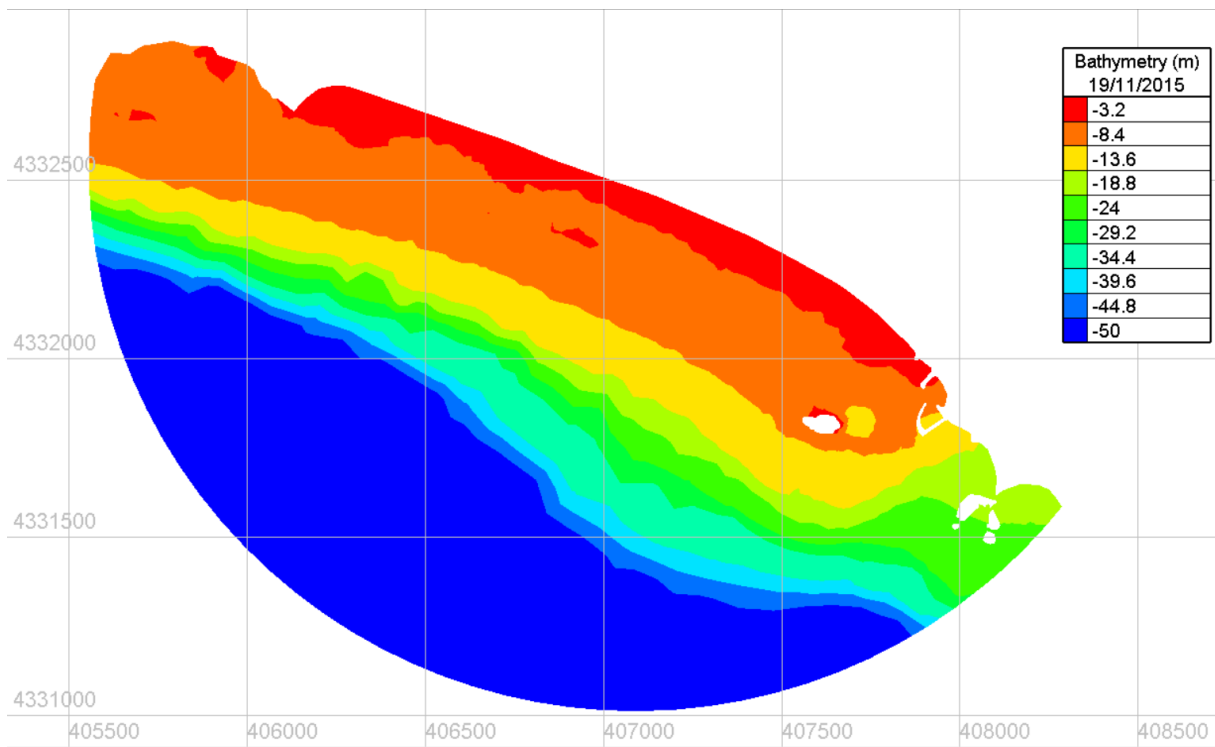


Εικόνα 4.12: Λεπτομέρειες πύκνωσης κανάθου υπολογιστικού πεδίου

Έπειτα, πραγματοποιείται η εισαγωγή της εκάστοτε βαθυμετρίας και η παρεμβολή των σημειακών δεδομένων, με τελικό αποτέλεσμα το πλέγμα της περιοχής μελέτης. Παρακάτω παρουσιάζονται, οπτικοποιημένες μέσω του προγράμματος BlueKenue, οι βαθυμετρίες τις περιοχής μελέτης που βασίστηκαν στις ενισχυμένες μετρήσεις των 14/02/2015 (Εικόνα 4.13) και στις 19/11/2015 (Εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.13: Μετρήσεις βαθυμετρίας Ερεσού 14/02/2015



Εικόνα 4.14: Μετρήσεις βαθυμετρίας Ερεσού 19/11/2015

## 4.4 Διαθέσιμα κυματικά δεδομένα στα ανοιχτά

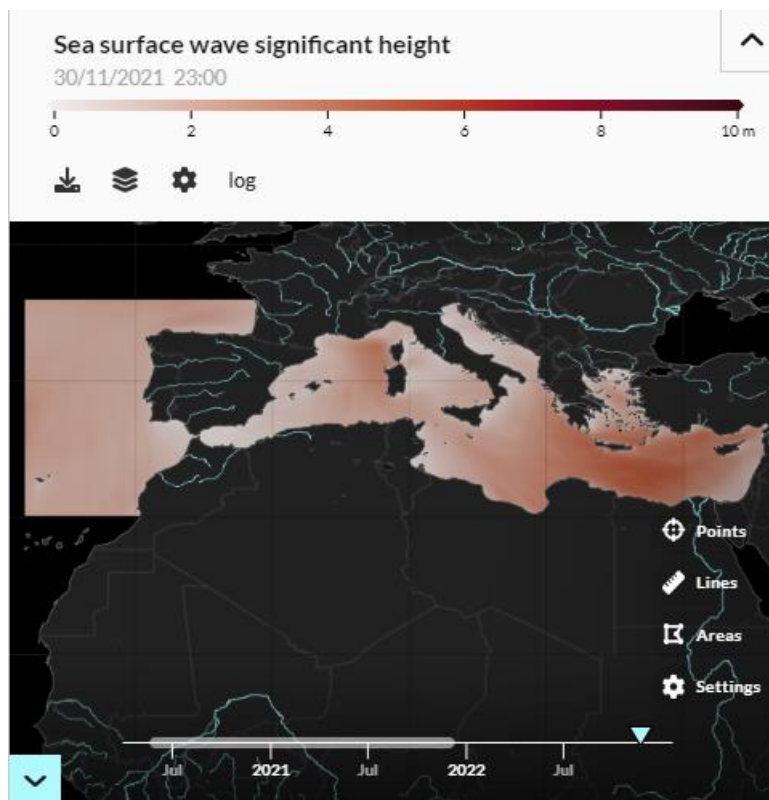
### 4.4.1 Copernicus Marine Service – CMEMS

Για τον προσδιορισμό του κυματικού κλίματος στα ανοιχτά αντλούνται ετήσιες χρονοσειρές από την υπηρεσία θαλάσσιων δεδομένων του Κοπέρνικου - Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS), εγκεκριμένη το 2014 από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

Η βάση CMEMS παρέχει τακτικές και συστηματικές πληροφορίες αναφοράς σχετικά με τη φυσική και βιογεωχημική κατάσταση, τη μεταβλητότητα και τη δυναμική των οικοσυστημάτων των ωκεανών και των θαλασσών για τις παγκόσμιες ωκεάνιες και τις ευρωπαϊκές περιφερειακές θαλάσσιες περιοχές. Οι παρατηρήσεις και οι προγνώσεις που παράγει η υπηρεσία στηρίζουν όλες τις εφαρμογές που σχετίζονται με τη θάλασσα, στις οποίες συγκαταλέγονται οι εξής:

- Ασφάλεια στη θάλασσα
- Θαλάσσιοι πόροι
- Θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον
- Πρόγνωση καιρού, κλίματος και εποχιακή πρόγνωση.

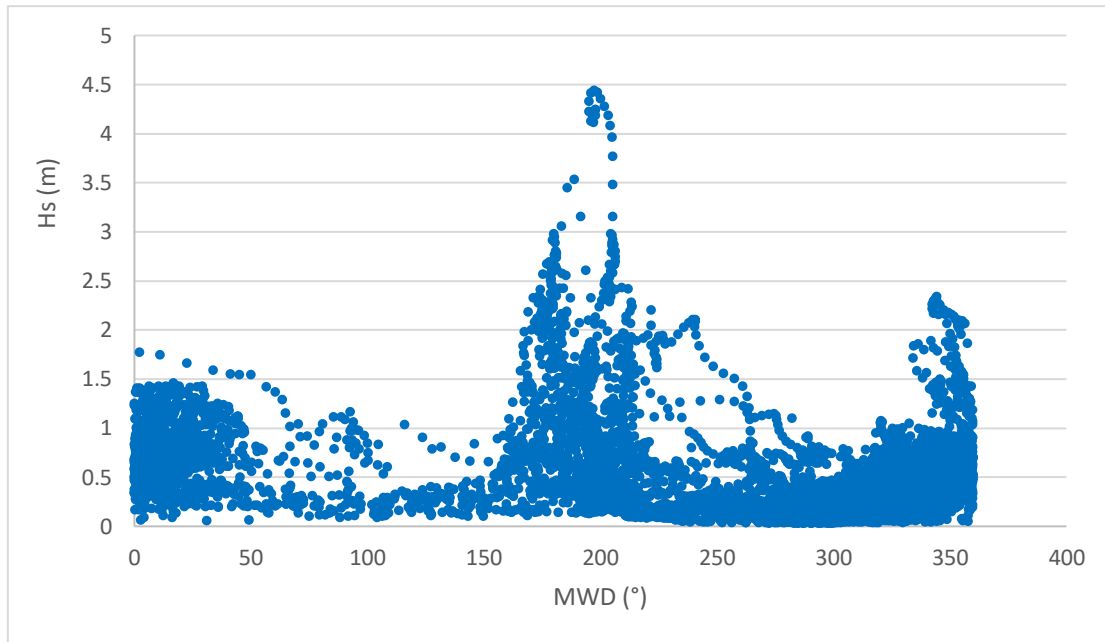
Ως βάση δεδομένων επιλέγεται το προϊόν Mediterranean Sea Waves Reanalysis (MEDSEA\_MULTYEAR\_WAV\_006\_012), το οποίο είναι ένα πολυετές μοντέλο πρόβλεψης κυμάτων εντός της Μεσογείου θάλασσας (Med-WAV). Το σύνολο δεδομένων που προσφέρονται από το προϊόν είναι μια πολυετής ανάλυση κυματισμών που ξεκινά από τον Ιανουάριο του 1993, και αποτελείται από παραμέτρους ωριαίων κυματικών χαρακτηριστικών σε οριζόντια ανάλυση  $1/24^\circ$ , που καλύπτει τη Μεσόγειο Θάλασσα και εκτείνεται έως και  $18.125^\circ W$  στον Ατλαντικό Ωκεανό, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 4.15*. Το σύστημα μοντελοποίησης Med-waves βασίζεται στο κυματικό μοντέλο WAM 4.6.2, το οποίο δημιουργήθηκε ως σύζευξη δυο υπολογιστικών κανάβων (αραιού και πυκνού) για να διασφαλιστεί ότι χαρακτηριστικά της αποθάλασσας που διαδίδεται από τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό (NA) προς το στενό του Γιβραλτάρ εισέρχεται σωστά στη Μεσόγειο Θάλασσα. Το χονδροειδές πλέγμα καλύπτει τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό από  $75^\circ \Delta$  έως  $10^\circ \Lambda$  και από  $70^\circ \text{B}$  έως  $10^\circ \text{N}$  σε ανάλυση  $1/6^\circ$ , ενώ το ένθετο λεπτό πλέγμα καλύπτει τη Μεσόγειο Θάλασσα από  $18,125^\circ \Delta$  έως  $36,2917^\circ \Lambda$  και από  $30,1875^\circ \text{B}$  έως  $45,9792^\circ \text{B}$  με ανάλυση  $1/24^\circ$ . Το μοντέλο επιλύει το προγνωστικό τμήμα του κυματικού φάσματος με 24 κατευθυντήριες και 32 λογαριθμικά κατανεμημένες συχνότητες.



Εικόνα 4.15: Χάρτης σημαντικού ύψους κύματος στην λεκάνη της Μεσογείου  
*Mediterranean Sea Waves Reanalysis – πηγή: copernicus.eu*

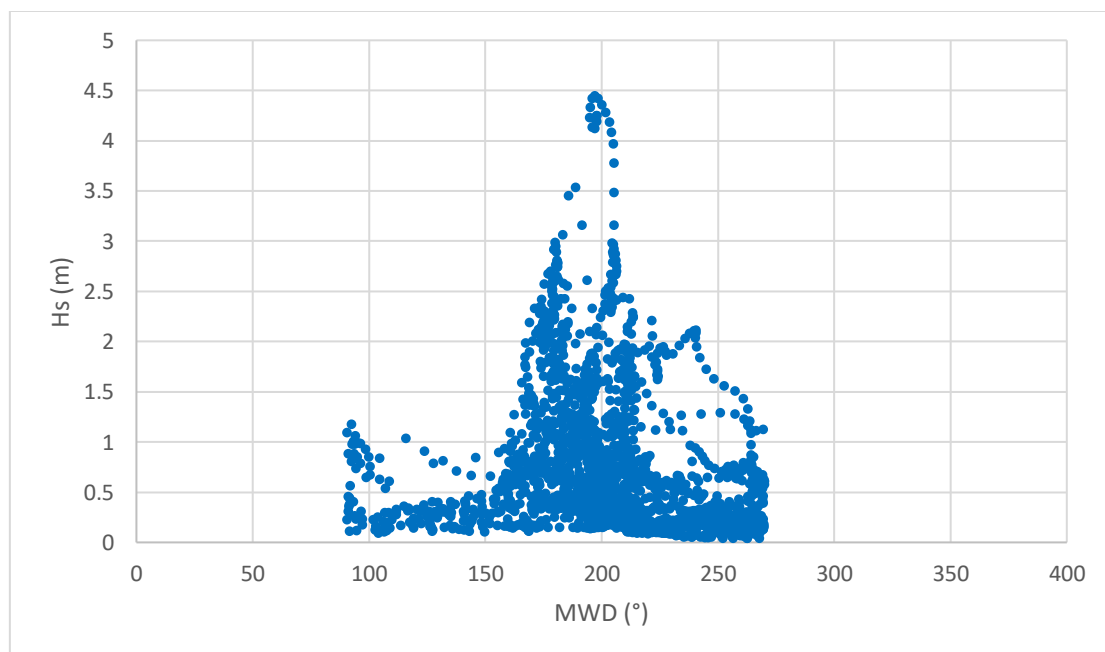
#### 4.4.2 Προσδιορισμός κυματικού κλίματος

Η παρούσα εργασία αφορά στην παρακολούθηση και στην σύγκριση της συμπεριφοράς των μεθόδων σχηματοποίησης όσο μεταβάλλεται ο αριθμός των αντιπροσώπων. Για την εξυπηρέτηση της παραπάνω διερεύνησης λήφθηκαν από την υπηρεσία Copernicus Marine Service – CMEMS και για την ευρύτερη θαλάσσια περιοχή στα ανοιχτά της ακτής της Σκάλας Ερεσού, δεδομένα ύψους κύματος ( $H_s$ ), περιόδου ( $T_p$ ), και διεύθυνσης του κυματισμού ( $MWD$ ), για την χρονική περίοδο 14/02/2015 έως 29/12/2015 (Εικόνα 4.16).



Εικόνα 4.16: Ύψος κύματος-Διεύθυνση διάδοσης - Δεδομένα Corpeticus

Από το σύνολο των 8017 δεδομένων, έγινε επεξεργασία μόνο των κυματισμών με διευθύνσεις  $90^{\circ}$ - $270^{\circ}$ , οι οποίες θεωρούνται κρίσιμες για τον προσανατολισμό της ακτής της Ερεσού, όσον αφορά την κατά μήκος στερεομεταφορά. Το κριτήριο αυτό ικανοποιούν 2052 παρατηρήσεις, οι οποίες θα εισαχθούν τελικά στις μεθόδους σχηματοποίησης (Εικόνα 4.17). Σημειώνεται πως, ποσοστιαία, οι περισσότεροι κυματισμοί προέρχονται από δυτικά και νοτιοδυτικά, από όπου παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα ύψη κύματος.



Εικόνα 4.17: Ύψος κύματος-Διεύθυνση διάδοσης - Δεδομένα μετά την επιλογή κρίσιμων διευθύνσεων



## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 5.1 Κυματικοί αντιπρόσωποι μεθόδων σχηματοποίησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχηματοποίησης των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων συντελεστών, όπως αναπτύχθηκαν στο *Κεφάλαιο 3*. Για την μέθοδο ροής ενέργειας θα διερευνηθεί η επίδραση του διαφορετικού αριθμού αντιπροσωπευτικών κυματικών καταστάσεων (6, 12 και 18 αντιπρόσωποι). Για την περίπτωση των 12 αντιπροσώπων, θα ακολουθήσει σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων συντελεστών.

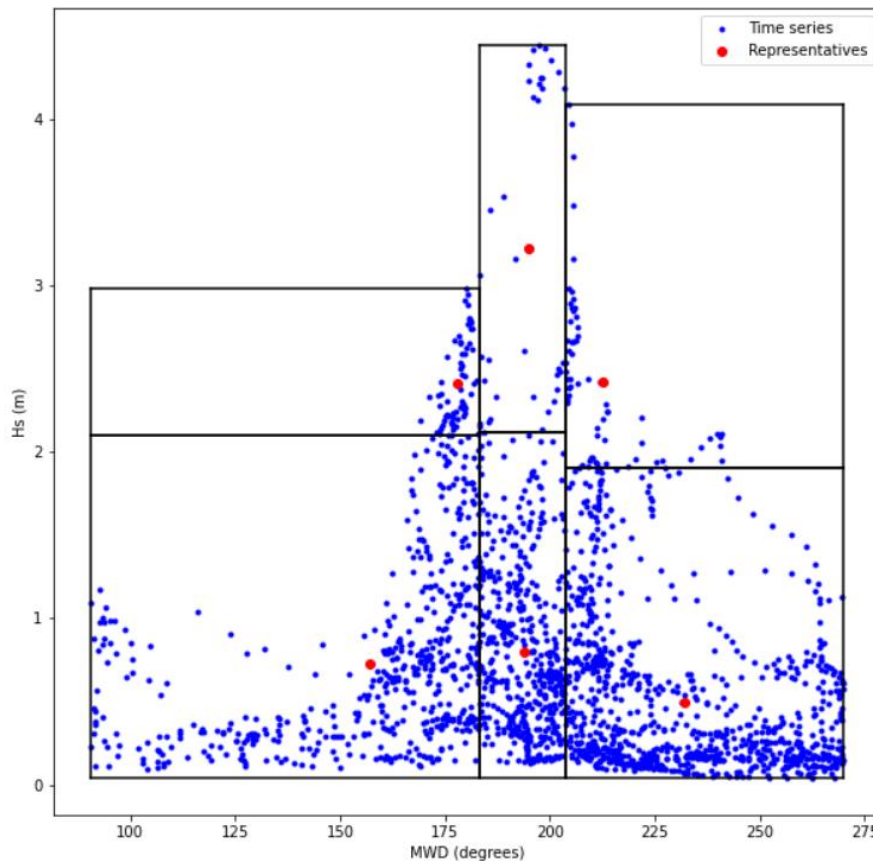
#### 5.1.1 Κυματικοί αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

Ακολουθώντας την μεθοδολογία, όπως αναπτύχθηκε στο *Κεφάλαιο 3*, εξήχθησαν οι τιμές των διαφορετικών αριθμών κυματικών αντιπροσώπων για την μέθοδο ροής ενέργειας, για 6, 12, και 18 αντιπροσωπευτικούς κυματισμούς.

Για την περίπτωση των 6 κυματικών αντιπροσώπων, παρουσιάζεται στην *Εικόνα 5.1* το γράφημα ύψους κύματος και διεύθυνσης διάδοσης, οι 6 κλάσεις και οι αντιπρόσωποι τους. Ακολούθως, στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι τιμές των κυματικών χαρακτηριστικών του κάθε αντιπροσώπου και η συχνότητα εμφάνισης του εντός του έτους. Σημειώνεται πως, η συχνότητα έχει υπολογιστεί θεωρώντας πως κάθε ένα από τα 2052 εισερχόμενα κύματα εμφανίζεται μια φορά εντός του έτους, δηλαδή με συχνότητα  $4.87 \cdot 10^{-4}$  (ή  $1/2052$ ).

Η διαλογή των παρατηρήσεων, η εύρεση των κλάσεων και των κυματικών αντιπροσώπων αυτών έγινε μέσω σύνταξης κώδικα σε *python* που παρατίθεται στο *Παράρτημα Υπολογισμών*.





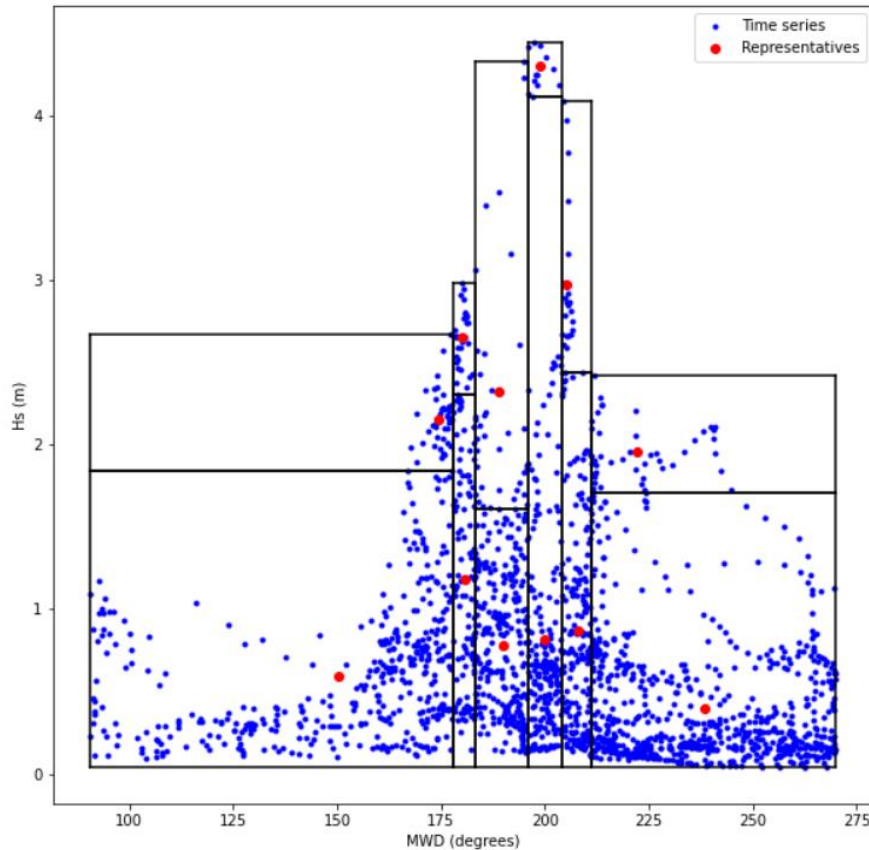
Εικόνα 5.1: 6 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας

Πίνακας 5.1: Κυματικά χαρακτηριστικά 6 αντιπροσώπων - Μέθοδος ροής ενέργειας

| Κυματικά χαρακτηριστικά αντιπροσώπου |        |          |         |               |
|--------------------------------------|--------|----------|---------|---------------|
| Class                                | Hs (m) | Tr (sec) | MWD (°) | Frequency (%) |
| <b>1a</b>                            | 0.73   | 4.33     | 156.97  | 25.15%        |
| <b>1b</b>                            | 2.41   | 6.86     | 178.09  | 3.31%         |
| <b>2a</b>                            | 0.80   | 4.85     | 193.78  | 22.51%        |
| <b>2b</b>                            | 3.22   | 7.57     | 194.97  | 1.75%         |
| <b>3a</b>                            | 0.50   | 3.82     | 232.18  | 44.15%        |
| <b>3b</b>                            | 2.42   | 6.81     | 212.71  | 3.12%         |

Παρατηρείται πως ο συχνότερα εμφανιζόμενος συνδυασμός (44.15%), έχει το μικρότερο ύψος και περίοδο ( $H_s = 0.50m$ ,  $T_p = 3.82sec$ ) και προέρχεται από τα νοτιοδυτικά, σχεδόν κάθετα ως προς τον άξονα της ακτής. Ο σπανιότερα εμφανιζόμενος συνδυασμός, έχει το μεγαλύτερο ύψος και περίοδο ( $H_s = 3.22m$ ,  $T_p = 7.57sec$ ) και προέρχεται από τα νοτιοδυτικά.

Στην περίπτωση των 12 αντιπροσωπευτικών εισερχόμενων κυματισμών τα αποτελέσματα την EFM παρουσιάζονται σχηματικά στην Εικόνα 5.2 και έπειτα στον Πίνακα 5.2.



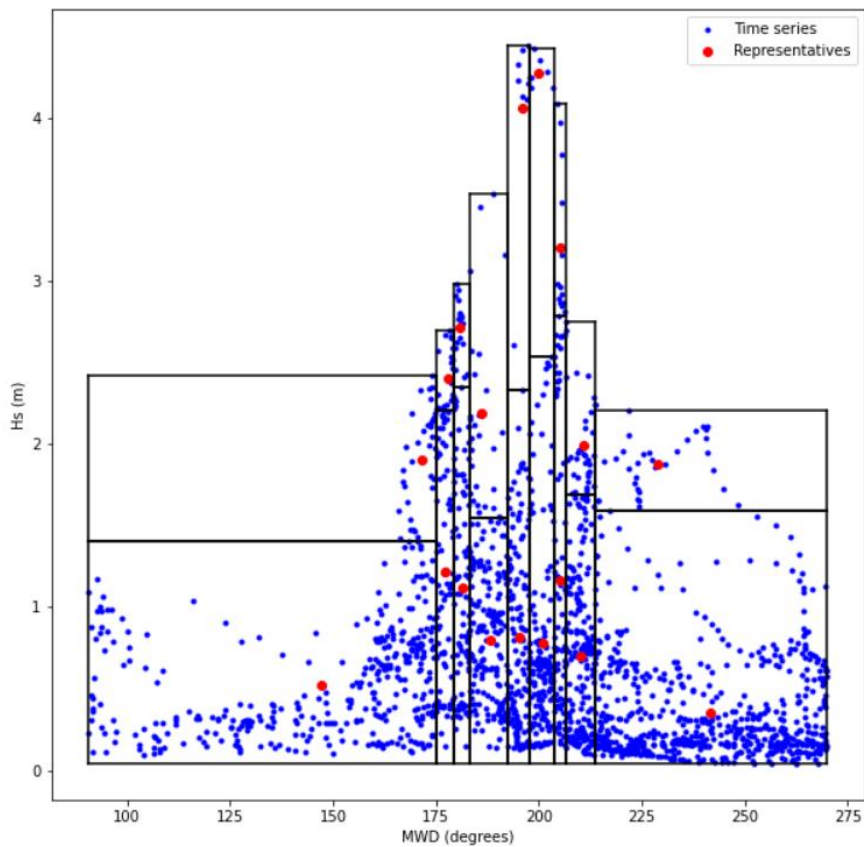
Εικόνα 5.2: 12 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας

Πίνακας 5.2: Κυματικά χαρακτηριστικά 12 αντιπροσώπων - Μέθοδος ροής ενέργειας

| Κυματικά χαρακτηριστικά αντιπροσώπου |        |          |         |               |
|--------------------------------------|--------|----------|---------|---------------|
| Class                                | Hs (m) | Tr (sec) | MWD (°) | Frequency (%) |
| 1a                                   | 0.59   | 4.13     | 150.40  | 19.54%        |
| 1b                                   | 2.15   | 6.30     | 174.50  | 2.10%         |
| 2a                                   | 1.19   | 5.11     | 180.85  | 5.60%         |
| 2b                                   | 2.65   | 7.24     | 180.11  | 1.36%         |
| 3a                                   | 0.78   | 4.86     | 190.08  | 12.57%        |
| 3b                                   | 2.32   | 6.81     | 189.03  | 1.75%         |
| 4a                                   | 0.82   | 4.79     | 199.96  | 9.70%         |
| 4b                                   | 4.30   | 8.39     | 198.87  | 0.49%         |
| 5a                                   | 0.87   | 4.55     | 208.00  | 8.87%         |
| 5b                                   | 2.98   | 7.29     | 205.34  | 1.07%         |
| 6a                                   | 0.40   | 3.63     | 238.38  | 34.75%        |
| 6b                                   | 1.96   | 6.42     | 222.12  | 2.19%         |

Ομοίως, παρατηρείται πως υψηλότερα ποσοστά εμφάνισης παρουσιάζουν οι κυματισμοί με μικρότερο ύψος κύματος (μικρότερο του 1 m). Ο κυματικός αντιπρόσωπος με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης (34.75%) προέρχεται από τα νοτιοδυτικά, με διεύθυνση σχεδόν κάθετη ως προς την ακτή, και με ύψος κύματος 0.40m και περίοδο 3.63sec.

Για την περίπτωση των 18 κυματικών αντιπροσώπων, εξαγόμενων μέσω της μεθόδου Energy Flux, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.3 και στον Πίνακα 5.3:



Εικόνα 5.3: 18 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας

Πίνακας 5.3: Κυματικά χαρακτηριστικά 18 αντιπροσώπων - Μέθοδος ροής ενέργειας

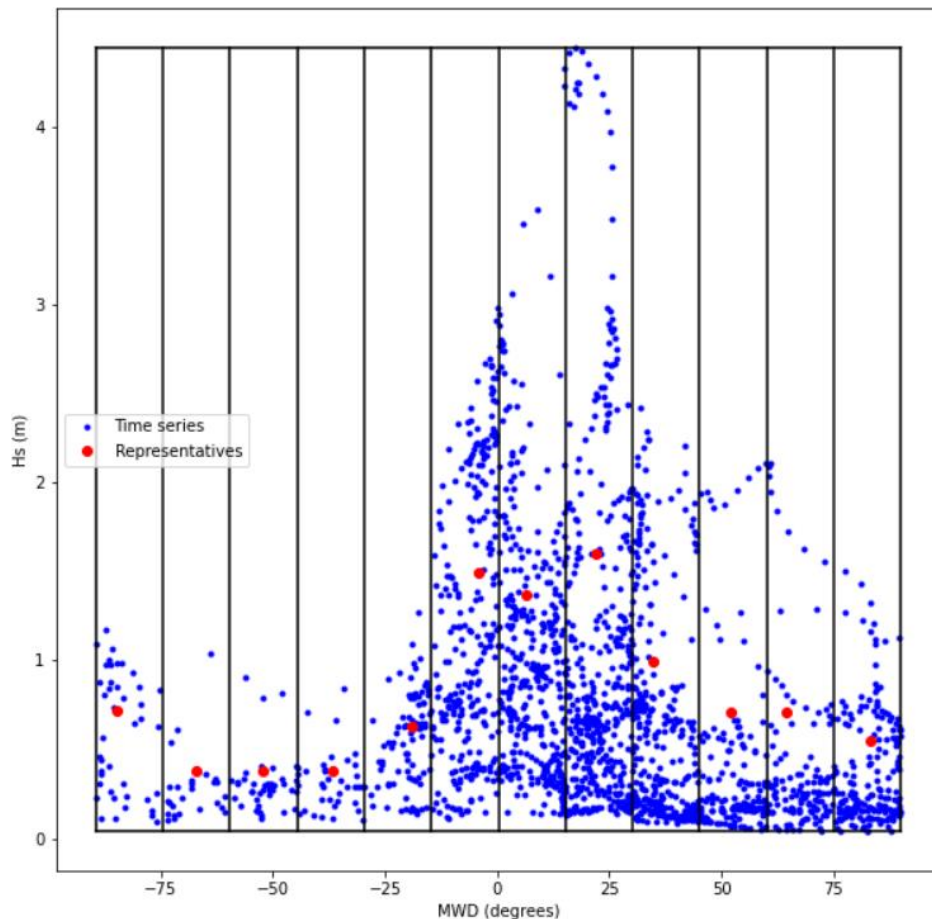
| Κυματικά χαρακτηριστικά αντιπροσώπου |        |          |         |               |
|--------------------------------------|--------|----------|---------|---------------|
| Class                                | Hs (m) | Tp (sec) | MWD (°) | Frequency (%) |
| 1a                                   | 0.53   | 4.06     | 147.22  | 17.25%        |
| 1b                                   | 1.90   | 5.80     | 171.47  | 1.75%         |
| 2a                                   | 1.22   | 5.01     | 177.30  | 3.51%         |
| 2b                                   | 2.40   | 6.99     | 177.93  | 1.12%         |
| 3a                                   | 1.12   | 4.99     | 181.63  | 4.09%         |
| 3b                                   | 2.72   | 7.25     | 180.73  | 0.88%         |
| 4a                                   | 0.80   | 4.62     | 188.12  | 8.38%         |
| 4b                                   | 2.19   | 6.82     | 186.09  | 1.27%         |
| 5a                                   | 0.81   | 5.25     | 195.13  | 6.73%         |
| 5b                                   | 4.06   | 8.39     | 195.98  | 0.39%         |
| 6a                                   | 0.78   | 4.69     | 200.76  | 7.07%         |
| 6b                                   | 4.28   | 8.39     | 199.71  | 0.34%         |
| 7a                                   | 1.16   | 5.00     | 205.06  | 3.12%         |
| 7b                                   | 3.20   | 7.49     | 205.28  | 0.63%         |
| 8a                                   | 0.70   | 4.33     | 210.27  | 9.41%         |
| 8b                                   | 2.00   | 6.44     | 210.77  | 1.66%         |
| 9a                                   | 0.35   | 3.52     | 241.54  | 30.85%        |
| 9b                                   | 1.88   | 6.20     | 228.85  | 1.56%         |

Στην περίπτωση των 18 αντιπροσώπων, παρατηρείται πως καλύπτεται μεγαλύτερο εύρος κυματικών συνθηκών, συμπεριλαμβανομένων και ακραίων κυματικών καταστάσεων, οι οποίες συνοδεύονται από μικρές συχνότητες εμφάνισης. Η συχνότερα εμφανιζόμενη κυματική κατάσταση (30.85%), διαθέτει ύψος κύματος 0.35m, περίοδο 3.52sec και προέρχεται από τα νοτιοδυτικά.

Ως προς την μεταβολή του αριθμού των αντιπροσώπων, με την χρήση της ίδιας μεθόδου διαλογής, προς το παρόν, μπορούμε να συμπεράνουμε πως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των αντιπροσώπων τόσο πιο εύστοχη είναι η προσομοίωση του αρχικού δείγματος (Εικόνα 5.4).

### 5.1.2 Κυματικοί αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών

Ακολουθώντας την μεθοδολογία των ισοδύναμων κυματισμών, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, για την περίπτωση των 12 αντιπροσώπων, προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, που παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.5 και στον Πίνακα 5.4.



Εικόνα 5.5: 12 Κυματικοί αντιπρόσωποι - Μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών

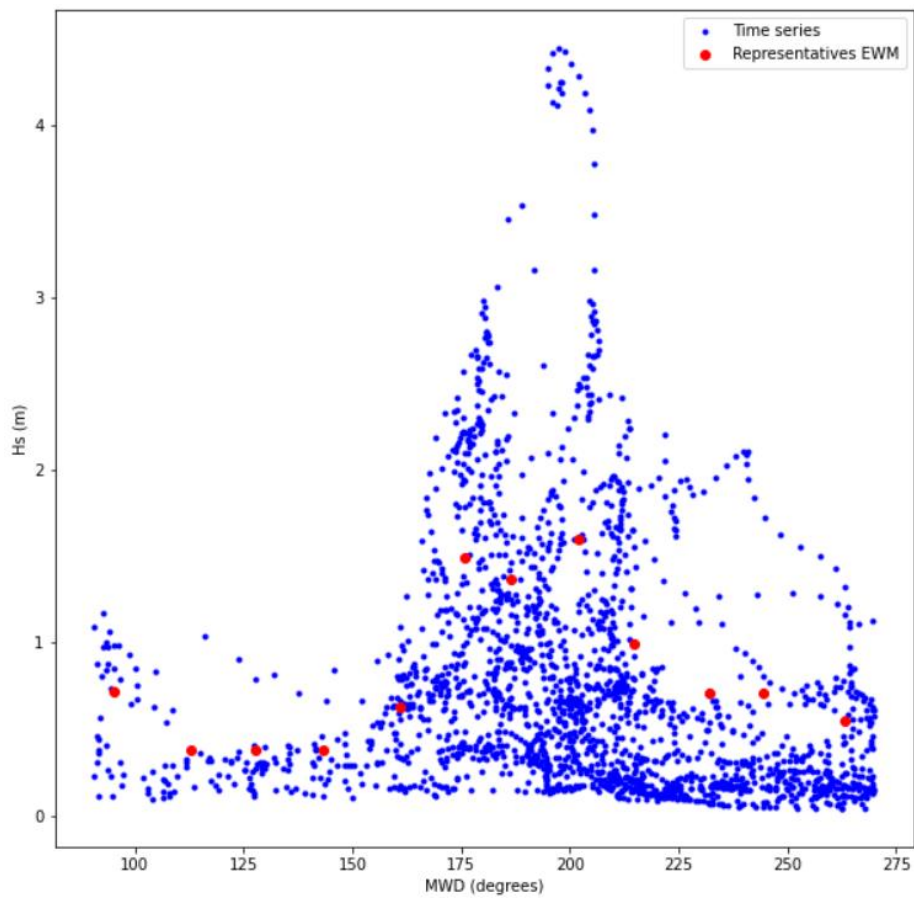
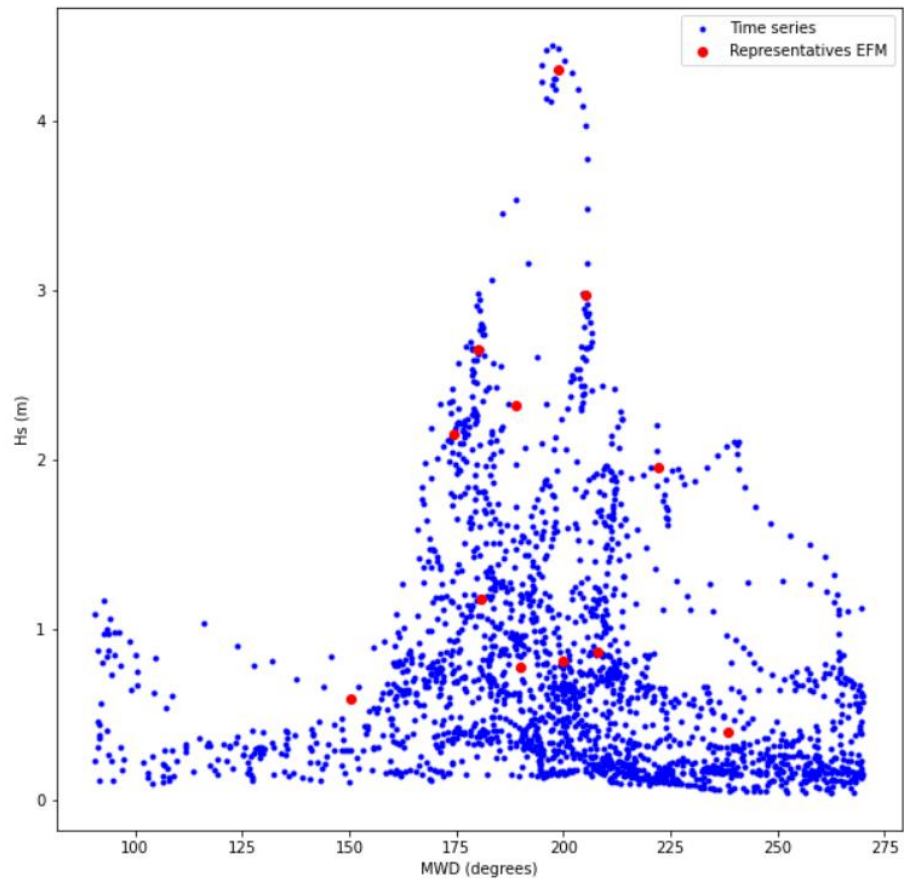
Πίνακας 5.4: Κυματικά χαρακτηριστικά 12 αντιπροσώπων - Μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών

| <b>Κυματικά χαρακτηριστικά αντιπροσώπου</b> |               |                 |                |                      |
|---|---------------|-----------------|----------------|----------------------|
| <b>Class</b>                                | <b>Hs (m)</b> | <b>Tp (sec)</b> | <b>MWD (°)</b> | <b>Frequency (%)</b> |
| <b>1</b>                                    | 0.72          | 4.57            | 95.19          | 2.05%                |
| <b>2</b>                                    | 0.38          | 3.62            | 112.90         | 1.27%                |
| <b>3</b>                                    | 0.38          | 3.75            | 127.64         | 1.95%                |
| <b>4</b>                                    | 0.38          | 3.98            | 143.22         | 1.75%                |
| <b>5</b>                                    | 0.63          | 4.02            | 161.01         | 4.43%                |
| <b>6</b>                                    | 1.50          | 5.53            | 175.96         | 13.16%               |
| <b>7</b>                                    | 1.37          | 5.51            | 186.57         | 17.50%               |
| <b>8</b>                                    | 1.60          | 5.57            | 202.15         | 19.20%               |
| <b>9</b>                                    | 0.99          | 4.80            | 214.85         | 15.35%               |
| <b>10</b>                                   | 0.71          | 4.04            | 232.12         | 7.46%                |
| <b>11</b>                                   | 0.71          | 3.96            | 244.34         | 6.24%                |
| <b>12</b>                                   | 0.55          | 3.73            | 263.25         | 9.60%                |

Στην εν λόγω μέθοδο, παρατηρούνται μεγάλα ποσοστά εμφάνισης σε αντιπροσώπους με μεγάλα κυματικά ύψη, όπως για παράδειγμα η κυματική κατάσταση 8, με ύψος κύματος 1.60m, και περίοδο 5.57sec και νοτιοδυτική διεύθυνση, η οποία διαθέτει τη μέγιστη συχνότητα εμφάνισης (19.20%).

### 5.1.3 Σύγκριση αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας και μεθόδου των ισοδύναμων κυματισμών

Για την περίπτωση των 12 αντιπροσώπων, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου ροής ενέργειας και της μεθόδου των ισοδύναμων κυματισμών, όπως φαίνεται στην *Εικόνα 5.6* και στον *Πίνακα 5.5*.



Εικόνα 5.6: 12 Αντιπρόσωποι -Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας (EFM) και ισοδύναμων κυματισμών (EWM)

Πίνακας 5.5 Κυματικά χαρακτηριστικά 12 αντιπροσώπων μεθόδων ροής ενέργειας (EFM) και ισοδύναμων κυματισμών (EWM)

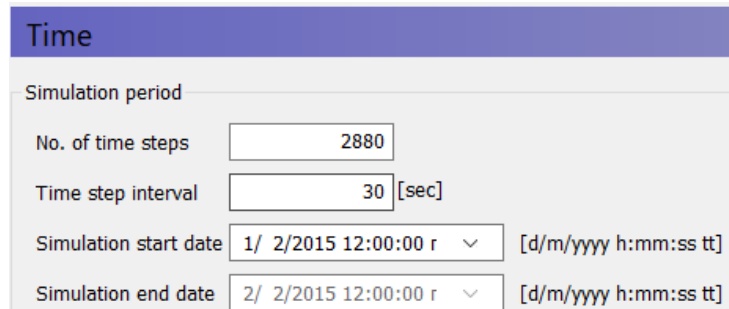
| Κυματικά χαρακτηριστικά αντιπροσώπου |        |          |         |               |        |          |         |               |
|--------------------------------------|--------|----------|---------|---------------|--------|----------|---------|---------------|
| Class                                | EFM    |          |         |               | EWM    |          |         |               |
|                                      | Hs (m) | Tp (sec) | MWD (°) | Frequency (%) | Hs (m) | Tp (sec) | MWD (°) | Frequency (%) |
| 1a/1                                 | 0.59   | 4.13     | 150.40  | 19.54%        | 0.72   | 4.57     | 95.19   | 2.05%         |
| 1b/2                                 | 2.15   | 6.30     | 174.50  | 2.10%         | 0.38   | 3.62     | 112.90  | 1.27%         |
| 2a/3                                 | 1.19   | 5.11     | 180.85  | 5.60%         | 0.38   | 3.75     | 127.64  | 1.95%         |
| 2b/4                                 | 2.65   | 7.24     | 180.11  | 1.36%         | 0.38   | 3.98     | 143.22  | 1.75%         |
| 3a/5                                 | 0.78   | 4.86     | 190.08  | 12.57%        | 0.63   | 4.02     | 161.01  | 4.43%         |
| 3b/6                                 | 2.32   | 6.81     | 189.03  | 1.75%         | 1.50   | 5.53     | 175.96  | 13.16%        |
| 4a/7                                 | 0.82   | 4.79     | 199.96  | 9.70%         | 1.37   | 5.51     | 186.57  | 17.50%        |
| 4b/8                                 | 4.30   | 8.39     | 198.87  | 0.49%         | 1.60   | 5.57     | 202.15  | 19.20%        |
| 5a/9                                 | 0.87   | 4.55     | 208.00  | 8.87%         | 0.99   | 4.80     | 214.85  | 15.35%        |
| 5b/10                                | 2.98   | 7.29     | 205.34  | 1.07%         | 0.71   | 4.04     | 232.12  | 7.46%         |
| 6a/11                                | 0.40   | 3.63     | 238.38  | 34.75%        | 0.71   | 3.96     | 244.34  | 6.24%         |
| 6b/12                                | 1.96   | 6.42     | 222.12  | 2.19%         | 0.55   | 3.73     | 263.25  | 9.60%         |

Παρατηρείται πως τα ύψη κύματος στην μέθοδο των ισοδύναμων κυματισμών δεν λαμβάνουν ακραίες τιμές όπως στην μέθοδο ροής ενέργειας. Οι αντιπρόσωποι της μεθόδου των ισοδύναμων κυματισμών φαίνεται να συγκεντρώνονται στα «κέντρα βάρους» της κάθε κατακόρυφης κλάσης, λαμβάνοντας πιο συντηρητικές τιμές. Αντίθετα, η μέθοδος ροής ενέργειας, καθώς χωρίζει την κάθε κατακόρυφη κλάση σε δύο επιμέρους, λαμβάνει υπόψιν και τις πιο ακραίες τιμές υψών κύματος. Οι κυματικές συνθήκες αυτές, μπορεί μεν να έχουν μικρότερες συχνότητες εμφάνισης, αλλά στην περίπτωση εμφάνισης τους δημιουργούν έντονες επιδράσεις, οι οποίες δεν μπορούν να αγνοηθούν.

Επίσης, σημειώνεται πως στους αντιπροσώπους της μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών, οι προκαθορισμένες διαστάσεις των κυματικών κλάσεων οδηγούν σε μεγαλύτερη συμπερίληψη όσον αφορά στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος, με διευθύνσεις από 95° έως 263°. Οι διευθύνσεις διάδοσης των κυματικών αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας λαμβάνουν τιμές από 150° έως 238°. Συγκεντρώνονται, δηλαδή, σε ένα πιο στενό εύρος εκατέρωθεν της νότιας διεύθυνσης (180°), το οποίο αντιστοιχεί και στις συχνότερα εμφανιζόμενες πνεύσεις ανέμων στην περιοχή.

## 5.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων μοντέλου MIKE 21

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα οπτικοποιημένα αποτελέσματα του συζευγμένου μοντέλου MIKE 21 για τους υπολογισμένους αντιπροσώπους.



The image shows a software interface titled "Time" for configuring simulation parameters. It includes the following fields:

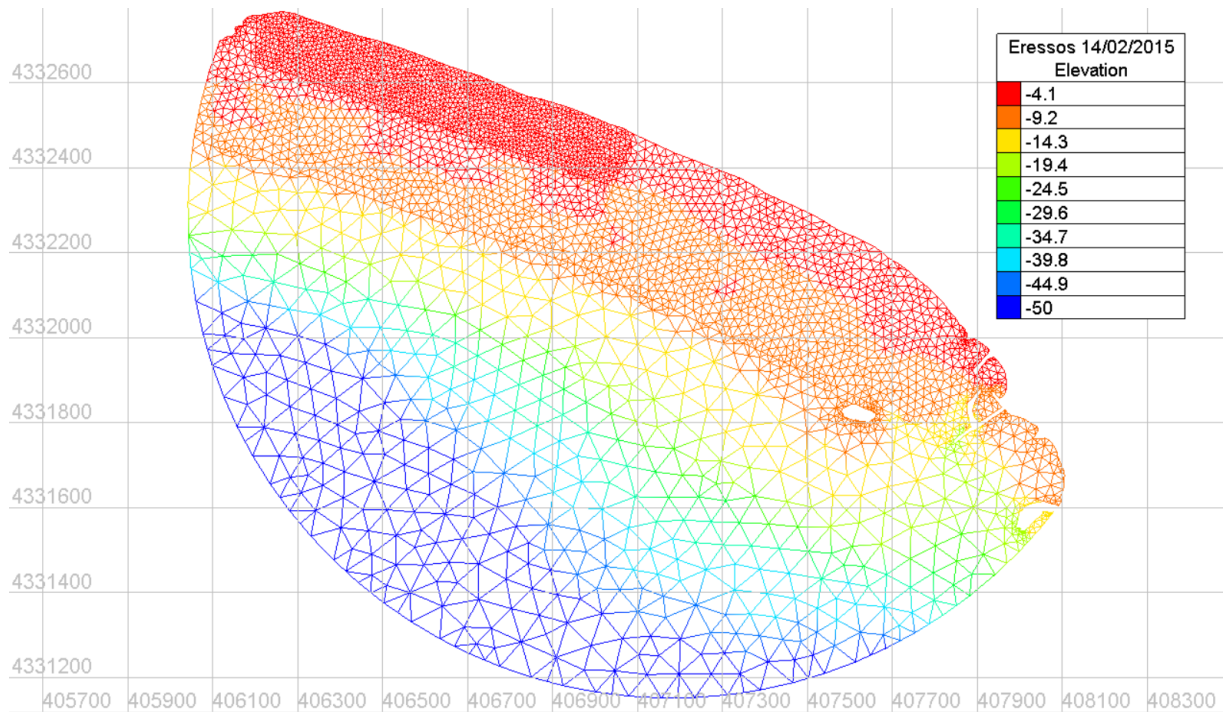
| Simulation period     |  |
|-----------------------|--|
| No. of time steps     | 2880                                       |
| Time step interval    | 30 [sec]                                   |
| Simulation start date | 1/ 2/2015 12:00:00 r [d/m/yyyy h:mm:ss tt] |
| Simulation end date   | 2/ 2/2015 12:00:00 r [d/m/yyyy h:mm:ss tt] |

Εικόνα 5.7: Χρόνος προσομοίωσης - Χρονικό θήμα προσομοίωσης

Προκειμένου να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος το μοντέλο ρυθμίστηκε ώστε να πραγματοποιεί προσομοίωση για χρονική διάρκεια 24 ωρών, εκτελώντας βήματα των 30 sec (Εικόνα 5.7). Ο χρόνος αυτός, μετά από ενδεικτικές προσομοιώσεις, θεωρήθηκε ως επαρκής ώστε να επέλθει υδροδυναμική ισορροπία και οι ακόλουθες μορφολογικές αλλαγές που παρατηρούνται στο παράκτιο σύστημα να είναι ασήμαντες (η διαφορά των ρυθμών μεταβολής του πυθμένα μεταξύ των δυο τελευταίων χρονικών βημάτων να είναι, κατά μέσο όρο, μικρότερη από 0.001m/day). Η επιλογή ενός πεπερασμένου χρόνου διεξαγωγής της προσομοίωσης ενέχει κάποιο υπολογιστικό ρίσκο, το οποίο περιορίζεται μέσω ενός συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης, στον οποίο αποδίδεται η αντιστοίχιση με μεγαλύτερες χρονικές κλίμακες (Κεφάλαιο 5.3). Σημειώνεται πως το μοντέλο της στερεομεταφοράς ξεκινά μετά τα πρώτα 1200 βήματα (μετά το πέρας του 1/3 του συνολικού υπολογιστικού χρόνου), διάστημα στο οποίο αρχίζουν να μονιμοποιούνται οι υδροδυναμικές συνθήκες και αποφεύγεται το ρίσκο να δημιουργηθούν απότομες μορφολογικές αλλαγές λόγω της στερεομεταφοράς.

Ως αρχείο πλέγματος τομέα, εισάγεται η βαθυμετρία των μετρήσεων τις 14/02/2015 (Εικόνα 5.8). Γενικότερα, είναι επιθυμητό η αρχική και η τελική βαθυμετρία των μετρήσεων να καλύπτουν περίπου την ίδια εποχή (χειμώνα με χειμώνα), αποφεύγοντας όμως της ακραίες μεταβολές που δημιουργούνται λόγω ενεργητικών κυματικών συνθηκών, κυρίως τους μήνες Δεκέμβριο με Ιανουάριο.





Εικόνα 5.8: Υπολογιστικό πλέγμα βαθυμετρίας Ερεσού 14/02/2015

Για κάθε προσομοίωση στο *Spectral Wave Module (SW)* συμπληρώνονται τα κυματικά χαρακτηριστικά του κάθε κυματικού αντιπροσώπου, ο οποίος αποτελεί το εισερχόμενο κύμα από το ανοικτό όριο. Από το αποτέλεσμα της προσομοίωσης, εξάγεται η μεταβολή βαθυμετρίας ως προς την αρχική, που επιφέρει στον πυθμένα η κάθε κυματική κατάσταση (Bed Level Change (BLC)). Μετά την ολοκλήρωση των προσομοιώσεων, για την εκάστοτε επιλογή αριθμού κυματικών αντιπροσώπων, αθροίζονται τα επί μέρους BLC, λαμβάνοντας υπόψιν την συχνότητα εμφάνισης της κυματικής κατάστασης, και έτσι, προκύπτει το τελικό προφίλ της ακτής.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται, ενδεικτικά:

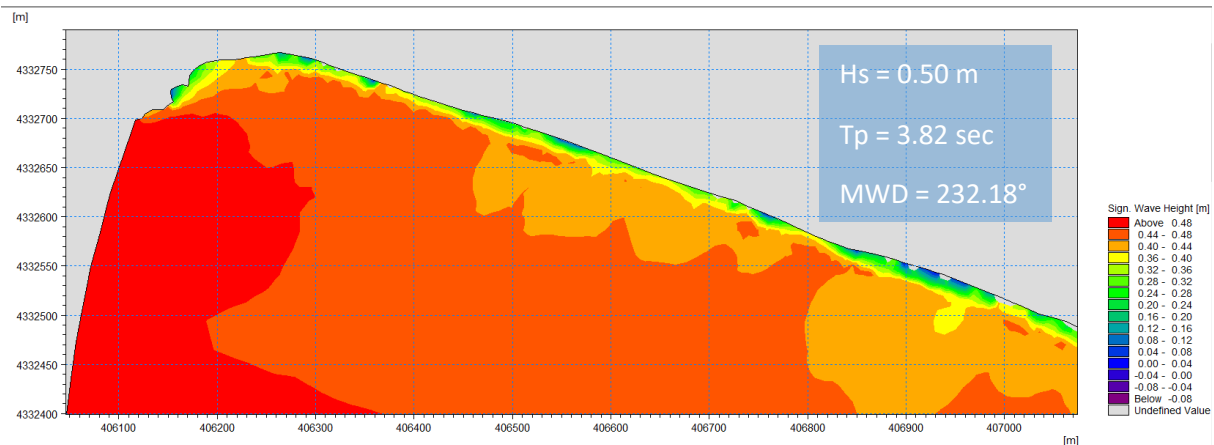
- Η χωρική κατανομή του ύψους κύματος, από το *Spectral Wave Module*.
- Η χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων, από το *Hydrodynamic Module*.
- Η χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα, από το *Sand Transport Module*.

του κυματικού κλίματος με την μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, για τις περιπτώσεις των 6 (Εικόνες 5.9 έως 5.13), 12 (Εικόνες 5.14 έως 5.18) και 18 (Εικόνες 5.19 έως 5.23) κυματικών αντιπροσώπων με χρήση της μεθόδου ροής ενέργειας, και των 12 κυματικών αντιπροσώπων με χρήση της μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών (Εικόνες 5.24 έως 5.28). Σημειώνεται πως τα σχήματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω αφορούν το πέρας της κάθε προσομοίωσης (Time Step 10/10), με εστίαση στην βορειοδυτική περιοχή των μετρήσεων.

### 5.2.1 Αποτελέσματα μεθόδου ροής ενέργειας: επιλογή 6 αντιπροσώπων

- *Spectral Wave Module*

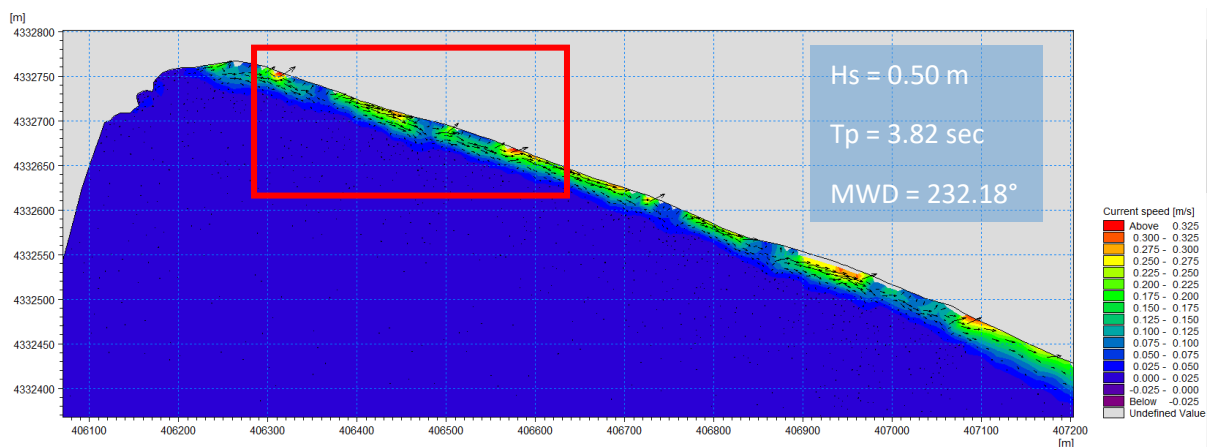
Η Εικόνα 5.9 απεικονίζει την χωρική κατανομή του ύψους κύματος λόγω εισερχόμενου κυματισμού νοτιοδυτικής διεύθυνσης, με ύψος 0.5m και περίοδο 2.82sec. Η συγκεκριμένη κυματική κατάσταση εμφανίζεται με συχνότητα 44.15% εντός της ετήσιας χρονοσειράς. Παρατηρείται πως, λόγω του μικρού ύψους του εισερχόμενου κύματος, η συγκεκριμένη διεύθυνση ανέμου, η οποία είναι σχεδόν κάθετη στην ακτή, δεν επιφέρει σημαντικές διαταραχές κοντά στην ακτή. Ενδεικτικά, μια ζώνη 30m από την ακτή το ύψος κύματος ανέρχεται στα 0.36m.



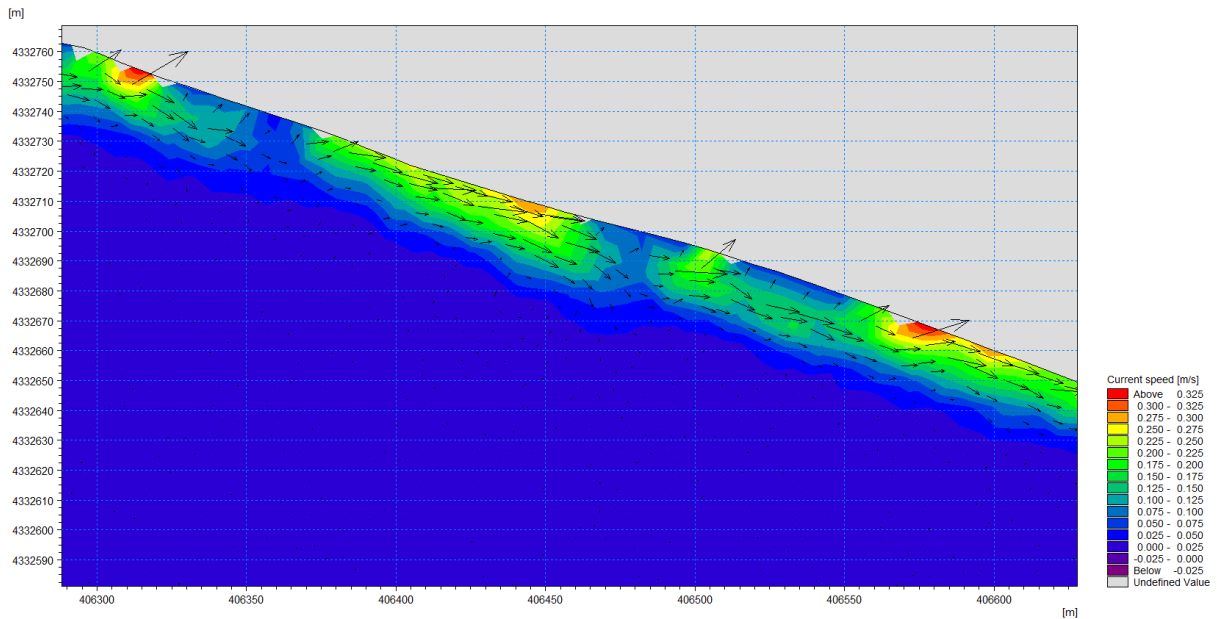
Εικόνα 5.9: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10)  
6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

- *Hydrodynamic Module*

Στις Εικόνες 5.10 και 5.11, παρατηρείται πως το παραπάνω κυματικό, δημιουργεί σημαντική κίνηση ρευμάτων σε μια ζώνη 30m από την ακτή. Η κίνηση των ρευμάτων είναι παράλληλη στην ακτή, με κατεύθυνση από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά. Η μέγιστη ταχύτητα που παρατηρείται είναι 0.325m/s.



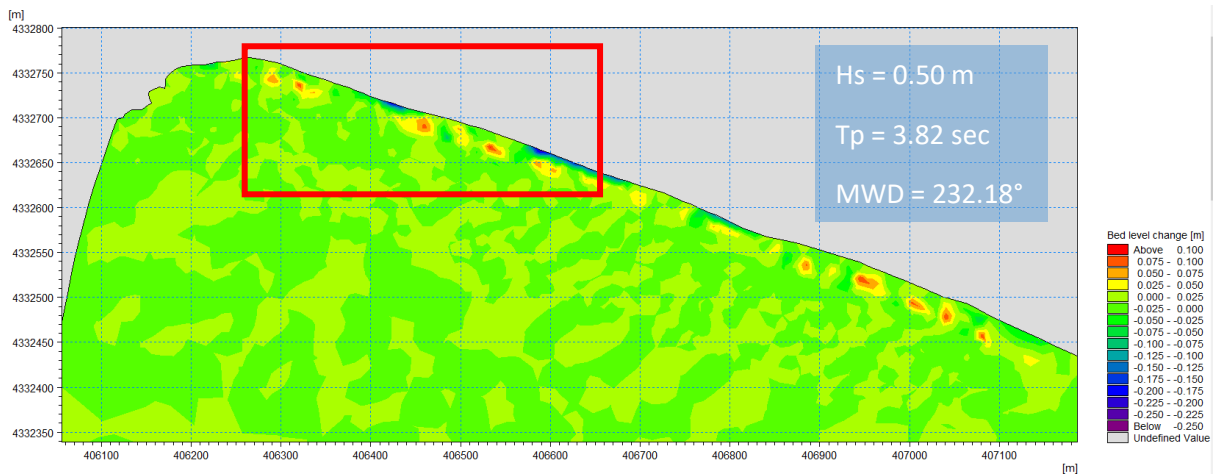
Εικόνα 5.10: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10)  
6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας



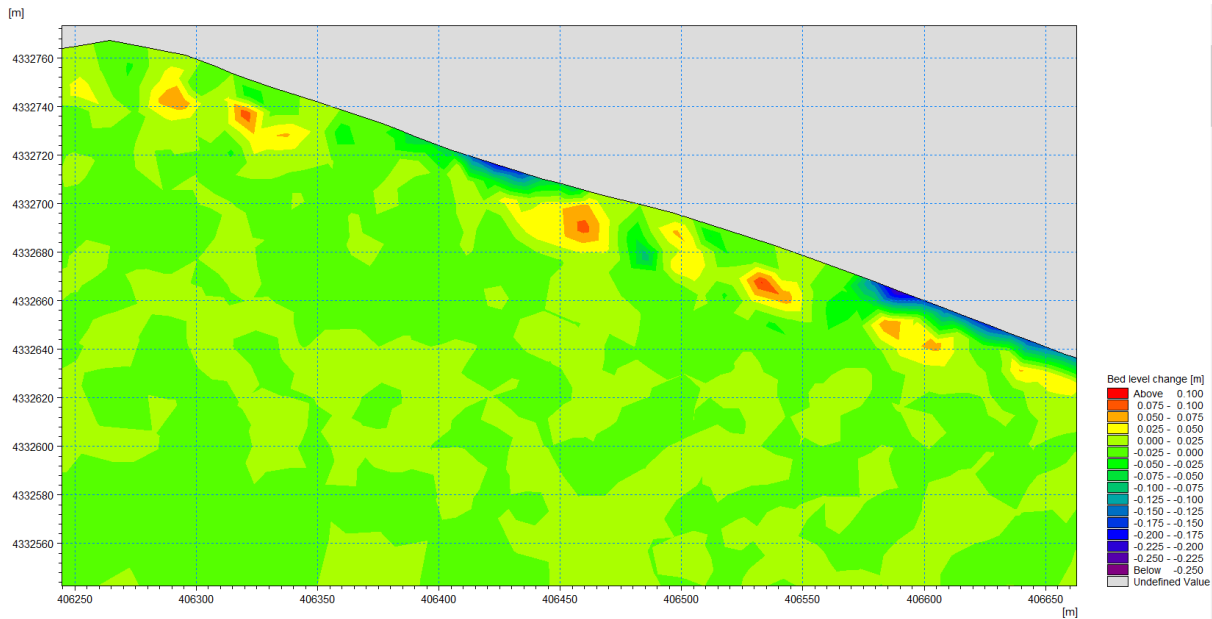
Εικόνα 5.11: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής κατανομής ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10) 6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

- **Sand Transport Module**

Οι Εικόνες 5.12 και 5.13, απεικονίζουν την τελική μετακίνηση του ιζήματος που προκαλείται από την παραπάνω κυματική συνθήκη. Σε μια ζώνη απόστασης 25m από την ακτή παρατηρείται απόθεση ιζήματος, με μέγιστη τιμή 0.1m. Μεταξύ αυτής της περιοχής και της ακτής, παρατηρούνται κατά τόπους υποχωρήσεις του πυθμένα, με μέγιστη τιμή 0.2m.



Εικόνα 5.12: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) 6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

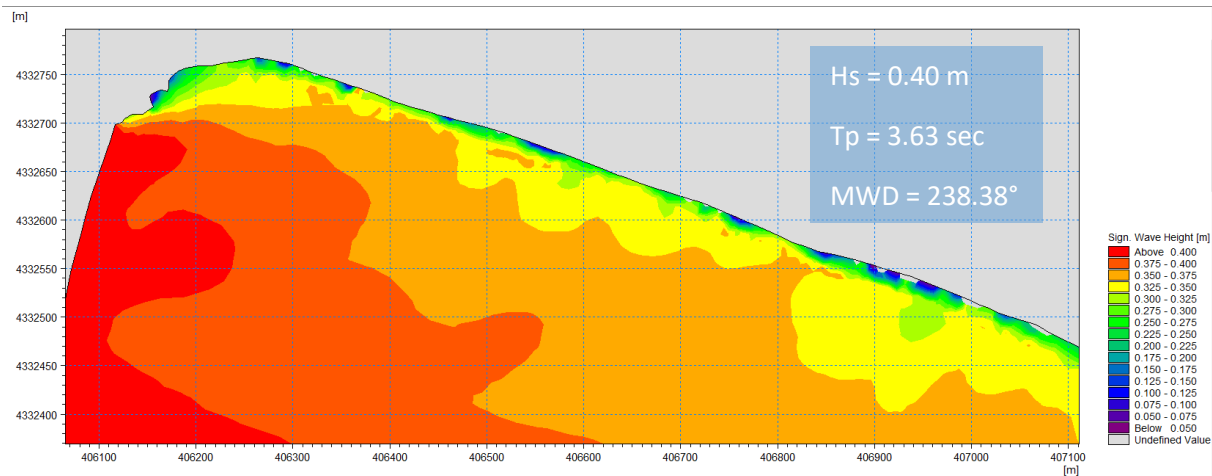


Εικόνα 5.13: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10) 6 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

## 5.2.2 Αποτελέσματα μεθόδου ροής ενέργειας: επιλογή 12 αντιπροσώπων

- *Spectral Wave Module*

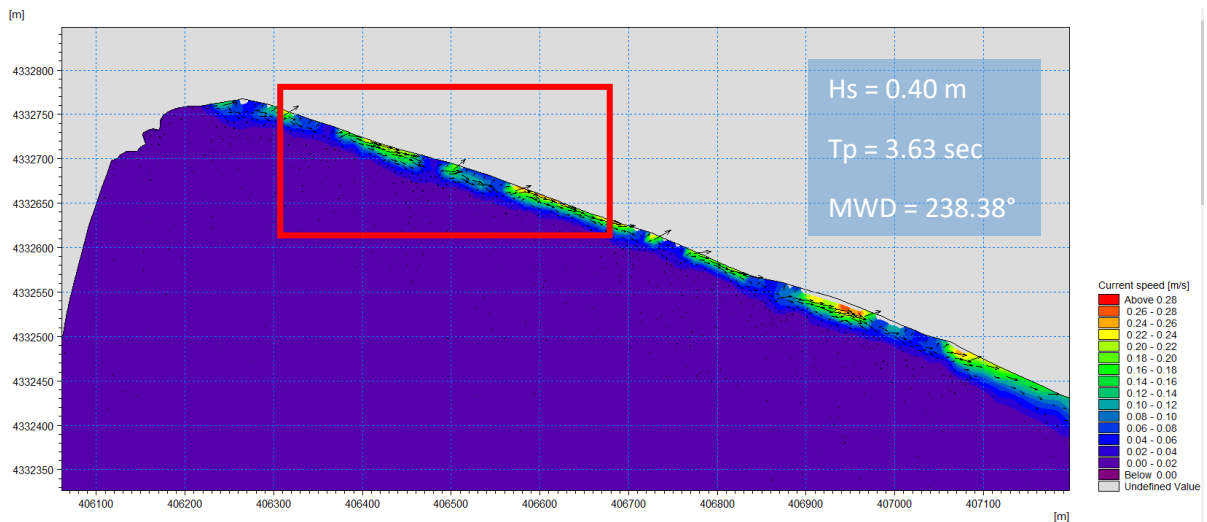
Η Εικόνα 5.14 απεικονίζει την εξέλιξη εισερχόμενου, από το ανοιχτό όριο, κυματισμού νοτιοδυτικής διεύθυνσεως με ύψος 0.40m και περίοδο 3.63sec. Η συγκεκριμένη κυματική κατάσταση εμφανίζεται με την μεγαλύτερη συχνότητα (34.75%), ανάμεσα στις 12 αντιπροσωπευτικές του υπό μελέτη έτους. Το μέγιστο ύψος σε απόσταση 30m από την ακτή είναι 0.35m. Παρατηρείται πως, η τελική διαμόρφωση της κατανομής του ύψους κύματος προσομοιάζει αρκετά την αντίστοιχη που προκαλεί η συχνότερα εμφανιζόμενη κυματική κατάσταση των 6 αντιπροσώπων, λόγω των κοινών κυματικών χαρακτηριστικών τους.



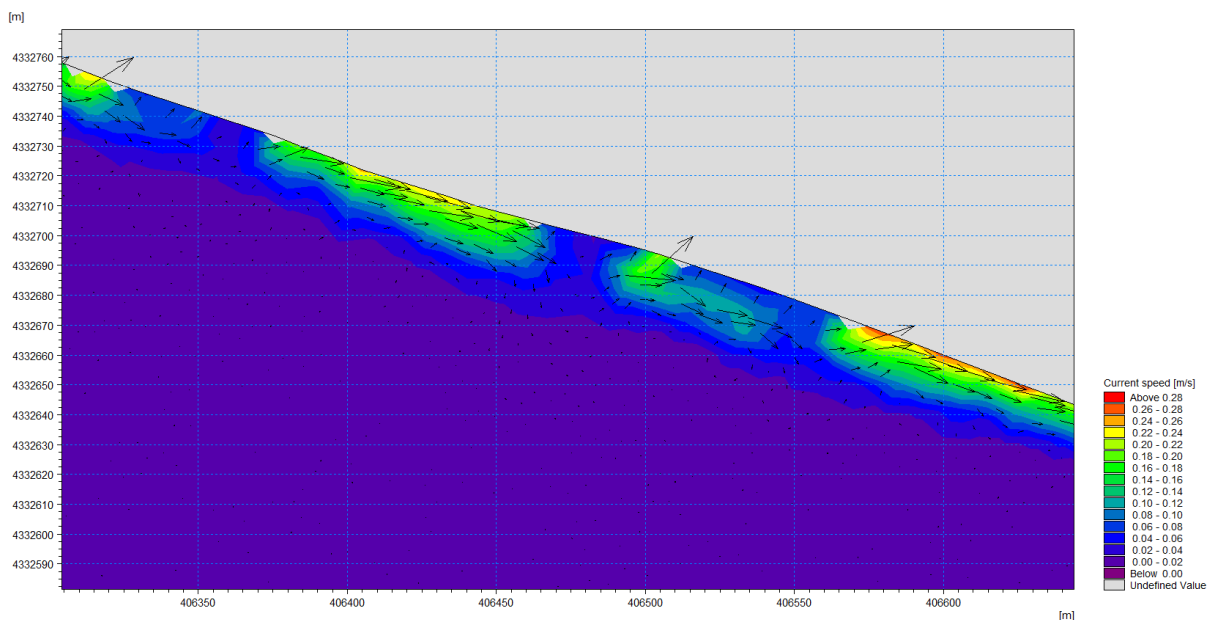
Εικόνα 5.14: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10) 12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

- *Hydrodynamic Module*

Στις *Εικόνες 5.15* και *5.16*, παρουσιάζεται η κίνηση των θαλάσσιων ρευμάτων στην ευρύτερη περιοχή μελέτης και μια λεπτομέρεια αυτής στην περιοχή των μετρήσεων. Παρατηρείται σχεδόν μηδενική κίνηση των ρευμάτων (0.02m/s), με εξαίρεση μια ζώνη σε απόσταση 20m από την ακτή όπου η μέγιστη ταχύτητα λαμβάνει την τιμή 0.28m/s. Η κίνηση των ρευμάτων, αν και μικρής σημασίας, είναι παράλληλη στην ακτή με φορά από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά, αρκετά παρόμοια με την κατάσταση των ρευμάτων στην επιλογή των 6 κυματικών αντιπροσώπων.



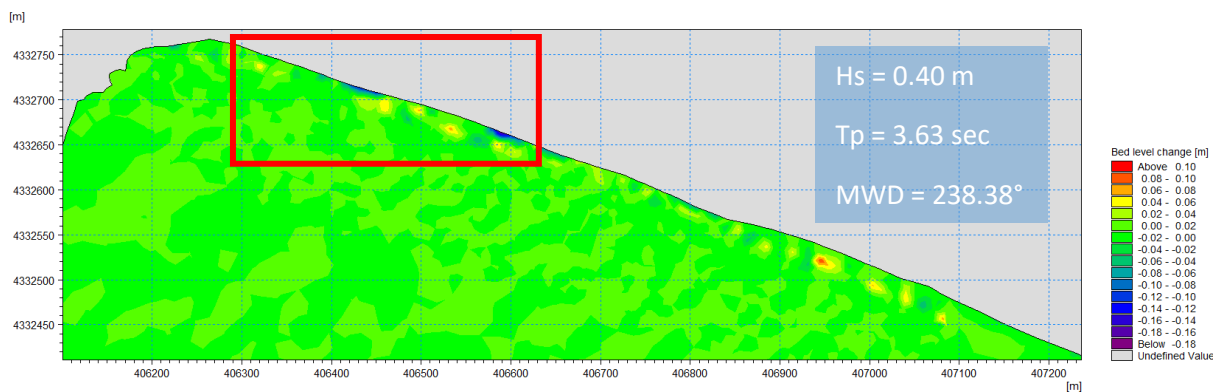
*Εικόνα 5.15: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας*



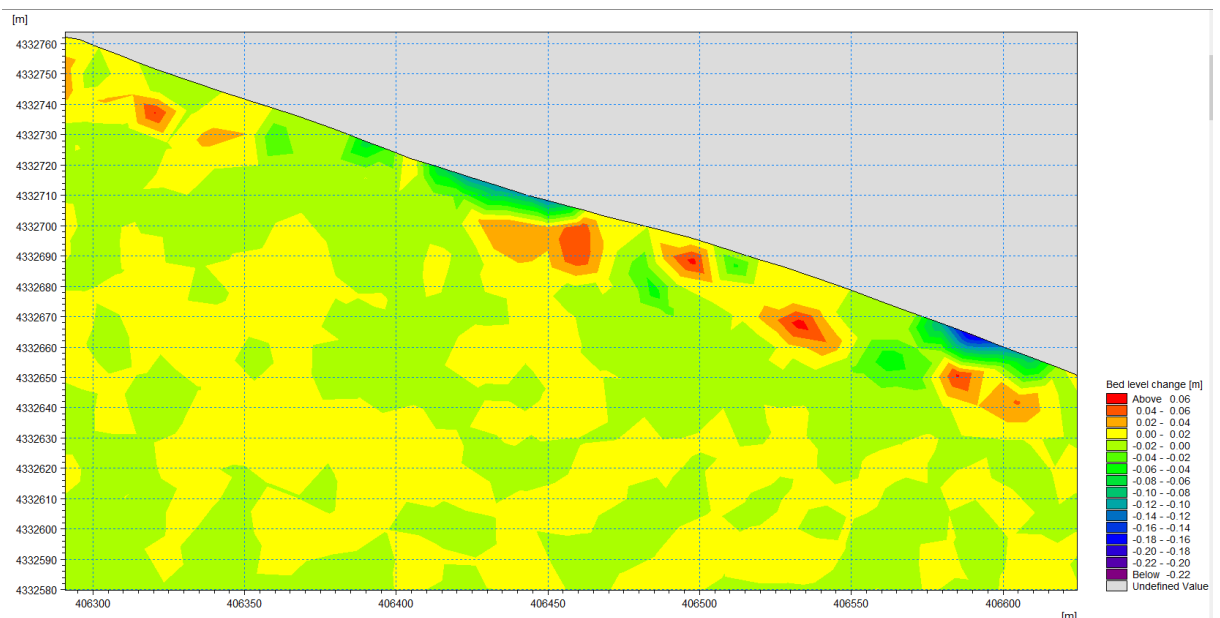
*Εικόνα 5.16: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής κατανομής ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας*

- *Sand Transport Module*

Όπως παρατηρείται στις *Εικόνες 5.17 και 5.18*, στην ευρύτερη περιοχή η μετακίνησης του ιζήματος είναι σχεδόν μηδενική. Εξάριση αποτελεί μια ζώνη σε απόσταση 30m από την ακτή, στην οποία παρατηρούνται κατά τόπους αποθέσεις και μικρές περιοχές διάβρωσης πολύ κοντά στην ακτή. Η όποια κίνηση του ιζήματος ακολουθεί την κατεύθυνση των προαναφερθέντων ρευμάτων. Σε σύγκριση με την μεταβολή του πυθμένα στην περίπτωση των 6 αντιπροσώπων, όπου παρατηρήθηκε ελαφρώς η υποχώρηση του πυθμένα, η εν λόγω κατάσταση θα μπορούσε να χαρακτηριστεί σχετικά πιο αμετάβλητη.



*Εικόνα 5.17: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας*



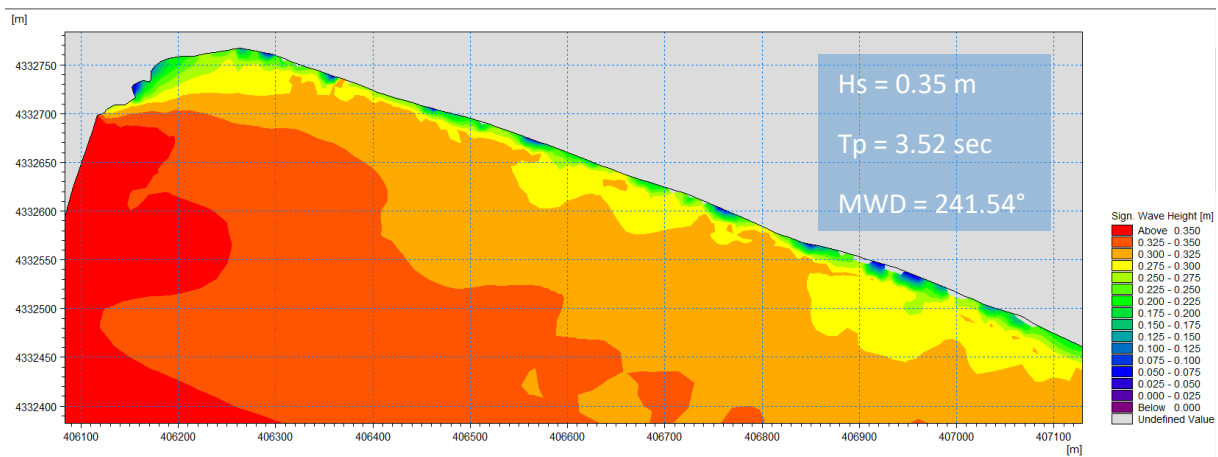
*Εικόνα 5.18: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας*

### 5.2.3 Αποτελέσματα μεθόδου ροής ενέργειας: επιλογή 18 αντιπροσώπων

- *Spectral Wave Module*

Η *Εικόνα 5.19* απεικονίζει την κατανομή του ύψους κύματος της συχνότερα εμφανιζόμενης κυματικής κατάστασης μεταξύ των 18 αντιπροσωπευτικών τιμών της ετήσιας χρονοσειράς. Το εισερχόμενο κύμα έχει συχνότητα εμφάνισης 30.85% στην διάρκεια του έτους, και προερχόμενο από τα νοτιοδυτικά χαρακτηρίζεται από ύψος κύματος 0.35m και περίοδο 3.52sec. Το μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση 100m από την ακτή λαμβάνει την τιμή 0.3m.

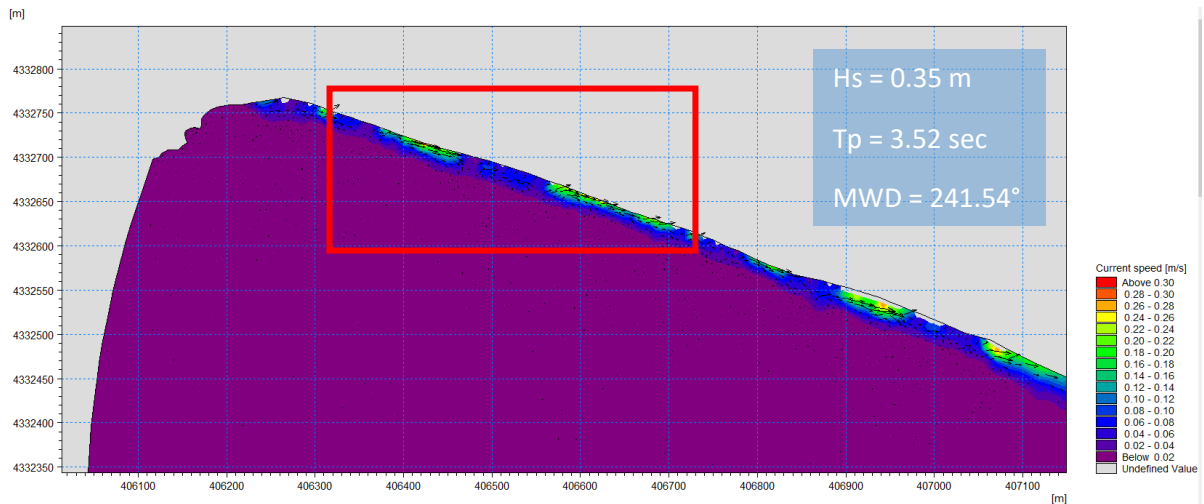
Συγκρίνοντας τις περιπτώσεις των 6, 12 και 18 κυματικών αντιπρόσωπων, παρατηρείται πως οι συχνότερα εμφανιζόμενοι κυματικοί αντιπρόσωποι παρουσιάζουν κοινά κυματικά χαρακτηριστικά εισερχόμενου από το ανοικτό όριο (μικρό ύψος κύματος, περίοδο, διεύθυνση σχεδόν κάθετη στην ακτή). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις παρόμοιες, μη σημαντικές κατανομές του ύψους κύματος εντός της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα, στην περιοχή των μετρήσεων παρατηρούνται μέγιστες τιμές ύψους κύματος 0.30-0.36m.



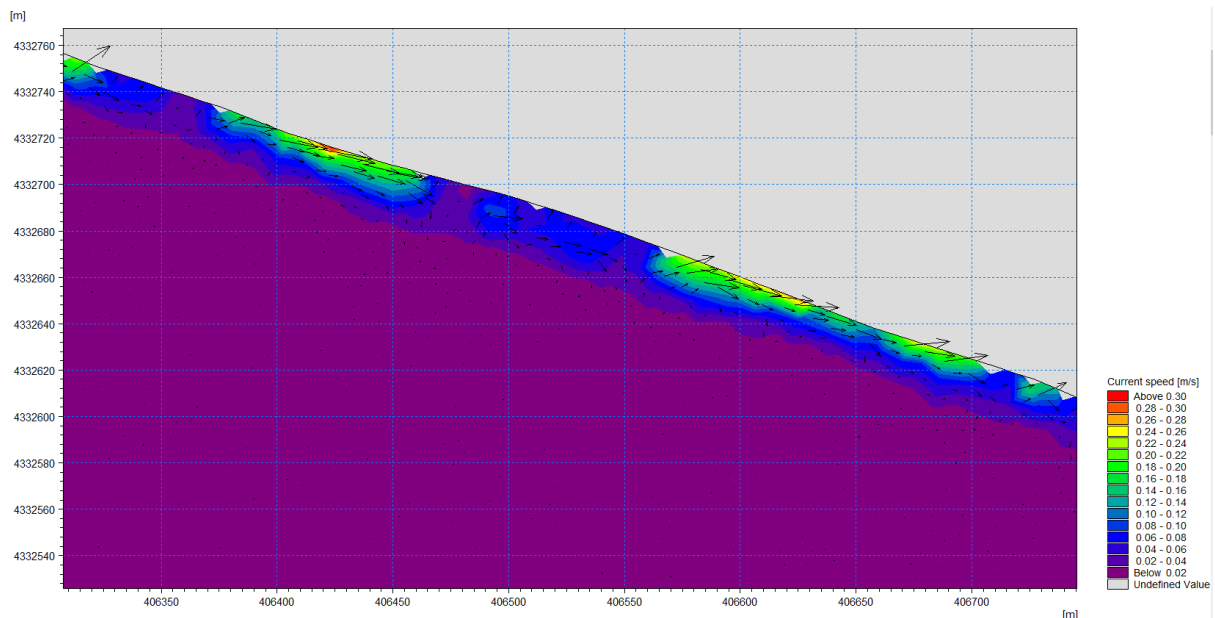
*Εικόνα 5.19: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10)  
18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας*

- *Hydrodynamic Module*

Στις Εικόνες 5.20 και 5.21, απεικονίζεται η σχεδόν μηδενική κυκλοφορία των ρευμάτων στην ευρύτερη περιοχή. Με εξαίρεση μια ζώνη σε απόσταση 20m από την ακτή όπου η ταχύτητα των ρευμάτων λαμβάνει τιμές της τάξης των 0.15-0.30m/s. Η κίνηση των ρευμάτων παραμένει παράλληλη στην ακτή, με διεύθυνση από τα βορειοδυτικά στα νοτιοανατολικά.



Εικόνα 5.20: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10)  
18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

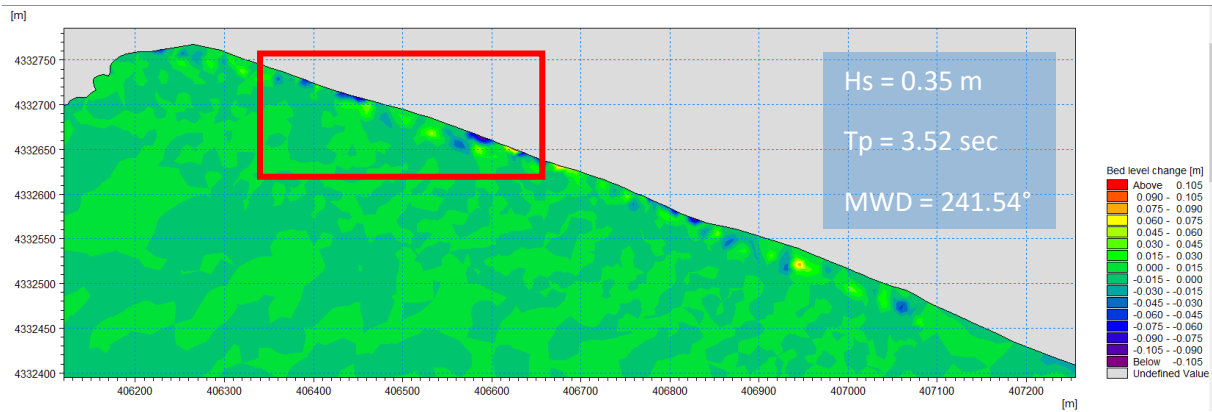


Εικόνα 5.21: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής κατανομής ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10)  
18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας

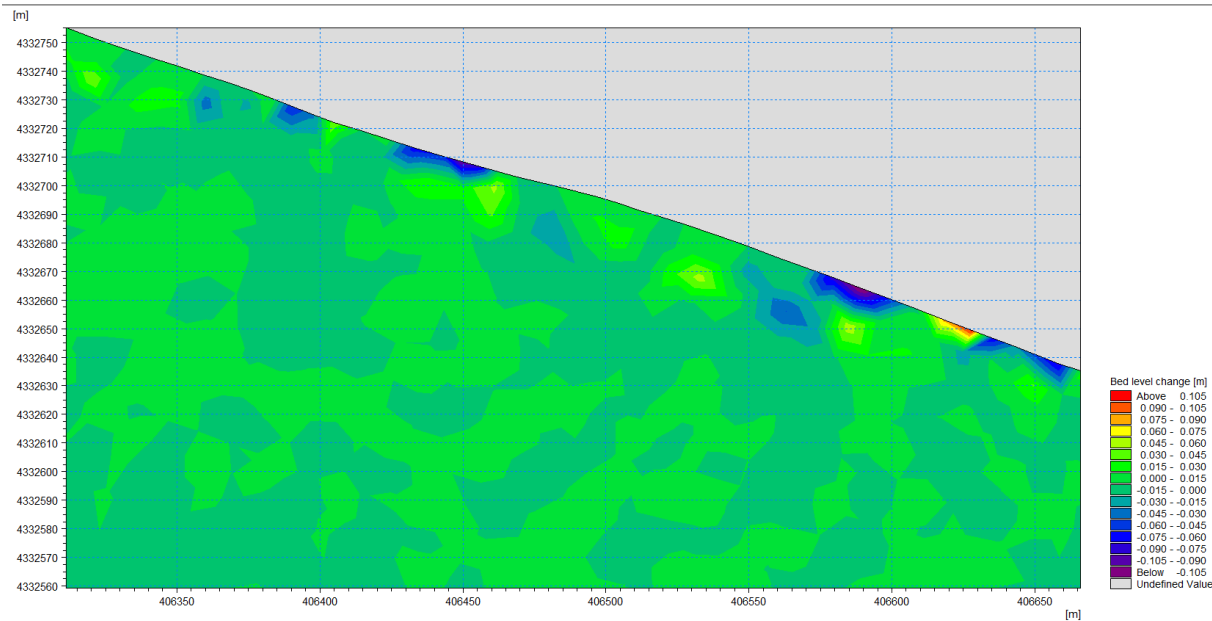


- *Sand Transport Module*

Στις *Εικόνες 5.22 και 5.23*, παρατηρούνται κυρίως περιοχές οριακά μηδενικής διάβρωσης, στην ευρύτερη περιοχή, με μέγιστη τιμή 0,105m σε μια ζώνη 20m από την ακτή. Το ίζημα κινείται στην διεύθυνση των ρευμάτων.



*Εικόνα 5.22: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10)  
18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας*



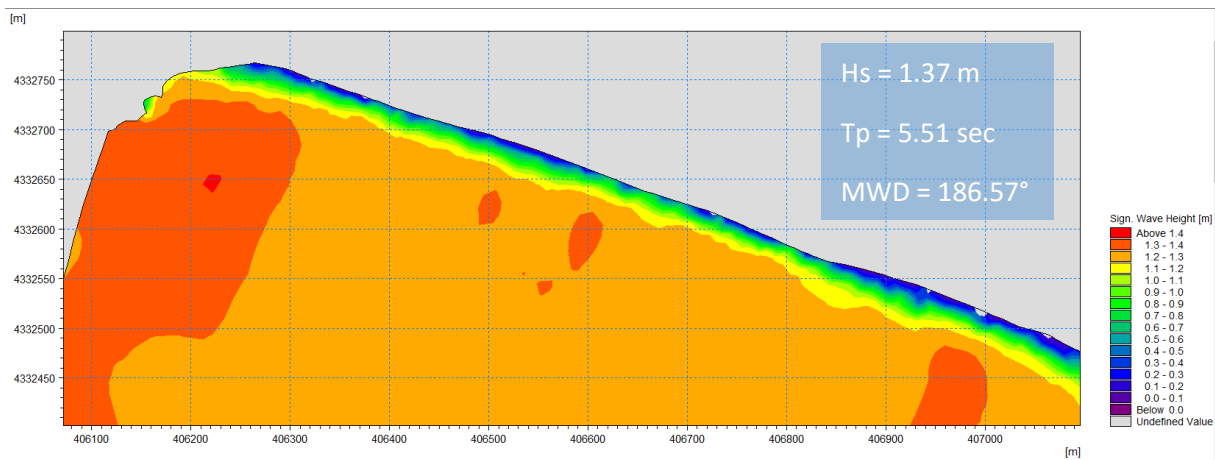
*Εικόνα 5.23: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10)  
18 αντιπρόσωποι μεθόδου ροής ενέργειας*

#### 5.2.4 Αποτελέσματα μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών: επιλογή 12 αντιπροσώπων

Όσον αφορά τα αποτελέσματα για τους 12 κυματικούς αντιπροσώπους που προέκυψαν από την μέθοδο ισοδύναμων κυματισμών, παρακάτω θα παρουσιαστούν η κατανομή του ύψους κύματος, η κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων και η μεταβολή της στάθμης του πυθμένα για τον αντιπρόσωπο με συχνότητες εμφάνισης 17.50%.

- *Spectral Wave Module*

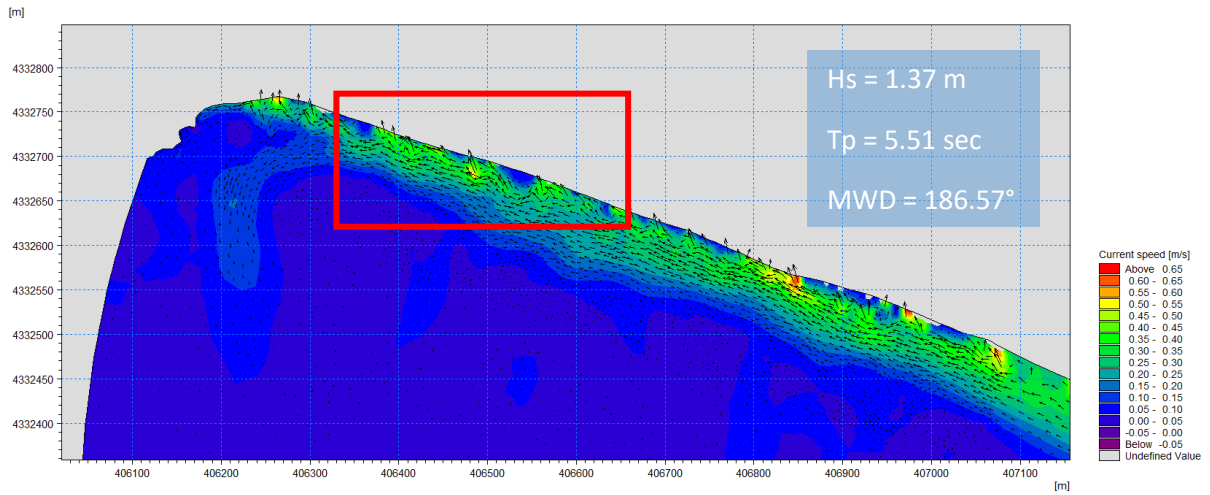
Η *Εικόνα 5.24* αφορά στον αντιπρόσωπο εισερχόμενου κυματισμού με συχνότητα εμφάνισης 17.50% εντός της ετήσιας χρονοσειράς. Το κύμα είναι νότιας διεύθυνσης με ύψος 1.37m και περίοδο 5.51sec. Το μέγιστο κυματικό ύψος στα πρώτα 100m από την ακτή, στην περιοχή των μετρήσεων, λαμβάνει την σημαντική τιμή των 1.3m.



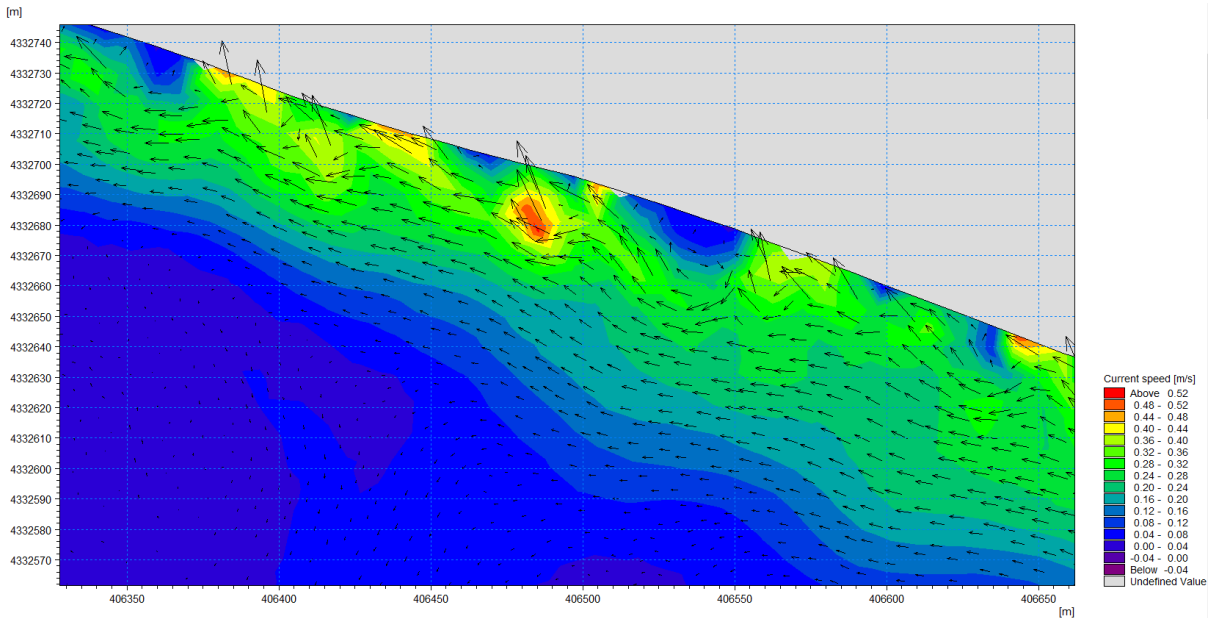
*Εικόνα 5.24: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών*

- *Hydrodynamic Module*

Οι *Εικόνες 5.25* και *5.26* απεικονίζουν την κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων που δημιουργούνται λόγω εισερχόμενου κυματισμού κάθετου στην ακτή ύψους 1.37m και περιόδου 5.51sec. Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης παρατηρείται σχεδόν μηδενική κίνηση, με εξαίρεση να αποτελεί μια ζώνη 170m από την ακτή, στην οποία αναπτύσσεται μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων 0.65m/s. Η κίνηση των ρευμάτων είναι παράλληλη στην ακτή με διεύθυνση από τα νοτιοανατολικά προς τα βορειοδυτικά. Λόγω της διεύθυνσης του εισερχόμενου κυματισμού (προερχόμενος από τα νότια), παρατηρούνται κατά τόπους στροβιλισμοί, όπως παραδείγματος χάριν στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχή μελέτης.



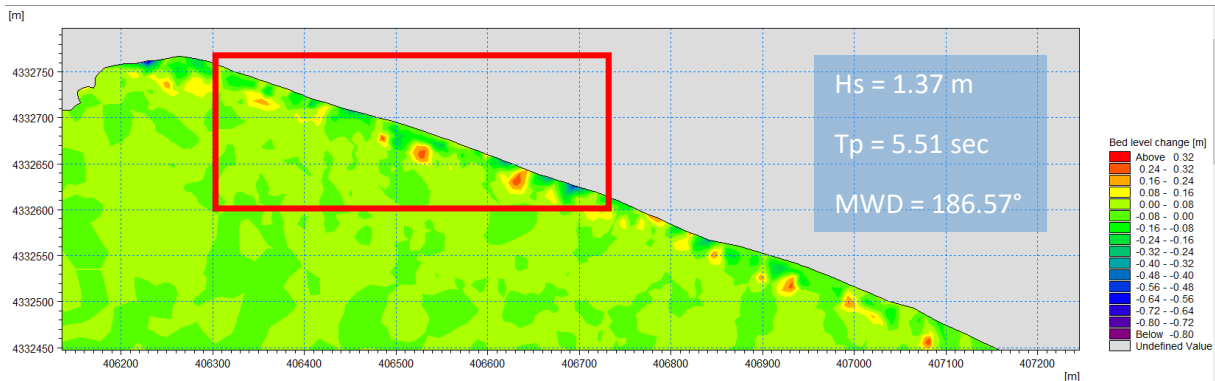
Εικόνα 5.25: Χωρική κατανομή ταχύτητας ρευμάτων (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών



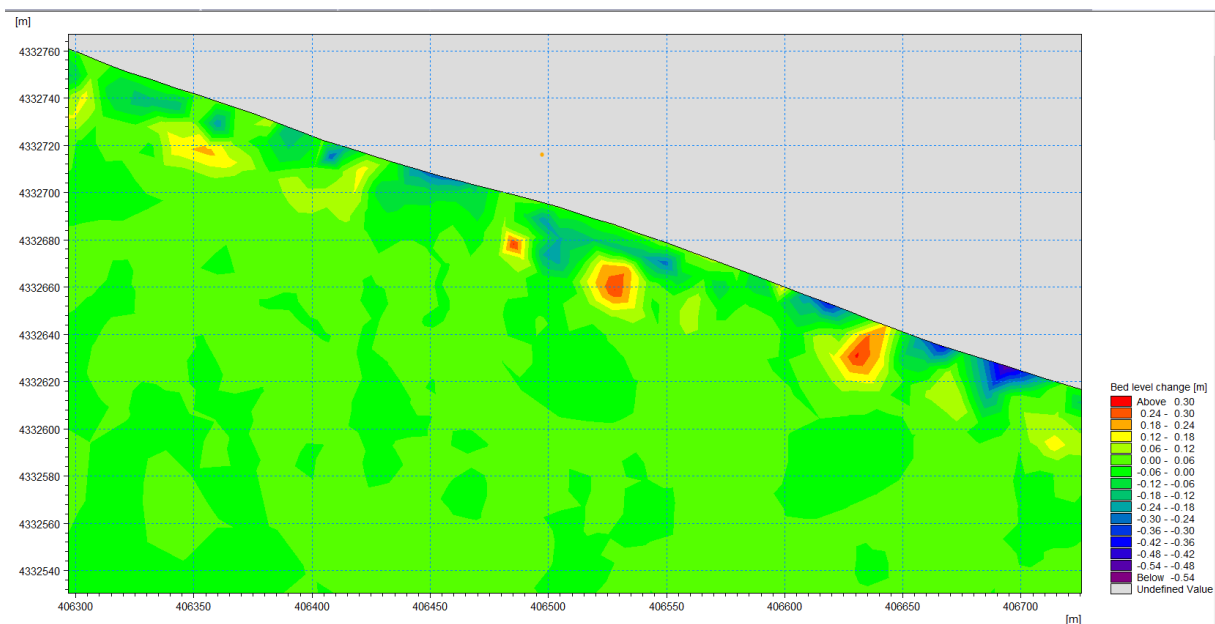
Εικόνα 5.26: Λεπτομέρεια στροβιλισμών ρευμάτων βορειοδυτικού τμήματος περιοχής μελέτης (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών

- *Sand Transport Module*

Στις *Εικόνες 5.27 και 5.28*, απεικονίζεται η κινητικότητα του ιζήματος, που προκαλεί η κυματική συνθήκη ετήσιας συχνότητας 17.50%. Παρατηρείται κυρίως μηδενική μετατόπιση ιζήματος, με μια ζώνη σε απόσταση 30m από την ακτή, στην οποία σημειώνεται εναπόθεση με μέγιστη τιμή 0.24m.



*Εικόνα 5.27: Χωρική μεταβολή στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών*



*Εικόνα 5.28: Λεπτομέρεια στην περιοχή των μετρήσεων χωρικής μεταβολής στάθμης πυθμένα (Time Step 10/10)  
12 αντιπρόσωποι μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών*

### 5.3 Τελικές βαθυμετρικές προσομοιώσεων – Σύγκριση με βαθυμετρικές μετρήσεων

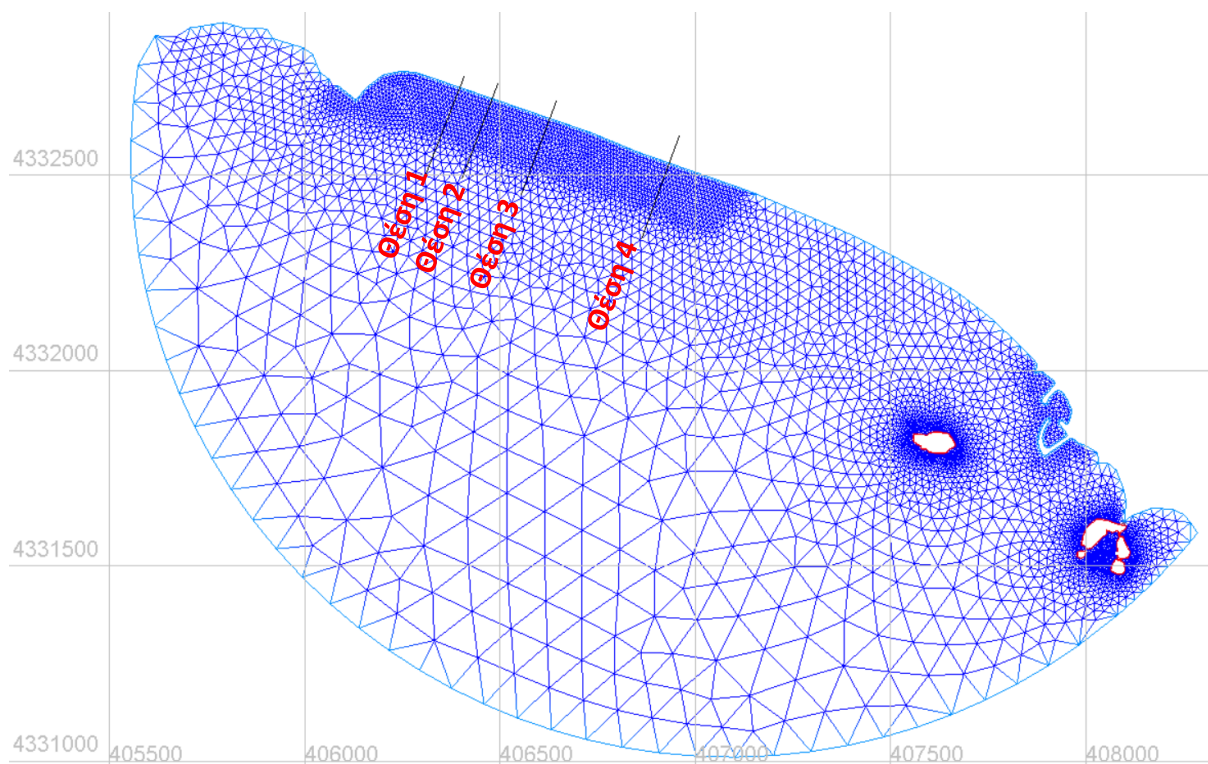
Για την προσέγγιση της τελικής προβλεπόμενης βαθυμετρίας, μέσω των υπολογισμών του μοντέλου MIKE 21, ακολουθεί η σύζευξη των μεταβολών του πυθμένα, Bed Level Change (BLC), για τον εκάστοτε αριθμό αντιπροσώπων. Τα BLC εξάγονται με την χρήση της δυνατότητας *Data Manager* του MIKE 21, μέσω της οποίας στην μεταβολή που επιφέρει η κάθε εισαγόμενη κυματική κατάσταση στην αρχική κατάσταση του πυθμένα συνηπολογίζεται και η συχνότητα εμφάνισης της.

Πριν το τελικό άθροισμα των επιμέρους BLC και της αρχικής κατάστασης, ακολουθεί μια επιπλέον διακριτοποίηση, κατά την οποία λαμβάνεται υπόψιν ο μειωμένος υπολογιστικός χρόνος του μοντέλου. Για κάθε σημείο της αρχικής βαθυμετρίας ελέγχεται αν το βάθος είναι μικρότερο από  $-0.7$  m. Σε αυτήν την περίπτωση το βάθος πολλαπλασιάζεται με έναν συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης, αποσκοπώντας στην καλύτερη προσομοίωση της τελικής βαθυμετρίας. Ο συντελεστής αυτός, στις δοκιμές που θα ακολουθήσουν, λαμβάνει τις τιμές 10, 15 και 20 ώστε να βρεθεί η τιμή που δίνει την βέλτιστη αποτύπωση. Η επιλογή της τιμής του συντελεστή γίνεται με βάση της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της μεθόδου ροής ενέργειας σε σχέση με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, όπως θα παρουσιασθεί στο *Κεφάλαιο 5.4*, και χρησιμοποιείται κατ' αντιστοιχία στα αποτελέσματα της μεθόδου Equivalent Waves.

Παρακάτω παρουσιάζονται σχηματοποιημένα, μέσω του προγράμματος BlueKenue, οι τελικές καταστάσεις της μεταβολής του πυθμένα, στις περιπτώσεις των 6, 12 και 18 αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας για τις παρακάτω περιπτώσεις συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης:

- Με τιμή πολλαπλασιαστικού συντελεστή (ΣΜΕ) ίση με 10.
- Με τιμή πολλαπλασιαστικού συντελεστή (ΣΜΕ) ίση με 15.
- Με τιμή πολλαπλασιαστικού συντελεστή (ΣΜΕ) ίση με 20.

Για την λεπτομερέστερη παρατήρηση στην περιοχή των μετρήσεων πεδίου, επιλέχθηκε η σύγκριση των προβλέψεων βαθυμετρίας και των μετρήσεων μέσω 4 κάθετων στην ακτή τομών, οι θέσεις των οποίων παρουσιάζονται στην *Εικόνα 5.29*. Οι θέσεις 1 έως 3 επιλέγονται στην περιοχή από την οποία έχουν ληφθεί κυρίως στοιχεία ιζήματος, ενώ η 4 σε κάποια πιο απομακρυσμένη θέση, η οποία ίσως επηρεάζεται και από την εκβολή του ρέματος της Χαλάνδρας. Στα διαγράμματα των τομών παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες βαθυμετρίες, με την εκάστοτε διαφοροποίηση στον συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης, και ως αναφορά η αρχική (14/02/2015) και τελική (19/11/2015) βαθυμετρία από τις μετρήσεις του 2015.

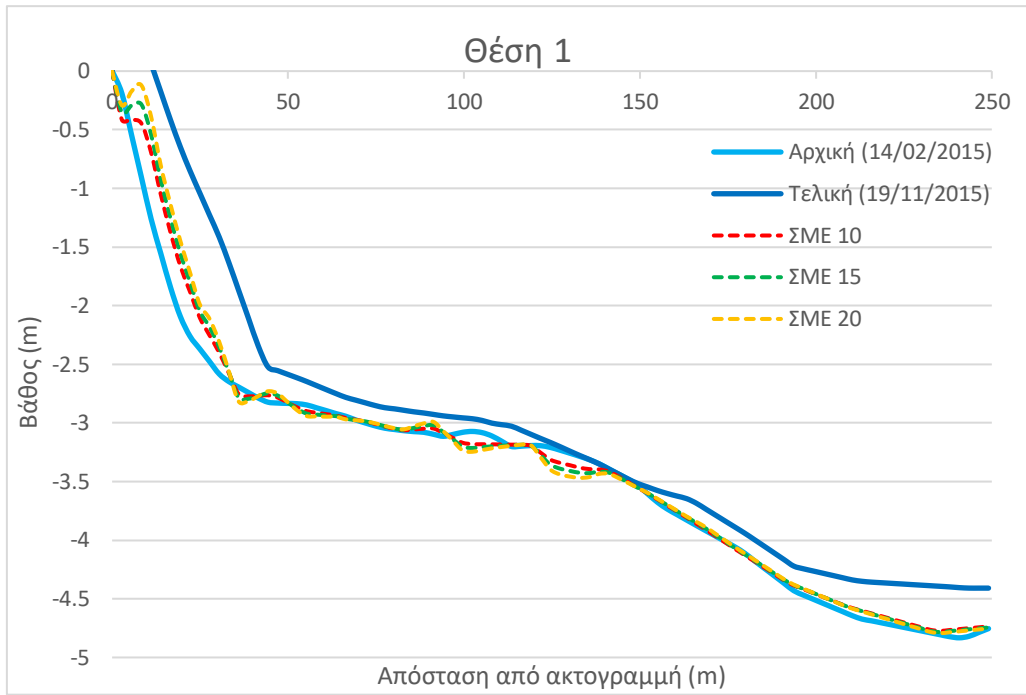


Εικόνα 5.29: Θέσεις κάθετων στην ακτή τομών, στην περιοχή των υπάρχοντων μετρήσεων

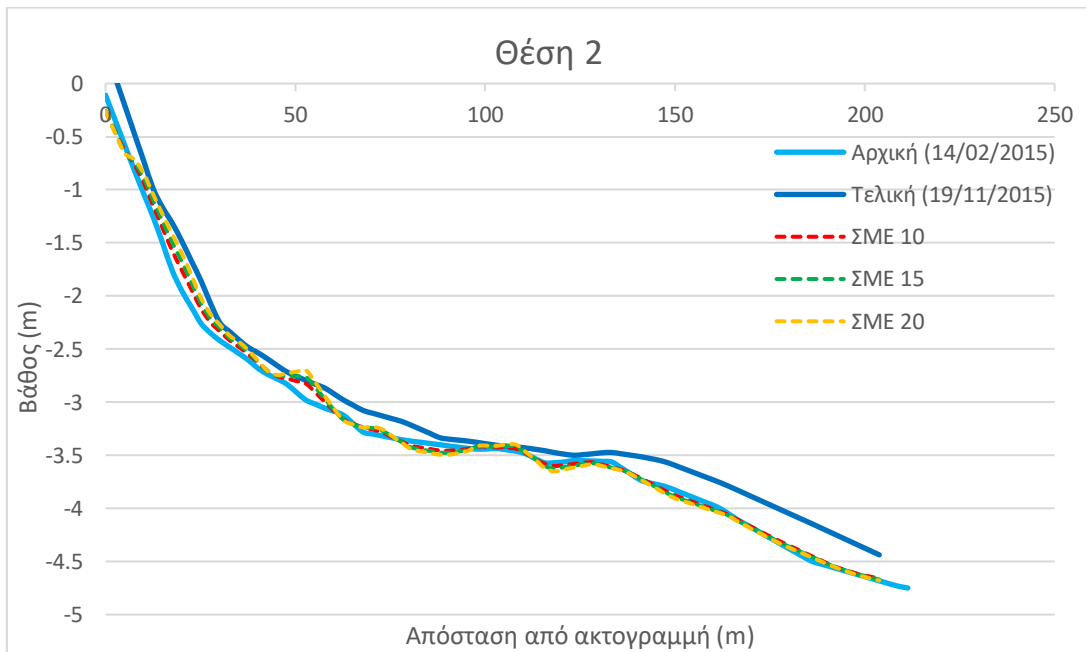
### 5.3.1 Τελικές βαθυμετρίες προσομοιώσεων – Επιλογή 6 αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας

Πριν τον σχολιασμό των προβλέψεων με τις διαφορετικές τιμές συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης, αξίζει να σημειωθούν κάποιες παρατηρήσεις ως προς τις βαθυμετρίες των μετρήσεων. Στις τομές 1 έως 3 (Εικόνα 5.30 έως 5.32), παρατηρείται κυρίως απόθεση ιζήματος κατά το πέρας του έτους. Στην τομή 4 (Εικόνα 5.33), η οποία βρίσκεται σε πιο απομακρυσμένη προς τα ανατολικά θέση από τις προηγούμενες, παρατηρείται διαβρωμένη εικόνα της ακτής στα πρώτα μέτρα. Όσο αυξάνεται η απόσταση από την ακτή ακολουθείται ένα εναλλασσόμενο προφίλ διάβρωσης και απόθεσης ιζήματος.

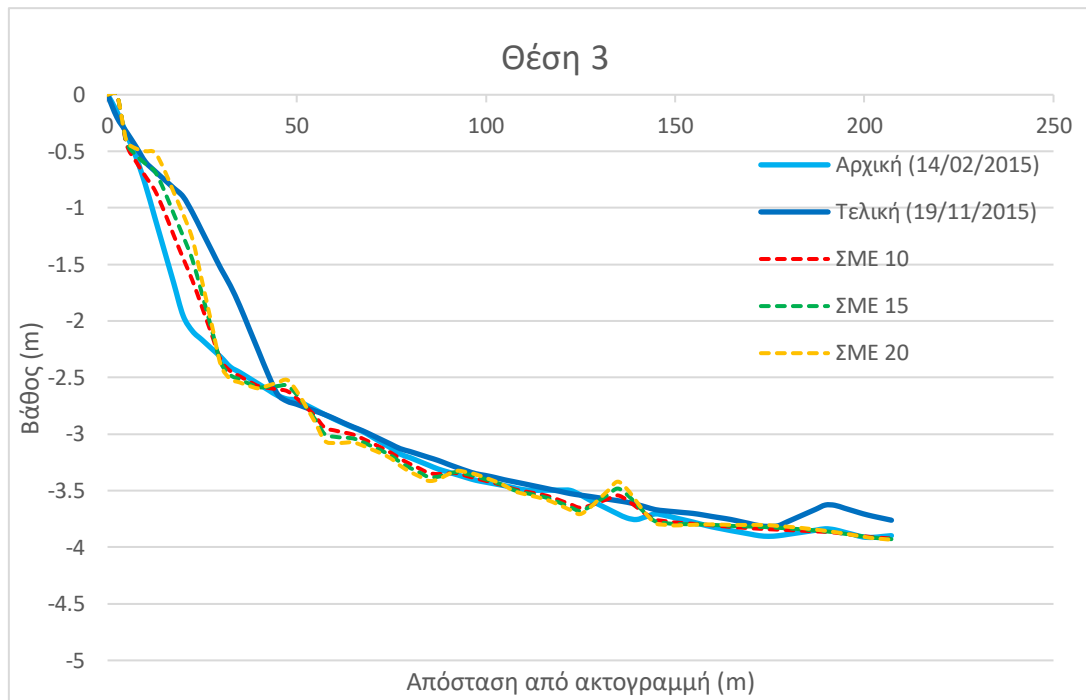
Στις παρακάτω τομές, παρατηρείται πως το μοντέλο προσεγγίζει καλύτερα την βαθυμετρία των μετρήσεων όσο αυξάνεται η απόσταση από την ακτή. Η δυσκολία προσέγγισης της βαθυμετρίας στα πρώτα μέτρα από την ακτή προκύπτει από το γεγονός πως στο μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνεται το φαινόμενο της αναρρίχησης. Από την οπτική παρατήρηση, προκύπτει πως στις 2 πρώτες τομές, οι προβλέψεις προσομοιάζουν καλύτερα την αρχική κατάσταση των μετρήσεων απ' ό,τι την τελική (Εικόνα 5.30 και 5.31). Η τελική κατάσταση των μετρήσεων φαίνεται να προσεγγίζεται καλύτερα στις θέσεις 3 και 4 (Εικόνα 5.32 και 5.33). Συνολικά, η τελική βαθυμετρία προσεγγίζεται καλύτερα από την πρόβλεψη πολλαπλασιασμένη με συντελεστή επιτάχυνσης 20. Στην περίπτωση των 6 αντιπροσώπων, οι προβλέψεις ανεξαρτήτως συντελεστή, φαίνεται να αναπαριστούν προφίλ μικρότερης απόθεσης από αυτό των τελικών μετρήσεων.



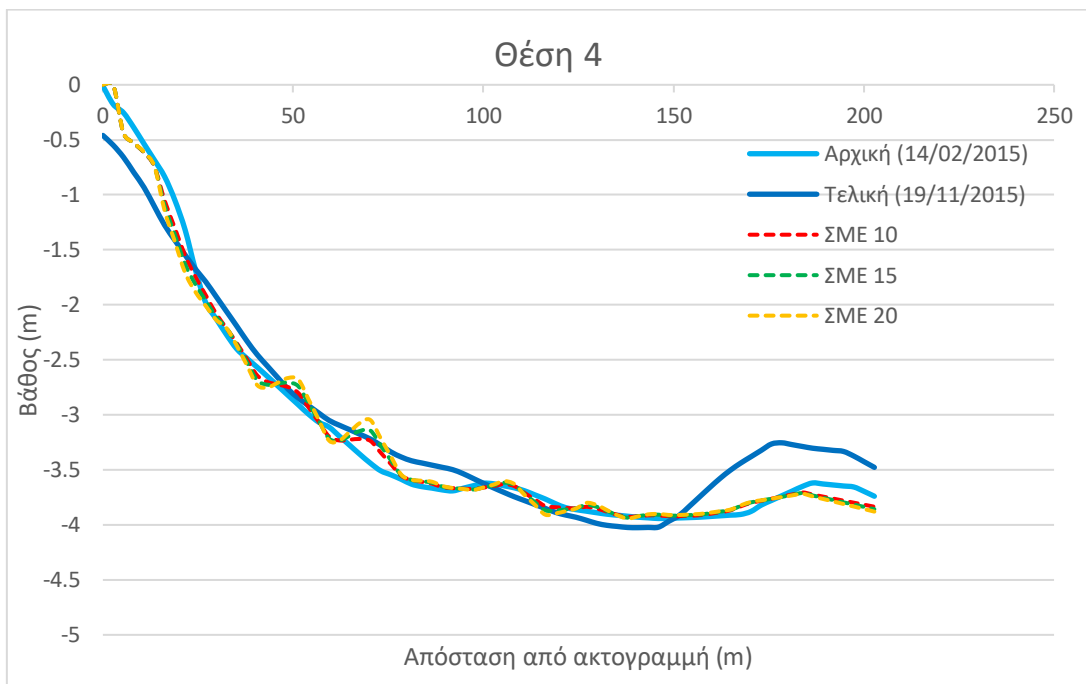
Εικόνα 5.30: Τομή θέση 1 - 6 αντιπρόσωποι EFM



Εικόνα 5.31: Τομή θέση 2 - 6 αντιπρόσωποι EFM



*Εικόνα 5.32: Τομή θέση 3 - 6 αντιπρόσωποι EFM*

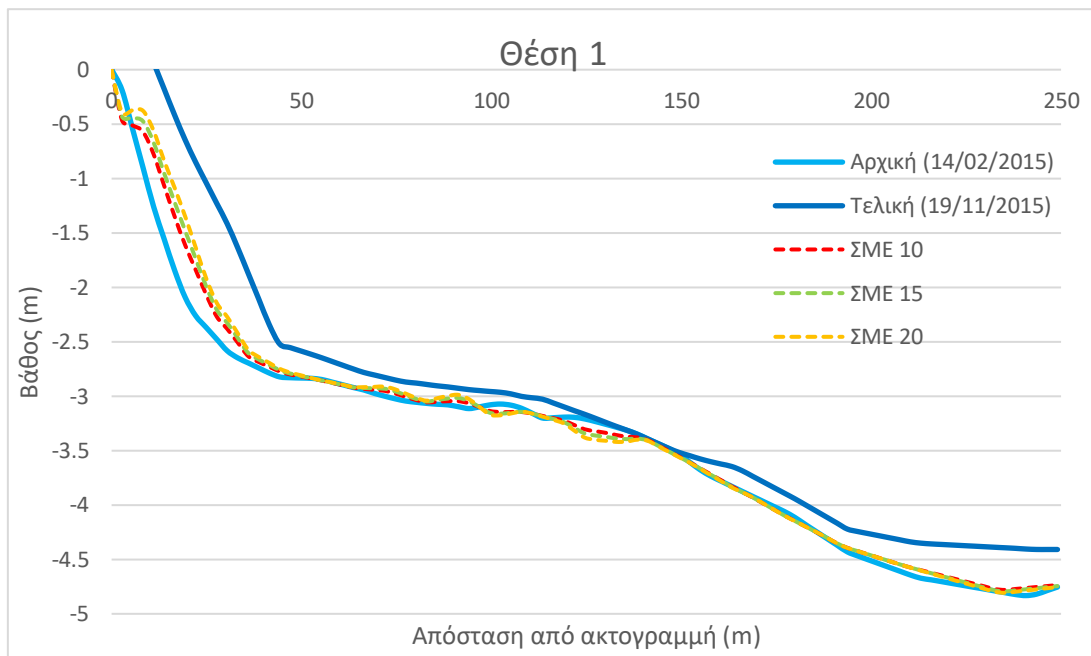


*Εικόνα 5.33: Τομή θέση 4 - 6 αντιπρόσωποι EFM*

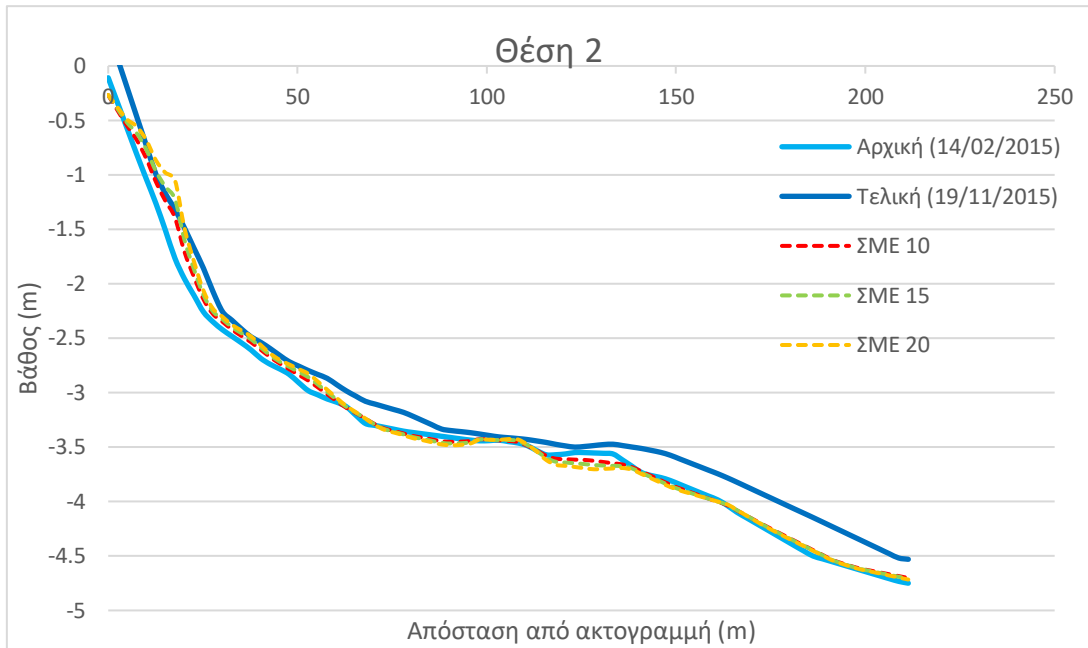


### 5.3.2 Τελικές βαθυμετρίες προσομοιώσεων – Επιλογή 12 αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας

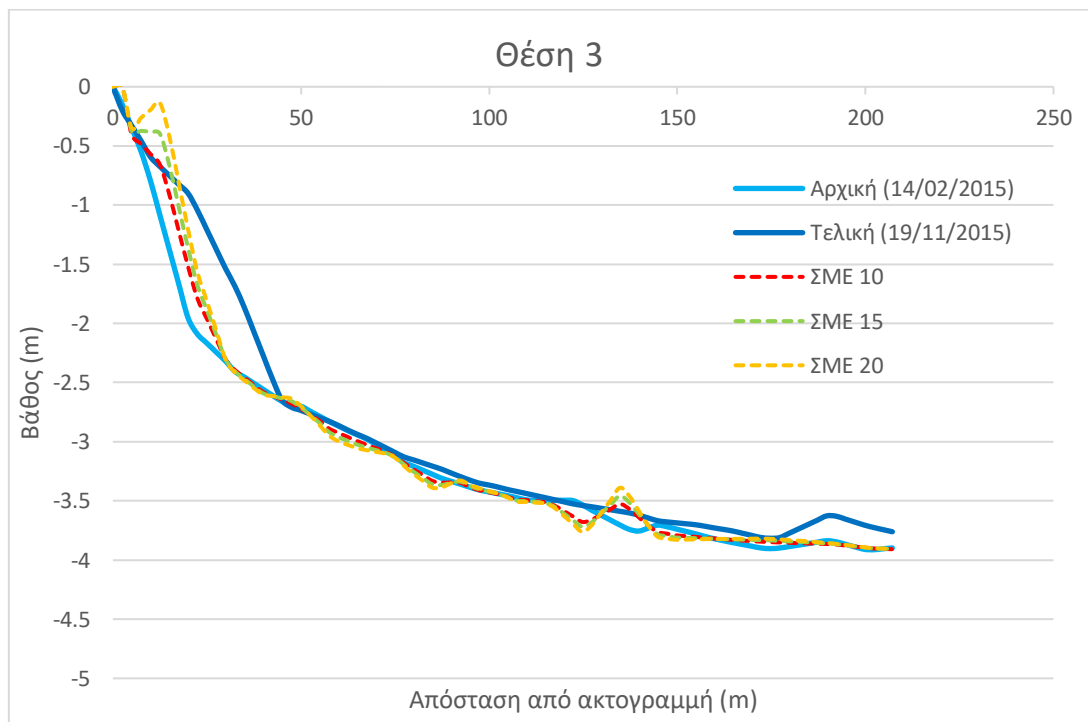
Στις Εικόνες 5.34 έως 5.37 παρουσιάζονται οι 4 κάθετες στην ακτή τομές για την περίπτωση των 12 αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας. Από την παρατήρηση των σχημάτων, μπορεί να εξαχθεί ως συμπέρασμα πως και σε αυτήν την περίπτωση αντιπροσωπευτικών τιμών, οι προβλέψεις συνολικά υποεκτιμούν την συνολική απόθεση ιζήματος, σε σχέση με την τελική βαθυμετρία των μετρήσεων. Στα πρώτα μέτρα από την ακτή, όπου εμφανίζονται και οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από την πραγματικές συνθήκες, φαίνεται πως η πρόβλεψη με συντελεστή επιτάχυνσης 20 δίνει την καλύτερη προσέγγιση, ενώ όσο αυξάνεται η απόσταση από την ακτή δεν είναι οπτικά το ίδιο ευδιάκριτο ποιος από τους τρεις συντελεστές αποδίδει καλύτερα. Συγκριτικά με την περίπτωση των 6 αντιπροσώπων, παρατηρούνται καλύτερες προσεγγίσεις τις τελικής στάθμης του πυθμένα.



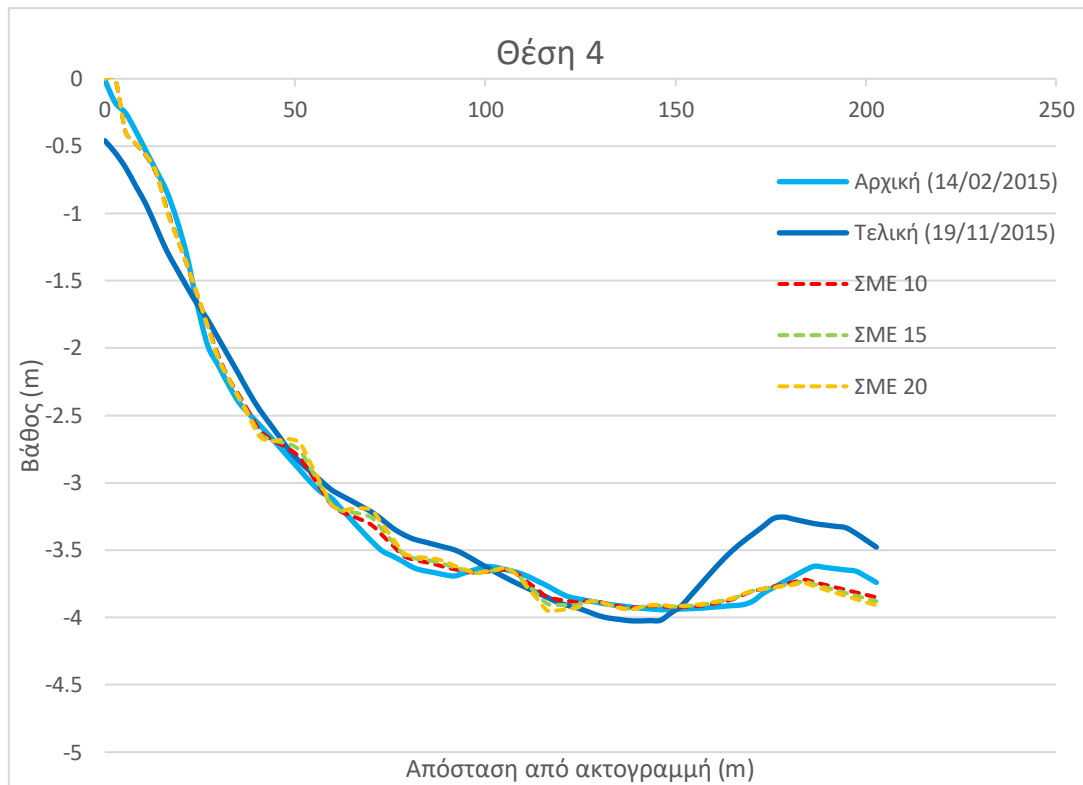
Εικόνα 5.34: Τομή θέση 1 - 12 αντιπρόσωποι EFM



Εικόνα 5.35: Τομή θέση 2 - 12 αντιπρόσωποι EFM



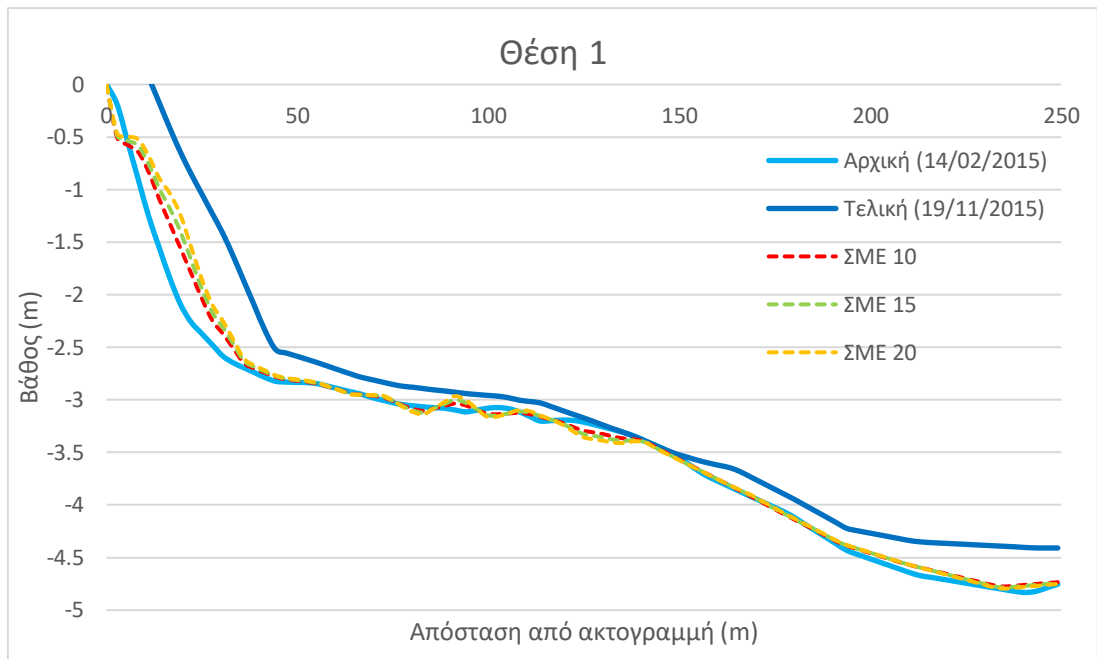
Εικόνα 5.36: Τομή θέση 3 - 12 αντιπρόσωποι EFM



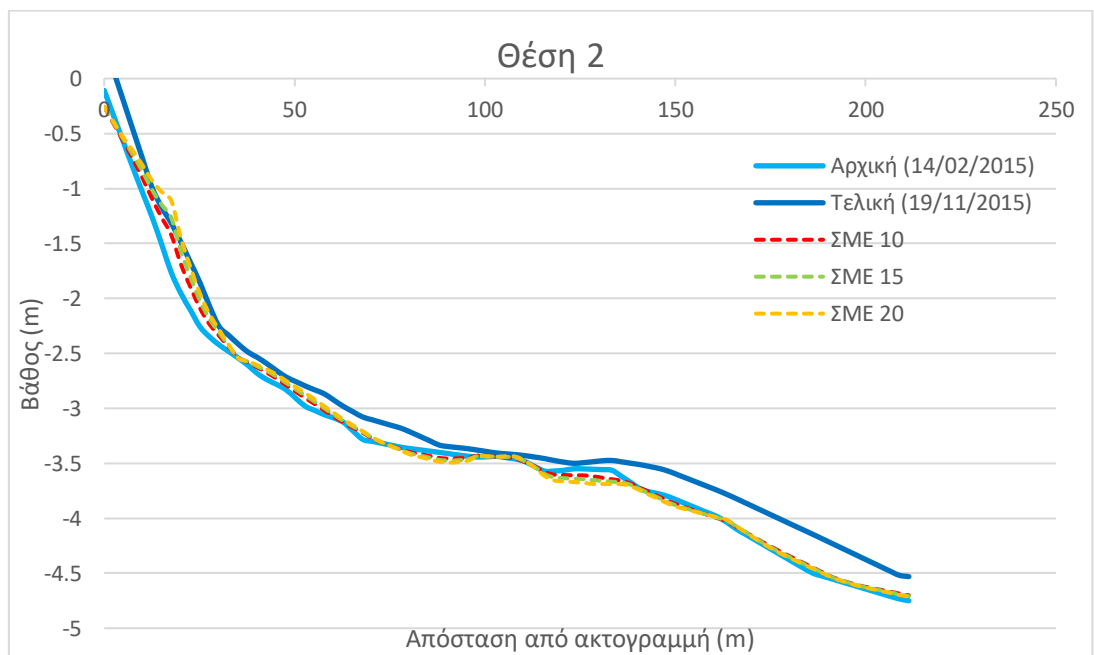
Εικόνα 5.37: Τομή θέση 4 - 12 αντιπρόσωποι EFM

### 5.3.3 Τελικές βαθυμετρίες προσομοιώσεων – Επιλογή 18 αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας

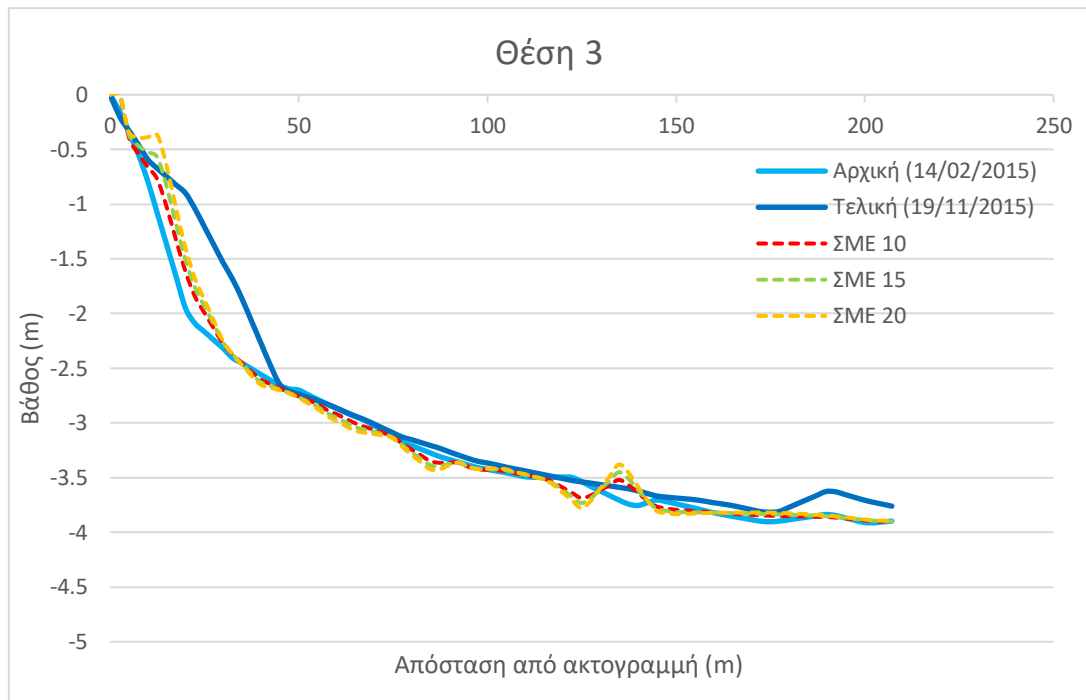
Όπως αναφέρθηκε και στον σχολιασμό των τομών για τις παραπάνω περιπτώσεις αριθμού αντιπροσωπευτικών κυματικών καταστάσεων της μεθόδου ροής ενέργειας, το μοντέλο αδυνατεί να προσομοιάσει επαρκώς τα πρώτα μέτρα από την ακτή. Συνολικά, φαίνεται πως οι προσομοιώσεις για 18 κυματικούς αντιπροσώπους, υποεκτιμούν την απόθεση ιζήματος κοντά στην ακτή (Σχήματα 5.38 έως 5.41). Από την οπτική παρατήρηση προκύπτει πως, η περίπτωση των 18 αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας, φαίνεται να προσεγγίζει καλύτερα την τελική βαθυμετρία των μετρήσεων, σε σχέση με την περίπτωση των 6 αντιπροσώπων.



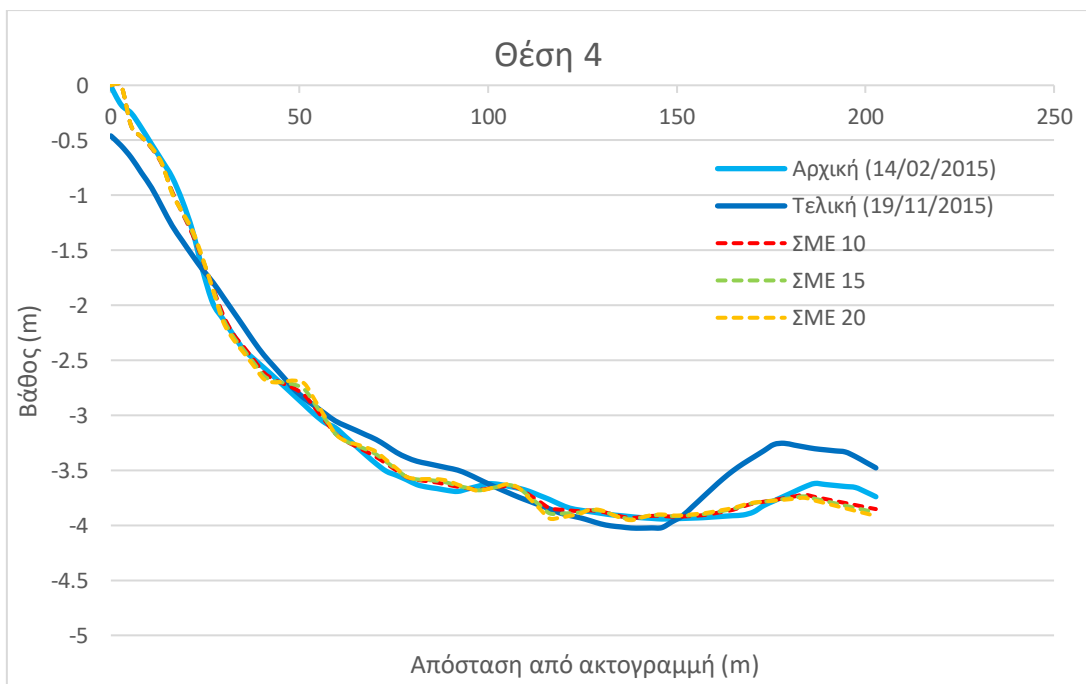
Εικόνα 5.38: Τομή θέση 1 - 18 αντιπρόσωποι EFM



Εικόνα 5.39: Τομή θέση 2 - 18 αντιπρόσωποι EFM



Εικόνα 5.40: Τομή θέση 3 - 18 αντιπρόσωποι EFM



Εικόνα 5.41: Τομή θέση 4 - 18 αντιπρόσωποι EFM

Δεδομένης της αβεβαιότητας και της υποκειμενικότητας του παρατηρητή, ακολουθεί η ανάπτυξη μιας υπολογιστικής μεθόδου αξιολόγησης των αποτελεσμάτων πρόβλεψης του μοντέλου, σε σχέση με τις δεδομένες μετρήσεις του πεδίου.

## 5.4 Αξιολόγηση προσομοίωσης μοντέλου

Για να διαπιστωθεί αξιοπιστία των προβλέψεων του αριθμητικού μοντέλου, σε σχέση με τις παρατηρήσεις στο πεδίο, απαιτείται η αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός συνόλου κριτηρίων, τα οποία προσδιορίζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των στατιστικών μετρήσεων της απόδοσης των μορφολογικών μοντέλων, και δεν περιορίζεται στην υποκειμενική κρίση του μελετητή.

Τα κριτήρια αξιολόγησης της απόδοσης ενός μορφολογικού μοντέλου είναι τα εξής:

- Η μεροληψία του μοντέλου (*bias*). Το *bias* μια μέτρηση της διαφοράς των κεντρικών τάσεων μεταξύ των προβλέψεων και των παρατηρήσεων. Οι βασικές εξισώσεις του *bias* είναι αυτή της μέσου ( $Bias_a$ ) και της διαμέσου ( $Bias_m$ ):

$$Bias_a = \langle Y \rangle - \langle X \rangle \quad (5.1)$$

$$Bias_m = Y_m - X_m \quad (5.2)$$

Όπου ως  $Y$  ορίζεται το σύνολο των προβλέψεων της τελικής βαθυμετρίας, ως  $X$  ορίζεται το σύνολο των μετρήσεων της τελικής βαθυμετρίας. Ως  $\langle Y \rangle$  ορίζεται ο μέσος όρος και ως  $Y_m$  η διάμεσος του συνόλου  $Y$ , αντιστοίχως και για το σύνολο  $X$ .

Η μεροληψία φανερώνει την τάση της προς τα πάνω ή προς τα κάτω πρόβλεψης, με την θετική μεροληψία να δηλώνει πως το μοντέλο συνεχώς υπερπροβλέπει τις παρατηρήσεις.

- Η ακρίβεια του μοντέλου (*accuracy*). Το *accuracy* είναι μια μέτρηση του μέσου μεγέθους της διαφοράς μεταξύ ενός συνόλου προβλέψεων και των αντίστοιχων παρατηρήσεων. Η μέτρηση της ακρίβειας γίνεται συνήθως μέσω του μέσου απόλυτου σφάλματος ( $MAE$ ) και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος ( $MSE$ ):

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

$$MSE(Y, X) = \langle (Y - X)^2 \rangle \quad (5.4)$$

Το  $MAE$  εφαρμόζεται εξίσου σε διανύσματα και για βαθμωτές τιμές, και έτσι είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για επικύρωση και αξιολόγηση υδροδυναμικής μοντελοποίησης (Sutherland κ.α., 2004). Παρόλα αυτά, το  $MAE$  είναι πιο περίπλοκο μαθηματικά από το  $MSE$ , λόγω της ύπαρξης του απολύτου.

- Η ικανότητα του μοντέλου (*skill*). Το *skill* είναι μια αδιάστατη μέτρηση της ακρίβειας μιας πρόβλεψης σε σχέση με την πρόβλεψη βάσης (*baseline*), η οποία θα μπορούσε να είναι μια αρχική συνθήκη, μια μέση τιμή, μια τυχαία επιλογή, ή ένας εμπειρικός προγνωστικός παράγοντας.

Η βαθμολόγηση της ικανότητας ενός μοντέλου μπορεί να βασιστεί στο μέσο απόλυτο σφάλμα, στο μέσο τετραγωνικό σφάλμα ή στο ριζικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα. Μια γενική μορφή βαθμολόγησης της ικανότητας μπορεί να δοθεί από την εξίσωση:

$$SS = \frac{A(B,X) - A(Y,X)}{A(B,X) - A(W,X)} \quad (5.5)$$

Όπου  $A(B, X)$  η ακρίβεια της πρόβλεψης βάσης,  $A(Y, X)$  η ακρίβεια των προβλέψεων, και  $A(W, X)$  η ακρίβεια ενός τέλει συνόλου, η οποία λαμβάνεται ως μηδέν. Ως  $B$  ορίζεται μια βαθυμετρία βάσης (baseline), συνήθως το σύνολο των μετρήσεων της αρχικής βαθυμετρίας.

Για την αξιολόγηση της ικανότητας ενός πιθανοτικού μοντέλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέτρα ακρίβειας το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ( $MSE$ ), ρίζα μέσο τετράγωνο σφάλμα ( $RMSE$ ) και μέσο απόλυτο σφάλμα ( $MAE$ ) ως μέτρα ακρίβειας.

Στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εν λόγω εργασίας, θα εφαρμοσθούν τα κριτήρια που ορίζει το Brier Skill Score (BSS). Το BSS έχει εφαρμοσθεί στην μοντελοποίηση της παράκτιας μορφολογίας από τους Brady και Sutherland (2001), Sutherland κ.α. (2001), Van Rijn κ.α. (2002), Van Rijn κ.α. (2003) and Sutherland and Soulsby (2003).

Το BSS ορίζεται ως:

$$BSS = 1 - \frac{MSE(Y, X)}{MSE(B, X)} = 1 - \frac{\langle (Y-X)^2 \rangle}{\langle (B-X)^2 \rangle} \quad (5.6)$$

Τα αποτελέσματα που μπορεί να προκύψουν από την εν λόγω μέθοδο αξιολόγησης των ικανοτήτων πιθανολογικών μοντέλων χωρίζονται σε κατηγορίες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6.

Πίνακας 5.6: Προτεινόμενη ταξινόμηση τιμών Brier Skill Score – πηγή Sutherland κ.α. (2004)

| Κατηγοριοποίηση | Τιμές BSS |
|-----------------|-----------|
| Εξαιρετική      | 1.0-0.5   |
| Καλή            | 0.5-0.2   |
| Ικανοποιητική   | 0.2-0.1   |
| Ανεπαρκής       | 0.1-0.0   |
| Κακή            | < 0.0     |

Η συνθήκη τέλει συμφωνίας, η οποία δίνει βαθμολογία ικανότητας 1. Ωστόσο, σημειώνεται πως ένα BSS μεγαλύτερο από 0.2 αντιπροσωπεύει μια χρήσιμη πρόβλεψη. Η μοντελοποίηση της αρχικής συνθήκης, η οποία δίνει βαθμολογία ικανότητας 0. Μεγάλη απόκλιση της τελικής συνθήκης από την πρόβλεψη βάσης δίνει αρνητικές τιμές βαθμολογίας ικανότητας. Οι βαθμολογίες ικανότητας είναι απεριόριστες στο κατώτερο όριο, και έτσι χαρακτηρίζονται από μεγάλη ευαισθησία σε αλλαγές, όταν είναι μικρός ο παρονομαστής. Ως εκ τούτου, μπορεί να είναι εξαιρετικά ευαίσθητες σε μικρές αλλαγές, όταν ο παρονομαστής είναι χαμηλός, καθώς και λόγω άλλων αδιάστατων βαθμολογιών δεξιοτήτων που προέρχονται από την αναλογία των δύο αριθμών. Επομένως, μεγάλες αρνητικές τιμές μπορούν να ληφθούν ακόμη και από μοντέλα που προβλέπουν μια μικρή αλλαγή (της σωστής τάξης μεγέθους) όταν η μετρούμενη μεταβολή είναι πολύ μικρή. Υπό αυτές τις συνθήκες, διαφορετικά μοντέλα του ίδιου πειράματος μπορούν να συγκριθούν, εφόσον θα χρησιμοποιηθεί ο ίδιος μικρός παρονομαστής.

Σύμφωνα με την έρευνα των Sutherland κ.α. (2004), η αξιολόγηση μέσω BSS προσφέρει τη δυνατότητα αποσύνθεσης σε όρους φάσης, εύρους και μεροληψίας, γεγονός που αποτελεί

πλεονέκτημα έναντι άλλων μεθόδων βαθμολόγησης ικανοτήτων, όπως οι MAE, MSE και RMSE.

Κάνοντας χρήση του Brier Skill Score (BSS) θα ακολουθήσει η αξιολόγηση, και τελικά η βέλτιστη επιλογή, του συντελεστή μορφολογική επιτάχυνσης ώστε οι βαθυμετρία των προβλέψεων να προσεγγίζει ικανοποιητικά την βαθυμετρία των μετρήσεων. Στην επιλογή του συντελεστή λαμβάνονται υπόψιν τα BSS για τις περιπτώσεις των 6, 12 και 18 αντιπροσώπων της μεθόδου Energy Flux. Έπειτα, για τον συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης που επιλέχθηκε, θα ακολουθήσει η επιλογή του βέλτιστου αριθμού αντιπροσώπων, με εκ νέου αξιολόγηση των BSS.

#### 5.4.1 Επιλογή βέλτιστου συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης (ΣΜΕ) μεθόδου ροής ενέργειας

Για τους υπολογισμούς που ακολουθούν, κάθε μια από τις 4 τομές χωρίστηκε σε 100 σημεία, τα οποία διατηρήθηκαν σταθερά κατά την εξαγωγή των συντεταγμένων τους από την εκάστοτε βαθυμετρία. Για τον υπολογισμό των BSS χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω βαθυμετρίες:

- Ως βαθυμετρία βάσης (*B*): οι αρχικές μετρήσεις 14/02/2015.
- Ως τελική βαθυμετρία μετρήσεων (*X*): οι τελικές μετρήσεις 19/11/2015.
- Ως τελική βαθυμετρία προβλέψεων (*Y*): η εκάστοτε προβλεπόμενη βαθυμετρία για τιμές συντελεστή μορφολογική επιτάχυνσης (ΣΜΕ) 10, 15 και 20.

Στην περίπτωση των 6 αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας (Πίνακας 5.7), παρατηρούνται συνολικά θετικές τιμές BSS. Οι θέσεις 1, 2 και 3 δίνουν BSS μεγαλύτερο από 0.2, όπου θεωρείται η οριακή τιμή χρήσιμης πρόβλεψης, με τον συντελεστή επιτάχυνσης 20 να αποδίδει καλύτερα στις θέσεις 1 και 3 (με τιμές BSS 0.421 και 0.458 αντίστοιχα), και τον συντελεστή 15 στην θέση 2 (με τιμή BSS 0.217). Για την θέση 4, η οποία δεν δίνει τιμές BSS ικανοποιητικής ικανότητας, παρατηρείται πως ο συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης που δίνει μεγαλύτερες τιμές BSS είναι 10 (με BSS 0.105).

Πίνακας 5.7: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς συντελεστές μορφολογικής επιτάχυνσης 6 αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας

| Τιμές BSS - 6 αντιπρόσωποι EFM |        |        |        |        |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                                | Θέση 1 | Θέση 2 | Θέση 3 | Θέση 4 |
| ΣΜΕ 10                         | 0.335  | 0.210  | 0.387  | 0.105  |
| ΣΜΕ 15                         | 0.382  | 0.217  | 0.455  | 0.072  |
| ΣΜΕ 20                         | 0.421  | 0.200  | 0.458  | 0.012  |

Στην περίπτωση των 12 αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας (Πίνακας 5.8), οι θέσεις 1 έως 3 παρουσιάζουν ικανοποιητικές τιμές BSS, με τον συντελεστή επιτάχυνσης 20 να αποδίδει καλύτερα στην θέση 1 (με BSS 0.507), και τον συντελεστή 15 στις θέσεις 2 και 3 (με τιμές BSS 0.286 και 0.425 αντίστοιχα). Η θέση 4, η οποία δίνει είτε αρνητικές τιμές (για ΣΜΕ 20), είτε τιμές που να τείνουν στο 0, ανάλογα με την τιμή του συντελεστή επιτάχυνσης,



παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα για συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης 10 (με τιμή BSS 0.051).

Πίνακας 5.8: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς συντελεστές μορφολογικής επιτάχυνσης 12 αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας

| Τιμές BSS - 12 αντιπρόσωποι EFM |              |              |              |              |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                 | Θέση 1       | Θέση 2       | Θέση 3       | Θέση 4       |
| <b>ΣΜΕ 10</b>                   | 0.380        | 0.280        | 0.380        | <b>0.051</b> |
| <b>ΣΜΕ 15</b>                   | 0.448        | <b>0.286</b> | <b>0.425</b> | 0.024        |
| <b>ΣΜΕ 20</b>                   | <b>0.507</b> | 0.244        | 0.395        | -0.016       |

Στην περίπτωση των 18 αντιπροσώπων από της μεθόδου ροής ενέργειας (Πίνακας 5.9), οι θέσεις 1, 2 και 3 δίνουν ικανοποιητικές τιμές BSS, με τον συντελεστή επιτάχυνσης 20 να αποδίδει καλύτερα στις θέσεις 1 και 3 (με τιμές BSS 0.535 και 0.400 αντίστοιχα), και τον συντελεστή 15 στην θέση 2 (με τιμή BSS 0.287). Στην θέση 4, όπου παρουσιάζονται κυρίως αρνητικές τιμές BSS, η μεγαλύτερη τιμή BSS είναι 0.013, και υπολογίζονται για συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης 10.

Πίνακας 5.9: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς συντελεστές μορφολογικής επιτάχυνσης 18 αντιπρόσωποι - Μέθοδος ροής ενέργειας

| Τιμές BSS - 18 αντιπρόσωποι EFM |              |              |              |              |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                 | Θέση 1       | Θέση 2       | Θέση 3       | Θέση 4       |
| <b>ΣΜΕ 10</b>                   | 0.397        | 0.275        | 0.324        | <b>0.013</b> |
| <b>ΣΜΕ 15</b>                   | 0.471        | <b>0.287</b> | 0.385        | -0.029       |
| <b>ΣΜΕ 20</b>                   | <b>0.535</b> | 0.256        | <b>0.400</b> | -0.082       |

Συνοψίζοντας τις παραπάνω παρατηρήσεις, φαίνεται πως η πλειονότητα των μεγιστοποιήσεων των τιμών του BSS πραγματοποιούνται για συντελεστή μορφολογική επιτάχυνσης 20. Συμπληρωματικά, στις θέσεις που ο συντελεστής 20 δεν δίνει την βέλτιστη ικανότητα, όπως η θέση 2, η τιμή του BSS παραμένει ικανοποιητική (μεγαλύτερη από 0.2). Προς δικαιολόγηση των περιπτώσεων που ο συντελεστής 20 δεν δίνει ικανοποιητικές τιμές, υπενθυμίζεται πως η τομή 4 βρίσκεται σε σχετικά απομακρυσμένη θέση, σε σχέση με την περιοχή των μετρήσεων και κοντά στην εκβολή του ρεύματος της Χαλάνδρας (διαφορά ως προς την σύσταση των ιζημάτων), οπότε οι τιμές του BSS μπορεί να επηρεάζεται από την μη επάρκεια των δεδομένων.

Έτσι, επιλέγοντας ως βέλτιστο συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης 20, ακολουθεί η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, συγκρίνοντας τον αριθμό των επιλεγόμενων αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας.

#### 5.4.2 Επιλογή βέλτιστου αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας

Όμοια με τους προηγούμενους υπολογισμούς BSS, κάθε μια από τις 4 τομές χωρίστηκε σε 100 σημεία, τα οποία διατηρήθηκαν σταθερά κατά την εξαγωγή των συντεταγμένων τους από την εκάστοτε βαθυμετρία. Ως δεδομένα βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

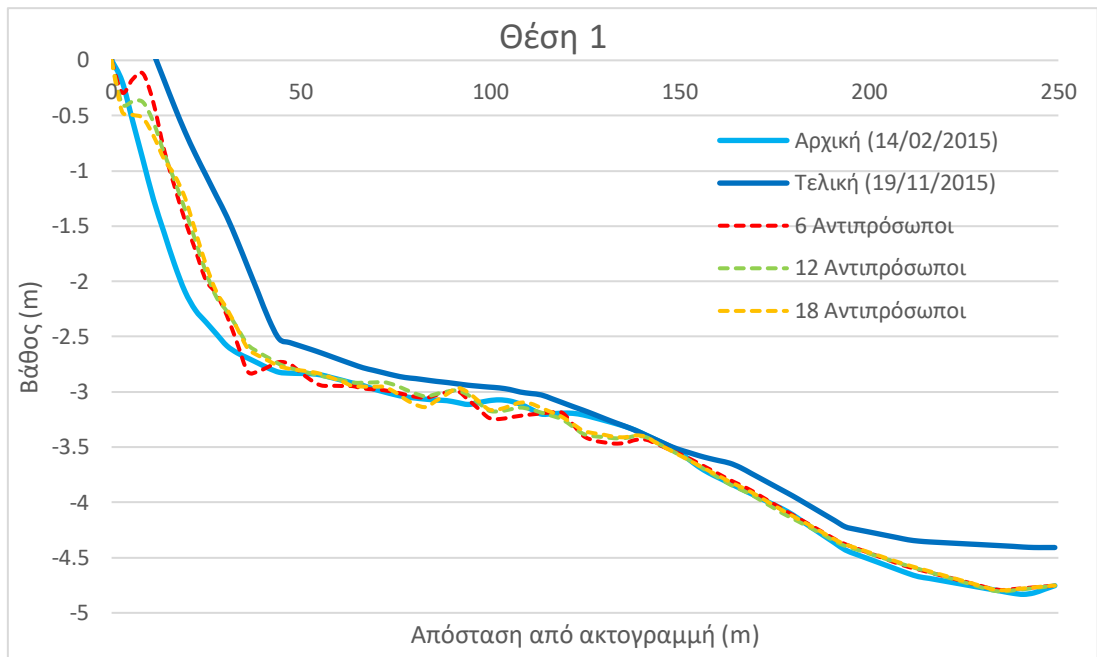
- Ως βαθυμετρία βάσης (*B*): οι αρχικές μετρήσεις 14/02/2015.
- Ως τελική βαθυμετρία μετρήσεων (*X*): οι τελικές μετρήσεις 19/11/2015.
- Ως τελική βαθυμετρία προβλέψεων (*Y*): η εκάστοτε προβλεπόμενη βαθυμετρία για 6, 12 και 18 αντιπροσώπους της μεθόδου ροής ενέργειας (EFM), με συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης 20.

Στον Πίνακα 5.10 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού του BSS, για τους διαφορετικούς αριθμούς αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας. Παρατηρείται ως στις θέσεις 1, 2 και 3 τα BSS δίνουν ικανοποιητικές τιμές, με τους 18 αντιπροσώπους να δίνουν καλύτερες αποδόσεις στις θέσεις 1 και 2 (με τιμές BSS 0.535 και 0.265 αντίστοιχα) και τους 6 αντιπροσώπους στην θέση 3 (με τιμή BSS 0.458). Στην θέση 4, όπως αναφέρθηκε και στις συγκριτικές αξιολογήσεις που προηγήθηκαν, οι τιμές των BSS είναι είτε αρνητικές είτε πολύ κοντά στο μηδέν, λόγω της απόστασης εν λόγω της θέσης από την περιοχή των μετρήσεων. Ως βέλτιστη, μπορεί να θεωρηθεί η επιλογή των 6 αντιπροσώπων, η οποία δίνει θετικό BSS τιμής 0.012, προσεγγίζοντας την αρχική βαθυμετρία των μετρήσεων. Συμφωνά με τις παραπάνω παρατηρήσεις των BSS, θα μπορούσε να εξαχθεί το συμπέρασμα πως καλύτερη προσομοίωση της τελικής βαθυμετρίας των μετρήσεων δίνει η προσομοίωση του κυματικού κλίματος 18 αντιπροσώπων της ετήσιας χρονοσειράς. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι διαφορές των BSS είναι σχετικά μικρές, η επιλογή οποιoδήποτε αριθμού αντιπροσώπων μεταξύ 6-18 μπορεί ικανοποιητικά να περιγράψει την ετήσια εξέλιξη της παράκτιας μορφολογίας, όπως έχει σημειωθεί και από άλλους ερευνητές (Benedet κ.α., 2016, de Queiroz κ.α., 2019).

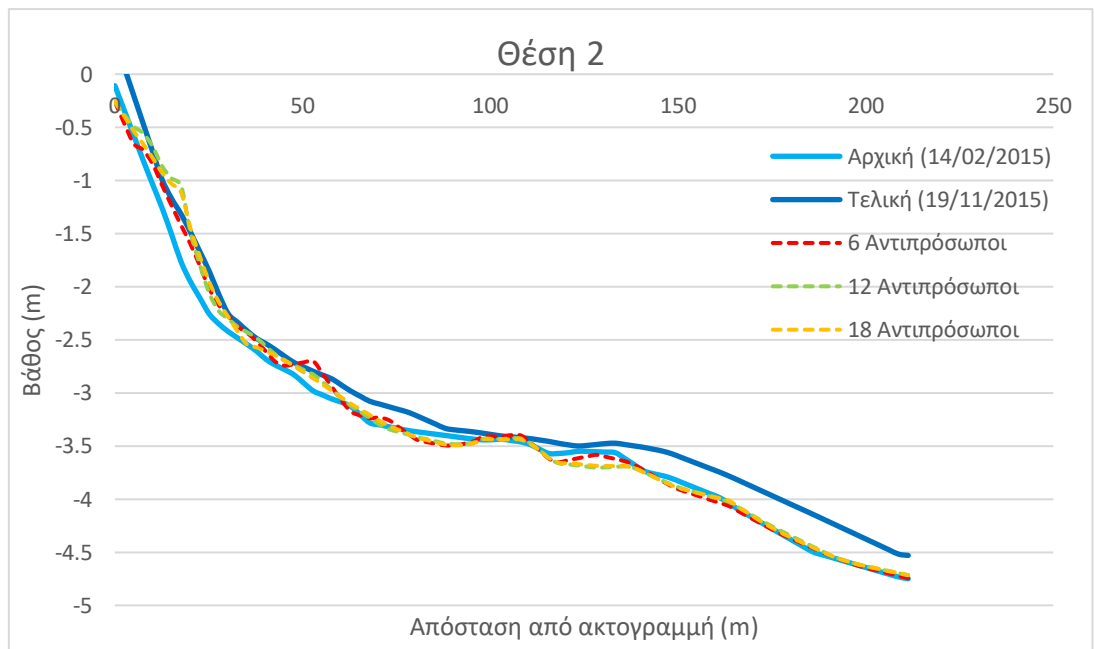
Πίνακας 5.10: Σύγκριση τιμών BSS για διαφορετικούς αριθμούς αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας

| Τιμές BSS - Αντιπρόσωποι EFM |        |        |        |        |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                              | Θέση 1 | Θέση 2 | Θέση 3 | Θέση 4 |
| <b>6 Αντιπρόσωποι</b>        | 0.421  | 0.200  | 0.458  | 0.012  |
| <b>12 Αντιπρόσωποι</b>       | 0.507  | 0.244  | 0.395  | -0.016 |
| <b>18 Αντιπρόσωποι</b>       | 0.535  | 0.256  | 0.400  | -0.082 |

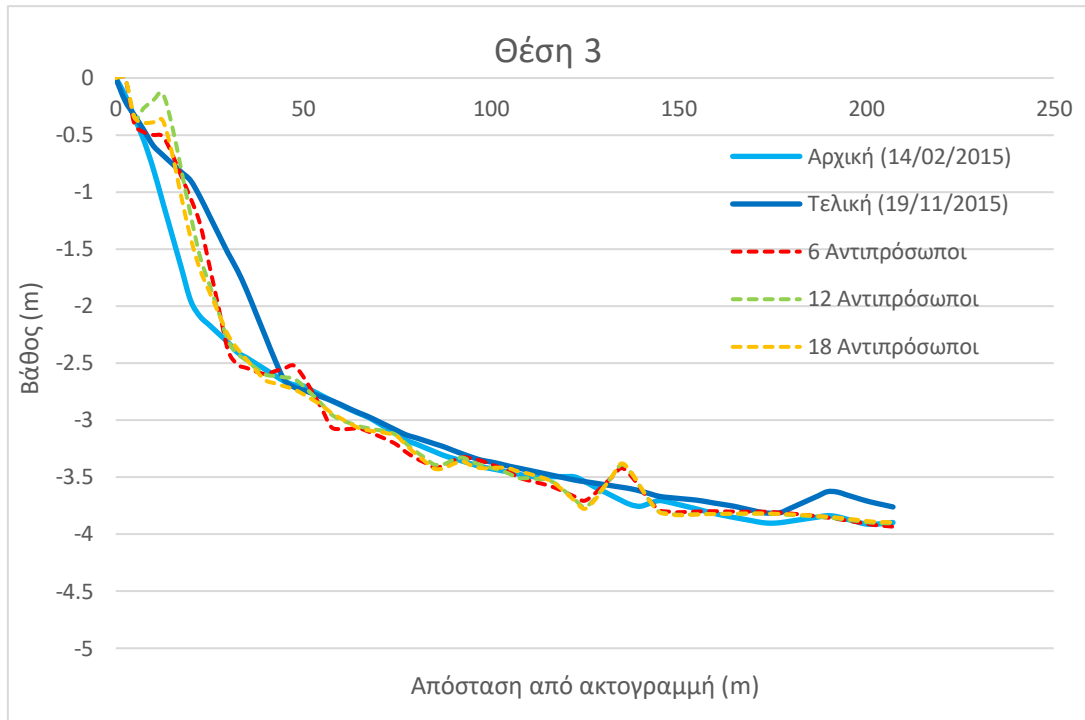
Στις Εικόνες 5.42 ως 5.45, παρουσιάζονται τα γραφήματα των 4 τομών, ώστε να εξυπηρετηθεί η οπτική σύγκριση του αριθμού των αντιπροσώπων. Παρατηρείται πως το μοντέλο αδυνατεί να προσομοιώσει επαρκώς τα πρώτα μέτρα από την ακτή, ενώ αποδίδει καλύτερα όσο αυξάνεται η απόσταση από αυτήν, όπως σημειώθηκε και στο Κεφάλαιο 5.3. Γενικά, οι προβλέψεις τείνουν να υποεκτιμούν την απόθεση που σημειώνεται κοντά στην ακτή στην διάρκεια του έτος, με εξαίρεση την εικόνα που παρουσιάζει η τομή στην θέση 4.



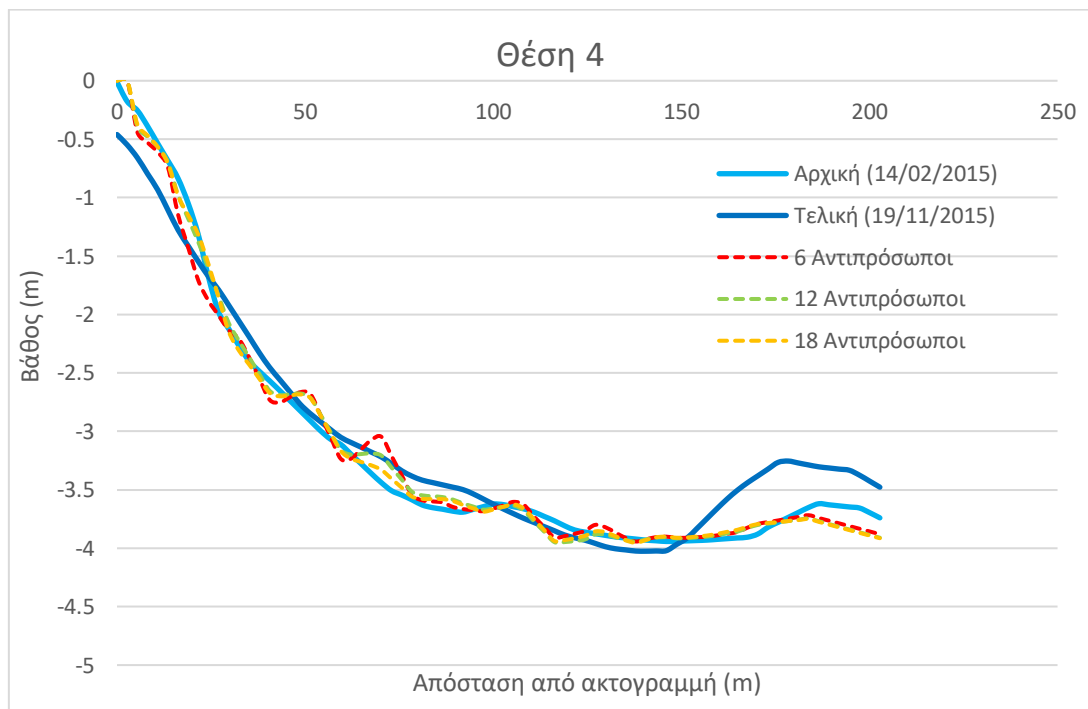
Εικόνα 5.42: Τομή θέση 1 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας



Εικόνα 5.43: Τομή θέση 2 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας



Εικόνα 5.44: Τομή θέση 3 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας



Εικόνα 5.45: Τομή θέση 4 – Σύγκριση αριθμού αντιπροσώπων μεθόδου ροής ενέργειας

### 5.4.3 Επιλογή βέλτιστης μεθόδου μεταξύ ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών

Εφόσον όλες οι δοκιμές ως προς τον βέλτιστο αριθμό των αντιπροσώπων της μεθόδου ροής ενέργειας αποδίδουν ικανοποιητικά, για την συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης των προσομοιώσεων μεταξύ των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών επιλέγονται οι 12 κυματικοί αντιπρόσωποι. Η ικανοποιητική απόδοση της εν λόγω επιλογής επιβεβαιώνεται από την διεθνή βιβλιογραφία, καθώς υπάρχουν περιπτώσεις παραδειγμάτων στα οποία ο μικρότερος αριθμός κυματικών αντιπροσώπων παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά, και από τα στατιστικά αποτελέσματα του BSS.

Λαμβάνοντας υπόψιν την συγκριτική αξιολόγηση των συντελεστών μορφολογικής επιτάχυνσης που προηγήθηκε, για αρχικά βάθη μικρότερα των 0.7m, η υπολογιζόμενη μεταβολή του ιζήματος που προκύπτει από κάθε μεμονωμένη κυματική κατάσταση, πολλαπλασιάζεται με την τιμή 20, πριν το τελικό άθροισμα. Ως δεδομένα βαθυμετρίας χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω:

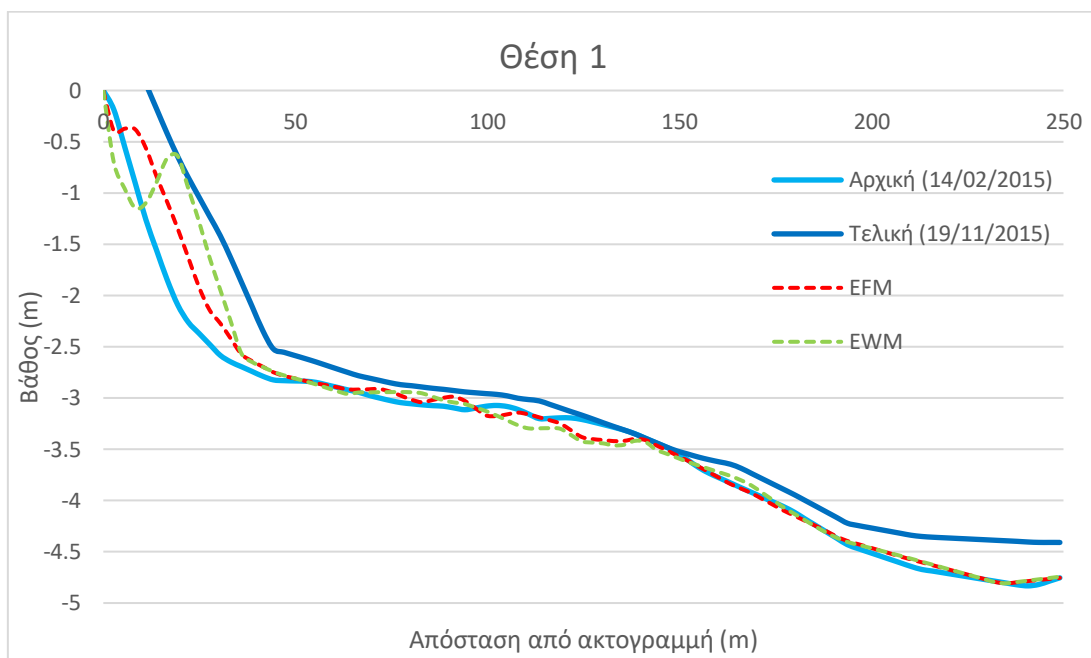
- Ως βαθυμετρία βάσης ( $B$ ): οι αρχικές μετρήσεις 14/02/2015.
- Ως τελική βαθυμετρία μετρήσεων ( $X$ ): οι τελικές μετρήσεις 19/11/2015.
- Ως τελική βαθυμετρία προβλέψεων ( $Y$ ): η εκάστοτε προβλεπόμενη βαθυμετρία των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών, με συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης 20.

Στον Πίνακα 5.11 συνοψίζονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού του BSS, για για την σύγκριση των δυο μεθόδων. Παρατηρώντας τις τιμές των BSS, μπορεί να σημειωθεί πως οι θέσεις 1 και 3 εμφανίζουν ικανοποιητικές τιμές, με την μέθοδο των ισοδύναμων κυματισμών να αποδίδει καλύτερα στην θέση 1 (με BSS 0.682), και την μέθοδος ροής ενέργειας στην θέση 3 (με BSS 0.395). Στις θέσεις 2 και 4 (Εικόνες 5.47 και 5.49), η μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών δίνει αρνητικές τιμές BSS (-2.074 και -1.954 αντίστοιχα), με μεγάλη απόκλιση από το μηδέν, ενώ η μέθοδος ροής ενέργειας δίνει ικανοποιητική τιμή στην θέση 2 (BSS= 0.244) και σχεδόν μηδενική τιμή στην θέση 4 (BSS= -0.016). Έτσι, στην περίπτωση των 12 αντιπροσώπων, με συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης 20, ως βέλτιστη θα μπορούσε να κριθεί η επιλογή της μεθόδου ροής ενέργειας.

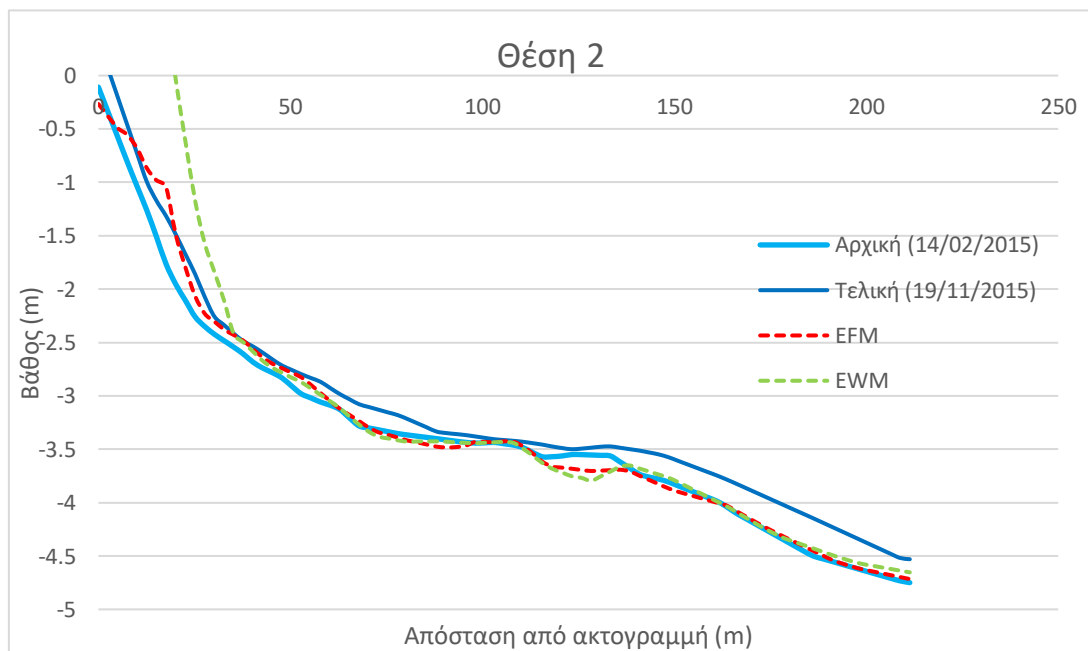
Πίνακας 5.11: Σύγκριση τιμών BSS για 12 κυματικούς αντιπροσώπους των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών

| Τιμές BSS |        |        |        |        |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
|           | Θέση 1 | Θέση 2 | Θέση 3 | Θέση 4 |
| EFM       | 0.507  | 0.244  | 0.395  | -0.016 |
| EWM       | 0.682  | -2.074 | 0.222  | -1.954 |

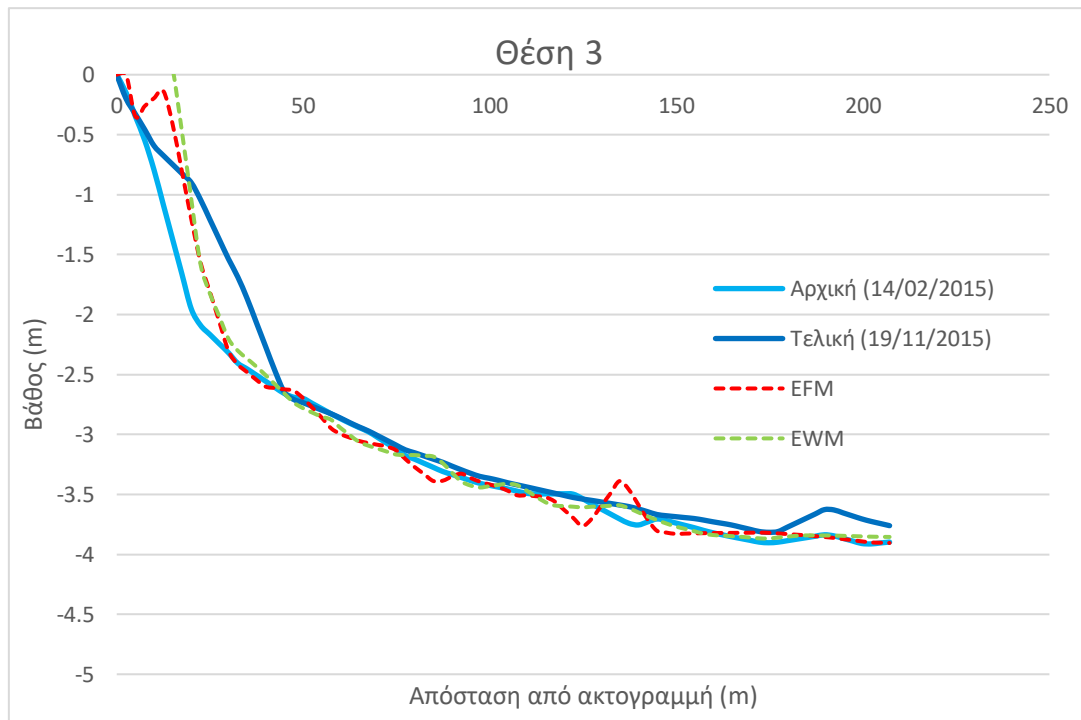
Στις Εικόνες 5.46 ως 5.49 παρουσιάζονται τα γραφήματα των 4 τομών, ώστε να εξυπηρετηθεί η οπτική σύγκριση των δυο μεθόδων. Παρατηρώντας την συμπεριφορά των αποτελεσμάτων της μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών σημειώνεται πως στην θέση 1, το μοντέλο υποεκτιμά την απόθεση ιζήματος, ενώ παρουσιάζει μια αρκετά ομαλή μορφολογία πυθμένα, σε σχέση με τις τρεις επόμενες θέσεις. Στις θέσεις 2, 3 και 4 υπερεκτιμάται η απόθεση του ιζήματος στα πρώτα μέτρα από την ακτή, με αποτέλεσμα την δημιουργία απότομης κλίσης.



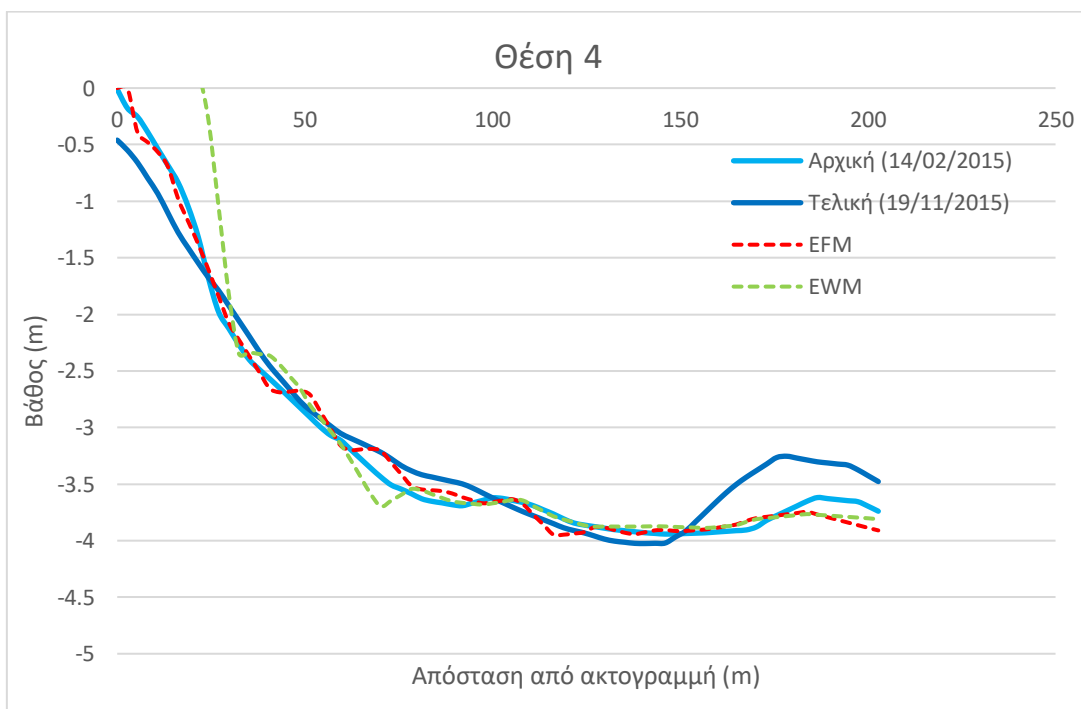
Εικόνα 5.46: Τομή θέση 1 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδυνάμων κυματισμών



Εικόνα 5.47: Τομή θέση 2 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδυνάμων κυματισμών



Εικόνα 5.48: Τομή θέση 3 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών



Εικόνα 5.49: Τομή θέση 4 – Σύγκριση μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών

Η οπτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων επιβεβαιώνει την αρκετά καλύτερη συμπεριφορά του υπολογιστικού μοντέλου με δεδομένα εισόδου υπολογισμένα μέσω της μεθόδου ροής ενέργειας. Συγκεκριμένα, στη τομή 2 η μέθοδος των ισοδύναμων κυματισμών υπερεκτιμά σημαντικά το μέγεθος της απόθεσης στο προφίλ ενώ στη τομή 4 προβλέπει απόθεση στο μέτωπο της ακτής αντί για διάβρωση, κάτι που δεν συμβαίνει στη μέθοδο ροής ενέργειας. Συγκεντρωτικά, συναξιολογώντας τις τιμές των BSS και από την οπτική επισκόπηση επιλέγεται ως καλύτερη η μέθοδος της ροής ενέργειας για την πρόβλεψη της εξέλιξης του πυθμένα στην περιοχή της Σκάλας Ερεσού .

#### 5.4.4 Αβεβαιότητες αποτελεσμάτων

Εξ ορισμού, τα μοντέλα και τα αποτελέσματα τους, αντιπροσωπεύουν μόνο εν μέρει την πραγματικότητα και υπάρχουν πολλές πηγές αβεβαιότητας. Είναι δυνατόν να διακρίνουμε δύο τύπους αβεβαιοτήτων: επιστημονικές αβεβαιότητες που προέρχονται από προσεγγίσεις, άγνωστες παραμέτρους ή έλλειψη φυσικής γνώσης και τυχαίες αβεβαιότητες που προέρχονται από εγγενή μεταβλητότητα του συστήματος ή εξωτερικές πηγές. Η αβεβαιότητα στη διαδικασία μοντελοποίησης μπορεί να προκύψει από τις συνοριακές συνθήκες και τα δεδομένα εισόδου, τη διατύπωση μοντέλου, δηλαδή εάν οι εξισώσεις του μοντέλου περιγράφουν επαρκώς τη φυσική του συστήματος, και μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης. Παραδείγματος χάριν μεμονωμένοι μοντελιστές μπορούν να δώσουν προτεραιότητα στη βαθμονόμηση διαφορετικών παραμέτρων ή να κρίνουν υποκειμενικά διαφορετικές τιμές για καλύτερη απόδοση.

Η διαδικασία παρατήρησης της μορφολογικής εξέλιξης της ακτής της Σκάλας Ερεσού, συγκεντρώθηκε στην μοντελοποίηση κυμάτων και θαλάσσιων ρευμάτων που οδηγούν στην στερεομεταφορά και μορφολογική εξέλιξη. Οι κυριότερες αβεβαιότητες μπορούν να οφείλονται στα εξής:

- Ενώ, υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων πεδίου στην αρχή και στο τέλος του έτους αναφοράς, θα ήταν χρήσιμο να υπήρχαν περισσότερες καταγραφές σε μικρότερα χρονικά διαστήματα για να εκτιμηθεί αν, πιθανά, οι μεταβολές του προφίλ οφείλονται σε ακραία κυματικά γεγονότα.
- Τα δεδομένα εισόδου στην προσομοίωση, εξαγόμενα από τον ωκεανογραφική βάση Κοπέρνικος – Copernicus Marine Service, δεν υπάρχει βεβαιότητα πως αποτελούν την πραγματική κυματική κατάσταση στην περιοχή του ανοικτού ορίου, εφόσον δεν υπάρχουν κυματικές μετρήσεις.
- Δεν έχει πραγματοποιηθεί συνολική βαθμονόμηση του συζευγμένου μοντέλου ή των επιμέρους μοντέλων SW και HD, λόγω απουσίας κυματικών και υδροδυναμικών μετρήσεων.
- Δεν έχουν ληφθεί υπόψιν παράγοντες υδρολογίας, όπως βροχοπτώσεις, καταιγίδες και τοπικές απορροές.
- Στην προσομοίωση μεταφοράς του ιζήματος, οι ιδιότητες του έχουν θεωρηθεί σταθερές σε όλη την έκταση του υπολογιστικού πεδίου (π.χ. διάμετρος κόκκου 0.55mm).
- Στην υδροδυναμική προσομοίωση, δεν έχουν ληφθεί υπόψιν παλιρροιακά φαινόμενα και ο εξαναγκασμός της κυματικής κίνησης από τον άνεμο.
- Στην κυματική προσομοίωση, δεν έχει ληφθεί υπόψιν το φαινόμενο της κυματικής αναρρίχησης, καθώς δεν συμπεριλαμβάνονται στο κυματικό μοντέλο και εν μέρει θα μπορούσε να οδηγήσει στη διαμόρφωση του προφίλ της ακτής και βελτίωση των στατιστικών δεικτών.





## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

### 6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων

Η πληθώρα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων που συγκεντρώνονται στην παράκτια ζώνη, οδηγεί στην ανάγκη μελέτης και μοντελοποίησης των φυσικών διεργασιών που συντελούνται σε αυτήν. Η κύρια παράμετρος της μακροχρόνιας μεταβολής της μορφολογίας της ακτής, είναι η μεταφορά των ιζημάτων μέσω της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς, η οποία είναι οδηγούμενη από την ενέργεια των κυματισμών και των θαλάσσιων ρευμάτων. Η προσομοίωση της επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης μοντέλων παράκτιας μορφολογίας μεγάλης υπολογιστικής πολυπλοκότητας, λόγω των σύνθετων, και αλληλεξαρτώμενων, φυσικών διεργασιών και του πλήθους των δεδομένων εισόδου. Η απαίτηση μείωσης του υπολογιστικού χρόνου, επιτυγχάνεται μέσω της ανάπτυξης μεθόδων σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος.

Στην παρούσα διπλωματική, αξιολογήθηκαν 2 μέθοδοι σχηματοποίησης, η μέθοδος ροής ενέργειας για 6, 12 και 18 κυματικούς αντιπροσώπους, και η μέθοδος ισοδύναμων κυματισμών για 12 κυματικούς αντιπροσώπους. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων βασίστηκε στη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα μετά το πέρας ενός χρονολογικού έτους (1 ημέρας στο μοντέλο, η οποία αντιστοιχίζεται με το μεγαλύτερης κλίμακας χρονικό διάστημα μέσω εμπειρικού συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης). Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με την χρήση του υπολογιστικού πακέτου MIKE 21 DHI, και ειδικότερα του πακέτου MIKE 21/3 Coupled Model FM. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων έγινε μέσω του στατιστικού δείκτη ικανότητας του μοντέλου Brier Skill Score (BSS). Η ακτή της οποίας η τοπογραφία και το κυματικό κλίμα χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων είναι η Σκάλα Ερεσού, της Λέσβου. Ως έτος αναφοράς επιλέχθηκε το 2015, εφόσον υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα αρχικής και τελικής βαθυμετρίας, από μετρήσεις πεδίου.

Με τη χρήση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και των υπολογιζόμενων τιμών BSS πραγματοποιήθηκαν τριών ειδών διερευνήσεις:

- Ως προς την εύρεση του βέλτιστου συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης μεταξύ των τιμών 10, 15 και 20 για τα αποτελέσματα της μεθόδου ροής ενέργειας, ο οποίος εφαρμόστηκε στις επόμενες διερευνήσεις.
- Ως προς την εύρεση του βέλτιστου αριθμού κυματικών αντιπροσώπων, μεταξύ των τιμών 6, 12 και 18, για τα αποτελέσματα της μεθόδου ροής ενέργειας.
- Ως προς την σύγκριση της απόδοσης των αποτελεσμάτων των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών, για την περίπτωση των 12 κυματικών αντιπροσώπων.

Συνοψίζοντας, βέλτιστος ως προς την αντιστοίχιση του πεπερασμένου χρόνου της προσομοίωσης με το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην αρχική και στην τελική βαθυμετρία των μετρήσεων (9 μήνες), κρίθηκε ο συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης 20. Έπειτα, στα αποτελέσματα της μεθόδου ροής ενέργειας, στα οποία εφαρμόστηκε ο επιλεγμένος συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης, παρατηρήθηκε πως οποιαδήποτε περίπτωση

αριθμού κυματικών αντιπροσώπων μεταξύ 6-18 μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά την τελική διαμόρφωση της στάθμης του πυθμένα εντός του έτους, σε σύγκριση με την βαθυμετρία των μετρήσεων πεδίου. Για την σύγκριση της αποδοτικότητας των μεθόδων ροής ενέργειας και ισοδύναμων κυματισμών επιλέχθηκε η περίπτωση των 12 κυματικών αντιπροσώπων, ως αποδεκτή σύμφωνα με τα αποτελέσματα και σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία, με την διερεύνηση να αναδεικνύει την υπεροχή της μεθόδου ροής ενέργειας. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί πως σε μερικές διατομές της ακτής η επιλογή των 6 αντιπροσώπων κρίθηκε ως η βέλτιστη. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψιν τις αποκλίσεις αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου σε σχέση με τις μετρήσεις πεδίου ως προς τη μεταβολή του πυθμένα στο πέρας των προσομοιώσεων, αυτές κρίθηκαν αποδεκτές δεδομένου ότι επιτυγχάνεται ουσιαστική μείωση χρόνου προσομοίωσης σε σχέση με την πλήρη χρονοσειρά και λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα των παράκτιων διεργασιών. Συμπερασματικά, η διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής και ιδιαίτερα η σύγκριση με μετρήσεις πεδίου, επιβεβαιώνει πως οι μέθοδοι σχηματοποίησης αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τους ακτομηχανικούς και ερευνητές που επιθυμούν να μειώσουν τον υπολογιστικό χρόνο των προσομοιώσεων διατηρώντας ικανοποιητικά αποτελέσματα της μορφολογικής εξέλιξης πυθμένα.

## 6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όσον αφορά μελλοντικές έρευνες και περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος παρατίθενται οι παρακάτω προτάσεις:

- Προσομοίωση της μορφολογικής αλλαγής με την εφαρμογή κάποιου μοντέλου το οποίο να έχει την δυνατότητα περιγραφής του φαινομένου της κυματικής αναρρίχησης, όπως κάποιο μοντέλο τύπου Boussinesq. Έτσι η πρόβλεψη θα είναι αντιπροσωπευτική ακόμη και στα πρώτα μέτρα από την ακτογραμμή, γεγονός που θα επηρεάζει ευμενώς και τους στατιστικούς δείκτες αξιολόγησης της προσομοίωσης. Ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι αυτού του τύπου τα μοντέλα, παρότι ιδιαίτερα ακριβή, απαιτούν ιδιαίτερα αυξημένο υπολογιστικό χρόνο.
- Περαιτέρω διερεύνηση ως προς την επιλογή της μεθόδου σχηματοποίησης και του μικρότερου δυνατού αριθμού αντιπροσωπευτικών κυματισμών που θα οδηγήσουν στην βέλτιστη προσομοίωση της κατάστασης της ακτής σύμφωνα με τις μετρήσεις πεδίου. Προς την κατεύθυνση αυτή προτείνεται η επιπρόσθετη εφαρμογή της μεθόδου Opti-Routine και της μεθόδου CERC.
- Επαλήθευση των μεθόδων σχηματοποίησης για διάστημα μηνών (έναντι της μιας ημέρας για την οποία εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις για την ακτή της Σκάλας Ερεσού), ώστε η αναγωγή σε ετήσια βάση να γίνεται με μεγαλύτερη αξιοπιστία από αυτήν που παρέχει ο πολλαπλασιασμός με τον εμπειρικό συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Η εν λόγω διαδικασία βέβαια, θα αυξήσει κατά πολύ τους υπολογιστικούς χρόνους, συμπεραίνοντας κατ' αναλογία των προσομοιώσεων των 24 ωρών που διεξήχθησαν, οι οποίες συχνά απαιτούσαν πάνω από 24 ώρες α για την ολοκλήρωσή τους.
- Επιλογή περισσότερων από μια ακτών αναφοράς, για την δοκιμή των διαφόρων μεθόδων σχηματοποίησης και την αξιολόγηση της απόδοσης των προσομοιώσεων της μεταβολής της στάθμης του πυθμένα. Οι διαφορές ως προς τον προσανατολισμό, το κυματικό κλίμα και την τοπογραφία της εκάστοτε ακτής θα ενισχύσουν την αξιοπιστία της τελικής επιλογής βέλτιστης προσομοίωσης. Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί η σημαντική αύξηση του κόστους που θα επιφέρει η ανάγκη για μετρήσεις πεδίου στις υπό μελέτη ακτές.
- Προσομοίωση της εξέλιξης της παράκτιας μορφολογίας λαμβάνοντας υπόψιν την αλληλουχία των κυματικών γεγονότων. Στην εν λόγω εργασία οι προσομοιώσεις, για τον εκάστοτε κυματικό αντιπρόσωπο, εκτελέστηκαν με βάση τη "μορφοστατική" προσέγγιση (όλες οι διακριτές προσομοιώσεις εκτελούνται με την ίδια αρχική βαθυμετρία), χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αλληλουχία τους. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί, πως η δυναμική προσέγγιση εξέλιξης του πυθμένα μπορεί να επιδράσει αρνητικά στην απόδοση του μοντέλου, κυρίως λόγω μη ρεαλιστικών βαθυμετρικών μεταβολών που μπορούν να προκύψουν για το συνδυασμό υψηλών τιμών του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης και κυματισμών υψηλής ενέργειας.



## 7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Benedet, L., Dobrochinski, J. P. F., Walstra, D. J. R., Klein, 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'
- Bosboom J., Stive M.J.F. (2021), 'Coastal Dynamics', by TU Delft
- Chonwattana, S., Weesakul, S., Vongvisessomjai S. (2005), '3D Modelling of morphological changes using representative waves'
- DHI (2023) MIKE 21 & 3 Flow Model FM, Sand Transport Module, Scientific Documentation
- DHI (2017) MIKE 21 & 3 Flow Model FM, Hydrodynamic Module, Short Description
- DHI (2017) MIKE 21 Wave Modelling, MIKE 21 Spectral Waves FM, Short Description
- DHI (2017) MIKE 21 21/3 Coupled Model FM, User Guide
- Korres, G., Ravdas, M., & Zacharioudaki, A. (2009), 'Mediterranean Sea Wave Hindcast (CMEMS MED-Waves)', Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS)
- Luijendijk A.P., Ranasinghe R., de Schipper M. A., Huisman B. A., Swinkels C. M., Walstra D. J.R., Stive M. J.F. (2017), 'The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study'
- Plecha S., Sancho F., Silva P., Dias J.M. (2007), 'Representative Waves for Morphological Simulations. Journal of Coastal Research'
- Roelvink D., Reniers A.C.F. (2014) 'Guide to Modeling Coastal Morphology', by Deakin University of Edinburgh, downloaded from [www.worldscientific.com](http://www.worldscientific.com)
- Sutherland J., Peet A.H., Soulsby R.L. (2004), 'Evaluating the performance of morphological models'
- Αδαμάκης Γ. (2005), 'Μορφολογία και Ιζηματολογία παραλιών στα κατάντη φραγμάτων: Ερεσός, Ν. Λέσβος', Διπλωματική μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Διαχείριση Παράκτιων Περιοχών», Μυτιλήνη
- Ανδρεάδης Ο. (2022), 'Ευπάθεια στη διάβρωση Ελληνικών νησιωτικών παραλιών: Παραδείγματα από τη Λέσβο και Χίο', Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
- Ατσικπάση Μ. Ι. (2000), 'Εκτίμηση Κατάστασης των Υδατικών Πόρων του Δήμου Ερεσού – Αντίσης', Πανεπιστήμιο Αιγαίου

- Βαβιάς Σ. (2011) *‘Φωτογραμμετρικές και Τηλεπισκοπικές Μέθοδοι σε θέματα παράκτιων περιοχών’*, Μεταπτυχιακή Εργασία Π.Μ.Σ. «Προστασία Περιβάλλοντος και Βιώσιμη Ανάπτυξη», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Καραμπάς Θ., Κρεστενίτης Ι., Κουτίτας Χ. (2015), *‘Ακτομηχανική - έργα προστασίας ακτών’*, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις Κάλλιπος
- Καρύμπαλης Θ. Ε. (2010) *‘Παράκτια γεωμορφολογία’*, Εκδόσεις ΙΩΝ
- Κατσικάτσος Γ., Ματαράγκας Δ., Μιγκίρος Γ., Τριανταφύλλης Μ. (1993), *‘Γεωλογική μελέτη στη νήσο Λέσβο’*, Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα
- Λειβαδίτης Γ., Αλεξούλη-Λειβαδίτη Α. (2004), *‘Μορφολογία των ακτών της Λέσβου’*, Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI
- Μέμος Κ., 2008, *‘Εισαγωγή στα λιμενικά έργα’*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Μουτζούρης, Κ. Ι. (2009), *‘Θαλάσσια Υδραυλική’*, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Παναγόπουλος Λ. Ε. (2019), *‘Στερεομεταφορά και Παράκτιες Διεργασίες με μεθόδους σχηματοποίησης κυματικού κλίματος – Περίπτωση Λιμένα Ρεθύμνου’*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- Πασακαλίδου Ε. (2007), Διπλωματική Εργασία, *‘Ίζηματολογία και Μορφοδυναμική Νησιωτικών Παραλιών στα Κατάντι Φραγμάτων: Παραλία Ερεσού, Ν. Λέσβος’*, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
- Πυθαρούλιου Α. Χ. (2020), *‘Αποτίμηση Μεθόδων Μακροχρόνιας Πρόβλεψης Μορφολογική Εξέλιξης Πυθμένα – Εφαρμογή στην ακτή Καμάρες της Σίφνου’*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Λίστα ιστοτόπων:

Φωτογραφία εξωφύλλου: <https://wikipedia.org/>

Δεδομένα κύματος: <https://marine.copernicus.eu/>

Δεδομένα βαθυμετρίας: <https://www.navionics.com/>

Ιστορικά στοιχεία για το νησί της Λέσβου: <https://wikipedia.org/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Παρακάτω παρατίθεται ο υπολογιστικός κώδικας σε Python που συντάχθηκε για τις ανάγκες:

1. Μείωσης των δεδομένων εισόδου, εξαγόμενα το την υπηρεσία Copernicus, βάση της κατεύθυνσης του εισερχόμενου κυματισμού.
2. Εφαρμογής της μεθόδου μεθόδου ροής ενέργειας για τα παραπάνω δεδομένα.
3. Εφαρμογής μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών για τα παραπάνω δεδομένα
4. Υπολογισμού της ολικής μεταβολής της στάθμης του πυθμένα (ενδεικτικά για μέθοδο ροής ενέργειας με 6 κυματικούς αντιπροσώπους)

### 1. Μείωση δεδομένων εισόδου βάση της κατεύθυνσης του εισερχόμενου κυματισμού

```
import csv

df = pd.read_csv('Eresos2015.csv')

with open('Eresos2015_edit.csv', 'w', encoding='UTF8', newline='') as f:
    writer = csv.writer(f)
    for i in range(df['MWD'].shape[0]):
        if df['MWD'][i]>90 and df['MWD'][i]<270:
            okey = [ df['Hs'][i], df['Tp'][i], df['MWD'][i] ]
            writer.writerow( okey )

file = pd.read_csv('Eresos2015_edit.csv')
file.to_csv('Eresos2015_edit.csv', header=['Hs','Tp', 'MWD'], index=False)
```

### 2. Εφαρμογή μεθόδου ροής ενέργειας

#### *MWD adjustment*

```
df = pd.read_csv('Eresos2015_edit.csv')

for i in range(df['MWD'].shape[0]):
    df['MWD'][i]=df['MWD'][i]-180
```

#### *Frequency Factor*

```
total_f = []

for i in range(df['MWD'].shape[0]):
    f = 1/df['MWD'].shape[0]
```



```

total_f.append(f)

f = []

df['Frequency'] = total_f

Sort by MWD
df.sort_values(by=['MWD'], inplace=True, ignore_index=True)

print(df.head())

Total Energy
E=np.sum(df['Hs']**2)

Create Vertical Classes

Add = 0

vclass = []

total_vclass = []

for i in range(df.shape[0]):

    Add += df['Hs'][i]**2

    vclass.append( [df['Hs'][i] , df['MWD'][i] , df['Tp'][i] , df['Frequency'][i]] )

    if Add >= E/6 :

        total_vclass.append(vclass)

        print(Add)

        Add = 0

        vclass = []

total_vclass.append(vclass)

Find x Coordinates
x=[ min(df['MWD']) ]

for vclass in total_vclass :

    x.append(max(vclass , key = lambda i:i[1] )[1])

x_list=[]
for i in range(len(x)):
    if i != 6 :
        x_list.append([x[i] , x[i+1]])
    else:
        break

Sort by Hs
for i in range(len(total_vclass)):

```

```
total_vclass[i] = sorted(total_vclass[i], key=lambda x:x[0])
```

#### *Create Horizontal Classes*

```
Add = 0
```

```
hclass = []
```

```
total_hclass=[]
```

```
for i in range(len(total_vclass)):
```

```
    flag = True
```

```
    for j in range(len(total_vclass[i])):
```

```
        Add += total_vclass[i][j][0]**2
```

```
        hclass.append( (total_vclass[i][j][0], total_vclass[i][j][1], total_vclass[i][j][2],  
total_vclass[i][j][3]) )
```

```
        if Add >= E/12 and flag:
```

```
            flag = False
```

```
            total_hclass.append(hclass)
```

```
            print(Add)
```

```
            Add = 0
```

```
            hclass = []
```

```
total_hclass.append(hclass)
```

```
print(Add)
```

```
Add = 0
```

```
hclass = []
```

#### *Find y Coordinates*

```
y=[]
```

```
for hclass in total_hclass :
```

```
    y.append(max(hclass , key = lambda i:i[0])[0])
```

```
y_list=[]
```

```
for i in range(0 , len(y) , 2):
```

```
    y_list.append([y[i] , y[i+1]])
```

#### *Find Representatives*

```
represent_x = []
```

```
for hclass in total_hclass :
```

```
    represent_x.append(np.mean(hclass , axis = 0)[1])
```

```
represent_y = []
```

```
for hclass in total_hclass :
```

```
    represent_y.append(np.mean(hclass , axis = 0)[0])
```

#### *Create Representative Wave File*

```
represent_Tp = []
```

```
for hclass in total_hclass :
```

```
    represent_Tp.append(np.mean(hclass , axis = 0)[2])
```

```
represent_F = []
```

```
for hclass in total_hclass :
```

```
    represent_F.append(np.sum(hclass , axis = 0)[3])
```

```
represent = []
```

```
for i in range(len(represent_y)) :
```

```

represent.append( (represent_y[i] , represent_Tp[i] , represent_x[i] , represent_F[i]) )
np.savetxt('EFM_6_Representative_Waves_Eresos_2015-2015.txt' , represent , header=
'Hs,Tp, MWD, Frequency' , delimiter=',')

```

#### *Create Plot*

```

plt.figure( figsize=(10 , 10) )
plt.plot(df['MWD'] , df['Hs'] , '.' , color = 'blue')
plt.plot(represent_x , represent_y , 'o' , color = 'red')
plt.legend(['Time series' , 'Representatives EFM'])
plt.xlabel('MWD (degrees)')
plt.ylabel('Hs (m)')
for i in range(len(x_list)):
    plt.plot((x_list[i][0],x_list[i][0]) , (min(df['Hs']),y_list[i][1]) , '-.' , color='black')
    plt.plot((x_list[i][0],x_list[i][1]) , (y_list[i][1],y_list[i][1]) , '-.' , color='black')
    plt.plot((x_list[i][1],x_list[i][1]) , (y_list[i][1],y_list[i][0]) , '-.' , color='black')
    plt.plot((x_list[i][1],x_list[i][0]) , (y_list[i][0],y_list[i][0]) , '-.' , color='black')
    plt.plot((x_list[i][0],x_list[i][1]) , (y_list[i][0],y_list[i][0]) , '-.' , color='black')
    plt.plot((x_list[i][1],x_list[i][1]) , (y_list[i][0],min(df['Hs'])) , '-.' , color='black')
    plt.plot((x_list[i][1],x_list[i][0]) , (min(df['Hs']),min(df['Hs'])) , '-.' , color='black')
plt.savefig('EFM_6_Representative_Waves_Plot_Eresos_2015-2015.png')

```

### *3. Εφαρμογή μεθόδου ισοδύναμων κυματισμών*

#### *Create Classes*

```

L = ( abs(min(df['MWD'])) + abs(max(df['MWD'])))/12
classes=[]
total_classes=[]
distance = [min(df['MWD'])]
d = min(df['MWD']) + L
for i in range(df.shape[0]) :
    if df['MWD'][i] >= d-L :
        if df['MWD'][i] > d:
            total_classes.append(classes)
            distance.append(d)
            classes=[]
            d += L
            classes.append( [df['Hs'][i] , df['Tp'][i] , df['MWD'][i] , df['Frequency'][i]] )
        elif df['MWD'][i] == d :
            classes.append( [df['Hs'][i] , df['Tp'][i] , df['MWD'][i] , df['Frequency'][i]] )
            distance.append(d)
            total_classes.append(classes)
            classes=[]
            d += L
        else:
            classes.append( [df['Hs'][i] , df['Tp'][i] , df['MWD'][i] , df['Frequency'][i]] )

```

*Calculate C1, C2, C3*

```
C=[]
total_C=[]
for classes in range(len(total_classes)) :
    for i in range(len(total_classes[classes])) :
        C1 = total_classes[classes][i][3]*(total_classes[classes][i][0]**2 *
total_classes[classes][i][1] * np.cos(np.radians(total_classes[classes][i][2])))
        C2 = total_classes[classes][i][3]*(total_classes[classes][i][0]**2 *
total_classes[classes][i][1] * np.sin(np.radians(total_classes[classes][i][2])))
        C3 = total_classes[classes][i][3]*(total_classes[classes][i][0]**2.5 *
(np.cos(np.radians(total_classes[classes][i][2])))**0.25 *
np.sin(np.radians(2*total_classes[classes][i][2])))
        C.append([ C1 , C2 , C3 ])
    total_C.append(C)
C=[]
```

*Calculate C1eq, C2eq, C3eq*

```
f_class= []
for i in total_classes :
    f = np.sum(i , axis=0)
    f_class.append(f[3])
total_Ceq = []
for C in range(len(total_C)) :
    Ceq = np.sum(total_C[C] , axis=0) / f_class[C]
    total_Ceq.append(Ceq)
```

*Calculate representative wave characteristics*

```
Representative=[]
for Ceq in total_Ceq :
    ae = np.degrees(np.arctan(Ceq[1]/Ceq[0]))
    He = (Ceq[2] / (np.cos(np.radians(ae))**(1/4)*np.sin(np.radians(2*ae))))**(2/5)
    Te = Ceq[0] / (He**2 * np.cos(np.radians(ae)))
    Representative.append( [He , Te , ae ] )
eq_represent = []
for i in range(len(Representative)) :
    eq_represent.append( (Representative[i][0] , Representative[i][1] , Representative[i][2] ,
f_class[i]) )
np.savetxt('Equivalent_Representative_Waves_Eresos_2015-2015.txt' , eq_represent ,
header= 'Hs,Tp, MWD, Frequency' , delimiter= ',')
```

*Create Plot*

```
plt.figure( figsize=(10 , 10) )
plt.plot(df['MWD'] , df['Hs'] , '.' , color = 'blue')
plt.xlabel('MWD (degrees)')
plt.ylabel('Hs (m)')
for i in range(len(Representative)) :
    plt.plot(Representative[i][2] , Representative[i][0] , '^' , color = 'orange')
for i in range(len(distance)):
```

```

plt.plot((distance[i],distance[i]), (min(df['Hs']),max(df['Hs'])), '-.', color='black')
plt.plot((min(distance),max(distance)), (min(df['Hs']),min(df['Hs'])), '-.', color='black')
plt.plot((min(distance),max(distance)), (max(df['Hs']),max(df['Hs'])), '-.', color='black')
plt.legend(['Time series', 'Representatives EWMMA'])

```

#### *Compaire EFM and EWM Plot*

```

plt.figure( figsize=(10, 10) )
plt.plot(df['MWD'], df['Hs'], '.', color = 'blue')
plt.xlabel('MWD (degrees)')
plt.ylabel('Hs (m)')
plt.plot(represent_x, represent_y, 'o', color = 'red')
for i in range(len(Representative)):
    plt.plot(Representative[i][2], Representative[i][0], '^', color = 'orange')
plt.legend(['Time series', 'EFM', 'EWM'])

```

4. Ολική μεταβολή στάθμης πυθμένα (ενδεικτικά για μέθοδο ροής ενέργειας με 6 κυματικούς αντιπροσώπους)

```

BLC = []
scenario = []
files = ["6BLC_1__21-36-00.xyz", "6BLC_2__21-36-00.xyz", "6BLC_3__21-36-00.xyz",
"6BLC_4__21-36-00.xyz", "6BLC_5__21-36-00.xyz", "6BLC_6__21-36-00.xyz"]
for file in files:
    xyz = pd.read_table(file, skiprows=0, delim_whitespace=True, names=['x', 'y', 'z', 'BLC'])
    for i in range(xyz.shape[0]):
        scenario.append( [ xyz['z'][i], xyz['BLC'][i] ] )
    BLC.append(scenario)
    scenario=[]
count = 0
for i in range(len(BLC)):
    for j in range(len(BLC[i])):
        if BLC[i][j][0] < -0.7 :
            BLC[i][j][1] *= 20
            count +=1
z_tot = []
for i in range(len(BLC[0])):
    Add = ( BLC[0][i][1] + BLC[1][i][1] + BLC[2][i][1] + BLC[3][i][1] + BLC[4][i][1] + BLC[5][i][1] )
    z_tot.append(Add)
xyz_tot = []
for i in range(len(z_tot)):
    xyz_tot.append([xyz['x'][i], xyz['y'][i], z_tot[i]])
np.savetxt('20_BLC_EFM_6Repr_2015.txt', xyz_tot, delimiter=' ')

```