



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ-ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ**

ΕΛΕΝΗ Κ. ΝΙΚΟΛΑΟΥ

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

**ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ: ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΤΣΟΥΚΑΛΑ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ
ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ**

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2014



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

**DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING**

**INTER-DEPARTMENT PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES IN WATER
RESOURCES SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**NUMERICAL INVESTIGATION OF THE
EFFICIENCY OF A BREAKWATER
SYSTEM**

ELENI K. NIKOLAOU

«WATER
RESOURCES
SCIENCE AND
TECHNOLOGY»

**SUPERVISED BY: VASILIKI TSOUKALA, ASSISTANT
PROFESSOR**

ATHENS, OCTOBER 2014

Στην οικογένεια και

τους πολύ καλούς μου φίλους

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Υπάρχουν πολλοί άνθρωποι που οφείλω να ευχαριστήσω για τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή εργασία. Καταρχήν ευχαριστώ την επιβλέπουσα μου, κα. Βασιλική Τσουκαλά, για την εμπιστοσύνη της προς το πρόσωπο μου ώστε να μου αναθέσει αυτή την εργασία. Την ευχαριστώ για την καθοδήγηση, τη βοήθεια, τις γνώσεις που μου μετέδωσε και την υπομονή της. Μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Υποψήφιο Διδάκτορα Μιχάλη Χονδρό, για την απίστευτη βοήθεια που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας, που χωρίς αυτήν δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωσή της.

Ευχαριστώ τον κ. Στέλιο Ζερβό και τον κ. Λούκα Αντωνίου, λειτουργούς του Κλάδου Θαλασσιών Έργων του Τμήματος Δημοσίων Έργων του Υπουργείου Συγκοινωνιών και Έργων Κύπρου, για τις πληροφορίες και τα δεδομένα που μου έδωσαν για την περιοχή μελέτης καθώς και για την προθυμία τους να με βοηθήσουν. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ηλία Μουσούλη, εκπρόσωπο του DHI στην Ελλάδα, για την άμεση ανταπόκρισή του ως προς την επίλυση αποριών και την αντιμετώπιση δυσκολιών που προκύπτανε κατά την εφαρμογή του λογισμικού.

Για μια ακόμη φορά, ευχαριστώ την οικογένεια μου, τους γονείς μου Κώστα και Μάρω και την αδελφή μου Νίκη, για την έμπρακτη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού. Τέλος, ευχαριστώ όλους μου τους φίλους, που βρίσκονται κοντά αλλά και μακριά μου, για τη συνεχή στήριξη και εμπύχωση. Πιο συγκεκριμένα, οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στις φίλες μου Δημούλα και Ραφαελία, για τη βοήθεια, τη συμπαράσταση, την υπομονή και την υποστήριξή τους, καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της δύσκολης χρονιάς.

Σας ευχαριστώ όλους

Έλενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|---|-----|
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ | 8 |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ | 10 |
| EXTENDED ABSTRACT | 28 |
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 38 |
| 1. ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ ΑΚΤΩΝ | 40 |
| 1.1. Παράκτια ζώνη..... | 40 |
| 1.2. Κύματα και ρεύματα | 41 |
| 1.3. Στερεομεταφορά και έναρξη κίνησης ιζήματος..... | 46 |
| 1.4. Μορφολογία και διάβρωση ακτών..... | 51 |
| 2. ΕΡΓΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΗΣ | 54 |
| 3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ | 61 |
| 3.1. Εισαγωγή..... | 61 |
| 3.2. CEDAS..... | 64 |
| 3.3. UNIBEST | 70 |
| 3.3.1. UNIBEST-CL+ | 71 |
| 3.3.2. UNIBEST-DE | 74 |
| 3.3.3. UNIBEST-TC | 75 |
| 3.4. DELFT3D..... | 79 |
| 3.5. SAND94..... | 81 |
| 3.6. The Cascade Model | 82 |
| 3.7. Coastal Evolution Model | 88 |
| 3.8. MIKE 21 model..... | 89 |
| 3.8.1. Mike 21 PMS | 91 |
| 3.8.2. MIKE 21 HD..... | 95 |
| 3.8.3. MIKE 21 ST..... | 98 |
| 3.9. LITPACK..... | 103 |
| 3.10. ONELINE Model | 108 |
| 3.11. XBeach | 111 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 3.12. | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ | 119 |
| 4. | ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 123 |
| 4.1. | Γεωγραφική θέση | 123 |
| 4.2. | Μορφολογία παράκτιας ζώνης | 125 |
| 4.3. | Κοκκομετρική ανάλυση | 127 |
| 4.4. | Προβλήματα διάβρωσης | 129 |
| 4.5. | Κυματικό κλίμα | 139 |
| 4.6. | Προτεινόμενα παράκτια έργα | 150 |
| 4.7. | Υφιστάμενα παράκτια έργα | 151 |
| 4.8. | Σημερινή κατάσταση | 154 |
| 5. | ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ | 158 |
| 5.1. | Χρονική περίοδος 2002 | 158 |
| 5.1.1. | Βαθυμετρία | 158 |
| 5.1.2. | Αποτελέσματα προσομοιώσεων PMS | 162 |
| 5.1.3. | Αποτελέσματα προσομοιώσεων Hd | 168 |
| 5.1.4. | Αποτελέσματα προσομοιώσεων ST | 172 |
| 5.2. | Χρονική περίοδος 2012 | 177 |
| 5.2.1. | Βαθυμετρία | 177 |
| 5.2.2. | Αποτελέσματα προσομοιώσεων PMS | 181 |
| 5.2.3. | Αποτελέσματα προσομοιώσεων HD | 184 |
| 5.2.4. | Αποτελέσματα προσομοιώσεων ST | 187 |
| 6. | ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 190 |
| 6.1. | Επαλληλία-Μέσος ετήσιος ρυθμός στερεομεταφοράς και τάσεις διάβρωσης/απόθεσης | 188 |
| 6.2. | Σύγκριση αποτελεσμάτων | 195 |
| 7. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 200 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 203 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α | 208 |
| | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β | 276 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 1.1: Κατάταξη ιζημάτων κατά Wentworth..... | 46 |
| Πίνακας 3.1: Επισκόπηση δεδομένων εισόδου UNIBEST-TC | 77 |
| Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστών β_1 , β_2 και β_3 | 93 |
| Πίνακας 3.3: Σύγκριση μοντέλων εξέλιξης ακτογραμμής..... | 119 |
| Πίνακας 4.1: Γεωγραφικά δεδομένα της οριοθέτησης και τυπολογίας των παράκτιων υδατικών συστημάτων | 126 |
| Πίνακας 4.2: Στοιχεία ταμιευτήρων περιοχής | 131 |
| Πίνακας 4.3: Πιθανότητα οι άνεμοι να είναι εντός συγκεκριμένου εύρους Βόρεια της Κύπρου..... | 139 |
| Πίνακας 4.4: Αποστάσεις αναπτυγμάτων πελάγους ανά 5° | 141 |
| Πίνακας 4.5: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη NNE διεύθυνση..... | 142 |
| Πίνακας 4.6: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για την E διεύθυνση..... | 142 |
| Πίνακας 4.7: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη ENE διεύθυνση | 143 |
| Πίνακας 4.8: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη WNW διεύθυνση..... | 143 |
| Πίνακας 4.9: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη WNW διεύθυνση..... | 144 |
| Πίνακας 4.10: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη NNW διεύθυνση..... | 144 |
| Πίνακας 4.11: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη W διεύθυνση | 145 |
| Πίνακας 4.12: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη N διεύθυνση | 146 |
| Πίνακας 4.13: Μέγιστες κυματικές συνθήκες στα βαθιά | 150 |
| Πίνακας 5.1: Κυματικά σενάρια | 163 |
| Πίνακας 6.1: Τιμές διάβρωσης και απόθεσης μεταξύ της ακτογραμμής 2002 και 2012 | 195 |

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 1.1: Παράκτια ζώνη..... | 41 |
| Εικόνα 1.2: Είδη θραύσης..... | 42 |
| Εικόνα 1.3: Διαγράμματα διάθλασης για διάφορες τοπογραφίες πυθμένα | 44 |
| Εικόνα 1.4: Περίθλαση γύρω από κατασκευή..... | 45 |
| Εικόνα 1.5: Δημιουργία βελοειδές ρεύματος..... | 47 |
| Εικόνα 1.6: Συνιστώσες κόκκου ιζήματος της επιφάνειας του πυθμένα..... | 48 |
| Διάγραμμα 1.1: Διάγραμμα Shields..... | 50 |
| Εικόνα 1.7: Μεταφορά ιζήματος κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή..... | 51 |
| Εικόνα 1.8: Χειμερινή και θερινή διατομή παραλίας..... | 52 |
| Εικόνα 2.1: Κυματοθραύστες, θωράκιση ακτής, πρόβολοι..... | 54 |
| Εικόνα 2.2: Κίνηση ιζήματος από την παρουσία ενός προβόλου..... | 55 |
| Εικόνα 2.3: Τυπική διατομή κυματοθραυστών | 57 |
| Εικόνα 2.4: Σχηματισμός salient και toboło | 59 |
| Εικόνα 2.5: Υδροδυναμικές συνθήκες και διεργασίες στερεομεταφοράς κοντά σε αποσπασμένο κυματοθραύστη..... | 60 |
| Εικόνα 3.1: Μεταβολή ακτογραμμής | 62 |
| Εικόνα 3.2: Σχηματική παρουσίαση υπολογισμού μεταβολής ακτογραμμής | 68 |
| Εικόνα 3.3: S-φ καμπύλη, σχηματισμός τόμπολο ή salient..... | 73 |
| Εικόνα 3.4: Δομή του μοντέλου UNIBEST-TC | 77 |
| Εικόνα 3.5: Επισκόπηση παράκτιας περιοχής όπου εφαρμόζεται το μοντέλο | 82 |
| Διάγραμμα 3.1: Κανονικοποίηση βάθους στη θραύση συναρτήσει της καμπυλότητας του κυματισμού και της γωνίας στα βαθιά..... | 85 |
| Διάγραμμα 3.2: Ο λόγος παράκαμψης συναρτήσει του μήκους του προβόλου και την κλίση των κυμάτων στα βαθιά για $A/H_{rms}, 0.1/3=0.1$ | 87 |
| Εικόνα 3.6: Δομή μοντέλου ONELINE..... | 110 |
| Εικόνα 3.7: Κλιμακωτής μορφής κάρναβος | 112 |
| Εικόνα 4.1: Γεωγραφική θέση Λατσιού | 123 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 4.2: Γεωγραφική θέση περιοχής εφαρμογής | 124 |
| Εικόνα 4.3: Λατσί | 125 |
| Εικόνα 4.4: Κόλπος Χρυσοχούς | 126 |
| Διάγραμμα 4.1: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης..... | 127 |
| Εικόνα 4.5: Διάβρωση ευρύτερης περιοχής | 131 |
| Εικόνα 4.6: Θέση ακτογραμμής 1963, 1993 και 2008 | 133 |
| Εικόνα 4.7: Περιοχή μελέτης..... | 134 |
| Εικόνα 4.8: Κατασκευή θωράκισης..... | 135 |
| Εικόνα 4.9: Θωράκιση νέου λιμένα Λατσιού | 135 |
| Εικόνα 4.10: Διάβρωση δημοτικής παραλίας, 2004 | 136 |
| Εικόνα 4.11: Διάβρωση δημοτικής παραλίας, 2007 | 137 |
| Εικόνα 4.12: Διάβρωση παραλίας Χώρου Κατασκήνωσης, 2007 | 139 |
| Εικόνα 4.13: Αναπτύγματα πελάγους..... | 141 |
| Εικόνα 4.14: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Βόρεια διεύθυνση ανέμου | 148 |
| Εικόνα 4.15: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Βόρειο-Βορειοανατολική διεύθυνση ανέμου | 148 |
| Εικόνα 4.16: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά την Ανατολική-Βορειοανατολική διεύθυνση ανέμου | 148 |
| Εικόνα 4.17: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά την Ανατολική διεύθυνση ανέμου | 149 |
| Εικόνα 4.18: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Δυτική διεύθυνση ανέμου | 149 |
| Εικόνα 4.19: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Δυτική-Βορειοδυτική διεύθυνση ανέμου | 149 |
| Εικόνα 4.20: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση ανέμου | 150 |
| Εικόνα 4.21: Υφιστάμενοι και Προτεινόμενοι κυματοθραύστες | 152 |
| Εικόνα 4.22: Διατομή κυματοθραύστη..... | 152 |
| Εικόνα 4.23: Κάτοψη Κυματοθραύστη | 153 |
| Εικόνα 4.24: Λιμανάκι Λατσιού | 154 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 4.25: Σημερινή κατάσταση δημοτικής παραλίας | 156 |
| Εικόνα 4.26: Σημερινή κατάσταση παραλίας κατασκηνωτικού χώρου | 157 |
| Εικόνα 5.1: Βαθυμετρία Βόρειας Διεύθυνσης..... | 159 |
| Εικόνα 5.2: Βαθυμετρία Δυτικής Διεύθυνσης..... | 159 |
| Εικόνα 5.3: Βαθυμετρία Ανατολικής Διεύθυνσης..... | 160 |
| Εικόνα 5.4: Βαθυμετρία Ανατολικής-Βορειοανατολικής Διεύθυνσης..... | 160 |
| Εικόνα 5.5: Βαθυμετρία Βόρειας-Βορειοανατολικής διεύθυνσης | 161 |
| Εικόνα 5.6: Βαθυμετρία Δυτικής-Βορειοδυτικής Διεύθυνσης..... | 161 |
| Εικόνα 5.7: Βαθυμετρία Βόρειας-Βορειοδυτικής Διεύθυνσης..... | 162 |
| Εικόνα 5.8: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ..... | 165 |
| Εικόνα 5.9: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ..... | 165 |
| Εικόνα 5.10: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ | 166 |
| Εικόνα 5.11: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 166 |
| Εικόνα 5.12: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 167 |
| Εικόνα 5.13: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 169 |
| Εικόνα 5.14: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ..... | 169 |
| Εικόνα 5.15: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ..... | 169 |
| Εικόνα 5.16: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 170 |
| Εικόνα 5.17: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 170 |
| Εικόνα 5.18: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 171 |
| Εικόνα 5.19: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ..... | 171 |
| Εικόνα 5.20: Γενικές παράμετροι πίνακα μεταφοράς ιζήματος | 172 |
| Εικόνα 5.21: Παράμετροι κυματισμού και ιζήματος πίνακα μεταφοράς ιζήματος..... | 173 |
| Εικόνα 5.22: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ | 174 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 5.23: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ | 174 |
| Εικόνα 5.24: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ | 175 |
| Εικόνα 5.25: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 175 |
| Εικόνα 5.26: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 176 |
| Εικόνα 5.27: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 176 |
| Εικόνα 5.28: Βαθυμετρία Βόρειας Διεύθυνσης με τα έργα..... | 177 |
| Εικόνα 5.29: Βαθυμετρία Δυτικής διεύθυνσης με τα έργα..... | 178 |
| Εικόνα 5.30: Βαθυμετρία Ανατολικής διεύθυνσης με τα έργα | 178 |
| Εικόνα 5.31: Βαθυμετρία Ανατολικής-Βορειοανατολικής διεύθυνσης με τα έργα | 179 |
| Εικόνα 5.32: Βαθυμετρία Βόρειας-Βορειοανατολικής διεύθυνσης με τα έργα | 179 |
| Εικόνα 5.33: Βαθυμετρία Δυτικής-Βορειοδυτικής διεύθυνσης με τα έργα..... | 180 |
| Εικόνα 5.34: Βαθυμετρία Βόρειας-Βορειοδυτικής διεύθυνσης με τα έργα | 180 |
| Εικόνα 5.35: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ | 181 |
| Εικόνα 5.36: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ..... | 181 |
| Εικόνα 5.37: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ | 182 |
| Εικόνα 5.38: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 182 |
| Εικόνα 5.39: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 183 |
| Εικόνα 5.40: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 183 |
| Εικόνα 5.41: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ | 184 |
| Εικόνα 5.42: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ | 184 |
| Εικόνα 5.43: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 185 |
| Εικόνα 5.44: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 185 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 5.45: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 186 |
| Εικόνα 5.46: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 186 |
| Εικόνα 5.47: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ | 187 |
| Εικόνα 5.48: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ | 187 |
| Εικόνα 5.49: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 188 |
| Εικόνα 5.50: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 188 |
| Εικόνα 5.51: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 189 |
| Εικόνα 5.52: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 189 |
| Διάγραμμα 6.1: Μέση ετήσια παράκτια στερεομεταφορά προκαλούμενη από τις κυματικές συνθήκες κάθε διεύθυνσης για το 2002..... | 191 |
| Διάγραμμα 6.2: Μέση ετήσια παράκτια στερεομεταφορά προκαλούμενη από τις κυματικές συνθήκες κάθε διεύθυνσης για το 2012..... | 192 |
| Διάγραμμα 6.3: Μέσος ετήσιος όγκος απόθεσης/διάβρωσης για τη Βόρεια διεύθυνση..... | 194 |
| Διάγραμμα 6.4: Μέσος ετήσιος όγκος απόθεσης/διάβρωσης για τη Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση..... | 194 |
| Διάγραμμα 6.5: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για τη Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση..... | 195 |
| Εικόνα 6.1: Αποτύπωση ακτογραμμής 2002 και 2012..... | 197 |
| Διάγραμμα 6.6: Μέσος ετήσιος όγκος απόθεσης/διάβρωσης προκαλούμενος από την επαλληλία των επιμέρους κυματικών συνθηκών..... | 199 |
| Εικόνα 1: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 3 μποφόρ..... | 208 |
| Εικόνα 2: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 3 μποφόρ..... | 208 |
| Εικόνα 3: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 3 μποφόρ | 208 |
| Εικόνα 4: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 4 μποφόρ..... | 209 |
| Εικόνα 5: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 4 μποφόρ..... | 209 |
| Εικόνα 6: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 4 μποφόρ | 209 |
| Εικόνα 7: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ..... | 210 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 8: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ..... | 210 |
| Εικόνα 9: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ..... | 210 |
| Εικόνα 10: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ..... | 211 |
| Εικόνα 11: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ..... | 211 |
| Εικόνα 12: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ..... | 211 |
| Εικόνα 13: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ..... | 212 |
| Εικόνα 14: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ..... | 212 |
| Εικόνα 15: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ..... | 212 |
| Εικόνα 16: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 213 |
| Εικόνα 17: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 213 |
| Εικόνα 18: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 213 |
| Εικόνα 19: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 214 |
| Εικόνα 20: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 214 |
| Εικόνα 21: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 214 |
| Εικόνα 22: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα..... | 215 |
| Εικόνα 23: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα..... | 215 |
| Εικόνα 24: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα..... | 215 |
| Εικόνα 25: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ. | 216 |
| Εικόνα 26: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ..... | 216 |
| Εικόνα 27: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ.. | 216 |
| Εικόνα 28: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ | 217 |
| Εικόνα 29: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ..... | 217 |
| Εικόνα 30: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ.. | 217 |
| Εικόνα 31: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ | 218 |
| Εικόνα 32: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ..... | 218 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 33: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ.. | 218 |
| Εικόνα 34: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ | 219 |
| Εικόνα 35: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ..... | 219 |
| Εικόνα 36: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ.. | 219 |
| Εικόνα 37: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ | 220 |
| Εικόνα 38: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 220 |
| Εικόνα 39: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ.. | 220 |
| Εικόνα 40: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 221 |
| Εικόνα 41: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 221 |
| Εικόνα 42: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 221 |
| Εικόνα 43: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 222 |
| Εικόνα 44: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 222 |
| Εικόνα 45: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 222 |
| Εικόνα 46: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 223 |
| Εικόνα 47: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 223 |
| Εικόνα 48: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα..... | 223 |
| Εικόνα 49: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ | 224 |
| Εικόνα 50: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ..... | 224 |
| Εικόνα 51: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ.. | 224 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 52: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ | 225 |
| Εικόνα 53: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ | 225 |
| Εικόνα 54: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ .. | 225 |
| Εικόνα 55: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 226 |
| Εικόνα 56: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 226 |
| Εικόνα 57: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ .. | 226 |
| Εικόνα 58: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ | 227 |
| Εικόνα 59: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ | 227 |
| Εικόνα 60: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ .. | 227 |
| Εικόνα 61: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ | 228 |
| Εικόνα 62: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ | 228 |
| Εικόνα 63: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ .. | 228 |
| Εικόνα 64: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ | 229 |
| Εικόνα 65: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ | 229 |
| Εικόνα 66: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ .. | 229 |
| Εικόνα 67: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 230 |
| Εικόνα 68: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 230 |
| Εικόνα 69: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ .. | 230 |
| Εικόνα 70: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 231 |
| Εικόνα 71: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 231 |
| Εικόνα 72: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 231 |
| Εικόνα 73: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 232 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 74: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 232 |
| Εικόνα 75: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 232 |
| Εικόνα 76: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7μποφόρ με τα έργα..... | 233 |
| Εικόνα 77: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 233 |
| Εικόνα 78: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 233 |
| Εικόνα 79: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8μποφόρ με τα έργα..... | 234 |
| Εικόνα 80: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 234 |
| Εικόνα 81: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα..... | 234 |
| Εικόνα 82: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9μποφόρ με τα έργα..... | 235 |
| Εικόνα 83: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 235 |
| Εικόνα 84: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα..... | 235 |
| Εικόνα 85: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 3μποφόρ | 236 |
| Εικόνα 86: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 3 μποφόρ..... | 236 |
| Εικόνα 87: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ | 236 |
| Εικόνα 88: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ..... | 236 |
| Εικόνα 89: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ | 237 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 90: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 237 |
| Εικόνα 91: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ..... | 237 |
| Εικόνα 92: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 238 |
| Εικόνα 93: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ | 238 |
| Εικόνα 94: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ..... | 238 |
| Εικόνα 95: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ | 239 |
| Εικόνα 96: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 239 |
| Εικόνα 97: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 239 |
| Εικόνα 98: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 240 |
| Εικόνα 99: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 240 |
| Εικόνα 100: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 240 |
| Εικόνα 101: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 241 |
| Εικόνα 102: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 241 |
| Εικόνα 103: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 241 |
| Εικόνα 104: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 242 |
| Εικόνα 105: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 242 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 106: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα..... | 242 |
| Εικόνα 107: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 243 |
| Εικόνα 108: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 3 μποφόρ | 243 |
| Εικόνα 109: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 3 μποφόρ | 243 |
| Εικόνα 110: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 3 μποφόρ | 244 |
| Εικόνα 111: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 4 μποφόρ | 244 |
| Εικόνα 112: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 4 μποφόρ | 244 |
| Εικόνα 113: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 4 μποφόρ | 244 |
| Εικόνα 114: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 245 |
| Εικόνα 115: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 245 |
| Εικόνα 116: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ | 245 |
| Εικόνα 117: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ | 245 |
| Εικόνα 118: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ | 245 |
| Εικόνα 119: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ | 246 |
| Εικόνα 120: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ | 246 |
| Εικόνα 121: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ | 246 |
| Εικόνα 122: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ | 246 |
| Εικόνα 123: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ | 247 |
| Εικόνα 124: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ | 247 |
| Εικόνα 125: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ | 247 |
| Εικόνα 126: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 248 |
| Εικόνα 127: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 248 |
| Εικόνα 128: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ | 248 |
| Εικόνα 129: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα ... | 248 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 130: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 248 |
| Εικόνα 131: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 249 |
| Εικόνα 132: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα ... | 249 |
| Εικόνα 133: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 249 |
| Εικόνα 134: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 249 |
| Εικόνα 135: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα ... | 250 |
| Εικόνα 136: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 250 |
| Εικόνα 137: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 250 |
| Εικόνα 138: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα ... | 251 |
| Εικόνα 139: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 251 |
| Εικόνα 140: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 251 |
| Εικόνα 141: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα ... | 252 |
| Εικόνα 142: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 252 |
| Εικόνα 143: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 252 |
| Εικόνα 144: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 3 μποφόρ | 253 |
| Εικόνα 145: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 3 μποφόρ | 253 |
| Εικόνα 146: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 4 μποφόρ | 253 |
| Εικόνα 147: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 4 μποφόρ | 253 |
| Εικόνα 148: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ | 254 |
| Εικόνα 149: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ | 254 |
| Εικόνα 150: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ | 254 |
| Εικόνα 151: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 254 |
| Εικόνα 152: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 254 |
| Εικόνα 153: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 255 |
| Εικόνα 154: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ | 255 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 155: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ..... | 255 |
| Εικόνα 156: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ..... | 255 |
| Εικόνα 157: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 256 |
| Εικόνα 158: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 256 |
| Εικόνα 159: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ..... | 256 |
| Εικόνα 160: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ..... | 256 |
| Εικόνα 161: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ..... | 256 |
| Εικόνα 162: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ..... | 257 |
| Εικόνα 163: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ..... | 257 |
| Εικόνα 164: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ..... | 257 |
| Εικόνα 165: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ..... | 257 |
| Εικόνα 166: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 258 |
| Εικόνα 167: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα..... | 258 |
| Εικόνα 168: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα..... | 258 |
| Εικόνα 169: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα... | 259 |
| Εικόνα 170: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 259 |
| Εικόνα 171: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα..... | 259 |
| Εικόνα 172: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 260 |
| Εικόνα 173: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 260 |
| Εικόνα 174: δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα..... | 260 |
| Εικόνα 175: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | |

| | |
|---|-----|
| | 261 |
| Εικόνα 176: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα..... | 261 |
| Εικόνα 177: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 261 |
| Εικόνα 178: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 262 |
| Εικόνα 179: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα..... | 262 |
| Εικόνα 180: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 262 |
| Εικόνα 181: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ με τα έργα | 263 |
| Εικόνα 182: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ με τα έργα..... | 263 |
| Εικόνα 183: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ με τα έργα | 263 |
| Εικόνα 184: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 3 μποφόρ..... | 264 |
| Εικόνα 185: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 3 μποφόρ | 264 |
| Εικόνα 186: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ..... | 264 |
| Εικόνα 187: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ | 264 |
| Εικόνα 188: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ..... | 265 |
| Εικόνα 189: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 265 |
| Εικόνα 190: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ | 265 |
| Εικόνα 191: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ..... | 266 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 192: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 266 |
| Εικόνα 193: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 266 |
| Εικόνα 194: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ | 267 |
| Εικόνα 195: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ | 267 |
| Εικόνα 196: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ | 265 |
| Εικόνα 197: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ | 268 |
| Εικόνα 198: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 268 |
| Εικόνα 199: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 268 |
| Εικόνα 200: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ | 269 |
| Εικόνα 201: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ | 269 |
| Εικόνα 202: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ | 269 |
| Εικόνα 203: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ | 270 |
| Εικόνα 204: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 270 |
| Εικόνα 205: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 270 |
| Εικόνα 206: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα | 271 |
| Εικόνα 207: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 271 |
| Εικόνα 208: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 271 |

| | |
|---|-----|
| Εικόνα 209: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα | 272 |
| Εικόνα 210: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 272 |
| Εικόνα 211: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 272 |
| Εικόνα 212: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα | 273 |
| Εικόνα 213: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 273 |
| Εικόνα 214: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 273 |
| Εικόνα 215: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα | 274 |
| Εικόνα 216: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 274 |
| Εικόνα 217: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 274 |
| Εικόνα 218: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα | 275 |
| Εικόνα 219: Θέση εγκάρσιων τομών Βόρειας διεύθυνσης | 276 |
| Εικόνα 220 (α), (β): Θέση εγκάρσιων τομών για τη σύγκριση με πραγματικά δεδομένα για τη Βόρεια διεύθυνση..... | 276 |
| Διάγραμμα 1: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για την Ανατολική-Βορειοανατολική διεύθυνση..... | 277 |
| Διάγραμμα 2: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για την Δυτική-Βορειοδυτική διεύθυνση..... | 277 |
| Διάγραμμα 3: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για τη Δυτική διεύθυνση . | 278 |
| Διάγραμμα 4: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για την Ανατολική διεύθυνση | 278 |

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η δημοτική παραλία στο Λατσί, στην Πόλη Χρυσοχούς της Επαρχίας Πάφου στην Κύπρο. Η περιοχή παρουσίαζε σημαντικό πρόβλημα διάβρωσης, το οποίο οδήγησε στο σχεδιασμό δεκατεσσάρων κυματοθραυστών και στην κατασκευή τεσσάρων από αυτούς. Η κατασκευή τους ξεκίνησε το Μάρτιο του 2009 και ολοκληρώθηκε το Μάιο του επόμενου χρόνου. Στόχος, είναι η μελέτη της εξέλιξης της ακτογραμμής, αν δηλαδή επήλθαν αλλαγές στην ακτογραμμή μετά την κατασκευή των έργων.

Για την επίτευξη του ανωτέρω στόχου, κατασκευάζεται μοντέλο για δύο χρονικές περιόδους: 2002 (πριν την κατασκευή) και 2012 (μετά την κατασκευή). Γίνεται διερεύνηση και σύγκριση μεταξύ μαθηματικών μοντέλων, τα οποία εξυπηρετούν τους σκοπούς της εργασίας. Βέλτιστη επιλογή αποτελεί το Mike 21 του DHI. Όλες οι βυθομετρικές μετρήσεις, αποτυπώσεις της ακτογραμμής, φωτογραφικό υλικό, ανεμολογικά δεδομένα καθώς επίσης και παλαιότερες μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, λήφθηκαν από τον Κλάδο Θαλασσιών Έργων του Υπουργείου Συγκοινωνιών και Έργων Κύπρου. Επίσης, πραγματοποιήθηκε επιτόπια επίσκεψη στην περιοχή για να διαπιστωθεί η σημερινή κατάσταση της παραλίας.

Έχοντας ως δεδομένα τα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής, υπολογίστηκε το ανεμολογικό κλίμα. Η περιοχή βάλλεται από ανέμους επτά διευθύνσεων: Βόρειους, Βορειο-Βορειοανατολικούς, Ανατολικούς-Βορειοανατολικούς, Ανατολικούς, Δυτικούς, Δυτικούς-Βορειοδυτικούς και Βορειο-Βορειοδυτικούς. Με το λογισμικό waves, έχοντας πριν υπολογίσει τα ενεργά αναπτύγματα πελάγους για κάθε διεύθυνση, υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά των κυματισμών: ύψος, μήκος και περίοδος. Χρησιμοποιώντας το Mike zero, κατασκευάζεται η βαθυμετρία της περιοχής, με το PMS (Parabolic Mild Slope Module) εξάγονται δύο αρχεία, ένα με τα χαρακτηριστικά των κυματισμών και ένα για τις τάσεις ακτινοβολίας, με το HD (Hydrodynamic Module) γίνεται ο υπολογισμός των ταχυτήτων της ροής και του βάθους του νερού και τέλος, με το ST (Sediment Transport Module) υπολογίζεται ο ρυθμός της στερεομεταφοράς.

Τα μοντέλα που προκύπτουν από τις δύο χρονικές περιόδους, συγκρίνονται αρχικά μεταξύ τους, ώστε να καταγραφούν οι διαφορές που έχουν επέλθει στο κυματικό κλίμα και το υδροδυναμικό πεδίο μετά την κατασκευή των έργων. Στη συνέχεια, γίνεται επεξεργασία των μοντέλων στερεομεταφοράς ώστε να συγκριθούν με πραγματικά δεδομένα και να διαπιστωθεί η απόδοση ή μη των κυματοθραυστών, καθώς επίσης και για την εξαγωγή άλλων συμπερασμάτων.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The subject of the present study is a coast located in Paphos, Cyprus. The coast has a serious problem with erosion, fact that lead to the design of fourteen detached breakwaters and the construction of the four. The construction began in March 2009 and finished in May 2010. The purpose of the present study is to examine the evolution of the coastline and more specifically to examine whether if the breakwaters brought changes, accretion or erosion in the coastline.

In order to accomplish the aim of the present study, a model was developed for two time periods: 2002 (before the construction of the works) and 2012 (after the construction of the works). A comparison between numerical models that are suitable for the goal of the study has been made, in order to choose the optimal one. The best choice is Mike 21 by DHI, because it is a comprehensive software, requires minimum input data, the computational procedure is reduced and provides an excellent customer support. Bathymetric measurements, coastline surveying, photographs, wind data and older studies for the area, were taken by the Department of Maritime Works of the Ministry of Communications and Works of the Republic of Cyprus. The results of the numerical simulation were compared to field measurements, in order to see the changes in the coastline and the efficiency of the numerical model.

Area of study

The coastline is located at Latchi, a village in Polis Chrysochous Municipality, in Paphos district in Cyprus. Is situated 35 km northwest of Paphos city and 180 km west of the capital city Nicosia (Figure 1). Latchi covers an area of 0.6 km², the coastline's length is 2200 m and is bounded east of the port up to the camping site of the aforesaid Municipality. During the period between 1963-1993, according to surveys and aerophotographs, the mean erosion was 30 m. The length of each breakwater is 100 m and their width is 4.50 m. The distance between them is 50 m, the berm height is 0.40 m and their distance from the coast is 100 m (Figure 2).



Figure 1: Location of the area of study

Source: Google Earth

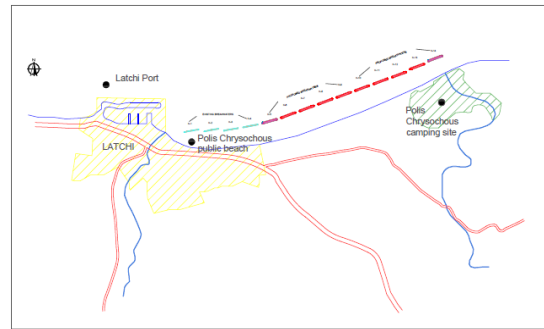


Figure 2: Area of study, Scale 1:200

Methodology

A series of steps was followed, in order to investigate the coastline evolution of the area of interest:

- Field study
- Collection of the data (bathymetric measurements, coastline surveys, older studies, wind data)
- Determination of the wave climate
- Simulation of the bathymetry, the wave and the hydrodynamic field and the sediment transport, using Mike 21 for 2002 and 2012
- Weighted superposition of the sediment transport values depending on each wave scenario, in order to gain the total annual sediment transport rate
- Comparison of the results of the two time periods to real data
- Conclusions

Wave Climate

For the calculation of the wave climate, were analyzed measurements of wind and waves from boats in the North of the island. Dominant wave direction is West (annual frequency 25.16%), East (annual frequency 10.15%) and West-Northwest (annual frequency 7.23%). Waves, a Fortran-based software, was applied to forecast the offshore wave characteristics by using the annual per cent frequencies for the seven winds that influence

the area (N, NNE, ENE, E, W, WNW, NNW). After the estimation of fetch, the peak period and the significant wave height were calculated (Table 1).

Table 1: Fetch-Limited Conditions

| Fetch-Limited Conditions | | | | | | | |
|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Beaufort | North | North-Northeast | East-Northeast | East | West | North-northwest | West-Northwest |
| 5 | H=1,902m T=5,52m | H=1,692m T=5,196s | H=0,641m T=3,101s | H=0,456m T=2,563s | H=1,022m T=3,991s | H=2,073m T=5,774s | H=1,812m T=5,384s |
| 6 | H=2,651m T=6,498s | H=2,336m T=6,086s | H=0,862m T=3,553s | H=0,611m T=2,928s | H=1,382m T=4,609s | H=2,915m T=6,825s | H=2,515m T=6,324s |
| 7 | H=3,424m T=7,365s | H=3,001m T=6,875s | H=1,109m T=3,957 | H=0,773m T=3,252s | H=1,755m T=5,156s | H=3,067m T=6,954s | H=3,241m T=7,157s |
| 8 | H=4,35m T=8,275m | H=3,799m T=7,703s | H=1,365m T=4,38s | H=0,966m T=3,593s | H=2,203m T=5,731s | H=4,828m T=8,739s | H=4,096m T=8,017s |
| 9 | H=5,3m T=9,101s | H=3,633m T=7,425s | H=1,648m T=4,766s | H=1,166m T=3,905s | H=2,663m T=6,254s | H=5,213m T=9,022s | H=3,633m T=7,425s |
| 10 | 0 | 0 | 0 | H=1,4m T=4,233s | 0 | 0 | 0 |

Mike 21 DHI

The software Mike 21 was used to create the bathymetry, to calculate the characteristics of the waves (height, period, length) and the radiation stresses, the velocity of the wave generated current and the sediment transport rates. Mike 21 was chosen among other numerical models, because is a comprehensive software, friendly towards the user, the input data are minimum and the calculation process is reduced in comparison to other models. Furthermore, the insurance of license is easier due to the fact that DHI has a representative in Greece and the customer service is available at any time.

The bathymetry for the two time periods mentioned above was created using Mike zero. It was created seven times for each year, meaning that the area is driven by seven wind directions (E, W, N, NNE, ENE, WNW, NNW). All the measurements were taken by the Ministry of Communications and Works of the Republic of Cyprus. In all cases the grid size was 1.5 m and the value of the coast was 10.

Mike 21 Parabolic Mild-Slope is a linear refraction-diffraction model based on a parabolic approximation to the elliptic mild slope equation. It reproduces phenomena such as shoaling and refraction, determines wave fields in open coastal areas and produces wave radiation stresses. Mike 21 PMS was used to determine the wave fields (root mean square wave height, peak wave period, mean wave direction) and wave radiation stresses of the area of interest for the period before and after the construction of the breakwaters. The simulation for all the wind directions, was performed for the wave scenarios presented in Table 1.

The Hydrodynamic Module (HD) is the basic module of the Mike 21 Flow Model. Simulates water level variations and flows in response to a variety of forcing functions in coastal regions etc. It takes into account the effects of bottom shear stress, wind shear stress, coriolis force, flooding and drying, wave radiation stresses, evaporation, momentum dispersion, sources and sinks and barometric pressure gradients. The output of the model is a water depth file and fluxes per unit length in x and y direction. The boundary value was chosen to be 12, because other values, after tests, gave wrong

formation of the wave driven currents. Eddy's viscosity value was 0.07, because presents no problems of instability in the various tests performed.

The output results of the Hydrodynamic Module are used as input for the Sediment Transport Module. Mike 21 ST is used for the calculation of non-cohesive sediment transport rates. The simulation also gives the initial rates of bed level changes, fact that helps to the identification of potential areas of accretion or erosion. It takes into account tide, wind, wave and current and simulates transport rates in natural environments, such as tidal inlets, and in constructions, such as harbors. Sediment Transport Table was created for every simulation, grain size was 1.25 mm and sediment grading was 1.8, values that were taken from older studies for the area. The result is a file with the transport rates in the horizontal (Ps) and the vertical axis (Qs) and the rate of the bottom change (dz/dt).

Results and discussion

According to the results, North, North-Northeast and North-Northwest are the dominant wave directions, which cause the biggest rate of sediment transport and consequently the beach erosion. The results for the North wind which causes the extreme wave conditions are presented below.

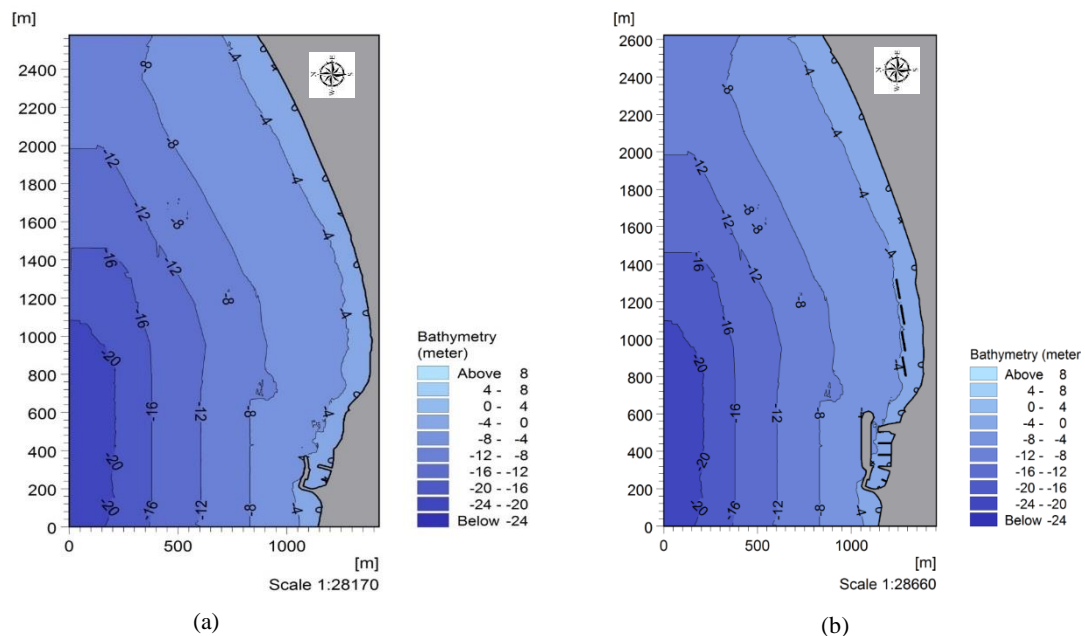


Figure 3 (a), (b): Bathymetry of N wind for 2002 and 2012 respectively

The maximum wave height that occurs in the coast is 5.3 m and it hits the coastline almost vertically. The wave breaking zone, due to the gentle slope, is 260 m. In the shadow of the breakwaters, wave serenity is observed and into the harbor wave heights are almost zero.

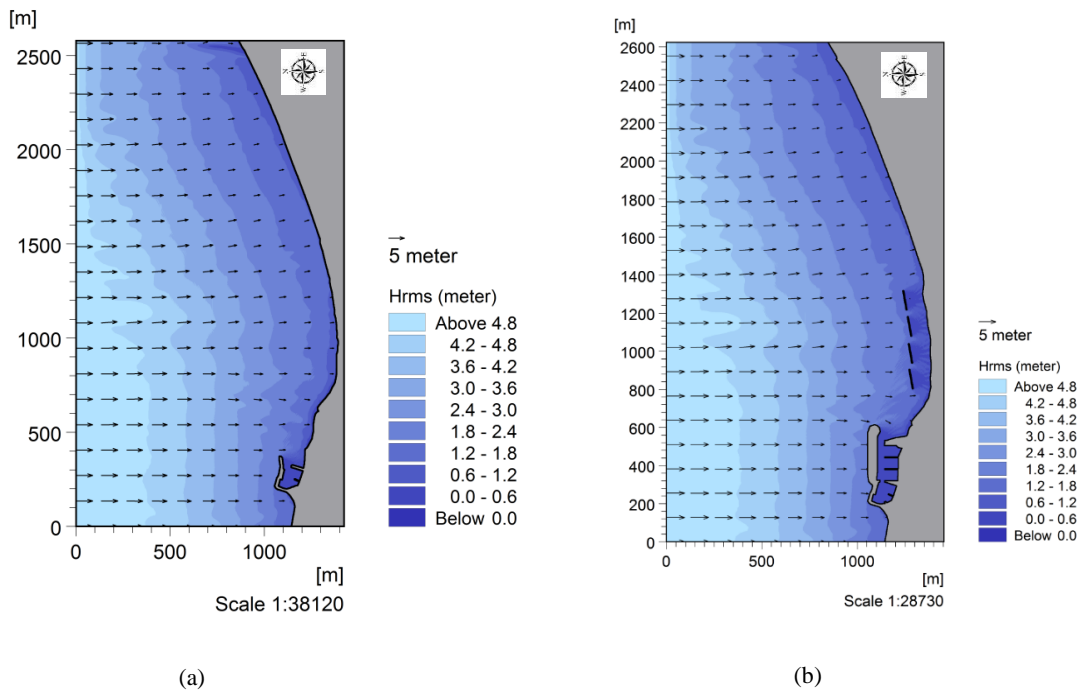


Figure 4 (a), (b): Root mean square wave height, Hrms for North wind for 2002 and 2012 respectively

MIKE 21 PMS

Similarly, it was observed that the current velocity is 0.8 m/s downstream the port in 2002 and 1.2 m/s in 2012. The direction is from West to East. It is moving along the coast and weakens downstream the breakwaters.

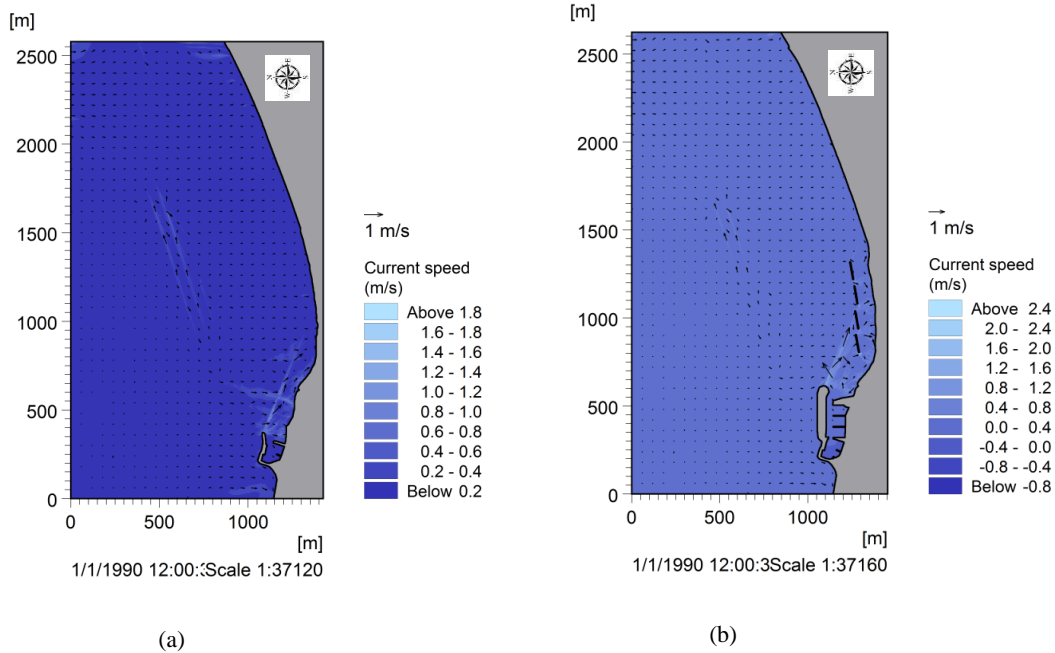


Figure 5 (a), (b): Current for North wind for 2002 and 2012 respectively

MIKE 21 HD

The sediment transportation follows the direction of the hydrodynamic circulation. The sediment transport is significant in the East of the coast ($6000 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$) and has a Northeast direction. Upstream the breakwaters the sediment movement has the same rate as in the east side of the coast and downstream the works, the transportation has low values.

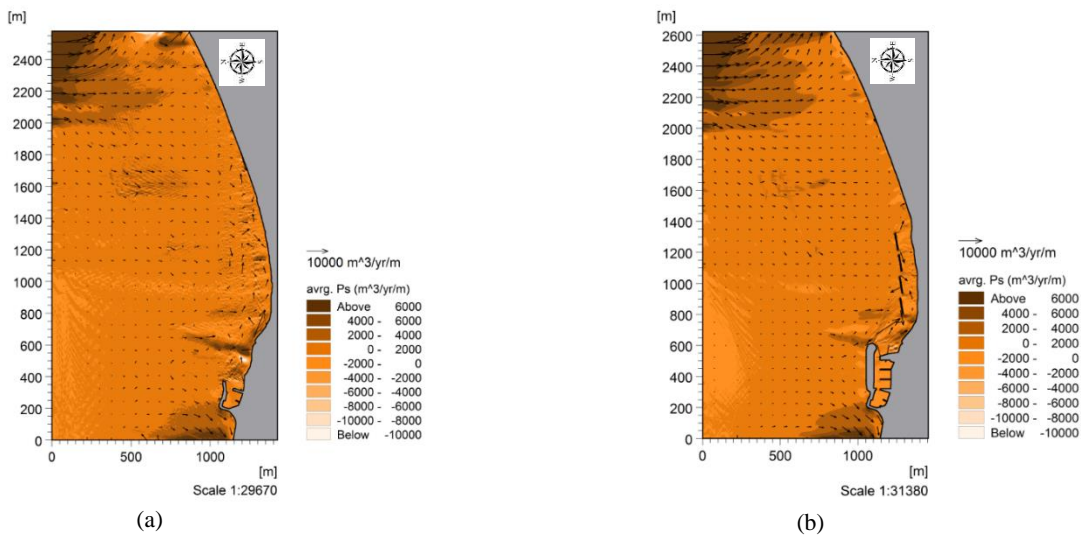


Figure 6 (a), (b): Sediment transport for the two time periods, MIKE 21 ST

Six cross sections, covering all the area of study and a zone bigger than the breaker zone ($X_b \cdot 1.2$), were used to calculate the mean annual sediment transport for 2002 and 2012. Superposition was held between the wave scenarios of each year; each wave condition was multiplied with the annual frequency of the wind. The results show that there is high sediment movement west of the area and a reduction in 2012 due to the breakwaters.

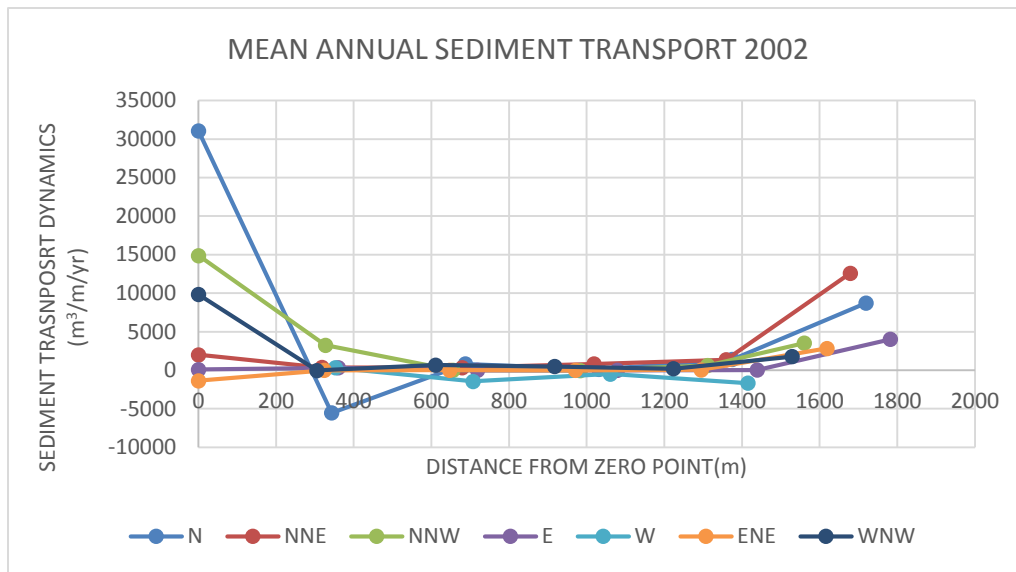


Figure 7: Mean annual sediment transport for each wind in 2002

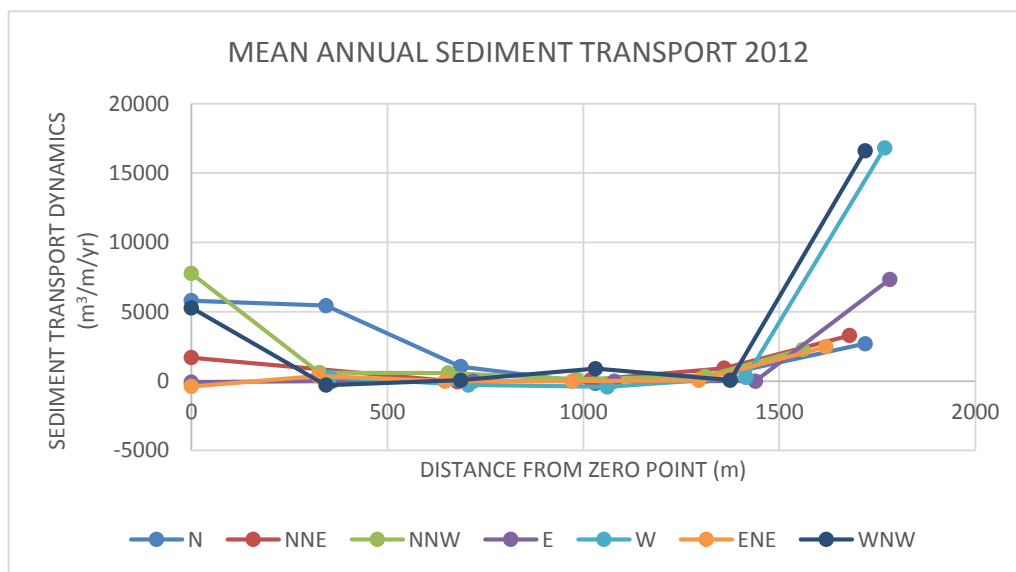


Figure 8: Mean annual sediment transport for each wind in 2012

A topographic survey of the coastline during the two time periods, shows five positions where the coastline is either eroding or depositing (Figure 8). Five cross sections in the results of the Sediment Transport Module in the same positions, were used to calculate the trend of erosion and accretion. The results are mostly similar to the real data; accretion occurs in the area of the breakwaters and erosion downstream the works (Figure 9).

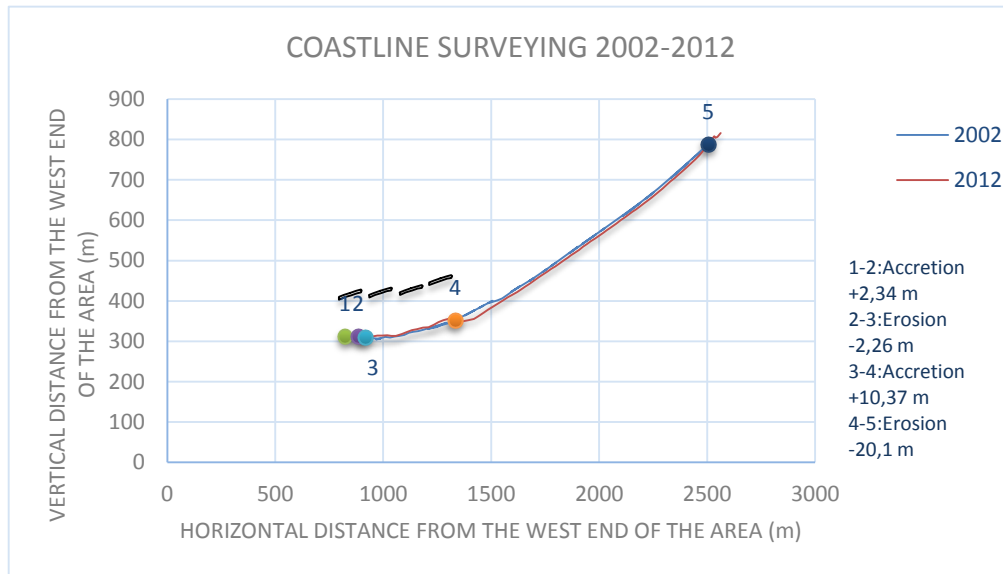


Figure 8: Topographic survey of the coastline for 2002 and 2012

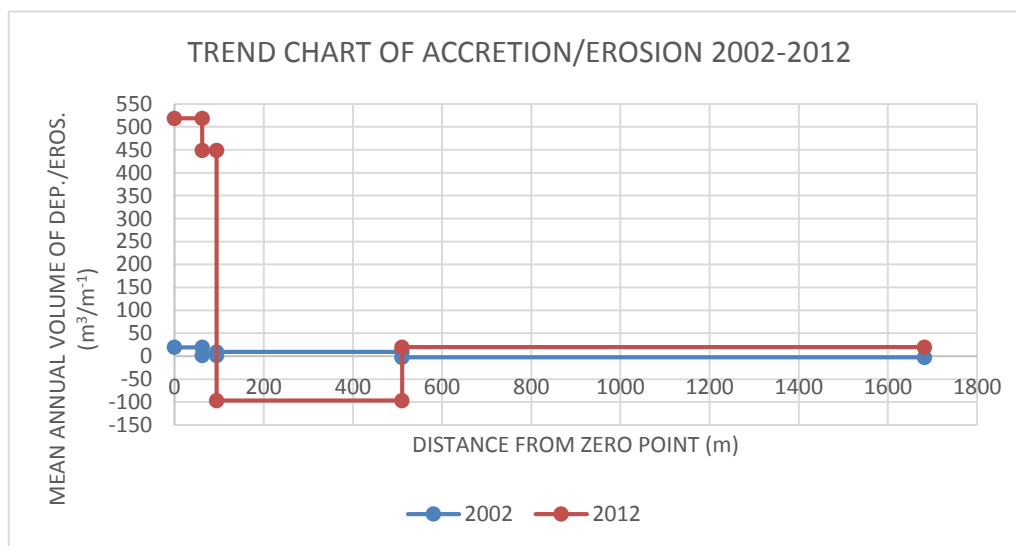


Figure 9: Trend chart of accretion and erosion of 2002 and 2012

Conclusions

The simulation shows that North, North-Northeast and North-Northwest are the dominant wind directions. The simulation of the wave climate shows that the North wind causes the biggest wave heights and the widest wave breaking zone. In the lee of the breakwaters and inside the basin, the wave height is minimum. For the rest of the wind scenarios, the picture is similar with proportionately smaller wave heights and breaking zone.

The general picture of the results of the Hydrodynamic module is that the velocity of the currents in the lee of the breakwaters is decreasing and the hydrodynamic field calms. The sediment transport follows the direction of the Hydrodynamic field. The rate is almost the same between the two time periods, except of the area in the lee of the breakwaters, where the rate is reducing. It moves from the West to the East of the coastline.

The coastline surveying shows the trend of accretion in the lee and the trend of erosion downstream the breakwaters. The same trend is shown in the numerical results of the sediment transport module. The results are not identical to the real data between the first and the third position of the cross sections (Figure 8). This is due to the extension of the port in 2005, which caused erosion downstream and is shown in the results of the model. Mike 21 demonstrates that is a useful tool for simulating coastal processes. It is noted that the whole process of the present research and as well as its results, consist of some minor failures (e.g. high sediment rate to the East, Figure 6b). Some assumptions were made in the simulations, such as the consideration of infinite amount of sediment. For this reason, while numerical models were used to analyze the wave climate of a region, as well as the behavior of the coast with or without projects, it is recommended for difficult cases to use them in conjunction with a physical model for better and more comprehensive results.

Finally, the construction of the four breakwaters seems to be successful, while accretion occurs in the part of the coast that are covering. Downstream the works, the coastline is eroding, due to the fact that the plan for the area is not integrated. In order to protect the coast thoroughly, it is imperative for the ten more breakwaters to be constructed.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. Στόχος Μεταπτυχιακής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη μιας ακτής στο Λατσιά στην Πόλη Χρυσοχούς, της Επαρχίας Πάφου στην Κύπρο. Η περιοχή παρουσιάζει σημαντικό πρόβλημα διάβρωσης, με μέση τιμή 30 μέτρα. Το Εργαστήριο Λιμενικών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, έπειτα από μελέτη της περιοχής, πρότεινε την κατασκευή 14 κυματοθραυστών και επέκταση του υφιστάμενου λιμένα. Η επέκταση του λιμένα ολοκληρώθηκε το 2004 και το Μάιο του 2010 ολοκληρώθηκε η τοποθέτηση των τεσσάρων κυματοθραυστών. Η κατασκευή των υπόλοιπων δέκα κυματοθραυστών, δεν έχει ξεκινήσει, λόγω της δυσμενούς οικονομικής κατάστασης της χώρας.

Πιο συγκεκριμένα, σκοπός είναι η διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος των κυματοθραυστών. Για την επίτευξη του ανωτέρου στόχου, χρησιμοποιείται το λογισμικό Mike 21 του DHI, όπου και συγκρίνονται τα αποτελέσματά του με πραγματικά δεδομένα. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιούνται για δύο χρονικές περιόδους: το 2002 και το 2012. Στοιχεία, όπως η βυθομετρία της περιοχής και η θέση της ακτογραμμής, λήφθηκαν από τον Κλάδο Θαλασσιών Έργων του Υπουργείου Συγκοινωνιών και Έργων Κύπρου.

2. Μεθοδολογία

Για την πραγματοποίηση της μεταπτυχιακής εργασίας, ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Επιτόπια επίσκεψη στην περιοχή μελέτης
- Συλλογή δεδομένων (βυθομετρικές μετρήσεις, αποτυπώσεις, παλαιότερες μελέτες, ανεμολογικά δεδομένα)
- Υπολογισμός κυματικού κλίματος
- Προσομοίωση με το Mike 21 για το 2002 και το 2012 (κατασκευή βαθυμετρίας, υπολογισμός κυμάτων, υδροδυναμικού πεδίου και εκτίμηση στερεομεταφοράς)
- Σταθμισμένη επαλληλία κυματικών σεναρίων

- Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο χρονικών περιόδων
- Εξαγωγή συμπερασμάτων

3. Πορεία Εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή ορισμένων βασικών εννοιών, οι οποίες και αναφέρονται κατά τη διάρκεια της εργασίας. Περιγράφονται οι παράκτιες διεργασίες, όπως είναι τα κύματα και τα ρεύματα και οι μηχανισμοί οι οποίοι προκαλούν το φαινόμενο της διάβρωσης σε μια ακτή.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στα έργα που αποσκοπούν στην προστασία μιας ακτής. Δίνεται έμφαση στους κυματοθραύστες, τις κατηγορίες τους και πώς αυτοί επιδρούν στην ακτή, μεταβάλλοντας τις υδροδυναμικές συνθήκες και τις διεργασίες που αφορούν στη στερεομεταφορά.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται μαθηματικά μοντέλα, τα οποία εξυπηρετούν τον σκοπό της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας. Καταγράφονται τα σημαντικότερα στοιχεία του κάθε μοντέλου και οι μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το καθένα και στο τέλος, πραγματοποιείται μια σύγκριση μεταξύ αυτών ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στην περιοχή μελέτης. Η γεωγραφική θέση, στοιχεία για τα ιζήματα, το ανεμολογικό και κυματικό καθεστώς, τα προβλήματα διάβρωσης και η περιγραφή των ακτομηχανικών έργων, αποτελούν ορισμένα από τα στοιχεία τα οποία απαρτίζουν το παρόν κεφάλαιο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τις δύο χρονικές περιόδους εφαρμογής του μοντέλου. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η βαθυμετρία της περιοχής ανά διεύθυνση και τα αποτελέσματα που αφορούν τους κυματισμούς, το υδροδυναμικό πεδίο και τη ροή ιζήματος της περιοχής. Στο έκτο κεφάλαιο, πραγματοποιείται η σταθμισμένη επαλληλία των αποτελεσμάτων των μοντέλων κίνησης ιζήματος για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας στερεοπαροχής και η σύγκριση τους με τα πραγματικά δεδομένα. Στο έβδομο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη.

1. ΠΑΡΑΚΤΙΕΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑ ΑΚΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις παράκτιες διεργασίες, όπως είναι τα κύματα και τα ρεύματα, τα οποία προκαλούν την έναρξη κίνησης του ιζήματος. Επιπλέον, αναφέρονται οι κυριότεροι λόγοι που επιδρούν σε μια ακτή, μεταβάλλοντας τη μορφολογία της.

1.1. Παράκτια ζώνη

Η πιο απλουστευμένη περιγραφή για την ακτή είναι ότι αποτελεί ένα γεωγραφικό χαρακτηριστικό, χωρίς όμως να υποδηλώνεται η πολυπλοκότητά της. Δεν αποτελεί μια σταθερή γραμμή σε ένα χάρτη, αλλά ένα δυναμικό περιβάλλον στο οποίο ακτή και θάλασσα αλληλοεπιδρούν προκαλώντας διάβρωση ή απόθεση, ανάλογα με τη χρονική κλίμακα και τους παράγοντες που επιδρούν (φυσικοί ή ανθρωπογενείς).

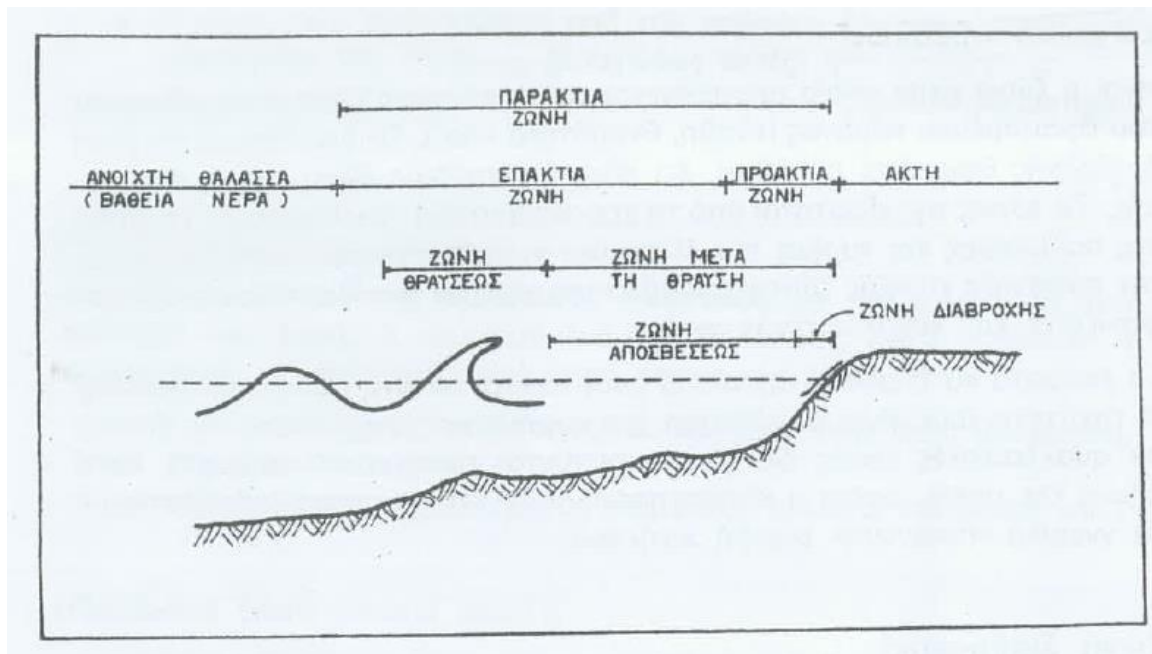
Σύμφωνα με το Πρωτόκολλο Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Παράκτιων Περιοχών της Σύμβασης της Βαρκελώνης, «παράκτια ζώνη» ορίζεται η γεωγραφική περιοχή στην οποία οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του θαλάσσιου και χερσαίου τμήματος συμβαίνουν σε μορφή σύνθετων οικολογικών συστημάτων, που προκαλούνται από βιοτικά και αβιοτικά συστατικά, συνυπάρχοντας και αλληλοεπιδρώντας με τις ανθρώπινες κοινωνίες και τις σχετικές κοινωνικό-οικονομικές δραστηριότητες.

Στην παράκτια ζώνη λαμβάνουν χώρα τρεις διεργασίες: Μεταφορά ενέργειας και κίνηση υδάτινων μαζών, μεταφορά και απόθεση ιζημάτων και μεταβολή της μορφής της παράκτιας ζώνης. Η παράκτια ζώνη αποτελείται από τις εξής ζώνες (Εικόνα 1.1):

- Ζώνη πριν τη θραύση¹: Το πεδίο όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυμάτων.
- Ζώνη θραύσης: Αποτελεί το πιο δυναμικό τμήμα της παράκτιας ζώνης καθώς εμφανίζεται και ολοκληρώνεται η θραύση των κυμάτων.

¹ Φυσικός μηχανισμός ο οποίος εκδηλώνεται όταν παρατηρείται αστάθεια στη διατομή του κύματος, λόγω του μειωμένου βάθους και της κλίσης του πυθμένα

- Ζώνη μετά τη θραύση η οποία υποδιαιρείται στη ζώνη απόσβεσης και διαβροχής. Στη ζώνη απόσβεσης αποσβήνεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του θραυόμενου κύματος, το εύρος της εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, την παλίρροια και την κλίση του πυθμένα. Η ζώνη διαβροχής οριοθετείται εξωτερικά από την κατώτερη θέση της ακτογραμμής και εσωτερικά από την ανώτερη θέση της ίδιας γραμμής. Το πλάτος της εξαρτάται από την κλίση του πυθμένα και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.



Εικόνα 1.1: Παρακτια ζώνη

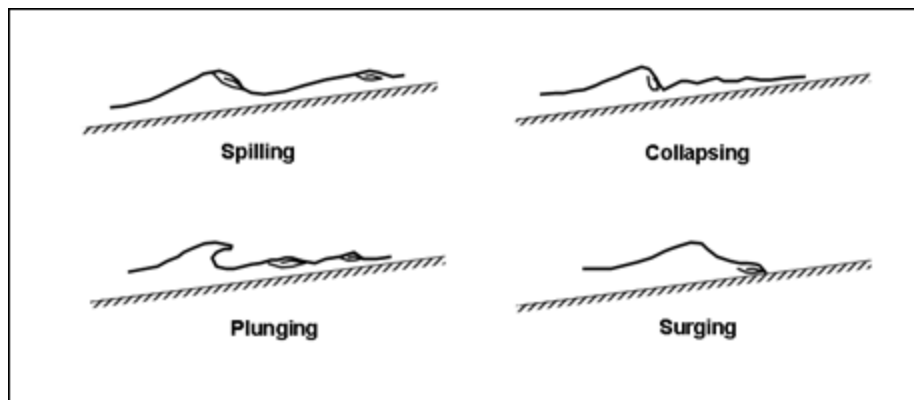
Πηγή: Μουτζούρης, 2005

1.2. Κύματα και ρεύματα

Η συνισταμένη διαταραχή της θαλάσσιας μάζας από τις ταλαντώσεις των σωματιδίων, η οποία προκαλείται από την απομάκρυνσή τους από τη θέση ισορροπίας και την επαναφορά τους στις αρχικές τους θέσεις, οδηγεί στο θαλάσσιο κυματισμό. Οι κυματισμοί διακρίνονται με βάση την περίοδο ταλαντώσεων των σωματιδίων σε κυματισμούς μεγάλης περιόδου και κυματισμούς μικρής περιόδου, σε δισδιάστατους και

τριδιάστατους, αναπτυσσόμενους, ανεπτυγμένους και αποσβηνόμενους. Χαρακτηριστικά μεγέθη των κυμάτων είναι το ύψος κύματος (H), το μήκος κύματος (L), η περίοδος (T) και η ταχύτητα κύματος (C).

Ο πυθμένας επιδρά στην υφή, τη μορφή και τη διεύθυνση μετάδοσης των κυμάτων, όταν το βάθος του νερού μειώνεται αισθητά. Η επίδραση αυτή εκφράζεται με τη μορφή των παραμορφώσεων, της θραύσης, της διάθλασης και της περίθλασης των κυμάτων. Σε μικρά βάθη μειώνεται το μήκος κύματος και στη συνέχεια αυξάνεται, αυξάνεται η καμπυλότητα και εμφανίζονται υψηλότερες αρμονικές. Όταν οι παραμορφώσεις στη διατομή φτάσουν σε μια κρίσιμη τιμή, το κύμα θραύεται. Κατά τη διάρκεια της θραύσης, η ελεύθερη επιφάνεια χάνει την κυματοειδή μορφή της και μέρος της ενέργειας μετατρέπεται σε ενέργεια τύρβης. Η θραύση εμφανίζεται στη βάση (θραύση εφορμήσεως, *surging*), στο άνω μέρος του μετώπου (θραύση κυλίσεως, *spilling*) ή στην κορυφή (θραύση εκτίναξεως, *plunging*). Ακόμη ένα είδος, είναι η θραύση κατάρρευσης (*collapsing*), η οποία κατατάσσεται ανάμεσα στη θραύση εκτίναξης και εφορμησης (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Είδη θραύσης

Πηγή: www.wikipedia.org

Σε θεωρητικό επίπεδο οι Munk (1949) και Komar and Gaughan (1973), έδωσαν αντίστοιχα τις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό του ύψους κύματος στη θραύση H_b :

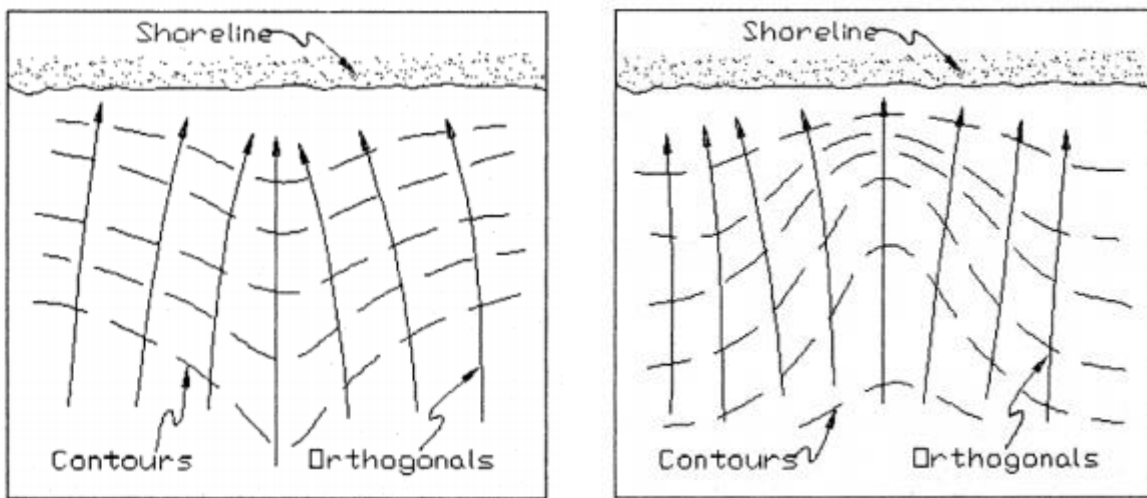
$$\frac{H_b}{H_0} = 0.3\gamma_0^{-0.33} \text{ και } \frac{H_b}{H_0} = 0.56\gamma_0^{-0.2} \quad (1)$$

Σε πειραματικό επίπεδο, οι LeMehaute and Koh (1967) και οι Moutzouris et Marcou (1978), έδωσαν αντίστοιχα τις εξής σχέσεις:

$$\frac{H_b}{H_0} = 0.76(\tan a)^{1/7} \gamma_0^{-1/4} \quad (2)$$

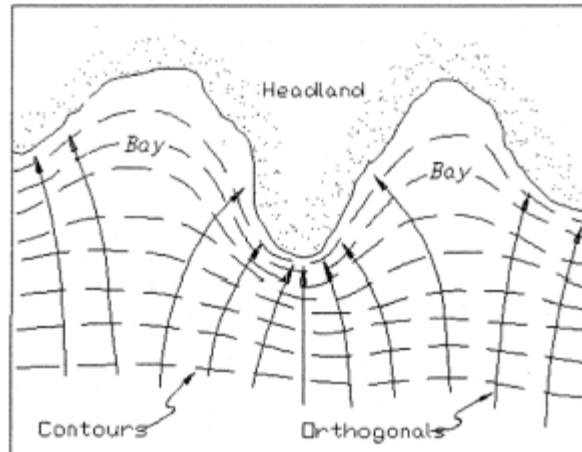
$$\text{Και } \frac{H_b}{H_0} = \beta \gamma_0^\delta \text{ όπου } \beta = 1.8 \text{ και } \delta = -0.5(d_0/L_0)^{0.7} \quad (3)$$

Μία ακόμη παραμόρφωση που υφίστανται τα κύματα είναι η διάθλαση, η οποία οφείλεται στη χωρική διαφοροποίηση της ταχύτητας προώθησεως ενός αρχικά δισδιάστατου κυματισμού, λόγω της επίδρασης του βάθους d στην ταχύτητα C . Το αποτέλεσμα της διάθλασης είναι η καμπύλωση των αρχικά ευθύγραμμων κορυφογραμμών με τάση παραλληλισμού προς τις ισοβαθείς. Συμβαίνει σε βάθος d μικρότερο του $L/2$ γιατί σε βαθιά νερά το C είναι συνάρτηση μόνο του T και όχι του d (Κουτίτας, 1998). Έτσι, από δύο σημεία στο μέτωπο του κύματος, το ένα που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος κινείται πιο γρήγορα στην ακτή, με αποτέλεσμα να καμπυλώνεται το μέτωπο και να γίνεται παράλληλο προς τις ισοβαθείς. Οι κάθετες στην κορυφογραμμή γραμμές, συγκλίνουν ή αποκλίνουν ανάλογα με την καμπυλότητα των κυμάτων. Επιπρόσθετα, αν η ακτή έχει τα κοίλα προς τη θάλασσα, τότε το ύψος κύματος αυξάνεται και συγκεντρώνεται ενέργεια (ακρωτήρια). Στην αντίθετη περίπτωση, μειώνεται το ύψος κύματος και η παραλία είναι αμμώδης λόγω της μικρής κυματικής ενέργειας.



(α)

(β)



(γ)

Εικόνα 1.3 (α), (β), (γ): Διαγράμματα διάθλασης για διάφορες τοπογραφίες πυθμένα

Πηγή: C.E.M 2008

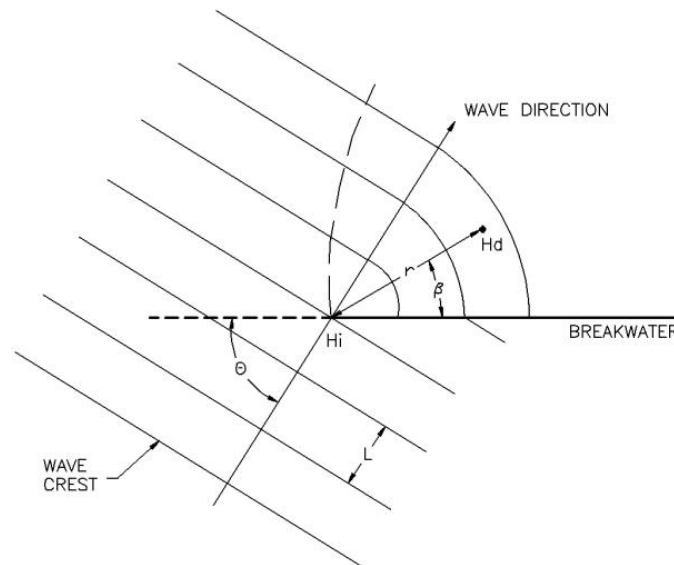
Το φαινόμενο της διάθλασης περιγράφεται από το νόμο του Snell. Από περιοχή βάθους d_1 και φασικής ταχύτητας C_1 σε περιοχή βάθους d_2 και φασικής ταχύτητας C_2 , συνεπάγεται αλλαγή της γωνίας φ_1 που σχηματίζει η ορθογώνιος με την ισοβαθή. Η νέα γωνία φ_2 δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varphi_2 = \arcsin\left(\frac{C_2}{C_1} \sin \varphi_1\right) \quad (4)$$

Άλλος ένας φυσικός μηχανισμός είναι η περίθλαση των κυμάτων, κατά την οποία μεταδίδεται ενέργεια κατά μήκος των κορυφογραμμών του προσπίπτοντος κύματος. Δημιουργείται από την επίδραση του μετώπου μιας κατασκευής και η μελέτη της είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό των διαταραχών στο εσωτερικό μιας λιμενολεκάνης, η οποία προστατεύεται από εξωτερικά λιμενικά έργα. Η περίθλαση υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$H = k_d H_o \quad (5)$$

όπου H_0 το ύψος κύματος πριν την κατασκευή και k_d ο συντελεστής περίθλασης.



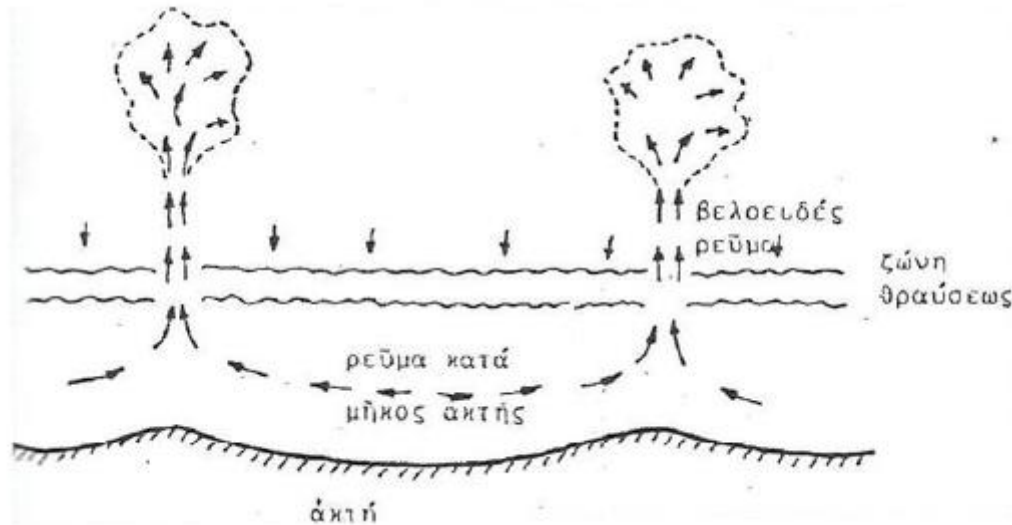
Εικόνα 1.4: Περίθλαση γύρω από κατασκευή

Πηγή: C.E.M 2008

Όσον αφορά στα ρεύματα αποτελούν σημαντικό παράγοντα μεταφοράς μαζών νερού και διαλυμένων ρυπαντών, μεταφοράς υλικού του πυθμένα και διαφοροποίησης της στάθμης σε χαμηλότερα ή υψηλότερα επίπεδα από τη Μέση Στάθμη Ηρεμίας. Προκαλούνται από την επίδραση της Σελήνης και του Ήλιου (παλίρροια), από την επίδραση του ανέμου (ανεμογενή ρεύματα), από τις παροδικές χωρικές βαθμίδες της πυκνότητας του θαλασσινού νερού (ρεύματα πυκνότητας) και κοντά στις ακτές λόγω των φαινομένων διάθλασης, περίθλασης και θραύσης (κυματογενή ρεύματα).

Η τριβή στον πυθμένα και η διατμητική τάση ακτινοβολίας, είναι οι γενεσιουργές δυνάμεις των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής (ρμκα). Στη ζώνη θραύσης, οι μεταβολές στο ύψος κύματος και η ανάκλαση μέρους της ενέργειας του κύματος και η παράλληλη κίνησή του προς την ακτή, προκαλεί την εμφάνιση ενός ρμκα. Η συμβολή δύο ρευμάτων κμα αντίθετης φοράς, εκτρέπει τη ροή προς τα βαθιά με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου ρεύματος, το οποίο καλείται βελοειδές ρεύμα. Διασχίζει τη ζώνη θραύσης και εκφυλίζεται στη ζώνη πριν τη θραύση. Αποτελεί ισχυρό ρεύμα επιστροφής μάζας από τη ζώνη μετά τη θραύση στη ζώνη πριν τη θραύση. Ίδιας έντασης ρεύματα προκαλούν

κάθετη ροή προς την ακτογραμμή, ενώ ρεύματα άνισης έντασης στρέφουν το βελοειδές ρεύμα και μειώνεται η ταχύτητα του.



Εικόνα 1.5: Δημιουργία βελοειδές ρεύματος

Πηγή: Μουτζούρης, 2005

1.3. Στερεομεταφορά και έναρξη κίνησης ιζήματος

Ο θαλάσσιος πυθμένας καλύπτεται από στρώμα ιζημάτων, γεγονός που του προσδίδει τον ασταθή του χαρακτήρα. Τα θαλάσσια ιζήματα προέρχονται είτε από την ίδια τη θάλασσα είτε από την ακτή και ονομάζονται γαιογενή, όταν μεταφέρονται μετά από διάβρωση ακτής και πελαγογενή, όταν καθιζάνουν στο νερό μετά από θαλάσσια ιζηματογένεση.

Το μέγεθος των ιζημάτων είναι σημαντικός παράγοντας για την κατανόηση των παράκτιων διεργασιών. Η διάσταση των κόκκων κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά μέχρι δεκάδες εκατοστά. Η κλίμακα κατάταξης του μεγέθους των κόκκων οφείλεται στον C.K. Wentworth (1992), η οποία έχει όρια πολλαπλάσια των 2mm. Η κατάταξη των κόκκων απεικονίζεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 1.1: Κατάταξη ιζημάτων κατά Wentworth, Πηγή: «Εισαγωγή στην Ακτομηχανική», Μουτζούρης 2005

| Τύπος | Χαρακτηριστική διάμετρος κόκκων |
|-------------------------|---------------------------------|
| Μεγάλοι λίθοι (boulder) | >256mm |
| Μικροί λίθοι (cobble) | 64-256mm |
| Μεγάλα χαλίκια (pebble) | 4-64mm |
| Μικρά χαλίκια (granule) | 2-4mm |
| Άμμος (sand) | 1/16-2mm |
| Ιλύς (silt) | 1/256-1/16mm |
| Άργιλος (clay) | <1/256mm |

Ευρέως χρησιμοποιούμενη είναι η κλίμακα ϕ , την οποία εισήγαγε το 1936 ο Krumbein και ορίζεται ως ακολούθως:

$$\phi_x = -\log_2 d \quad (6)$$

όπου x είναι το εκατοστιαίο ποσοστό κόκκων που έχει διάμετρο μικρότερη ή ίση με d (mm). Πλεονέκτημα της κλίμακας είναι ότι τα όρια των κατηγοριών ιζημάτων εκφράζονται με ακέραιους αριθμούς και στα μειονεκτήματα συγκαταλέγεται το γεγονός ότι μειώνεται ενώ αυξάνεται η διάμετρος των κόκκων. Το μέσο μέγεθος του κόκκου είναι ίσο με:

$$\mu = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3} \quad (7)$$

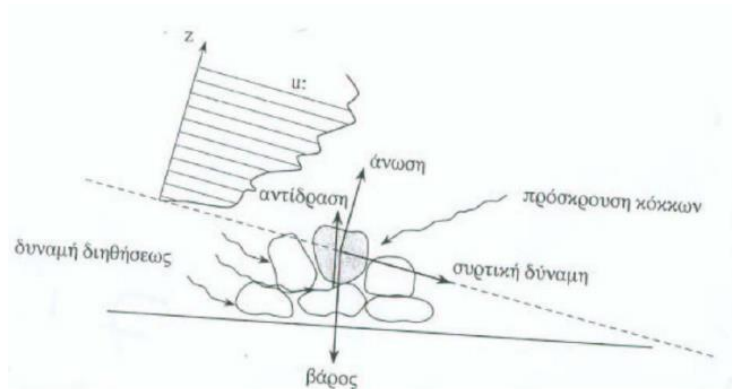
η τυπική απόκλιση ίση με:

$$\sigma = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6} \quad (8)$$

και η λοξότητα ίση με:

$$sk = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{95} - \phi_5)} \quad (9)$$

Η μεταφορά των κόκκων των ιζημάτων, προκαλείται από τους κυματισμούς και τα ρεύματα τα οποία παρατηρούνται κοντά στον πυθμένα. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι διάφορες συνιστώσες που δρουν πάνω σε ένα κόκκο: ορθές και διατμητικές τάσεις από το κινούμενο νερό, αντίδραση στήριξης σε άλλους κόκκους, υδροδυναμικές υποπιέσεις λόγω διήθησης και δυνάμεις προσκρούσεως άλλων κόκκων. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες, δύνανται να επιφέρουν επικόλληση των κόκκων.



Εικόνα 1.6: Συνιστώσες κόκκου ιζήματος της επιφάνειας του πυθμένα

Πηγή: Κουτίτας, 1998

Η κίνηση συνεχίζεται μέχρι την έκλειψη των αιτιών που την προκαλούν ή όταν υπάρχουν παράκτια εμπόδια. Στη ζώνη πριν τη θραύση ο κυρίαρχος μηχανισμός απώλειας ενέργειας είναι η τριβή στον πυθμένα, με αποτέλεσμα η κίνηση των ιζημάτων να γίνεται σαν φορτίο πυθμένα. Στη ζώνη θραύσης και μετά τη θραύση, σημαντικότεροι μηχανισμοί είναι η τριβή και η τύρβη, όπου η στερεομεταφορά γίνεται σαν φορτίο πυθμένα και σε αιώρηση (Κ.Ι. Μουτζούρης 2005).

Η έναρξη της κίνησης ενός κόκκου ιζήματος στον πυθμένα, εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη διατμητική ή επιφανειακή τάση στον κόκκο. Όταν η τιμή υπερβεί μια οριακή κρίσιμη τιμή, συγκεκριμένα την παράμετρο θ_c του Shields, τότε ξεκινάει η αποκόλληση. Η τιμή αυτή υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\theta_{cr} = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} \quad (10)$$

όπου D_{50} η μέση διάμετρος του κόκκου, τ_{cr} η κρίσιμη διατμητική τάση στον πυθμένα, ρ_s η πυκνότητα της άμμου και ρ η πυκνότητα του νερού.

Η μέγιστη διατμητική τάση τ_w στον πυθμένα από κύμα υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_w \rho u_{max}^2 \quad (11)$$

Η μέγιστη τιμή u_{max} της οριζόντιας τροχιακής ταχύτητας στον πυθμένα είναι ίση με:

$$u_{max} = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sin hkd} \quad (12)$$

όπου f_w ο συντελεστής τριβής κύματος του Jonsson, ο οποίος στις περισσότερες παράκτιες ζώνες είναι ίσος με 0.30, d είναι το βάθος του νερού, H το ύψος κύματος, T η περίοδος κύματος και $k = \frac{2\pi}{L}$ ο κυματαριθμός.

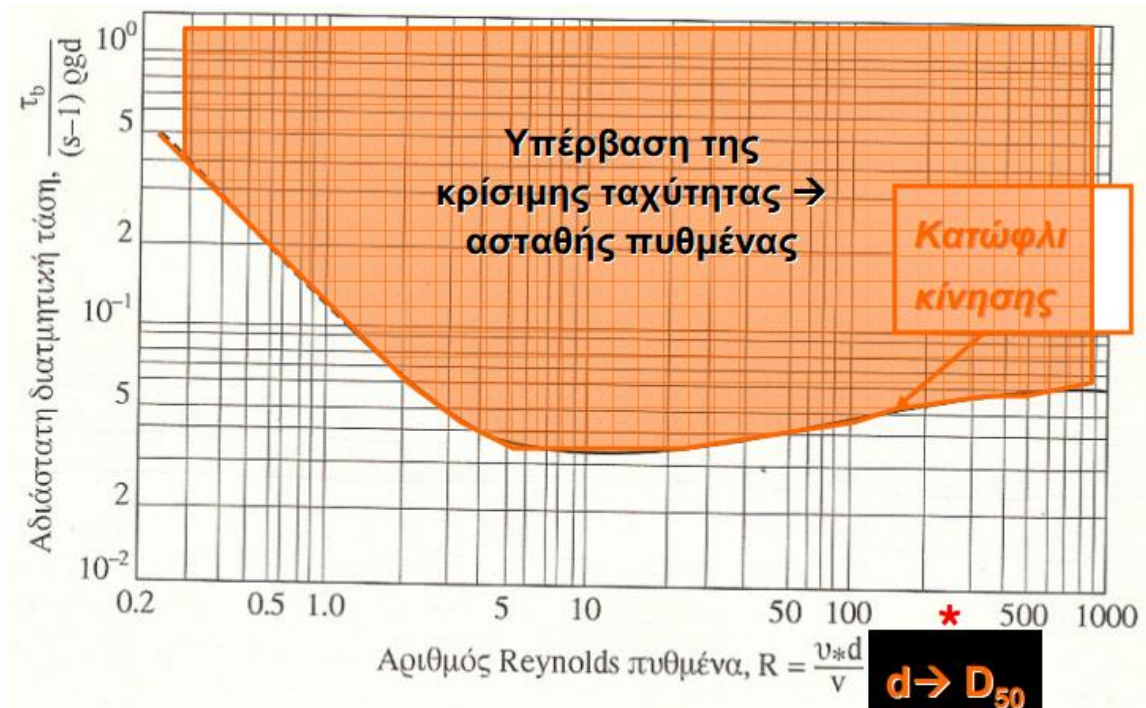
Η μέγιστη οριζόντια τροχιακή ταχύτητα συνδέεται με μια ταχύτητα τριβής, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$u_*^4 = \frac{8\nu u_{max}^2}{\pi T} \quad (13)$$

Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του Shields, γίνεται ο έλεγχος έναρξης κίνησης του ιζήματος, αφού πρώτα υπολογιστεί ο αριθμός Reynolds

$$Re_* = \frac{u_* D}{\nu} \quad (14)$$

όπου ν η κινηματική συνεκτικότητα ίση με $1,15 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$.



Διάγραμμα 1.1: Διάγραμμα Shields

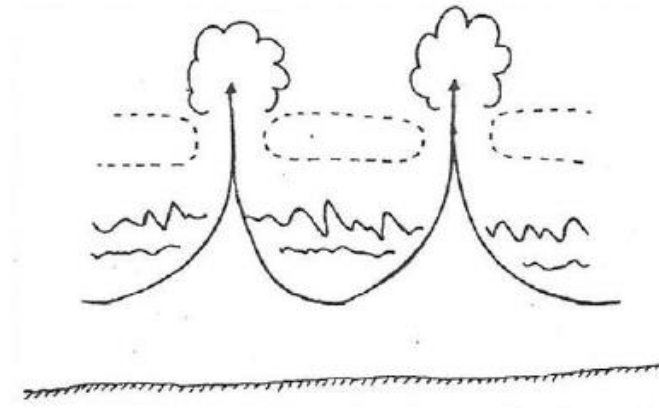
Πηγή: Θεοχάρης Κόφτης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας 2010

Η αδιάστατη διατμητική τάση είναι ίση με $\frac{u_*^2}{(s-1)gD_{50}}$. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται η τιμή της ταχύτητας στην οποία παρατηρείται έναρξη κίνησης του ιζήματος. Η παραπάνω μέθοδος εφαρμόστηκε για την περιοχή μελέτης και συμπεραίνεται ότι για όλες τις διευθύνσεις η έναρξη κίνησης ιζήματος πραγματοποιείται στα 3 μποφόρ.

Η μεταφορά ιζημάτων κάθετα στην ακτογραμμή οφείλεται κατά κύριο λόγο στην κυματική δράση. Η κάθετη συνιστώσα της τροχιακής κίνησης των υγρών σωματιδίων θέτουν το ίζημα σε κίνηση και μεταφέρεται από το κυματογενές ρεύμα. Στη ζώνη πριν τη θραύση η τροχιά είναι σχεδόν κλειστή και τείνει να γίνει πιο πεπλατυσμένη όταν έρχεται σε επαφή με το στρώμα των ιζημάτων. Στη ζώνη θραύσης και μετά τη θραύση, η στερεομεταφορά είναι θεαματική, καθώς τα ιζήματα τίθενται σε αιώρηση και μεταφέρονται στην ακτή σχηματίζοντας έξαλο αναβαθμό.

Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής οφείλεται στη θραύση των κυμάτων, η οποία θέτει τα ιζήματα σε αιώρηση. Μετατοπίζονται από τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής και από τη συνιστώσα κατά μήκος της ακτής της κίνησης των κυμάτων. Η στερεοπαροχή

εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων και μεγιστοποιείται υπό γωνία 45° , όταν δηλαδή μεγιστοποιείται και η ταχύτητα του ρεύματος. Ο υπολογισμός της είναι πολύ σημαντικός, καθώς είναι απαραίτητο μέγεθος για το σχεδιασμό των παράκτιων έργων.

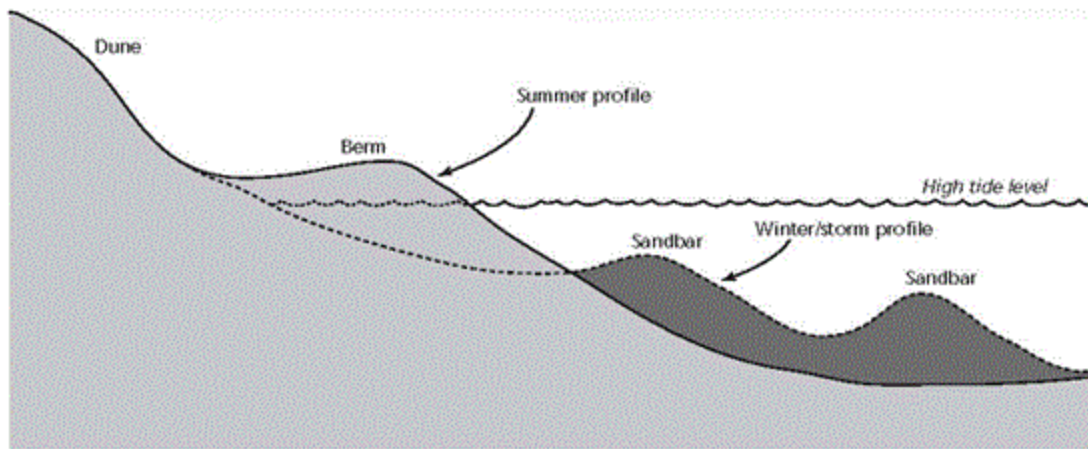


Εικόνα 1.7: Μεταφορά ιζήματος κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή

Πηγή: Μουτζούρης, 2005

1.4. Μορφολογία και διάβρωση ακτών

Η διατομή της ακτής και η κλίση της καθορίζονται από το κυματικό κλίμα και τα χαρακτηριστικά του ιζήματος. Το κυματικό κλίμα ορίζεται από την καμπυλότητα του κυματισμού και τον τύπο της θραύσης, ενώ το ίζημα από το μέγεθος. Κατά τη διάρκεια της χρονιάς, η ακτή δέχεται δύο τύπους κυμάτων. Κατά την καλοκαιρινή περίοδο, δέχεται κυματισμούς χαμηλής ενέργειας με θραύση στη βάση (surging) με αποτέλεσμα την απόθεση ιζήματος και την εμφάνιση έξαλου αναβαθμού. Κατά τη χειμερινή περίοδο, δέχεται κύματα μεγαλύτερης ενέργειας συνοδευόμενα με θραύση στο άνω μέρος του μετώπου (spilling), προκαλώντας διάβρωση του μετώπου και τη δημιουργία ύφαλου αναβαθμού (Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.8: Χειμερινή και θερινή διατομή παραλίας

Πηγή: www.whoi.edu

Η διάβρωση των ακτών είναι ένα σύνθετο φυσικό δυναμικό φαινόμενο. Τα αίτια και οι μηχανισμοί οι οποίοι προκαλούν το φαινόμενο της διάβρωσης είναι πολλά και διαφέρουν από ακτή σε ακτή. Γενικά, προκαλείται όταν η κίνηση των ιζημάτων στην παράκτια ζώνη δεν είναι σε ισορροπία και λόγω φυσικών και ανθρωπογενών παρεμβάσεων. Οι φυσικές διεργασίες οι οποίες προκαλούν διάβρωση είναι οι εξής:

- **Κύματα:** Αποτελούν τον κύριο λόγο διάβρωσης των ακτών. Όσο μεγαλύτερη είναι η κυματική ενέργεια, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός της διάβρωσης. Η κυματική ενέργεια εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου που φυσά στην επιφάνεια της θάλασσας, το μήκος του αναπτύγματος πελάγους (fetch = η απόσταση της θάλασσας πάνω από την οποία φυσά ο άνεμος) και από τη χρονική διάρκεια πνοής του ανέμου.
- Το ρυθμό της διάβρωσης επηρεάζει η γεωλογία της ακτής. Αν η ακτή αποτελείται από υλικά με μεγάλη αντοχή, ο ρυθμός της διάβρωσης είναι μικρότερος από το αν αποτελείται από πιο χαλαρά υλικά. Ακτές με χαλίκια επιτρέπουν μεγαλύτερη διείσδυση νερού, με αποτέλεσμα τη μείωση της ενέργειας λόγω της τριβής, ενώ αμμώδεις ακτές επιτρέπουν μικρότερη διείσδυση, άρα μικρότερη τριβή και μεγαλύτερο ρυθμό διάβρωσης.
- **Γεωμορφολογία.** Στα ακρωτήρια παρατηρείται διάθλαση των κυμάτων, προκαλώντας τη σύγκλιση τους και τη συσσώρευση ενέργειας. Σε αμμώδεις και

- πιο πλατιές ακτές, τα κύματα αποκλίνουν και χάνουν ενέργεια λόγω της τριβής με τον πυθμένα. Στην πρώτη περίπτωση, η διάβρωση είναι εντονότερη.
- Έντονες καταιγίδες, οι οποίες μεταφέρουν το ίζημα προς ή μακριά από την ακτή
 - Άνοδος της στάθμης της θάλασσας και έντονα καιρικά φαινόμενα λόγω της κλιματικής αλλαγής.

Οι ανθρωπογενείς διεργασίες είναι οι ακόλουθες:

- Κατασκευή φραγμάτων ή άλλων έργων, τα οποία επιφέρουν μείωση της στερεοπαροχής από τα ποτάμια.
- Κατασκευή παράκτιων έργων, τα οποία διαταράσσουν την ισόρροπη κατανομή των ιζημάτων.
- Η εκτεταμένη οικιστική και βιομηχανική ανάπτυξη στην παράκτια ζώνη.
- Απόληψη άμμου κυρίως από αμμοθίνες (Ozhan 1993; Loizidou & Iacovou, 1999).
- Παρεμβάσεις για τον έλεγχο της χερσαίας διάβρωσης, όπως η αναδάσωση ή φύτευση εκτάσεων πλησίον των ακτών (Eronat, 1999).

Η διάβρωση απειλεί όλο και περισσότερο τις ευρωπαϊκές ακτές. Στη μελέτη «Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability», την οποία κοινοποίησε η Ευρωπαϊκή ένωση, διαπιστώνεται ότι το 1/5 περίπου, των ακτών της Ε.Ε., έχει επηρεαστεί από τη διάβρωση, με την ακτογραμμή να υποχωρεί κατά 0,5 έως 2 μέτρα κάθε χρόνο και σε κάποιες περιπτώσεις μέχρι και 15 μέτρα. Η Κύπρος, η οποία ενδιαφέρει στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, βρίσκεται ανάμεσα στις πρώτες θέσεις των χωρών της Ε.Ε. οι ακτές της οποίας έχουν υποστεί διάβρωση, με ποσοστό 37,8%. Η κατασκευή τεχνικών έργων, όπως είναι τα φράγματα και οι εξωποτάμιες δεξαμενές για τη συλλογή του νερού πριν αυτό καταλήξει στη θάλασσα, οδήγησε στη μείωση της ελεύθερης επιφανειακής ροής. Λόγω της παγίδευσης του ποτάμιου υλικού στα φράγματα, η κατάσταση δυναμικής ισορροπίας μεταξύ της τροφοδοσίας των ακτών με το ποτάμιο ίζημα και της κυματικής δράσης ανατρέπεται, με αποτέλεσμα η κυματική δράση να μετατρέπεται σε κυρίαρχο μηχανισμός, προκαλώντας έτσι παράκτια διάβρωση.

2. ΕΡΓΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΗΣ

Η προσπάθεια ελέγχου της διάβρωσης των ακτών ξεκίνησε από τον 18^ο αιώνα, χωρίς όμως επιτυχία λόγω της δυσκολίας σχεδιασμού τέτοιων έργων. Οι παλαιότερες μέθοδοι προστασίας στόχευαν στη θωράκιση της ακτής με ογκόλιθους, προστατευτικούς τοίχους και άλλες μεθόδους. Πιο σύγχρονες μέθοδοι είναι η κατασκευή έργων παράλληλα και κάθετα στην ακτογραμμή. Έργα παράλληλα στην ακτογραμμή είναι οι ύφαλοι και έξαλοι κυματοθραύστες και η θωράκιση του μετώπου της ακτής, ενώ έργα κάθετα είναι οι πρόβολοι. Τα προαναφερθέντα έργα θεωρούνται σκληρά έργα προστασίας της ακτής, καθώς αποσκοπούν στην άμεση αντιμετώπιση του προβλήματος. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται υλικά όπως το σκυρόδεμα, διάφοροι τύποι ογκολίθων και πλακίδια.

Οι ήπιες μέθοδοι προστασίας της ακτής, σύμφωνα με την EUCC (European Union for Coastal Conservation), είναι η εγκατάσταση στοιχείων που στοχεύουν στη συνεργασία με τη φύση με τη διαχείριση φυσικών συστημάτων που μπορούν να προσαρμοστούν στην ενέργεια των κυμάτων, παλιρροιών και ανέμων. Αποσκοπούν στη μείωση των αρνητικών συνεπειών που επιφέρει η ανθρώπινη παρέμβαση και τέτοια έργα θεωρούνται η αναπλήρωση της ακτής, οι ύφαλοι κυματοθραύστες και οι πρόβολοι. Εφαρμόζονται σε συνδυασμό με τις σκληρές μεθόδους, απαιτούν σωστό σχεδιασμό, συχνή συντήρηση και αποτελούν μη μόνιμη λύση. Η επιλογή μεθόδου προστασίας εξαρτάται από το μηχανισμό της διάβρωσης, τον τύπο της ακτής και των ιζημάτων, τη χρήση της παράκτιας περιοχής, την οικονομικότητα κλπ.



(α)



(β)

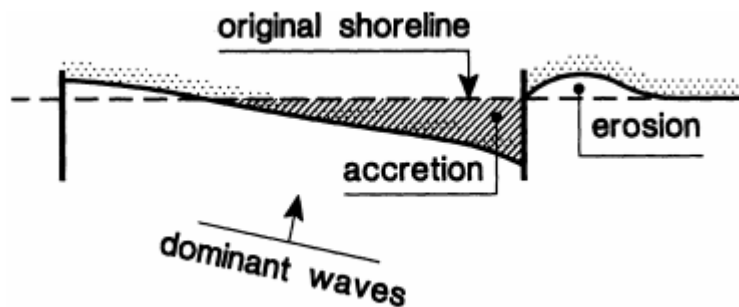


(γ)

Εικόνα 2.1: Κυματοθραύστες, θωράκιση ακτής, πρόβολοι

Πηγή: www.google.com

Η παρουσία παράκτιων έργων αναστατώνει το φυσικό περιβάλλον, καθώς μεταβάλλουν τα κυματολογικά δεδομένα αφού προκαλείται περίθλαση, ανάκλαση ή θραύση σε περιοχές που δεν παρατηρείτο πριν. Προσάμμωση παρατηρείται ανάντη του έργου, δηλαδή στην πλευρά της επικρατούσας προέλευσης της στερεομεταφοράς και σε μια στενή ζώνη αμέσως κατάντη και διάβρωση κατάντη του εμποδίου (Εικόνα 2.2). Η απόθεση ιζημάτων ανάντη του έργου οφείλεται στη μείωση της ταχύτητας ροής και κατά συνέπεια στη μείωση της στερεομεταφοράς. Η διάβρωση της ακτής κατάντη του έργου, οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν ιζήματα για να μετακινηθούν από το ρεύμα και στη μείωση της ταχύτητας ροής λόγω της ανάκλασης ενέργειας και της περίθλασης (πχ. κυματοθραύστης) και της ανυπαρξίας συνθηκών θραύσης (πχ. βυθοκορημένος διάυλος ναυσιπλοΐας).



Εικόνα 2.2: Κίνηση ιζήματος από την παρουσία ενός προβόλου

Πηγή: Leo C. van Rijn, 2013

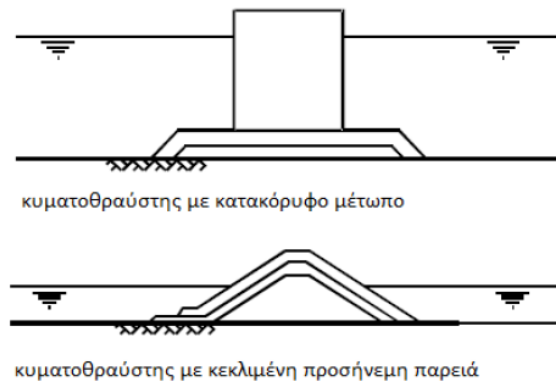
Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία ενδιαφέρουν οι κυματοθραύστες. Οι κυματοθραύστες, είναι έργα τα οποία κατασκευάζονται παράλληλα και σε απόσταση από την ακτή και η στέψη τους είναι πάνω ή κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Καταστρέφουν την κυματική ενέργεια στην υπήνεμη πλευρά τους, προστατεύοντας την ακτή από τη δράση των κυμάτων. Τα είδη των κυματοθραυστών είναι τα εξής:

1. Ύφαλοι ή έξαλοι
2. Μεμονωμένοι ή σε σύστημα
3. Συμπαγείς ή πλωτοί

Η στέψη των *ύφαλων* κυματοθραυστών βρίσκεται κάτω από τη Μέση Στάθμη Ηρεμίας (ΜΣΗ) και εξαρτάται από τον επιθυμητό βαθμό προστασίας. Επιτρέπουν την απρόσκοπτη κυκλοφορία του νερού, προσφέροντας ταυτόχρονα και μερική προστασία της ακτής από τους κυματισμούς. Σε περιοχές με έντονο υδροδυναμικό πεδίο, οι ύφαλοι κυματοθραύστες καθίστανται ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση της διάβρωσης. Μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε από το US Army Corps of Engineers (Dally and Pope 1986), έδειξε ότι μειώνουν αποτελεσματικά το ύψος των κυμάτων, ο βαθμός της οποίας εξαρτάται από το πλάτος της στέψης και το βάθος του νερού. Το βάθος του νερού είναι κρίσιμη παράμετρος, καθώς όταν είναι μεγάλο, περνά μεγάλη ποσότητα νερού από την κατασκευή, το οποίο οδηγεί στη δημιουργία ισχυρών ρευμάτων κατά μήκος της ακτής.

Πέρα από τη μείωση του ύψους κύματος, επηρεάζουν και τη μεταφορά ιζήματος καθώς εμποδίζουν την προκαλούμενη από τα ρεύματα στερεομεταφορά. Κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή με τεχνητούς ή φυσικούς ογκολίθους. Παρουσιάζουν αρκετά μειονεκτήματα, όπως το γεγονός ότι έχουν μεγάλο κόστος, η επιθεώρηση της κατασκευής είναι δύσκολη, αποτελούν κίνδυνο για τη ναυσιπλοΐα καθώς δεν είναι ιδιαίτερα ορατοί κ.ο.κ.

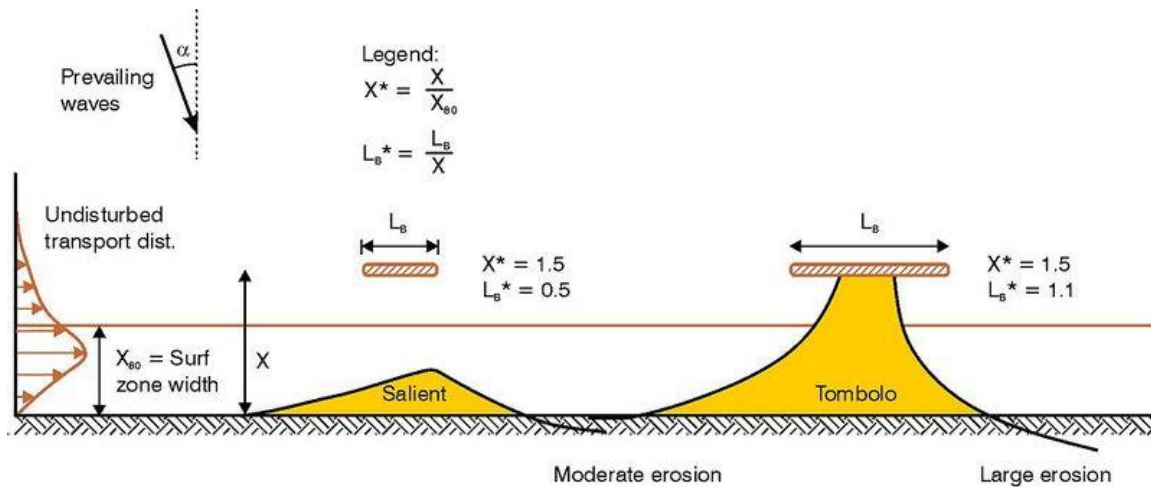
Η χρήση της στέψης, η ανώτατη στάθμη της πλημμυρίδας, το υψηλότερο κύμα σχεδιασμού και η μέγιστη ανύψωση των κυμάτων, αποτελούν παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν το ύψος της στέψης στους *έξαλους* κυματοθραύστες. Η κατασκευή καθίσταται ανυπερπήδητη όταν το ύψος της στέψης είναι ίσο με το ύψος του υψηλότερου κύματος σχεδιασμού πάνω από την ανώτατη στάθμη της πλημμυρίδας. Τα έργα αυτά είναι ογκώδη ώστε να αντέχουν στα ακραία καιρικά φαινόμενα, προκαλούν όμως έτσι μείωση στην κυκλοφορία νερού και υποβάθμιση της ποιότητας του. Λόγω του γεγονότος ότι τα εισερχόμενα κύματα χτυπούν τους κυματοθραύστες κατευθείαν, διαχέουν και εκτρέπουν την κυματική ενέργεια πριν αυτή φθάσει στην ακτή. Εξασφαλίζονται έτσι συνθήκες χαμηλότερης κυματικής ενέργειας ανάντη της κατασκευής, επιφέροντας απόθεση ιζήματος στην ακτή.



Εικόνα 2.3: Τυπική διατομή κυματοθραυστών

Πηγή: CIRIA;CUR: CETMEF, 2007

Ανάλογα με την απόσταση από την ακτή, το μήκος και την απόσταση μεταξύ των κυματοθραυστών, δημιουργείται salient ή tombolo (Εικόνα 2.4). Όταν το μήκος του κυματοθραύστη προς την απόσταση του από την ακτή, παίρνει τιμές από 1.5-2, τότε ενοείται η δημιουργία tombolo. Το tombolo δημιουργείται λόγω της αλλαγής της κατεύθυνσης και του ύψους των κυματισμών εξαιτίας της περίθλασης, με αποτέλεσμα ποσότητα ιζήματος να μεταφέρεται στη ζώνη θραύσης πίσω από έργο, προκαλώντας έτσι προσάμμωση και την ένωση του έργου με την ακτή. Όταν η τιμή αυτή είναι μικρότερη από 1, τότε ενοείται η δημιουργία salient. Η χαμηλή στέψη επιτρέπει τη διείσδυση κυματικής ενέργειας στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η δημιουργία tombolo. Αντίθετα, οι στέψεις μεγάλου πλάτους σε χαμηλούς κυματοθραύστες, αυξάνουν τη δυνατότητα θραύσης των κυμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση της κυματικής ενέργειας στην προσήνεμη πλευρά και τη δημιουργία tombolo.



Εικόνα 2.4: Σχηματισμός salient και tombolo

Πηγή: Magnor, 2013

Όσον αφορά στους μεμονωμένους κυματοθραύστες, όταν το μήκος τους δεν είναι πολύ μεγάλο, ευνοείται η δημιουργία tombolo. Η απόθεση ιζήματος ανάντη της κατασκευής, εξαρτάται από τη δύναμη των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής (USACE 1992). Σε μεγάλα μήκη, το ίζημα αυξάνεται και από τις δύο πλευρές και καθώς κατευθύνεται προς την ακτή λόγω της διάθλασης των κυμάτων, δημιουργείται λιμνοθάλασσα στο κέντρο. Στο πέρασμα του χρόνου, η υπερπήδηση της κατασκευής από τα κύματα, οδηγούν στη διαμόρφωση μιας παραλίας, η στάθμη της οποίας είναι πάνω από το κανονικό της επίπεδο.

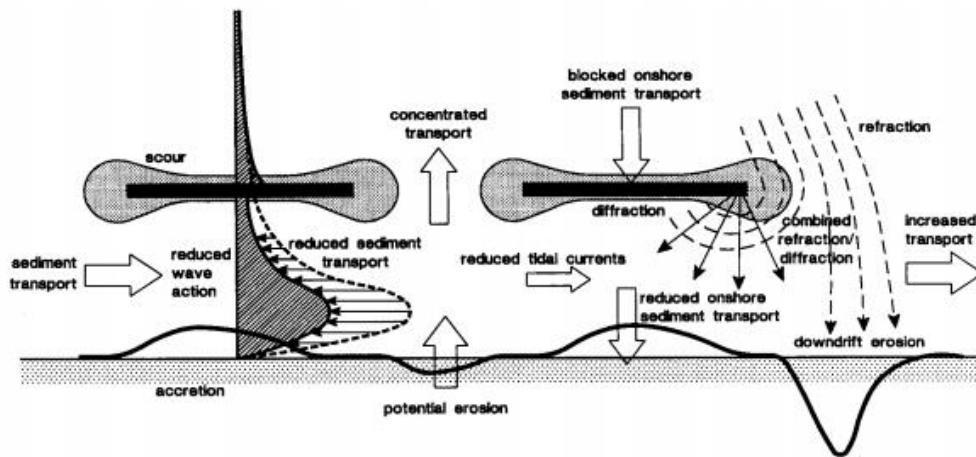
Σε σχέση με τους μεμονωμένους, η κατασκευή κυματοθραυστών οι οποίοι είναι σε σύστημα, είναι πιο διαδεδομένη. Κρίσιμη παράμετρος είναι η απόσταση μεταξύ των κυματοθραυστών, καθώς αυτή επιτρέπει τη διάθλαση των επερχόμενων κυματισμών. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση, τόσο περισσότερη κυματική ενέργεια διεισδύει πίσω από την κατασκευή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ρευμάτων κατά μήκος της ακτής και μεταφορά ιζήματος. Έρευνες καταδεικνύουν ότι η ιδανική τιμή του λόγου της απόστασης προς το μήκος των κυματοθραυστών είναι 0.25-0.66 (USACE 1992). Περίθλαση των κυμάτων παρατηρείται οποιαδήποτε τιμή και αν έχει η απόσταση αυτή, καθώς τα κύματα πάντα θα διαπερνούν την κατασκευή. Κατά την κατασκευή των κυματοθραυστών τρεις παράμετροι είναι σημαντικοί:

1. Η απόσταση μεταξύ των κυματοθραυστών προς την απόσταση από την ακτή, καθορίζουν το εύρος της διάβρωσης
2. Το μήκος των κυματοθραυστών προς την απόσταση από την ακτή, καθορίζουν τη δημιουργία salient
3. Η απόσταση μεταξύ των κυματοθραυστών προς το μήκος της κατασκευής, καθορίζουν το βαθμό της δραστηριότητας των κατά μήκος της ακτής ρευμάτων

Η κατασκευή *συμπαγών κυματοθραυστών* είναι η πιο διαδεδομένη μορφή κυματοθραυστών. Κατασκευάζονται στον πυθμένα της θάλασσας και φθάνουν μέχρι και την επιφάνεια, μειώνουν την κυματική ενέργεια και παγιδεύουν το ίζημα. Μπορούν να κατασκευαστούν μόνο σε σχετικά ρηχά νερά και το κόστος τους είναι μεγάλο. Σε βαθύτερα νερά, η κατασκευή τέτοιων κυματοθραυστών καθίσταται αποτρεπτική λόγω κόστους, με αποτέλεσμα να προτιμάται η κατασκευή *πλωτών κυματοθραυστών*. Δεν φθάνουν στον πυθμένα, σταθεροποιούνται σε αυτόν με αλυσίδες ή σχοινιά και το γεγονός ότι επιπλέουν τους επιτρέπει να προσαρμόζονται στο ανώτατο όριο της πλημμυρίδας. Εν αντιθέσει με τους συμπαγείς κυματοθραύστες, οι πλωτοί προτιμώνται σε ακτές με χαμηλή κυματική ενέργεια καθώς παρουσιάζουν μικρότερη αποτελεσματικότητα σε κύματα μεγαλύτερου ύψους.

Όσον αφορά στις υδροδυναμικές συνθήκες και τις διεργασίες που αφορούν τη στερεομεταφορά (Εικόνα 2.5), παρατηρείται μείωση της κυματικής ενέργειας στην ακτογραμμή, ενώ μέρος της κυματικής ενέργειας φθάνει στην υπήνεμη πλευρά λόγω της περίθλασης στα άκρα και στα κενά μεταξύ των κυματοθραυστών, της διάδοσης μέσω του κυματοθραύστη και της υπερπήδησης. Τα μεταδιδόμενα και περιθλώμενα κύματα κατευθύνονται προς την ακτή, αλλά η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά στην υπήνεμη πλευρά μειώνεται. Παράγονται ρεύματα κατά μήκος της ακτής αφού παρατηρείται σημαντική ροή νερού διαμέσου της κατασκευής. Η κινούμενη άμμος κατά μήκος της ακτής παγιδεύεται πίσω από την κατασκευή και αποτίθεται εντός της προστατευόμενης υπήνεμης πλευράς. Στην περίπτωση προσπίπτοντος κύματος, τα περιθλώμενα κύματα μεταφέρουν ίζημα από τις παρακείμενες παραλίες στην υπήνεμη πλευρά του έργου, έως ότου η ακτογραμμή να είναι τόσο ευθυγραμμισμένη ώστε η θραύση των κυμάτων να γίνεται παράλληλα με αυτήν και η κατά μήκος στερεομεταφορά

να μηδενιστεί σχηματίζοντας *toobolo* ή *salient*. Στην περίπτωση πλάγιου προσπίπτων κυματισμού δημιουργείται ένα σύστημα, κατά μήκος της ακτής, ρευμάτων και στερεομεταφοράς, το οποίο υφίσταται μέχρι τη εμφάνιση ενός *salient*. Η ακτογραμμή προσαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε τα μικρότερα κύματα πίσω από την κατασκευή να μεταφέρουν το ίδιο ποσό ιζήματος με τα μεγαλύτερα (Leo C. van Rijn, 2013).



Εικόνα 2.5: Υδροδυναμικές συνθήκες και διεργασίες στερεομεταφοράς κοντά σε αποσπασμένο κυματοθραύστη

Πηγή: <http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Coastalstructures2013.pdf>

Παρόλο που οι κυματοθραύστες κατασκευάζονται για την προστασία διαβρωμένων ακτών, παρουσιάζουν ορισμένες αβεβαιότητες οι οποίες προκαλούν προβλήματα τόσο στην κατασκευή όσο και στην ακτογραμμή. Έχει παρατηρηθεί πολλές φορές αστοχία των έργων, κυρίως σε περιόδους με έντονες καταιγίδες καθώς επίσης και λόγω κακού σχεδιασμού και κατασκευής. Οι υδροδυναμικές και μορφοδυναμικές διεργασίες γύρω από ένα βυθισμένο κυματοθραύστη δεν είναι πλήρως γνωστές και δεν υπάρχουν κατάλληλες μέθοδοι σχεδιασμού. Για όλες τις περιπτώσεις κυματοθραυστών, απαιτείται καλή γνώση των κυματικών και ανεμολογικών συνθηκών για την εκάστοτε περίπτωση και λεπτομερής και προσεχτικός σχεδιασμός.

3. ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

Το κεφάλαιο που ακολουθεί πραγματεύεται το θέμα των μαθηματικών μοντέλων, τα οποία χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της εξέλιξης της ακτογραμμής. Αρχικά, γίνεται μια συνοπτική σύγκριση των μαθηματικών και των φυσικών μοντέλων και μια μικρή ιστορική αναδρομή για την ανάπτυξη τους. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή δέκα μαθηματικών μοντέλων και στο τέλος επιλέγεται μέσα από ένα σύνολο κριτηρίων, η βέλτιστη επιλογή.

3.1. Εισαγωγή

Η κλιματική αλλαγή και οι παράκτιες κατασκευές, οδήγησαν σε μια σειρά προσπαθειών ώστε να μελετηθεί και να προβλεφθεί η εξέλιξη της ακτογραμμής. Για το σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν τα φυσικά και μαθηματικά μοντέλα. Τόσο τα φυσικά όσο και τα μαθηματικά μοντέλα, απαιτούν ειδικούς σε θέματα παράκτιας μηχανικής για την αξιολόγηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Η σωστή αναπαραγωγή της φυσικής συμπεριφοράς, δεν αντισταθμίζει τα προβλήματα κλίμακας και το μεγάλο κόστος που απαιτείται στα φυσικά μοντέλα. Εν αντιθέσει, τα μαθηματικά μοντέλα είναι ικανά να μελετούν τις αλλαγές στην ακτογραμμή, όταν η χωρική και χρονική κλίμακα είναι μεγάλη. Όπως αναφέρουν οι de Vriend και Komar (1998), τα μαθηματικά μοντέλα προτιμώνται όχι μόνο λόγω του ότι είναι ώριμα ως προς τη γνώση των παράκτιων διεργασιών, αλλά και λόγω των προηγμένων δυνατοτήτων των σημερινών υπολογιστών.

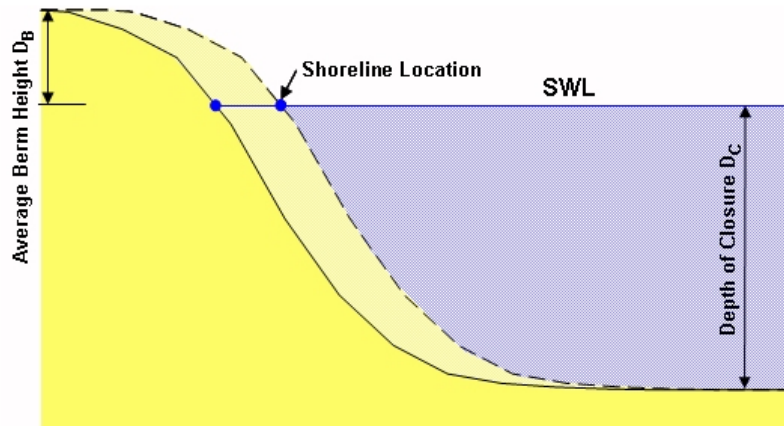
Τα φυσικά μοντέλα απαιτούν μεγάλα εργαστήρια τα οποία πρέπει να είναι καταλλήλως εξοπλισμένα, εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό και το κόστος που τα συνοδεύει είναι αρκετά μεγάλο, καθώς απαιτείται δαπάνη για την κατασκευή του μοντέλου, για την παροχή νερού και ενέργειας κοκ. Όσον αφορά στα μαθηματικά μοντέλα, απαιτείται δαπάνη για την αγορά ή την ανάπτυξη του λογισμικού, εξοπλισμός επεξεργασίας των δεδομένων και προσωπικό το οποίο να είναι εξοικειωμένο με προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών. Είναι προφανές ότι τα μαθηματικά μοντέλα είναι οικονομικά αποδοτικότερα σε σχέση με τα φυσικά μοντέλα. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν

μειονεκτήματα καθώς απαιτείται πλήρης γνώση του προβλήματος και σε ορισμένες περιπτώσεις δίνουν λανθασμένα αποτελέσματα.

Πιο συγκεκριμένα, στα μαθηματικά μοντέλα οι εξισώσεις που διέπουν τις διεργασίες, οι αριθμητικές μέθοδοι και οι συντελεστές βαθμονόμησης, πρέπει να είναι γνωστά στον μελετητή, ώστε τα αποτελέσματα να είναι έγκυρα. Όπως ο μελετητής ο οποίος χρησιμοποιεί ένα φυσικό μοντέλο, πρέπει να γνωρίζει για την κλίμακα και τις επιπτώσεις των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, έτσι και αυτός ο οποίος χρησιμοποιεί ένα μαθηματικό μοντέλο πρέπει να γνωρίζει τις επιπτώσεις των απλοποιήσεων που υπεισέρχονται στο μοντέλο καθώς επίσης και τυχόν παγίδες όπως είναι η αριθμητική διάχυση και διασπορά (William Kamphuis, 2010).

Η αρχή έγινε από τον Pelnard-Considere το 1956, ο οποίος έθεσε τις βάσεις που διέπουν ένα γραμμικό μαθηματικό μοντέλο και επαλήθευσε τη λύση της αλλαγής της ακτογραμμής που προκαλείται από ένα πρόβολο, με εργαστηριακές μεθόδους. Το μοντέλο ήταν πολύ απλό καθώς μπορούσε να προβλέψει τη μεταβολή της ακτογραμμής μόνο για μικρές γωνίες κυμάτων. Ο Pelnard-Considere ανέπτυξε μια μαθηματική θεωρία για την ανταπόκριση της ακτής απέναντι στην κυματική ενέργεια, με την προϋπόθεση ότι η διατομή της ακτής κινείται παράλληλα με τον εαυτό της.

Η έννοια της μιας γραμμής υποθέτει ότι, όταν παρατηρείται διάβρωση ή πρόσχωση, η τυπική διατομή μιας ακτής μετακινείται εγκάρσια πάνω από ένα φανταστικό οριζόντιο επίπεδο, το οποίο τοποθετείται στο ενεργό βάθος της διατομής (Εικόνα 3.1). Στηρίζεται στο γεγονός ότι η διατομή της ακτής διατηρεί μια μορφή, η οποία είναι χαρακτηριστική της συγκεκριμένης ακτής, εκτός από τις περιπτώσεις ακραίων γεγονότων (πχ. ακτές με ήπια κλίση παραμένουν ήπιες). Αν η διατομή παραμένει σταθερή, οποιοδήποτε σημείο της είναι ικανό να καθορίσει τη θέση ολόκληρης της διατομής με συνέπεια ως προς την αρχική. Έτσι, μια ισοϋψής καμπύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει τη μεταβολή στη μορφή και τον όγκο της ακτής, καθώς αυτή διαβρώνεται ή προσχώνεται.



Εικόνα 3.1: Μεταβολή ακτογραμμής

Πηγή: www.coastalwiki.org

Στη συνέχεια, αναπτύχθηκαν πολλά μοντέλα που αφορούσαν τη μεταβολή της ακτογραμμής και τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς (Hanson et al., 1997, Uda and Hashimoto, 1982), τις παράκτιες κατασκευές (Hanson and Kraus, 1985, Larson et al., 1997) και δραστηριότητες που αφορούν την αναπλήρωση της ακτογραμμής (Dean and Chul-Hee, 1992, Rogers and Work, 1996). Ο Bakker (1968) ανέπτυξε ένα δισδιάστατο μοντέλο και μελέτησε τη μεταβολή της ακτογραμμής λόγω της μεταφοράς ιζήματος κοντά σε ένα πρόβολο. Οι Perlin και Dean (1983) ανέπτυξαν περαιτέρω το μοντέλο του Bakker, σε ένα μοντέλο N-Line, το οποίο προσομοίωνε την ανταπόκριση της ακτογραμμής σε παράκτιες κατασκευές, χρησιμοποιώντας την εγκάρσια και την κατά μήκος στερεομεταφορά. Τα μοντέλα N-Line είναι βελτιωμένα όσον αφορά στην υπολογιστική αποδοτικότητα (Dabees, 2000; Hanson and Larson, 2000; Steetzel et al., 1998).

Οι Basco (1983), Horikawa (1988) και de Vriend et al. (1993 and 1993a) κάνουν μια ανασκόπηση για τα δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα. Στα τρισδιάστατα μοντέλα οι υδροδυναμικές εξισώσεις γράφονται στις τρεις διαστάσεις και μπορούν να απλοποιηθούν σε δισδιάστατα χρησιμοποιώντας καθετοποιημένες τιμές για τη ροή του ρευστού. Τα μοντέλα περιλαμβάνουν τα φαινόμενα της βαρύτητας, της τριβής του πυθμένα, των δυνάμεων Coriolis, της παλίρροιας κ.ο.κ. Τα 3-D μοντέλα απλοποιούνται επίσης όταν

αγνοούνται οι κατά μήκος της ακτής μεταβολές της στάθμης του νερού, οι ταχύτητες του ρευστού και οι παροχευτικότητές τους. Παραδείγματα τέτοιων μοντέλων δίνουν οι Stive and Battjes (1984), Stive (1986), Steetzel (1987, 1990), Watanabe et al. (1980), Watanabe and Dibajnia (1988), Roelvink (1991), Sato and Mitsunobu (1991) και Broker et al. (1991).

Για βραχυπρόθεσμες κλίμακες, γίνεται υπόθεση ότι οι αλλαγές στη διατομή της ακτής στην εγκάρσια διεύθυνση, είναι αποτέλεσμα της στερεομεταφοράς που παράγεται από τις καταιγίδες και τη θραύση των κυμάτων ((UNIBEST-TC (Delft, 1993), LITPROF (DHI, 2000)). Για μακροπρόθεσμες κλίμακες, η μεταβολή στην ακτογραμμή στην κατά μήκος της ακτής διεύθυνση, προβλέπεται χρησιμοποιώντας μεταβολές στην κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά και παραλείποντας στοιχεία εγκάρσια της ακτής (GENESIS (Hanson and Kraus, 1991a), UNIBEST-CL (Delft, 1993), LITLINE (DHI, 2000)). Τα μοντέλα αυτά έχουν εφαρμοστεί σε πληθώρα έργων, με αποτέλεσμα η χρησιμότητά τους ως εργαλείο σχεδιασμού να επαληθεύεται. Στη συνέχεια ακολουθεί περιγραφή των προαναφερθέντων μοντέλων καθώς επίσης και ορισμένων άλλων για τα οποία δεν έχει γίνει αναφορά αλλά εξυπηρετούν τους σκοπούς της παρούσας εργασίας.

3.2. CEDAS

Το Coastal Engineering Design and Analysis System (CEDAS) έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία Veri-Tech (ΗΠΑ) και περιλαμβάνει τα εξής τμήματα: ACES, EST, Reliable, NMLong-CW, DYNLET, SBEACH, BMAP, RMAP, NEMOS, GENESIS, and RCPWAVE. Στην παρούσα εργασία ενδιαφέρει το NEMOS (Nearshore Evolution Modeling System). Το NEMOS είναι ένα σύνολο από μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της μακροπρόθεσμης εξέλιξης της ακτογραμμής λαμβάνοντας υπόψη τους κυματισμούς, τα παράκτια έργα, την αναπλήρωση της ακτής και άλλες δραστηριότητες που αφορούν στην ακτομηχανική. Περιλαμβάνει το RCPWAVE, STWAVE και το GENESIS (GENeralized model for SIMulating Shoreline change).

Το GENESIS είναι αριθμητικό μοντέλο που υπολογίζει την αλλαγή στην ακτογραμμή, η οποία προκαλείται κύρια από την κυματική δράση. Το μοντέλο στηρίζεται στο γεγονός ότι η ακτή παραμένει αμετάβλητη, με αποτέλεσμα οποιαδήποτε μεταβολή στην ακτογραμμή να περιγράφεται μοναδικά με ένα σημείο. Εφαρμόζεται για ποικιλία συνθηκών οι οποίες περιλαμβάνουν αυθαίρετους αριθμούς, τοποθεσίες και συνδυασμούς προβόλων, προβλητών, αποσπασμένων κυματοθραυστών, θαλάσσιων τοίχων και αναπλήρωσης ακτής. Το μοντέλο περιλαμβάνει τα φαινόμενα της ρήχωσης, διάθλασης και περίθλασης των κυματισμών.

Το μοντέλο προσομοιώνει τη μεταβολή της ακτογραμμής, η οποία προκαλείται από τις χωρικές και χρονικές διαφοροποιήσεις της κατά μήκος στερεομεταφοράς. Η μεταβολή της ακτογραμμής που προκαλείται από την κάθετη στην ακτογραμμή στερεομεταφορά και συνδέεται με φαινόμενα καταϊγίδας, δεν μπορεί να προσομοιωθεί από το GENESIS. Το μοντέλο προσομοιώνει καλύτερα την ανταπόκριση της ακτογραμμής όταν υπάρχουν σε αυτή παράκτιες κατασκευές, όπως είναι οι πρόβολοι και οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες. Χρησιμοποιείται για μήκη ακτογραμμής από 1 μέχρι 100 χιλιόμετρα και για χρονική περίοδο από 1 μέχρι 100 μήνες. Αποτελεί γενικευμένο μοντέλο το οποίο εφαρμόζεται για οποιοδήποτε τμήμα της ακτής. Η χρονική περίοδος που μπορεί να μοντελοποιηθεί, εξαρτάται από τις κυματικές συνθήκες και τη στερεομεταφορά, την ακρίβεια των οριακών συνθηκών, τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε μελέτης και από το πόσο κοντά ή μακριά είναι η ακτή από τη θέση ισορροπίας.

Οι βασικές παραδοχές του μοντέλου είναι:

- α. Η ακτογραμμή παραμένει σταθερή.
- β. Τα όρια προς την πλευρά της ακτής και προς την πλευρά της θάλασσας είναι σταθερά.
- γ. Τα ιζήματα μεταφέρονται κατά μήκος της ακτής λόγω της θραύσης των κυματισμών.
- δ. Η λεπτομερής κατανόηση της θαλάσσιας κυκλοφορίας κοντά στην ακτή, αγνοείται.
- ε. Υπάρχει μια μακροπρόθεσμη τάση στην εξέλιξη της ακτογραμμής.

Οι παραπάνω παραδοχές υποδηλώνουν ένα ευέλικτο μοντέλο, το οποίο βρίσκεται εφαρμογή σε διάφορες περιπτώσεις ακτομηχανικής, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι αυτές δεν έχουν περιορισμούς.

Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες στα άκρα του πλέγματος του μοντέλου, αποτελούν τις κυριότερες αιτίες που προκαλούν τη μεταβολή στην ακτογραμμή στο GENESIS. Πηγές ιζημάτων όπως είναι η αναπλήρωση της ακτής καθώς επίσης και καθιζήσεις ιζημάτων όπως είναι οι εκβολές, μπορούν να αποδοθούν με φυσιολογικό τρόπο. Από αυτή την άποψη, το μοντέλο παρέχει αυτοματοποιημένα μέσα, επιτυγχάνοντας έτσι μια ανάλυση του ισοζυγίου των ιζημάτων εξαρτώμενη από το χρόνο.

Το μοντέλο συστάθηκε το 1987 από τον Hanson σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Lund στη Σουηδία, το CERC (Coastal Engineering Research Center) και το US Army Engineer Waterways Experiment Station. Το GENESIS απαιτεί από το χρήστη την εισαγωγή πολλών δεδομένων. Τα βασικά δεδομένα τα οποία απαιτούνται είναι τα εξής:

- Η θέση της ακτογραμμής
- Τα χαρακτηριστικά των κυματισμών (ύψος, περίοδος, διεύθυνση)
- Τα στοιχεία των ακτομηχανικών έργων
- Η διατομή του μετώπου της ακτής
- Οι οριακές συνθήκες και μια εκτίμηση της διαπερατότητας των κατασκευών

Το ύψος, η περίοδος και η διεύθυνση των κυματισμών, πρέπει να εισάγονται στο μοντέλο σε ένα χρονικό διάστημα το οποίο καθορίζεται από το χρήστη. Η περίοδος του κύματος είναι σταθερή για μονοχρωματικά κύματα. Όσον αφορά στα έργα ακτομηχανικής, πρέπει να περιλαμβάνονται στοιχεία για τη θέση και το χρόνο κατασκευής τους καθώς επίσης και παράγοντες διαπερατότητας για έργα όπως είναι οι πρόβολοι και οι κυματοθραύστες.

Το μοντέλο GENESIS υπολογίζει τη μεταβολή της ακτογραμμής, ως αποτέλεσμα των αυξομειώσεων του ρυθμού της κατά μήκος στερεομεταφοράς. Γίνεται υπόθεση ότι οι μεταβλητές οι οποίες προκαλούν την μετακίνηση ιζημάτων είναι το ύψος κύματος στη

θραύση (H_b) και η γωνία του θραυόμενου κυματισμού με την ακτογραμμή (θ_{bs}). Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατά μήκος στερεομεταφοράς είναι:

$$Q = (H^2 C_g) b \left[a_1 \sin 2\theta_{bs} - a_2 \sin \theta_{bs} \frac{\partial H}{\partial x} \right] b \quad (1)$$

όπου C_g η ταχύτητα των κυματισμών, b είναι μεταβλητή η οποία υποδηλώνει συνθήκες θραυόμενου κυματισμού, a_1 και a_2 είναι αδιάστατοι παράμετροι που υπολογίζονται ως εξής:

$$a_1 = \frac{K_1}{16 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) (1.416)^{\frac{5}{2}}} \quad (2)$$

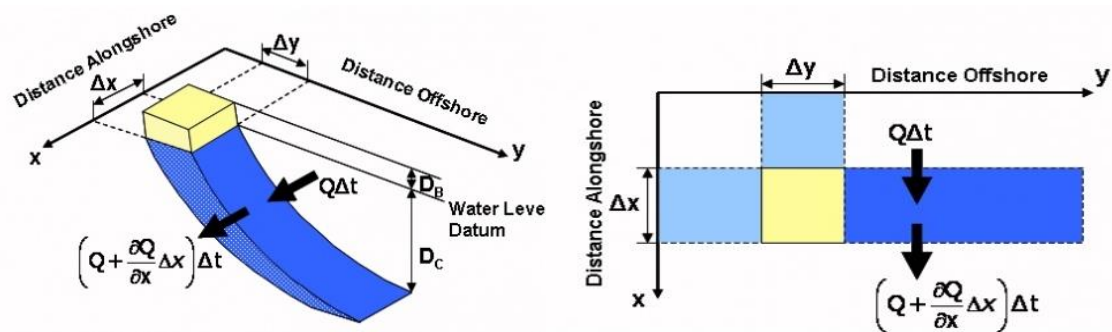
$$a_2 = \frac{K_2}{8 \left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right) (1-p) \tan \beta (1.416)^{\frac{7}{2}}} \quad (3)$$

όπου K_1 και K_2 εμπειρικοί συντελεστές, ρ_s η πυκνότητα των ιζημάτων η οποία λαμβάνεται ίση με $2.65 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$, ρ η πυκνότητα του νερού η οποία είναι ίση με $1.03 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ για θαλασσινό νερό, p το πορώδες του ιζήματος στον πυθμένα και $\tan \beta$ η μέση κλίση πυθμένα κοντά στην ακτή.

Η εξίσωση υπολογισμού της μεταβολής της ακτογραμμής βασίζεται στην έννοια της διατήρησης του όγκου του ιζήματος. Γίνεται υπόθεση ότι η ακτογραμμή μετακινείται είτε προς τη θάλασσα είτε προς τη ξηρά, χωρίς να αλλάζει η διατομή της, ανταποκρινόμενη σε ένα μέγεθος ιζήματος, το οποίο εισχωρεί ή εκχωρεί από ένα τμήμα του δικτύου. Η εξίσωση η οποία δίνει το ρυθμό μεταβολής της ακτογραμμής είναι η εξής:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{(D_B + D_C)} \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right] = 0 \quad (4)$$

όπου D_B το ύψος του αναβαθμού, D_C το ενεργό βάθος² ∂_y η αλλαγή θέσης της ακτογραμμής, q η στερεομεταφορά, ∂Q ο ρυθμός της κατά μήκος στερεομεταφοράς και Δx το μήκος του τμήματος της ακτογραμμής (Εικόνα 3.2). Η αλλαγή στον όγκο σε ένα τμήμα είναι $\Delta V = \Delta x \Delta y (D_B + D_C)$ και καθορίζεται από το ρυθμό με τον οποίο εισέρχεται ή εξέρχεται το ίζημα από τις δύο πλευρές. Η αλλαγή στον όγκο υποδεικνύει αν υπάρχει διαφορά στο ρυθμό της κατά μήκος στερεομεταφοράς q στα πλευρικά τμήματα των κελιών. Η αλλαγή αυτή είναι ίση με $\Delta V = \Delta Q \Delta t$.



Εικόνα 3.2: Σχηματική παρουσίαση υπολογισμού μεταβολής ακτογραμμής

Πηγή: http://www.vliz.be/wiki/Long-term_modelling_using_1-line_models_-_GENESIS_and_new_extensions

Στα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συνδυασμό ακτομηχανικών έργων, λαμβάνει υπόψη την περιθλαση των αποσπασμένων κυματοθραυστών και των προβόλων, καλύπτει ευρύ φάσμα χωρικής έκτασης, χρησιμοποιεί πολλαπλές ακολουθίες κυμάτων, περιλαμβάνει τη διάδοση κυματισμών στους αποσπασμένους κυματοθραύστες καθώς επίσης και κυματισμών αυθαίρετου ύψους, περιόδου και διεύθυνσης.

Στα μειονεκτήματα του μοντέλου συγκαταλέγεται το γεγονός ότι δεν λαμβάνει υπόψη την ανάκλαση των κυματισμών από τις κατασκευές και τυχόν φαινόμενα παλίρροιας της περιοχής, δεν μπορεί να προβλέψει τη δημιουργία τόμπολο καθώς επίσης και το γεγονός ότι παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς όσον αφορά στη θέση, το σχήμα και τον

² Το D_c προσδιορίζει το βάθος από το οποίο γίνεται παράλληλη μετατόπιση του πυθμένα

προσανατολισμό των κατασκευών. Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί για σύνθετα προβλήματα ακτομηχανικής, γεγονός το οποίο δεν αποτελεί πλεονέκτημα, καθώς επιτρέπει σε άτομα με μειωμένη εμπειρία να παράγουν αποτελέσματα για τα οποία δεν έχουν την τεχνογνωσία να αξιολογήσουν.

Όπως έχει αναφερθεί, η διατομή της ακτής θεωρείται σταθερή στο μοντέλο, με αποτέλεσμα το GENESIS να ποσοτικοποιεί τις αλλαγές στην κάτοψη της ακτογραμμής και να μην ποσοτικοποιεί τις αλλαγές στην υπεράκτια διατομή, καθώς θεωρεί ότι δεν υπάρχουν (Robert S. Young, Orrin H. Pilkey, David M. Bush and E. Robert Thieler, Durham USA, 1995).

Οι Hanson and Kraus το 1989, συνέταξαν μια λίστα με τους περιορισμούς του μοντέλου. Οι αρχικές τους παρατηρήσεις αφορούσαν στην ανεπάρκεια των δεδομένων. Το ενεργό βάθος δεν μπορεί να εντοπιστεί με ακρίβεια καθώς μικρές αλλαγές στη βαθυμετρία σε βαθύτερα νερά είναι δύσκολο να μετρηθούν. Απαιτούνται δεδομένα για ορισμένες περιπτώσεις, όπως οι συντελεστές διαπερατότητας για τους προβόλους και οι συντελεστές μετάδοσης για τους αποσπασμένους κυματοθραύστες. Επιπλέον, ενώ το σύνολο των δεδομένων εκτελεί με αρκετά πλήρη τρόπο αυστηρή βαθμονόμηση, η διαδικασία επαλήθευσης συνήθως απουσιάζει.

Στη λίστα των περιορισμών του μοντέλου, περιλαμβάνονται περιορισμοί οι οποίοι αφορούν στην εφαρμογή του. Η προγνωστική αξιοπιστία του GENESIS εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου. Επιπρόσθετα, το μοντέλο δεν είναι ικανό να υπολογίζει τη μεταβολή της παραλίας μέσα σε εκβολές ή σε περιοχές όπου παρατηρείται το φαινόμενο της παλίρροιας. Το GENESIS δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως προγνωστικό εργαλείο, καθώς περιέχει λανθασμένες υποθέσεις και ατέλειες στη δομή του, τα οποία συνεισφέρουν στην αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

Σύμφωνα με τη μελέτη η οποία έγινε από τους Robert S. Young, Orrin H. Pilkey, David M. Bush και E. Robert Thieler το 1995 στις ΗΠΑ, οι παράγοντες που συμβάλλουν στις φυσικές ανακρίβειες του μοντέλου είναι:

- Δεδομένα κυματισμών: Όλα τα δεδομένα που αφορούν τους κυματισμούς και εισάγονται στο μοντέλο είναι μέσες τιμές.

- Η διατομή ισορροπίας, το ύψος του αναβαθμού και το ενεργό βάθος, παραμένουν σταθερά σε όλη τη διάρκεια του μοντέλου. Έτσι, πρέπει να επιλέγεται μια μέση τιμή για το κάθε ένα.
- Άγνοια για τις αρχικές συνθήκες: Είναι αδύνατο να μετρηθούν με ακρίβεια οι αρχικές συνθήκες για οποιοδήποτε μοντέλο. Το GENESIS απαιτεί τις εξής αρχικές συνθήκες:
 - α. Θέση της ακτογραμμής: την αρχική αλλά και κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης και επαλήθευσης
 - β. Βαθυμετρία
 - γ. Το ύψος του αναβαθμού
 - δ. Το ενεργό βάθος
 - ε. Τοποθεσία και όγκος αναπλήρωσης ακτής
 - στ. Στερεομεταφορά
- Το μοντέλο περιέχει ατέλειες:
 - α. Στις εξισώσεις της κατά μήκος στερεομεταφοράς: Οι εξισώσεις υποθέτουν αμμώδη και ομοιόμορφη, ως προς την κλίση, παράκτια ζώνη.
 - β. Στην εξίσωση μεταβολής της ακτογραμμής: Είναι υπεραπλουστευμένη καθώς υποθέτει ότι η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά απλώνεται σε ένα λεπτό στρώμα σε όλη την παράκτια περιοχή. Το γεγονός αυτό δεν είναι φυσικά αποδεκτό.
- Ακραία γεγονότα: Δεν λαμβάνει υπόψη τη μεταβολή στην ακτογραμμή, η οποία συνδέεται με μεγάλες καταγίδες ή τη μόνιμη μεταφορά ιζήματος.
- Δεν μπορεί να λάβει υπόψη του όλες τις διαδικασίες μεταφοράς και απόθεσης ιζημάτων.

3.3. UNIBEST

Το UNIBEST (UNiform BEach Sediment Transport) είναι μέρος του UNIBEST Coastal Software Package το οποίο συστάθηκε από το Πανεπιστήμιο του Delft της Ολλανδίας το 1994, και χρησιμοποιείται για τη μελέτη των ιστορικών αλλαγών στην ακτογραμμή, για την πραγματοποίηση μελλοντικών προβλέψεων και για να δίνει πληροφορίες για την κατεύθυνση της στερεομεταφοράς. Είναι σχεδιασμένο να υπολογίζει την κάθετη στην

ακτογραμμική στερεομεταφορά και τις επακόλουθες αλλαγές στη διατομή της ακτής υπό τη συνδυασμένη δράση των κυμάτων, των κατά μήκος της ακτής παλιρροϊκών ρευμάτων και του ανέμου. Είναι γραμμικό μοντέλο, με αποτέλεσμα οι διατομές να παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- α. UNIBEST-CL₊ (Coastline Development): Μοντελοποιεί την κατά μήκος στερεομεταφορά και τη μορφοδυναμική των ακτογραμμών.
- β. UNIBEST-DE (Dune Erosion Events): Υπολογίζει την εγκάρσια εξέλιξη της ακτογραμμής κατά τη διάρκεια φαινομένων καταιγίδας.
- γ. UNIBEST-TC (Cross-shore profile development): Υπολογίζει την εγκάρσια στερεομεταφορά και τα αποτελέσματα αυτής πάνω στην ακτογραμμή.

Πιο αναλυτικά:

3.3.1. UNIBEST-CL₊

Αποτελεί ισχυρό εργαλείο, σύμφωνα με το οποίο η μορφοδυναμική αλλαγή των ακτογραμμών υπολογίζεται με βάση την υπολογισμένη κατά μήκος στερεομεταφορά σε συγκεκριμένες θέσεις στην ακτή. Αποτελείται από δύο μέρη, το UNIBEST-LT και το UNIBEST-CL. Το πρώτο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κατανομής της εγκάρσιας στερεομεταφοράς, με δεδομένο το κυματικό κλίμα και κάποιων πρόσθετων παραμέτρων, λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα της περίθλασης, της ρήχωσης και της διασποράς. Το δεύτερο χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα του πρώτου τμήματος του μοντέλου για να υπολογίσει τις μεταβολές της ακτογραμμής με βάση τη γραμμική θεωρία. Ενσωματώνονται έργα προστασίας των ακτών, όπως είναι οι πρόβολοι και οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες, χρησιμοποιείται για διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες και είναι σχεδιασμένο για αμμόδεις ακτές μειωμένης καμπυλότητας.

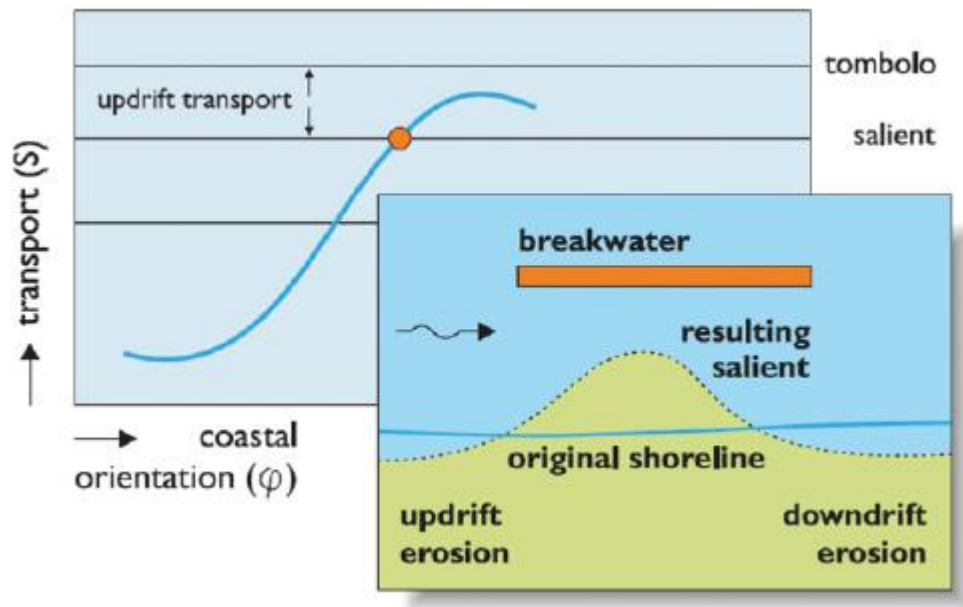
Το μοντέλο χρησιμοποιείται για μεγάλο εύρος έργων τα οποία σχετίζονται με την ακτομηχανική και υπολογίζει την εξέλιξη της ακτογραμμής για μικρά χρονικά διαστήματα αλλά και για δεκαετίες. Επιπλέον, είναι εφικτή η αποτίμηση της εξέλιξης της ακτογραμμής γύρω από έργα προστασίας όπως είναι οι πρόβολοι, οι θωρακίσεις και οι

αποσπασμένοι κυματοθραύστες. Ο χρόνος υπολογισμού του μοντέλου είναι 5 χρόνια και το χρονικό βήμα είναι 1/100 χρόνια.

Η ακτογραμμή ορίζεται σε σχέση με μια γραμμή αναφοράς, η οποία καθορίζεται από το χρήστη και μπορεί να είναι καμπύλης μορφής. Το γεγονός αυτό καθιστά εφικτή τη μοντελοποίηση πολύπλοκων παράκτιων περιοχών, όπως είναι τα δέλτα, οι μικροί κόλποι, οι παραλίες κυκλικής μορφής ακόμα και ολόκληρων νησιών (www.deltaressystems.com). Υπολογίζονται τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής και η στερεομεταφορά, τα οποία προκαλούνται από τους κυματισμούς και περιλαμβάνει το φαινόμενο της παλίρροιας.

Ο υπολογισμός της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής και η κατανομή της στην ακτογραμμή γίνεται με πολλές μεθόδους. Μέθοδοι οι οποίες συνδέουν τη στερεομεταφορά με την ενέργεια του κύματος όπως είναι αυτές του Cerc και Kamphuis (1991) καθώς επίσης και μέθοδοι βασισμένες στην επεξεργασία όπως αυτές του Bijker, Soulsby/Van Rijn, van Rijn 1992, Van Rijn 1993 and Van Rijn 2004, χρησιμοποιούνται από το μοντέλο. Η στερεομεταφορά υπολογίζεται στη βάση εκατοντάδων συνδυασμών κυματισμών και συνθηκών παλίρροιας.

Σημαντική πτυχή του μοντέλου είναι η σχέση μεταξύ του προσανατολισμού της ακτής και της κατά μήκος στερεομεταφοράς. Η σχέση αυτή παρουσιάζεται σε μια καμπύλη που ονομάζεται S-φ (Εικόνα 3.3). Η καμπύλη αντιπροσωπεύει τις βασικές αρχές του μοντέλου καθώς παρέχει πληροφορίες για την κλίση της στερεομεταφοράς, η οποία προκαλείται από την καμπυλότητα της ακτής και από την εξαρτώμενη στο χρόνο ανταπόκριση της κατά μήκος στερεομεταφοράς στις αλλαγές του προσανατολισμού της ακτής με το χρόνο.



Εικόνα 3.3: S-φ καμπύλη, σχηματισμός τόμπολο ή salient

Πηγή: UNIBEST – CL+, Deltares systems

Η μετακίνηση της ακτογραμμής υπολογίζεται με βάση την εξίσωση συνέχειας των ιζημάτων, την υπολογισμένη από την καμπύλη S-φ στερεομεταφορά και από το ενεργό ύψος της διατομής. Απαιτούνται αρχικές και οριακές συνθήκες ανάλογα με την υπό εξέταση περίπτωση. Τα δεδομένα εισόδου είναι τα εξής:

- Κυματικό κλίμα (ύψος, περίοδος και κατεύθυνση κυματισμών, ποσοστά εμφάνισης σε κάθε περίπτωση)
- Καθεστώς παλίρροιας (ταχύτητες ρευμάτων, στάθμη νερού και ποσοστά εμφάνισης ανά περίπτωση)
- Παράκτια διατομή, ενεργός ζώνη και ενεργό ύψος διατομής
- Χαρακτηριστικά ιζημάτων
- Παράμετροι σχετιζόμενοι με την εκάστοτε μέθοδο υπολογισμού της στερεομεταφοράς
- Παράμετροι διάδοσης κυματισμών
- Θέση και μορφή ακτογραμμής
- Οριακές συνθήκες

- Στοιχεία για τα παράκτια έργα

Τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου είναι:

- Χαρακτηριστικά κυματισμών.
- Εγκάρσια κατανομή των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής.
- Εγκάρσια κατανομή της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής.
- Σχέση μεταξύ της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς και του προσανατολισμού της ακτής.
- Ο ρυθμός μεταβολής της κατά μήκος στερεομεταφοράς.
- Θέση της ακτογραμμής, μετακίνηση και προσανατολισμός μεταξύ των σημείων του πλέγματος.
- Ρυθμός μετακίνησης της ακτογραμμής μεταξύ των σημείων του πλέγματος.

3.3.2. UNIBEST-DE

Υπολογίζει την εγκάρσια εξέλιξη της ακτογραμμής κατά τη διάρκεια φαινομένων καταϊγίδας σε αμμώδεις ακτές και συνοδεύεται από αύξηση της στάθμης των υδάτων. Ευνοείται έτσι η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ιζήματος λόγω της μεγάλης διαταραχής που προκαλείται από την έντονη θραύση των κυματισμών. Το μοντέλο υπολογίζει τη διάδοση των κυματισμών, τη ροή που προκαλείται από τους κυματισμούς και το ρεύμα πυθμένα, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων του ιζήματος.

Ο ρυθμός της εγκάρσιας μεταφοράς προέρχεται από την, ολοκληρωμένη ως προς το βάθος, ταχύτητα και το προφίλ των συγκεντρώσεων των ιζημάτων (Steetzel, 1993). Η ολοκληρωμένη σε βάθος ταχύτητα χωρίζεται σε δύο μέρη: πάνω και κάτω από το μέσο επίπεδο της κοιλίας του κύματος. Η κατευθυνόμενη προς τη θάλασσα στερεομεταφορά, υπολογίζεται βάση στην περιγραφή της δευτερογενούς διατομής του ρεύματος σύμφωνα με τον De Vriend and Stive (1987) και η μέση στο χρόνο συγκέντρωση ιζημάτων βασίζεται στη μονοδιάστατη εξίσωση διάχυσης. Η κατευθυνόμενη προς τη ξηρά στερεομεταφορά πάνω από το επίπεδο της κοιλίας του κύματος, σύμφωνα με τους Stive

and Wind (1986), περιγράφεται από τη μέση στο χρόνο συγκέντρωση στη μέση στάθμη της θάλασσας και τη ροή μάζας που παρατηρείται πάνω από αυτό το επίπεδο.

Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο ώστε να λαμβάνει υπόψη την επίδραση της μεταφοράς που προκαλείται από τους παφλασμούς και την κλίση του πυθμένα. Η εξίσωση διατήρησης του όγκου των ιζημάτων, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των μεταβολών του πυθμένα. Η δυναμική των κυματισμών στην εγκάρσια διατομή της ακτογραμμής υπολογίζονται σύμφωνα με το μοντέλο του Battjes and Stive model (1984). Το μοντέλο απεικονίζει την εγκάρσια στερεομεταφορά σε ένα μονοδιάστατο κάρναβο όπου το μέγεθος του φατνίου διαφοροποιείται. Χρησιμοποιούνται χρονοσειρές κυματισμών και δεδομένα που αφορούν τη στάθμη του νερού.

3.3.3. UNIBEST-TC

Το UNIBEST-TC είναι σχεδιασμένο να υπολογίζει την εγκάρσια στερεομεταφορά και τα αποτελέσματα αυτής σε οποιαδήποτε ακτή υπό τη συνδυασμένη δράση των κυμάτων, των παλιρροϊκών ρευμάτων κατά μήκος της ακτής και του ανέμου. Το μοντέλο εφαρμόζεται για πληθώρα ακτομηχανικών προβλημάτων όπως είναι:

- Η δυναμική των εγκάρσιων διατομών
- Οι αλλαγές στη διατομή λόγω των εποχιακών ανέμων
- Η δημιουργία υποθαλάσσιου αναβαθμού
- Η διερεύνηση της σταθερότητας της αναπλήρωσης ακτής
- Η διερεύνηση της επίπτωσης της αφαίρεσης άμμου πάνω στην εγκάρσια διατομή της ακτογραμμής

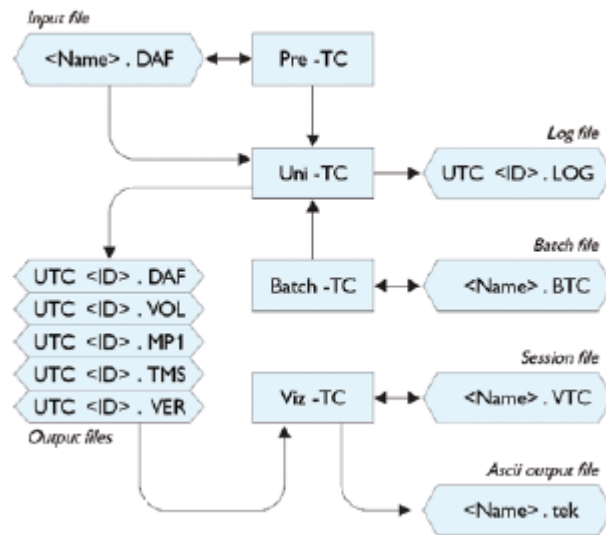
Το μοντέλο είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μελετά τις μορφολογικές αλλαγές στην ακτή από μερικές ώρες μέχρι κάποιες μέρες και για κάποιους μήνες μέχρι χρόνια. Το μοντέλο δεν εφαρμόζεται για την περίπτωση μελέτης των μορφοδυναμικών αλλαγών στη ζώνη απόσβεσης, και πιο συγκεκριμένα για βάθη νερού από 0.5-1 μέτρο, και στη ζώνη διαβροχής. Εφαρμόζεται για μήκη ακτών μέχρι και 10 χιλιόμετρα. Επιπλέον, δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τρισδιάστατα φαινόμενα. Οι Steetzel and Stive (1986) και αργότερα ο Bakker (1995), διαπίστωσαν ότι τα

αποτελέσματα του μοντέλου εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα καλής ποιότητας και σωστά επιλεγμένων οριακών συνθηκών.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του το ρεύμα πυθμένα, τη βαρύτητα, την ασυμμετρία των κυμάτων και τη ροή μάζας κάτω από την κοιλία των κυμάτων. Αποτελείται από πέντε υπο-μοντέλα:

1. Διάδοσης κύματος: Υπολογίζει την απόσβεση της ενέργειας του κύματος και τη διάχυση των κυμάτων.
2. Ρεύματος πυθμένα: Υπολογίζει την κάθετη κατανομή του μέσου κυματογενούς ρεύματος τόσο στην εγκάρσια όσο και στην κατά μήκος της ακτής διεύθυνση.
3. Τροχιακών ταχυτήτων κυμάτων: Υπολογίζει τη χρονοσειρά της τροχιακής ταχύτητας των κυμάτων κοντά στον πυθμένα.
4. Φορτίου πυθμένα και αιωρούμενου φορτίου: Το αιωρούμενο φορτίο υπολογίζεται ως το προϊόν του μέσου κυματογενούς ρεύματος και των κατακόρυφων διατομών συγκέντρωσης (and the vertical concentration profiles). Το φορτίο πυθμένα υπολογίζεται συναρτήσει της στιγμιαίας διατμητικής τάσης του πυθμένα.
5. Αλλαγής βάθους πυθμένα: Καθορίζεται από το ολοκληρωμένο ως προς το βάθος ισοζύγιο μάζας.

Ένα αρχείο εγκατάστασης (Batch-TC) παρέχεται για την εκτέλεση ενός μεγάλου αριθμού διαδοχικών τρεξιμάτων του μοντέλου. Οι προκαθορισμένες χρονοσειρές των οριακών συνθηκών, των εγκάρσιων διατομών του πυθμένα, οι περιοχές όπου απαιτούν λεπτομερή δεδομένα εξόδου και ο υπολογιστικός κάρναβος, ελέγχονται γραφικά μέσω του προεπεξεργαστή (Pre-TC). Μέσω της μετεπεξεργασίας (Viz-TC) πραγματοποιούνται πέντε ταυτόχρονες εκτελέσεις. Τα επιλεγμένα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα αρχείο ASCII ή απεικονίζονται γραφικά (Εικόνα 3.4).



Εικόνα 3.4: Δομή του μοντέλου UNIBEST-TC

Πηγή: UNIBEST-TC, Deltares systems

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα γενικευμένα δεδομένα εισόδου που απαιτεί το μοντέλο. Σημειώνεται ότι αυτά ενδέχεται να αλλάζουν, ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται κάθε φορά.

Πίνακας 3.1: Επισκόπηση δεδομένων εισόδου UNIBEST-TC, Πηγή: Unibest-TC Userguide, D.J.R. Walstra, 2000

| Δεδομένα Εισόδου | | Παρατηρήσεις |
|--------------------------|---|--|
| Υδροδυναμικές Πιέσεις | Ύψος κύματος | Χρονοσειρά ή συνεχές |
| | Περίοδος κύματος | Χρονοσειρά ή συνεχές |
| | Γωνία κύματος | Χρονοσειρά ή συνεχές |
| | Στάθμη νερού | Χρονοσειρά ή συνεχές |
| | Ταχύτητες παλίρροιας κατά μήκος της ακτής | Χρονοσειρά ή συνεχές |
| | Κατεύθυνση και ταχύτητα ανέμου | Χρονοσειρά ή συνεχές |
| Μορφολογία Πυθμένα | Διατομή πυθμένα | Εγκάρσια διατομή |
| | Χαρακτηριστικά ιζημάτων | Συνεχής ή εγκάρσια μεταβλητότητα |
| | Μεταβλητότητα κατά μήκος της ακτής | Μπορεί να έχει επιπτώσεις στη μορφή της διατομής ή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων |

Τα πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι τα εξής:

- Υπολογιστικά αποδοτικό
- Υπολογισμός στερεομεταφοράς βασισμένος στην επεξεργασία (λιγότερη βαθμονόμηση)
- Επικυρωμένο μοντέλο
- Εύχρηστο

Οι αδυναμίες του μοντέλου είναι ότι προτιμάται για ακτές οι οποίες κυριαρχούνται από κυματισμούς μεγάλης έντασης και απαιτεί από το χρήστη γνώσεις ακτομηχανικής.

3.4. DELFT3D

Το Πανεπιστήμιο του Delft ανέπτυξε ένα λογισμικό το οποίο λέγεται DELFT3D και εφαρμόζεται πρωταρχικά στην ελεύθερη επιφάνεια του υδάτινου περιβάλλοντος. Προσομοιώνει τη δισδιάστατη και τρισδιάστατη ροή, τη στερεομεταφορά, τους κυματισμούς, την ποιότητα και οικολογία του νερού. Η πιο ευρεία εφαρμογή του αφορά στη μοντελοποίηση παράκτιων περιοχών, ποτάμιων συστημάτων, εκβολών ποταμών και λιμένων. Το μοντέλο προσομοιώνει παράκτιες κατασκευές, όπως είναι οι κυματοθραύστες και οι πρόβολοι. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των κατασκευών στις ακτές, αφού παρέχει τη δυνατότητα να πραγματοποιεί βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προσομοιώσεις.

Αποτελείται από ένα αριθμό τμημάτων, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους καθώς αλληλεπιδρά το ένα με το άλλο. Το κάθε τμήμα του μοντέλου καλύπτει ένα συγκεκριμένο τομέα ή πρόβλημα μηχανικής, μπορεί να εκτελεστεί ανεξάρτητα ή σε συνδυασμό με ένα ή περισσότερα τμήματα και τα αποτελέσματα του κάθε ενός παρέχονται σε ένα αρχείο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάποιο άλλο τμήμα. Τα τμήματα είναι τα ακόλουθα:

1. D-Flow

Ενσωματώνει τις επιδράσεις της παλίρροιας, του ανέμου, της ατμοσφαιρικής πίεσης, της διαφοράς πυκνότητας, των κυμάτων, των στροβίλων, της ξήρανσης και της πλημμύρας. Προσομοιώνει ασταθής ροές σε ρηχά νερά και τα αποτελέσματα του χρησιμοποιούνται από όλα τα υπόλοιπα τμήματα του μοντέλου. Περιλαμβάνει τρισδιάστατη μοντελοποίηση, κατασκευές (υπερχειλιστές, ημιδιαπερατές κατασκευές) και προσομοιώσεις τυρβώδους ροής.

2. D-Waves

Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ασταθούς διάδοσης κυμάτων χαμηλής κορυφογραμμής (short-crested waves), ενσωματώνοντας τη δράση του ανέμου, την

απώλεια ενέργειας λόγω της τριβής του πυθμένα, τη θραύση και διάθλαση των κυμάτων και τη ρήχωση.

3. D-Morphology

Υπολογίζει τη στερεομεταφορά και τις μορφολογικές αλλαγές για αυθαίρετο αριθμό συνεκτικών και μη ιζημάτων. Χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό μαθηματικών τύπων για τους υπολογισμούς και τόσο τα ρεύματα όσο και τα κύματα λειτουργούν ως κινητήριες δυνάμεις. Χαρακτηριστικό του είναι η ανάδραση πληροφορίας που έχει με το D-Flow και το D-Wave, καθώς επιτρέπει την προσαρμογή των κυμάτων και των ροών στην τοπική βαθυμετρία και την προσομοίωση σε οποιαδήποτε χρονική κλίμακα (από μέρες μέχρι αιώνες).

4. D-Water Quality

Προσομοιώνει την ποιότητα του νερού και των ιζημάτων, το οποίο επιτυγχάνεται επιλύοντας εξισώσεις οριζόντιας μεταφοράς-διάχυσης. Παραδείγματα τέτοιων προσομοιώσεων είναι η υποβάθμιση του BOD, η νιτροποίηση, η ανάπτυξη αλγών, η ανακύκλωση θρεπτικών συστατικών κοκ.

5. D-Sediment Transport

Το τμήμα αυτό προσομοιώνει τη μεταφορά, τη διάβρωση και την καθίζηση συνεκτικών ή μη ιζημάτων και του αιωρούμενου ή του φορτίου πυθμένα. Οι επιδράσεις στις μεταβολές του πυθμένα αγνοούνται και περιλαμβάνει αρκετές μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς.

6. D-Ecology

Περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες που αφορούν στην ποιότητα του νερού και σχετίζεται με την ανάπτυξη των άλγεων, τις οποίες λαμβάνει υπόψη και το D-Water Quality, με κάποιες επιπλέον διαδικασίες.

7. D-Particle Tracking

Εκτιμά τη χωρική κατανομή μεμονωμένων σωματιδίων, ακολουθώντας το «μονοπάτι» τους στο χρόνο, όπως είναι για παράδειγμα μια πετρελαιοκηλίδα.

Το γραφικό περιβάλλον του χρήστη είναι πολύ φιλικό με αποτέλεσμα να καθίσταται εύχρηστο και ισχυρό εργαλείο. Τα δεδομένα εξόδου και εισόδου αποτελούν χρονοσειρές και μπορεί να είναι μονοδιάστατα, δισδιάστατα και τρισδιάστατα.

3.5. SAND94

Το SAND94 είναι μαθηματικό μοντέλο το οποίο προορίζεται για τον υπολογισμό των κυματισμών, των κυματογενών ρευμάτων, της στερεομεταφοράς και της εξέλιξης της ακτογραμμής. Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο IBW PAN (Institute of Hydro engineering PAS) στην Πολωνία. Οι παράμετροι των κυμάτων στα βαθιά υπολογίζονται με βάση την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, το ανάπτυγμα πελάγους και από τη μέθοδο του Krilov et. Al (1976), η οποία περιλαμβάνει εμπειρικές εξισώσεις της ακόλουθης μορφής:

$$\frac{g\bar{H}}{W^2} = f_1 \left(\frac{g}{W^2}, \frac{gt}{W} \right) \quad (5)$$

$$\frac{g\bar{T}}{W} = f_2 \left(\frac{gX}{W^2}, \frac{gt}{W} \right) \quad (6)$$

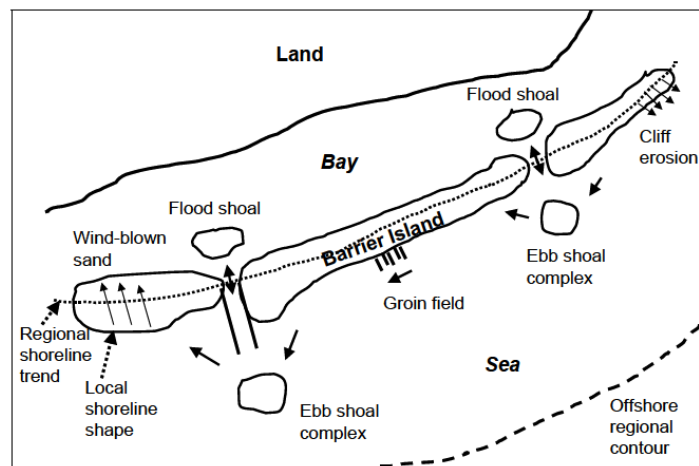
όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας, \bar{H} το μέσο ύψος κύματος, W η ταχύτητα του ανέμου, \bar{T} η μέση περίοδος κύματος, X το ανάπτυγμα πελάγους του ανέμου και t ο χρόνος διάρκειας.

Ο προσδιορισμός της εξέλιξης της ακτογραμμής βασίζεται σε ένα γραμμικό μοντέλο. Το μοντέλο λειτουργεί είτε για τον προσδιορισμό του ρυθμού της στερεομεταφοράς, η οποία καθορίζεται από κυματικά δεδομένα εισόδου σε χρονολογική σειρά, είτε για την καθαρή στερεομεταφορά (net sediment transport) υπολογισμένη για όλη την περίοδο ανάλυσης. Υπολογίζονται επίσης η κατανομή της κυματικής ενέργειας και η ταχύτητα των κατά μήκος ρευμάτων, (Modelling Large-Scale Dynamics Of Hel Peninsula, Pl, 1998).

3.6. The Cascade Model

Το Cascade Model αναπτύχθηκε στο Lund University στη Σουηδία από τους Magnus Larson, Nicholas C. Kraus και Hans Hanson το 2002. Είναι ένα αριθμητικό μοντέλο το οποίο προσομοιώνει τη στερεομεταφορά και την εξέλιξη της ακτογραμμής. Εφαρμόζεται σε τμήματα της ακτογραμμής, το μήκος των οποίων μπορεί να είναι μέχρι και εκατοντάδες χιλιόμετρα, περιλαμβάνει διαδικασίες οι οποίες σχετίζονται με τη στερεομεταφορά όπως είναι η αναπλήρωση της ακτής και οι βυθοκορήσεις καθώς επίσης και φαινόμενα όπως η δημιουργία εκβολών, καταιγίδες, η αλλαγή στη στάθμη της θάλασσας και οι παράκτιες κατασκευές όπως είναι οι πρόβολοι και οι θαλάσσιοι τοίχοι.

Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 3.5), απεικονίζεται μια παράκτια περιοχή στην οποία το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί. Απεικονίζονται τρεις αμμώδεις περιοχές (barrier islands), οι οποίες είναι παράλληλες με την ακτή και διαχωρίζονται από ανοίγματα, γύρω από τα οποία παρατηρείται μεταφορά ιζημάτων. Επιπλέον, απεικονίζεται η διάβρωση σε μία από τις αμμώδεις περιοχές (cliff erosion) καθώς επίσης και απόθεση ιζημάτων λόγω του ανέμου (wind-blown sand) (Larson, Kraus and Hanson, 2002).



Εικόνα 3.5: Επισκόπηση παράκτιας περιοχής όπου εφαρμόζεται το μοντέλο

Πηγή: Πηγή: Simulation Of Regional Longshore Sediment Transport And Coastal Evolution – The “Cascade” Model, Magnus Larson, Nicholas C. Kraus και Hans Hanson, 2002

Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής περιγράφεται ως εξής:

$$Q = Q_o \sin 2(\alpha_o) \quad (7)$$

όπου Q_o το πλάτος ρυθμού στερεομεταφοράς και α_o η γωνία μεταξύ των θραυόμενων κυματισμών και του προσανατολισμού της ακτογραμμής και η οποία είναι ίση με:

$$\alpha_o = \alpha_b - \tanh^{-1} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \quad (8)$$

όπου α_b η γωνία του κύματος τη στιγμή της θραύσης, y η θέση της ακτογραμμής και x η κατά μήκος της ακτής συντεταγμένη. Η περιφερειακή στερεομεταφορά υπακούει σε παρόμοια σχέση:

$$Q_r = Q_{or} \sin 2(\alpha_{or}) \quad (9)$$

$$\alpha_{or} = \alpha_{br} - \tanh^{-1} \left(\frac{\partial y_r}{\partial x} \right) \quad (10)$$

Ο δείκτης r αναφέρεται στην περιφερειακή κλίμακα.

Στο μοντέλο γίνεται υπόθεση ότι η τοπική ακτογραμμή εξελίσσεται με συνέπεια ως προς την περιφερειακή ακτογραμμή και η στερεομεταφορά περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$Q = Q_o \sin 2 \left(\alpha_{br} + \alpha_b - \tan^{-1} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) \right) \quad (11)$$

Αν $Q_r = 0$, τότε $\alpha_{br} = \tan^{-1} \left(\frac{\partial y_r}{\partial x} \right)$ και το y υπολογίζεται λύνοντας την εξίσωση 11 σε συνδυασμό με την εξίσωση διατήρησης του όγκου της άμμου:

$$\frac{dQ}{dx} + D \frac{\partial y}{\partial t} = q(x, t) \quad (12)$$

όπου D το βάθος, t ο χρόνος και q ένας όρος ο οποίος μεταβάλλεται στο χώρο και χρόνο.

Στο μοντέλο υπάρχουν οι εξής οριακές συνθήκες:

- Καμία μεταφορά: $Q = 0$
- Καμία αλλαγή στην ακτογραμμή: $\frac{\partial Q}{\partial x} = 0$
- Παράκαμψη (bypassing)
- Παράκαμψη και συσσώρευση και μεταφορά ιζημάτων

Ο ρυθμός της στερεομεταφοράς πρέπει να υπολογιστεί για πολλά σημεία και για διάφορα χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα τα χαρακτηριστικά των κυματισμών στο σημείο θραύσης να υπολογίζονται πολλές φορές. Οι κυματικές συνθήκες στα βαθιά υπολογίζονται επιλύοντας την εξίσωση διατήρησης της ροής ενέργειας και το νόμο του Snell.

$$H_o^2 C_{go} \cos \theta_o = H_b^2 C_{gb} \cos \theta_b \quad (13)$$

$$\frac{\sin \theta_o}{C_o} = \frac{\sin \theta_b}{C_b} \quad (14)$$

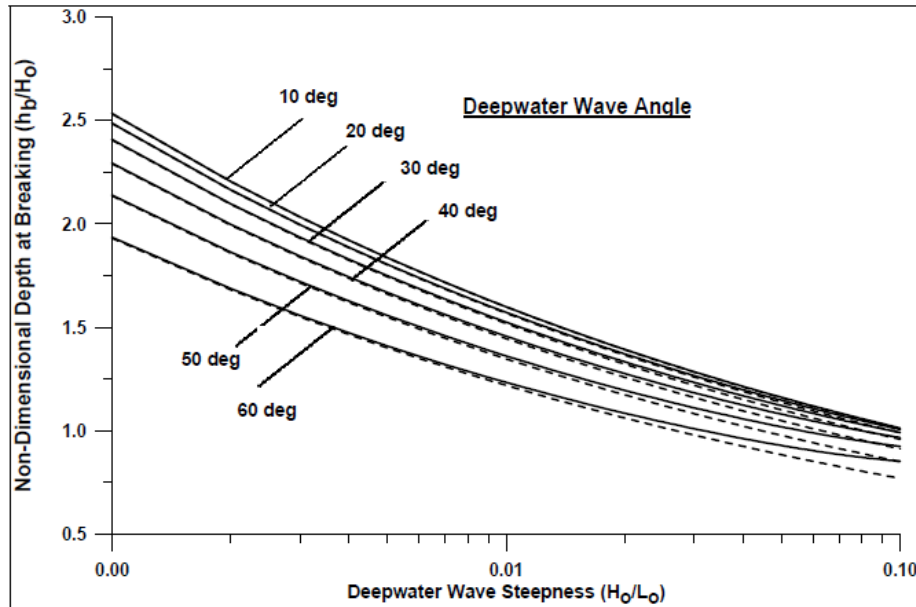
όπου H το ύψος κύματος, C_g η ταχύτητα του συνόλου, C η ταχύτητα φάσης και θ η γωνία του κύματος. Οι δύο εξισώσεις συνδυάζονται δίνοντας την παρακάτω εξίσωση:

$$\left(\frac{h_b}{L_o}\right)^{\frac{5}{2}} \cos \left(\sin^{-1} \left(\sqrt{2\pi} \sin \theta_o \sqrt{\frac{h_b}{L_o}} \right) \right) = \left(\frac{H_o}{L_o}\right)^2 \frac{\cos \theta_o}{\gamma_b^2 2\sqrt{2\pi}} \quad (15)$$

όπου h_b το βάθος του νερού στο σημείο θραύσης, L_o το μήκος κύματος στα βαθιά και γ_b το ύψος κύματος στο σημείο έναρξης της θραύσης το οποίο είναι ίσο με 0,78. Αν η γωνία του κύματος στη θραύση είναι μικρή, το h_b υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{h_b}{L_o} = \left(\left(\frac{H_o}{L_o}\right)^2 \frac{\cos \theta_o}{\gamma_b^2 2\sqrt{2\pi}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (16)$$

Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η μεταβολή του $\frac{h_b}{H_o}$ με $\frac{H_o}{L_o}$ με το θ_o (συμπαγείς γραμμές) και στις διακεκομμένες γραμμές απεικονίζονται οι λύσεις για την παραπάνω εξίσωση.



Διάγραμμα 3.1: Κανονικοποίηση βάθους στη θραύση συναρτήσει της καμπυλότητας του κυματισμού και της γωνίας στα βαθιά

Πηγή: Simulation Of Regional Longshore Sediment Transport And Coastal Evolution – The “Cascade” Model, Magnus Larson, Nicholas C. Kraus και Hans Hanson, 2002

Η γωνία κύματος στο σημείο θραύσης υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\theta_b = \sin^{-1} \left(\sqrt{2\pi} \sin \theta_o \sqrt{\frac{h_b}{L_o}} \right) \quad (17)$$

Όσον αφορά στον υπολογισμό της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής, στο μοντέλο χρησιμοποιείται μια καινούργια μέθοδος, η οποία αναπτύχθηκε από τους Larson και Bayram (2002). Η μέθοδος περιλαμβάνει τα ρεύματα που προκαλούνται από την παλίρροια και τον άνεμο και περιγράφεται ως ακολούθως:

$$Q = \frac{\varepsilon}{(\rho_s - \rho)(1 - \alpha)gw} F \bar{V} \quad (18)$$

όπου F η κυματική ροή ενέργειας που κατευθύνεται προς την ακτή, \bar{V} η μέση ταχύτητα του κατά μήκος ρεύματος στη ζώνη θραύσης, ε εμπειρικός συντελεστής, ρ_s η πυκνότητα των ιζημάτων, ρ η πυκνότητα του νερού, α το πορώδες και w η ταχύτητα πτώσης των ιζημάτων.

Το μοντέλο υπολογίζει το μέγεθος του ιζήματος που διαπερνά ένα πρόβολο με τη βοήθεια ενός μοντέλου, το οποίο αναπτύχθηκε από τους Larson και Hanson (1996). Ο ρυθμός στερεομεταφοράς ανά μονάδα μήκους είναι:

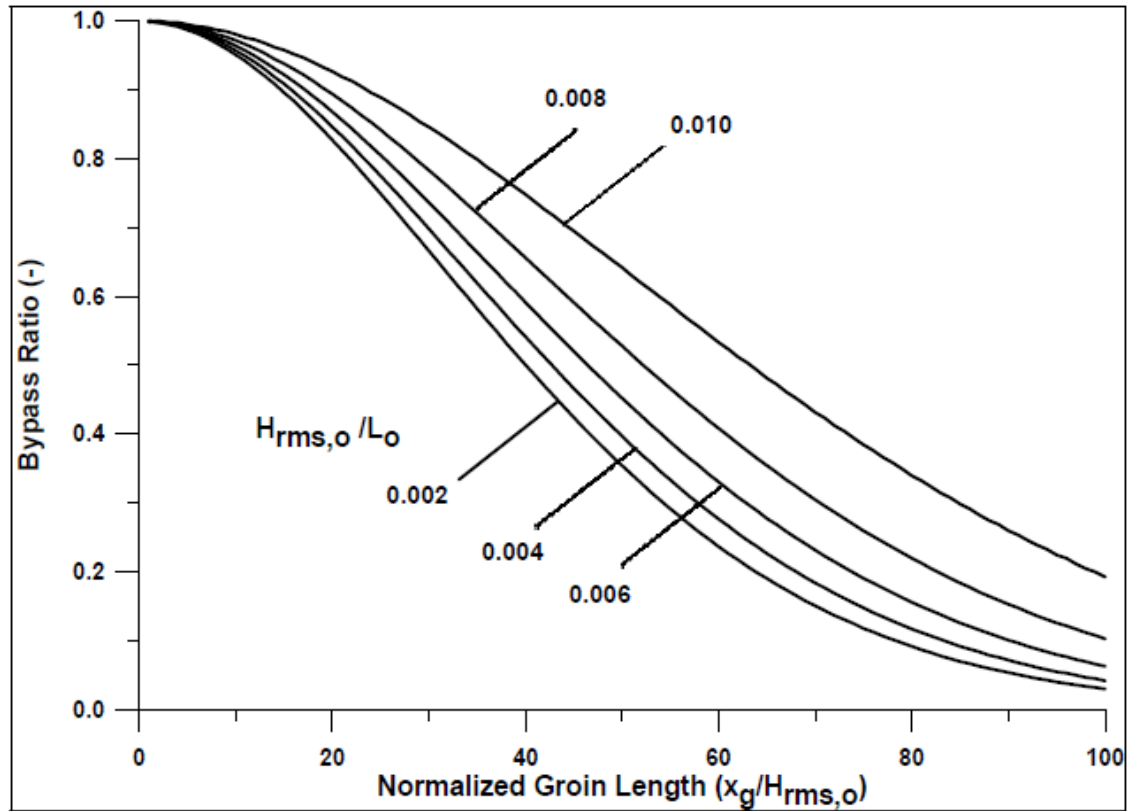
$$q_l = \frac{\varepsilon_c}{(\rho_s - \rho)(1 - \alpha)gw} VP \quad (19)$$

όπου V η ταχύτητα του τοπικού ρεύματος κατά μήκος της ακτής και ε_c συντελεστής μεταφοράς. Για τον καθορισμό της ποσότητας ιζήματος που διαπερνά ένα πρόβολο, γίνεται υπόθεση ότι το σύνολο του ιζήματος που κατευθύνεται προς τη θάλασσα περνά από τον πρόβολο, ενώ το ίζημα που κατευθύνεται προς τη ξηρά μπλοκάρεται. Το σύνολο του ιζήματος το οποίο διαπερνά ένα πρόβολο υπολογίζεται ως εξής:

$$p = \int_{x_g}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{h}} \left(\frac{d\xi}{dx} \right)^2 dx \left\{ \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{h}} \left(\frac{d\xi}{dx} \right)^2 dx \right\}^{-1} \quad (20)$$

όπου ξ ο δείκτης των θραυόμενων κυμάτων το οποίο είναι ίσο με $\xi = \exp\left(-\left(\frac{\gamma_b h}{H_x}\right)^2\right)$

όπου H_x το τοπικό rms του ύψους κύματος παραλείποντας τη θραύση των κυμάτων. Ο λόγος παράκαμψης p είναι συνάρτηση τριών αδιάστατων παραμέτρων και του προσπίπτοντος κύματος: $X_g/H_{rms,o}$, $H_{rms,o}/L_o$, $A/H_{rms,o}^{1/3}$ και θ_o . Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται η σχέση του λόγου παράκαμψης p με το μήκος του προβόλου και την κλίση των κυματισμών στα βαθιά για μια καθορισμένη τιμή για το $A/H_{rms,o}^{1/3}$.



Διάγραμμα 3.2: Ο λόγος παράκαμψης συναρτήσει του μήκους του προβόλου και την κλίση των κυμάτων στα βαθιά για $A/H_{rms,o}^{1/3}=0.1$

Πηγή: Πηγή: Simulation Of Regional Longshore Sediment Transport And Coastal Evolution – The “Cascade” Model, Magnus Larson, Nicholas C. Kraus και Hans Hanson, 2002

Το μοντέλο περιλαμβάνει το Reservoir Model (Kraus 2000) για να περιγράψει τη μεταφορά και αποθήκευση του εισερχόμενου ιζήματος. Το ίζημα συγκεντρώνεται δημιουργώντας μορφολογικά τμήματα (αναβαθμούς). Ο Kraus (2000) υπέθεσε ότι το ίζημα που διαπερνά κάθε τμήμα είναι ανάλογο του ρυθμού μεταξύ του πραγματικού όγκου και του όγκου ισορροπίας κάθε τμήματος. Οι εξισώσεις οι οποίες περιγράφουν τη συγκέντρωση και τη μεταφορά των ιζημάτων είναι:

$$Q_{out} = Q_{in} \frac{V}{V_{eq}} \quad (21)$$

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (22)$$

όπου Q_{in} και Q_{out} η μεταφορά από τη μορφολογική μονάδα, V ο όγκος του ιζήματος σε κάθε τμήμα και V_{eq} η τιμή μεγέθους του όγκου.

3.7. Coastal Evolution Model

Το Coastal Evolution Model αναπτύχθηκε από το Πανεπιστήμιο του Duke το 2000. Αποτελεί γραμμικό μοντέλο όπου η εγκάρσια ακτογραμμή μετατρέπεται σε ένα μόνο σημείο δεδομένων, επιτρέποντας έτσι την προσομοίωση της μορφής της ακτογραμμής. Το μοντέλο χρησιμοποιείται για τη μελέτη ακτής, η οποία παρουσιάζει μεταβλητό ρυθμό διάβρωσης, καθώς επίσης και για την προσομοίωση της εξέλιξης της ακτογραμμής όταν τροφοδοτείται ίζημα από ένα διαβρωμένο μέτωπο ακτής (<http://fallmeeting.agu.org/2012/e posters/eposter/ep33b-0856/>).

Το μοντέλο χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για αμμώδεις ακτές, οι οποίες δέχονται μεγάλους κυματισμούς και σε ακτογραμμές σύνθετης μορφής, όπως είναι τα ακρωτήρια. Η χρονική κλίμακα κυμαίνεται από μερικά μέχρι χιλιάδες χρόνια και η χωρική κλίμακα καλύπτει μέχρι και εκατοντάδες χιλιόμετρα ακτογραμμής. Η υπόθεση του παράλληλου μετώπου ακτής, καθίσταται παράλογο σε κλίμακες μικρότερες του χιλιομέτρου, όπως επίσης και η υπόθεση ότι το μέτωπο της ακτής διαβρώνεται ή προσχώνεται διατηρώντας ταυτόχρονα τη μορφή του για χρονικές κλίμακες μικρότερες από δεκαετίες. Η εξέλιξη της ακτογραμμής προκύπτει από το ρυθμό μεταβολής της κατά μήκος στερεομεταφοράς που προκαλείται από τον άνεμο. Η προσομοίωση των ανθρώπινων χειρισμών στην εξέλιξη της ακτογραμμής μέσω έργων παράκτιας προστασίας (κυματοθραύστες, αναπλήρωση ακτής), καθίσταται εφικτή.

Οι παράμετροι εισόδου του μοντέλου είναι:

- Η αρχική ακτογραμμή, η οποία πρέπει να είναι σε αρχείο δυαδικής μορφής.
- Οι κυματικές συνθήκες (γωνία και ύψος κύματος).
- Ένα σύνολο βασικών παραμέτρων (πχ. αριθμός χρονικών βημάτων) σε μορφή αρχείου .xml

Οι παράμετροι εξόδου αποτελούνται από εικόνες, οι οποίες απεικονίζουν την εξέλιξη της ακτογραμμής είτε σε αρχείο δυαδικής μορφής είτε σε αρχείο ASCII ή ακόμα και σε αρχεία JPEG.

Η εξέλιξη της ακτογραμμής περιγράφεται από την εξίσωση συνέχειας. Ο ρυθμός της αλλαγής στην ακτογραμμή στην εγκάρσια διεύθυνση είναι ανάλογη με την απόκλιση της κατά μήκος της ακτής ροής του ιζήματος. Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής υπολογίζεται με τη μέθοδο του CERC, η οποία συνδέει τη ροή ιζημάτων με τη θραύση των κυματισμών και υπολογίζει αθροιστικά τα φορτία πυθμένα και αιώρησης ως εξής:

$$Q_l = 2.05 * 10^6 * H_o^{\frac{5}{2}} * (\cos \beta_o)^{\frac{1}{4}} * \sin 2\beta_o \quad (23)$$

όπου H_o το ύψος κύματος στα βαθιά και β_o η γωνία πρόσπτωσης του κύματος.

3.8. MIKE 21 model

Το λογισμικό MIKE του DHI³ (Danish Hydraulic Institute) είναι ένα εργαλείο το οποίο έχει ως σκοπό την προσομοίωση υδραυλικών συστημάτων και φαινομένων σε εκβολές, παράκτιες περιοχές και στις θάλασσες. Τα φαινόμενα αυτά αφορούν την ποιότητα του νερού, τον ευτροφισμό, τη μεταφορά και διασπορά κ.ο.κ. Εφαρμόζεται σε δισδιάστατες ροές ελεύθερης επιφάνειας, με την υπόθεση αμελητέας διαστρωμάτωσης και στους εξής τομείς:

- Παράκτια υδραυλική και ωκεανογραφία
- Περιβαλλοντική υδραυλική
- Μεταφορά ιζημάτων
- Κύματα
- Λιμάνια

³ Το DHI είναι ένας ανεξάρτητος ερευνητικός οργανισμός με έδρα το Horsholm της Δανίας, ο οποίος ασχολείται με θέματα μηχανικής και περιβάλλοντος, όπως είναι τα λιμάνια, οι υδατικοί πόροι, η ακτομηχανική και άλλους τομείς που σχετίζονται με το υδάτινο περιβάλλον και την υγεία.

Το MIKE 21 είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελείται από τμήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς. Μερικά από τα τμήματα του λογισμικού, όπως αυτά περιγράφονται από το DHI, είναι:

1. PP - Preprocessing and Postprocessing (Προεπεξεργασία και Μετεπεξεργασία): Το PP προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον εργασίας το οποίο διευκολύνει την εισαγωγή των δεδομένων εισόδου, την ανάλυση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.
2. PMS – Parabolic Mild-Slope (Μοντέλο γραμμικής διάθλασης-περίθλασης): Αναπαράγει φαινόμενα όπως είναι η ρήγωση, η διάθλαση και η διάχυση, τα οποία προκαλούνται από την τριβή του πυθμένα και τη θραύση των κυμάτων.
3. HD - Hydrodynamics (Υδροδυναμική): Το HD προσομοιώνει τις διακυμάνσεις της στάθμης του νερού και της ροής.
4. AD - Advection-Dispersion (Μεταφορά - Διασπορά): Προσομοιώνει τη μεταφορά, τη διασπορά και την αποσύνθεση διαλυμένων ουσιών.
5. ST - Sand Transport Advanced (Μοντέλο στερεομεταφοράς): Μοντέλο το οποίο αφορά τη μεταφορά ιζημάτων που προκαλείται από ρεύματα και από το συνδυασμό ρευμάτων-κυμάτων και περιλαμβάνει τρισδιάστατη περιγραφή του ρυθμού της στερεομεταφοράς.
6. MT - Mud Transport (Μεταφορά ιζήματος): Μοντέλο το οποίο περιγράφει τη διάβρωση, τη μεταφορά και την απόθεση συνεκτικού ιζήματος.
7. Coupled Modelling (Συνδυασμένο μοντέλο): Ισχυρό σύστημα το οποίο συνδυάζει το κυματικό μοντέλο, το μοντέλο ροής και μεταφοράς ιζημάτων σε ένα πλήρως δυναμικό, μορφολογικό μοντέλο.
8. EMS - Elliptic Mild Slope (Ελλειπτικό, ήπιας κλίσης): Μοντέλο το οποίο χρησιμοποιείται για τη μελέτη της δυναμικής των κυμάτων σε παράκτιες περιοχές.
9. BW - Boussinesq Waves (Μοντέλα Boussinesq): Το πιο σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη και ανάλυση της κυματικής διαταραχής σε λιμένες και παράκτιες περιοχές. Περιλαμβάνει τη δυναμική της ζώνης απόσβεσης και διαβροχής.

Πριν από την εφαρμογή οποιουδήποτε τμήματος του Mike 21, χρησιμοποιείται το Mike zero, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της βαθυμετρίας της περιοχής ενδιαφέροντος. Το Mike zero έχει ως δεδομένα εισόδου τις συντεταγμένες των ισοβαθών και της ακτής σε μορφή .xyz, τα οποία έπειτα από γραμμική παρεμβολή δίνουν τη βαθυμετρία της περιοχής.

3.8.2. Mike 21 PMS

Το Mike 21 PMS είναι ένα γραμμικό μοντέλο διάθλασης-περίθλασης, το οποίο βασίζεται στην παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της διάθλασης και της ρήχωσης λόγω της μεταβολής του βάθους, την περίθλαση κατά μήκος της κάθετης στην κύρια διεύθυνση του κύματος, την απώλεια ενέργειας εξαιτίας της τριβής του πυθμένα και της θραύσης των κυμάτων, τη διασπορά συχνοτήτων και την κατευθυντική διασπορά (Parabolic Mild-Slope Wave Module, User Guide, DHI Software 2007). Το μοντέλο εφαρμόζεται για τη μελέτη της κυματικής διαταραχής και για τον υπολογισμό των κυματικών πεδίων σε παράκτιες περιοχές με κατασκευές όπως είναι οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες και οι πρόβολοι.

Η ελλειπτική εξίσωση ήπιας κλίσης, η οποία προτάθηκε αρχικά από τον Berkhoff (1972), γράφεται ως εξής:

$$\nabla(C C_g \Delta \varphi) + (k^2 C C_g + i \omega W) \varphi = 0 \quad (24)$$

όπου ∇ δισδιάστατος τελεστής κλίσης, $C(x, y)$ η ταχύτητα φάσης κύματος, C_g η ταχύτητα ομάδας, $\varphi(x, y)$ το δυναμικό ταχύτητας μέσης ελεύθερης επιφάνειας, το οποίο είναι ίσο με:

$$\varphi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} \varphi(x, y) \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \quad (25)$$

όπου z η θαλάσσια στάθμη από τη ΜΣΘ, d το βάθος νερού, k ο κυματαριθμός και ω η κυκλική συχνότητα.

Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας, σύμφωνα με τους Dean & Darlymple (1984), γράφεται ως εξής:

$$n = \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (26)$$

$$n = \varphi(x, y) e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (27)$$

Για κύματα σταθερής συχνότητας (plane progressive wave), το μέσο δυναμικό της ελεύθερης επιφάνειας, είναι ίσο με:

$$\varphi = A^*(x, y) e^{i\psi} \quad (28)$$

όπου $\psi = \int^x k \cos \theta dx + \int^y k \sin \theta dy$ και θ η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του κύματος και του άξονα x . Υποθέτοντας κύμα σταθερής συχνότητας κατά μήκος του άξονα x , η συνάρτηση φάσης ψ , γράφεται ως εξής:

$$\psi = \int^x k dx \quad (29)$$

Μια παραβολική προσέγγιση της εξίσωσης 24 προκύπτει από την υπόθεση μιας κύριας διεύθυνσης κύματος, της x -διεύθυνσης και από την αγνόηση της διασποράς λόγω ανάκλασης και της περίθλασης κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης. Έτσι, η εξίσωση διαφοροποιείται ως εξής:

$$(CC_g \varphi_x)_x + (CC_g \varphi_y)_y + (k^2 CC_g + i\omega W) \varphi = 0 \quad (30)$$

όπου οι δείκτες x και y είναι παράγωγα των x και y .

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 27, οι όροι κλίσης εκφράζονται ως ακολούθως:

$$\varphi_x = (ikA^* + A_x^*) e^{i\psi} \quad (31)$$

$$CC_g \varphi_x = (i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) e^{i\psi} \quad (32)$$

$$(CC_g \varphi_x)_x = \left[ik(i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) + i\omega C_g A_x^* + i\omega A^* (C_g)_x + (CC_g A_x^*)_x \right] e^{i\psi} \quad (33)$$

Ο όρος $(CC_g A_x^*)_x$ αντιπροσωπεύει την επίδραση της διασποράς και της περίθλασης κατά μήκος του άξονα x , με αποτέλεσμα να παραλείπεται στην παραβολική προσέγγιση. Επομένως:

$$(CC_g \varphi_x)_x \cong \left[\{-k\omega C_g + i\omega (C_g)_x\} A^* + 2i\omega C_g A_x^* \right] e^{i\psi} \quad (34)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 28, προκύπτει:

$$(CC_g \varphi_y)_y = (CC_g A_y^*)_y e^{i\psi} \quad (35)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 34 και 35 στην εξίσωση 30, δίνεται:

$$A_x^* - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y^*)_y + A^* \frac{(C_g)_x}{2C_g} + A^* \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (36)$$

Στη συνέχεια γίνεται υπόθεση ότι:

$\varphi = A(x, y) e^{ik_0 x}$ όπου k_0 είναι ένας κυματαριθμός αναφοράς και $A(x, y)$ είναι μια αργά μεταβαλλόμενη σύνθετη μεταβλητή, όπου:

$$A^*(x, y) = A(x, y) e^{i\theta} \text{ και } \theta = k_0 x - \int^x k dx$$

Έτσι, η εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$A_x - i(k - k_0)A + \frac{A}{2C_g} (C_g)_x - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y)_y + \frac{W}{2C_g} A = 0 \quad (37)$$

Η τελευταία εξίσωση είναι η απλουστευμένη παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης. Ο Kirby (1986), διεύρυνε την εξίσωση ώστε να χρησιμοποιείται για πολλαπλασιαστικά κύματα μεγάλης γωνίας κατά μήκος του άξονα x . Ανέπτυξε την

παρακάτω εξίσωση, η οποία αποτελεί την βασική εξίσωση που επιλύεται στο Mike 21 PMS:

$$A_x + i(k_0 - \beta_1 k)A + \frac{A}{2c_g}(C_g)_x + \frac{\sigma_1}{\omega c_g}(CC_g A_y)_y + \frac{\sigma_2}{\omega c_g}(CC_g A_y)_{yx} + \frac{W}{2c_g}A = 0 \quad (38)$$

όπου

$$\sigma_1 = i\left(\beta_2 - \beta_3 \frac{k_0}{k}\right) + \beta_3 \left(\frac{k_x}{k^2} + \frac{(c_g)_x}{2kc_g}\right) \quad (39)$$

$$\sigma_2 = -\beta_3/k \quad (40)$$

Οι συντελεστές β_1 , β_2 και β_3 δίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι τιμές είναι για διαφορετικές παραβολικές προσεγγίσεις.

Πίνακας 3.2: Τιμές συντελεστών β_1 , β_2 και β_3 . Πηγή: www.dhisoftware.com

| Aperture | β_1 | β_2 | β_3 |
|----------|-------------|--------------|--------------|
| Simple | 1 | -0.5 | 0 |
| Pade | 1 | -0.75 | -0.25 |
| 10o | 0.999999972 | -0.752858477 | -0.252874920 |
| 20 | 0.999998178 | -0.761464683 | -0.261734267 |
| 30 | 0.999978391 | -0.775898646 | -0.277321130 |
| 40 | 0.999871128 | -0.796244743 | -0.301017258 |
| 50 | 0.999465861 | -0.822482968 | -0.335107575 |
| 60 | 0.998213736 | -0.854229482 | -0.383283081 |
| 70 | 0.994733030 | -0.890064831 | -0.451640568 |
| 80 | 0.985273164 | -0.925464479 | -0.550974375 |
| 90 | 0.956311082 | -0.943396628 | -0.704401903 |

3.8.3. MIKE 21 HD

Το MIKE 21 HD είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υπολογισμού για δισδιάστατες ροές σε ελεύθερη επιφάνεια. Αποτελεί το σημαντικότερο υπολογιστικό εργαλείο ολόκληρου του λογισμικού MIKE 21, καθώς παρέχει την υδροδυναμική βάση για άλλα μοντέλα του λογισμικού, όπως είναι αυτό της μεταφοράς-διασποράς, της ποιότητας του νερού και της μεταφοράς ιζήματος.

(<http://www.dhisoftware.com/Products/CoastAndSea/MIKE21/Hydrodynamics.aspx>).

Το υδροδυναμικό μοντέλο προσομοιώνει τις χωρικές μεταβολές της στάθμης του νερού, των ροών και των ταχυτήτων σε λίμνες, εκβολές και παράκτιες περιοχές, λόγω των ποικίλων δυνάμεων που επιδρούν σε αυτά. Οι μεταβολές της στάθμης του νερού και των ροών, επιλύονται σε ευθύγραμμο, καμπυλόγραμμο ή τριγωνικό κάναβο, ο οποίος καλύπτει την περιοχή μελέτης. Το μοντέλο εφαρμόζεται για πληθώρα υδραυλικών και άλλων σχετικών φαινομένων, όπως είναι:

- Η παλίρροια και τα ρεύματα
- Κύματα θύελλας
- Στάσιμο κύμα εντός λιμένα
- Αστοχία φράγματος

Σύμφωνα με το DHI το υδροδυναμικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις:

- Των Υδραυλικών κατασκευών
- Της δύναμης Coriolis
- Των Κυματογενών ρευμάτων
- Των Πλημμυρών
- Των Διατμητικών τάσεων του πυθμένα
- Των Διατμητικών τάσεων του ανέμου στην επιφάνεια
- Των παροχών εισόδου και εξόδου
- Της εξάτμισης
- Των τάσεων ακτινοβολίας

- Της διασποράς της ορμής

Το MIKE 21 HD επιλύει πλήρως τις δυναμικές εξισώσεις της συνέχειας και της ποσότητας κίνησης σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (41)$$

Εξίσωση ποσότητας κατά την οριζόντια διεύθυνση:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_q - fVV_x + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση:

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fVV_y + \\ \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (43)$$

όπου

$h(x, y, t)$ το βάθος του νερού, $d(x, y, t)$ χρονικά μεταβαλλόμενο βάθος νερού, $\zeta(x, y, t)$ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, $p, q(x, y, t)$ η ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα, $C(x, y)$ ο συντελεστής Chezy, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, $f(V)$ ο συντελεστής τριβών ανέμου, $V, V_x, V_y(x, y, t)$ η ταχύτητα του ανέμου και οι συνιστώσες της κατά και x και y , $\Omega(x, y)$ συντελεστής Coriolis, $p_a(x, y, t)$ η ατμοσφαιρική πίεση, ρ_w η πυκνότητα του νερού, x, y οι χωρικές συντεταγμένες, t ο χρόνος και $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ οι συνιστώσες ενεργών διατμητικών τάσεων.

Στο υδροδυναμικό μοντέλο, οι μεταφορές της θερμοκρασίας (T) και η αλατότητα (s), ακολουθούν τη γενική εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης ως ακολούθως:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_r + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + H + T_s S \quad (44)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_r + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + H + s_s S \quad (45)$$

Οι οριζόντιοι συντελεστές διάχυσης ορίζονται ως εξής:

$$(F_T, F_S) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (46)$$

όπου

t ο χρόνος, x, y, z οι καρτεσιανές συντεταγμένες, u, v, w οι συνιστώσες της ταχύτητας ροής, T, s η θερμοκρασία και η αλατότητα, D_v ο οριζόντιος τυρβώδης συντελεστής διάχυσης, H συντελεστής λόγω της ανταλλαγής θερμότητας με την ατμόσφαιρα, S η τάση ακτινοβολίας, T_s, S_s η θερμοκρασία και η αλατότητα της πηγής, F_T, F_S, F_c οριζόντιοι όροι διάχυσης, D_h οριζόντιος συντελεστής διάχυσης και h το βάθος.

Στο μοντέλο υπεισέρχονται τα εξής δεδομένα:

- Τομεακοί και χρονικοί παράμετροι
 - Το μέγεθος και η έκταση του πλέγματος και η βαθυμετρία
 - Βήμα χρόνου και ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης
- Συντελεστές βαθμονόμησης
 - Αντίσταση πυθμένα
 - Συντελεστές ορμής-διασποράς
 - Συντελεστής τριβής ανέμου
- Αρχικές συνθήκες
 - Επιφανειακή στάθμη νερού
 - Συνιστώσες της ταχύτητας

- Οριακές συνθήκες
 - Στάθμη νερού
 - Μέγεθος και διεύθυνση ροής
- Άλλες κινητήριες δυνάμεις
 - Διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου
 - Παλίρροια
 - Παρουσία πηγών και μέγεθος απορροής τους
 - Επίδραση κυματισμού

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι η διακύμανση της επιφάνειας, το βάθος του νερού, το πεδίο ταχυτήτων της ροής σε όλη την περιοχή υπολογισμού, οι πυκνότητες, οι θερμοκρασίες και οι αλατότητες, η διεύθυνση και η ταχύτητα του ρεύματος, η ταχύτητα του ανέμου, η πίεση της ατμόσφαιρας και ο συντελεστής αντίστασης.

3.8.4. MIKE 21 ST

Το MIKE 21 ST αποτελεί τμήμα του λογισμικού MIKE, το οποίο αφορά στον υπολογισμό του ρυθμού μεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων και στα ποσοστά μεταβολής του πυθμένα. Η μεταφορά ιζήματος είναι αποτέλεσμα της δράσης αμιγών ρευμάτων ή ενός συνδυασμού ρευμάτων-κυμάτων. Το μοντέλο εφαρμόζεται σε όλες τις περιοχές στις οποίες κύματα ή/και ρεύματα προκαλούν μεταφορά μη-συνεκτικού ιζήματος. Επιπλέον, εφαρμόζεται τόσο σε περιφερειακές ζώνες της τάξης των 10 km όσο και σε τοπικές ζώνες γύρω από παράκτιες περιοχές όπου απαιτείται ακρίβεια της τάξης του m. Το μοντέλο ST καλύπτει ένα ευρύ φάσμα τομέων, μερικοί των οποίων είναι:

- Διαχείριση ακτογραμμής
- Έργα προστασίας ακτής
- Μορφολογία ποταμών
- Διάβρωση γύρω από βυθισμένους σωλήνες
- Σταθερότητα εισόδου παλίρροιας

Ο υπολογισμός του ρυθμού μεταφοράς των ιζημάτων γίνεται πάνω σε ένα κάρναβο, ο οποίος καλύπτει την περιοχή μελέτης. Το μοντέλο βασίζεται στα αποτελέσματα του

υδροδυναμικού μοντέλου (HD), χρησιμοποιεί στοιχεία για τους κυματισμούς της περιοχής (αποτελέσματα PMS) καθώς επίσης και πληροφορίες οι οποίες αφορούν χαρακτηριστικά του πυθμένα και του ιζήματος.

Το MIKE 21 ST λαμβάνει υπόψη τη συνδυασμένη δράση κυμάτων και ρευμάτων, αν ο κυματισμός είναι θραυόμενος ή όχι, αν το υλικό του πυθμένα είναι ομοιογενές ή όχι και αν η επιφάνεια του βυθού είναι επίπεδη ή όχι. Σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος, υπάρχουν πέντε θεωρίες υπολογισμού της στερεομεταφοράς:

1) Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς (Engelund & Hansen)

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_t = 0.1 \frac{c^2}{2g} \theta^{2,5} \quad (47)$$

και

$$\Phi_t = \frac{q_t}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (48)$$

2) Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς (Engelund & Fredsøe)

Το άθροισμα του φορτίου του πυθμένα (q_b) και του αιωρούμενου φορτίου (q_s), δίνουν το ρυθμό μεταφοράς του ολικού φορτίου (q_t). Η στερεομεταφορά, αφού γίνει θεώρηση ότι γίνεται σε ένα στρώμα πάχους ίση με τη διάμετρο των κόκκων, υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.07\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gd}, \theta' > \theta_c \quad (49)$$

όπου

$p = \left[1 + \left(\frac{\frac{\pi\beta}{6}}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{4}}$ η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι να βρίσκονται σε κίνηση και β ο δυναμικός συντελεστής τριβής

$\theta' = \frac{u_f^2}{(s-1)gd}$ η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα σε σχέση με την τριβή και θ_c η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα κατά την έναρξη κίνησης του ιζήματος

Το αιωρούμενο φορτίο υπολογίζεται ως εξής:

$$q_s = 11.6U_f'c_b a \left[I_1 \ln \left(\frac{30h}{k_N} \right) + I_2 \right] \quad (50)$$

όπου

U_f' η διατμητική ταχύτητα σχετιζόμενη με την τριβή, c_b η συγκέντρωση αιωρούμενου ιζήματος, $\alpha = 2d$ το επίπεδο αναφοράς για το c_b , I_1 και I_2 τα ολοκληρώματα του Einstein, h το βάθος του νερού και $k_N = 2.5D$ η ισοδύναμη τραχύτητα Nikuradse.

3. Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς (Zyserman & Fredsøe)

Στο θεώρημα αυτό η συγκέντρωση του φορτίου του πυθμένα υπολογίζεται ως εξής:

$$c_b = \frac{A(\theta' - \theta_c)^n}{1 + \frac{A}{c_m}(\theta' - \theta_c)^n}, \theta' > \theta_c \quad (51)$$

4. Θεωρία μεταφοράς φορτίου πυθμένα (Peter-Meyer & Müller)

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα υπολογίζεται με την παρακάτω εξίσωση:

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \quad (52)$$

και

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gd^2}} \quad (53)$$

5. Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς (Ackers & White)

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του ολικού φορτίου υπολογίζεται ως εξής:

$$G_{gr} = C \left[\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right]^m \quad (54)$$

όπου C , A και m οι παράμετροι του μοντέλου, οι οποίοι εξαρτώνται από το αδιάστατο

μέγεθος $D_{gr} = D \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{\frac{1}{3}}$ όπου D το μέγεθος των κόκκων, s η σχετική πυκνότητα του ιζήματος και ν το κινηματικό ιξώδες του νερού. Το F_{gr} αντιπροσωπεύει την κινητικότητα του ιζήματος και υπολογίζεται ως εξής:

$$F_{gr} = \frac{U_f^n}{\sqrt{gd(s-1)}} \left[\frac{\nu}{\sqrt{32 \log\left(\frac{10h}{d}\right)}} \right]^{1-n} \quad (55)$$

Όπου V η μέση κατά βάθος ταχύτητα του ρεύματος και n σταθερά η οποία κυμαίνεται από 0 μέχρι 1 ανάλογα με το υλικό.

Στην περίπτωση συνδυασμένης δράσης κυμάτων και ρευμάτων, χρησιμοποιούνται δύο θεωρίες:

- η θεώρηση του Bijker σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται ξεχωριστά το αιωρούμενο φορτίο και το φορτίο πυθμένα. Σύμφωνα με τον Bijker η διατμητική ταχύτητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$U_{f,wc} = U_{f,c} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{u_b}{\nu} \right)^2} = \frac{\sqrt{gV}}{c} \sqrt{1 + \frac{1}{2} \left(\xi \frac{u_b}{\nu} \right)^2} \quad (56)$$

όπου

u_b το πλάτος της τροχιάς ταχύτητας λόγω του κύματος στον πυθμένα

ξ ο αδιάστατος παράγοντας που εκφράζεται συναρτήσει του συντελεστή τριβής λόγω κύματος $f_w = \exp \left[-5.977 + 5.213 \left(\frac{\alpha_b}{r} \right)^{-0.914} \right]$ όταν $1.47 < \frac{\alpha_b}{r} < 3000$ και $f_w = 0.32$ όταν $\frac{\alpha_b}{r} \leq 1.47$ όπου $\alpha_b = \frac{u_b T}{2\pi}$ το πλάτος των υγρών σωματιδίων λόγω κύματος στον πυθμένα και του αριθμού Chezy $\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}}$.

Το φορτίο πυθμένα και σε αιώρηση υπολογίζεται υπολογίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$q_b = B d_{50} U_{f,c} \exp \left(- \frac{0.27 \Delta d_{50} g}{\mu U_{f,wc}^2} \right) \quad (57)$$

όπου

B αδιάστατος συντελεστής, $\Delta = \frac{\rho_s}{\rho - 1}$ η σχετική πυκνότητα του ιζήματος, $\mu = \left(\frac{C}{C'} \right)^{\frac{3}{2}}$ συντελεστής αμμοκυμάτων και $C' = 18 \log \left(\frac{12h}{d_{90}} \right)$ ο αριθμός Chezy

β. η θεωρία του DHI για το συνολικό φορτίο.

Στο μοντέλο υπεισέρχονται οι εξής παράμετροι:

- Η κλίση του πυθμένα
- Η διαβάθμιση του υλικού του πυθμένα
- Η απώλεια ενέργειας λόγω της θραύσης των κυμάτων
- Τα επιφανειακά ρεύματα
- Η γωνία διάδοσης των κυμάτων σε σχέση με τη διεύθυνση ροής

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι οι χρονοσειρές των ρυθμών μεταφοράς ιζήματος, οι μέσοι ρυθμοί μεταφοράς ιζήματος και οι αρχικοί ρυθμοί διάβρωσης και απόθεσης άμμου σε κάθε σημείο (Μελέτη για την προστασία και βελτίωση της ακτής Κόλπου Χρυσοχούς, Φάση IV: Λεπτομερής κατασκευαστική μελέτη, Μάρτιος 2004, Κύπρος).

3.9. LITPACK

Το LITPACK είναι αριθμητικό μοντέλο του DHI, το οποίο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της μεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων σε κύματα και ρεύματα, των παράκτιων ρευμάτων και της εξέλιξης της ακτογραμμής. Μέρος του μοντέλου είναι το STP (Sediment Transport Module), το οποίο αφορά στη στερεομεταφορά μη συνεκτικών ιζημάτων, το LITDRIFT που σχετίζεται με τα παράκτια ρεύματα και τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής, το LITLINE το οποίο αφορά στην εξέλιξη της ακτογραμμής, το LITPROF το οποίο ασχολείται με την εγκάρσια εξέλιξη της ακτογραμμής και το LITTREN το οποίο αφορά στην απόθεση των ιζημάτων σε κοιλάτητες στον πυθμένα (trenches) (http://tapchi.vnu.edu.vn/e_4_07/B6.pdf)

Σύμφωνα με το DHI, το STP και το LITDRIFT αποτελούν τα κυριότερα μέρη του LITPACK. Το STP επιλύει την εξίσωση διάχυσης ιζημάτων με αποτέλεσμα να περιγράφει τη στερεομεταφορά μη συνεκτικών ιζημάτων. Εφαρμόζεται για κυματισμούς και ρεύματα τυχαίας γωνίας, για θραυόμενους ή μη κυματισμούς, για επίπεδους πυθμένες ή πυθμένες με αμμοκύματα, για ομοιόμορφο ή διαβαθμισμένο υλικό πυθμένα και για να περιγράψει τις επιπτώσεις της κλίσης του πυθμένα και της ροής.

Σύμφωνα με τους Engelund and Fredsøe (1976), η μεταφορά ιζήματος στον πυθμένα προσδιορίζεται συναρτήσει της διατμητικής τάσης του πυθμένα μέσω της αδιάστατης διατμητικής τάσης του πυθμένα, θ :

$$\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gd} \quad (58)$$

όπου

s η σχετική πυκνότητα των ιζημάτων, U_f η διατμητική ταχύτητα, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και d το μέγεθος των κόκκων.

Η στερεομεταφορά του αιωρούμενου φορτίου, q_s , περιγράφεται από τη συγκέντρωση του ιζήματος C , η οποία προσδιορίζεται από την κατακόρυφη εξίσωση της τυρβώδους διάχυσης:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\varepsilon_s \frac{\partial C}{\partial z} \right] + w \frac{\partial C}{\partial z} \quad (59)$$

Όπου ε_s ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης, w η ταχύτητα καθίζησης των ιζημάτων, t ο χρόνος και z η κατακόρυφη συντεταγμένη. Όταν $z = 2d$, η συγκέντρωση στον πυθμένα είναι ίση με C_b , η οποία είναι συνάρτηση του θ και ισχύει όταν $\theta > 0.8$.

Η στερεομεταφορά του αιωρούμενου φορτίου, q_s , υπολογίζεται ως εξής:

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D C U_{mean} dy dt \quad (60)$$

Τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο STP είναι το βάθος του νερού, η κλίση του πυθμένα, τα χαρακτηριστικά του κυματισμού και του ιζήματος και η ταχύτητα και η διεύθυνση του ρεύματος. Το μοντέλο δίνει τιμές για τη συγκέντρωση, την ταχύτητα, την στερεομεταφορά του αιωρούμενου φορτίου σε δύο διευθύνσεις, το συνολικό φορτίο του πυθμένα σε σύρση και αιώρηση και οι χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές των ταχυτήτων της τριβής και του πυθμένα.

Το STP και ένα παράκτιο υδροδυναμικό μοντέλο, συνδυασμένα με το LITDRIFT, περιγράφει το παράκτιο φορτίο. Το LITDRIFT προσομοιώνει την εγκάρσια διανομή του ύψους των κυμάτων και τα κατά μήκος ρεύματα, με αποτέλεσμα να περιγράφει με λεπτομερή τρόπο την εγκάρσια διανομή της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής. Επιλύει την εξίσωση ορμής και εφαρμόζεται στις περιπτώσεις των παλιρροϊκών ρευμάτων, όταν παρατηρείται διάθλαση, ρήχωση και θραύση και όταν η τριβή στον πυθμένα και η κατανομή των ιζημάτων είναι ανομοιόμορφη.

Το υδροδυναμικό μοντέλο LITDRIFT, περιγράφει τη διάδοση, τη ρήχωση και τη θραύση των κυματισμών, περιλαμβάνει υπολογισμούς που αφορούν τις κινητήριες δυνάμεις που οφείλονται στις τάσεις ακτινοβολίας, καθώς επίσης και τη δυναμική ισορροπία μεταξύ

της κατά μήκος και της εγκάρσιας διεύθυνσης, δίνοντας τις ταχύτητες των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής. Το μοντέλο εφαρμόζεται και σε ακτές με αναβαθμούς, ενώ οι συνθήκες θεωρούνται ομοιόμορφες σε ευθύγραμμες ακτές (http://www.mikebydhi.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/marine/LITPA_CKShortDescription.pdf).

Το προφίλ ταχυτήτων των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\tau_b - \frac{d}{dy} \left[\rho E D \frac{du}{dy} \right] = -\frac{ds_{xy}}{dy} + \tau_w + \tau_{cur} \quad (61)$$

όπου

τ_b η διατμητική τάση του πυθμένα λόγω του ρεύματος κατά μήκος της ακτής, ρ η πυκνότητα του νερού, E ο συντελεστής ορμής, D το βάθος του νερού, u η ταχύτητα του ρεύματος κατά μήκος της ακτής, y συντεταγμένη της ακτής, S_{xy} η διατμητική συνιστώσα της τάσης ακτινοβολίας και τ_w και τ_{cur} οι κινητήριες δυνάμεις λόγω του ανέμου και των παράκτιων ρευμάτων.

Αφού γίνει ο υπολογισμός των σημείων που περιγράφουν το ρεύμα κατά μήκος της ακτής, επιλέγονται εκείνα που αντιπροσωπεύουν το παράκτιο φορτίο ενώ οι υπολογισμοί οι οποίοι αφορούν στη στερεομεταφορά ενσωματώνονται αυτόματα από το μοντέλο STP. Στον υπολογισμό της συνολικής στερεομεταφοράς, συνεισφέρει η μεταφορά ιζημάτων από περιοχές όπου παρατηρείται θραύση κυματισμών. Έτσι, η επιλογή των σημείων γίνεται πρωταρχικά από αυτές τις περιοχές. Στις περιπτώσεις ακτών με αναβαθμούς, τα σημεία που χρησιμοποιούνται βρίσκονται πάνω στους αναβαθμούς, όπου συντελείται η θραύση.

Στο μοντέλο εισέρχονται στοιχεία τα οποία αφορούν στη βαθυμετρία, την τραχύτητα του πυθμένα και τα χαρακτηριστικά των κόκκων κάθε σημείου, τη στάθμη του νερού, τα χαρακτηριστικά του κυματισμού (ύψος, περίοδος, γωνία) και την ταχύτητα του παλιρροιακού ρεύματος. Στα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνεται το φορτίο

πυθμένα και η μεταφορά του αιωρούμενου φορτίου, το συνολικό φορτίο και η εγκάρσια διανομή του συνολικού ετήσιου παράκτιου φορτίου.

Το LITLINE, βασιζόμενο στα αποτελέσματα του LITDRIFT, υπολογίζει τη θέση της ακτογραμμής έχοντας ως δεδομένα εισόδου το κυματικό κλίμα. Το μοντέλο βασίζεται σε μια γραμμική θεωρία, σύμφωνα με την οποία το εγκάρσιο προφίλ της ακτογραμμής παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια της διάβρωσης/απόθεσης. Εφαρμόζεται στις περιπτώσεις στις οποίες μελετώνται οι αλλαγές στην ακτογραμμή λόγω φυσικών παραγόντων και έργων προστασίας (πρόβολοι, κυματοθραύστες, θωράκιση) και λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της περίθλασης στην περίπτωση των προβόλων και των κυματοθραυστών. Στηρίζεται στην εξίσωση συνέχειας για όγκους ιζημάτων:

$$\frac{dy_c(x)}{dt} = -\frac{1}{h_{act}(x)} \frac{\partial Q(x)}{\partial x} + \frac{Q_{sou}(x)}{h_{act}(x)\Delta x} \quad (62)$$

όπου

$y_c(x)$ η θέση της ακτογραμμής, t ο χρόνος, $Q(x)$ η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτογραμμής, x η κατά μήκος θέση της ακτογραμμής, $h_{act}(x)$ το ύψος της εγκάρσιας διατομής, Δx το βήμα κατά μήκος της ακτής και $Q_{sou}(x)$ όρος εκφρασμένος σε όγκο.

Στο μοντέλο εισάγονται η θέση της ακτογραμμής, τα χαρακτηριστικά του ιζήματος, οι υδρολογικές συνθήκες, το κυματικό κλίμα, παράμετροι που αφορούν τα παράκτια έργα (αριθμός, θέση, διαστάσεις), ο συντελεστής τραχύτητας του πυθμένα, οι ιδιότητες των αμμόλοφων και οι ισοβαθείς. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι η θέση της ακτογραμμής, το βάθος του πυθμένα, ο ρυθμός της στερεομεταφοράς, η συσσώρευση του ποσοστού στερεομεταφοράς και η τιμή μονάδας της στερεομεταφοράς.

Το LITTREN βρίσκει εφαρμογή στις περιοχές όπου το αιωρούμενο φορτίο δεν βρίσκεται σε ισορροπία με τις υδροδυναμικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής και πιο συγκεκριμένα σε συνθήκες:

- Μη ισόρροπης μεταφοράς ιζημάτων σε συνδυασμό κυμάτων και ρευμάτων.

- Πλήρης μορφολογικής ανατροφοδότησης μεταξύ της αλλαγής του βάθους του πυθμένα, των κυμάτων, των ρευμάτων και της στερεομεταφοράς.
- Διάθλασης ρευμάτων και κυμάτων.

Η βασική εξίσωση του μοντέλου είναι:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w \frac{\partial c}{\partial z} \quad (63)$$

όπου c η συγκέντρωση του ιζήματος, t ο χρόνος, ε_s τυρβώδης εσωτερική τριβή, w η ταχύτητα πτώσης των ιζημάτων, z η στάθμη του πυθμένα.

Οι διακυμάνσεις του πυθμένα περιγράφονται από την εξίσωση συνέχειας των ιζημάτων του πυθμένα:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{1}{(1-n)} \frac{\partial q}{\partial x} \quad (64)$$

όπου n το πορώδες του πυθμένα, q η στερεομεταφορά και x η οριζόντια συντεταγμένη.

Ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο είναι η βαθυμετρία, αυθαίρετες χρονοσειρές μεγεθών κύματος/ρευμάτων, η διεύθυνση και η στάθμη του νερού, η διάμετρος των κόκκων και η ταχύτητα πτώσης. Δεδομένα εξόδου είναι η εγκάρσια διατομή του πυθμένα, οι μεταβολές του πυθμένα και η συνολική στερεομεταφορά.

Το *LITPROF*, βασιζόμενο στα αποτελέσματα του STP για το ρυθμό της μεταφοράς των ιζημάτων, επιλύει την εξίσωση συνέχειας των ιζημάτων του πυθμένα, περιγράφοντας έτσι την εγκάρσια μεταβολή της ακτογραμμής. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη του τις επιδράσεις της ρήχωσης, της θραύσης, της μεταφοράς και των παράκτιων έργων.

Οι μεταβολές του πυθμένα περιγράφονται από την εξίσωση συνέχειας των ιζημάτων ως εξής, με την προϋπόθεση ότι η στερεομεταφορά στην ακτογραμμή είναι μηδέν:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{1-n} \frac{\partial q_s}{\partial x} \quad (65)$$

όπου h το βάθος του πυθμένα, n το πορώδες του υλικού του πυθμένα

Το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να βασιστεί απευθείας στο ρυθμό της στερεομεταφοράς, ο οποίος έχει υπολογιστεί από τις τοπικές παραμέτρους του κυματισμού, και αυτό γιατί δεν είναι φυσικά ορθή η απαίτηση για άμεση ανταπόκριση της στερεομεταφοράς στις μεταβολές των υδροδυναμικών συνθηκών (Roelvink and Stive, 1988). Ουσιαστικά, δεν υπάρχει καμία θεωρία που να περιγράφει την εγκάρσια μεταβολή της στερεομεταφοράς και έχει εφαρμοστεί ένας μετασχηματισμός της στερεομεταφοράς, ο οποίος υπολογίζεται από τις τοπικές συνθήκες. Ο μετασχηματισμός υποδεικνύει ότι η κυκλοφορία του ρεύματος δεν προσαρμόζεται αμέσως στις κινητήριες δυνάμεις αλλά αναπτύσσεται σταδιακά. Αυτό δείχνει ότι η μέγιστη στερεομεταφορά κινείται προς την ακτή σε σχέση με τις κινητήριες δυνάμεις. Κατά συνέπεια, η στερεομεταφορά, q_{sl} , δίνεται από την παρακάτω σχέση (http://www.mikebydhi.com/upload/dhisoftwarearchive/shortdescriptions/marine/LITPA_CKShortDescription.pdf):

$$\frac{\partial q_{sl}}{\partial x} = \frac{q_s - q_{sl}}{L} \quad (66)$$

όπου q_{sl} η στερεομεταφορά, L η κλίμακα μήκους.

Δεδομένα εισόδου είναι η βαθυμετρία της εγκάρσιας διατομής, οι αυθαίρετες χρονοσειρές του ύψους κύματος και της στάθμης της επιφάνειας και η βάση δεδομένων του ρυθμού μεταφοράς. Δεδομένα εξόδου του μοντέλου είναι η ανταπόκριση της ακτογραμμής σε διάφορες συνθήκες και στα παράκτια έργα, η πορεία του προστιθέμενου υλικού (διαδικασία αναπλήρωσης ακτογραμμής) και η μορφή της διατομής.

3.10. ONELINE Model

Το αριθμητικό μοντέλο ONELINE συστάθηκε το 1988 από το Πανεπιστήμιο του Queens του Καναδά. Προσομοιώνει τη μεταβολή της ακτογραμμής σε ακτές όπου υπάρχουν παράκτιες κατασκευές και πολύπλοκες οριακές συνθήκες. Βασίζεται στη γραμμική θεωρία και δεν πραγματοποιεί καμία υπόθεση όσον αφορά στη γωνία, σεβόμενο τη

γωνία του προσπίπτον κυματισμού και τη διεύθυνση της ακτογραμμής. Ακολούθησαν πολλές βελτιώσεις, με την τελευταία έκδοση να ενσωματώνει την επίδραση της εγκάρσιας στερεομεταφοράς στη μεταβολή της ακτογραμμής και περιλαμβάνει μια βελτιωμένη μαθηματική διατύπωση των οριακών συνθηκών και των εσωτερικών περιορισμών (Mohamed Dabees, J. William Kamphuis, 1998).

Το μοντέλο στηρίζεται στην παραδοχή ότι η διατομή της ακτής μετακινείται παράλληλα με τον εαυτό της μέχρι το ενεργό βάθος. Η διατήρηση του ιζήματος για μια μικρή απόσταση της ακτογραμμής Δx , περιγράφεται ως ακολούθως:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{1}{d_p} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} + q \right) \quad (67)$$

όπου y η θέση της ακτογραμμής, x το γεωγραφικό μήκος, t ο χρόνος, Q η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής, q ο μέσος ρυθμός στερεομεταφοράς και d_p είναι το άθροισμα του ενεργού βάθους και το ύψος του αναβαθμού. Για τον υπολογισμό της κατά μήκος στερεομεταφοράς χρησιμοποιείται η μέθοδος του Kamphuis (Kamphuis, 1991) (Hanson and Kraus, 1989).

$$Q = CKH_b^2 T^{1.5} \beta^{0.75} D^{-0.25} \left[\sin^{0.6}(2a_b) - \frac{2}{\beta} \cos a_b \frac{\partial H_b}{\partial x} \right] \quad (68)$$

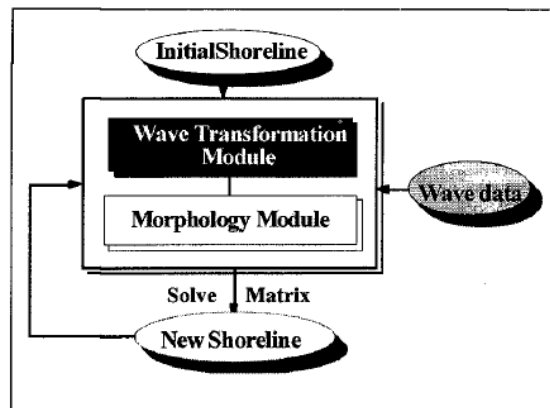
όπου Q ο ρυθμός της κατά μήκος στερεομεταφοράς, C σταθερά η οποία είναι ίση με 7.3 όταν το Q εκφράζεται σε $\frac{m^3}{hr}$, K εμπειρικός συντελεστής για τη βαθμονόμηση του μοντέλου, H_b το ύψος κύματος στη θραύση, T η περίοδος του κύματος, β η κλίση του πυθμένα στη ζώνη θραύσης, a_b η γωνία του θραυόμενου κυματισμού και D το ονομαστικό μέγεθος των κόκκων.

Η εγκάρσια στερεομεταφορά υπολογίζεται με βάση τη μέθοδο του Bailard (1982).

$$q = k_s \frac{\rho C_f u_b^3}{(\rho_s - \rho) g p} \left\{ \frac{\varepsilon_B}{\tan \varphi} \left(\psi_1 + \frac{2}{3} \delta_u - \frac{\tan \beta}{\tan \varphi} u_3^* \right) + \frac{u_b}{\omega_s} \varepsilon_s \left[\psi_2 + \delta_u u_3^* - \frac{u_o}{\omega_s} \varepsilon_s \tan \beta u_5^* \right] \right\} \dots (69)$$

όπου $\delta_u, \psi_1, \psi_2, u_3^*$ και u_5^* είναι ροπές ταχύτητας όπως έχουν καθοριστεί από τον Bailard (1982) συναρτήσει του ύψους κύματος, φ η γωνία των εσωτερικών τριβών, ε_B και ε_S είναι οι συντελεστές του φορτίου πυθμένα και του αιωρούμενου φορτίου αντίστοιχα, C_f ο συντελεστής αντίστασης, u_b η ταχύτητα του νερού στον πυθμένα, ρ και ρ_s είναι αντίστοιχα η πυκνότητα του νερού και των ιζημάτων, p η συγκέντρωση του ιζήματος, ω_s η ταχύτητα πτώσης και k_s εμπειρικός συντελεστής.

Η δομή του μοντέλου παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 3.6). Η ακτογραμμή διακριτοποιείται σε ένα πεπερασμένο κάρναβο και ο χρόνος της προσομοίωσης χωρίζεται σε χρονικά βήματα. Για κάθε χρονικό βήμα και σημείο του καννάβου, υπολογίζονται η ρήχωση, η διάθλαση, η περίθλαση και η στερεομεταφορά. Στη συνέχεια επιλύονται ταυτόχρονα οι εξισώσεις, δίνοντας τη νέα ακτογραμμή.



Εικόνα 3.6: Δομή μοντέλου ONELINE

Πηγή: ONELINE, A NUMERICAL MODEL FOR SHORELINE CHANGE, Mohamed Dabees and J. William Kamphuis, 1998

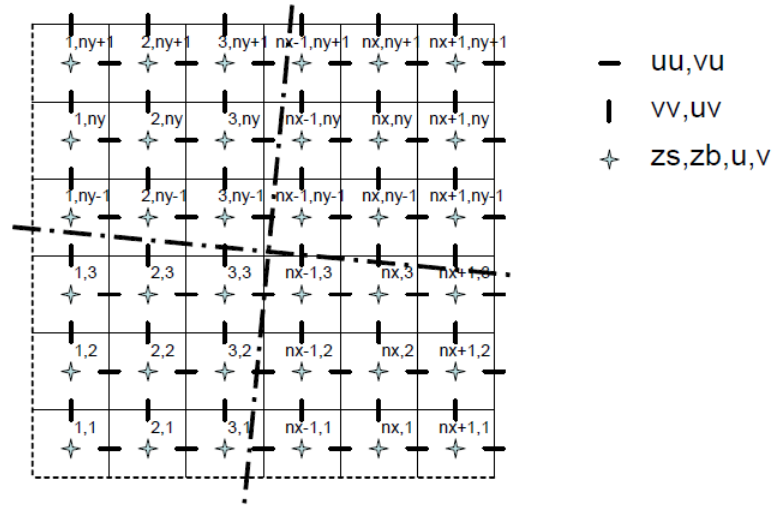
Όπως έχει αναφερθεί, η τελευταία έκδοση του μοντέλου περιλαμβάνει μια βελτιωμένη μαθηματική διατύπωση των οριακών συνθηκών και των εσωτερικών περιορισμών. Οι οριακές συνθήκες καθορίζονται μέσω ανάλυσης ευαισθησίας και βαθμονόμησης του μοντέλου, γεγονός που επιτρέπει την προσομοίωση πολύπλοκων παράκτιων συστημάτων, όπως είναι τα υποβρύχια φαράγγια. Επιπρόσθετα, η αναπαράσταση κατασκευών όπως είναι οι πρόβολοι και οι κυματοθραύστες, έχει βελτιωθεί με αποτέλεσμα να παρέχει ακριβή ανταπόκριση της ακτογραμμής στις παράκτιες

κατασκευές. Πραγματοποιήθηκαν αρκετές δοκιμές του μοντέλου, τα αποτελέσματα των οποίων δείχνουν ότι το μοντέλο παρέχει μια ρεαλιστική προσομοίωση της επιρροής των παράκτιων κατασκευών στη στερεομεταφορά και στην αλλαγή της ακτογραμμής.

3.11.XBeach

Το μοντέλο XBeach είναι ένα μαθηματικό μοντέλο ανοιχτού κώδικα, το οποίο αναπτύχθηκε από το UNESCO | IHE (Institute for Water Education), το Πανεπιστήμιο του Delft και το Πανεπιστήμιο του Μαϊάμι το 2006 και υπολογίζει τη μεταβολή της ακτής σε φαινόμενα καταιγίδας και τυφώνων, συμπεριλαμβανομένου του μηχανισμού της διάβρωσης και της θραύσης. Χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παράκτιες περιοχές καθώς επίσης και για μεγαλύτερες κλίμακες, όπου υπεισέρχονται οριακές συνθήκες προερχόμενες από τον άνεμο και τα κύματα. Το μοντέλο επιλύει δισδιάστατες εξισώσεις για τη διάδοση των κυμάτων, τη στερεομεταφορά και τις μεταβολές στον πυθμένα και μη γραμμικές εξισώσεις των αβαθών νερών της μάζας και της ορμής, για ποικίλες κυματικές συνθήκες και συνθήκες ροής. Το XBeach χρησιμοποιεί τη μέθοδο GLM (Generalized Lagrangian Mean), η οποία αναπτύχθηκε από τους D.G. Andrews and M.E. McIntyre (1978) για να συμπεριλάβει το ρεύμα πυθμένα και τις επιπτώσεις του στη διατμητική τάση του πυθμένα και τη στερεομεταφορά.

Το μοντέλο χρησιμοποιεί ένα σύστημα συντεταγμένων, σύμφωνα με το οποίο ο άξονας x είναι στραμμένος προς την ακτή και σχεδόν κάθετα με αυτήν και ο άξονας y έχει κατεύθυνση κατά μήκος της ακτής. Το μοντέλο είχε αρχικά αναπτυχθεί σε περιβάλλον Matlab και στη συνέχεια μετατράπηκε σε Fortran 90/95, η οποία και χρησιμοποιείται την παρούσα στιγμή. Ο κάρναβος που εφαρμόζεται είναι κλιμακωτής μορφής, στον οποίο τα υψόμετρα του πυθμένα, η στάθμη και τα βάθη του νερού και οι συγκεντρώσεις, ορίζονται στα κέντρα των κελιών. Όσον αφορά στις ταχύτητες και τη στερεομεταφορά, ορίζονται σε u - και v - σημεία. Οι ταχύτητες σε αυτά τα σημεία συμβολίζονται με u_u και v_v αντίστοιχα. Η στάθμη του νερού, z_s , και το υψόμετρο του πυθμένα, z_b , ορίζονται θετικά προς τα πάνω (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7: Κλιμακωτής μορφής κάρναβος

Πηγή: XBeach Annual Report and Model Description, 2007

Η δράση του κύματος δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D}{\sigma} \quad (70)$$

όπου

$$A(x, y, z) = \frac{S_w(x, y, z)}{\sigma(x, y)} \quad (71)$$

όπου S_w η ενέργεια του κύματος σε κάθε διεύθυνση και σ η ενδογενής συχνότητα κυμάτων. Η διάδοση της δράσης του κύματος στην x και y διεύθυνση δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$c_x(x, y, \theta) = c_g(x, y) \cos \theta + u(x, y) \quad (72)$$

$$c_y(x, y, \theta) = c_g(x, y) \sin \theta + v(x, y) \quad (73)$$

όπου θ η γωνία πρόσπτωσης. Η ταχύτητα διάδοσης στον θ χώρο υπολογίζεται ως εξής:

$$c_{\theta}(x, y, \theta) = \frac{\sigma}{\sin h 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \sin \theta \left(\sin \theta \frac{\partial v}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (74)$$

όπου το k δίνεται από τις εξισώσεις:

$$\frac{\partial k_x}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial x} = 0 \quad (75)$$

$$\frac{\partial k_y}{\partial t} + \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0 \quad (76)$$

όπου ω είναι η απόλυτη ακτινική συχνότητα και είναι ίση με $\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{u}$, $\sigma = \sqrt{gk \tan h kh}$ και $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$.

Η συνολική ταχύτητα ορίζεται από τη γραμμική θεωρία κύματος:

$$c_g = nc = \left(\frac{1}{2} + \frac{kh}{\sin h 2kh} \right) \frac{\sigma}{k} \quad (77)$$

Η διασπορά της ενέργειας του κύματος λόγω της θραύσης των κυμάτων, σύμφωνα με τον Baldock et al. (1998) δίνεται ως ακολούθως:

$$\bar{D} = \frac{1}{4} \alpha Q_b \rho g f_m (H_b^2 + H_{rms}^2) \quad (78)$$

όπου $\alpha = O(1)$ και f_m αντιπροσωπεύει τη μέση ενδογενή συχνότητα. Το ποσό των θραυόμενων κυμάτων δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_b = \exp \left[- \left(\frac{H_b^2}{H_{rms}^2} \right) \right] \quad (79)$$

και το ύψος του θραυόμενου κύματος ισούται με:

$$H_b = \frac{0.88}{k} \tan h \left[\frac{\gamma kh}{0.88} \right] \quad (80)$$

όπου γ είναι παράμετρος βαθμονόμησης και σύμφωνα με τους Battjes and Stive (1985) είναι ίση με:

$$\gamma = 0.5 + 0.4 \tanh(33s_0) \quad (81)$$

όπου s_0 είναι η καμπυλότητα του κύματος στα βαθιά. Οι Ruessink et.al (2003) πρότεινε ένα εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της παραμέτρου, σύμφωνα με τον οποίο εξαρτάται από το βάθος του νερού:

$$\gamma = 0.76kh + 0.29 \quad (82)$$

Η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος ορίζεται ως εξής:

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{8 \int S_w(x,y,\theta) d\theta}{\rho g}} = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho g}} \quad (83)$$

Η συνολική διασπορά του κύματος, \bar{D} , κατανέμεται ομοιόμορφα στις διευθύνσεις του κύματος:

$$D(x, y, \theta) = \frac{S_w(x,y,\theta)}{E_w(x,y)} \bar{D} \quad (84)$$

Η στερεομεταφορά διαμορφώνεται με την οριζόντια εξίσωση διάχυσης του μέσου βάθους (Gallapatti and Vreugdenhil, 1985):

$$\frac{\partial hc}{\partial t} + \frac{\partial hc u^E}{\partial x} + \frac{\partial hc v^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hc_{eq} - hc}{T_s} \quad (85)$$

όπου C είναι η συγκέντρωση των ιζημάτων. Η μεταφορά του ιζήματος αντιπροσωπεύεται από ένα χρόνο προσαρμογής T_s , ο οποίος καθορίζεται ως εξής:

$T_s = \max\left(0.05 \frac{h}{w_s}, 0.2\right) s$, όπου μικρές τιμές υποδεικνύουν στιγμιαία αντίδραση ιζήματος.

Οι διαφορικές εξισώσεις για την οριζόντια μεταφορά διάχυσης του ιζήματος επιλύονται με πεπερασμένες διαφορές. Η οριζόντια μεταφορά κατά x δίνεται ως ακολούθως:

$$\left(\frac{\partial hCu^E}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{(h^n C^n u^{E,n+1})_{i,j} - (h^n C^n u^{E,n+1})_{i-1,j}}{x_{i,j} - x_{i-1,j}}, u_{i,j}^{E,n+1} > 0 \quad (86)$$

$$\left(\frac{\partial hCu^E}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{(h^n C^n u^{E,n+1})_{i+1,j} - (h^n C^n u^{E,n+1})_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}}, u_{i,j}^{E,n+1} < 0 \quad (87)$$

Παρόμοιας μορφής είναι και οι εξισώσεις για την y διεύθυνση.

Η οριζόντια διάχυση υπολογίζεται ως εξής:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(D_H h \frac{\partial C}{\partial x}\right)\right)_{i,j} = \frac{(D_H h C \partial x)_{i+1,j} - (D_H h C \partial x)_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} \quad (88)$$

Η εγκάρσια κλίση στις συγκεντρώσεις ιζημάτων είναι ίση με:

$$C_{\partial x} = \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right)_{i,j} = \frac{C_{i+1,j} - C_{i,j}}{x_{i+1,j} - x_{i,j}} \quad (89)$$

και η κατά μήκος κλίση στις συγκεντρώσεις ιζημάτων είναι ίση με:

$$\left(\frac{\partial C}{\partial y}\right)_{i,j} = \frac{C_{i,j+1} - C_{i,j}}{y_{i,j+1} - y_{i,j}} \quad (90)$$

Ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων ισορροπίας των ιζημάτων υπολογίζεται από τη μαθηματική εξίσωση του Soulsby-van Rijn (1997):

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left((|u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d})^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - a_b m) \quad (91)$$

όπου m η κλίση του πυθμένα, a_b είναι παράμετρος βαθμονόμησης, A_{sb} και A_{ss} οι συντελεστές του φορτίου πυθμένα και του αιωρούμενου αντίστοιχα, οι οποίοι είναι συνάρτηση του μεγέθους και της σχετικής πυκνότητας του ιζήματος και του τοπικού βάθους του νερού και u_{rms} η τροχιακή ταχύτητα των κυμάτων μικρού μήκους κύματος, η οποία είναι ίση με $u_{rms} = \frac{\pi H_{rms}}{T_{rep} \sqrt{2} \sinh(kh + \delta H_{rms})}$.

Η μετακίνηση υλικού του πυθμένα παρατηρείται όταν η κλίση του πυθμένα υπερβεί μία τιμή:

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr}$$

όπου η εκτιμώμενη κλίση του πυθμένα υπολογίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial z_b}{\partial x} = \frac{z_{b,i+1,j} - z_{b,i,j}}{\Delta x} \quad (92)$$

Η μεταβολή του πυθμένα μέσα σε ένα βήμα χρόνου δίνεται:

$$\Delta z_b = \min \left(\left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, 0.005 \right), \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \quad (93)$$

$$\Delta z_b = \min \left(- \left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, -0.005 \right), \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \quad (94)$$

όπου η τιμή 0.005 εισάγεται για αποφυγή δημιουργίας μεγάλου εύρους κυμάτων. Η αντίστοιχη τροποποίηση του πυθμένα δίνεται ως εξής:

$$z_{b,i,j}^{n+1} = z_{b,i,j}^n + \Delta z_{b,i,j} \quad (95)$$

$$z_{b,i+1,j}^{n+1} = z_{b,i+1,j}^n - \Delta z_{b,i,j} \quad (96)$$

Αντίστοιχη τροποποίηση παρατηρείται στη στάθμη του νερού. Αντίστοιχες εξισώσεις ισχύουν και για τη διεύθυνση y .

Το μοντέλο εφαρμόζεται σε ακτές με μήκος αρκετών χιλιομέτρων και με ζώνη θραύσης μέχρι 1 χιλιόμετρο. Οι συγκεκριμένοι περιορισμοί, υποδεικνύουν ότι το μοντέλο απαιτεί οριακές συνθήκες οι οποίες σχετίζονται με την παλίρροια, τον άνεμο, τη βαθυμετρία και τους κυματισμούς σε βαθύτερα νερά. Ως δεδομένα εισόδου λαμβάνονται η βαθυμετρία, η στάθμη του νερού, το μέγεθος των ιζημάτων και οι διάφορες παράμετροι του μοντέλου. Τα δεδομένα εξόδου είναι τα ύψη κύματος, οι ταχύτητες, η στάθμη του νερού, οι συγκεντρώσεις των ιζημάτων, ο ρυθμός της στερεομεταφοράς, η μεταβολή του πυθμένα, η βαθυμετρία και οι επιπλέον μεταβλητές του μοντέλου.

Το μοντέλο δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις μεγάλων βαθών αλλά χρησιμοποιείται για μη μόνιμες συνθήκες. Πλεονέκτημα του μοντέλου αποτελεί το γεγονός ότι έχει καλές προκαθορισμένες τιμές, το οποίο επιτρέπει τη γρήγορη σύστασή του και την έγκαιρη διερεύνηση τυχόν προβλημάτων. Χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις μακροπρόθεσμων προσομοιώσεων, καθώς έχει τη δυνατότητα της μονοδιάστατης επιλογής. Όσον αφορά στο δισδιάστατο χαρακτήρα του, αυτός είναι περιορισμένος λόγω της απουσίας διεργασιών που συντελούνται στα βαθιά και των προβλημάτων μνήμης κατά τη διάρκεια της δημιουργίας χρονοσειρών μεγάλων κυμάτων. Έτσι, το XBeach προτιμάται στις περιπτώσεις όπου παρατηρείται μετακίνηση των χερσαίων συνόρων και όταν η εγκάρσια διατομή της ακτής ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα.

Επιπρόσθετα, το μοντέλο ενσωματώνει τις διεργασίες που συντελούνται κατά την εγκάρσια στερεομεταφορά και έρευνες δείχνουν ότι η τυχαιότητα των κυμάτων εξάγεται

σε μια διασπορά περίπου του 20% της στερεομεταφοράς. Το μοντέλο εφαρμόζεται επιτυχώς σε αμμώδεις παραλίες, γεγονός το οποίο οδήγησε στην ευρύτερη εφαρμογή του και πιο συγκεκριμένα σε παραλίες με χαλίκια. Στο συμπέρασμα αυτό κατέληξαν οι Jamal et al. (2010), οι οποίοι έδειξαν ότι η μεταβολή των ταχυτήτων ροής και η ενσωμάτωση της διήθησης, παρέχουν τη δυνατότητα αναπαραγωγής σχηματισμού αναβαθμού σε παραλίες με χαλίκια. Επιπλέον, μελέτες των Alegria - Arzaburu et al. (2010) και Williams et al. (2012) κατέδειξαν ότι το μοντέλο προσομοιώνει ικανοποιητικά τις διαβρωτικές διατομές τέτοιων ακτών.

Η χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου είναι όλο και πιο διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια, εξ 'ου και η συνεχής ανάπτυξή του. Όσον αφορά στην προσομοίωση της διάβρωσης γύρω από θαλάσσιους τοίχους και θωρακίσεις, μελέτες κατέδειξαν ότι το μοντέλο παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα (van Geer et al., 2012). Παρόλα αυτά, η διάβρωση ανάντη των κατασκευών υποτιμάται, καθώς το μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνει μηχανισμούς αύξησης των κυμάτων μικρού μήκους κύματος. Ο Thiel de Vries το 2012, συμπεριέλαβε στις μελέτες του το μηχανισμό αυτό, ώστε η διάβρωση ανάντη των έργων να προσομοιώνεται όσο το δυνατό καλύτερα.

Στην περιοχή Εμίλια Ρομάνια στη Βόρεια Ιταλία, πραγματοποιήθηκε μελέτη με σκοπό την αξιολόγηση προβλέψεων από το μοντέλο XBeach, ως μέρος ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης των επιπτώσεων καταιγίδας. Σε ένα τμήμα της ακτής είναι κατασκευασμένοι έξαλοι κυματοθραύστες. Η μελέτη έδειξε ότι στο τμήμα αυτό, απαιτείται δισδιάστατη προσομοίωση, ώστε να αποφεύγεται η μη ρεαλιστική αύξηση της στάθμης του νερού στην υπήνεμη πλευρά του έργου, η οποία παρατηρείται κατά τις μονοδιάστατες προσομοιώσεις λόγω της αδυναμίας του νερού να κινηθεί πέρα από τη μη πορώδες κατασκευή. Έτσι, οι δισδιάστατες προσομοιώσεις επιτυγχάνουν μείωση των επιπέδων του νερού πίσω από την κατασκευή.

3.12. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Στον πίνακα που ακολουθεί, συνοψίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των μοντέλων που έχουν περιγραφεί παραπάνω, με σκοπό τη μετέπειτα σύγκρισή τους. Η σύγκριση αποσκοπεί στην επιλογή του βέλτιστου μοντέλου, το οποίο εξυπηρετεί καλύτερα τους σκοπούς της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Τα κριτήρια σύγκρισης αφορούν τον τύπο του μοντέλου, αν είναι δηλαδή κλειστού ή ανοιχτού κώδικα, το λειτουργικό σύστημα που απαιτεί το καθένα, το χρόνο προσομοίωσης, τη συμπερίληψη ακτομηχανικών έργων, τη χωρική και χρονική κλίμακα, τα φαινόμενα που λαμβάνουν υπόψη όπως είναι η θραύση, η διάθλαση και η περίθλαση, καθώς επίσης και σε ποιες ακτές εφαρμόζονται. Μέσα από τα παραπάνω, επιλέγεται το μοντέλο εκείνο το οποίο ικανοποιεί τον επιδιωκόμενο στόχο.

Πίνακας 3.3: Σύγκριση μοντέλων εξέλιξης ακτογραμμής

| | Χρονολογία | Λειτουργικό σύστημα | Γλώσσα προγραμματισμού | Τύπος | Χρόνος Προσομοίωσης | Ακτομηχανικά έργα | Χρονική και χωρική κλίμακα | Φαινόμενα | Εφαρμογή |
|----------|------------|------------------------|------------------------------|----------|-----------------------|---|---|--|--|
| GENESIS | 1985 | Windows | Fortran77 | Κλειστός | Λεπτά μέχρι ώρες | Κυμαθοραύστες, πρόβολοι, θαλάσσιοι τοίχοι, αναπλήρωση ακτής | 1-100 km, 1-100 μήνες | Ρήγωση, διάθλαση, περίθλαση, θραύση | Σε οποιοδήποτε τμήμα της ακτής |
| UNIBEST | 1994 | Windows | - | Κλειστός | - | Κυμαθοραύστες, πρόβολοι | Μικρά χρονικά διαστήματα μέχρι δεκαετίες, μέχρι 10 km | Περίθλαση, ρήγωση, διασπορά, παλίρροια | Αμμώδεις και μειωμένης καμπυλότητας ακτές |
| CEM | 2000 | Linux | C | Ανοιχτός | Μέρες | Κυμαθοραύστες, αναπλήρωση ακτής | Μερικά μέχρι χιλιάδες χρόνια, μερικά μέχρι εκατοντάδες km | - | Αμμώδεις ακτές |
| CASCADE | 1995 | Unix, Linux, Mac OS | Fortran77, C | Κλειστός | Λεπτά μέχρι ώρες | Πρόβολοι, θαλάσσιοι τοίχοι | 1-100 km | Θραύση | Παράκτιες περιοχές με εκβολές ποταμών |
| DELFT 3D | 1988 | Linux, Windows | Fortran77, Fortran90, C, C++ | Ανοιχτός | Ώρες μέχρι μέρες | Κυμαθοραύστες, πρόβολοι | 1-100 χρόνια | Θραύση, διάθλαση, ρήγωση. | Μοντελοποίηση παράκτιων περιοχών, ποταμών, εκβολών και λιμένων |
| MIKE 21 | 1985 | Windows | - | Κλειστός | - | Κυμαθοραύστες, πρόβολοι | 1-10 km | Ρήγωση, διάθλαση, περίθλαση, ανάκλαση, θραύση, τριβή πυθμένα | Σε εκβολές ποταμών, κόλπους και παράκτιες περιοχές |
| LITPACK | 1985 | Windows | - | Κλειστός | - | Κυμαθοραύστες, πρόβολοι, θωράκιση | 1-10 km | Διάθλαση, ρήγωση, θραύση, περίθλαση | Ευθύγραμμες και ακτές με αναβαθμούς |
| SAND94 | 1994 | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Κλειστός | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Δεν υπάρχουν στοιχεία |
| ONELINE | 1988 | Windows | - | Κλειστός | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Κυμαθοραύστες, πρόβολοι | Δεν υπάρχουν στοιχεία | Ρήγωση, διάθλαση, περίθλαση | Πολύπλοκες παράκτιες περιοχές |
| XBeach | 2006 | Linux, Mac OS, Windows | Fortran90 | Ανοιχτός | - | Κυμαθοραύστες, θαλάσσιοι τοίχοι, θωρακίσεις | Για μήκη αρκετών km και ζώνη θραύσης μέχρι 1 km | Θραύση | Αμμώδεις ακτές και ακτές με χαλίκια |

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η πλειονότητα των μοντέλων είναι κλειστού τύπου, με εξαίρεση το DELFT3D, το XBeach και το CEM. Όλα τα μοντέλα, πλην του SAND94 για το οποίο δεν υπάρχουν στοιχεία, ενσωματώνουν έργα προστασίας της ακτής. Ζητούμενο της παρούσας εργασίας είναι η ενσωμάτωση από τα μοντέλα, των κυματοθραυστών, τους οποίους δεν περιλαμβάνει το μοντέλο CASCADE.

Όσον αφορά στα μοντέλα κλειστού τύπου, το MIKE 21 και το LITPACK του DHI, το GENESIS, το ONELINE και το UNIBEST εξυπηρετούν τον επιδιωκόμενο στόχο. Μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε για το λιμένα της πόλης Władysławowo Βόρεια της Πολωνίας, και είχε σκοπό τον υπολογισμό της μεταβολής της ακτογραμμής χρησιμοποιώντας τα μοντέλα GENESIS, LITPACK και UNIBEST, κατέδειξε ότι και τα τρία μοντέλα παρείχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, με τα πιο ακριβή να είναι αυτά του UNIBEST και του LITPACK. Το GENESIS απορρίπτεται και για το λόγο ότι δεν είναι σύγχρονο, καθώς έχει αναπτυχθεί το 1985.

Όσον αφορά στα μοντέλα ανοιχτού κώδικα, απορρίπτεται το μοντέλο CEM γιατί ο χρόνος προσομοίωσης που απαιτεί είναι μεγάλος και χρησιμοποιεί ως λειτουργικό σύστημα τα Linux, εν αντιθέσει με το XBeach και το Delft3D των οποίων οι προσομοιώσεις είναι άμεσες και χρησιμοποιούν μεταξύ άλλων τα Windows, τα οποία είναι πιο εύχρηστα. Επιπλέον, είναι λογισμικά του Πανεπιστημίου του Delft, γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι παρέχεται καλή τεχνική υποστήριξη που επιτρέπει την επίλυση τυχόν αποριών και δυσκολιών που πιθανώς να προκύψουν στην πορεία. Μεταξύ των δύο μοντέλων, επιλέγεται το μοντέλο XBeach γιατί παρέχει δισδιάστατη προσομοίωση των κυματισμών, το οποίο επιτρέπει τη συμπερίληψη της ζώνης θραύσης. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα της προσομοίωσης της διάβρωσης σε πιο λεπτομερή βαθμό. Επιπλέον, στις υπό μελέτη περιοχές όπου συμπεριλαμβάνονται παράκτιες κατασκευές, όπως είναι οι κυματοθραύστες, το XBeach χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με το Delft3D. Μελέτη, η οποία είχε σαν σκοπό την πρόβλεψη της τρωτότητας σε παραλίες με αμμοθίνες χρησιμοποιώντας τρία μαθηματικά μοντέλα μεταξύ των οποίων το Delft3D και το XBeach (Filipa S.B.F. Oliveira, 2013), κατέδειξε ότι τα αποτελέσματα του

XBeach είχαν περισσότερη συμβατότητα με τα πειραματικά αποτελέσματα και παρουσίασε καλύτερη επίδοση.

Για την παρούσα εργασία, επιλέγεται το MIKE 21 του DHI, παρόλο που το ONELINE, το UNIBEST, το LITPACK και το XBeach εξυπηρετούν τον επιδιωκόμενο στόχο. Ο λόγος επιλογής είναι το γεγονός ότι αποτελεί ολοκληρωμένο σύστημα, είναι φιλικό προς το χρήστη, απαιτεί ελάχιστα δεδομένα εισόδου και η υπολογιστική διαδικασία είναι μειωμένη. Ο κάρναβος απεικόνισης των αποτελεσμάτων είναι ευέλικτος, γεγονός το οποίο επιτρέπει πιο ακριβή αναπαράσταση της παράκτιας περιοχής και τη μείωση του μεγέθους του κελιού σε περιοχές που ενδιαφέρουν ιδιαίτερα. Προτιμάται σε σχέση με τα υπόλοιπα, καθώς υπάρχει περισσότερη εμπειρία στη χρησιμοποίησή του. Επιπρόσθετα, η εξασφάλιση άδειας χρήσης από το DHI είναι πιο εύκολη, καθώς ο οργανισμός έχει συνεργάτες στην Ελλάδα και παρέχεται άμεση τεχνική υποστήριξη. Το υπολογιστικό μοντέλο του DHI παρέχεται σε έκδοση 2012, υποδεικνύοντας ότι είναι σύγχρονο και εξυπηρετεί τις σημερινές ανάγκες που προκύπτουν από το εκάστοτε πρόβλημα.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στην ενότητα που ακολουθεί, περιγράφεται η περιοχή για την οποία θα εφαρμοστεί το μοντέλο. Αναφέρεται η γεωγραφική θέση της περιοχής, στοιχεία για το ανεμολογικό και κυματικό κλίμα, τα προβλήματα διάβρωσης και παρουσιάζονται τα έργα προστασίας που έχουν προταθεί για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

4.1. Γεωγραφική θέση

Το Λατσί βρίσκεται στο Δήμο Πόλης Χρυσοχούς της Επαρχίας Πάφου στην Κύπρο. Βρίσκεται στα βορειοδυτικά του νησιού, σε απόσταση 35 km βορειοδυτικά της πόλης της Πάφου και σε απόσταση 180 km δυτικά της πρωτεύουσας Λευκωσίας (Εικόνα 4.1).

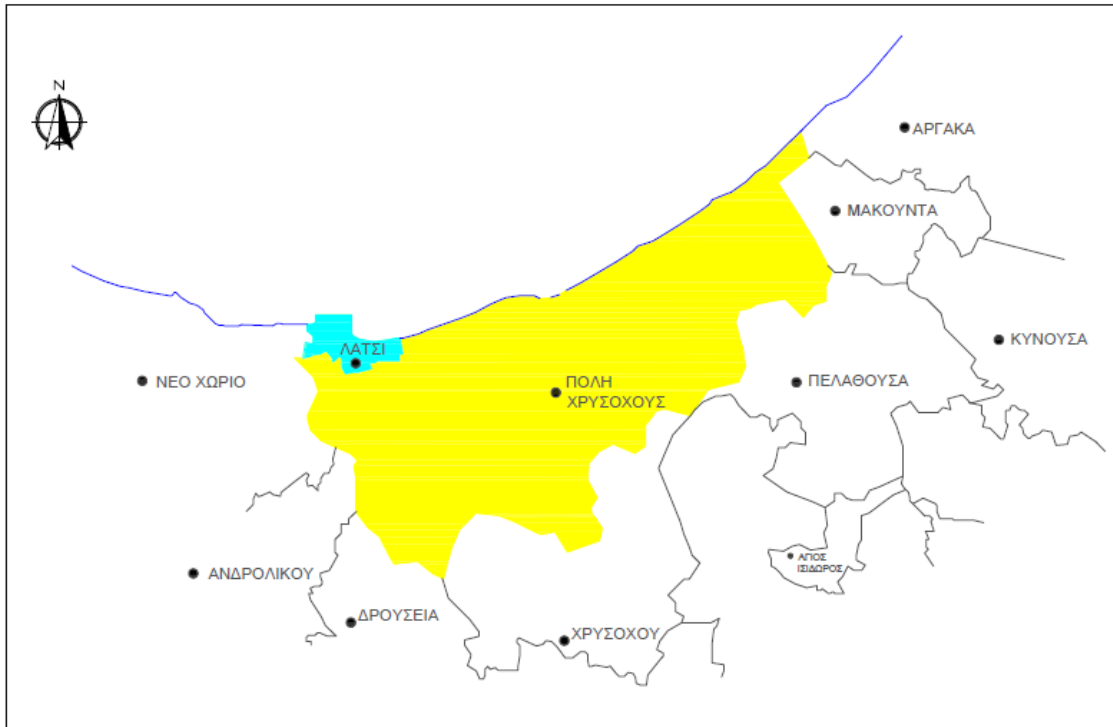


Εικόνα 4.1: Γεωγραφική θέση Λατσιού, Κλίμακα 1:55000

Πηγή: Google Earth

Το Λατσί αποτελεί περιοχή του δήμου Πόλης Χρυσοχούς. Ο δήμος απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα στην εικόνα που ακολουθεί και το Λατσί με γαλάζιο (Εικόνα 4.2). Η

περιοχή συνορεύει με το χωριό Νέο Χωριό, την Ανδρολίκου, τη Δρούσεια, τη Χρυσοχού, την Πελαθούσα, τη Μακούντα και την Αργάκα. Δυτικά της περιοχής και σε απόσταση 10 χιλιομέτρων βρίσκεται η χερσόνησος του Ακάμα, η οποία αποτελεί προστατευόμενη περιοχή και ανήκει στο δίκτυο NATURA.

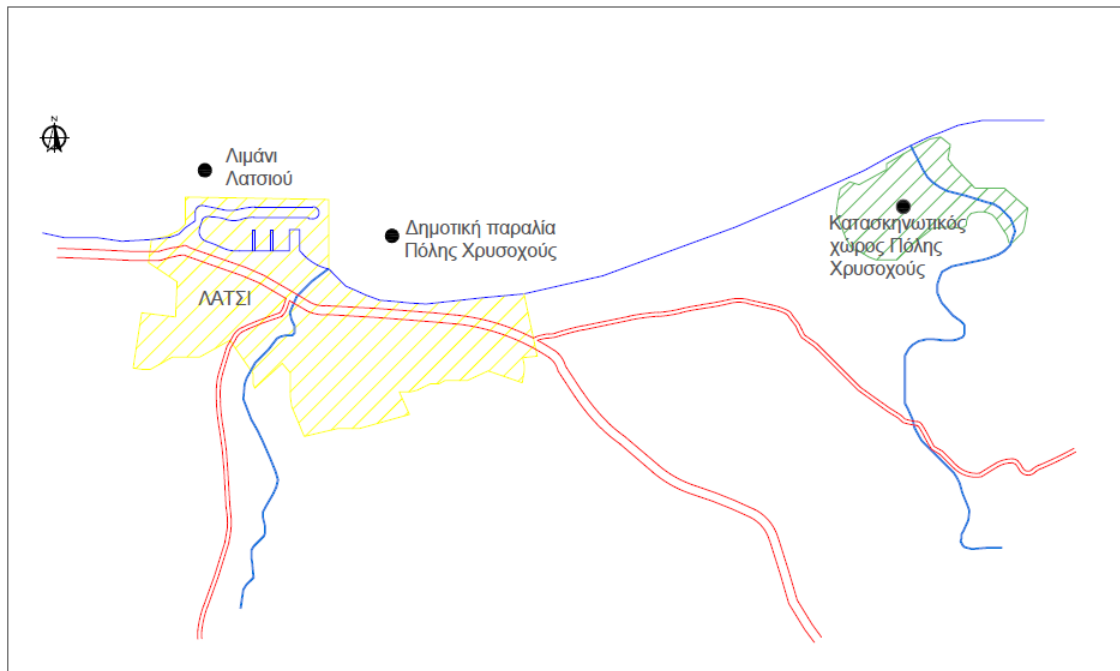


Εικόνα 4.2: Γεωγραφική θέση περιοχής εφαρμογής, Κλίμακα 1: 500

Πηγή: Επεξεργασία μελετητή

Η περιοχή του Λατσιού (Εικόνα 4.3) έχει έκταση 0.6 km² και αποτελεί δημοφιλή τουριστικό προορισμό, κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, καθώς προσελκύει ξένους αλλά και ντόπιους παραθεριστές. Η περιοχή αποτελείται από πολλές ψαροταβέρνες, ξενοδοχειακές μονάδες και οικιστικά συγκρότηματα. Το λιμανάκι, η φυσική ομορφιά και οι βραβευμένες με μπλε σημαία παραλίες, συμβάλλουν ώστε η περιοχή να θεωρείται από τις ομορφότερες της επαρχίας Πάφου. Συγκριτικό πλεονέκτημα της περιοχής είναι το γεγονός ότι βρίσκεται πολύ κοντά στη χερσόνησο του Ακάμα, η οποία συγκεντρώνει

εκατοντάδες επισκέπτες ολόχρονα καθώς επίσης και στα Λουτρά της Αφροδίτης, τοπικό μοναδικής ομορφιάς.



Εικόνα 4.3: Λατσί, Κλίμακα 1:200

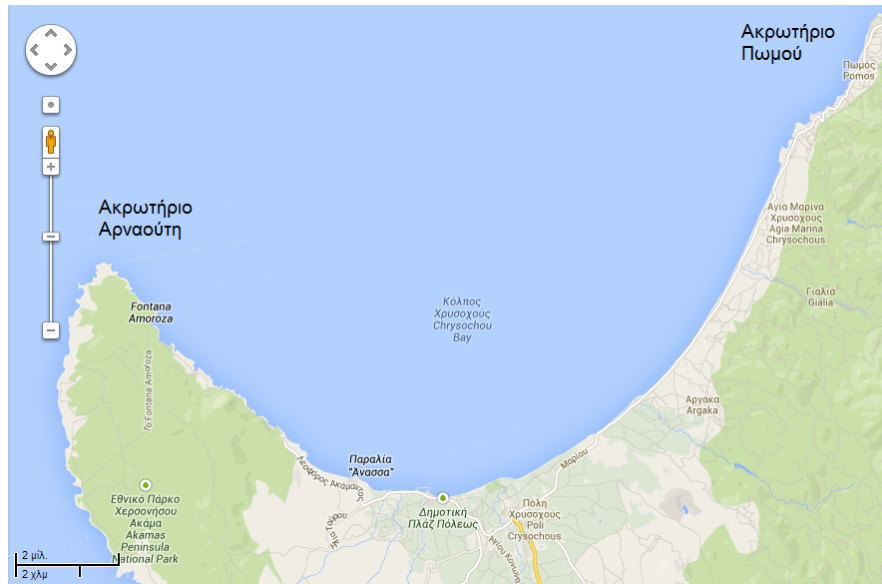
Πηγή: Επεξεργασία μελετητή

Η παραπάνω εικόνα απεικονίζει την περιοχή για την οποία θα εφαρμοστεί το μοντέλο. Η ακτή οριοθετείται ανατολικά του λιμένα και μέχρι τον κατασκευαστικό χώρο Πόλης Χρυσοχούς, περιλαμβάνει τη δημοτική παραλία της περιοχής και έχει μήκος περίπου 2200 m.

4.2. Μορφολογία παράκτιας ζώνης

Η παράκτια ζώνη της περιοχής αποτελεί τμήμα του κόλπου Χρυσοχούς. Ο κόλπος Χρυσοχούς οριοθετείται στα ανατολικά από το ακρωτήριο Πωμού και στα δυτικά από το ακρωτήριο Αρναούτη και έχει μήκος 38 χιλιόμετρα. (Εικόνα 4.4). Η πεδιάδα Χρυσοχούς έχει μήκος 25 χιλιόμετρα και το πλάτος της δεν υπερβαίνει τα 11 χιλιόμετρα. Το υψόμετρο της πεδιάδας είναι κάτω από 100 μέτρα, με εξαίρεση το νοτιότερο τμήμα, του

οποίου το υψόμετρο ξεπερνά τα 200 μέτρα. Την ευρύτερη περιοχή διασχίζουν τέσσερις ποταμοί, ο Μακούντας ή Ξερός, ο Ξεροπόταμος, ο Χρυσοχούς και το αργάκι του Αγίου Ιωάννη. Ο συνδυασμός των λεκάνων απορροής τους είχε σαν αποτέλεσμα τη διαμόρφωση της παράκτιας ζώνης.



Εικόνα 4.4: Κόλπος Χρυσοχούς, Κλίμακα 1: 2000

Πηγή: map.google.gr

Τα κυριότερα πετρώματα της περιοχής είναι οι αποθέσεις των θαλάσσιων αναβαθμίδων (ασβεστολιθικοί ψαμμίτες, άμμοι και χαλίκια), οι αποθέσεις του σχηματισμού Αθαλάσας (ασβεστολιθικοί ψαμμίτες, άμμοι και αμμώδεις μάργες) και οι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις. Το κεντρικό τμήμα του κόλπου της Χρυσοχούς αποτελείται από αλλουβιακές αποθέσεις, μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Κατά το Πλειστόκαινο (2.000.000-12.000 πριν από σήμερα) η περιοχή ήταν ποταμόκολπος και βρισκόταν κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας και προς την ενδοχώρα, σε σχέση με τη σημερινή της θέση. Η απόθεση των υλικών που μετέφεραν οι ποταμοί, είχαν σαν αποτέλεσμα την πρόσχωση του ποταμόκολπου και τη δημιουργία της σημερινής κοιλάδας.

Κύριο χαρακτηριστικό της παράκτιας ζώνης είναι το ήπιο ανάγλυφο και η παρουσία χαμηλών θινών με βλάστηση, οι οποίες αποτελούν το όριο του αυχένα της παραλίας. Πιο γνωστή περιοχή για λουομένους είναι η δημοτική παραλία, η οποία είναι οργανωμένη

και περιλαμβάνει στο χερσαίο της χώρο όλες τις απαραίτητες εγκαταστάσεις και εξοπλισμό για τους λουομένους.

4.3. Κοκκομετρική ανάλυση

Οι τρεις βασικοί τύποι παράκτιων υδάτων που παρατηρούνται στην Κύπρο και προέκυψαν μέσα από την Έκθεση «Χαρακτηρισμός των τύπων των επιφανειακών υδατικών συστημάτων», η οποία πραγματοποιήθηκε από το Delft Hydraulics το Δεκέμβριο του 2004 για λογαριασμό του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου του Υπουργείου Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, είναι:

1. CW1 - Σκληρό υπόστρωμα ενδιάμεσου βάθους μέτριας έκθεσης: Καλύπτει το 42% της ελεύθερης θαλάσσιας περιοχής της Κύπρου και αφορά 8 σώματα.
2. CW2 - Άμμος-χαλίκι ενδιάμεσου βάθους μέτριας έκθεσης: Καλύπτει το 43% της ελεύθερης θαλάσσιας περιοχής της Κύπρου και αφορά 13 σώματα.
3. CW3 - Σκληρό αβαθές υπόστρωμα μέτριας έκθεσης: Καλύπτει το 15% της ελεύθερης θαλάσσιας περιοχής της Κύπρου και αφορά 4 σώματα.

Η περιοχή που εξετάζεται έχει σύμφωνα με την Έκθεση, κωδική ονομασία CY_3-C2 και CY_4-C2 και για τις οποίες ισχύει:

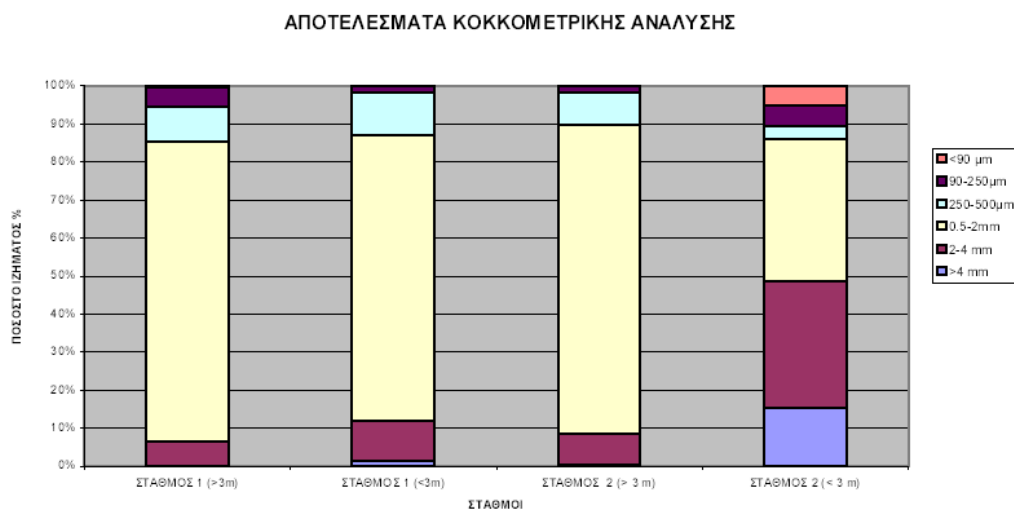
Πίνακας 4.1: Γεωγραφικά δεδομένα της οριοθέτησης και τυπολογίας των παράκτιων υδατικών συστημάτων

Πηγή: Εφαρμογή των άρθρων 5 και 6 της Οδηγίας-Πλαίσιο για τα Νερά 2000/60/ΕΚ, Τεύχος Ι: Χαρακτηρισμός των τύπων των επιφανειακών υδατικών συστημάτων, Δεκέμβριος 2004

| Αριθμός | Όνομα | Ιδιαίτερα τροποποιημένο | Τύπος σύμφωνα με την Οδηγία Πλαίσιο για τα Νερά | Έκταση (km ²) |
|---------|-------------------------|-------------------------|---|---------------------------|
| CY_3-C2 | Κόλπος Χρυσοχούς-Βόρεια | Όχι | Υπόστρωμα με άμμο και χαλίκι – μέτριας έκθεσης | 33 |
| CY_4-C2 | Κόλπος Χρυσοχούς-Νότια | Όχι | Υπόστρωμα με άμμο και χαλίκι – μέτριας έκθεσης | 12 |

- * Το άρθρο 4.3 της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά παρέχει έναν κατάλογο δραστηριοτήτων λόγω των οποίων ένα υδατικό σώμα μπορεί να χαρακτηριστεί ως ιδιαίτερα τροποποιημένο. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που διεξάγονται στα παράκτια ύδατα της Κύπρου είναι η ναυσιπλοΐα, συμπεριλαμβανομένων των λιμενικών εγκαταστάσεων ή της αναψυχής και η αστικοποίηση. Οι αλλαγές στις υδρομορφολογικές φυσικές συνθήκες αποτελούν τον κύριο λόγο για τον προσωρινό χαρακτηρισμό των ιδιαίτερα τροποποιημένων υδάτων στα παράκτια ύδατα.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης που έγινε σε δύο σταθμούς: στον κατασκηνωτικό χώρο (Σταθμός 1) και στην περιοχή ανατολικά του αλιευτικού καταφυγίου (Σταθμός 2).



Διάγραμμα 4.1: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

Πηγή: Μελέτη για την Προστασία και Βελτίωση της ακτής Κόλπου Χρυσοχούς, Ιούνιος 2002

Στο σταθμό 1 σε βάθος μεγαλύτερο από 3 μέτρα, το μεγαλύτερο μέρος των κόκκων είναι 0,5-2 mm. Το ίδιο ισχύει και για τη δειγματοληψία σε βάθος μικρότερο από 3 μέτρα. Δεν παρατηρούνται κόκκοι διαμέτρου μικρότερης από 90 μm. Στο σταθμό 2 σε βάθος μεγαλύτερο των 3 μέτρων, η πλειοψηφία των κόκκων έχει διάμετρο από 0,5-2 mm. Δεν παρατηρείται το ίδιο σε βάθος μικρότερο των 3 μέτρων, καθώς παρατηρούνται κόκκοι διαμέτρου 0,5-2 mm και κόκκοι διαμέτρου 2-4 mm. Παρατηρούνται επίσης κόκκοι διαμέτρου μικρότερης από 90 μm και μεγαλύτερης των 4 mm. Πιο αναλυτικά:

Κατασκηνωτικός χώρος:

Ο βυθός καλύπτεται από χονδρόκοκκο αμμώδες ίζημα. Τα αμμώδη υποστρώματα χαρακτηρίζονται από χαμηλή βιοποικιλότητα σε σύγκριση με τα βραχώδη και μικτά υποστρώματα. Στην περιοχή δεν υπάρχουν λιβάδια Ποσειδωνίας. Η βιοποικιλότητα είναι χαμηλή λόγω του γεγονότος ότι το υπόστρωμα μετακινείται εξαιτίας των κυμάτων και των ρευμάτων, με αποτέλεσμα η ανάπτυξη οργανισμών να καθίσταται δύσκολη.

Περιοχή ανατολικά του αλιευτικού καταφυγίου:

Μέχρι την ισοβαθή των 3 μέτρων, ο βυθός χαρακτηρίζεται από εναλασσόμενες περιοχές βράχων και άμμου με διάσπαρτες μάζες Ποσειδωνίας. Μετά την ισοβαθή των 3 μέτρων, ο βυθός είναι αμμώδης με ελάχιστες μάζες Ποσειδωνίας. Οι Ποσειδωνίες είναι σε υγιή κατάσταση και παρουσιάζουν ενδείξεις ανάπτυξης. Οι άκρες τους είναι φαγωμένες, γεγονός που υποδεικνύει ότι τρέφονται από αυτές θαλάσσιοι οργανισμοί. Στην περιοχή έχουν αναγνωριστεί πολλά είδη ψαριών.

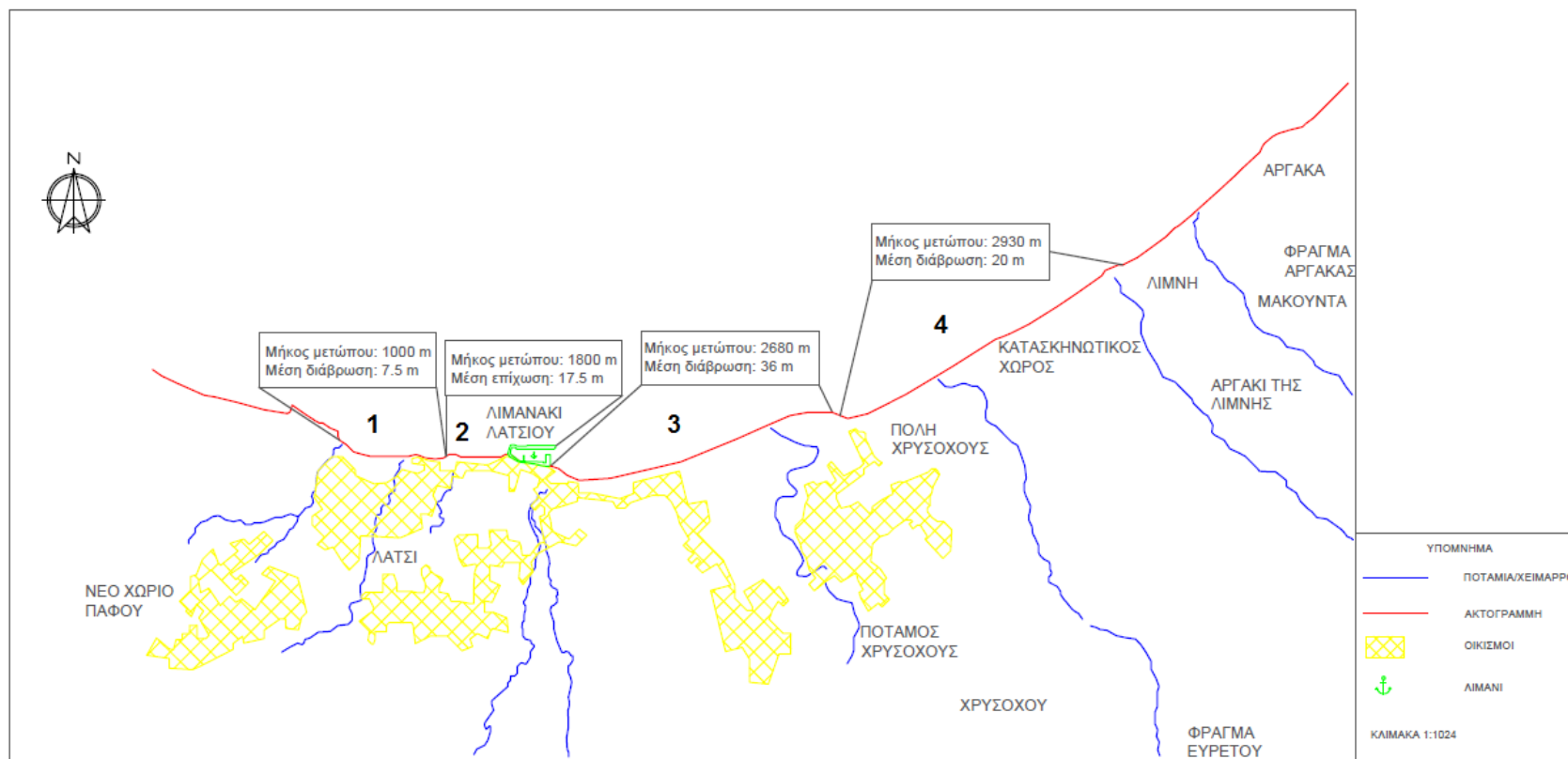
Μορφολογία πυθμένα – Ιζήματα

Από τη ΜΣΘ μέχρι το βάθος -0.1 μέτρων, η ακτή έχει κλίση 1:20-1:30 και ο πυθμένας καλύπτεται από κροκάλες, λεπτόκοκκο ίζημα και άμμο. Από την ισοβαθή των 3 μέτρων μέχρι και τα 5 μέτρα, ο πυθμένας καλύπτεται από βράχους καθώς επίσης και από λιβάδια Ποσειδωνίας. Τα Λιβάδια Ποσειδωνίας παρατηρούνται μέχρι την ισοβαθή των 20 μέτρων. Μέχρι το βάθος των 10 μέτρων, οι κλίσεις του πυθμένα είναι πολύ μικρές και κυμαίνονται από 1:65-1:90. Το ανάγλυφο της ευρύτερης θαλάσσιας περιοχής, είναι ανάγλυφο «βυθισμένων» οροσειρών και πρόκειται για αρκετά βαθιά περιοχή. Σε απόσταση περίπου 500 μέτρων από την ακτή παρατηρείται η πρώτη μεγάλη υποθαλάσσια χαράδρα, η οποία έχει βάθος 100 μέτρα. Η «πλαγιά» σε απόσταση 50 μέτρων ανεβαίνει, με αποτέλεσμα το βάθος να είναι μόλις 30 μέτρα.

4.4. Προβλήματα διάβρωσης

Ο κλάδος Θαλασσιών Έργων του Τμήματος Δημοσίων Έργων του Υπουργείου Συγκοινωνιακών και Έργων Κύπρου, παρακολουθεί τις ακτές του νησιού με ετήσιες

μετρήσεις πεδίου οι οποίες ξεκίνησαν το 1995. Στη εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 4.5) παρουσιάζεται η διάβρωση της ευρύτερης περιοχής. Στην παρούσα μελέτη, ενδιαφέρει η περιοχή με αριθμό 3.



Εικόνα 4.5: Διάβρωση ευρύτερης περιοχής

Πηγή: Αρχείο Κλάδου Θαλασσιών Έργων

Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται διάβρωση στην εκβολή του ποταμού Μακούντας όπου έχει κατασκευαστεί ταμιευτήρας και η ακτή καλύπτεται από χαλίκια, γεγονός που υποδηλώνει την υποχώρηση λεπτόκοκκων ιζημάτων. Οι ίδιες συνθήκες επικρατούν και στην αποβάθρα της Λίμνης όπου εκβάλλει ο χειμάρρος «Αργάκι της Λίμνης». Η μέση διάβρωση κατά την περίοδο 1963-1993 είναι 30 μέτρα. Η περιοχή από την αποβάθρα της Λίμνης μέχρι την εκβολή του ποταμού της Χρυσοχούς, παρουσιάζει τη μέγιστη διάβρωση με την ακτή να έχει υποχωρήσει 50 μέτρα. Από την εκβολή του ποταμού της Χρυσοχούς έως το λιμένα Λατσιού, η μέση διάβρωση για το ίδιο χρονικό διάστημα φθάνει τα 30 μέτρα.

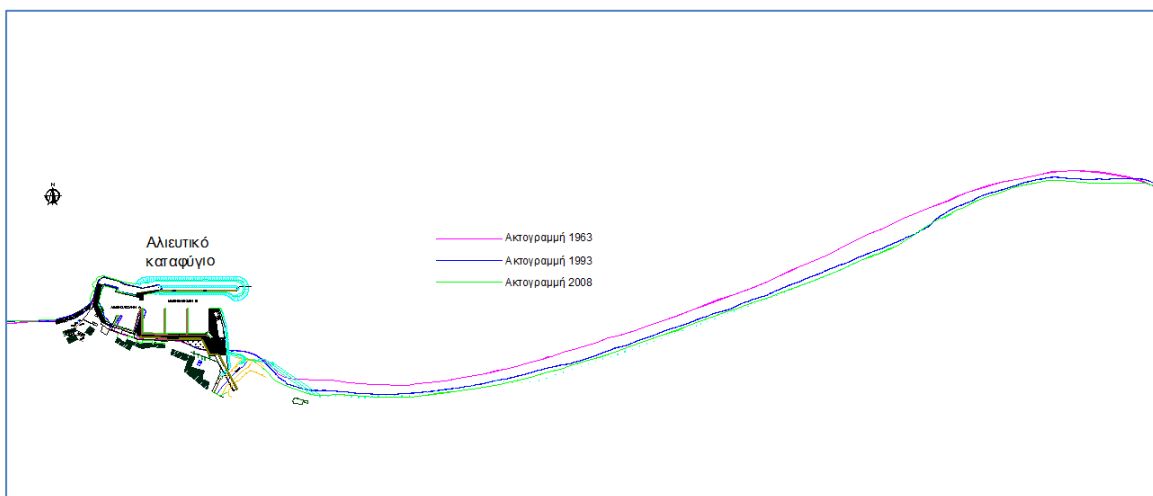
Σύμφωνα με τις μετρήσεις και τις αεροφωτογραφίες του 1963 και 1993, παρατηρείτο διάβρωση στην ακτή μελέτης, από το αλιευτικό καταφύγιο μέχρι τον κατασκευαστικό χώρο της Πόλης Χρυσοχούς. Οι κυριότεροι λόγοι της διάβρωσης ήταν οι εξής:

1. Η παγίδευση των φερτών υλικών στους ταμιευτήρες (Πίνακας 4.2), με αποτέλεσμα οι ποσότητες που φθάνουν στον κόλπο να είναι μηδενικές.
2. Οι λατομεύσεις του παράκτιου υλικού.
3. Το αλιευτικό καταφύγιο, δυτικά του οποίου είχε παρατηρηθεί πρόσχωση, ενώ στα ανατολικά διάβρωση της ακτής.
4. Οι εκστρατείες καθαρισμού της ακτής από τα χαλίκια, με σκοπό τη δημιουργία αμμώδης παραλίας.
5. Ο συνδυασμός των παραπάνω με το γεγονός ότι τα πρανή αποτελούνται από χαλαρές αλλουβιακές αποθέσεις.

Πίνακας 4.2: Στοιχεία ταμιευτήρων περιοχής, Πηγή: Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Κύπρου, 2013

| Όνομα χειμάρρου | Όνομα φράγματος | Έτος κατασκευής | Λεκάνη απορροής (km ²) | Χωρητικότητα φράγματος (εκ. m ³) |
|-------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|--|
| Ποταμός Χρυσοχούς | Ευρέτου | 1986 | 91 | 24 |
| Μακούντα | Αργάκα | 1964 | 50 | 0,99 |

Σύμφωνα με τις ετήσιες μετρήσεις πεδίου και τη σύγκριση αεροφωτογραφιών του 1963 και του 1993, η διάβρωση της δημοτικής παραλίας ήταν 30 μέτρα μέσα σε διάστημα 30 ετών. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι *το κεντρικό τμήμα του Κόλπου Χρυσοχούς βρίσκεται σε ασταθή κατάσταση με ενεργό διάβρωση* (Περιγραφή Περιβαλλοντικής Κατάστασης του Παράκτιου Συστήματος Μελέτης, PROPLAN Ltd, Ιούλιος 2001). Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται η θέση της ακτογραμμής το 1963 με μωβ χρώμα, το 1993 με μπλε και το 2008 με πράσινο.

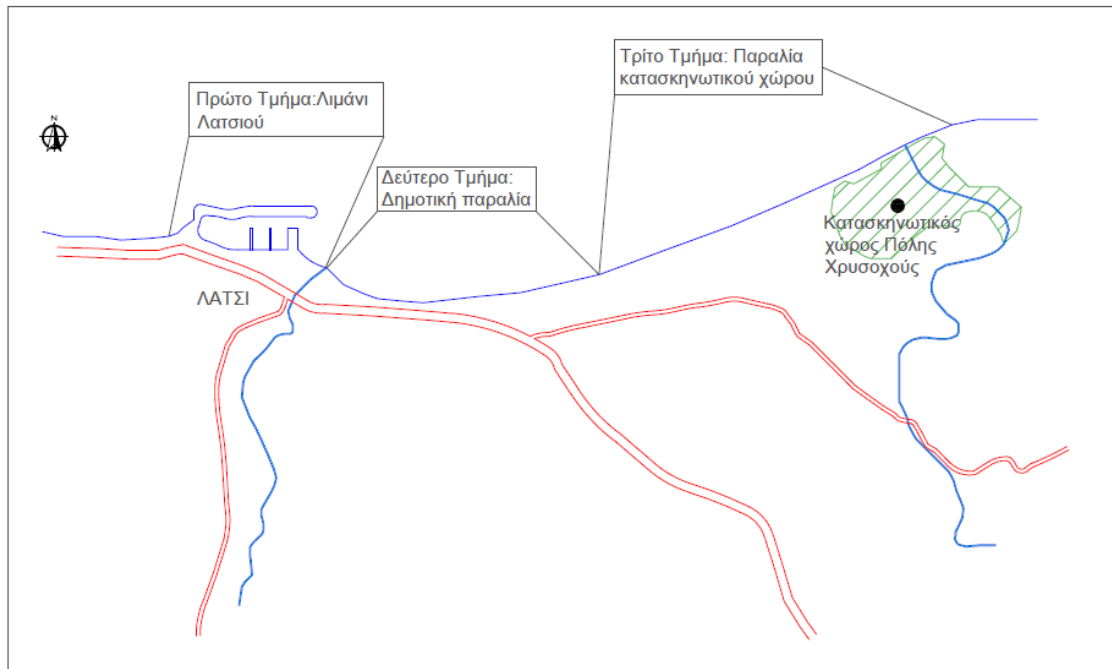


Εικόνα 4.6: Θέση ακτογραμμής 1963, 1993 και 2008, Κλίμακα 1:200

Πηγή: Κλάδος Θαλασσιών Έργων

Η ακτογραμμή το 1973 βρισκόταν σε απόσταση 15 έως 60 μέτρα βορειότερα από τη σημερινή της θέση. Η ακτή υπόκειται σε συνεχή διάβρωση, η οποία είναι πιο έντονη στην ανατολική πλευρά και κυμαίνεται από 30 μέχρι 60 μέτρα την περίοδο 1963-2004. Στα δυτικά, η διάβρωση συντελείται με πιο χαμηλούς ρυθμούς καθώς για την ίδια περίοδο έχει υποχωρήσει 10 με 20 μέτρα. Τη χρονική περίοδο 1993-2008, ο ρυθμός διάβρωσης της παραλίας είναι μικρότερος από το ρυθμό διάβρωσης της περιόδου 1973-1993. Αυτό υποδηλώνει ότι η ακτή όδευε προς μια κατάσταση ισορροπίας, διαπίστωση η οποία ισχύει πριν τα έργα επέκτασης του λιμένα (Μελέτη ΕΜΠ για την Προστασία και Βελτίωση της ακτής Κόλπου Χρυσοχούς, Τεύχος: Εξέλιξη Ακτογραμμής, Μάρτιος

2004). Για τη μελέτη της διάβρωσης, η περιοχή έχει χωριστεί σε τρία τμήματα (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Περιοχή μελέτης, Κλίμακα 1:200

Πηγή: Επεξεργασία μελετητή

Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικές φωτογραφίες για το κάθε τμήμα.

Πρώτο Τμήμα: Λιμένας Λατσιού

Η περιοχή περιλαμβάνει το λιμάνι του Λατσιού. Στις παρακάτω εικόνες, οι οποίες έχουν ημερομηνία λήψης την 6^η Δεκεμβρίου του 2004, απεικονίζεται η κατασκευή της θωράκισης, η οποία αποτελεί μέρος των έργων του νέου λιμένα Λατσιού.



Εικόνα 4.8: Κατασκευή θωράκισης

Πηγή: Αρχείο κλάδου Θαλασσιών Έργων



Εικόνα 4.9: Θωράκιση νέου λιμένα Λατσειού

Πηγή: Αρχείο κλάδου Θαλασσιών Έργων

Δεύτερο Τμήμα: Δημοτική παραλία Πόλης Χρυσοχούς

Η 2^η υποπεριοχή αφορά στη δημοτική παραλία Πόλης Χρυσοχούς και έχει μήκος 800 μέτρα. Στις παρακάτω εικόνες, οι οποίες έχουν ημερομηνία λήψης την 6^η Δεκεμβρίου του 2004, απεικονίζουν την περιοχή πριν την κατασκευή των παράκτιων έργων και στις οποίες είναι εμφανής η διάβρωση. Χαρακτηριστική είναι η τρίτη (γ) και τέταρτη φωτογραφία (δ), στις οποίες φαίνεται ότι το κύμα έχει φθάσει μέχρι και τρία μέτρα στη ξηρά.



(α)



(β)



(γ)

(δ)

Εικόνα 4.10 (α), (β), (γ), (δ): Διάβρωση δημοτικής παραλίας, 2004

Πηγή: Αρχείο Κλάδου Θαλασσίων Έργων

Οι παρακάτω φωτογραφίες έχουν ημερομηνία λήψης την 5^η Φεβρουαρίου του 2007. Η διάβρωση είναι ακόμα πιο έντονη σε σχέση με το 2004. Χαρακτηριστική είναι η δεύτερη φωτογραφία (β) όπου οι κροκάλες έχουν φτάσει μέχρι την ψαροταβέρνα «Ψαρόπουλος», καθώς και η πέμπτη (ε) όπου έχουν εισχωρήσει μέχρι το πάρκο.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)

Εικόνα 4.11 (α), (β), (γ), (δ), (ε), (ζ) : Διάβρωση δημοτικής παραλίας, 2007

Πηγή: Αρχείο Κλάδου Θαλασσιών Έργων

Τρίτο Τμήμα: Κατασκηνωτικός χώρος

Η 3^η υποπεριοχή περιλαμβάνει την παραλία που βρίσκεται μπροστά από τον κατασκηνωτικό χώρο και έχει μήκος 1300 μέτρα. Οι φωτογραφίες που ακολουθούν έχουν ληφθεί στις 5 Φεβρουαρίου του 2007. Η διάβρωση είναι εμφανής και είναι χαρακτηριστική στη δεύτερη (β) και στην τέταρτη (δ) φωτογραφία όπου το κύμα έχει φθάσει αρκετά μέτρα στο εσωτερικό της ακτής καθώς επίσης και στην έκτη (ζ) όπου μεγάλου όγκου πέτρες, λόγω των κυματισμών, μεταφέρθηκαν στην παραλία.



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)

Εικόνα 4.12 (α), (β), (γ), (δ), (ε), (ζ): Διάβρωση παραλίας Χώρου Κατασκήνωσης, 2007

Πηγή: Αρχείο Κλάδου Θαλασσιών Έργων

4.5. Κυματικό κλίμα

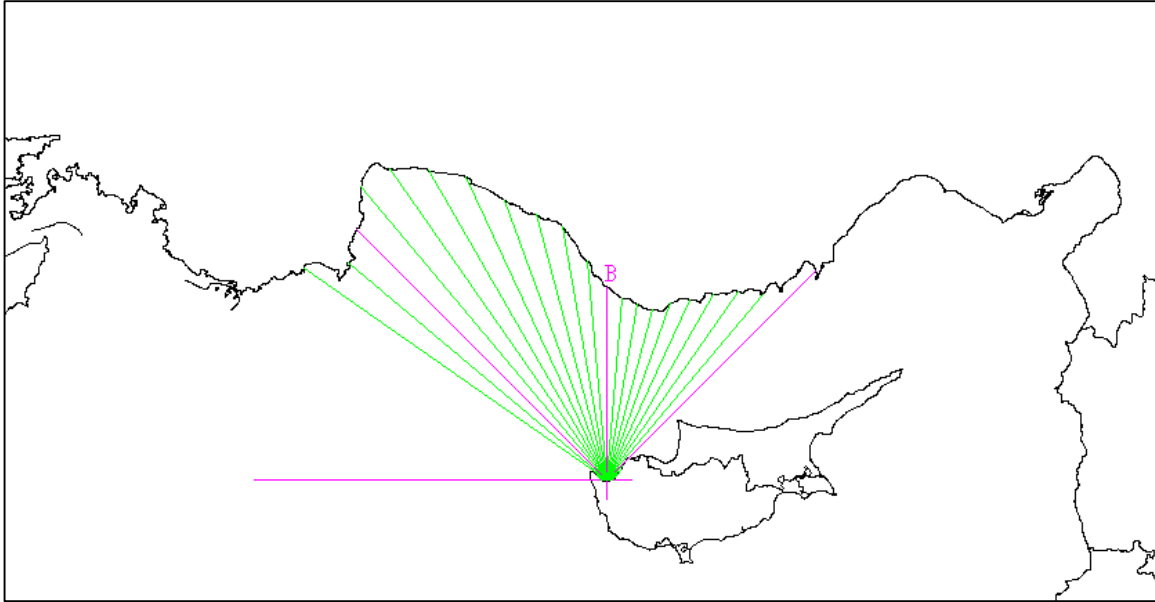
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το κυματικό κλίμα της περιοχής, αναλύθηκαν μετρήσεις ανέμων και κυμάτων από πλοία στην περιοχή. Η περιοχή δέχεται ανέμους επτά διευθύνσεων: Βόρειας, Βορειο-Βορειοδυτικής, Δυτικής-Βορειοδυτικής, Βορειο-Βορειοανατολικής, Ανατολικής-Βορειοανατολικής, Δυτικής και Ανατολικής. Επικρατούσα διεύθυνση ανέμου είναι η Δυτική με συχνότητα εμφάνισης 25,16%. Άνεμοι με Ανατολική κατεύθυνση παρουσιάζουν συχνότητα εμφάνισης 10,15%, ενώ οι Δυτικοί-Βορειοδυτικοί άνεμοι έχουν συχνότητα εμφάνισης 7,23%.

Η πιο μεγάλη ταχύτητα ανέμου που έχει παρατηρηθεί είναι τα 10 beaufort κατά την Ανατολική διεύθυνση, με συχνότητα εμφάνισης 0,04% και η μικρότερη το 1 beaufort με την ίδια συχνότητα και κατά την Ανατολική, επίσης, διεύθυνση. Ο πίνακας που ακολουθεί απεικονίζει την πιθανότητα οι άνεμοι να είναι εντός συγκεκριμένου εύρους, από σταθμό βόρεια της Κύπρου και αντιστοιχεί σε ετήσιες τιμές.

Πίνακας 4.3: Πιθανότητα οι άνεμοι να είναι εντός συγκεκριμένου εύρους στα Βόρεια της Κύπρου, Πηγή: Κλάδος Θαλασσιών Έργων, Υπουργείο Συγκοινωνιών και Έργων

| Bf | | N | NNE | ENE | E | ESE | SSE | S | SSW | WSW | W | WNW | NNW | |
|---------------|----------------------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|---------------|
| | ΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΤΟ | -1515 | 1545 | 4575 | 75105 | 105135 | 135165 | 165195 | 195225 | 225255 | 255285 | 285315 | 315345 | ΣΥΝΟΛΟ |
| 0 | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 8,57 | | | | 0,04 | 0,04 | | | | | | | | 8,65 |
| 2 | 2,34 | 0,38 | 0,38 | 0,46 | 0,88 | 0,46 | 0,29 | 0,25 | 0,29 | 1,04 | 2,13 | 0,63 | 0,29 | 9,82 |
| 3 | 1,13 | 0,96 | 1 | 1,3 | 1,88 | 0,96 | 0,46 | 0,75 | 1,34 | 2,93 | 5,01 | 2,34 | 1,17 | 21,23 |
| 4 | 0,08 | 0,75 | 1,04 | 1,8 | 1,76 | 0,96 | 0,59 | 0,96 | 1,34 | 3,76 | 6,73 | 2,09 | 1,17 | 23,03 |
| 5 | 0,04 | 0,75 | 0,88 | z | 1,96 | 0,63 | 0,33 | 0,5 | 0,92 | 2,76 | 6,81 | 1,38 | 0,84 | 19,43 |
| 6 | 0,04 | 0,42 | 0,63 | 1,04 | 1,88 | 0,13 | 0,17 | 0,17 | 0,29 | 1,42 | 3,09 | 0,46 | 0,33 | 10,07 |
| 7 | | 0,21 | 0,33 | 0,54 | 0,96 | 0,29 | 0,04 | | 0,17 | 0,88 | 1,04 | 0,21 | 0,08 | 4,76 |
| 8 | | 0,13 | 0,13 | 0,29 | 0,46 | 0,08 | | 0,04 | 0,13 | 0,29 | 0,29 | 0,08 | 0,17 | 2,09 |
| 9 | | 0,17 | 0,04 | 0,13 | 0,29 | | | 0,04 | | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,88 |
| 10 | | | | | 0,04 | | | | | | | | | 0,04 |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | |
| ΣΥΝΟΛΟ | 12,2 | 3,76 | 4,43 | 7,19 | 10,15 | 3,55 | 1,88 | 2,72 | 4,47 | 13,12 | 25,16 | 7,23 | 4,14 | 100 |

Για τον υπολογισμό του κυματικού κλίματος, υπολογίστηκαν αρχικά τα ενεργά αναπτύγματα πελάγους για 7 διευθύνσεις (N, W, E, NNE, ENE, WNW, NNW). Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζονται τα αναπτύγματα πελάγους ανά 5° .



Εικόνα 4.13: Αναπτύγματα πελάγους

Στη συνέχεια, μετρήθηκαν οι αποστάσεις ανά 5 μοίρες και καταγράφηκαν όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.4: Αποστάσεις αναπτυγμάτων πελάγους ανά 5°

| ANGLE | R (km) | ANGLE | R (km) |
|--------------|---------------|--------------|---------------|
| 0 | 123,09 | 180 | 0,00 |
| 5 | 116,24 | 185 | 0,00 |
| 10 | 113,99 | 190 | 0,00 |
| 15 | 112,55 | 195 | 0,00 |
| 20 | 120,15 | 200 | 0,00 |
| 25 | 126,49 | 205 | 0,00 |
| 30 | 136,73 | 210 | 0,00 |
| 35 | 146,99 | 215 | 0,00 |
| 40 | 155,10 | 220 | 0,00 |
| 45 | 17,29 | 225 | 0,00 |
| 50 | 13,27 | 230 | 0,00 |
| 55 | 10,93 | 235 | 0,00 |
| 60 | 9,18 | 240 | 0,00 |
| 65 | 7,76 | 245 | 0,00 |
| 70 | 6,55 | 250 | 0,00 |
| 75 | 5,51 | 255 | 0,00 |
| 80 | 4,59 | 260 | 0,00 |
| 85 | 3,81 | 265 | 0,00 |
| 90 | 3,16 | 270 | 3,31 |
| 95 | 0,00 | 275 | 3,77 |
| 100 | 0,00 | 280 | 4,31 |
| 105 | 0,00 | 285 | 4,97 |
| 110 | 0,00 | 290 | 5,78 |
| 115 | 0,00 | 295 | 6,82 |
| 120 | 0,00 | 300 | 8,45 |
| 125 | 0,00 | 305 | 236,01 |
| 130 | 0,00 | 310 | 215,88 |
| 135 | 0,00 | 315 | 226,23 |
| 140 | 0,00 | 320 | 244,52 |
| 145 | 0,00 | 325 | 242,47 |
| 150 | 0,00 | 330 | 228,51 |
| 155 | 0,00 | 335 | 213,81 |
| 160 | 0,00 | 340 | 189,93 |
| 165 | 0,00 | 345 | 175,31 |
| 170 | 0,00 | 350 | 164,59 |
| 175 | 0,00 | 355 | 139,93 |

Στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα ενεργά αναπτύγματα πελάγους ανά διεύθυνση:

Πίνακας 4.5: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη NNE διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|--------------|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 113 | 0,707107 | 0,5 | 56,2735 |
| -40 | 120 | 0,766044 | 0,586824 | 70,50809 |
| -35 | 126 | 0,819152 | 0,67101 | 84,87271 |
| -30 | 137 | 0,866025 | 0,75 | 102,5505 |
| -25 | 147 | 0,906308 | 0,821394 | 120,7326 |
| -20 | 155 | 0,939693 | 0,883022 | 136,9532 |
| -15 | 17 | 0,965926 | 0,933013 | 16,13459 |
| | | | | |
| | | 5,970255 | | 588,0252 |
| | | | | |
| | Feff= | 98,49247 | KM | |

Πίνακας 4.6: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για την E διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|----|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 17 | 0,707107 | 0,5 | 8,6465 |
| -40 | 13 | 0,766044 | 0,586824 | 7,785982 |
| -35 | 11 | 0,819152 | 0,67101 | 7,333469 |
| -30 | 9 | 0,866025 | 0,75 | 6,8835 |
| -25 | 8 | 0,906308 | 0,821394 | 6,37073 |
| -20 | 7 | 0,939693 | 0,883022 | 5,784679 |
| -15 | 6 | 0,965926 | 0,933013 | 5,136235 |
| -10 | 5 | 0,984808 | 0,969846 | 4,455474 |
| -5 | 4 | 0,996195 | 0,992404 | 3,782051 |
| 0 | 3 | 1 | 1 | 3,158 |
| 5 | 0 | 0,996195 | 0,992404 | 0 |
| 10 | 0 | 0,984808 | 0,969846 | 0 |
| 15 | 0 | 0,965926 | 0,933013 | 0 |
| 20 | 0 | 0,939693 | 0,883022 | 0 |
| 25 | 0 | 0,906308 | 0,821394 | 0 |
| 30 | 0 | 0,866025 | 0,75 | 0 |
| 35 | 0 | 0,819152 | 0,67101 | 0 |
| 40 | 0 | 0,766044 | 0,586824 | 0 |
| 45 | 0 | 0,707107 | 0,5 | 0 |
| | | | | |
| | | 16,90251 | | 59,33662 |
| | | | | |

Πίνακας 4.7: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη ENE διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|--------------|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 17,29 | 0,707107 | 0,5 | 8,6465 |
| -40 | 13,27 | 0,766044 | 0,586824 | 7,785982 |
| -35 | 10,93 | 0,819152 | 0,67101 | 7,333469 |
| -30 | 9,18 | 0,866025 | 0,75 | 6,8835 |
| -25 | 7,76 | 0,906308 | 0,821394 | 6,37073 |
| -20 | 6,55 | 0,939693 | 0,883022 | 5,784679 |
| -15 | 5,51 | 0,965926 | 0,933013 | 5,136235 |
| | | 5,970255 | | 47,94109 |
| | Feff= | 8,029991 | KM | |

Πίνακας 4.8: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη WNW διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|--------------|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 4,97 | 0,707107 | 0,5 | 2,4835 |
| -40 | 5,78 | 0,766044 | 0,586824 | 3,388909 |
| -35 | 6,82 | 0,819152 | 0,67101 | 4,578302 |
| -30 | 8,45 | 0,866025 | 0,75 | 6,3345 |
| -25 | 236,01 | 0,906308 | 0,821394 | 193,8539 |
| -20 | 215,88 | 0,939693 | 0,883022 | 190,6286 |
| -15 | 226,23 | 0,965926 | 0,933013 | 211,0727 |
| | | 5,970255 | | 612,3403 |
| | Feff= | 102,5652 | KM | |

Πίνακας 4.9: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη WNW διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|--------------|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 4,97 | 0,707107 | 0,5 | 2,4835 |
| -40 | 5,78 | 0,766044 | 0,586824 | 3,388909 |
| -35 | 6,82 | 0,819152 | 0,67101 | 4,578302 |
| -30 | 8,45 | 0,866025 | 0,75 | 6,3345 |
| -25 | 236,01 | 0,906308 | 0,821394 | 193,8539 |
| -20 | 215,88 | 0,939693 | 0,883022 | 190,6286 |
| -15 | 226,23 | 0,965926 | 0,933013 | 211,0727 |
| | | 5,970255 | | 612,3403 |
| | Feff= | 102,5652 | KM | |

Πίνακας 4.10: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους για τη NNW διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|--------------|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 226 | 0,707107 | 0,5 | 113,1135 |
| -40 | 245 | 0,766044 | 0,586824 | 143,4914 |
| -35 | 242 | 0,819152 | 0,67101 | 162,7018 |
| -30 | 229 | 0,866025 | 0,75 | 171,3795 |
| -25 | 214 | 0,906308 | 0,821394 | 175,6214 |
| -20 | 190 | 0,939693 | 0,883022 | 167,7151 |
| -15 | 175 | 0,965926 | 0,933013 | 163,5674 |
| | | 5,970255 | | 1097,59 |
| | Feff= | 183,8431 | KM | |

Πίνακας 4.11: Ενεργό ανάπτγμα πελάγους για τη W διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|--------------|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 0 | 0,707107 | 0,5 | 0 |
| -40 | 0 | 0,766044 | 0,586824 | 0 |
| -35 | 0 | 0,819152 | 0,67101 | 0 |
| -30 | 0 | 0,866025 | 0,75 | 0 |
| -25 | 0 | 0,906308 | 0,821394 | 0 |
| -20 | 0 | 0,939693 | 0,883022 | 0 |
| -15 | 0 | 0,965926 | 0,933013 | 0 |
| -10 | 0 | 0,984808 | 0,969846 | 0 |
| -5 | 0 | 0,996195 | 0,992404 | 0 |
| 0 | 3 | 1 | 1 | 3,311 |
| 5 | 4 | 0,996195 | 0,992404 | 3,737393 |
| 10 | 4 | 0,984808 | 0,969846 | 4,181007 |
| 15 | 5 | 0,965926 | 0,933013 | 4,634274 |
| 20 | 6 | 0,939693 | 0,883022 | 5,099453 |
| 25 | 7 | 0,906308 | 0,821394 | 5,60437 |
| 30 | 8 | 0,866025 | 0,75 | 6,3345 |
| 35 | 236 | 0,819152 | 0,67101 | 158,3624 |
| 40 | 216 | 0,766044 | 0,586824 | 126,6848 |
| 45 | 226 | 0,707107 | 0,5 | 113,1135 |
| | | | | |
| | | 16,90251 | | 431,0627 |
| | | | | |
| | Feff= | 25,50287 | KM | |
| | | | | |

Πίνακας 4.12: Ενεργό ανάπτγμα πελάγους για τη Ν διεύθυνση

| ANGLE | R | cosa | cosa ² | Rxcosa ² |
|-------|--------------|----------|-------------------|---------------------|
| -45 | 226 | 0,707107 | 0,5 | 113,1135 |
| -40 | 245 | 0,766044 | 0,586824 | 143,4914 |
| -35 | 242 | 0,819152 | 0,67101 | 162,7018 |
| -30 | 229 | 0,866025 | 0,75 | 171,3795 |
| -25 | 214 | 0,906308 | 0,821394 | 175,6214 |
| -20 | 190 | 0,939693 | 0,883022 | 167,7151 |
| -15 | 175 | 0,965926 | 0,933013 | 163,5674 |
| -10 | 165 | 0,984808 | 0,969846 | 159,626 |
| -5 | 140 | 0,996195 | 0,992404 | 138,8651 |
| 0 | 123 | 1 | 1 | 123,086 |
| 5 | 116 | 0,996195 | 0,992404 | 115,354 |
| 10 | 114 | 0,984808 | 0,969846 | 110,5547 |
| 15 | 113 | 0,965926 | 0,933013 | 105,0078 |
| 20 | 120 | 0,939693 | 0,883022 | 106,0969 |
| 25 | 126 | 0,906308 | 0,821394 | 103,894 |
| 30 | 137 | 0,866025 | 0,75 | 102,5505 |
| 35 | 147 | 0,819152 | 0,67101 | 98,62842 |
| 40 | 155 | 0,766044 | 0,586824 | 91,01407 |
| 45 | 17 | 0,707107 | 0,5 | 8,6465 |
| | | | | |
| | | 16,90251 | | 2360,914 |
| | | | | |
| | Feff= | 139,6783 | KM | |
| | | | | |

Στη συνέχεια με τη βοήθεια του προγράμματος waves, υπολογίστηκαν τα στοιχεία των κυματισμών για τις παραπάνω διευθύνσεις.

| DIRECTION OF WIND :N | | | EF. FETCH : 139.678 km | | |
|----------------------|------------|---------------|------------------------|------------|-----------|
| Ua (Beauf) | Dua (%) | min D (hr) | Ho (m) | T (sec) | Lo (m) |
| 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.000 | 0.380 | 26.753 | 0.261 | 2.147 | 7.197 |
| 3.000 | 0.960 | 18.249 | 0.635 | 3.248 | 16.472 |
| 4.000 | 0.750 | 13.423 | 1.302 | 4.587 | 32.847 |
| 5.000 | 0.750 | 11.394 | 1.902 | 5.520 | 47.581 |
| 6.000 | 0.420 | 9.851 | 2.651 | 6.498 | 65.926 |
| 7.000 | 0.210 | 8.797 | 3.424 | 7.365 | 84.691 |
| 8.000 | 0.130 | 7.908 | 4.350 | 8.275 | 106.902 |
| 9.000 | 0.170 | 7.240 | 5.300 | 9.101 | 129.329 |

Εικόνα 4.14: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Βόρεια διεύθυνση ανέμου

| DIRECTION OF WIND :NNE | | | EF. FETCH : 98.4925 km | | |
|------------------------|------------|---------------|------------------------|------------|-----------|
| Ua (Beauf) | Dua (%) | min D (hr) | Ho (m) | T (sec) | Lo (m) |
| 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.000 | 0.380 | 19.585 | 0.253 | 2.087 | 6.798 |
| 3.000 | 1.000 | 13.613 | 0.591 | 3.113 | 15.129 |
| 4.000 | 1.040 | 10.136 | 1.174 | 4.343 | 29.452 |
| 5.000 | 0.880 | 8.643 | 1.692 | 5.196 | 42.151 |
| 6.000 | 0.630 | 7.495 | 2.336 | 6.086 | 57.839 |
| 7.000 | 0.330 | 6.705 | 3.001 | 6.875 | 73.803 |
| 8.000 | 0.130 | 6.035 | 3.799 | 7.703 | 92.634 |
| 9.000 | 0.040 | 3.504 | 3.633 | 7.425 | 86.083 |

Εικόνα 4.15: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Βόρειο-Βορειοανατολική διεύθυνση ανέμου

| DIRECTION OF WIND :ENE | | | EF. FETCH : 8.02999 km | | |
|------------------------|------------|---------------|------------------------|------------|-----------|
| Ua (Beauf) | Dua (%) | min D (hr) | Ho (m) | T (sec) | Lo (m) |
| 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.000 | 0.460 | 2.467 | 0.138 | 1.484 | 3.439 |
| 3.000 | 1.300 | 1.853 | 0.263 | 2.034 | 6.459 |
| 4.000 | 1.800 | 1.437 | 0.465 | 2.667 | 11.106 |
| 5.000 | 1.630 | 1.243 | 0.641 | 3.101 | 15.014 |
| 6.000 | 1.040 | 1.089 | 0.862 | 3.554 | 19.723 |
| 7.000 | 0.540 | 0.980 | 1.090 | 3.957 | 24.441 |
| 8.000 | 0.290 | 0.886 | 1.365 | 4.380 | 29.952 |
| 9.000 | 0.130 | 0.815 | 1.648 | 4.766 | 35.468 |

Εικόνα 4.16: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά την Ανατολική-Βορειοανατολική διεύθυνση ανέμου

| DIRECTION OF WIND :E | | | EF. FETCH : 3.51052 km | | |
|----------------------|------------|---------------|------------------------|------------|-----------|
| Ua (Beauf) | Dua (%) | min D (hr) | Ho (m) | T (sec) | Lo (m) |
| 1.000 | 0.040 | 1.922 | 0.041 | 0.816 | 1.040 |
| 2.000 | 0.880 | 1.292 | 0.102 | 1.269 | 2.514 |
| 3.000 | 1.880 | 0.979 | 0.190 | 1.708 | 4.557 |
| 4.000 | 1.760 | 0.763 | 0.331 | 2.215 | 7.660 |
| 5.000 | 1.960 | 0.661 | 0.456 | 2.563 | 10.259 |
| 6.000 | 1.880 | 0.580 | 0.611 | 2.928 | 13.382 |
| 7.000 | 0.960 | 0.522 | 0.773 | 3.252 | 16.508 |
| 8.000 | 0.460 | 0.473 | 0.966 | 3.593 | 20.158 |
| 9.000 | 0.290 | 0.435 | 1.166 | 3.905 | 23.809 |
| 10.000 | 0.040 | 0.401 | 1.400 | 4.233 | 27.982 |

Εικόνα 4.17: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά την Ανατολική διεύθυνση ανέμου

| DIRECTION OF WIND :W | | | EF. FETCH : 25.5029 km | | |
|----------------------|------------|---------------|------------------------|------------|-----------|
| Ua (Beauf) | Dua (%) | min D (hr) | Ho (m) | T (sec) | Lo (m) |
| 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.000 | 2.130 | 6.225 | 0.197 | 1.787 | 4.984 |
| 3.000 | 5.010 | 4.570 | 0.401 | 2.533 | 10.017 |
| 4.000 | 6.730 | 3.504 | 0.732 | 3.398 | 18.032 |
| 5.000 | 6.810 | 3.019 | 1.022 | 3.991 | 24.874 |
| 6.000 | 3.090 | 2.637 | 1.382 | 4.609 | 33.169 |
| 7.000 | 1.040 | 2.369 | 1.755 | 5.156 | 41.513 |
| 8.000 | 0.290 | 2.139 | 2.203 | 5.731 | 51.282 |
| 9.000 | 0.040 | 1.965 | 2.663 | 6.254 | 61.074 |

Εικόνα 4.18: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Δυτική διεύθυνση ανέμου

| DIRECTION OF WIND :WNW | | | EF. FETCH : 120.565 km | | |
|------------------------|------------|---------------|------------------------|------------|-----------|
| Ua (Beauf) | Dua (%) | min D (hr) | Ho (m) | T (sec) | Lo (m) |
| 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.000 | 0.630 | 23.441 | 0.258 | 2.123 | 7.034 |
| 3.000 | 2.340 | 16.118 | 0.617 | 3.192 | 15.911 |
| 4.000 | 2.090 | 11.921 | 1.248 | 4.485 | 31.404 |
| 5.000 | 1.380 | 10.139 | 1.812 | 5.384 | 45.254 |
| 6.000 | 0.460 | 8.778 | 2.515 | 6.324 | 62.438 |
| 7.000 | 0.210 | 7.845 | 3.241 | 7.157 | 79.975 |
| 8.000 | 0.080 | 7.008 | 4.096 | 8.017 | 100.338 |
| 9.000 | 0.040 | 3.504 | 3.633 | 7.425 | 86.083 |

Εικόνα 4.19: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Δυτική-Βορειοδυτική διεύθυνση ανέμου

| DIRECTION OF WIND : NNW | | | EF. FETCH : 183.843 km | | |
|-------------------------|------------|---------------|------------------------|------------|-----------|
| Ua (Beauf) | Dua (%) | min D (hr) | Ho (m) | T (sec) | Lo (m) |
| 1.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2.000 | 0.290 | 25.405 | 0.260 | 2.138 | 7.134 |
| 3.000 | 1.170 | 23.077 | 0.665 | 3.347 | 17.493 |
| 4.000 | 1.170 | 16.785 | 1.402 | 4.774 | 35.577 |
| 5.000 | 0.840 | 14.186 | 2.073 | 5.774 | 52.061 |
| 6.000 | 0.330 | 12.230 | 2.915 | 6.825 | 72.736 |
| 7.000 | 0.080 | 7.008 | 3.067 | 6.954 | 75.505 |
| 8.000 | 0.170 | 9.788 | 4.828 | 8.739 | 119.225 |
| 9.000 | 0.080 | 7.008 | 5.213 | 9.022 | 127.077 |

Εικόνα 4.20: Ύψος, περίοδος και μήκος κύματος κατά τη Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση ανέμου

4.6. Προτεινόμενα παράκτια έργα

Έχοντας διαπιστώσει ότι στην περιοχή υπάρχει σοβαρό πρόβλημα διάβρωσης, το Εργαστήριο Λιμενικών Έργων (ΕΛΕ) της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, προχώρησε σε προτάσεις για την προστασία και βελτίωση της παράκτιας ζώνης στην περιοχή δυτικά και ανατολικά του αλιευτικού καταφυγίου μέχρι τον κατασκευαστικό χώρο Πόλις Χρυσοχούς. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των έργων:

- Πρώτο τμήμα: 600 μέτρα δυτικά του αλιευτικού καταφυγίου Λατσιού

Το ΕΛΕ προτείνει να παραμείνει η κατάσταση ως έχει. Εισηγείται δηλαδή τη μη κατασκευή οποιουδήποτε έργου.

- Δεύτερο τμήμα: 2,5 χιλιόμετρα ανατολικά του αλιευτικού καταφυγίου Λατσιού μέχρι τον κατασκευαστικό χώρο Πόλις Χρυσοχούς

Το ΕΛΕ εισηγείται την κατασκευή των παρακάτω παράκτιων έργων:

- α. Ίσαλοι κυματοθραύστες (στάθμη στέψεως στα +0,25 cm από τη ΜΣΘ) από φυσικούς ογκόλιθους υπό μικρή γωνία ως προς την ακτογραμμή. Εκτιμάται ότι απαιτείται η κατασκευή 18 κυματοθραυστών μήκους 100 μέτρων με απόσταση μεταξύ τους 50 μέτρα, υπό γωνία 10° με την ακτογραμμή.

- β. Θωράκιση με φυσικούς ογκολίθους του μετώπου της ακτής, ανατολικά της εκβολής του χειμάρρου στον λιμένα Λατσίου μέχρι τη ψαροταβέρνα Ψαρόπουλος. Η κατασκευή αυτή κρίνεται απαραίτητη γιατί η επέκταση του λιμένα εντατικοποιεί τους διαβρωτικούς μηχανισμούς στο τμήμα αυτό.
- γ. Πρόβολοι μικρού μήκους από σκυρόδεμα ή φυσικούς ογκολίθους με στάθμη στέψης +1,20 m, βατοί από επισκέπτες, μήκους 15 μέτρων ανά 50 μέτρα, κάθετοι στην ακτογραμμή. Η εκτίμηση είναι ότι θα χρειαστούν 22 πρόβολοι και θα κατασκευαστούν σε μήκος ακτογραμμής 1,2 χιλιόμετρα στα αμέσως ανατολικά της θωράκισης του μετώπου.

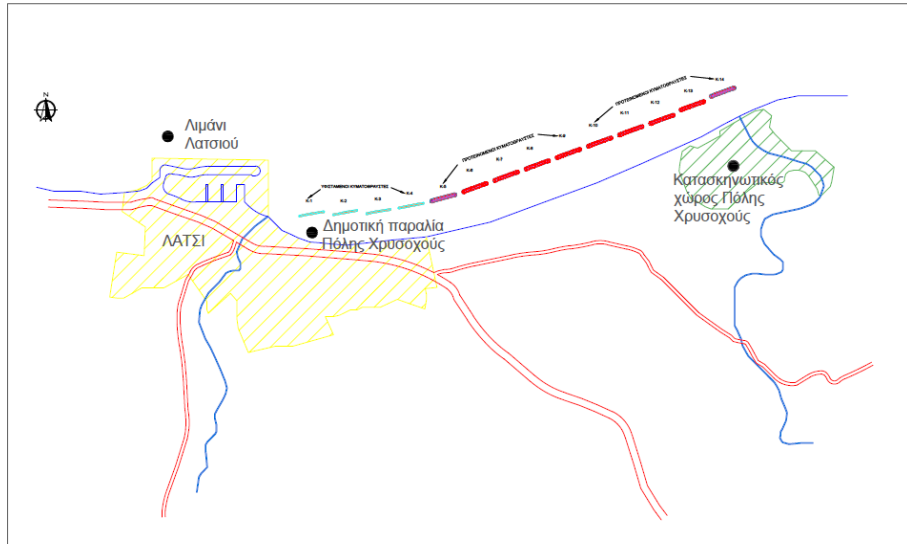
4.7. Υφιστάμενα παράκτια έργα

Στην περιοχή έχουν κατασκευαστεί τέσσερις κυματοθραύστες και πραγματοποιήθηκε η θωράκιση του μετώπου της ακτής ανατολικά του λιμένα, δηλαδή στη δημοτική παραλία Πόλις Χρυσοχούς. Το έργο ξεκίνησε τον Μάρτιο του 2009 και ολοκληρώθηκε το Μάιο του 2010 και στοίχισε 3.044.000 ευρώ. Στα προγραμματιζόμενα έργα είναι η κατασκευή ακόμη 10 κυματοθραυστών, τα οποία δεν έχουν ακόμη ξεκινήσει λόγω της δυσμενούς οικονομικής κατάστασης της χώρας. Ως κυματικές συνθήκες σχεδιασμού κατασκευής των ακτομηχανικών έργων επιλέχθηκαν οι εξής:

Πίνακας 4.13: Μέγιστες κυματικές συνθήκες στα βαθιά, Πηγή: Μελέτη για την Προστασία και Βελτίωση της ακτής του Κόλπου Χρυσοχούς, Εξέλιξη Ακτογραμμής, Μάρτιος 2004

| Τομέας πρόσπτωσης | Ύψος κύματος (H _a) m | Γωνία Πρόσπτωσης |
|-------------------|----------------------------------|------------------|
| -15°-15° | 4.1 | 0° |
| 15°-45° | 3.7 | 30° |
| 45°-75° | 2.6 | 60° |
| 75°-105° | 1.7 | 90° |
| 255°-285° | 2.2 | 270° |
| 285°-315° | 3.8 | 300° |
| 315°-345° | 4.5 | 330° |

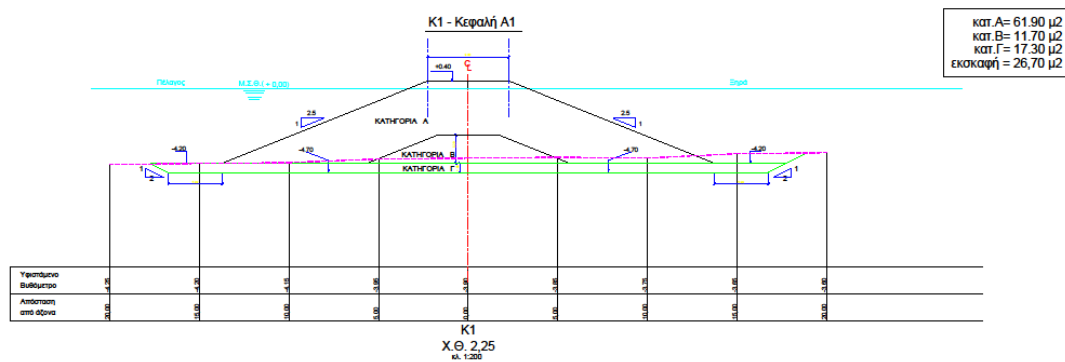
Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 4.21), απεικονίζεται η θέση των υφιστάμενων κυματοθραυστών και αυτών που πρόκειται να κατασκευαστούν.



Εικόνα 4.21: Υφιστάμενοι και Προτεινόμενοι κυματοθραύστες, Κλίμακα 1:200

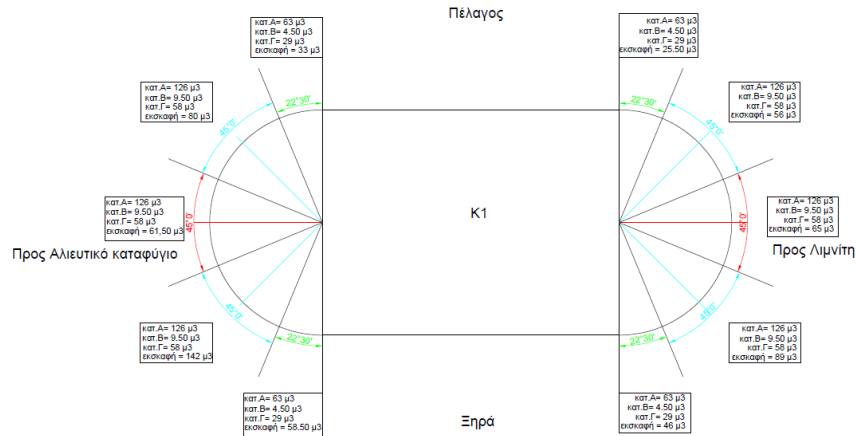
Πηγή: Αρχείο Κλάδου Θαλασσίων Έργων

Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται η διατομή και η κάτοψη των κυματοθραυστών (Εικόνα 4.22 και 4.23).



Εικόνα 4.22: Διατομή κυματοθραύστη

Πηγή: Αρχείο Κλάδου Θαλασσίων Έργων



Εικόνα 4.23: Κάτοψη Κυματοθραύστη

Πηγή: Αρχείο Κλάδου Θαλασσιών Έργων

Στη εικόνα απεικονίζεται η διατομή του κυματοθραύστη στη χιλιομετρική θέση 2.25. Ο κυματοθραύστης έχει τοποθετηθεί σε βάθος 4.70 μέτρα, η κλίση των πρανών είναι 1:2.5 και το πλάτος στέγης είναι 4,50 μέτρα. Όλοι οι κυματοθραύστες έχουν μήκος 100 μέτρα, απέχουν 50 μέτρα μεταξύ τους και το ύψος στέγης είναι +0,40 μέτρα από ΜΣΘ. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιήθηκαν πλωτά σκάφη για τη μεταφορά των υλικών και πλωτή πλατφόρμα με γερανό και ρυμουλκό, ενώ οι ογκόλιθοι προέκυψαν από το λατομείο στην Ανδρολίκου.

4.8. Σημερινή κατάσταση

Πρώτο Τμήμα:

Οι φωτογραφίες, οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω (28 Αυγούστου 2013), παρουσιάζουν τη σημερινή κατάσταση του λιμένα. Ο λιμένας, λόγω της αυξημένης ζήτησης χώρου για πρόσδεση σκαφών αναψυχής, υπέστη επέκταση με την κατασκευή νέας εξωτερικής λεκάνης καθώς είχε χωρητικότητα 100 σκαφών. Η νέα λεκάνη εξυπηρετεί σκάφη αναψυχής και διαθέτει όλες τις εγκαταστάσεις και εξυπηρετήσεις που παρέχει μια μαρίνα. Η παλιά λεκάνη χρησιμοποιείται ως αλιευτικό καταφύγιο. Έχει συνολικό μήκος 400 μέτρα και πλάτος 150 μέτρα και προστατεύεται από τον προσήνεμο μόλο με πρανή και θωράκιση φυσικών ογκολίθων. Στο λιμανάκι κατασκευάστηκαν δύο πλωτές προβλήτες μήκους 70 μέτρων και κρηπίδωμα μήκους 100 μέτρων για τα μικρά σκάφη. Το βάθος του κυμαίνεται από 2 μέχρι 4 μέτρα.



(α)



(β)

Εικόνα 4.24 (α), (β): Λιμανάκι Λατσιού

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

Δεύτερο Τμήμα:

Όσον αφορά στη δημοτική παραλία, η σημερινή κατάσταση φαίνεται στις φωτογραφίες που ακολουθούν και οι οποίες έχουν ημερομηνία λήψης την 28^η Αυγούστου 2013. Στην πρώτη (α) και δεύτερη φωτογραφία (β) απεικονίζεται η θωράκιση της ακτής ανατολικά του λιμένα. Η κατασκευή που φαίνεται στη δεύτερη φωτογραφία δεν αποτελεί πεζόδρομο, αν και χρησιμοποιείται ως τέτοιος από τους περιοίκους, αλλά χρησιμοποιείται για να απορροφά τους κυματισμούς που τυχόν να διαπερνούν τη θωράκιση. Στην τρίτη (γ) και τέταρτη (δ) φωτογραφία απεικονίζονται οι κυματοθραύστες, ενώ η πέμπτη (ε) δείχνει τη γενική άποψη της παραλίας. Στην παραλία έχει δημιουργεί salient λόγω της χαμηλής στέψης των κυματοθραυστών, η οποία επιτρέπει τη διείσδυση κυματικής ενέργειας. Στην έκτη (ζ) φωτογραφία φαίνεται ο έξαλος αναβαθμός ο οποίος έχει δημιουργεί και επαληθεύει το γεγονός ότι πρόκειται για τη θερινή διατομή της ακτής.

Σύμφωνα με τις ετήσιες μετρήσεις που πραγματοποιούνται στην περιοχή, μεταξύ 2008 και 2012, παρατηρείται πρόσχωση με τιμή που φθάνει μέχρι και 13 μέτρα σε κάποια σημεία. Όσον αφορά στις μετρήσεις μεταξύ Οκτώβρη 2011 και 2012, παρατηρείται διάβρωση, η οποία φθάνει και τα 4 μέτρα.



(α)



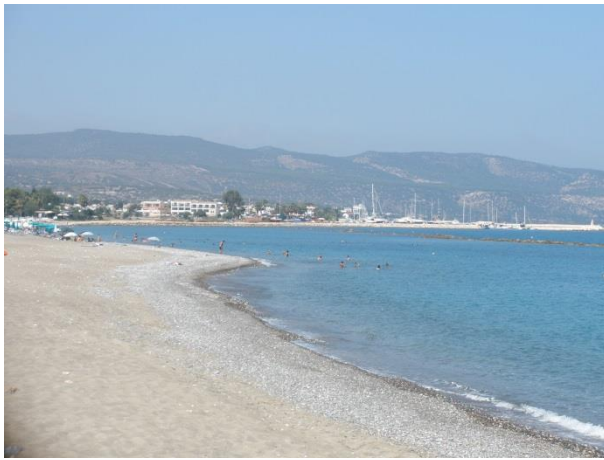
(β)



(γ)



(δ)



(ε)



(ζ)

Εικόνα 4.25 (α), (β), (γ), (δ), (ε), (ζ): Σημερινή κατάσταση δημοτικής παραλίας

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

Τρίτο Τμήμα:

Στην περιοχή δεν έχουν κατασκευαστεί τα έργα που έχουν προγραμματιστεί. Σύμφωνα με τις ετήσιες αποτυπώσεις της ακτογραμμής, φαίνεται ότι αυτή συνεχίζει να υποχωρεί (Εικόνα 4.19). Κατά τις μετρήσεις 2008 και 2012, η ακτογραμμή υποχωρεί μέχρι και 15 μέτρα κατάντη του 4^{ου} κυματοθραύστη. Η υποχώρηση είναι εμφανής ακόμα και μεταξύ των μετρήσεων που έγιναν τον Οκτώβριο του 2011 και αυτών που έγιναν το 2012, η οποία φθάνει σε κάποια σημεία τα 4 μέτρα.



(α)



(β)

Εικόνα 4.26 (α), (β): Σημερινή κατάσταση παραλίας κατασκηνωτικού χώρου

Πηγή: Προσωπικό αρχείο

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η εφαρμογή του μοντέλου γίνεται αρχικά για τη χρονική περίοδο 2002, δηλαδή πριν από την κατασκευή των έργων και για το 2012, μετά την επέκταση του λιμένα και την κατασκευή των κυματοθραυστών. Η εφαρμογή ξεκινά με την κατασκευή της βαθυμετρίας, τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των κυμάτων (ύψος κύματος, περίοδος, διεύθυνση) και των τάσεων ακτινοβολίας χρησιμοποιώντας το PMS, συνεχίζεται με την εφαρμογή του Υδροδυναμικού μοντέλου και στο τέλος υπολογίζεται η κίνηση του ιζήματος. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το 2002 και έπειτα για το 2012.

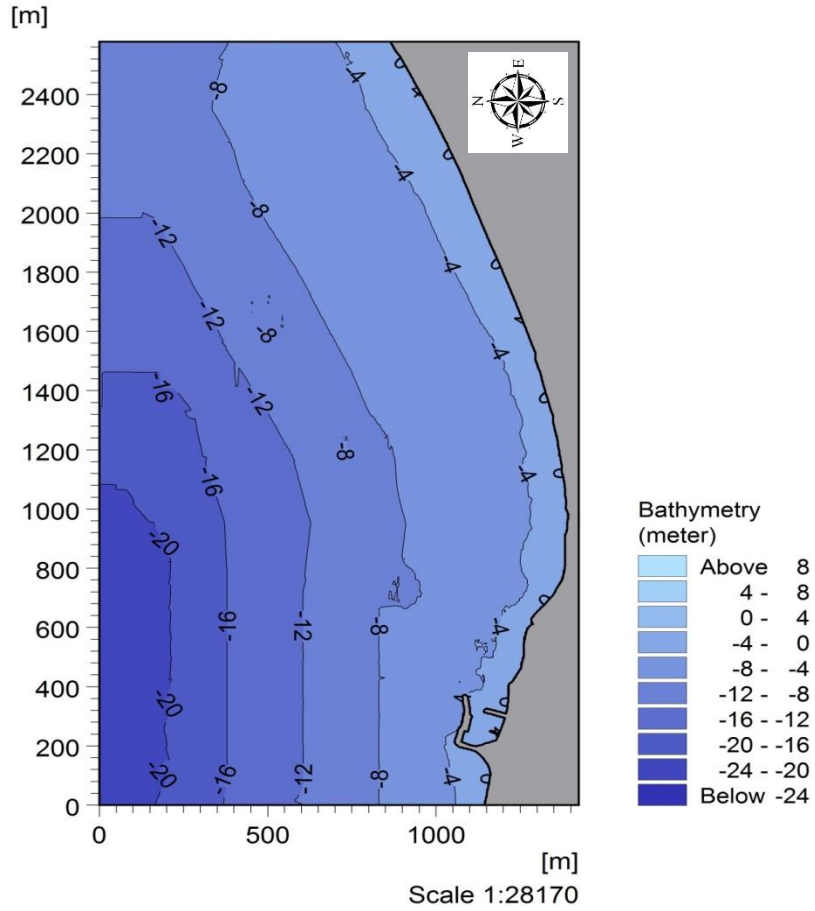
5.1. Χρονική περίοδος 2002

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των τεσσάρων τμημάτων του Mike 21 και γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των τμημάτων αυτών και των παραμέτρων και διαδικασιών που ακολουθήθηκαν.

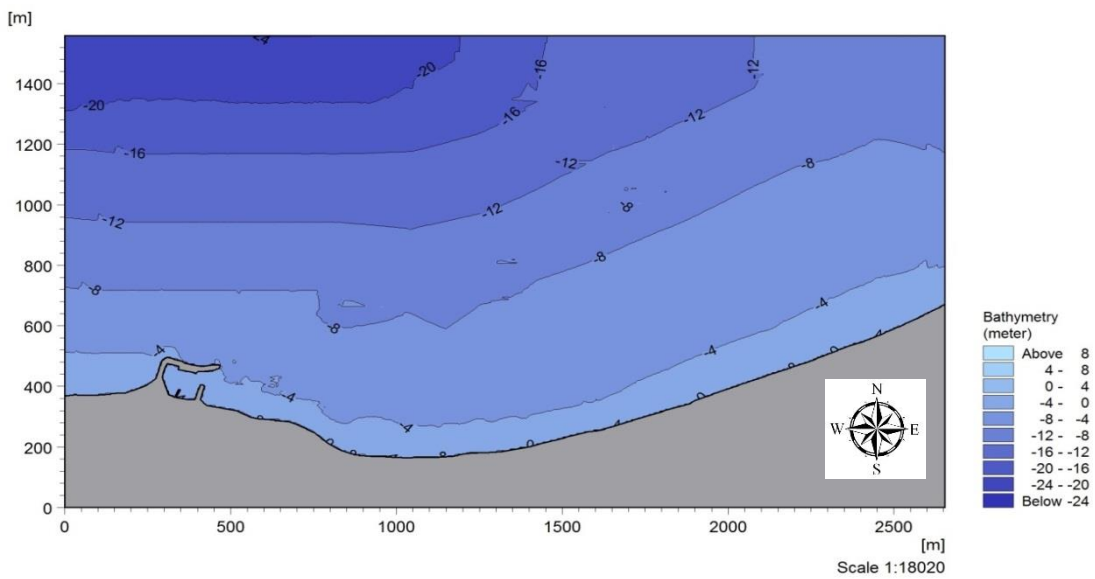
5.1.1. Βαθυμετρία

Η περιοχή, όπως έχει αναφερθεί, βάλλεται από ανέμους 7 διευθύνσεων και η βαθυμετρία κατασκευάστηκε για κάθε μία διεύθυνση. Χρησιμοποιήθηκαν βυθομετρικές μετρήσεις του 2002, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν από τον Κλάδο Θαλασσιών Έργων. Η ακτογραμμή προέκυψε επίσης από αποτύπωση του Τμήματος του Υπουργείου Συγκοινωνιών και Έργων. Κάθε φορά η ακτογραμμή στρεφόταν ώστε να είναι κάθετη στη διεύθυνση του αντίστοιχου ανέμου. Το Mike 21 δέχεται τα κύματα από τα αριστερά, υπό γωνία 270° , με αποτέλεσμα κάθε φορά η ακτογραμμή να στρέφεται, έτσι ώστε η εκάστοτε διεύθυνση να είναι παράλληλη με τον άξονα x.

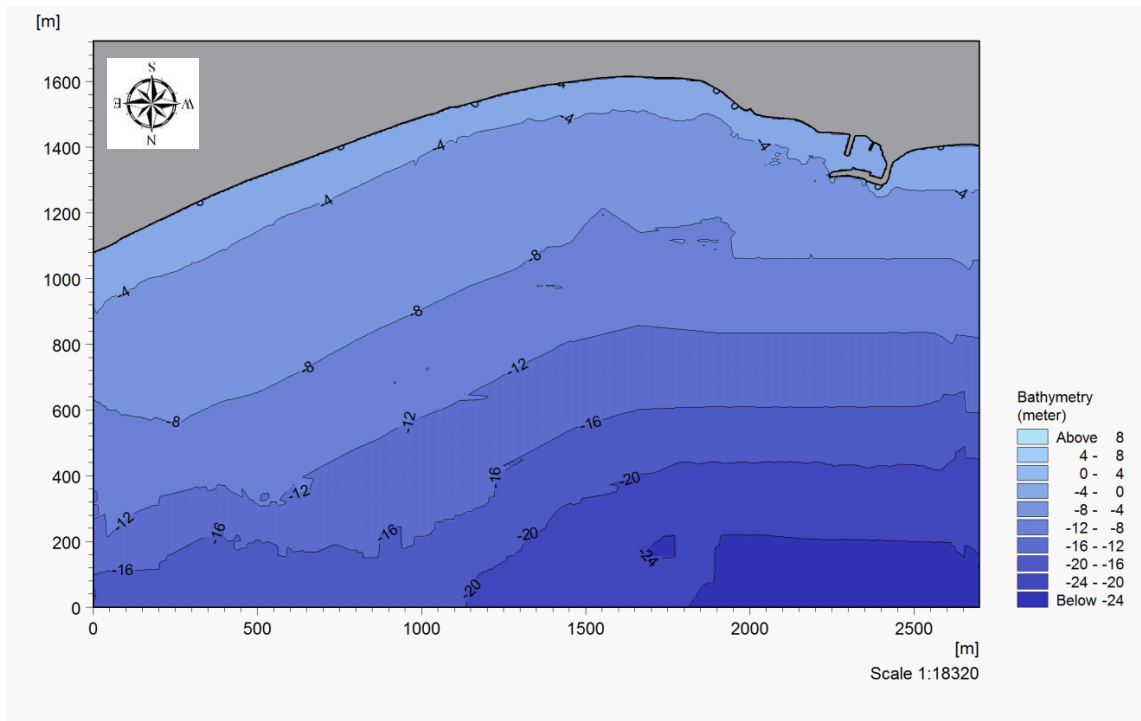
Για την κατασκευή της βαθυμετρίας, επιλέχθηκε για όλες τις περιπτώσεις, διάσταση καννάβου 1.5 m, το ύψος και το μήκος της περιοχής ποικίλει ανάλογα με τη διεύθυνση ανέμου και σε όλες τις περιπτώσεις δόθηκε η τιμή 10 για την ακτή. Παρακάτω παρουσιάζεται η βαθυμετρία για τις επτά διευθύνσεις ανέμου.



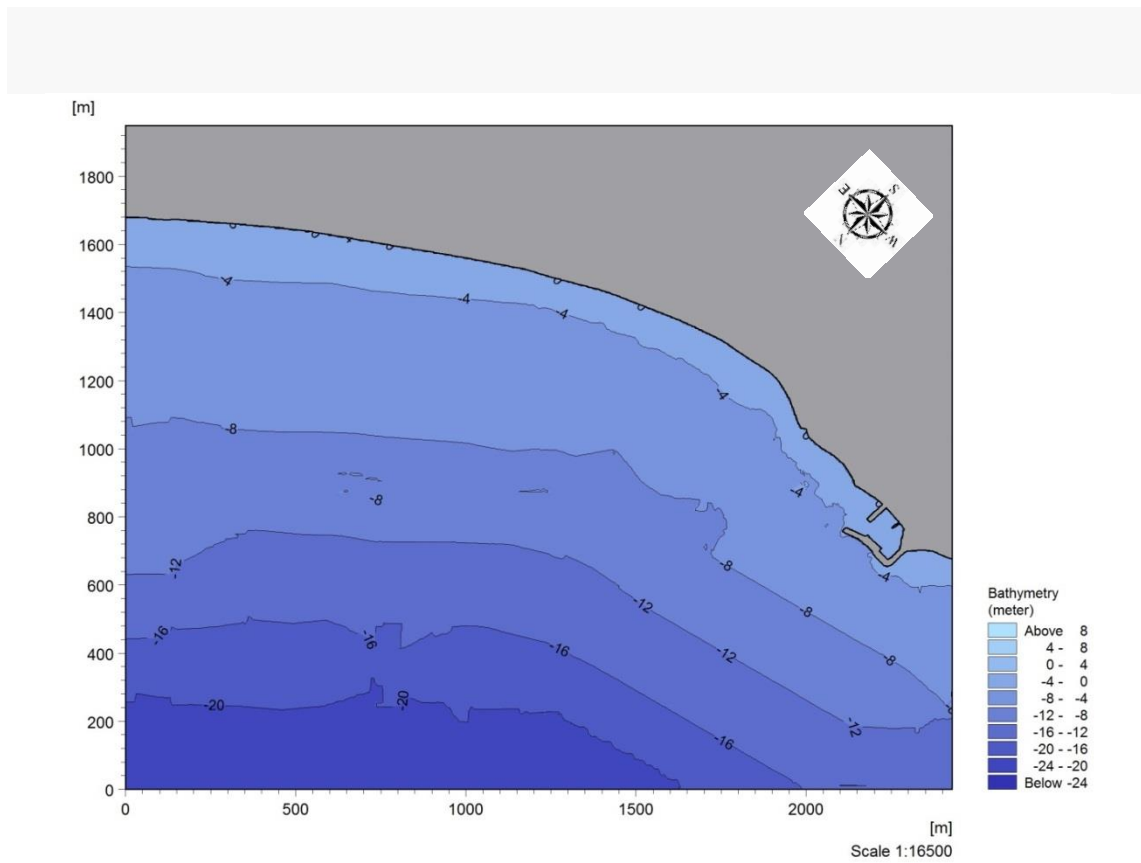
Εικόνα 5.1: Βαθυμετρία Βόρειας Διεύθυνσης



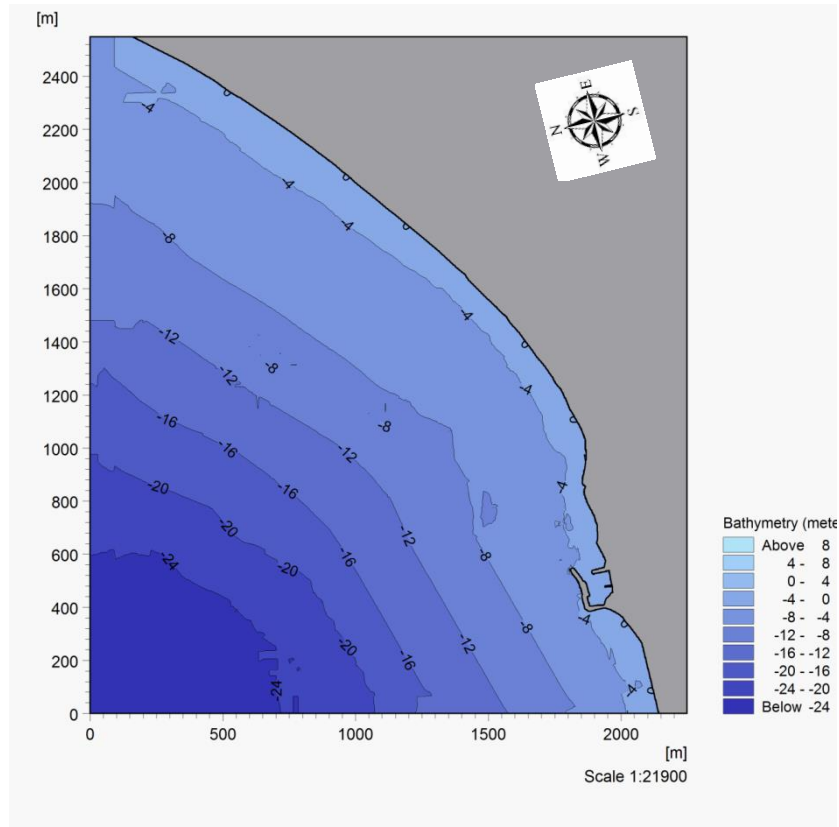
Εικόνα 5.2: Βαθυμετρία Δυτικής Διεύθυνσης



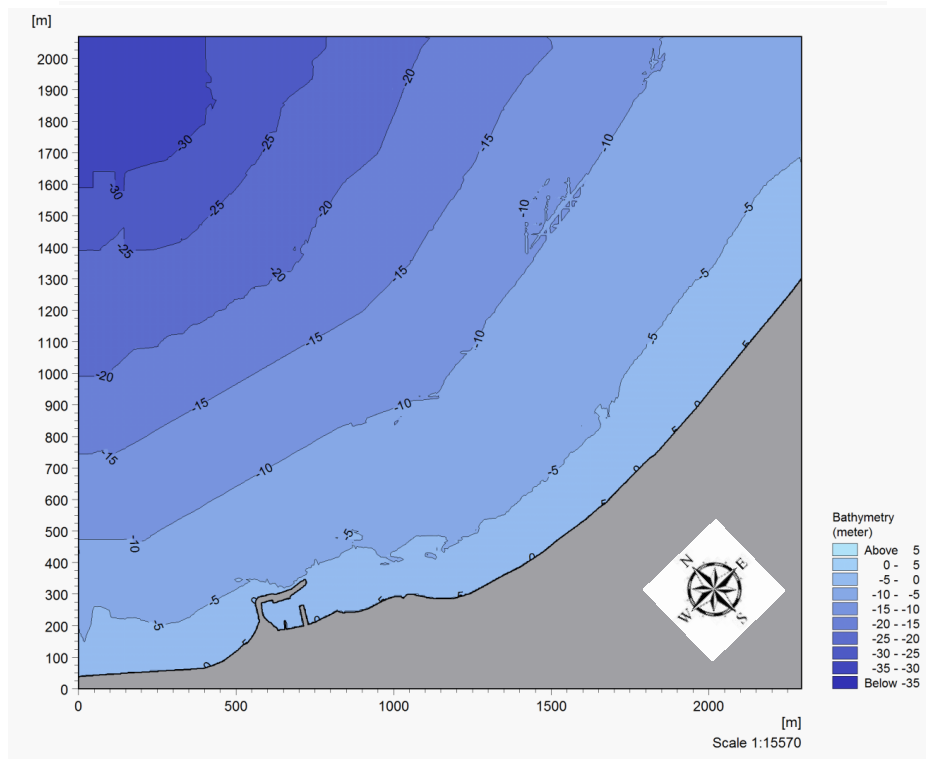
Εικόνα 5.3: Βαθυμετρία Ανατολικής Διεύθυνσης



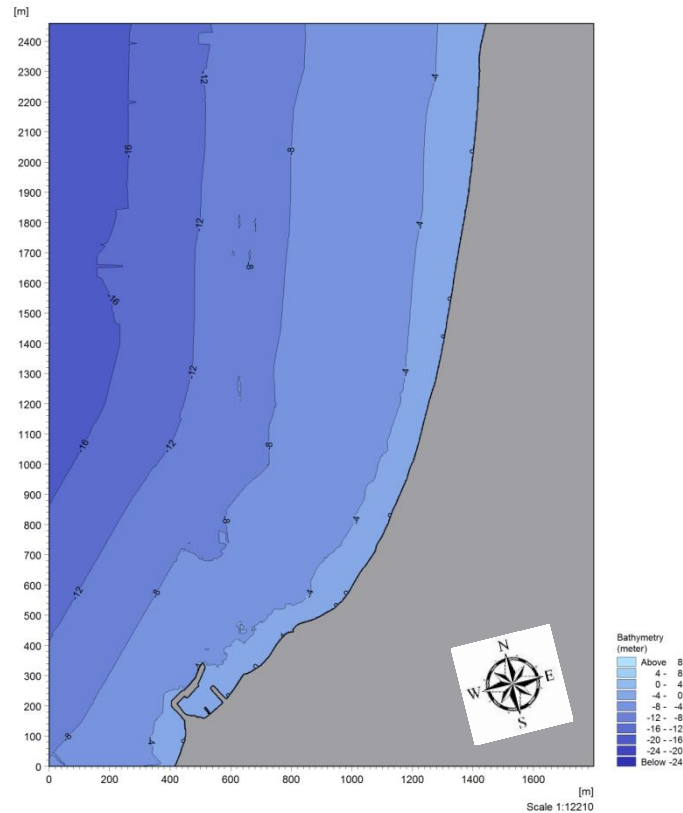
Εικόνα 5.4: Βαθυμετρία Ανατολικής-Βορειοανατολικής Διεύθυνσης



Εικόνα 5.5: Βαθμετρία Βόρειας-Βορειοανατολικής διεύθυνσης



Εικόνα 5.6: Βαθμετρία Δυτικής-Βορειοδυτικής Διεύθυνσης



Εικόνα 5.7: Βαθυμετρία Βόρειας-Βορειοδυτικής Διεύθυνσης

5.1.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων PMS

Κατά την εφαρμογή του PMS, ορίζεται αρχικά ο τύπος της προσομοίωσης, ο οποίος επιλέγεται να είναι η κανονική προσομοίωση (Normal PMS). Καθορίζεται η τιμή της βαθυμετρίας, η οποία αντιστοιχεί στη ξηρά και είναι ίση με 10, εισάγεται το εκάστοτε αρχείο της βαθυμετρίας και επιλέγεται η προσομοίωση για σταθερές συνθήκες (stationary). Στη συνέχεια, στις οριακές συνθήκες, επιλέγεται ο κυματισμός να είναι τυχαίος παραμετρικός (Parametric random) και ορίζονται το μέσο τετραγωνικό ύψος, η περίοδος αιχμής του κύματος και η μέση διεύθυνση κύματος. Επιπλέον, επιλέγεται ο τύπος των πλευρικών ορίων, ο οποίος είναι συμμετρικός.

Στις παραμέτρους του μοντέλου, επιλέγεται μηδενική ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, καθώς δεν έχει ληφθεί υπόψη η παλίρροια. Στις παραμέτρους επίλυσης, επιλέγεται η απλή προσέγγιση και η συμπερίληψη της τριβής του πυθμένα στην προσομοίωση, διατηρώντας την προεπιλεγμένη τιμή για την τραχύτητα Nikuradse k_N ,

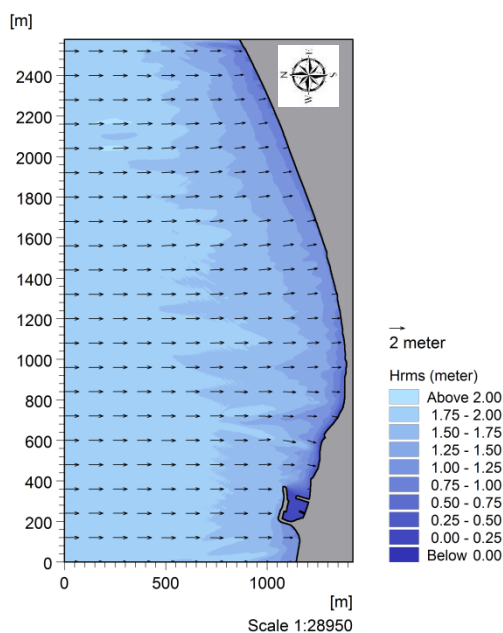
καθώς επίσης και της θραύσης, διατηρώντας τις προεπιλεγμένες τιμές. Στα αποτελέσματα προκύπτουν δύο αρχεία, εκ των οποίων το ένα αφορά τα χαρακτηριστικά του κύματος (ύψος, περίοδος, διεύθυνση) και το άλλο τις τάσεις ακτινοβολίας. Αφού βρέθηκαν οι δυσμενέστεροι κυματισμοί που πλήττουν την περιοχή, επιλέχθηκαν να μελετηθούν οι κυματισμοί από 3-9 μποφόρ. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυματικά σενάρια και τα αποτελέσματα αυτών για το σημαντικό ύψος κύματος. Να σημειωθεί ότι δίνονται αντιπροσωπευτικά τα αποτελέσματα των διευθύνσεων με τους μέγιστους κυματισμούς, καθώς τα αποτελέσματα της ίδιας διεύθυνσης αλλά μικρότερης έντασης είναι ποιοτικά όμοια. Τα αποτελέσματα των υπόλοιπων διευθύνσεων παρατίθενται (Παράρτημα Α, Εικόνα 1-218).

Πίνακας 5.1: Κυματικά σενάρια

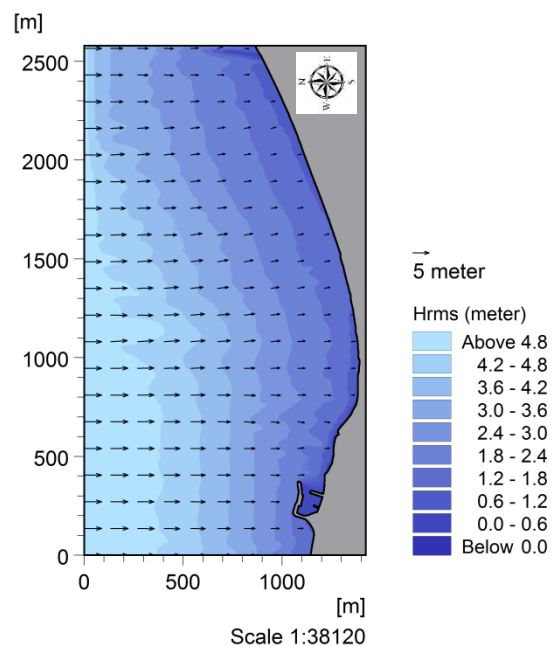
| Συνθήκες Fetch-Limited | | | | | | | |
|------------------------|----------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Bf | Βόρειος | Βορειο- Βορειοανατολικός | Ανατολικός- Βορειοανατολικός | Ανατολικός | Δυτικός | Βορειο- Βορειοδυτικός | Δυτικός- Βορειοδυτικός |
| 3 | H=0,635m T=3,248s | H= 0,591m T=3,113s | H= 0,263m T= 2,034s | H= 0,19m T= 1,708s | H= 0,401m T= 2,533s | H= 0,665m T= 2,138s | H= 0,617m T=3,192s |
| 4 | H=1,302m T=4,587s | H=1,174m T=4,343m | H= 0,465m T= 2,667s | H= 0,331m T= 1,708s | H= 0,732m T= 3,398s | H= 1,402m T= 4,774 s | H= 1,248m T=4,485s |
| 5 | H=1,902m T=5,52m | H=1,692m T=5,196s | H=6,641m T=3,101s | H=0,456m T=2,563s | H=1,022m T=3,991s | H=2,073m T=5,774s | H=1,812m T=5,384s |
| 6 | H=2,651m T=6,498s | H=2,336m T=6,086s | H=0,862m T=3,553s | H=0,611m T=2,928s | H=1,382m T=4,609s | H=2,915m T=6,825s | H=2,515m T=6,324s |
| 7 | H=3,424m T=7,365s | H=3,001m T=6,875s | H=1,109m T=3,957 | H=0,773m T=3,252s | H=1,755m T=5,156s | H=3,067m T=6,954s | H=3,241m T=7,157s |
| 8 | H=4,35m T=8,275m | H=3,799m T=7,703s | H=1,365m T=4,38s | H=0,966m T=3,593s | H=2,203m T=5,731s | H=4,828m T=8,739s | H=4,096m T=8,017s |
| 9 | H=5,3m T=9,101s | H=3,633m T=7,425s | H=1,648m T=4,766s | H=1,166m T=3,905s | H=2,663m T=6,254s | H=5,213m T=9,022s | H=3,633m T=7,425s |
| 10 | 0 | 0 | 0 | H=1,4m T=4,233s | 0 | 0 | 0 |

5.1.2.1. Βόρεια Διεύθυνση

Ο κόλπος είναι εκτεθειμένος στο βόρειο άνεμο λόγω του προσανατολισμού του. Οι κυματισμοί προσβάλλουν κάθετα την ακτογραμμή και το ύψος κύματος διατηρείται σχεδόν αμείωτο, όπου και θραύεται σε μικρή απόσταση από την ακτή. Στο κέντρο και στα δυτικά του κόλπου και σε απόσταση περίπου 400 m από την ακτή, το ύψος κύματος δεν υπερβαίνει τα 3 m. Στα ανατολικά παρατηρούνται μικρότερα ύψη καθώς σε απόσταση 200 m από την ακτή δεν ξεπερνούν τα 2 m. Το μεγαλύτερο ύψος κύματος είναι τα 5.3 m σε απόσταση 1 km από το κέντρο του κόλπου. Εντός του λιμένα, το ύψος κύματος κυμαίνεται από 0,18-0,01 m, ενώ στην προσήνεμη πλευρά κυμαίνεται μεταξύ 2 και 1.5 m. Στην είσοδο παρατηρούνται κυματισμοί από 1,0 μέχρι 2,0 m. Λόγω των ήπιων κλίσεων του πυθμένα, η ζώνη θραύσης εκτείνεται μέχρι και σε απόσταση 260 m από την ακτή. Παρακάτω παρουσιάζονται το ύψος και η διεύθυνση των κυμάτων για τον άνεμο των 5 και 9 μποφόρ.



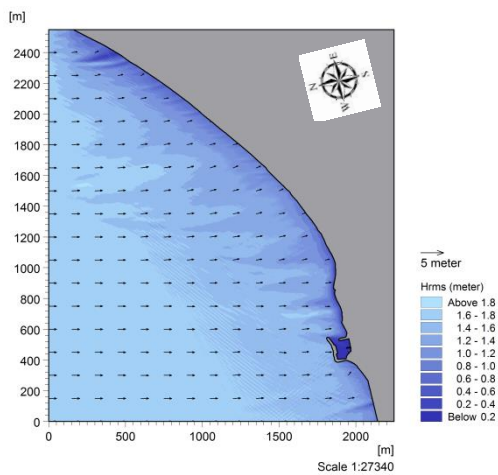
Εικόνα 5.8: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ



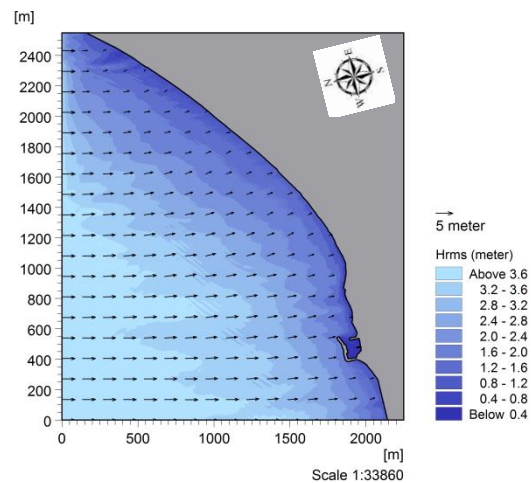
Εικόνα 5.9: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ

5.1.2.2. Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση

Οι κυματισμοί προσβάλλουν την ακτογραμμή υπό μικρή γωνία και το ύψος κύματος διατηρείται σχεδόν αμείωτο, όπου και θραύεται σε μικρή απόσταση από την ακτή. Στο κεντρικό τμήμα του κόλπου και σε απόσταση 200 μέτρα από την ακτή, το ύψος κύματος φθάνει τα 2,5 m. Στα ανατολικά παρατηρούνται μικρότερα ύψη κύματος, ενώ στα δυτικά και σε απόσταση 700 μέτρων, παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές των κυματισμών, που φθάνουν τα 3,7 m. Στη λιμενολεκάνη παρατηρείται ηρεμία, ενώ στην προσήνεμη πλευρά καταγράφονται κυματισμοί από 1,0-2,0 m. Λόγω των ήπιων κλίσεων του πυθμένα, η ζώνη θραύσης εκτείνεται μέχρι και σε απόσταση 160 m από την ακτή.



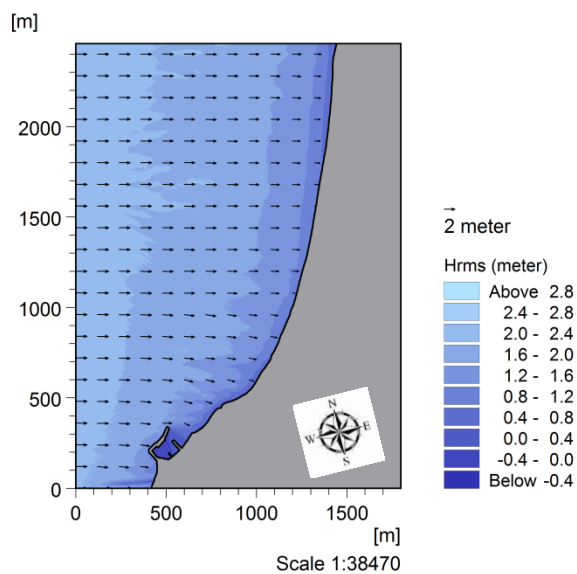
Εικόνα 5.10: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



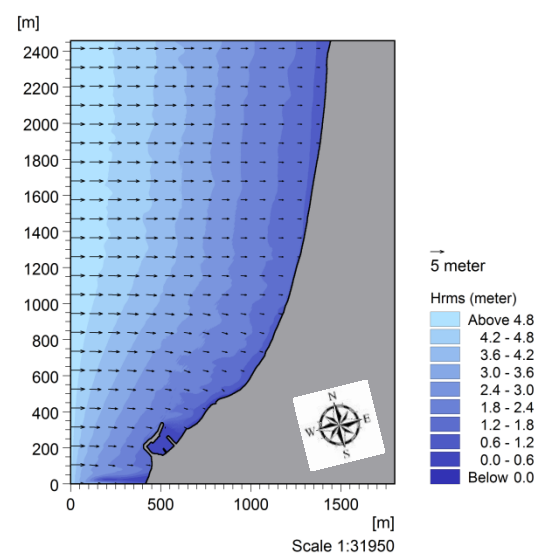
Εικόνα 5.11: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ

5.1.2.3. Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση

Οι κυματισμοί προερχόμενοι από τη Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση επηρεάζουν σημαντικά την ακτή μελέτης. Προσβάλλουν σχεδόν κάθετα την ακτογραμμή με το ύψος κύματος να μειώνεται στη ζώνη θραύσης. Παρατηρούνται κυματισμοί μέχρι 5,2 m σε απόσταση 800 μέτρων από την ακτή. Στο μυχό του κόλπου και σε απόσταση 300 μέτρων, οι κυματισμοί δεν ξεπερνούν τα 3 μέτρα, ενώ προς τα ανατολικά μειώνονται. Εντός της λιμενολεκάνης, παρατηρείται ηρεμία, ενώ στην προσήνεμη πλευρά του έργου οι κυματισμοί φθάνουν μέχρι και τα 2 m. Λόγω των ήπιων κλίσεων του πυθμένα, η ζώνη θραύσης εκτείνεται μέχρι και σε απόσταση 230 m από την ακτή.



Εικόνα 5.12: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



Εικόνα 5.13: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ

5.1.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων Hd

Κατά την εφαρμογή του υδροδυναμικού μοντέλου, στις βασικές παραμέτρους επιλέγεται αρχικά η υδροδυναμική ανάλυση, εισάγεται το αρχείο της βαθυμετρίας και επιλέγεται η κάθε προσομοίωση να μην είναι συνέχεια της άλλης, δηλαδή «cold start». Ο χρόνος προσομοίωσης και το χρονικό βήμα, επιλέγονται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται μόνιμη κατάσταση της ροής και ο αριθμός Courant να είναι μικρότερος από το 10, ώστε να υπάρχει επίσης ευστάθεια στις τιμές. Ο αριθμός Courant υπολογίζεται ως εξής:

$$C_r = C \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

όπου Δx είναι το χωρικό βήμα του καννάβου, Δt το χρονικό βήμα και C η ταχύτητα η οποία είναι ίση με $C = (gd)^{1/2}$. Η τιμή αυτή διαφοροποιείται αφού χρησιμοποιείται διαφορετικό χρονικό βήμα και στις πλείστες των περιπτώσεων ήταν κάτω από 5.

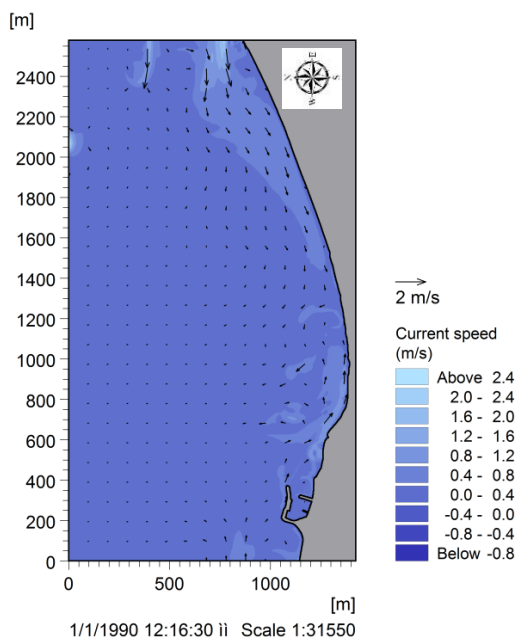
Οι δύο αυτοί χρονικοί παράμετροι διαφοροποιούνται ανάλογα με τον κυματισμό και την ένταση του ανέμου. Όσον αφορά στα ανοιχτά όρια, αυτά καθορίζονται από το πρόγραμμα με την εισαγωγή της βαθυμετρίας, πηγές και καταβόθρες δεν συμπεριλαμβάνονται, καθώς επίσης και η παλίρροια αφού η διακύμανση της είναι πολύ μικρή στην περιοχή μελέτης.

Στις υδροδυναμικές παραμέτρους, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας επιλέγεται να έχει μηδενική τιμή και τα όρια επιλέγονται να έχουν τιμή 12. Η παράμετρος αυτή είναι πολύ σημαντική, καθώς μπορεί να δώσει λανθασμένη μορφή των κυματογενών ρευμάτων, γεγονός το οποίο διαπιστώθηκε από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Ο συντελεστής τυρβώδους διάχυσης επιλέγεται να είναι ίσος με 0,07 καθώς δεν παρουσίαζε προβλήματα αστάθειας στις διάφορες δοκιμές και έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε άλλες εφαρμογές με παρόμοιες συνθήκες. Η αντίσταση του πυθμένα στη ροή, επιλέγεται να είναι σταθερή και ίση με $32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ και εκφράζεται μέσω του συντελεστή τριβής Manning. Στη συνέχεια εισάγεται το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας που έχει προκύψει από το PMS και τέλος επιλέγεται να μην συμπεριληφθεί ο άνεμος, καθώς γίνεται θεώρηση ότι έχει σταθερά χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων. Από

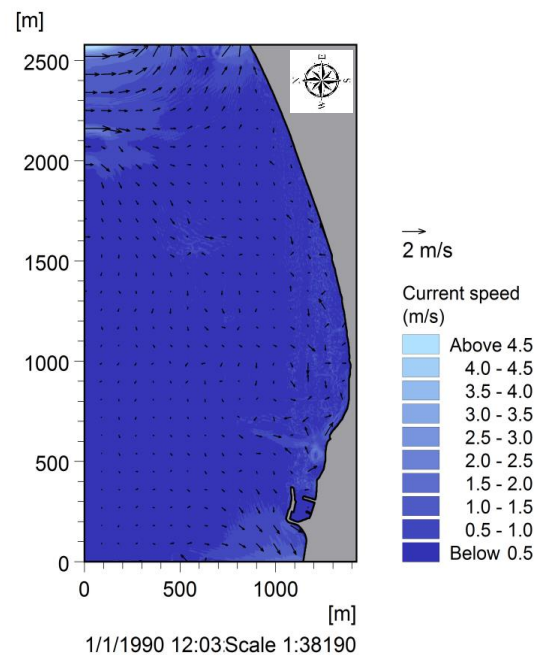
την υδροδυναμική προσομοίωση, εξάγεται ένα αρχείο με τα βάρη του νερού και τις παροχές ανά μονάδα μήκους κατά x και y . Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ανά διεύθυνση ανέμου, παρουσιάζονται παρακάτω.

5.1.3.1. Βόρεια διεύθυνση

Σε μικρότερης έντασης άνεμο (5 μποφόρ), δημιουργούνται δύο ρεύματα αντίθετης φοράς κατά μήκος της ακτής, τα οποία συναντώνται στο μέσο περίπου του κόλπου. Σε μεγαλύτερης έντασης άνεμο (9 μποφόρ), παρατηρείται η δημιουργία ενός ρεύματος το οποίο έχει βορειοανατολική κατεύθυνση και ενός άλλου στην προσήνεμη πλευρά του λιμένα, το οποίο έχει βορειοδυτική κατεύθυνση.



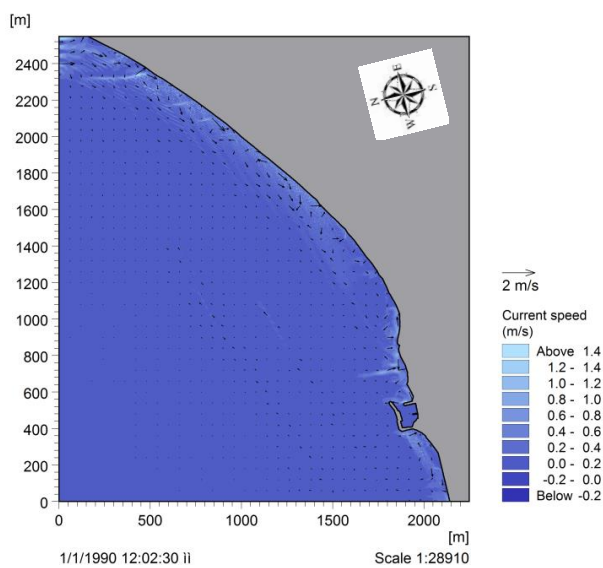
Εικόνα 5.14: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ



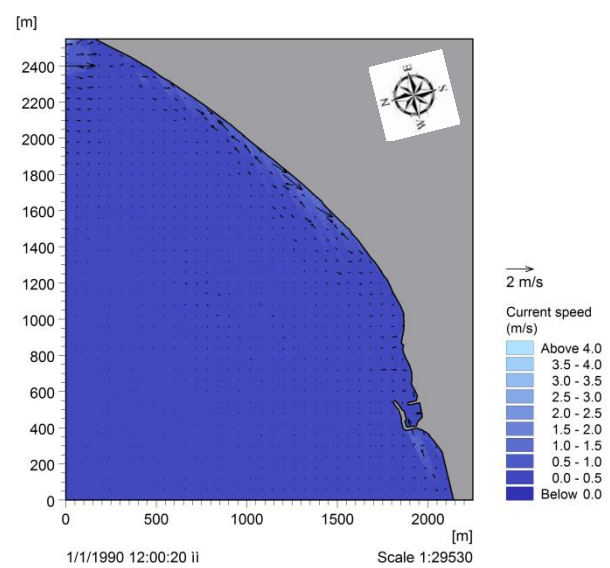
Εικόνα: 5.15: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ

5.1.3.2. Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση

Η γενική εικόνα της κυματογενούς κυκλοφορίας είναι παρόμοια για όλες τις κυματικές συνθήκες. Η κατεύθυνση του ανύσματος των ρευμάτων είναι σε γενικές γραμμές παράλληλο με την ακτογραμμή και κατευθύνονται από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά και από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά. Μεγαλύτερες ταχύτητες ρευμάτων καταγράφονται στο μέσο περίπου της ακτής και φθάνουν τα 2 m/s.



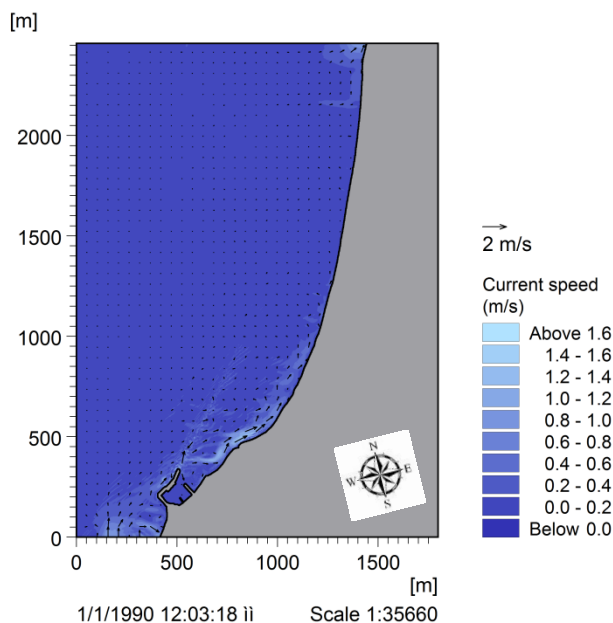
Εικόνα 5.16: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



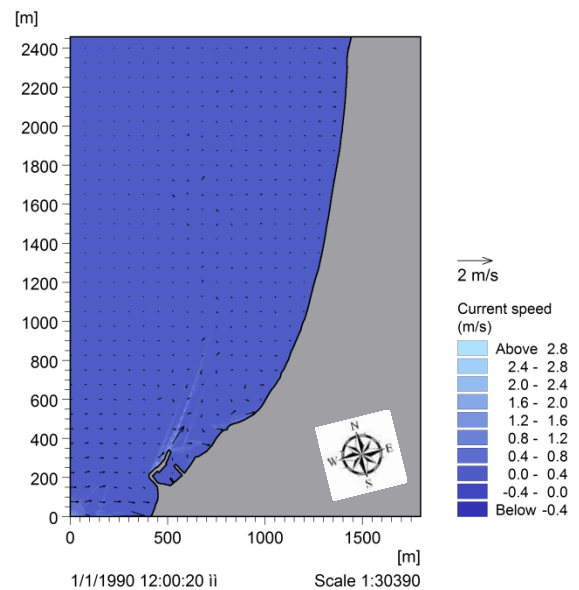
Εικόνα 5.17: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ

5.1.3.3. Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση

Σε ανέμους μικρότερης έντασης, παρατηρείται ένα ρεύμα το οποίο ξεκινάει από την υπήνεμη πλευρά του λιμένα και κατευθύνεται από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά κατά μήκος της ακτής με ταχύτητα που φθάνει και τα 2 m/s και στη συνέχεια εξασθενεί. Σε ανέμους μεγαλύτερης έντασης, παρατηρείται η δημιουργία του ίδιου ρεύματος, το οποίο όμως κινείται με μικρότερη ταχύτητα και εξασθενεί πιο γρήγορα. Στο υπόλοιπο τμήμα της ακτής τα ρεύματα είναι αμελητέα.



Εικόνα 5.18: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



Εικόνα 5.19: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ

5.1.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων ST

Στις βασικές παραμέτρους του μοντέλου στερεομεταφοράς, επιλέγεται ο τύπος της προσομοίωσης μεταξύ συνθηκών αμιγούς ρεύματος και συνδυασμού ρευμάτων και κυμάτων. Οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή προκαλούν τόσο κυματισμούς όσο και ρεύματα, επομένως επιλέγεται ο δεύτερος τύπος προσομοίωσης. Στη συνέχεια εισάγεται το αρχείο της υδροδυναμικής ανάλυσης. Η ανάλυση γίνεται για όλη την περιοχή μελέτης και με χρόνο προσομοίωσης ίδιο με αυτόν του υδροδυναμικού μοντέλου.

Στις παραμέτρους του μοντέλου, επιλέγεται το ντετερμινιστικό μοντέλο για δύο διαστάσεις και εισάγεται ο πίνακας μεταφοράς ιζήματος. Ο πίνακας αυτός δημιουργείται χρησιμοποιώντας το Mike 21 Toolbox και την επιλογή Sediments και Generation of Sediment Table. Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι γενικές παράμετροι (απόκλιση υπολογισμού συγκέντρωσης, μέγιστος αριθμός περιόδων κύματος, σχετική πυκνότητα ιζήματος, η παράμετρος Shields και η θερμοκρασία του νερού) και οι αντίστοιχες τιμές τους. Επιπρόσθετα, επιλέγεται η συμπερίληψη των αμμοκυμάτων και η μη συμπερίληψη της κλίσης του πυθμένα.

Select General Parameters

On this page you specify the sediment transport parameters and whether you want to account for the influence of ripples and/or the bed slope on the sediment transport. You can also choose which description of the bed concentration will be used.

| | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| General Parameters: | | Ripples: |
| Tolerance in calc. of concentration: | <input type="text" value="0.0001"/> | <input checked="" type="radio"/> Include effects |
| Maximum number of wave periods: | <input type="text" value="150"/> | <input type="radio"/> Exclude effects |
| Relative density of sediment: | <input type="text" value="2.65"/> | Bed Slope: |
| Critical value of Shields parameter: | <input type="text" value="0.045"/> | <input type="radio"/> Include Bed Slope |
| Water temperature: | <input type="text" value="16"/> | <input checked="" type="radio"/> Exclude Bed Slope |
| | | Bed Concentration: |
| | | <input checked="" type="radio"/> Deterministic |
| | | <input type="radio"/> Empirical |

Εικόνα 5.20: Γενικές παράμετροι πίνακα μεταφοράς ιζήματος

Στη συνέχεια (Εικόνα 5.21) εισάγονται οι τιμές για την ταχύτητα του ρεύματος, το ύψος και την περίοδο του κύματος, το λόγο ύψους κύματος και βάθος νερού, το μέγεθος και η διακύμανση των κόκκων. Οι τιμές που αφορούν στους κόκκους λήφθηκαν από την Ακτομηχανική Μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την περιοχή. Οι υπόλοιπες τιμές μεταβάλλονται ανάλογα με τον κυματισμό.

Define the Sediment Transport Table Axes

On this page you specify the first value, spacing and the number of points for each axis of the sediment transport table. The table includes current speed, wave height, wave period, wave height/water depth, grain size and sediment grading.

Breaking wave parameters

Gamma 1: Gamma 2:

Sediment table axis

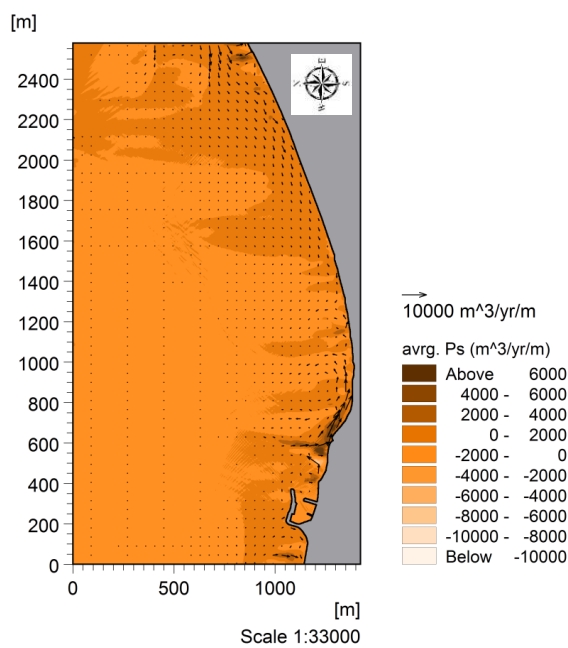
| | First value | Spacing | No of point |
|----------------------------|-------------|---------|-------------|
| Current speed | 0.1 | 0.1 | 20 |
| Wave height | 0.1 | 0.2 | 8 |
| Wave period | 3.248 | 1 | 1 |
| Wave height/water depth | 0.05 | 0.1 | 9 |
| Grain Size | 1.250 | 2.000 | 1 |
| Sediment grading | 1.8 | 0.15 | 1 |
| Bed slope, curr. direction | -0.01 | 0.01 | 3 |
| Bed slope, normal to curr. | -0.02 | 0.02 | 3 |

Εικόνα 5.21: Παράμετροι κυματισμού και ιζήματος πίνακα μεταφοράς ιζήματος

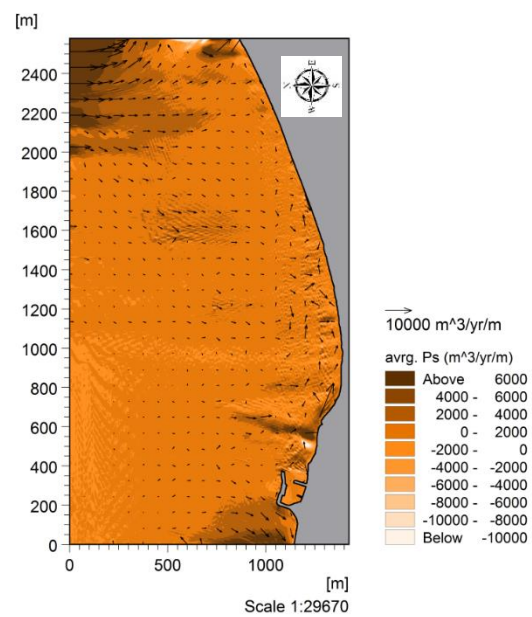
Μετά την κατασκευή του πίνακα, εισάγεται το αρχείο με τα χαρακτηριστικά του κύματος που προέκυψε από το PMS, οι κυματικές συνθήκες θεωρούνται σταθερές και χρησιμοποιούνται οι τιμές που δίνει το πρόγραμμα. Σταθερή θεωρείται και η τριβή του πυθμένα. Τέλος, ορίζονται τα χαρακτηριστικά του ιζήματος, με το πορώδες να λαμβάνεται ίσο με 0,4 και οι υπόλοιπες τιμές να είναι ίσες με τις τιμές του πίνακα που έχει κατασκευαστεί. Προκύπτει ένα αρχείο με το ρυθμό ως προς τον οριζόντιο (P_s) και κατακόρυφο άξονα (Q_s) και ο ρυθμός μεταβολής του πυθμένα (dz/dt). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω. Τονίζεται ότι τα αποτελέσματα λαμβάνονται υπόψη μόνο ποιοτικά, καθώς το μοντέλο θεωρεί ότι υπάρχει άπειρη ποσότητα ιζήματος στην περιοχή, το πάχος του πυθμένα είναι άπειρο και ότι δεν υπάρχει καμία αλληλεπίδραση έξω από τα όρια της περιοχή μελέτης.

5.1.4.1. Βόρεια διεύθυνση

Παρατηρείται μεγάλο δυναμικό μεταφοράς ιζήματος στα Ανατολικά της ακτής με τιμές μεγαλύτερες από $40000 \text{ m}^3/\text{έτος}/\text{m}$. Η ροή του ιζήματος ακολουθεί τη φορά των ρευμάτων. Κατά μήκος της ακτογραμμής παρατηρείται ροή ιζήματος με τιμές μεγαλύτερες από $50000 \text{ m}^3/\text{έτος}/\text{m}$, ενώ στα Δυτικά και σε απόσταση 800 μέτρων από την ακτή, η ροή είναι πολύ μικρή.



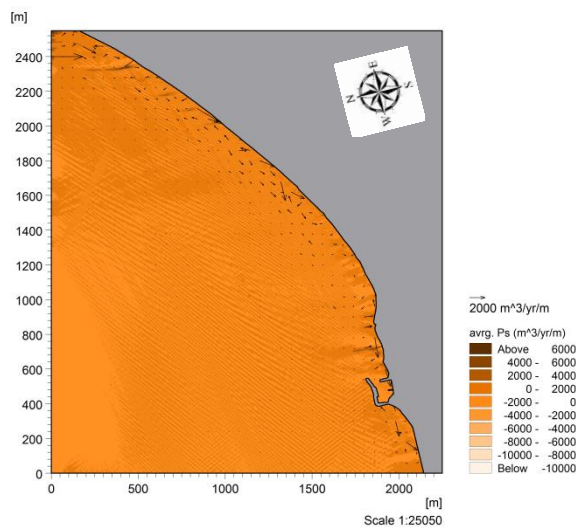
Εικόνα 5.22: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 5 μπόφόρ



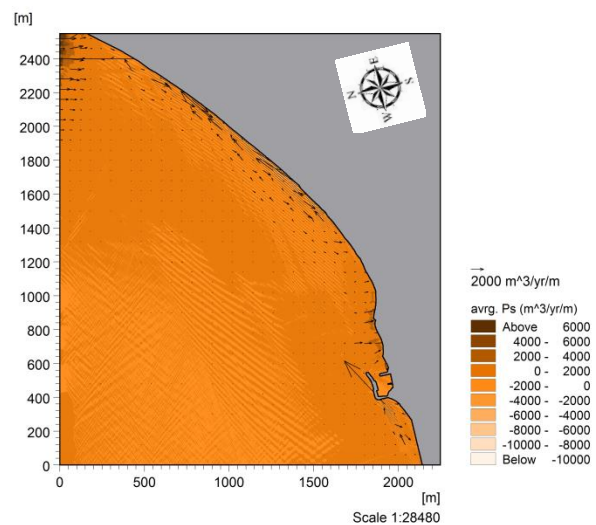
Εικόνα 5.23: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 9 μπόφόρ

5.1.4.2. Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση

Η ροή του ιζήματος ακολουθεί τη φορά των ρευμάτων. Οι τιμές της στερεομεταφοράς κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα. Στα 400 μέτρα από την ακτή οι τιμές της ιζηματομεταφοράς είναι της τάξης των $10000 \text{ m}^3/\text{έτος}/\text{m}$. Βορειοδυτικά η μεταφορά ιζήματος είναι πολύ μικρή έως μηδαμινή, ενώ Βορειοανατολικά παρατηρείται μεγαλύτερη κίνηση.



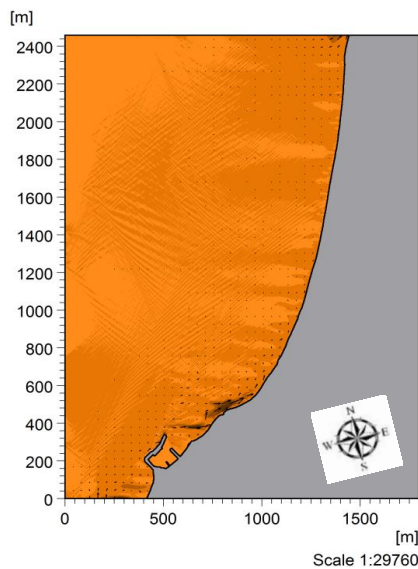
Εικόνα 5.24: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



Εικόνα 5.25: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ

5.1.4.3. Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση

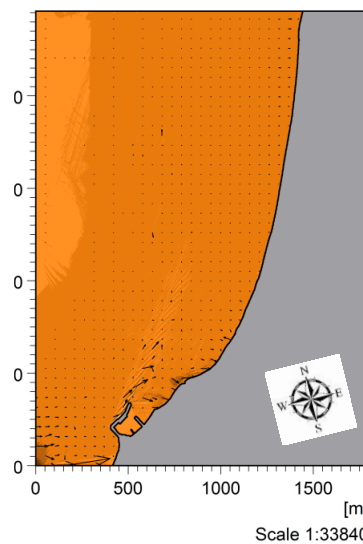
Το ιζήμα κινείται κατά μήκος της ακτής ξεκινώντας κατάντη του λιμένα και στο μυχό του κόλπου αρχίζει να μειώνεται. Η κίνηση του ιζήματος προς τα βαθιά είναι σχεδόν αμελητέα και ακολουθεί τη φορά της υδροδυναμικής κυκλοφορίας. Ο Βόρειος-Βορειοδυτικός άνεμος, όπως φαίνεται από το κυματικό μοντέλο των 5 και 9 μποφόρ, δεν επηρεάζει σημαντικά τη στερεομεταφορά και κατά συνέπεια το ρυθμό της διάβρωσης, συγκριτικά με τις υπόλοιπες δύο κυρίαρχες διευθύνσεις.



Εικόνα 5.26: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ

10000 m³/yr/m
 avg. Ps (m³/yr/m)
 Above 6000
 4000 - 6000
 2000 - 4000
 0 - 2000
 -2000 - 0
 -4000 - -2000
 -6000 - -4000
 -8000 - -6000
 -10000 - -8000
 Below -10000

Scale 1:29760



Εικόνα 5.27: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ

10000 m³/yr/m
 avg. Ps (m³/yr/m)
 Above 6000
 4000 - 6000
 2000 - 4000
 0 - 2000
 -2000 - 0
 -4000 - -2000
 -6000 - -4000
 -8000 - -6000
 -10000 - -8000
 Below -10000

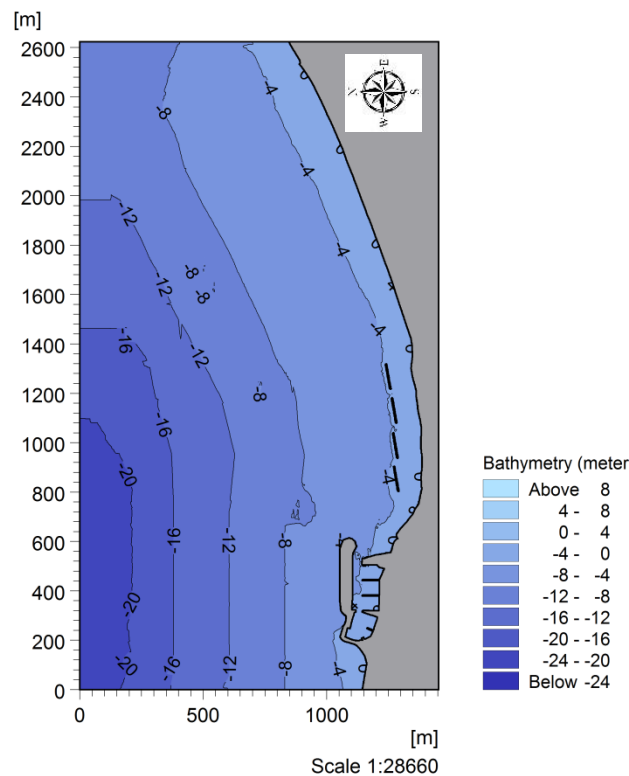
Scale 1:33840

5.2. Χρονική περίοδος 2012

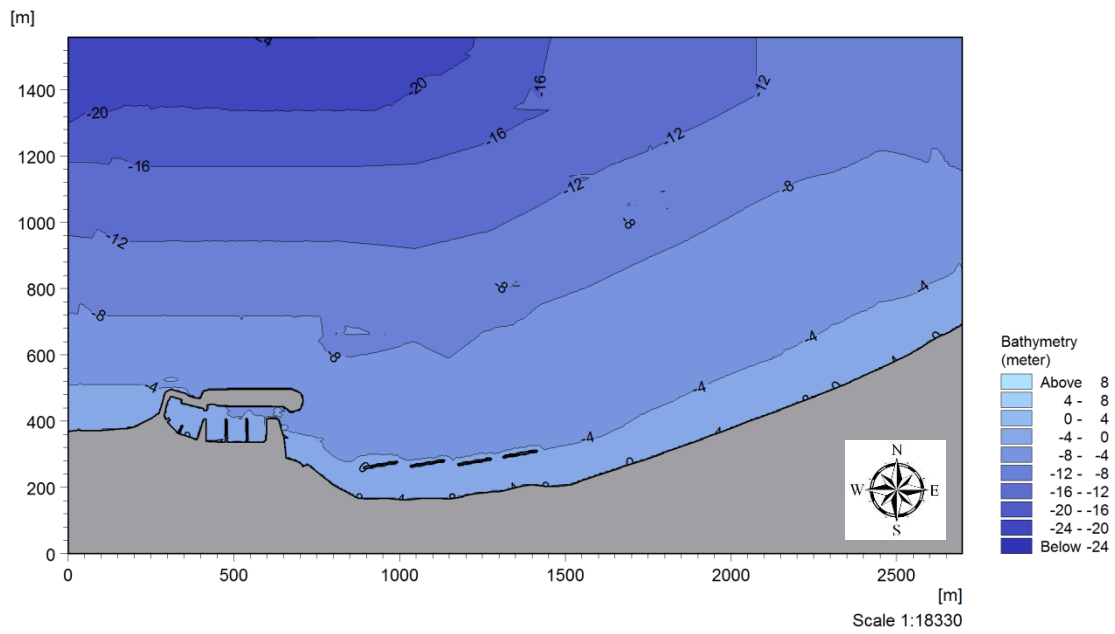
Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με τα έργα. Σημειώνεται ότι όλες οι παράμετροι για όλες τις προσομοιώσεις, είναι ακριβώς ίδιες με τις προσομοιώσεις πριν από την κατασκευή των έργων. Επίσης, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τους κυματισμούς από 5-9 μποφόρ, καθώς οι προσομοιώσεις των 3-4 μποφόρ χωρίς τα έργα, έδωσαν πολύ μικρές τιμές στερεομεταφοράς, οι οποίες σε κάποια σημεία ήταν σχεδόν μηδενικές. Θεωρήθηκε συνετό να μην πραγματοποιηθούν για το 2012.

5.2.1. Βαθυμετρία

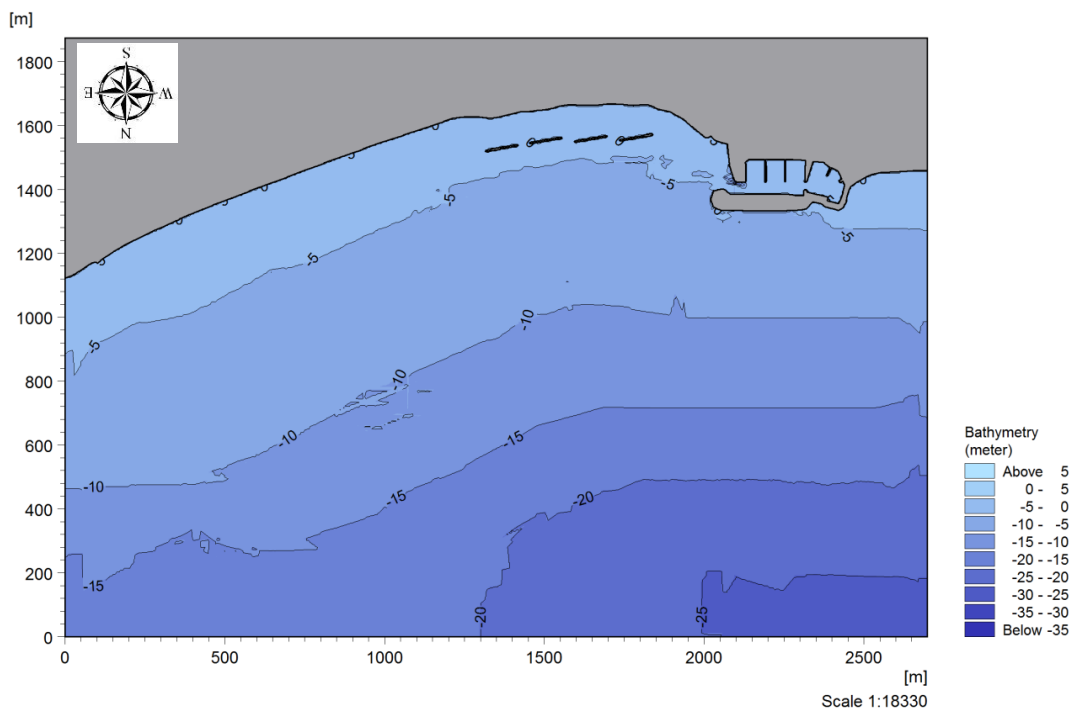
Κατά την κατασκευή της βαθυμετρίας, διατηρήθηκαν οι βαθυμετρικές μετρήσεις του 2002 και χρησιμοποιήθηκε η ακτογραμμή του 2012, όπως αυτή προέκυψε από την αποτύπωση.



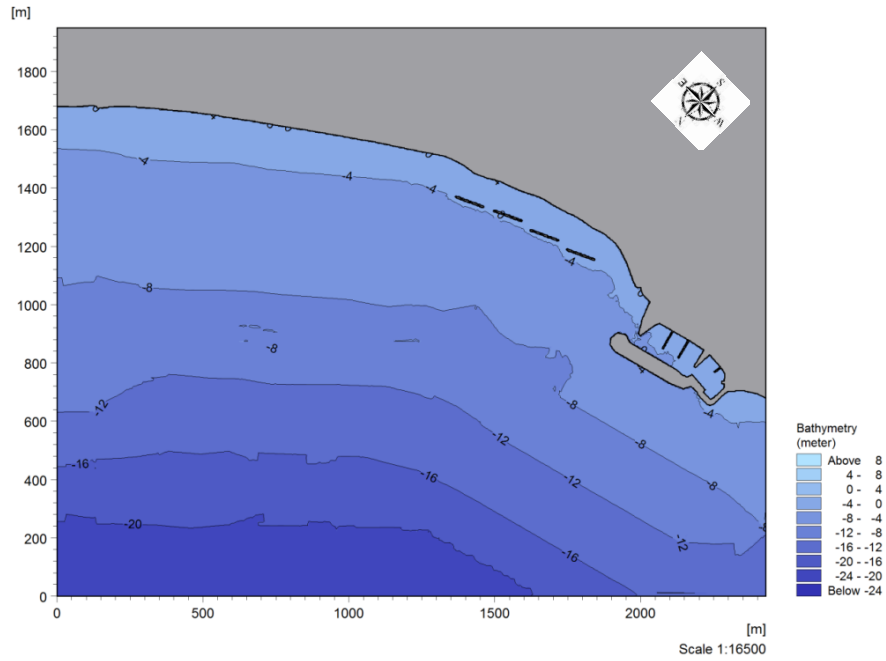
Εικόνα 5.28: Βαθυμετρία Βόρειας Διεύθυνσης με τα έργα



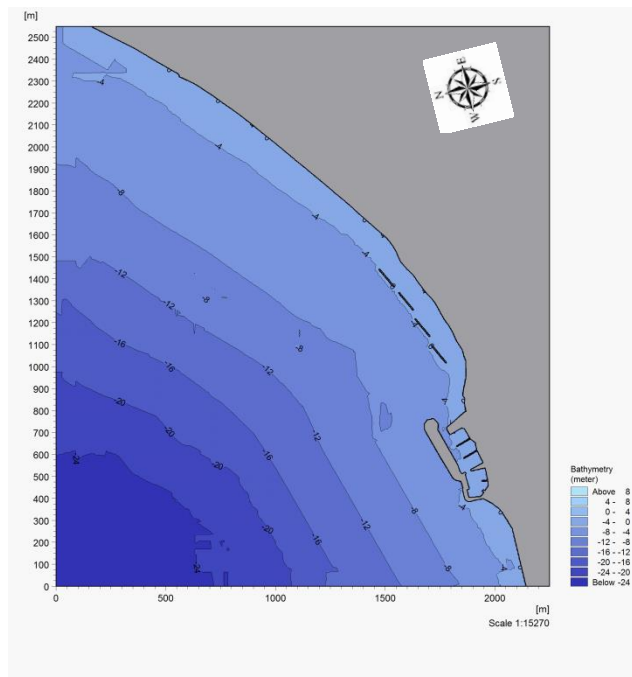
Εικόνα 5.29: Βαθυμετρία Δυτικής διεύθυνσης με τα έργα



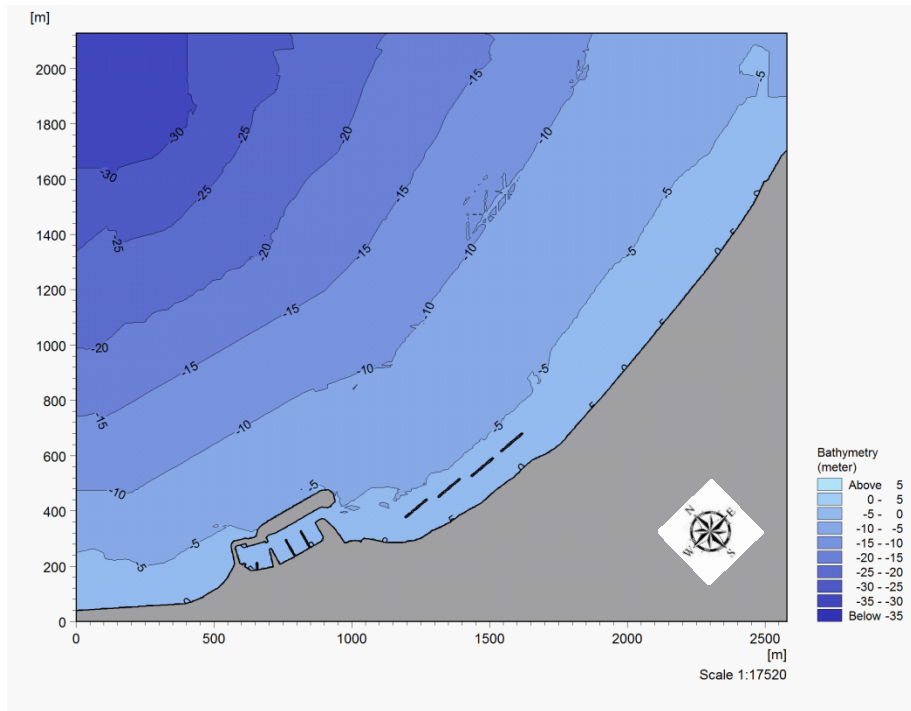
Εικόνα 5.30: Βαθυμετρία Ανατολικής διεύθυνσης με τα έργα



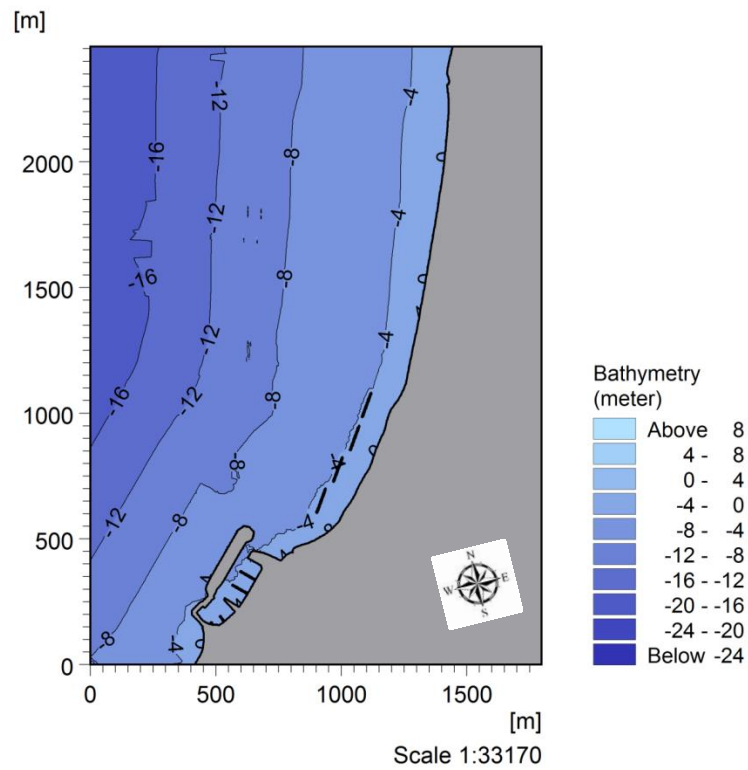
Εικόνα 5.31: Βαθυμετρία Ανατολικής-Βορειοανατολικής διεύθυνσης με τα έργα



Εικόνα 5.32: Βαθυμετρία Βόρειας-Βορειοανατολικής διεύθυνσης με τα έργα



Εικόνα 5.33: Βαθυμετρία Δυτικής-Βορειοδυτικής διεύθυνσης με τα έργα



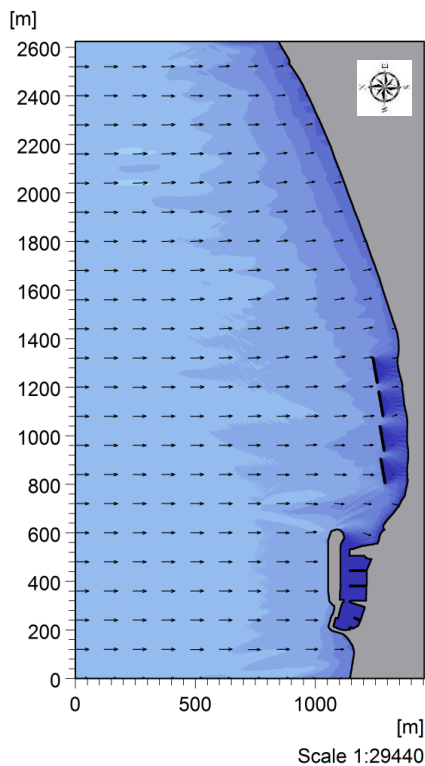
Εικόνα 1.34: Βαθυμετρία Βόρειας-Βορειοδυτικής διεύθυνσης με τα έργα

5.2.2. Αποτελέσματα προσομοιώσεων PMS

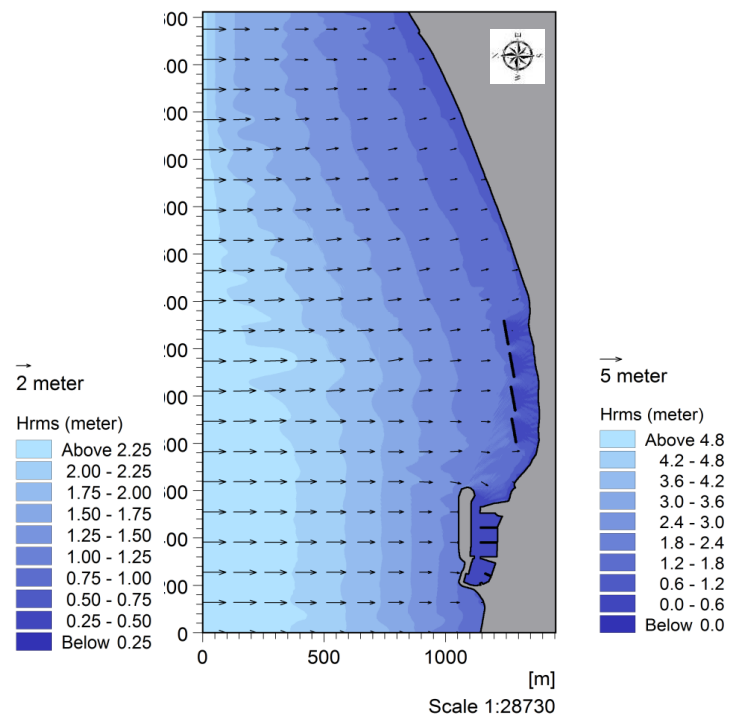
Ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με την προσομοίωση χωρίς τα έργα, διατηρώντας όλες τις παραμέτρους τις ίδιες.

5.2.2.1. Βόρεια διεύθυνση

Παρατηρείται ηρεμία εντός της λιμενολεκάνης και στην προσήνεμη πλευρά του λιμένα το ύψος κύματος φθάνει τα 2,0 m. Στο κενό μεταξύ των κυματοθραυστών, το ύψος κύματος στις μέγιστες κυματικές συνθήκες, φθάνει το 1,5 m. Παρατηρείται ηρεμία πίσω από τους κυματοθραύστες όπου τα ύψη κύματος είναι πολύ μικρά, με τιμές κάτω από 0,01 m.



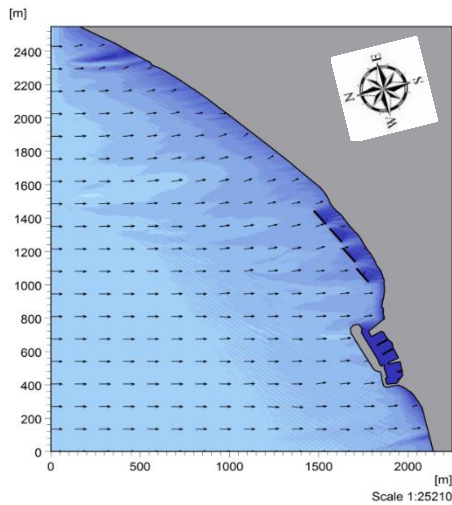
Εικόνα 5.35: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ



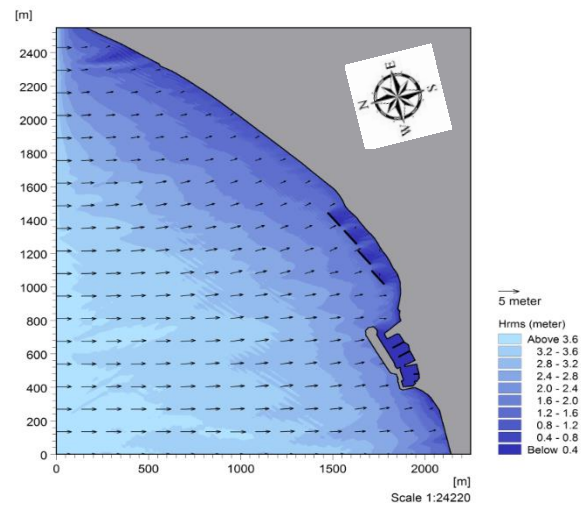
Εικόνα 5.36: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ

5.2.2.2. Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση

Το ύψος κύματος στη σκιά των κυματοθραυστών είναι κάτω από 0,2 m, ενώ στα διάκενα κυμαίνεται από 1,4-1,6 m. Κατά μήκος και μπροστά από τους κυματοθραύστες, το ύψος κύματος παίρνει τιμές κάτω από 0,5 m. Εντός της λιμενολεκάνης, παρατηρείται ηρεμία.



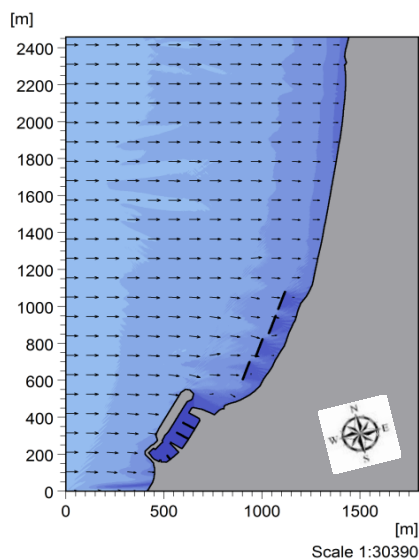
Εικόνα 5.37: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



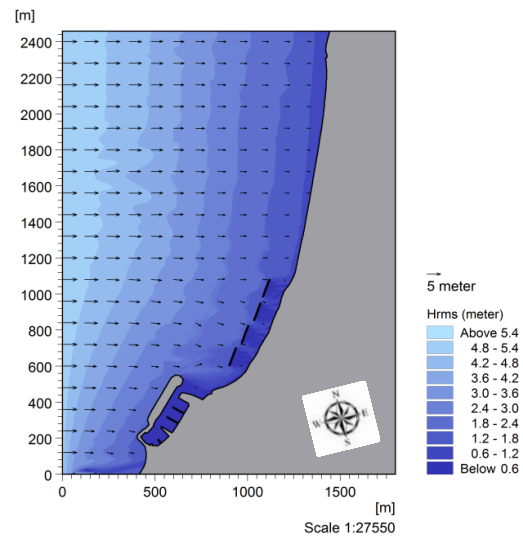
Εικόνα 5.38: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ

5.2.2.3. Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση

Παρατηρούνται ύψη κύματος μεταξύ 1,6 και 1,4 m στο κενό μεταξύ των κυματοθραυστών. Στη σκιά τους, το ύψος κύματος παίρνει τιμές μικρότερες από 0,3 m. Κατά μήκος της ακτής, μπροστά από τους κυματοθραύστες το ύψος κύματος κυμαίνεται από 0,1-0,5 m, ενώ κατάντη των έργων φθάνει και τα 0,8 m. Όσον αφορά στο λιμένα, παρατηρούνται οι ίδιες κυματικές συνθήκες με τις υπόλοιπες διευθύνσεις.



Εικόνα 5.39: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



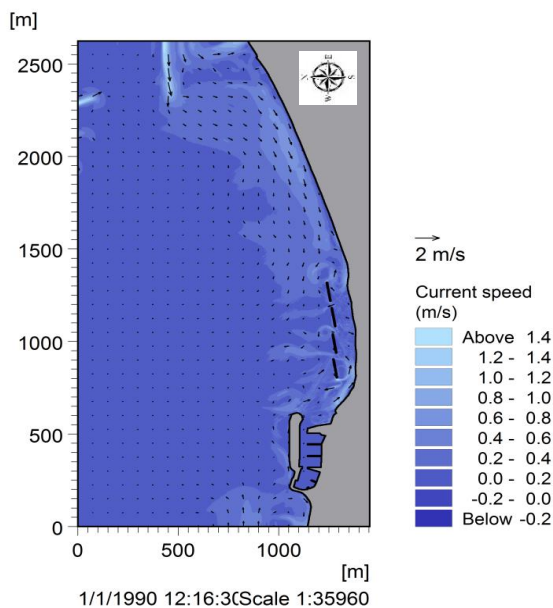
Εικόνα 5.40: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ

5.2.3. Αποτελέσματα προσομοιώσεων HD

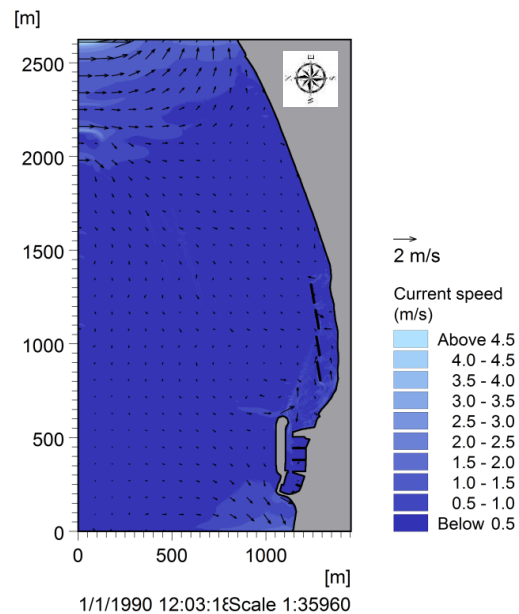
Στο συγκεκριμένο σημείο, σε κάποιες διευθύνσεις έγινε αλλαγή στη βαθυμετρία στα κελιά κατά μήκος της ακτογραμμής, καθώς το λογισμικό δεν μπορούσε να διαχειριστεί στα πλευρικά και, δίπλα από την ακτογραμμή, όρια την παράμετρο της παλίνρροιας. Στα κελιά αυτά δόθηκε τιμή βάθους μεγαλύτερη από την κανονική έτσι ώστε να παραμένουν σε κάθε περίπτωση υγρά.

5.2.3.1. Βόρεια διεύθυνση

Σε κυματική συνθήκη μικρότερης έντασης, το κατά μήκος ρεύμα που κατευθύνεται από Ανατολικά προς Δυτικά, ανακόπτεται από τον τέταρτο κυματοθραύστη και κινείται προς τα βαθιά. Το ρεύμα από τα δυτικά περιορίζεται ελάχιστα από τον πρώτο κυματοθραύστη, καθώς εισέρχεται στην περιοχή της ακτής. Σε μεγαλύτερης έντασης άνεμο, το ρεύμα στο ακρομώλιο παίρνει μεγαλύτερες τιμές, το οποίο όμως δεν κατευθύνεται προς την ακτή. Κατάντη των κυματοθραυστών, τα ρεύματα εξασθενούν και έχουν ταχύτητες μικρότερες από 0,5 m/s. Στη σκιά τους παρατηρείται μικρή κυκλοφορία.



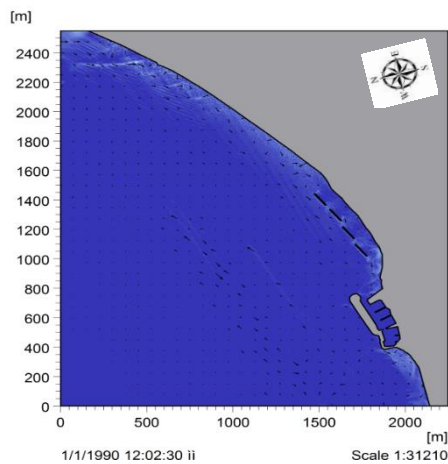
Εικόνα 5.41: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ



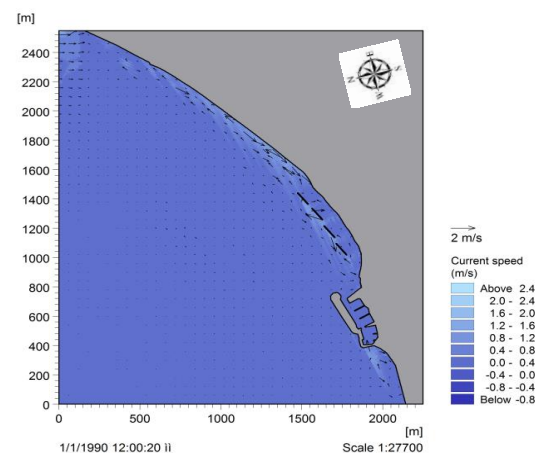
Εικόνα 5.42: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ

5.2.3.1. Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση

Οι κυματοθραύστες αποκόπτουν τη ροή των ρευμάτων, με αποτέλεσμα αυτά να εισέρχονται στην περιοχή της ακτής με μειωμένα πλάτη και ταχύτητες. Ο ανατολικός κυματοθραύστης αποκόπτει τη ροή του κατά μήκος ρεύματος που κινείται προς τα Δυτικά και δεν εισέρχεται στο συγκεκριμένο τμήμα της ακτής. Ένα ρεύμα κινείται κατά μήκος της προσήνεμης πλευράς των κυματοθραυστών. Το υδροδυναμικό πεδίο στην προσήνεμη πλευρά του λιμένα παρουσιάζει ηρεμία, ενώ ανάντη οι τιμές των ταχυτήτων φθάνουν και το 1 m/s.



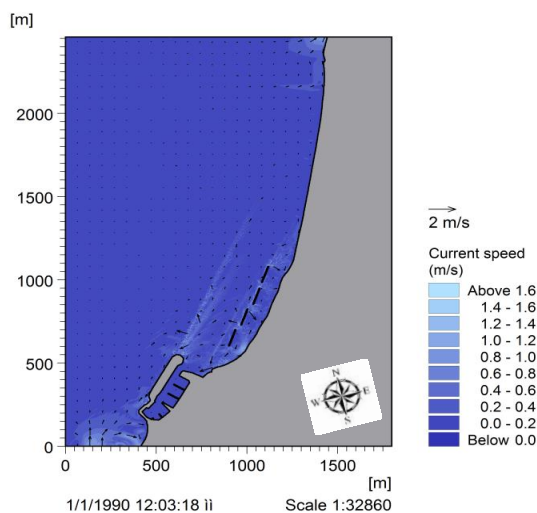
Εικόνα 5.43: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



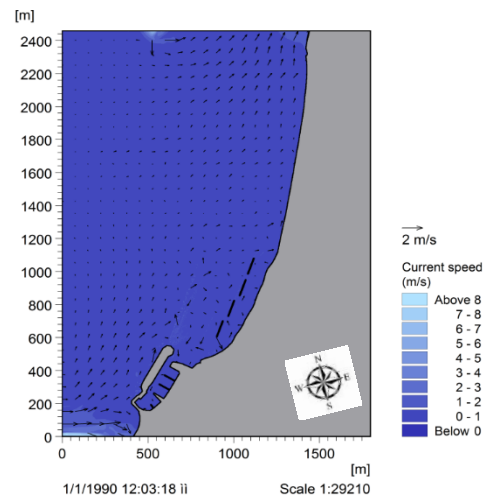
Εικόνα 5.44: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ

5.2.3.2. Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση

Ένα ρεύμα κινείται με Βορειοδυτική κατεύθυνση προς το λιμένα, ο οποίος αποκόπτει την πορεία του, με αποτέλεσμα τη μείωση των ταχυτήτων του και την κατεύθυνση του προς τα Βορειοανατολικά. Οι κυματοθραύστες εμποδίζουν την είσοδο των ρευμάτων στην ακτή και προκαλούν την εξασθένησή τους στα κατάντη. Στα ανατολικά, δημιουργείται ένα ρεύμα με ταχύτητες μέχρι και 2 m/s, κινείται κατά μήκος της ακτής και κατευθύνεται προς τα Βορειοανατολικά. Παρατηρείται επίσης μικρή κυκλοφορία στη σκιά των κυματοθραυστών.



Εικόνα 5.45: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



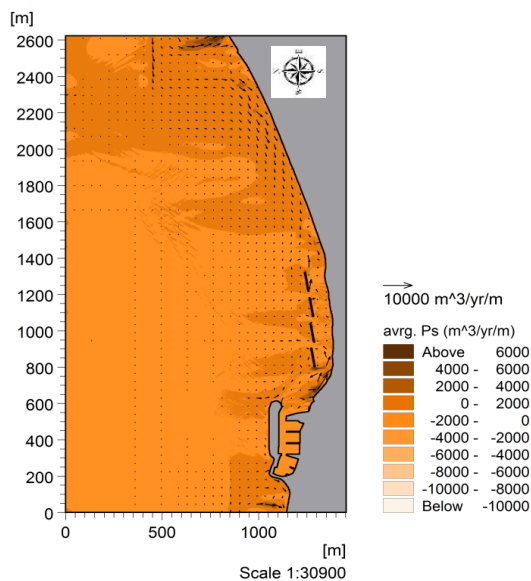
Εικόνα 5.46: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ

5.2.4. Αποτελέσματα προσομοιώσεων ST

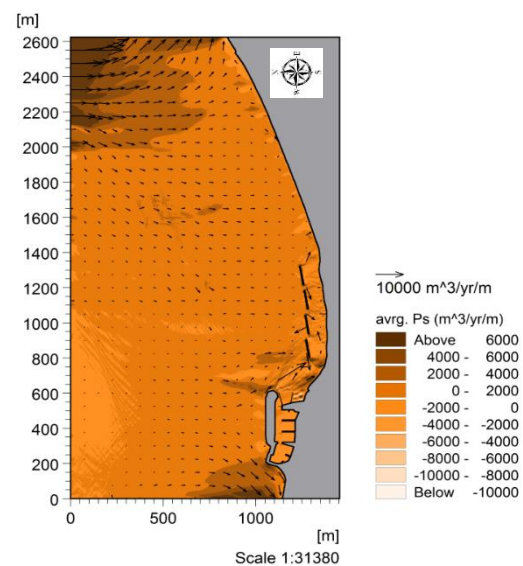
Παρουσιάζονται τα κυματικά μοντέλα της στερεομεταφοράς για τις τρεις κύριες διευθύνσεις ανέμου, διατηρώντας τις ίδιες παραμέτρους.

5.2.4.1. Βόρεια διεύθυνση

Η μεταφορά του ιζήματος ακολουθεί τη φορά των κυματογενών ρευμάτων. Παρατηρείται μεγάλο δυναμικό στα ανατολικά με τιμές μεγαλύτερες από 6000 $\text{m}^3/\text{έτος}/\text{m}$, ενώ στα δυτικά η ροή είναι αμελητέα. Ανάντη του πρώτου κυματοθραύστη παρατηρείται το μεγαλύτερο δυναμικό στερεομεταφοράς με ρυθμό 6000 $\text{m}^3/\text{έτος}/\text{m}$ και το μικρότερο καταγράφεται στη σκιά του τέταρτου κυματοθραύστη. Στο υπόλοιπο τμήμα της ακτογραμμής, η ροή του ιζήματος είναι μικρή.



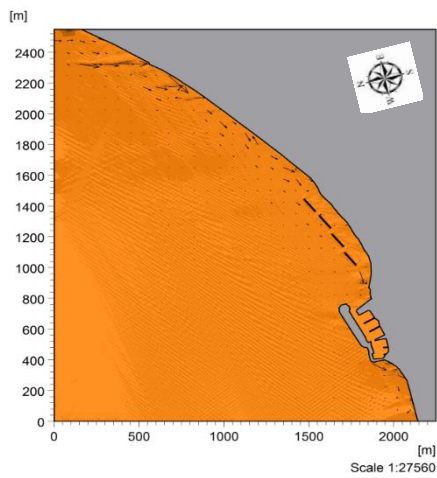
Εικόνα 5.47: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 5 μποφόρ



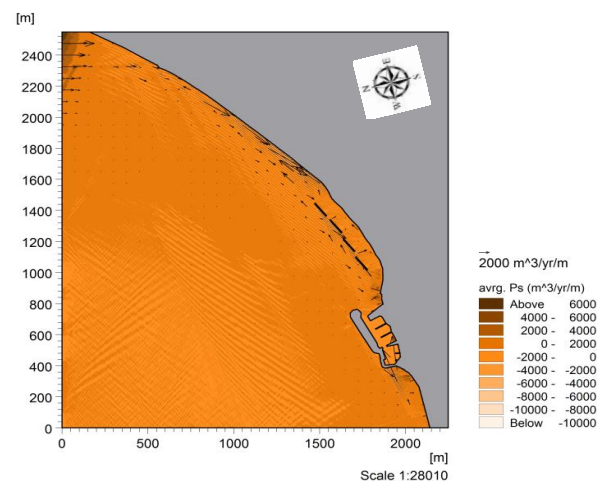
Εικόνα 5.48: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 9 μποφόρ

5.2.4.2. Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση

Έντονη ροή ιζήματος παρατηρείται στο τμήμα της ακτής μετά τους κυματοθραύστες, ενώ στη σκιά των τεσσάρων κυματοθραυστών η ροή είναι μειωμένη. Σημειώνεται ότι η ροή ιζήματος που παρατηρείται στο Ανατολικό όριο, αποτελεί αστοχία του Mike 21, η οποία πιθανώς να προήλθε λόγω του γεγονότος ότι τα νερά είναι πολύ ρηχά στο συγκεκριμένο τμήμα. Στα βαθιά η ροή είναι αμελητέα.



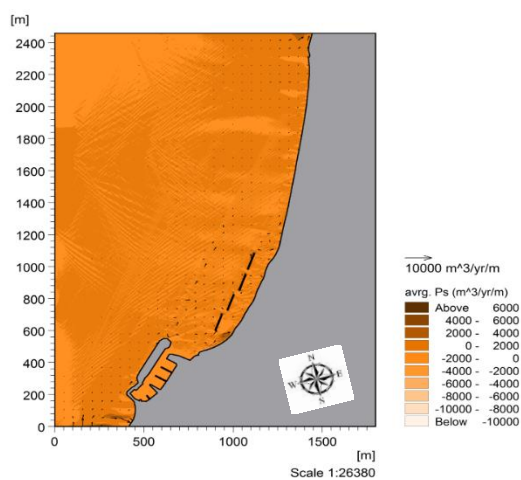
Εικόνα 5.49: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



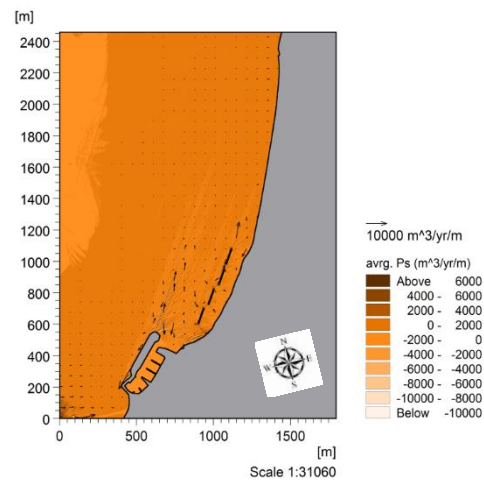
Εικόνα 5.50: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ

5.2.4.3. Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση

Η ροή ιζήματος στα βαθιά και στη σκιά των κυματοθραυστών είναι αμελητέα, όπως και κατά μήκος της ακτής μετά τα έργα. Η ροή, η οποία παρατηρείται στον προσήνεμη περιοχή των κυματοθραυστών και είναι της τάξης των $5000 \text{ m}^3/\text{έτος}/\text{m}$, πιθανώς να οφείλεται στο γεγονός ότι στο συγκεκριμένο σημείο συντελείται η διεργασία της θραύσης των κυμάτων.



Εικόνα 5.51: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



Εικόνα 5.52: Δυναμικό στερεομεταφοράς Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ

6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

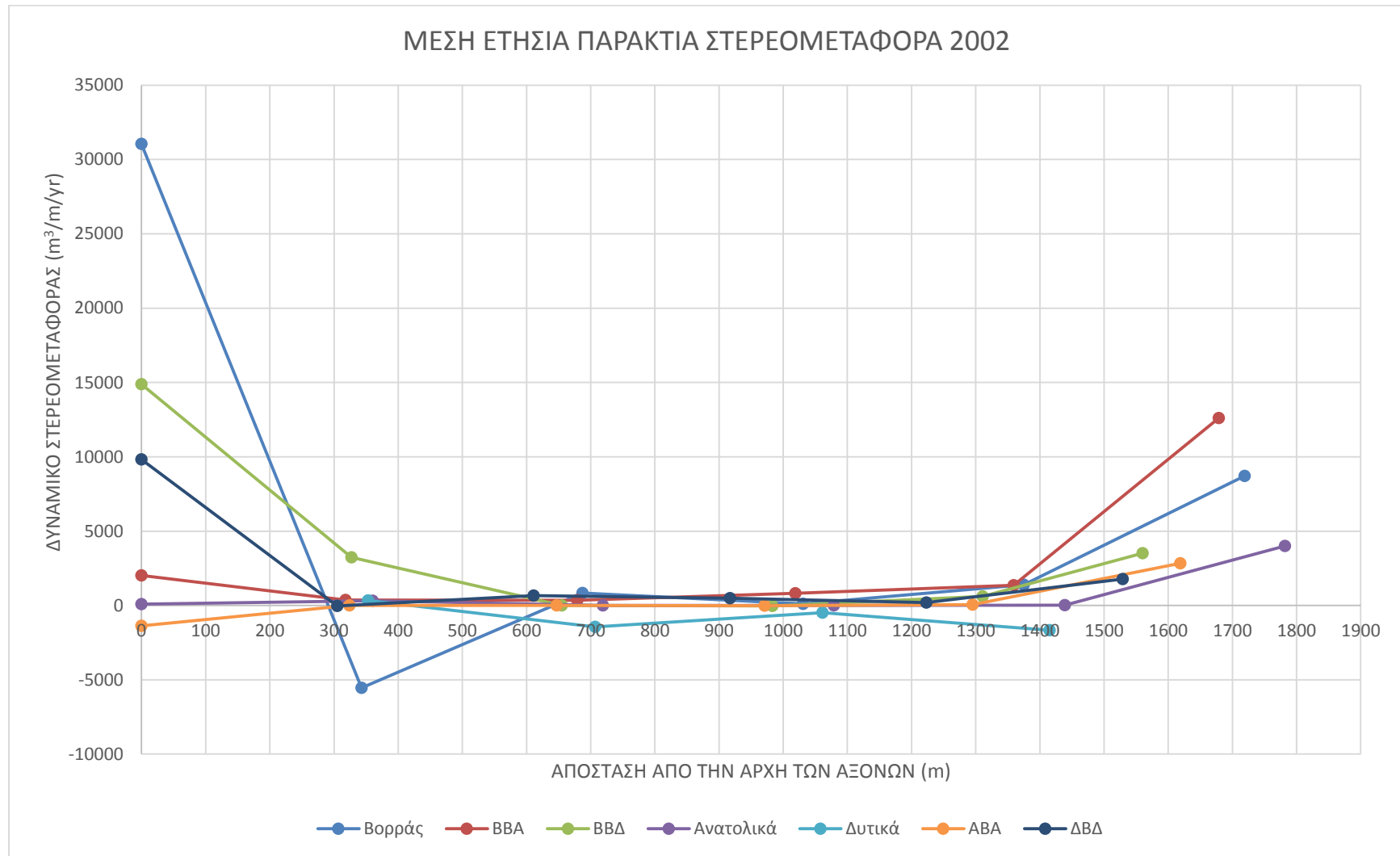
Στην ενότητα που ακολουθεί πραγματοποιείται η σταθμισμένη επαλληλία των αποτελεσμάτων της στερεομεταφοράς, με σκοπό τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας στερεομεταφοράς. Επίσης, συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με δεδομένα πεδίου, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την απόθεση και τη διάβρωση της ακτής.

6.1. Επαλληλία-Μέσος ετήσιος ρυθμός στερεομεταφοράς και τάσεις διάβρωσης/απόθεσης

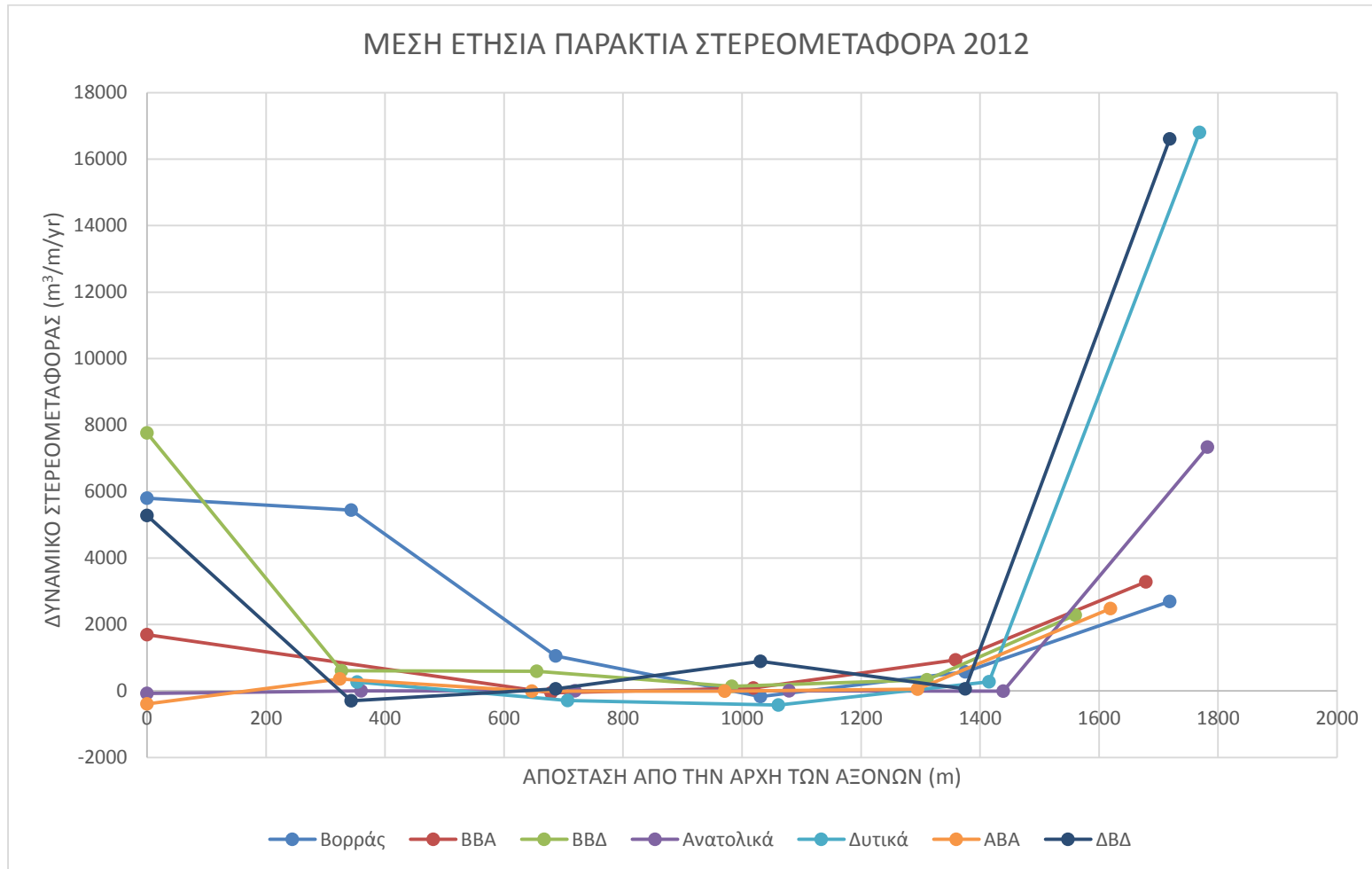
Στο σημείο αυτό γίνεται η σταθμισμένη επαλληλία των αποτελεσμάτων όλων διευθύνσεων που επηρεάζουν την περιοχή μελέτης, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ο συνολικός ρυθμός στερεομεταφοράς και οι τάσεις διάβρωσης και απόθεσης πριν και μετά την κατασκευή των έργων.

Αρχικά, γίνεται υπέρθεση των αποτελεσμάτων της στερεομεταφοράς για την κάθε διεύθυνση που εξετάστηκε και για κάθε κυματικό σενάριο. Ως συντελεστές βαρύτητας χρησιμοποιούνται οι μέσες ετήσιες συχνότητες εμφάνισης (Πίνακας 4.3). Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, θεωρούνται έξι εγκάρσιες τομές ανά περίπου 350 χωρικά σημεία του καννάβου, δηλαδή ανά 525 m (η τιμή αυτή αλλάζει, καθώς τα αποτελέσματα των διευθύνσεων έχουν διαφορετική κλίμακα), που καλύπτουν ζώνη μεγαλύτερη από τη ζώνη θραύσης και είναι ίση με $1,20 \cdot X_b$ (Παράρτημα Β, Εικόνα 219 α, β). Για τον υπολογισμό του ρυθμού στερεομεταφοράς που περνά από κάθε διατομή, αθροίζονται οι τιμές των σημείων που περνούν από αυτήν. Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται για κάθε κυματικό σενάριο, το ετήσιο δυναμικό στερεομεταφοράς.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια υπό μορφή διαγραμμάτων. Στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται η απόσταση Y_i , η οποία οριοθετεί την περιοχή μελέτης και υποδηλώνει τη θέση των εγκάρσιων τομών και στον κατακόρυφο άξονα υποδηλώνεται το δυναμικό στερεομεταφοράς. Θετικό πρόσημο παίρνει, αν η στερεομεταφορά διαπερνά τη διατομή από αριστερά προς δεξιά, δηλαδή αν κινείται από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά. Ακολουθούν τα διαγράμματα της μέσης παράκτιας στερεομεταφοράς για τις δύο χρονικές περιόδους.



Διάγραμμα 6.1: Μέση ετήσια παράκτια στερεομεταφορά προκαλούμενη από τις κυματικές συνθήκες κάθε διεύθυνσης για το 2002



Διάγραμμα 6.2: Μέση ετήσια παράκτια στερεομεταφορά προκαλούμενη από τις κυματικές συνθήκες κάθε διεύθυνσης για το 2012

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα και για τις δύο χρονικές περιόδους, διαπιστώνεται μεγάλο δυναμικό στερεομεταφοράς στο δυτικό και ανατολικό άκρο της περιοχής. Το μεγαλύτερο δυναμικό στερεομεταφοράς προκύπτει από την κυματογενή κυκλοφορία που προκαλούν οι Βόρειοι, Βόρειοι-Βορειοδυτικοί και Βόρειοι-Βορειοανατολικοί κυματισμοί. Το δυναμικό στερεομεταφοράς παρουσιάζει και για τις δύο χρονικές περιόδους, ίδιο περίπου ρυθμό εκτός από την περιοχή των κυματοθραυστών.

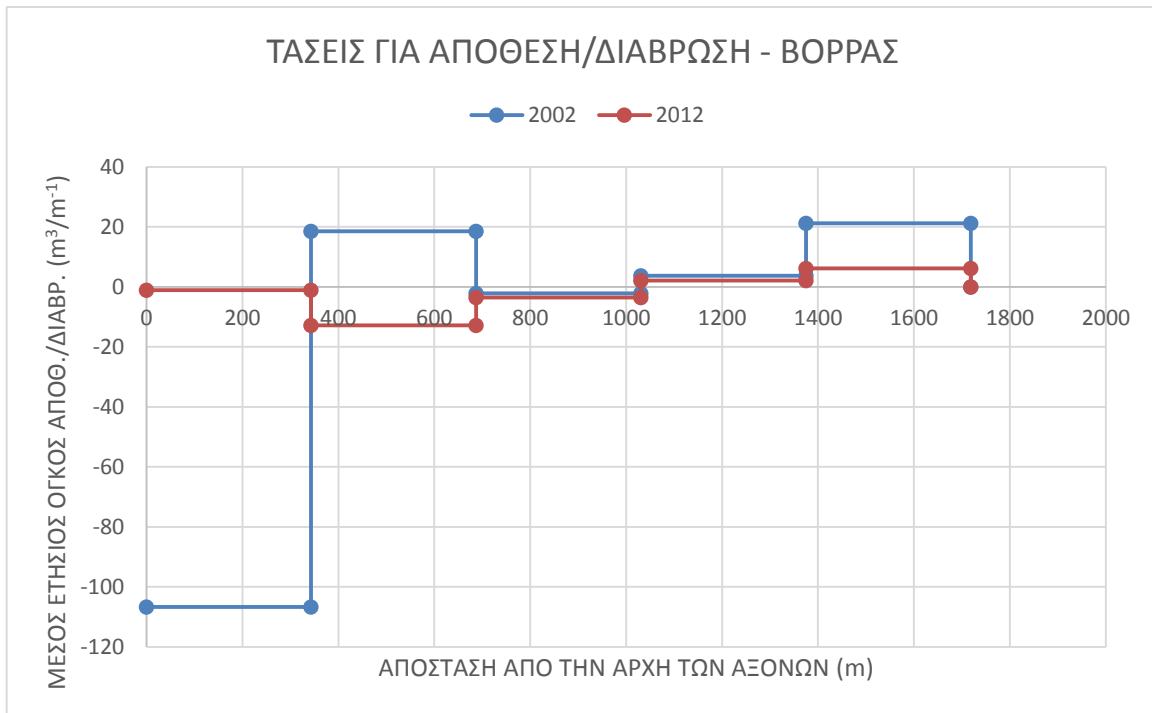
Η κατασκευή των έργων μειώνει το μέγεθος της στερεομεταφοράς, γεγονός το οποίο είναι εμφανέστερο στη σύγκριση της Δυτικής-Βορειοδυτικής και Δυτικής διεύθυνσης. Κατά τη σύγκριση του ρυθμού στερεομεταφοράς της Βόρειας διεύθυνσης, παρατηρείται αλλαγή κατεύθυνσης του ιζήματος, καθώς το 2002 είχε κίνηση από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ενώ το 2012 καταγράφεται η αντίθετη κατεύθυνση. Σημειώνεται ότι οι μεγάλες τιμές που παρατηρούνται στα ανατολικά, οφείλονται σε πιθανή αστοχία του μοντέλου, καθώς τα νερά είναι αρκετά ρηχά σε σχέση με το εσωτερικό και δυτικό τμήμα του κόλπου.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται το διάγραμμα τάσεων για απόθεση ή διάβρωση, όπου στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται επίσης η απόσταση Y_i ενώ στον κατακόρυφο άξονα τοποθετείται ο μέσος ετήσιος όγκος απόθεσης ή διάβρωσης ανά μέτρο. Ο όγκος υπολογίζεται από τη διαφορά της στερεομεταφοράς στη θέση i με τη θέση j , ανηγμένος με την μεταξύ τους απόσταση και ως εξής:

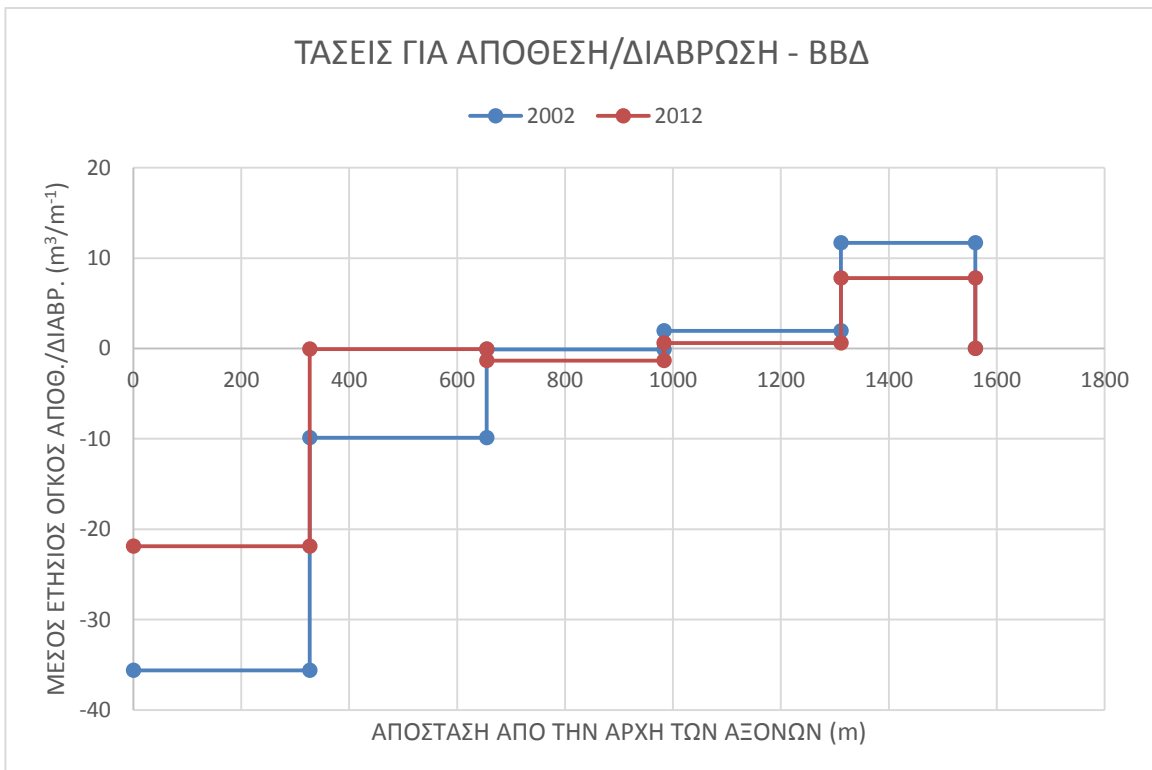
$$\frac{S_i - S_j}{Y_i - Y_j} \quad (1)$$

Γνωρίζοντας την τιμή της στερεομεταφοράς σε δύο διατομές, είναι εφικτό να προσδιοριστεί αν το συγκεκριμένο τμήμα της ακτής υφίσταται διάβρωση ή απόθεση. Όταν η ποσότητα ιζήματος που εισέρχεται μεταξύ δύο διατομών είναι μεγαλύτερη από αυτή που απομακρύνεται, τότε υπάρχει τάση για απόθεση. Στην αντίθετη περίπτωση υπάρχει τάση για διάβρωση ή όταν ο ρυθμός της στερεομεταφοράς στην κατάντη διατομή είναι μεγαλύτερος από την ανάντη. Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεως

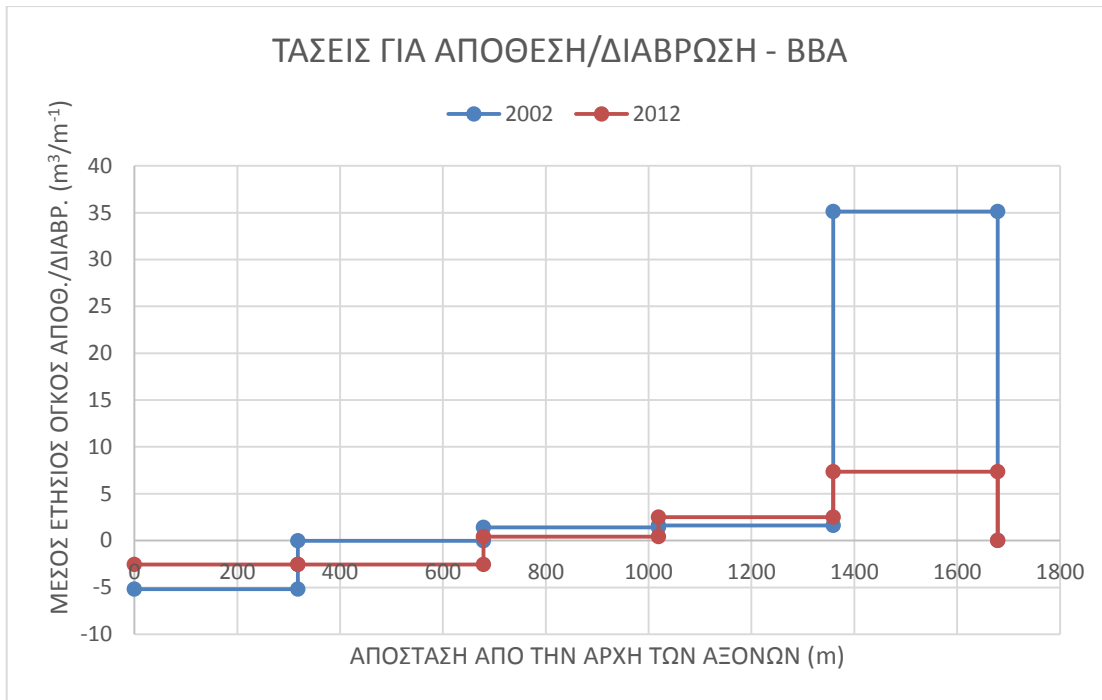
απόθεσης-διάβρωσης για τις κυρίαρχες διευθύνσεις ανέμου. Τα διαγράμματα των υπόλοιπων διευθύνσεων παρατίθενται (Παράρτημα Β, Διάγραμμα 1-4).



Διάγραμμα 6.3: Μέσος ετήσιος όγκος απόθεσης/διάβρωσης για τη Βόρεια διεύθυνση



Διάγραμμα 6.4: Μέσος ετήσιος όγκος απόθεσης/διάβρωσης για τη Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση



Διάγραμμα 6.5: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για τη Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση

Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, οι τάσεις για απόθεση και διάβρωση εναλλάσσονται. Διαφαίνεται τάση για απόθεση στη σκιά των κυματοθραυστών κατά το 2012. Στο ίδιο σημείο παρατηρείται διάβρωση κατά το 2002. Κατάντη των έργων, δηλαδή από την 4^η μέχρι την 6^η διατομή, παρατηρείται διάβρωση και τις δύο χρονιές.

6.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων

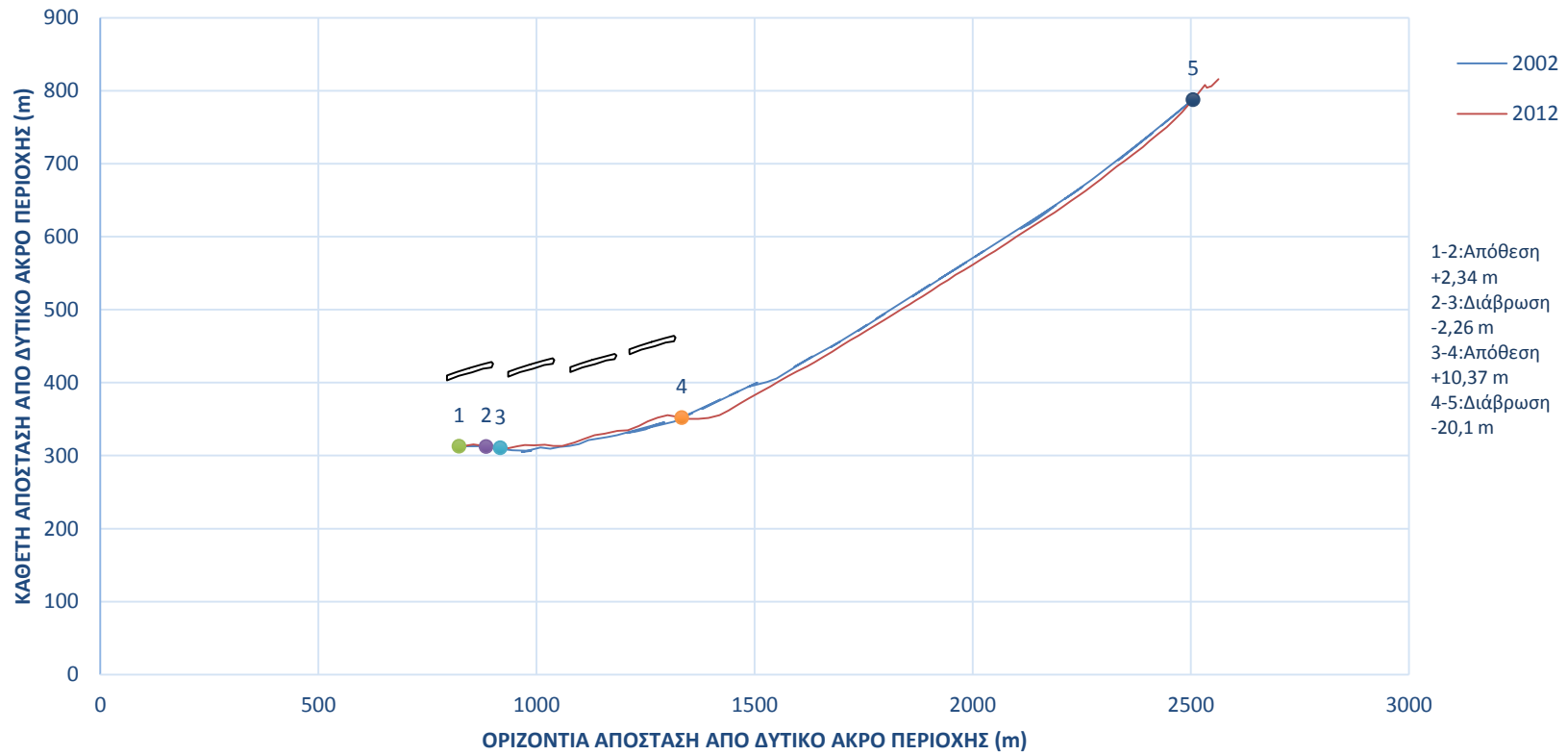
Στο παρακάτω διάγραμμα, απεικονίζεται το τμήμα της ακτογραμμής κατάντη του λιμένα, για τις δύο χρονικές περιόδους, όπως αυτή αποτυπώθηκε από τον Κλάδο Θαλασσιών Έργων. Η ακτογραμμή χωρίζεται σε πέντε υποπεριοχές και η διάβρωση και απόθεση που παρουσιάζει μεταξύ 2002 και 2012, καταγράφεται ως ακολούθως:

Πίνακας 6.1: Τιμές διάβρωσης και απόθεσης μεταξύ της ακτογραμμής 2002 και 2012

| Σημείο | Διάβρωση/Απόθεση |
|--------|------------------|
| 1-2 | + 2,34 m |
| 2-3 | -2,26 m |
| 3-4 | +10,37 m |
| 4-5 | -20, 1 m |

Το σημείο 1 βρίσκεται ανάντη των κυματοθραυστών, τα σημεία 2 και 3 βρίσκονται στην περιοχή των έργων και τα σημεία 4 και 5 κατάντη. (Εικόνα 6.1). Σημειώνεται ότι οι παραπάνω τιμές, ενδεχομένως να περιέχουν σφάλματα, αφού είναι πολύ πιθανό να μεσολάβησε κάποια απρόσμενη κακοκαιρία πριν από την κάθε αποτύπωση, που να μετακίνησε υλικό και να προκάλεσε διάβρωση. Επίσης, η αποτύπωση του 2002 πραγματοποιήθηκε πριν τα έργα επέκτασης του λιμένα, τα οποία ολοκληρώθηκαν το 2005.

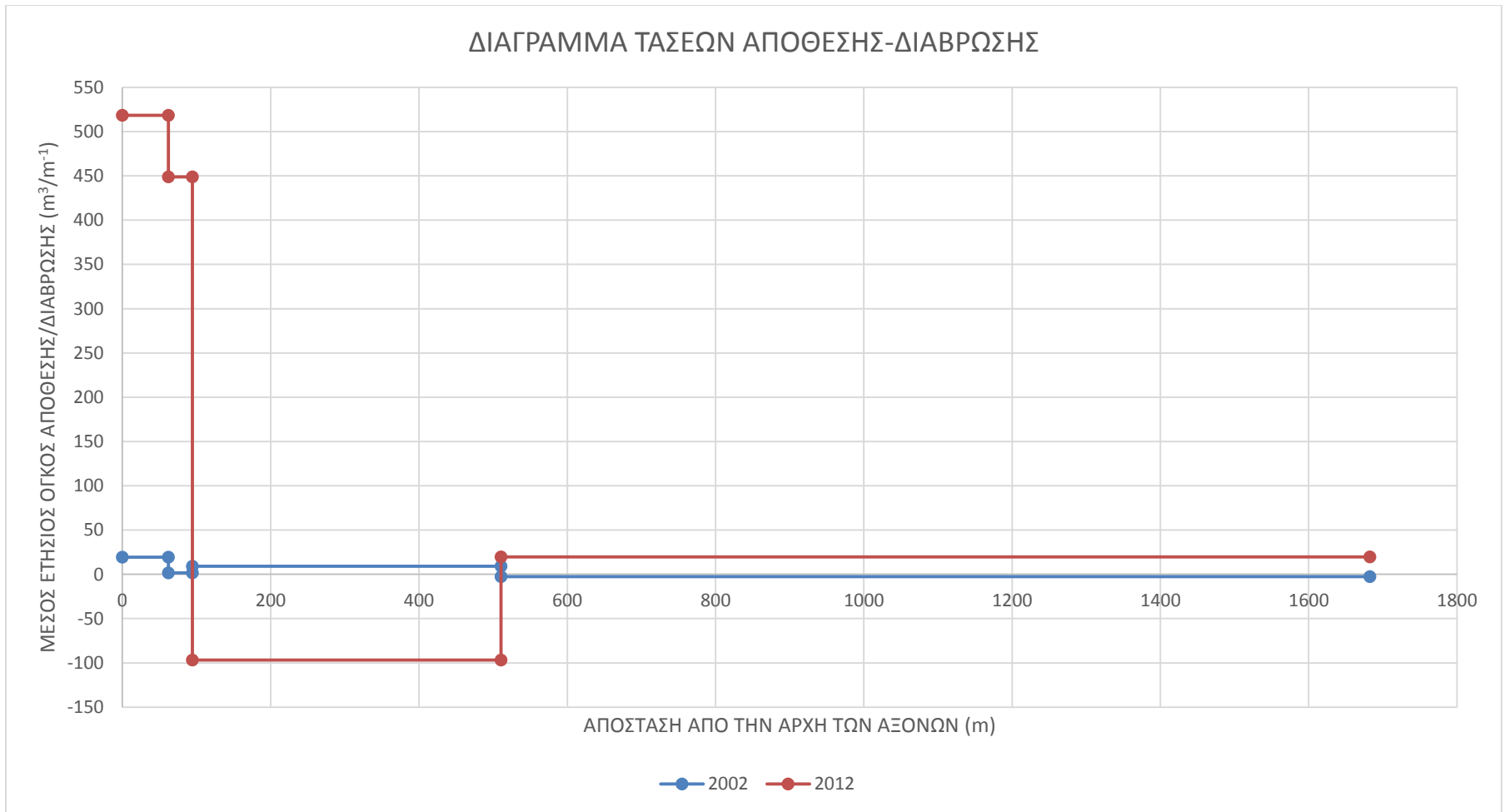
ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ 2002-2012



Εικόνα 6.1: Αποτύπωση ακτογραμμής 2002 και 2012

Κατασκευάζεται το διάγραμμα τάσεων απόθεσης-διάβρωσης για το 2002 και 2012, με σκοπό τη σύγκριση του με τα πραγματικά δεδομένα. Θεωρούνται πέντε διατομές ανά χρονική περίοδο (Παράρτημα Β, Εικόνα 220 α, β), οι οποίες λαμβάνονται στα σημεία 1-5. Δεν πραγματοποιήθηκε επαλληλία των επτά διευθύνσεων, γιατί αυτό δεν ήταν δυνατό λόγω της διαφορετικής κλίμακας και στροφής των καννάβων. Επομένως, θεωρήθηκαν οι διατομές ξεχωριστά για κάθε διεύθυνση και χρονική περίοδο και στη συνέχεια αθροίστηκαν τα αποτελέσματα.

Σύμφωνα με το διάγραμμα τάσεων απόθεσης-διάβρωσης για το 2002, φαίνεται τάση για διάβρωση στη σκιά των κυματοθραυστών και τάση για απόθεση κατάντη. Κατά το 2012 φαίνεται τάση για απόθεση στη σκιά των κυματοθραυστών και τάση για διάβρωση αμέσως μετά τα έργα.. Η κύρια τάση που συνοδεύει όλα τα παράκτια έργα και φαίνεται και στις αποτυπώσεις της ακτογραμμής, επιβεβαιώνεται μέσα από την αριθμητική προσομοίωση και η οποία συμφωνεί με τα πραγματικά δεδομένα. Μεταξύ της 1^{ης} και 3^{ης} διατομής, οι τάσεις δεν συμπίπτουν. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δείχνουν τάση για διάβρωση, η οποία έχει προέλθει από την επέκταση του λιμένα. Όπως είναι λογικό, αυτό δεν φαίνεται κατά το 2002 καθώς η αποτύπωση προηγήθηκε της επέκτασης του λιμένα.



Διάγραμμα 6.6: Μέσος ετήσιος όγκος απόθεσης/διάβρωσης προκαλούμενος από την επαλληλία των επιμέρους κυματικών συνθηκών

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια μελέτης τμήματος της ακτογραμμής του Κόλπου Χρυσοχούς, καθώς παρουσίαζε σημαντικό πρόβλημα διάβρωσης, το οποίο οδήγησε στο σχεδιασμό δεκατεσσάρων κυματοθραυστών και στην κατασκευή τεσσάρων από αυτούς. Πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση για δύο χρονικές περιόδους (πριν και μετά την κατασκευή των έργων), με σκοπό τη διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος των κυματοθραυστών, χρησιμοποιώντας το λογισμικό Mike 21 του DHI. Δημιουργήθηκε η βαθυμετρία, προσομοιώθηκε το κυματικό κλίμα και το υδροδυναμικό πεδίο και υπολογίστηκε ο ρυθμός της στερεομεταφοράς.

Η περιοχήβάλλεται από ανέμους επτά διευθύνσεων, το οποίο οδήγησε στην προσομοίωση επτά κυματικών συνθηκών. Κάθε κυματική συνθήκη αποτελείται από πέντε κυματικά σενάρια (5-9 μποφόρ), τα οποία και προσομοιώθηκαν. Σημειώνεται ότι για το 2002 έγινε προσομοίωση και των μικρότερης σε ένταση κυματικών σεναρίων (3-4 μποφόρ), τα οποία αποδείχθηκε ότι επηρεάζουν την περιοχή σε μικρό βαθμό. Για το λόγο αυτό, δεν προσομοιώθηκαν για το 2012.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για το κυματικό κλίμα δείχνουν ότι η ακτή στο Λατσί προσβάλλεται κυρίως από Βόρειους, Βόρειους-Βορειοανατολικούς και Βόρειους-Βορειοδυτικούς ανέμους. Μέγιστο ύψος κύματος προκαλεί ο Βόρειος άνεμος και είναι ίσο με 5,3 m. Η ζώνη θραύσης, λόγω της ήπιας κλίσης του πυθμένα, εκτείνεται σε απόσταση 260 m από την ακτή. Στην σκιά των κυματοθραυστών, λόγω της μείωσης της κυματικής ενέργειας, και εντός της λιμενολεκάνης, παρατηρείται ηρεμία. Για τις υπόλοιπες κυματικές συνθήκες η εικόνα είναι αντίστοιχη, με αναλογικά μικρότερα ύψη κύματος και μικρότερη ζώνη θραύσης.

Όσον αφορά το υδροδυναμικό πεδίο, στο Βόρειο άνεμο η μέγιστη ταχύτητα του ρεύματος είναι 0,8 m/s κατάντη του λιμένα το 2002 και 1,2 m/s το 2012. Κινείται από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά κατά μήκος της ακτής και εξασθενεί κατάντη των κυματοθραυστών. Η γενική εικόνα από τις προσομοιώσεις είναι ότι οι κυματοθραύστες ανακόπτουν την πορεία των ρευμάτων και μειώνουν τις ταχύτητές τους στην υπήνεμη τους πλευρά.

Το μεγαλύτερο δυναμικό στερεομεταφοράς προκαλούν οι τρεις κυρίαρχες διευθύνσεις ανέμου. Σε όλες τις προσομοιώσεις η στερεομεταφορά ακολουθεί τη ροή των κυματογενών ρευμάτων. Μέσα από τη σταθμισμένη επαλληλία των κυματικών συνθηκών, διαπιστώνεται δυναμικό μεταφοράς ιζήματος από το Δυτικό προς το Ανατολικό τμήμα της ακτής και για τις δύο χρονικές περιόδους. Μεγάλη κίνηση ιζήματος παρατηρείται στο Δυτικό και Ανατολικό άκρο της περιοχής και στην υπήνεμη πλευρά των έργων, καταγράφεται μείωση.

Η αποτύπωση της ακτής στις δύο χρονικές περιόδους που εξετάζονται, δείχνει την τάση για απόθεση στη σκιά των κυματοθραυστών και την τάση για διάβρωση στο τμήμα της ακτής που δεν έχουν κατασκευαστεί οι υπόλοιποι κυματοθραύστες. Εγκάρσιες διατομές στα σημεία μεταβολής της ακτής στα σταθμισμένα μοντέλα της στερεομεταφοράς για το 2002 και 2012, έδειξαν τις τάσεις απόθεσης και διάβρωσης. Τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης δείχνουν να συμφωνούν με την πραγματικότητα, καθώς δείχνουν την τάση για απόθεση στην υπήνεμη πλευρά των έργων και την τάση για διάβρωση κατάντη. Επίσης, τα αποτελέσματα του Mike 21 δείχνουν την τάση για διάβρωση κατάντη του λιμένα, η οποία προήλθε μετά τις εργασίες επέκτασής του. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι το λογισμικό Mike 21 του DHI, μπορεί να δώσει ικανοποιητικά αποτελέσματα τα οποία να προσομοιάζουν με την πραγματικότητα.

Σημειώνεται ότι στην όλη διαδικασία και τα αποτελέσματά της εμπεριέχονται, όπως είναι φυσικό, κάποιες αστοχίες όπως για παράδειγμα, η μεγάλη ροή ιζήματος στα Ανατολικά της ακτής (Εικόνα 5.48) και η μη πλήρης συμφωνία με τα πραγματικά δεδομένα στις τάσεις απόθεσης και διάβρωσης (Διάγραμμα 6.6). Κατά τις προσομοιώσεις έγιναν

ορισμένες παραδοχές, όπως για παράδειγμα η θεώρηση για ύπαρξη άπειρης ποσότητας ιζήματος, η θεώρηση για άνεμο με σταθερά χαρακτηριστικά κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων και η αλλαγή της τιμής ορισμένων κελιών στη βαθυμετρία του 2012 (Ενότητα 5.2.3). Για το σκοπό αυτό, ενώ χρησιμοποιούνται τα μαθηματικά μοντέλα για την ανάλυση του κυματικού κλίματος μιας περιοχής, της συμπεριφοράς της ακτής με ή χωρίς τα έργα, κρίνεται σκόπιμο σε δύσκολες περιπτώσεις και η χρησιμοποίηση του φυσικού μοντέλου για καλύτερα και πιο ολοκληρωμένα αποτελέσματα.

Τέλος, όσον αφορά στην υπό εξέταση ακτή, κρίνεται επιτακτική και άμεση ανάγκη να ολοκληρωθούν τα έργα με την κατασκευή των δέκα επιπλέον κυματοθραυστών. Οι τέσσερις κυματοθραύστες, όπως έχει φανεί από το μαθηματικό μοντέλο και από τα δεδομένα πεδίου, έχουν επιτύχει το σκοπό τους. Χωρίς την ολοκλήρωση των έργων, η υποχώρηση της ακτής είναι αναμενόμενη. Έτσι, με την ολοκληρωτική εφαρμογή του σχεδίου για την περιοχή, εξασφαλίζεται η προστασία όλου του τμήματος της ακτής.

Για συνέχιση της παρούσας εργασίας, προτείνεται ο υπολογισμός της μελλοντικής εξέλιξης της ακτογραμμής για περίοδο 5 και 10 χρόνων, με τη χρήση του λογισμικού Litpack του DHI, ενσωματώνοντας τους υπόλοιπους δέκα κυματοθραύστες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διαδικτυακές αναφορές

- Πρόβλεψη Τεσσαρακονταετίας της Μεταβολής της Ακτογραμμής στην Ευρύτερη Περιοχή του Λιμένα της Αλεξανδρούπολης με τη Χρήση του Λογισμικού Cedas
<http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=117766978691320>
- User's Guide to the Shoreline Modeling System (SMS)
<http://acwc.sdp.sirsi.net/client/search/asset/1000857>
- Veri-Tech, Inc
<http://www.veritechinc.com/products/cedas/CEDASdetails.php>
- Genesis: Generalized Model for Simulating Shoreline Change
<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a217305.pdf>
- A Discussion of the Generalized Model for Simulating Shoreline Change
<http://journals.fcla.edu/jcr/article/view/79864/77129>
- Long-term modelling using 1-line models - GENESIS and new extensions
http://www.vliz.be/wiki/Long-term_modelling_using_1_line_models_GENESIS_and_new_extensions
- Unibest-TC, Deltares Systems
<http://www.deltaresystems.com/hydro/product/1179832/unibest-tc/1180016>
- Shoreline Change Modeling - In Relation To The Sediment Budget
<http://www.ecy.wa.gov/programs/sea/swces/products/publications/papers/workshop99/buijsman.pdf>
- UNIBEST- Uniform Beach Sediment Transport
<http://ebmtoolsdatabase.org/tool/unibest-uniform-beach-sediment-transport>
- Mike by DHI, Waves
<http://www.mikebydhi.com/Products/CoastAndSea/MIKE21/Waves.aspx>
- Identification Of Some Relevant Processes In Coastal Morphological Modelling
<http://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/viewFile/5151/4829> CHECK
- Mike by DHI, Hydrodynamics
<http://www.dhisoftware.com/Products/CoastAndSea/MIKE21/Hydrodynamics.aspx>

- Two-Dimensional Floodplain Model (MIKE21 HD)
http://hydrologicmodels.tamu.edu/Adjusted_Apr_2010/Hydraulic_models_11/Mike21_HD.pdf
- Using “Mike 21” And “Pom” For Numerical Simulations Of The Hydrodynamics In Baixada Santista Region
<http://www.mares.io.usp.br/aagn/aagn12/UMPFNSHBSR.pdf>
- Mike 21 & Mike 3 Flow Model FM
http://www.dhisoftware.com/Download/DocumentsAndTools/~//media/Microsite_MIKEbyDHI/Publications/PDF/Short%20descriptions/M213_ST_FM_ShortDescription.ashx
- Mike 21 Flow Model, Hydrodynamic Module
http://www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document_public/Project/Manuals/WRS/MIKE21_HD_ScientificDoc.pdf
- Studying shoreline change by using LITPACK mathematical model (case study in Cat Hai Island, Hai Phong City, Vietnam)
http://tapchi.vnu.edu.vn/e_4_07/B6.pdf
- Modelling the Holderness coast, eastern England: Past, present and future
<http://fallmeeting.agu.org/2012/eposters/eposter/ep33b-0856/>
- Community Surface Dynamics Modeling System
http://csdms.colorado.edu/wiki/Model_portal
- Οδηγός για τα προβλήματα της παράκτιας διάβρωσης
http://www.programmemed.eu/uploads/tx_ausybibliomed/COASTANCE_11_GuideForStakeholders_REMTH_GR.pdf
- Litpack, An Integrated Modelling System for Littoral Processes and Coastline Kinetics
<http://www.mikebydhi.com/upload/dhissoftwarearchive/shortdescriptions/marine/LITPACKShortDescription.pdf>
- Ακτομηχανική και Λιμενικά Έργα
<http://www.civ.uth.gr/lessons/53%5CParaktiaStereometaforaMorfologiaAktwn.pdf>
- Αρχή Λιμένων Κύπρου

<http://www.cpa.gov.cy/>

- Τοπικό Σχέδιο Κόλπου Χρυσοχούς, 2013
[http://www.moi.gov.cy/moi/tph/tph.nsf/All/026AF1C1508A4FCEC2257B7F002A8AE2/\\$file/%CE%A4%CE%BF%CF%80%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%A3%CF%87%CE%AD%CE%B4%CE%B9%CE%BF%20%CE%9A%CF%8C%CE%B%CF%80%CE%BF%CF%85%20%CE%A7%CF%81%CF%85%CF%83%CE%BF%CF%87%CE%BF%CF%8D%CF%82%20-%20%CE%BA%CE%B5%CE%AF%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%BF.pdf](http://www.moi.gov.cy/moi/tph/tph.nsf/All/026AF1C1508A4FCEC2257B7F002A8AE2/$file/%CE%A4%CE%BF%CF%80%CE%B9%CE%BA%CF%8C%20%CE%A3%CF%87%CE%AD%CE%B4%CE%B9%CE%BF%20%CE%9A%CF%8C%CE%B%CF%80%CE%BF%CF%85%20%CE%A7%CF%81%CF%85%CF%83%CE%BF%CF%87%CE%BF%CF%8D%CF%82%20-%20%CE%BA%CE%B5%CE%AF%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%BF.pdf)
- Υπουργείο Εσωτερικών Κύπρου, Τμήμα Πολεοδομίας και Οικήσεως
<http://www.moi.gov.cy/>
- Ορθολογική Αειφόρος Διαχείριση των Όμβριων Υδάτων και των Ιζημάτων που Μεταφέρονται από τα Ύδατα, Διάβρωση Δέλτα Ποταμών και Παραλιών
<http://www.izimata.com/Deliverables/IZHMATA-DELIVERABLE-7-8.pdf>
- Ακτή, Κέντρο Μελετών και Έρευνας
<http://akti.org.cy/>
- Design of hard coastal structures against erosion
<http://www.leovanrijn-sediment.com/papers/Coastalstructures2013.pdf>

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγγελερύ Π. (2013), Διπλωματική εργασία με τίτλο «Αριθμητική Προσομοίωση Υδροδυναμικού Πεδίου και Κίνησης Ιζήματος σε Ακτή Τύπου Θύλακα», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Αργυρόπουλος Ε. (2012), Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Μελέτη της Εντατικοποίησης των Κυματικών Μεγεθών Κατάντη Κυματοθραύστη και Εκτός της Σκιάς του», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Γαδ Φ. (2011), Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Βελτιστοποίηση Διάταξης Συστήματος Προβόλων», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ζέικος Λ. και Τσακίρης Γ. (2011), «Κριτική Παρουσίαση της Εφαρμογής της Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ στην Κύπρο, ΕΜΠ, Αθήνα.

- Ζόλκος Π. (2010), Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Περιβαλλοντική Αποτίμηση και Οικονομοτεχνική Εκτίμηση Έργων Προστασίας Παράκτιας Ζώνης του Νότιου Κορινθιακού Κόλπου», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κακαβά Α. (2010), Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Διαχείριση Παράκτιας Διάβρωσης και Εφαρμογή στην Ακτή του Δήμου Γουβών Ηρακλείου Κρήτης», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Κουτίτας Χ. (1998), «Εισαγωγή στην παράκτια τεχνική και τα λιμενικά έργα», Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Μαυραντωνάκης Α. (2013), Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Διερεύνηση Σχεδιασμού Διάταξης Μαρίνας σε Σχέση με τη Στερεομεταφορά στην Είσοδο και Προτάσεις Βελτίωσης», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μεταλληνός Σ. (2011), Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Πεδίο Ταχυτήτων Λόγω Κυματισμών στο Εσωτερικό Ύφαλης Κατασκευής», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μουτζούρης Κ. (2005), Εισαγωγή στην Ακτομηχανική, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μουτζούρης Κ. (2009), Θαλάσσια Υδραυλική, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παρασκευοπούλου Α. (2009), Μεταπτυχιακή εργασία με τίτλο «Εκβολή Ποταμού Αχελώου στο Ιόνιο Πέλαγος», ΕΜΠ, Αθήνα.
- Χατζημιχαλάκης Φ. (2012), Διπλωματική εργασία με τίτλο «Πειραματική Διερεύνηση Μεταβολής Βυθομετρίας στην Ορόκλινη Κύπρου υπό Κυματική Δράση», ΕΜΠ, Αθήνα.

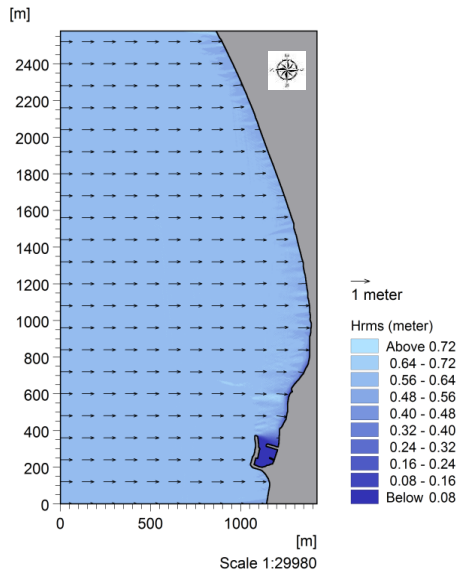
Ξένη Βιβλιογραφία

- Bolle A., Mercelis. P, Roelvink. D, Haerens. P, Trouw. K (2011), Application And Validation Of Xbeach For Three Different Field Sites, TDL Electronic Journals - Texas Digital Library.
- Dabees M. and Kamphuis J.William (1998), Online, A Numerical Model For Shoreline Change, Coastal Engineering Proceedings.
- French Peter W. (2001), Coastal defences, processes, problems and solutions, Routledge, Oxon UK, 2001.
- G.L.S. van der Salm (2013), MSc Graduation Thesis, Coastline modelling with UNIBEST: Areas close to structures, Delft University of Technology, Delft, Holland.

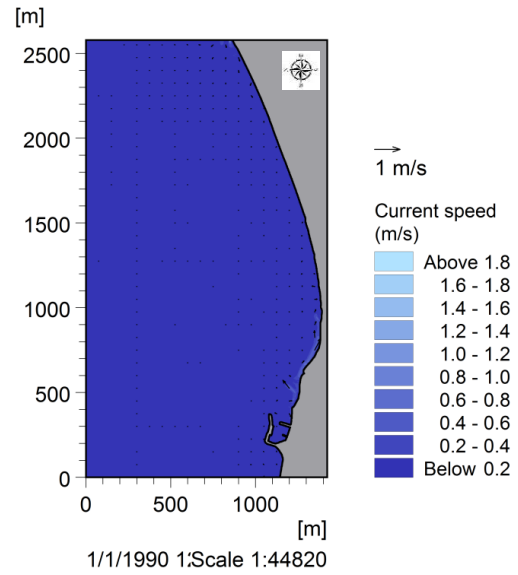
- Harley M., Armaroli C. and Ciavola P. (2011), Evaluation of XBeach predictions for a real-time warning system in Emilia-Romagna, Northern Italy, Journal of Coastal Research, SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium).
- Kamphuis J. William (2010), Introduction to Coastal Engineering and Management, Queens's University, Canada.
- Larson M., Kraus N.C. and Hanson H. (2002), Simulation Of Regional Longshore Sediment Transport And Coastal Evolution – The “Cascade” Model, 28th Coastal Engineering Conference, World Scientific Press.
- Roelvink. D (P.I.), Ad Reniers, Ap van Dongeren, Jaap van Thiel de Vries, Jamie Lescinski, Robert McCall (2011), XBeach Model Description and Manual, Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Roelvink D. (P.I.), Ad Reniers, Ap van Dongeren, Jaap van Thiel de Vries, Jamie Lescinski, Dirk-Jan Walstra (2006), XBeach Annual Report and Model Description, UNESCO-IHE, Delft Hydraulics and Delft University of Technology.
- Szmytkiewicz M., Zeidler R., Rozynski G., Skaja M.(1998), Modelling Large-Scale Dynamics of Hel Peninsula, Poland.
- Trouw K., Zimmermann N., Mathys M., Delgado R., Roelvink D. (2012), Numerical Modelling Of Hydrodynamics And Sediment Transport In The Surf Zone: A Sensitivity Study With Different Types Of Numerical Models.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

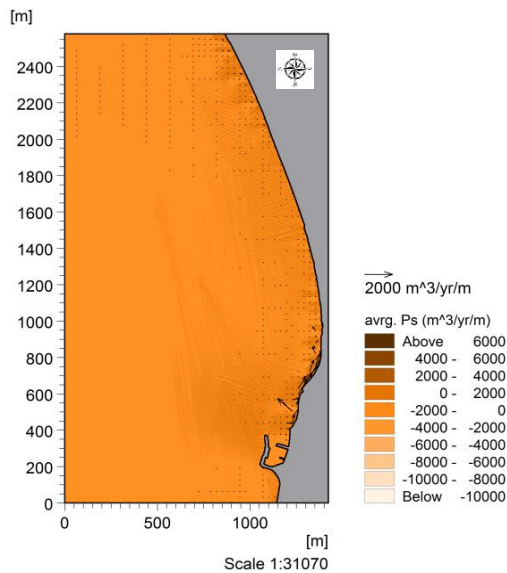
Βόρεια διεύθυνση



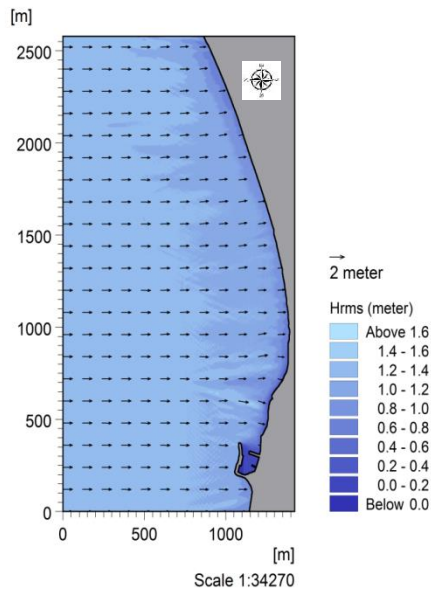
Εικόνα 1: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 3 μποφόρ



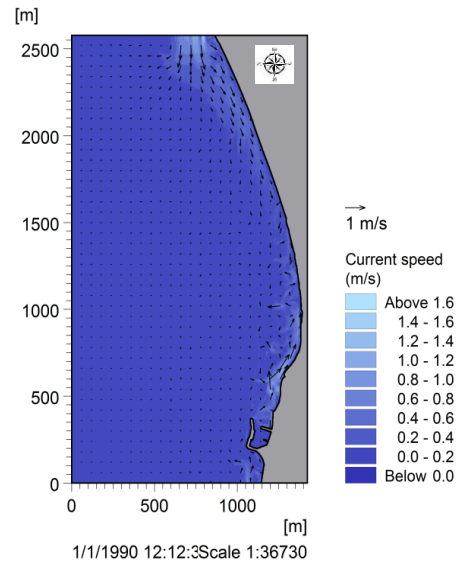
Εικόνα 2: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 3 μποφόρ



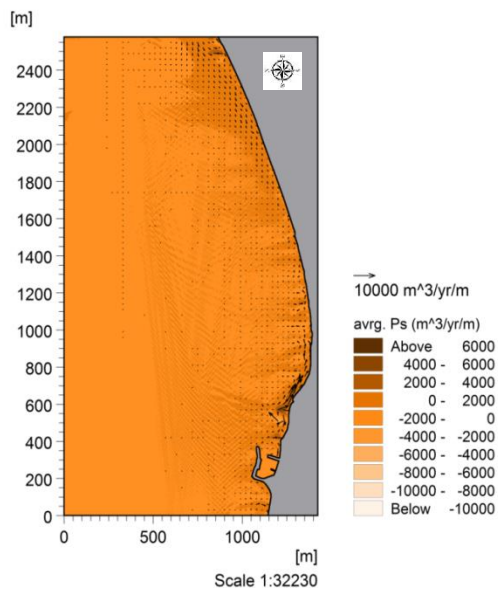
Εικόνα 3: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 3 μποφόρ



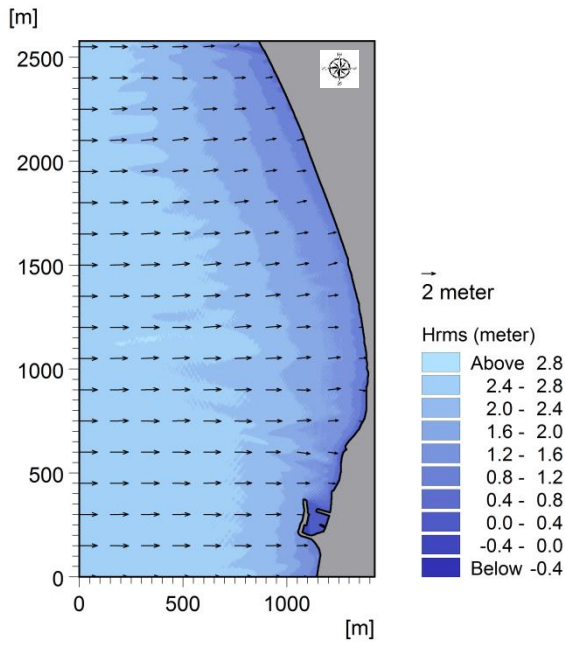
Εικόνα 4: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 4 μποφόρ



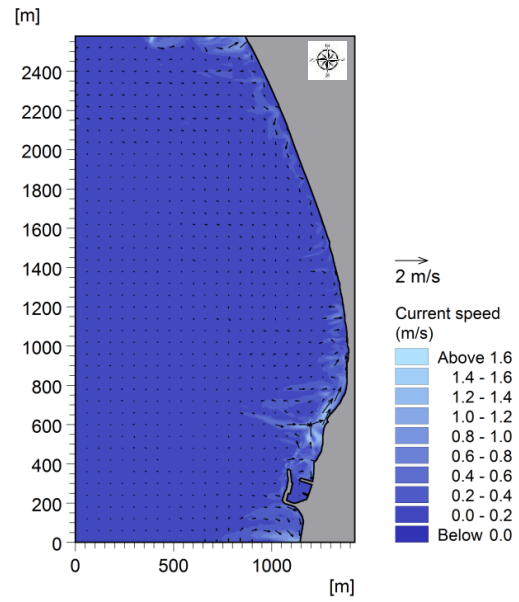
Εικόνα 5: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 4 μποφόρ



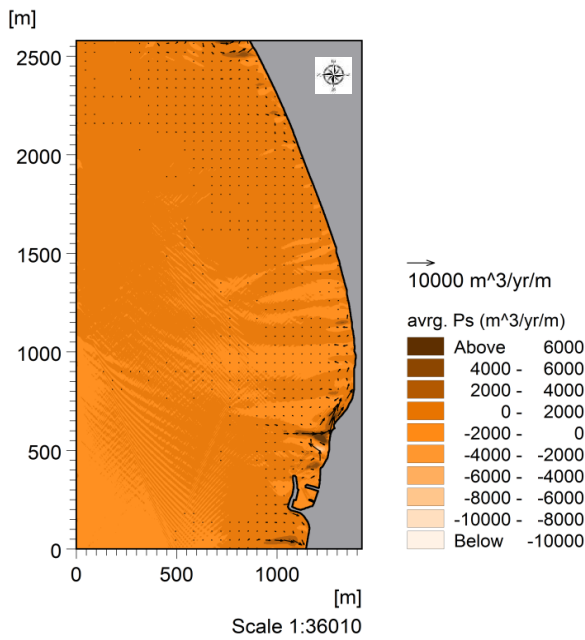
Εικόνα 6: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 4 μποφόρ



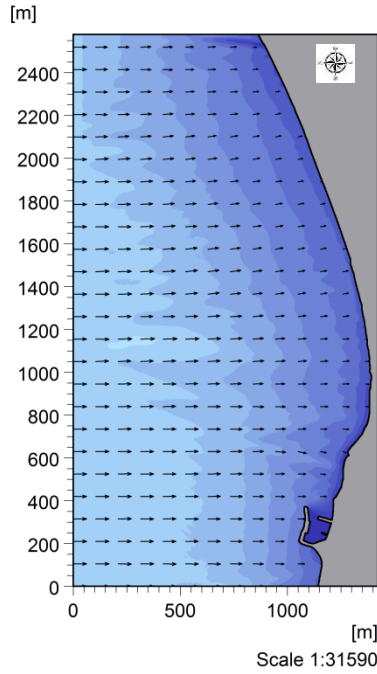
Εικόνα 7: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ



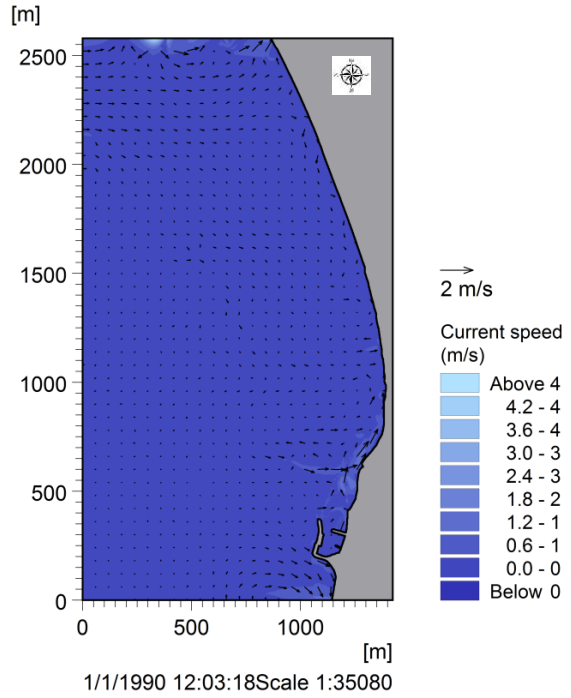
Εικόνα 8: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ



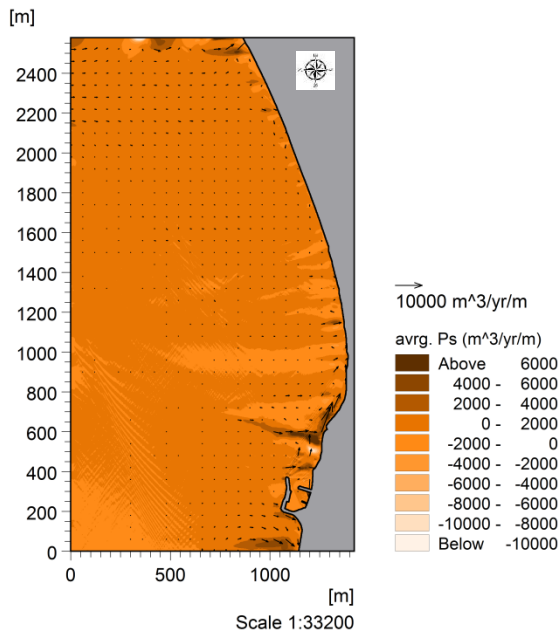
Εικόνα 9: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ



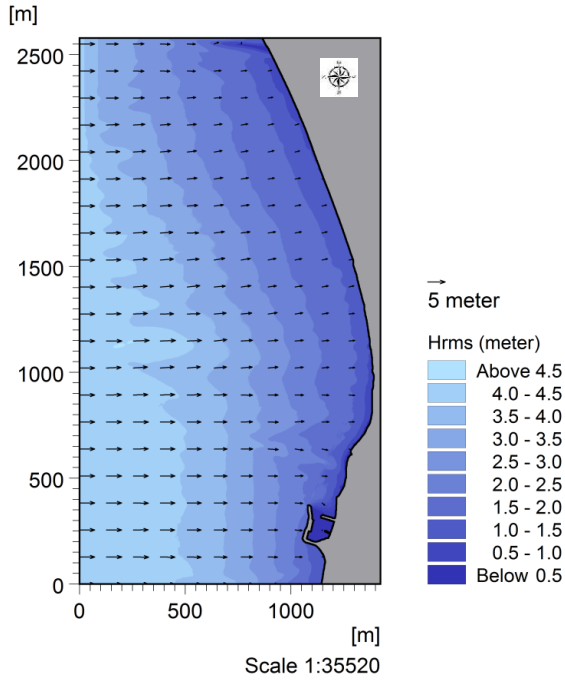
Εικόνα 10: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ



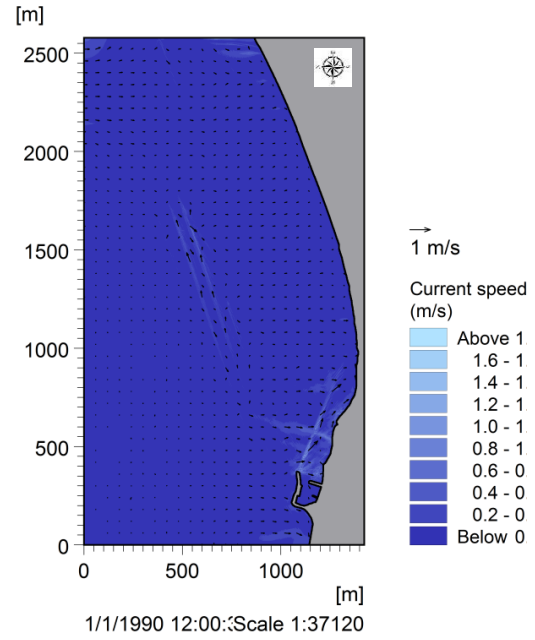
Εικόνα 11: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ



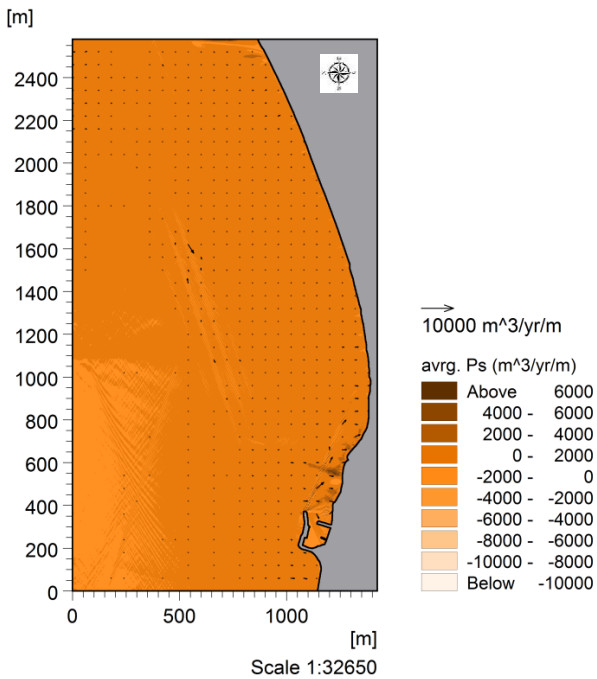
Εικόνα 12 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ



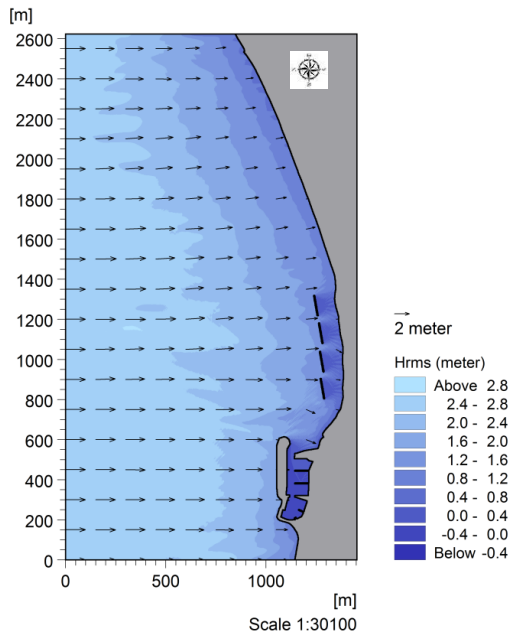
Εικόνα 13: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ



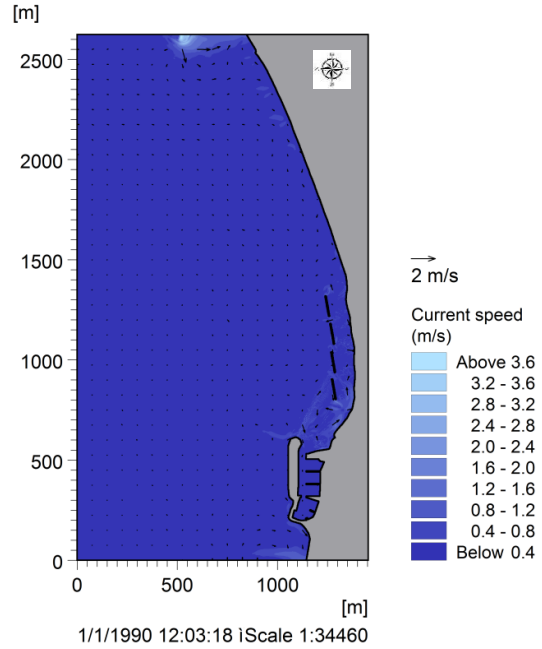
Εικόνα 14: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ



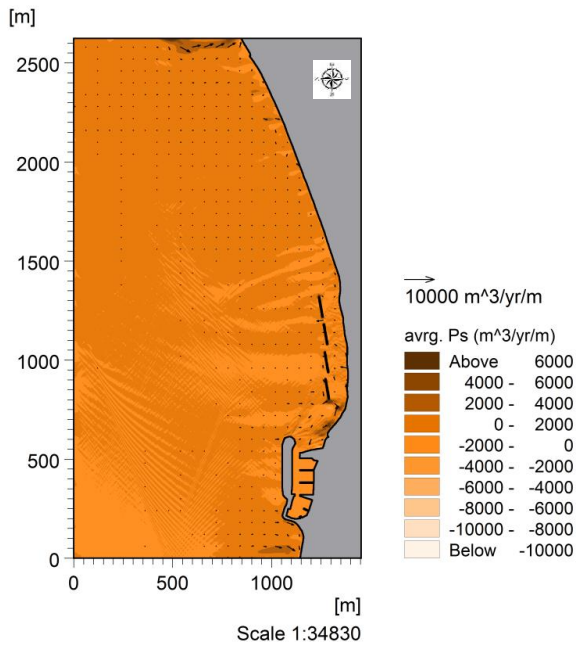
Εικόνα 15 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ



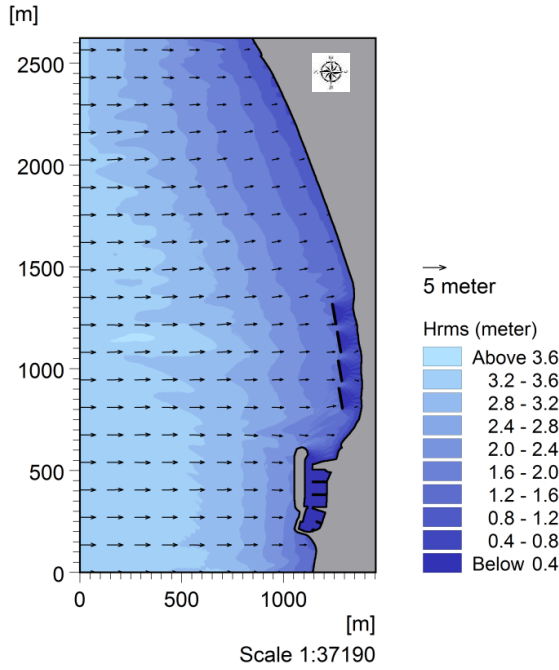
Εικόνα 16: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



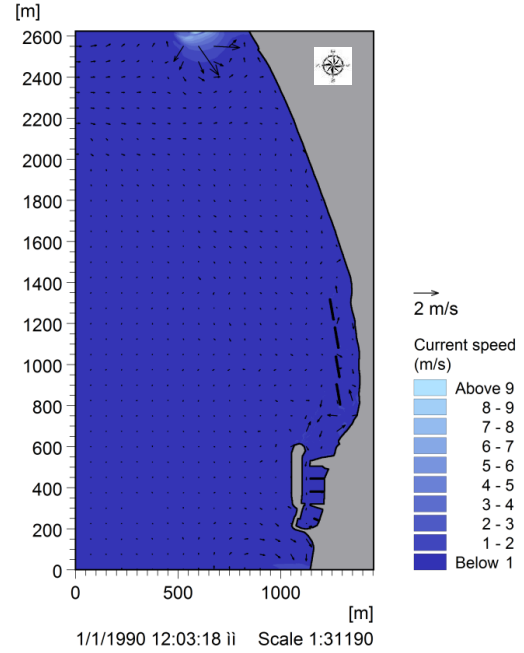
Εικόνα 17: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



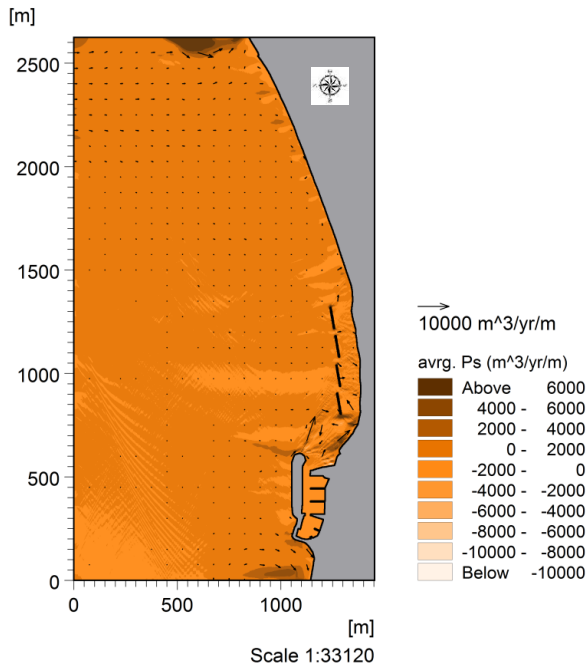
Εικόνα 18 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



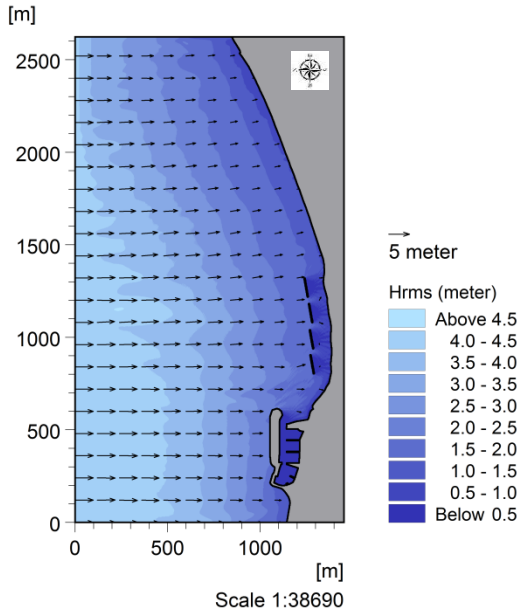
Εικόνα 19: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



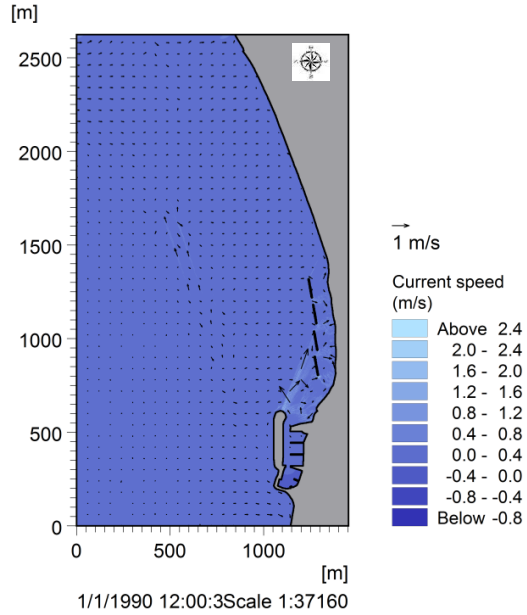
Εικόνα 20: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



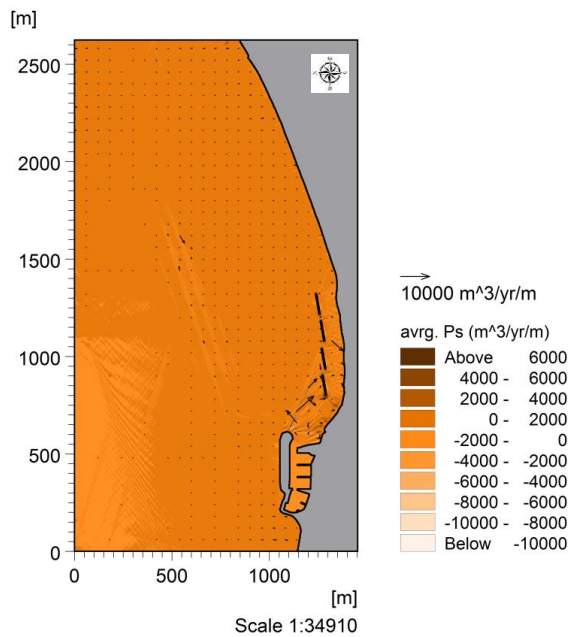
Εικόνα 21 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



Εικόνα 22: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

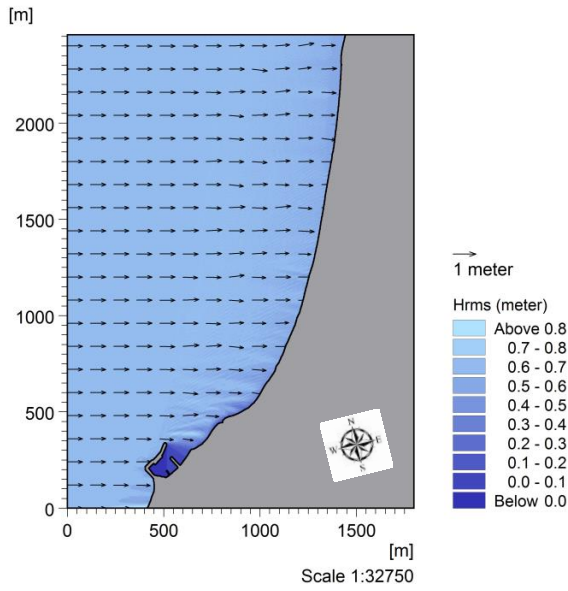


Εικόνα 23: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ με έργα

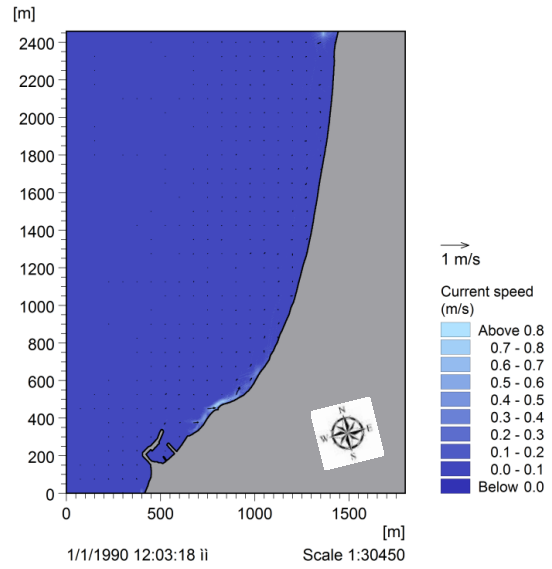


Εικόνα 24 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

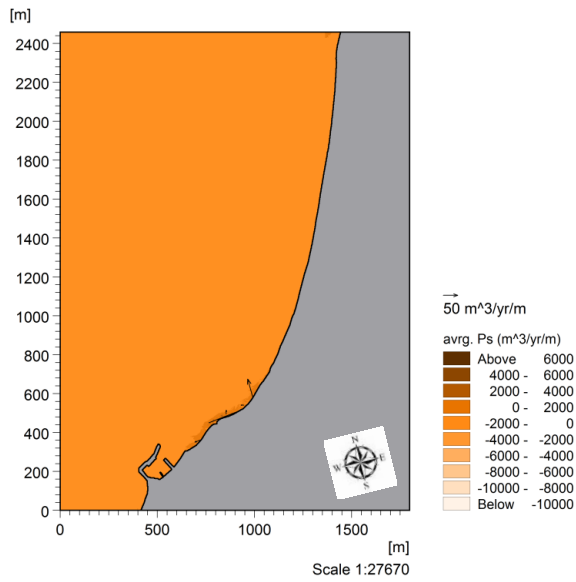
Βόρεια-Βορειοδυτική διεύθυνση



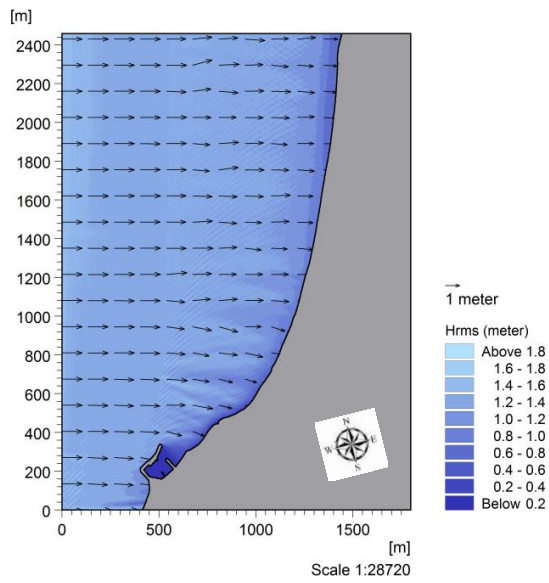
Εικόνα 25: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ



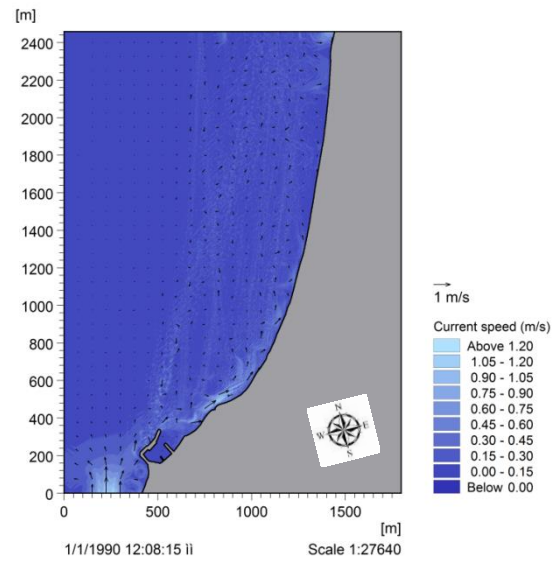
Εικόνα 26: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ



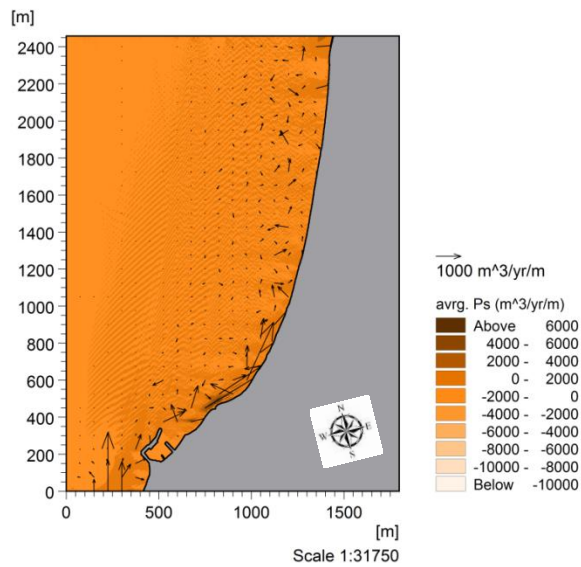
Εικόνα 27 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ



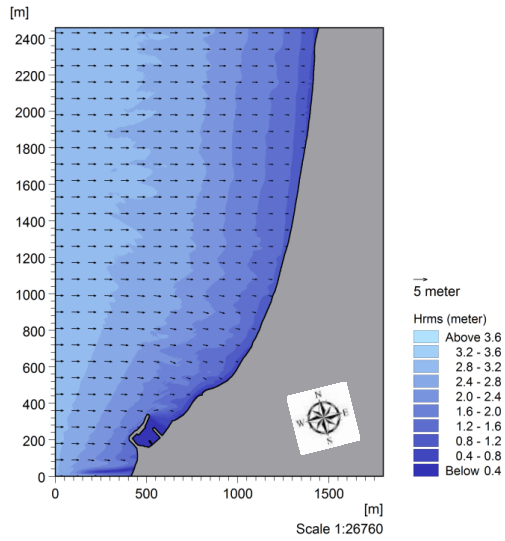
Εικόνα 28: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ



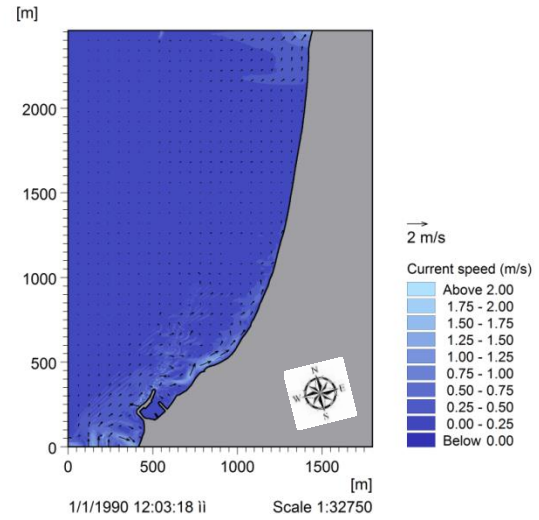
Εικόνα 29: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ



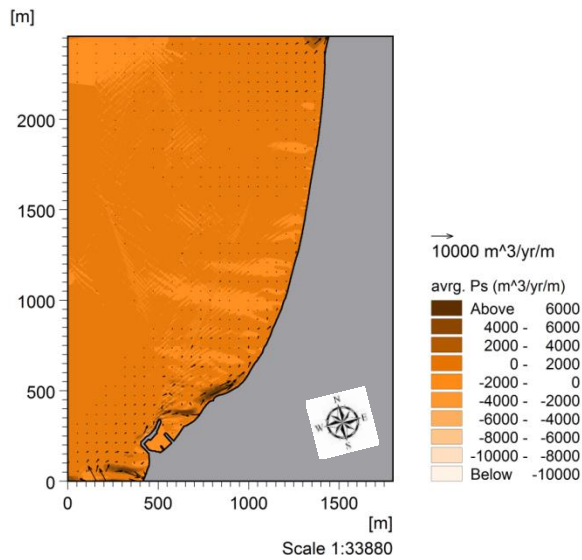
Εικόνα 30 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ



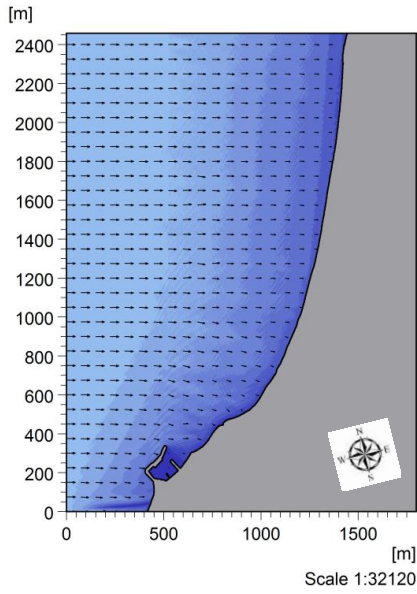
Εικόνα 31: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ



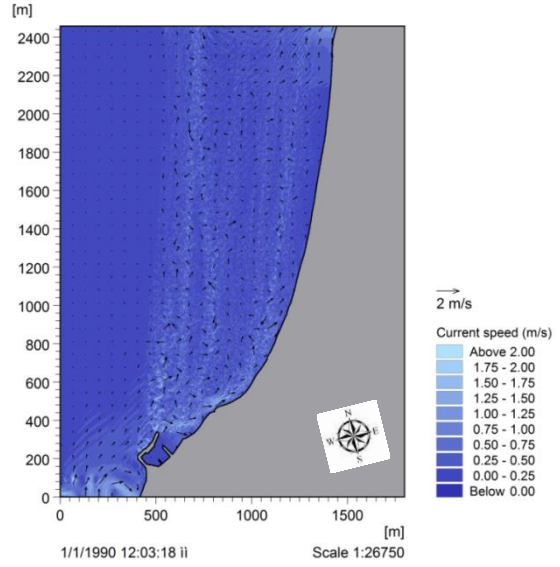
Εικόνα 32: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ



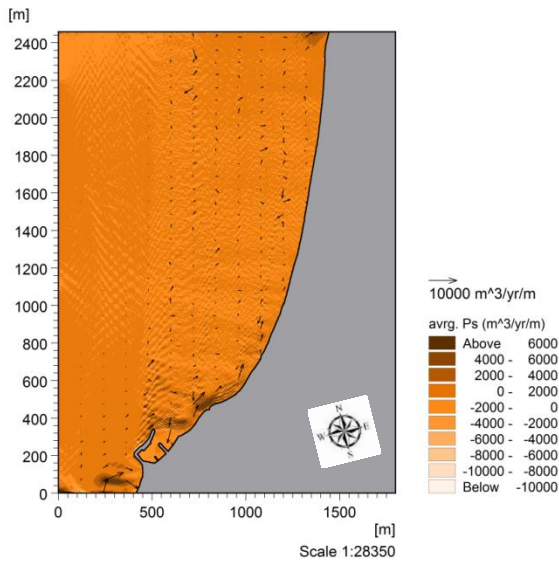
Εικόνα 33 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ



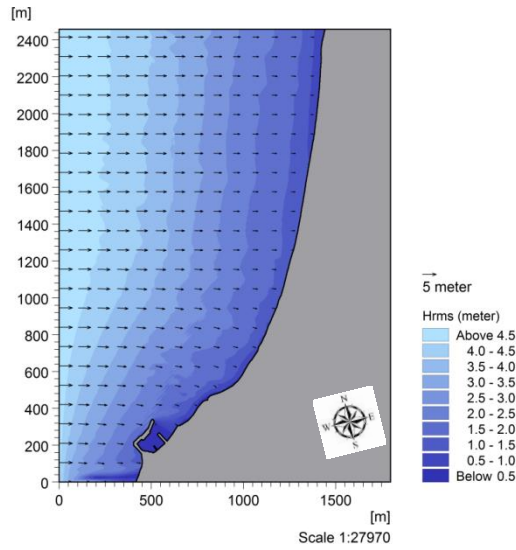
Εικόνα 34: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ



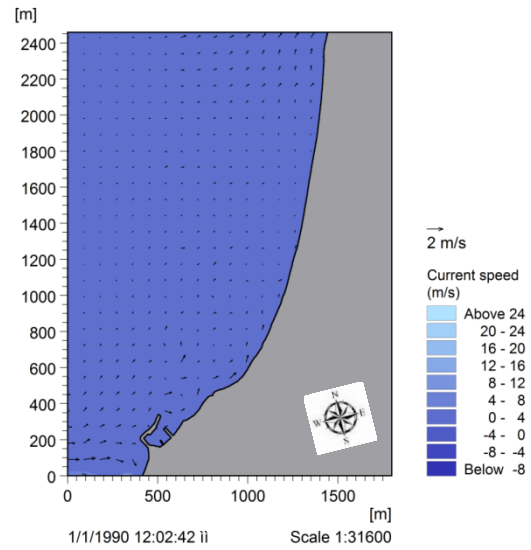
Εικόνα 35: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ



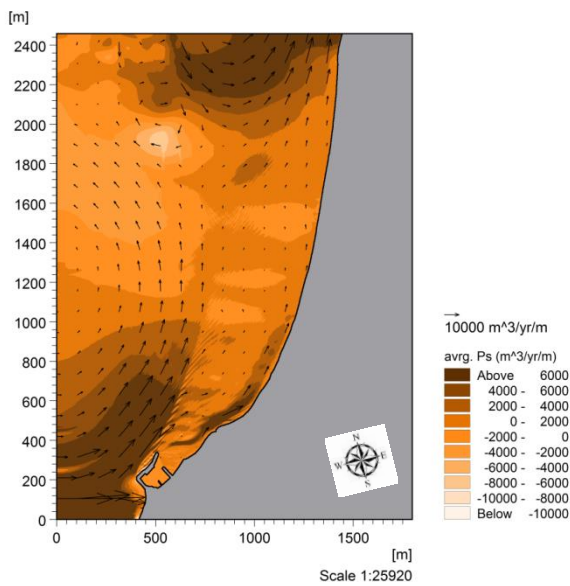
Εικόνα 36 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ



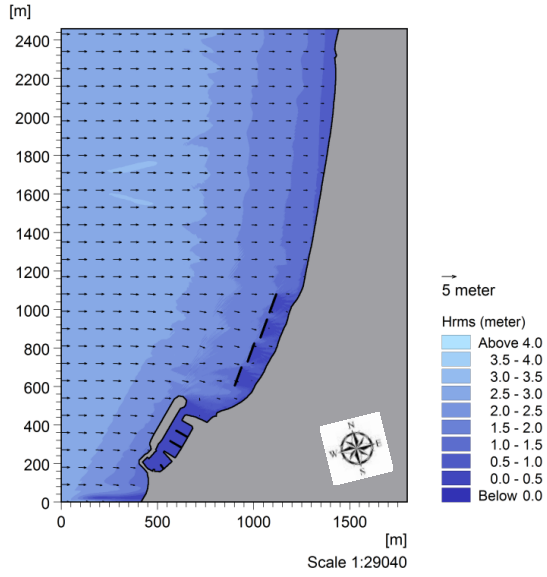
Εικόνα 37: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ



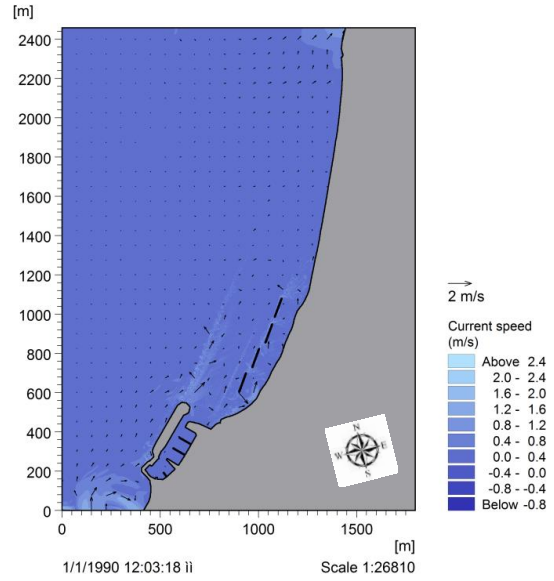
Εικόνα 38: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ



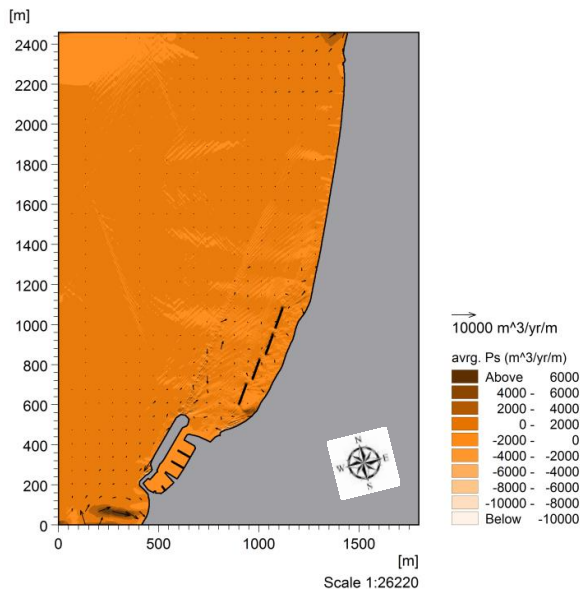
Εικόνα 39 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ



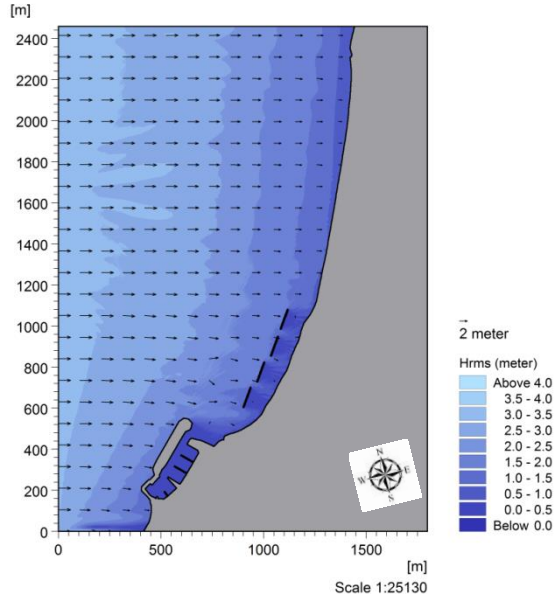
Εικόνα 40: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ



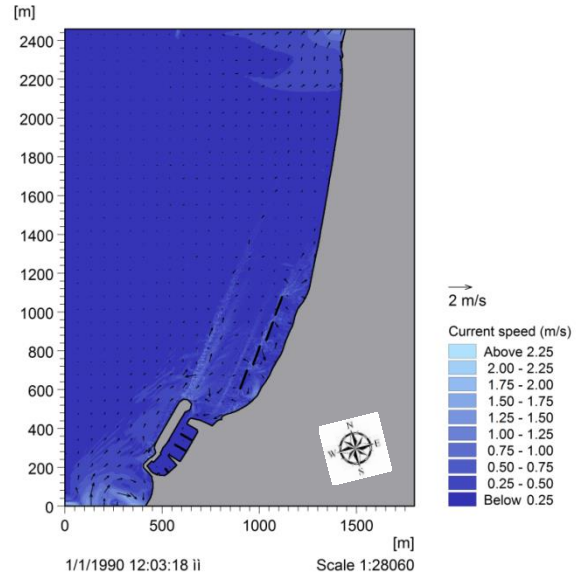
Εικόνα 41: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



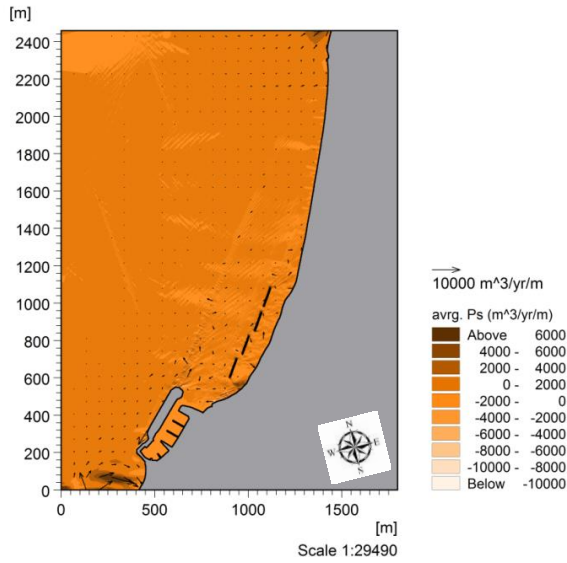
Εικόνα 42 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ



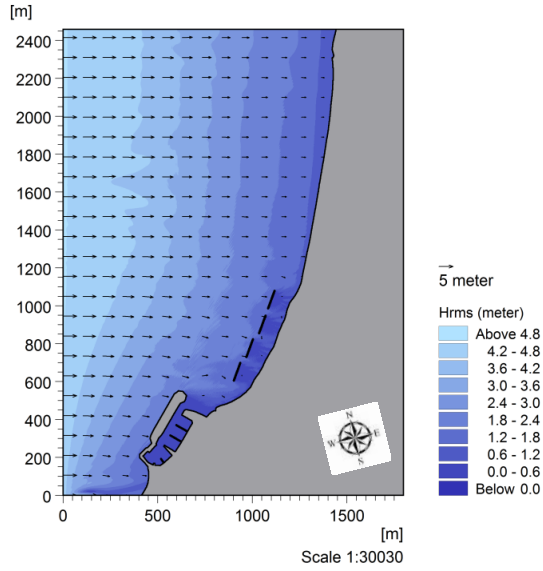
Εικόνα 43: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



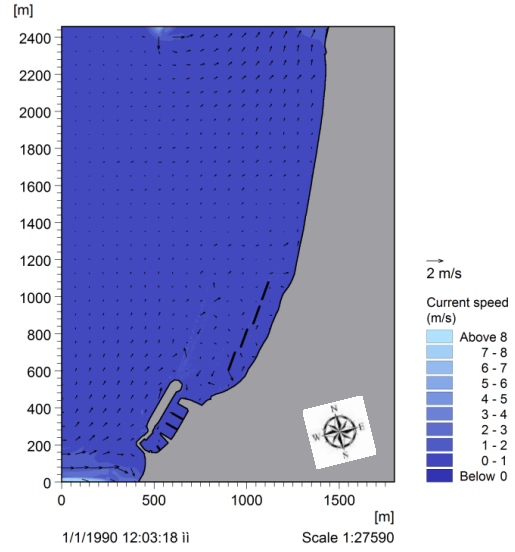
Εικόνα 44: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



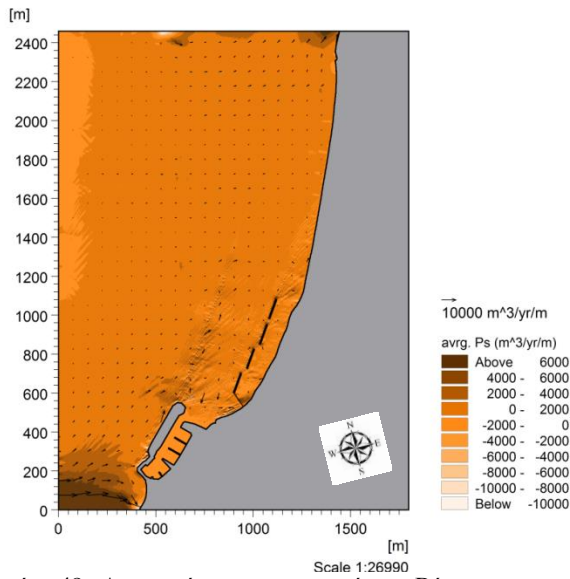
Εικόνα 45 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



Εικόνα 46: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

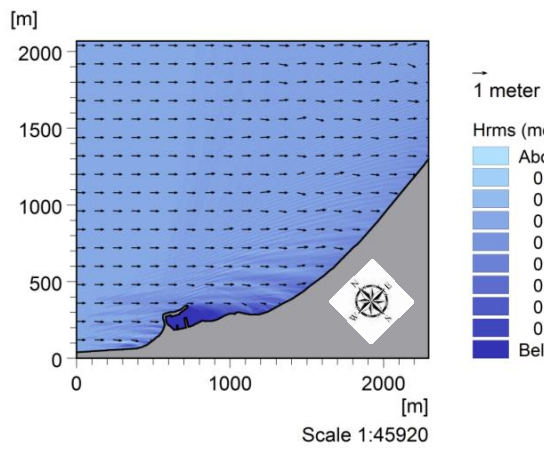


Εικόνα 47: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

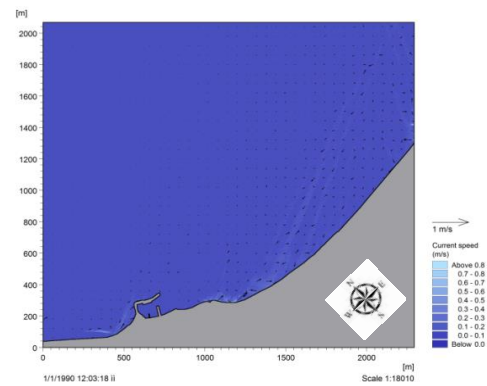


Εικόνα 48 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

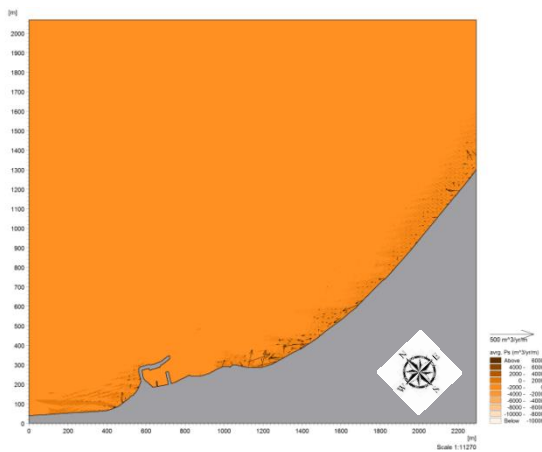
Δυτική-Βορειοδυτική διεύθυνση



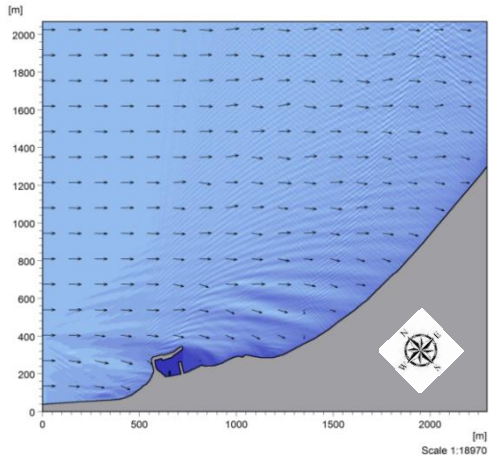
Εικόνα 49: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ



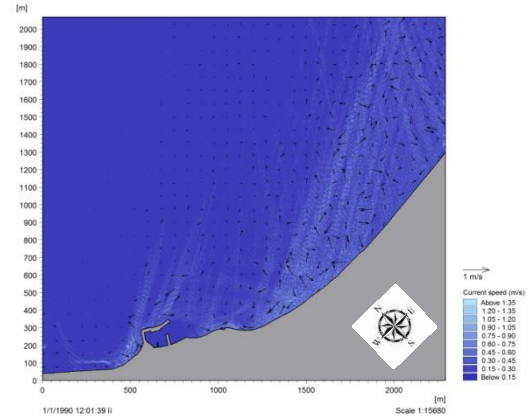
Εικόνα 50: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ



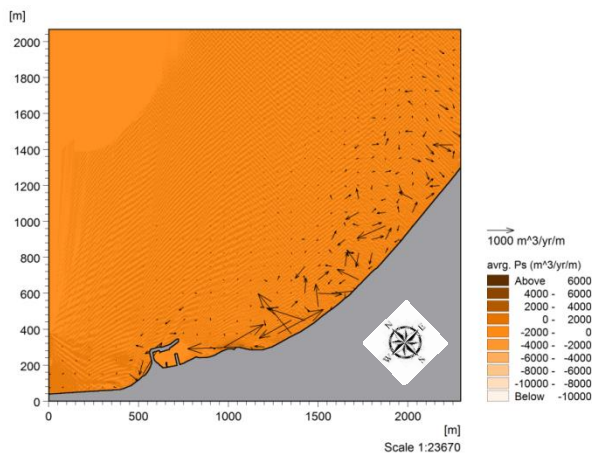
Εικόνα 51 : Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 3 μποφόρ



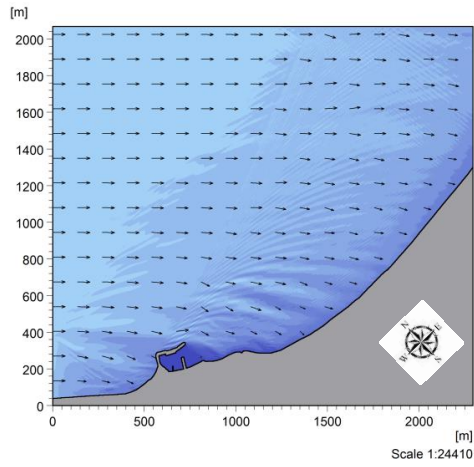
Εικόνα 52: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ



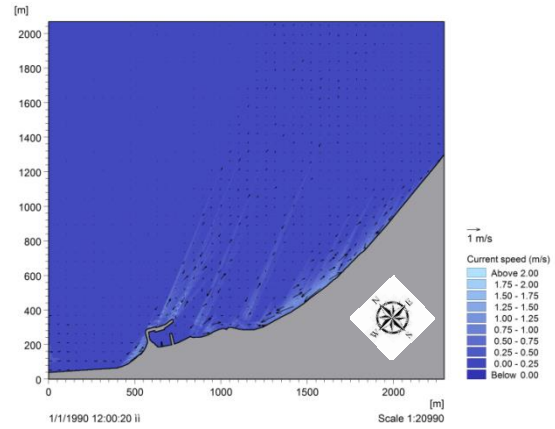
Εικόνα 53: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ



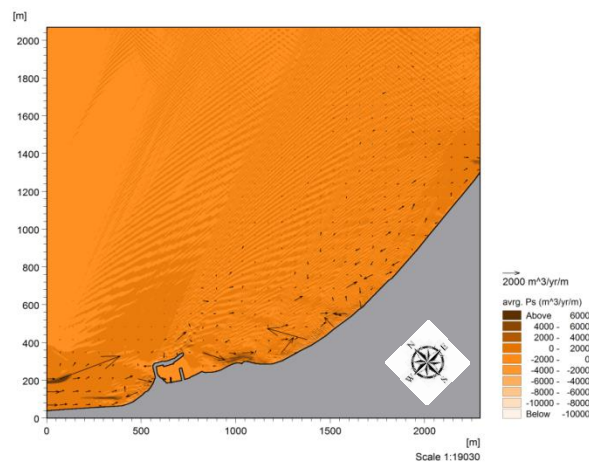
Εικόνα 54: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 4 μποφόρ



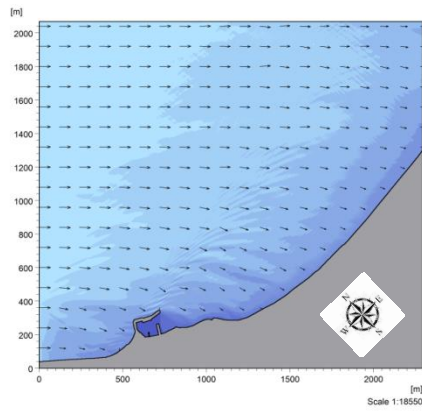
Εικόνα 55: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



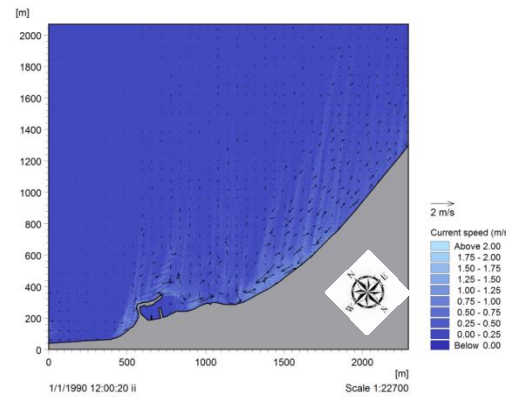
Εικόνα 56: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



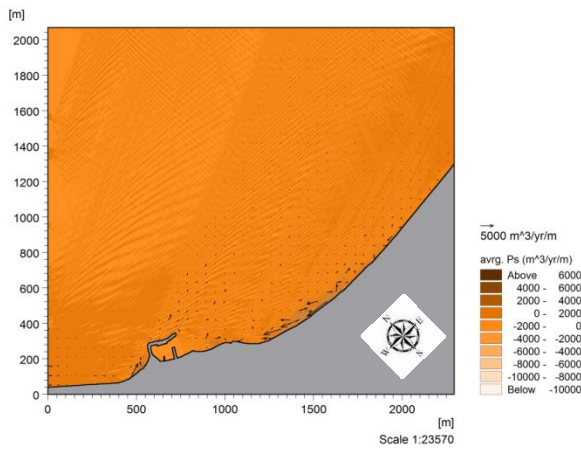
Εικόνα 57: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ



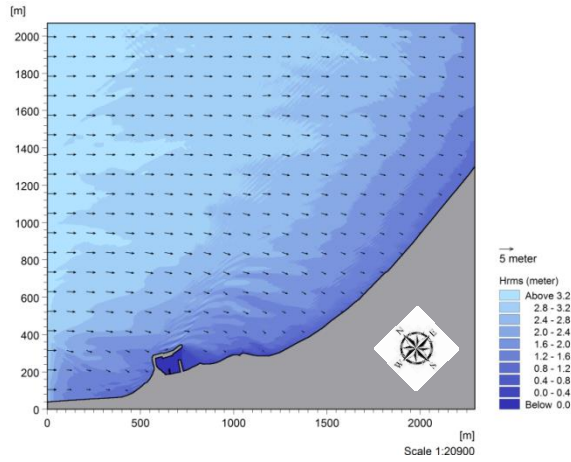
Εικόνα 58: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μιοφόρ



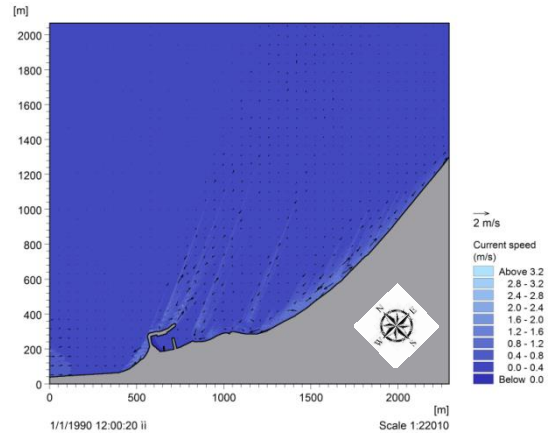
Εικόνα 59: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μιοφόρ



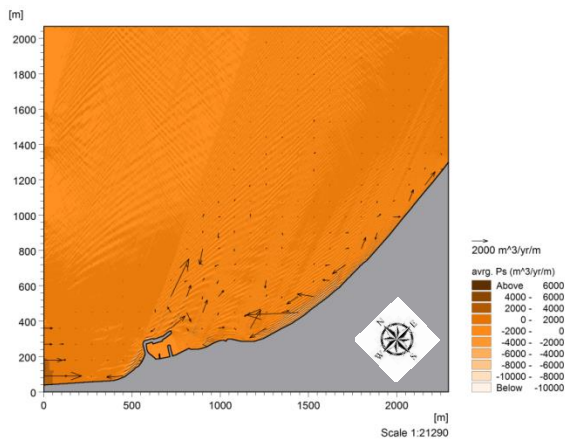
Εικόνα 60: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μιοφόρ



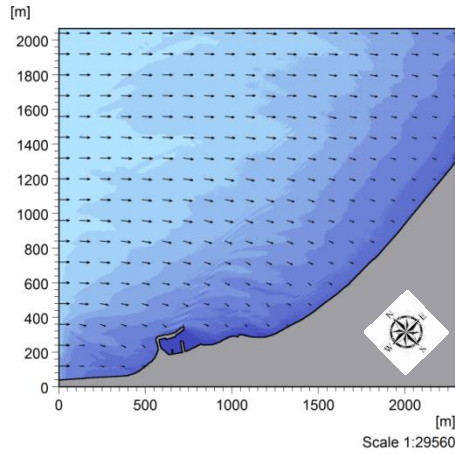
Εικόνα 61: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ



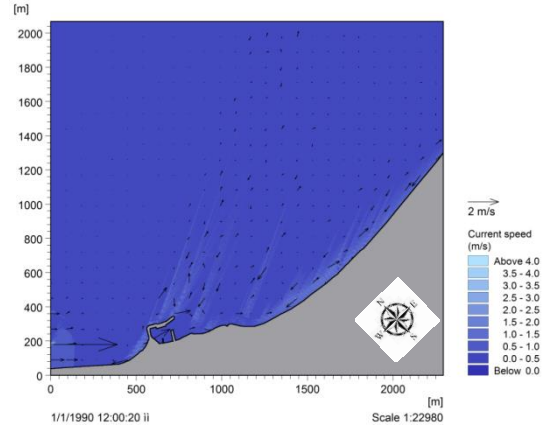
Εικόνα 62: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ



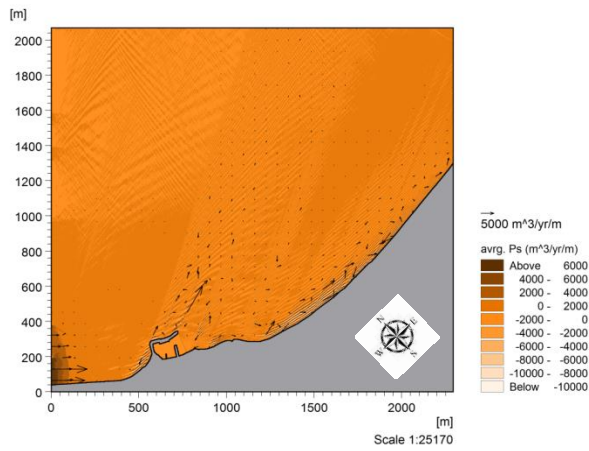
Εικόνα 63: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ



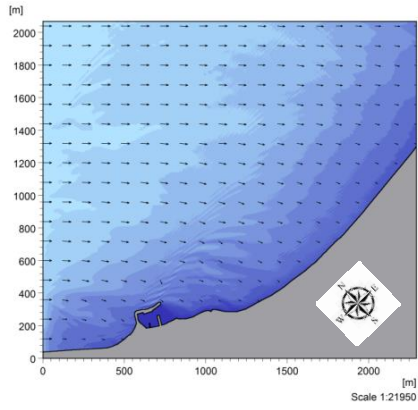
Εικόνα 64: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ



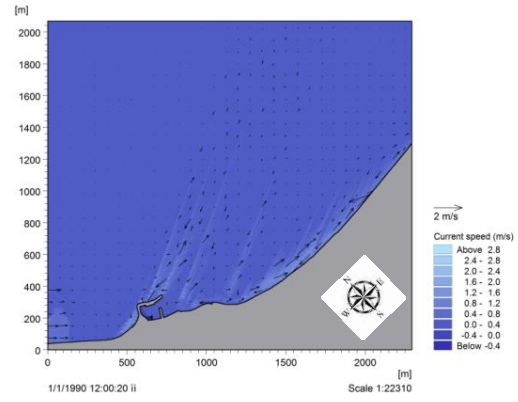
Εικόνα 65: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ



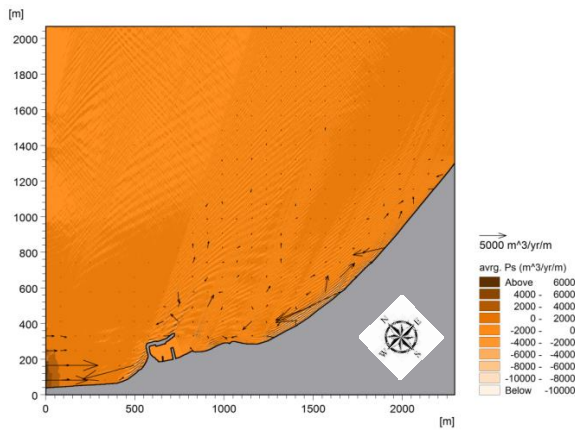
Εικόνα 66: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ



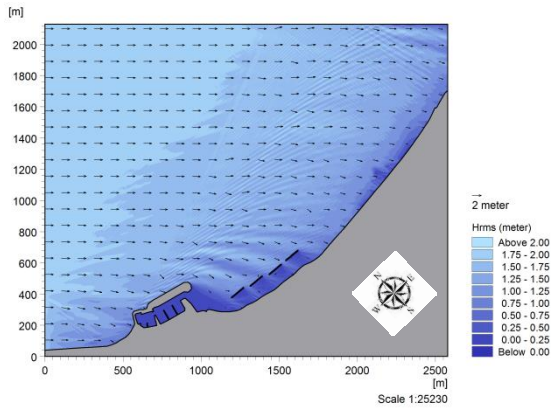
Εικόνα 67: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ



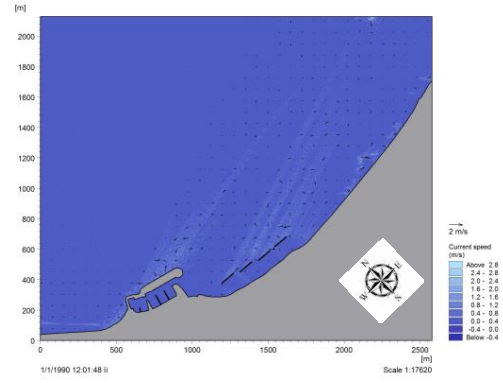
Εικόνα 68: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ



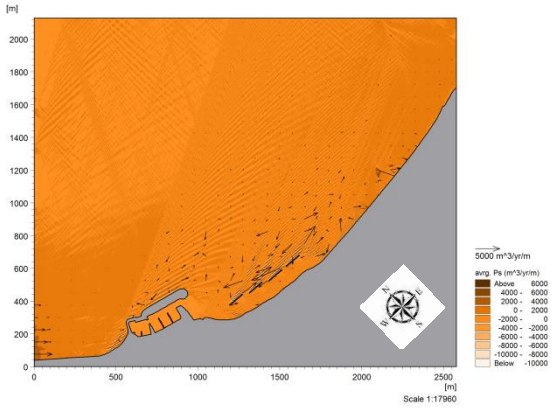
Εικόνα 69: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ



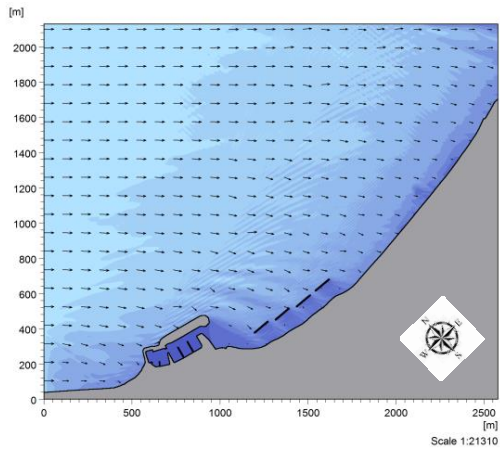
Εικόνα 70: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



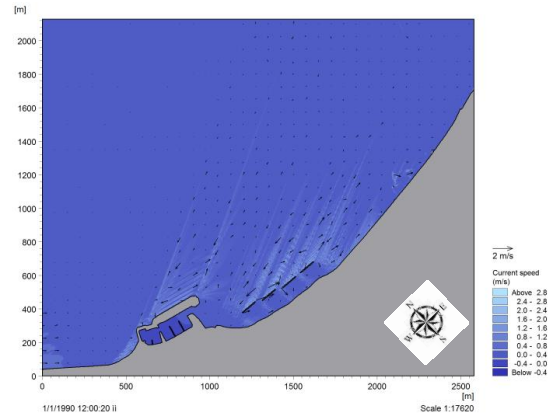
Εικόνα 71: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



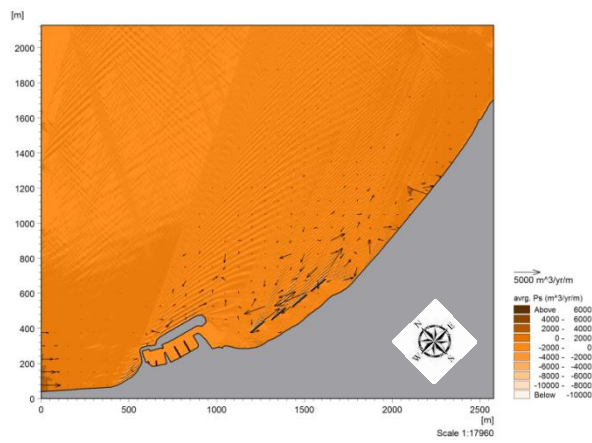
Εικόνα 72: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



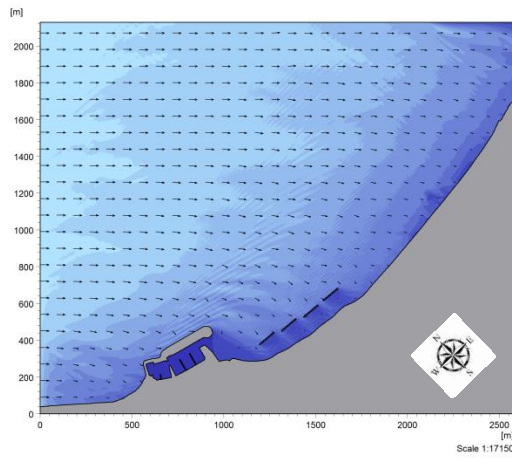
Εικόνα 73: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



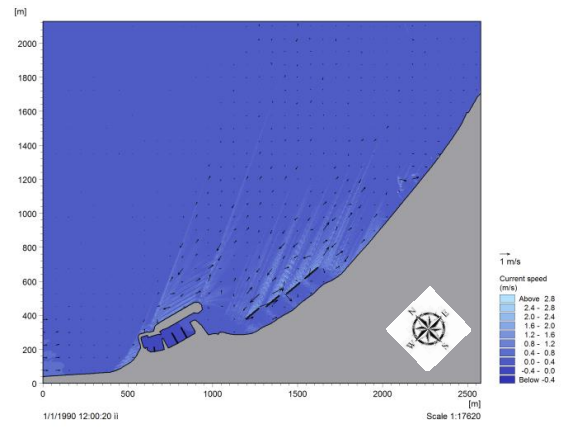
Εικόνα 74: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



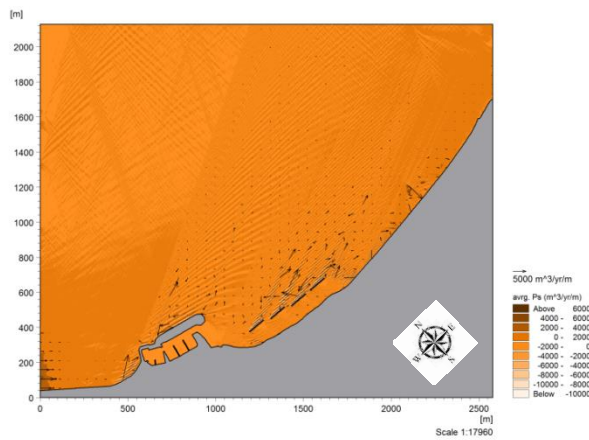
Εικόνα 75: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



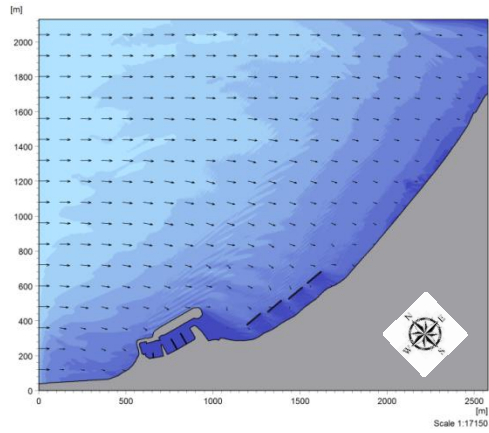
Εικόνα 76: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



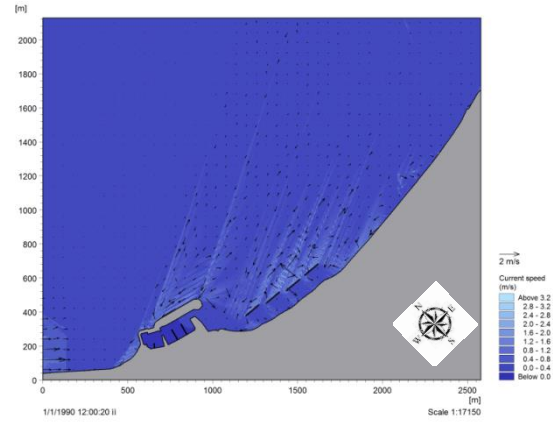
Εικόνα 77: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



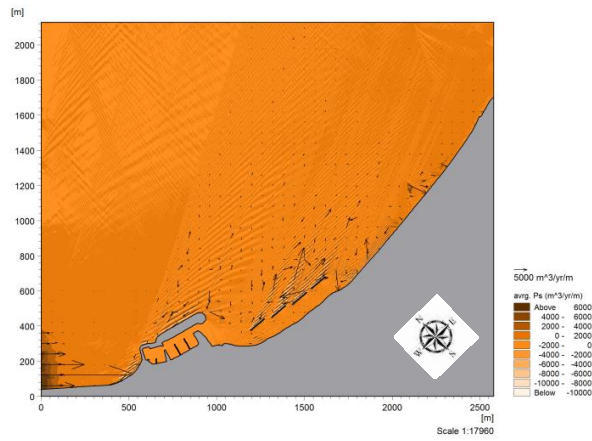
Εικόνα 78: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



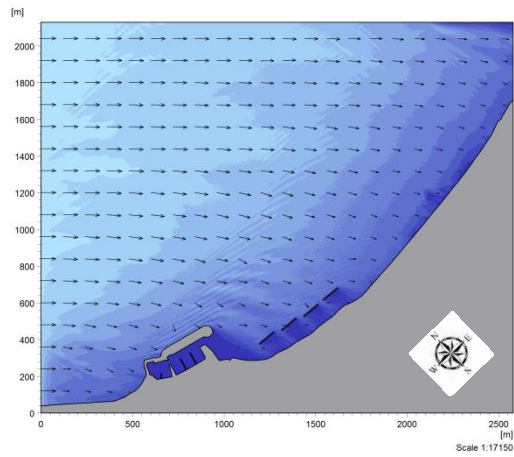
Εικόνα 79: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



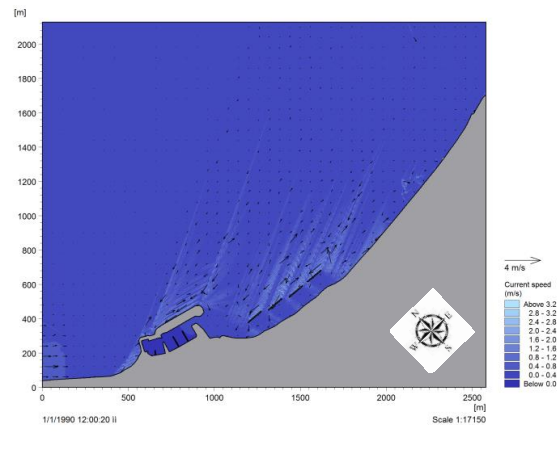
Εικόνα 80: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



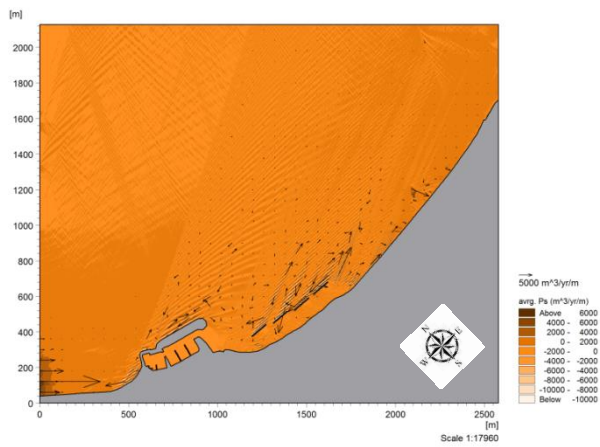
Εικόνα 81: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



Εικόνα 82: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

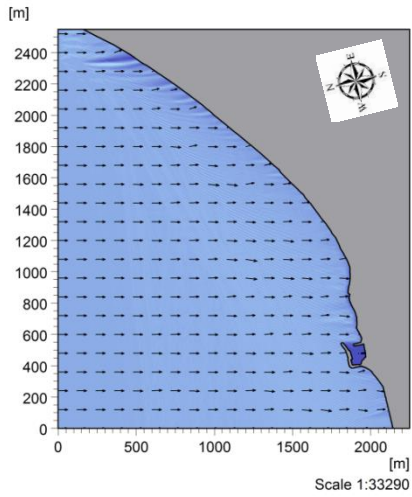


Εικόνα 83: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

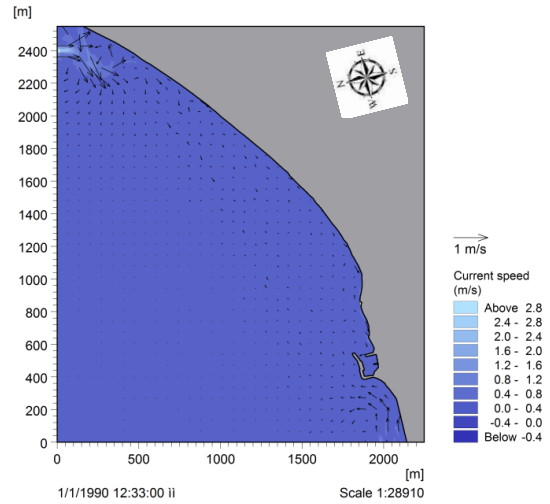


Εικόνα 84: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό-Βορειοδυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

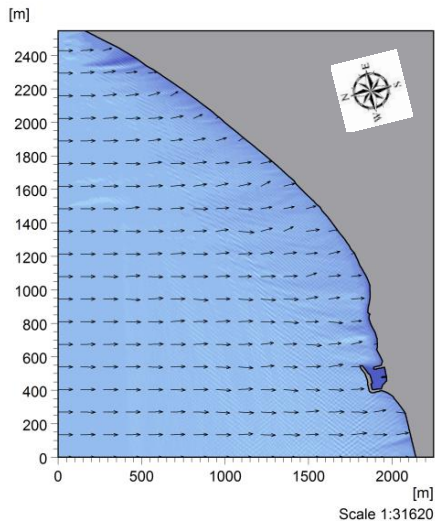
Βόρεια-Βορειοανατολική διεύθυνση



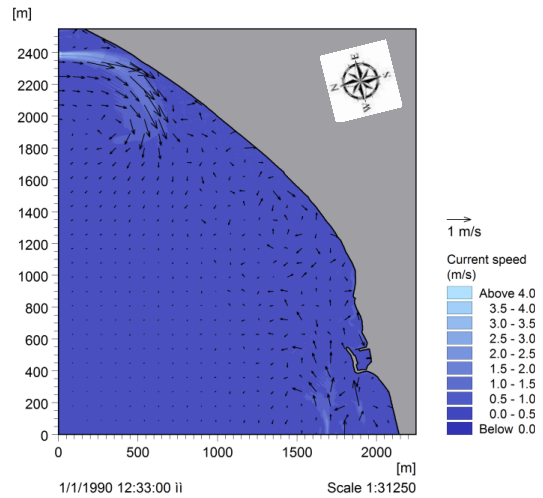
Εικόνα 85: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 3 μποφόρ



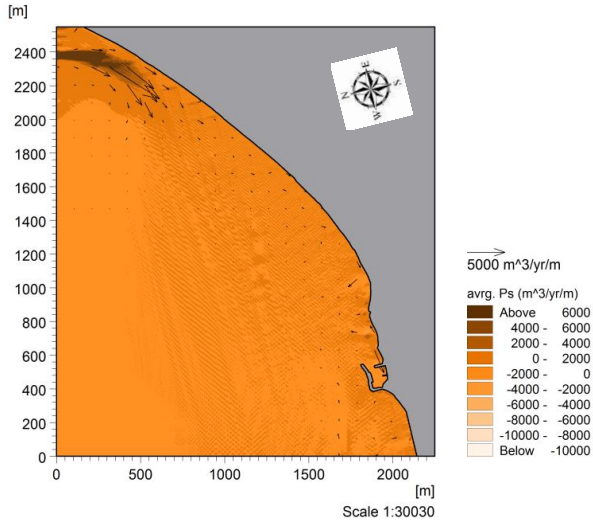
Εικόνα 86: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 3 μποφόρ



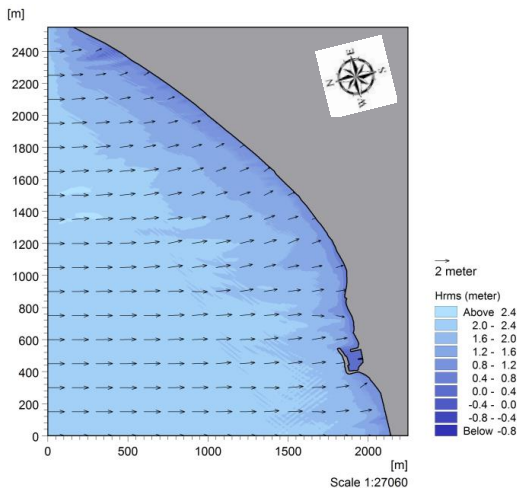
Εικόνα 87: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



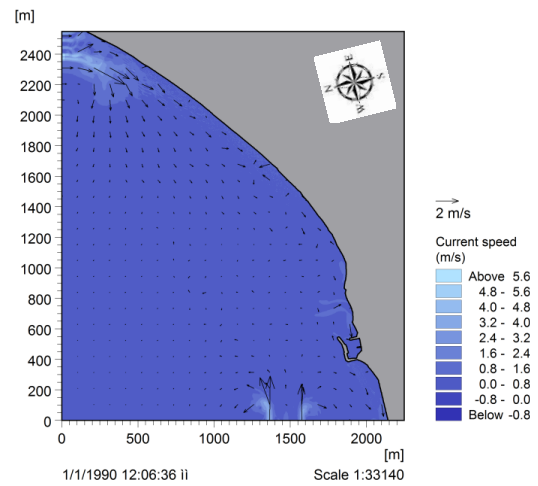
Εικόνα 88: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



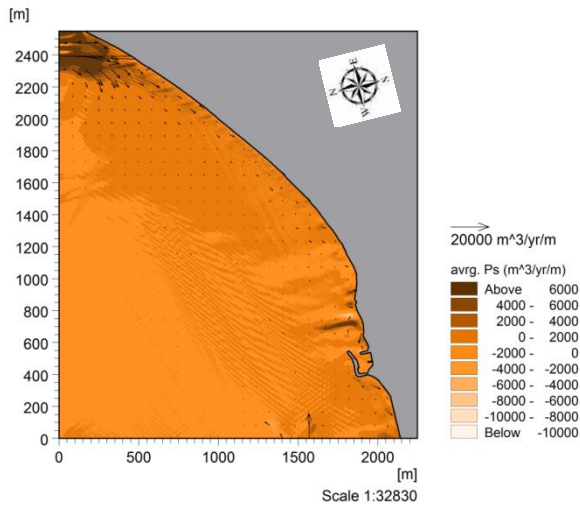
Εικόνα 89: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



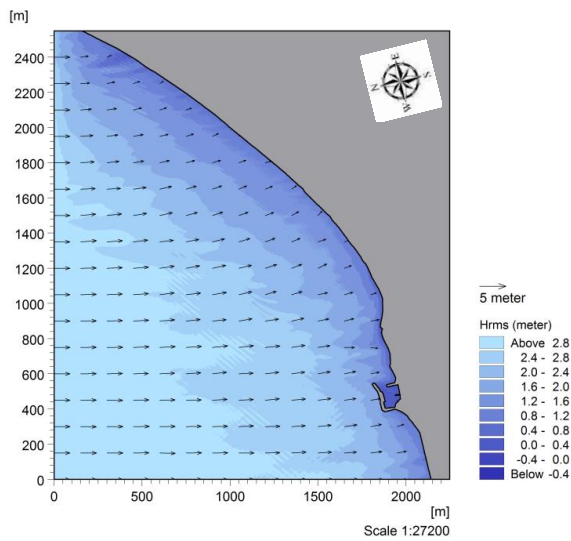
Εικόνα 90: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



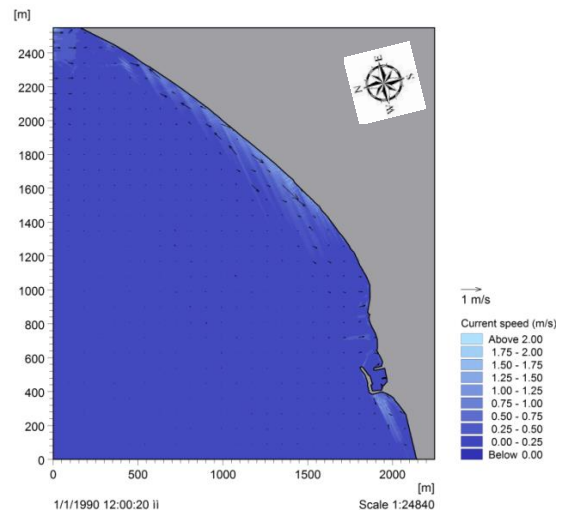
Εικόνα 91: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



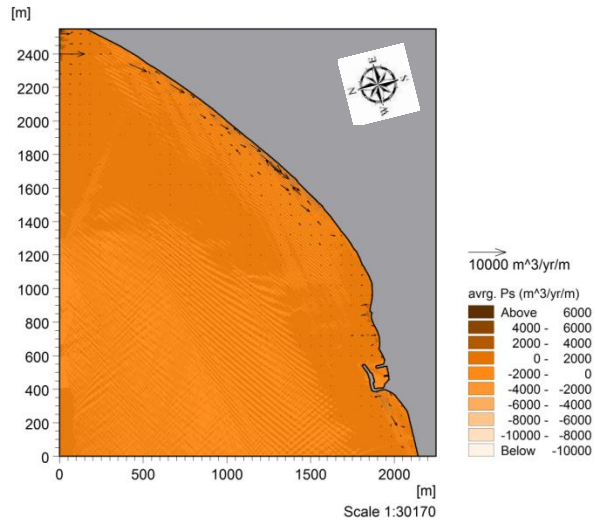
Εικόνα 92: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



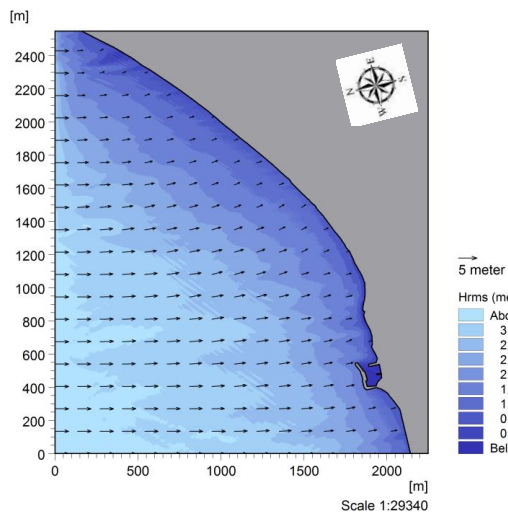
Εικόνα 93: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



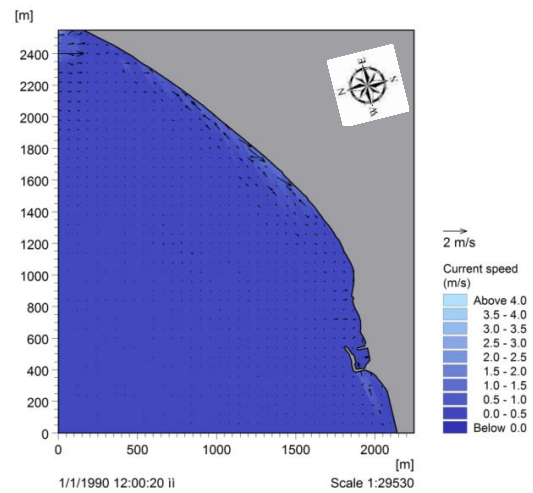
Εικόνα 94: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



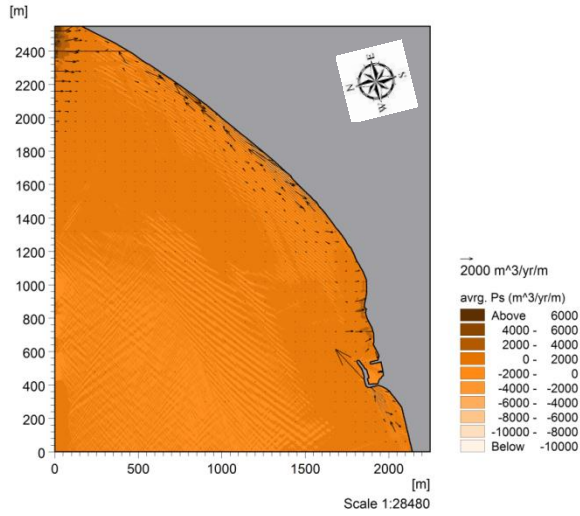
Εικόνα 95: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



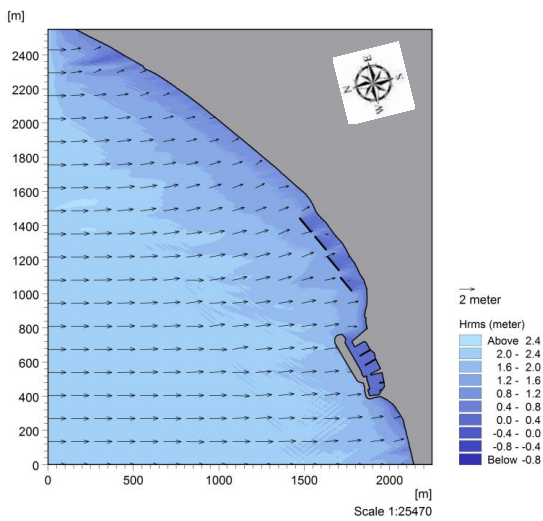
Εικόνα 96: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



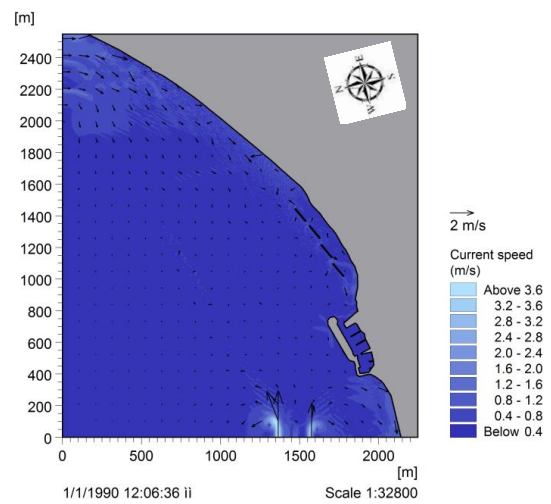
Εικόνα 97: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



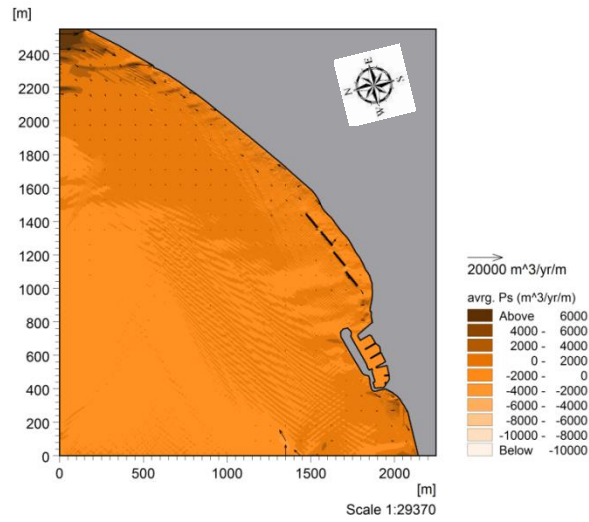
Εικόνα 98: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



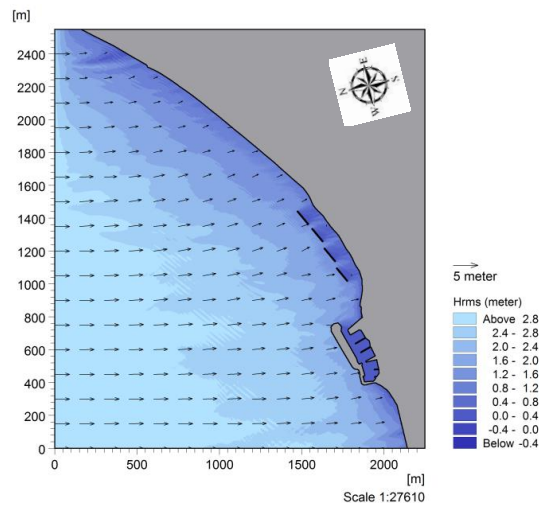
Εικόνα 99: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



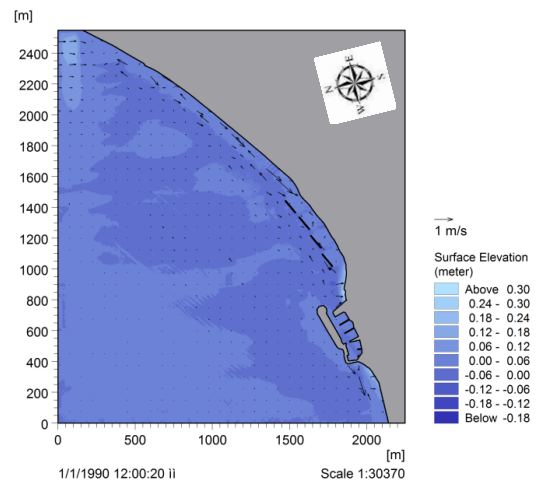
Εικόνα 100: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



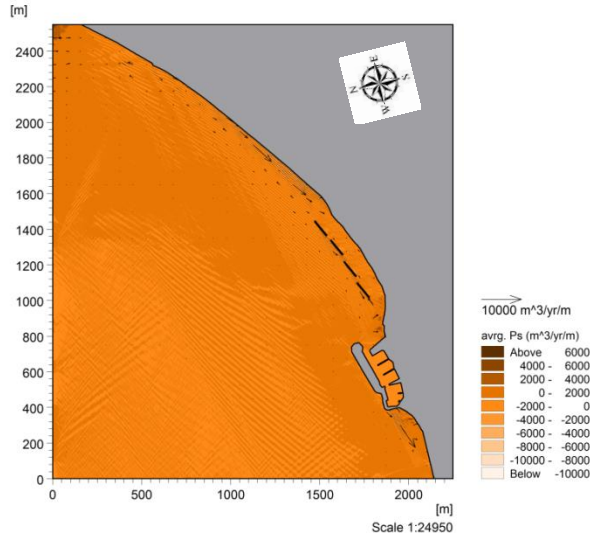
Εικόνα 101: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



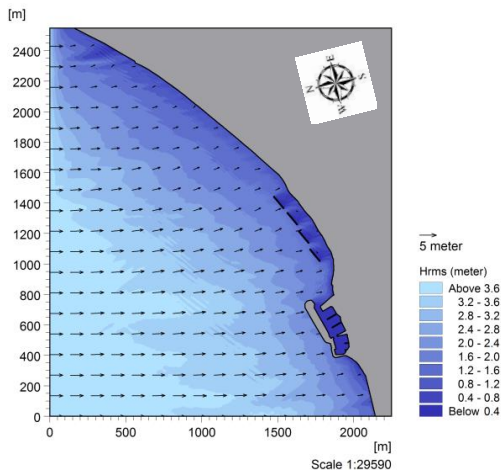
Εικόνα 102: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



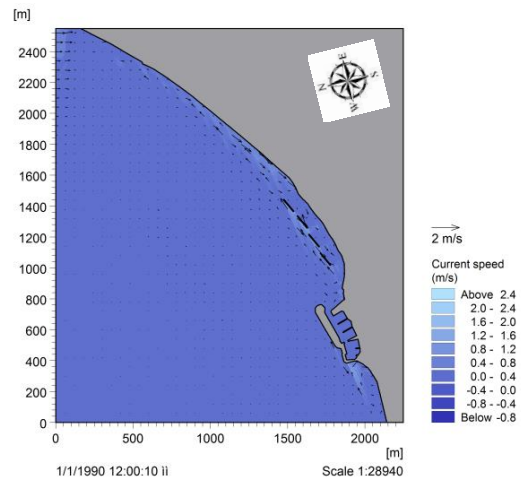
Εικόνα 103: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



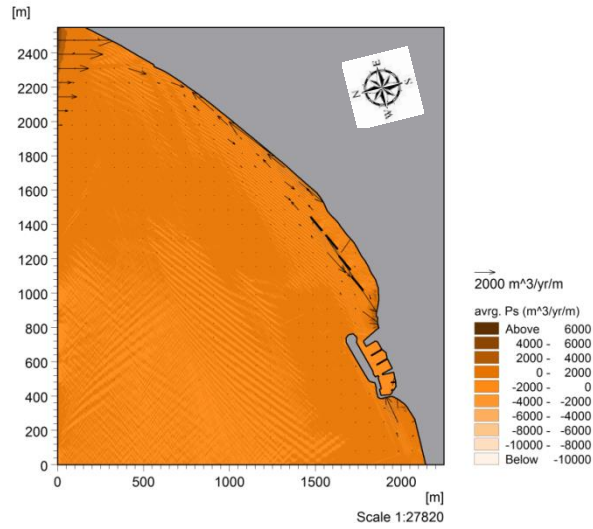
Εικόνα 104: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



Εικόνα 105: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

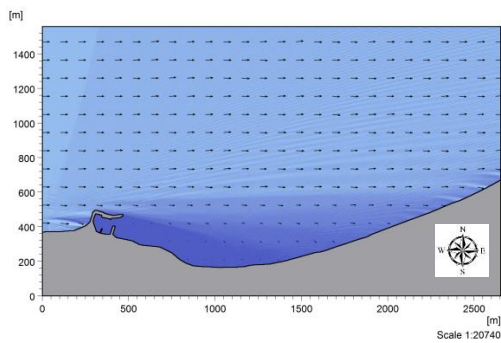


Εικόνα 106: Υδροδυναμικό πεδίο για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

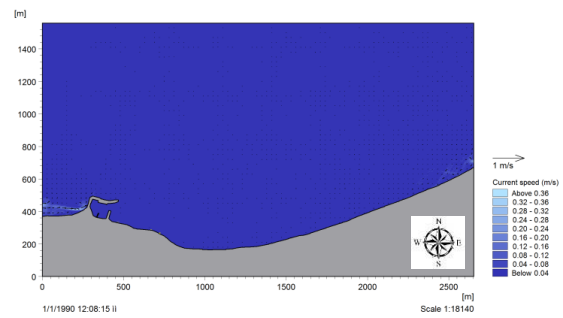


Εικόνα 107: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Βόρειο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα

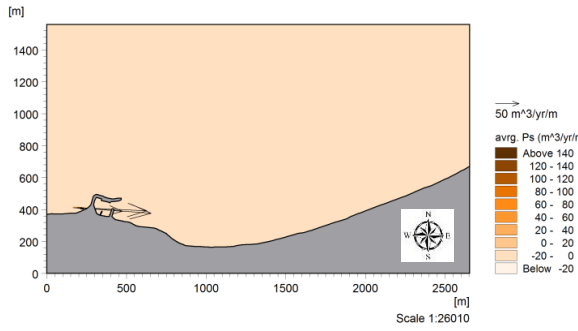
Δυτική διεύθυνση



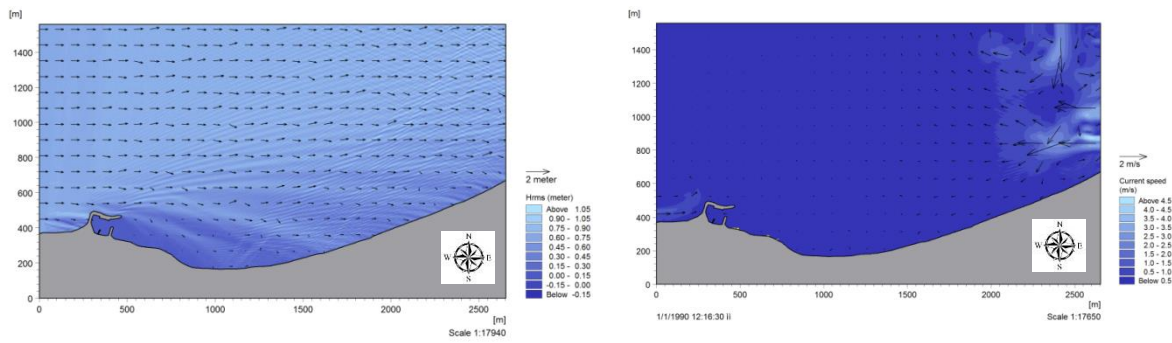
Εικόνα 108: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 3 μποφόρ



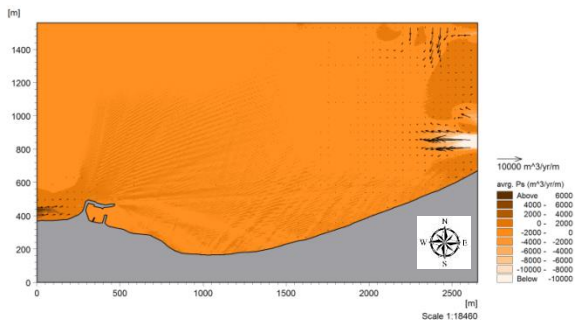
Εικόνα 109: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 3 μποφόρ



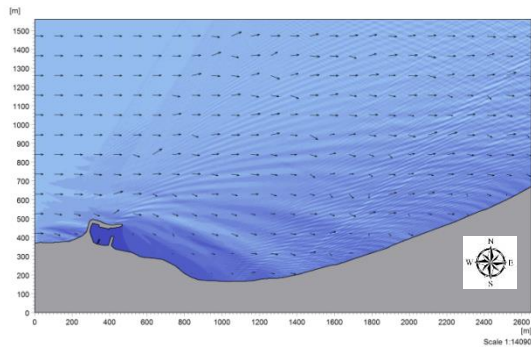
Εικόνα 110: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 3 μποφόρ



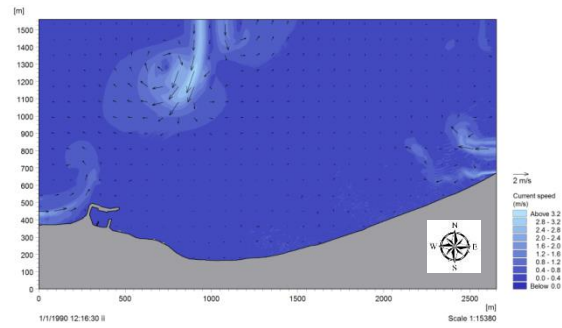
Εικόνα 111: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 4 μποφόρ



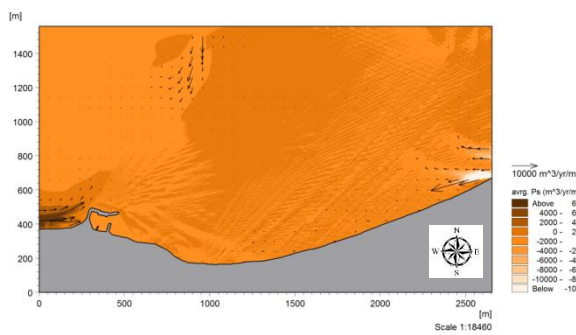
Εικόνα 113: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 4 μποφόρ



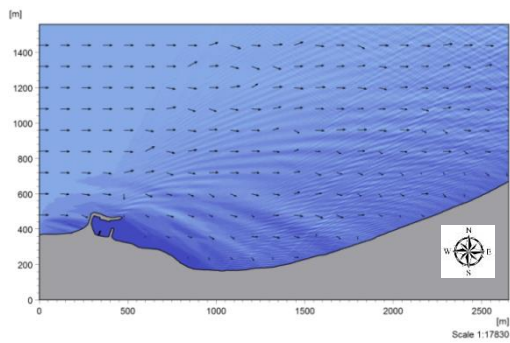
Εικόνα 114: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ



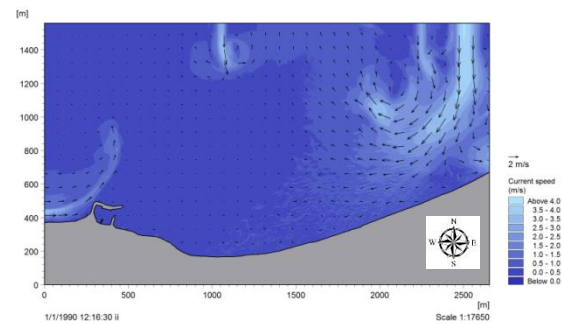
Εικόνα 115: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ



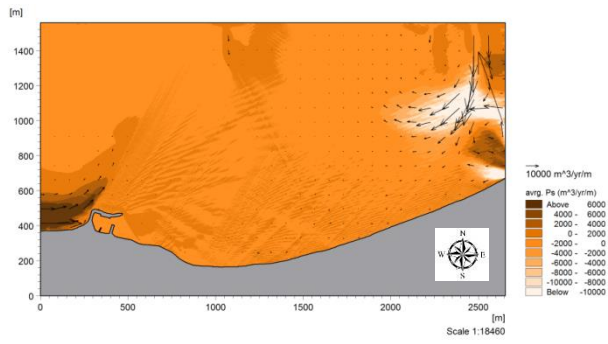
Εικόνα 116: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ



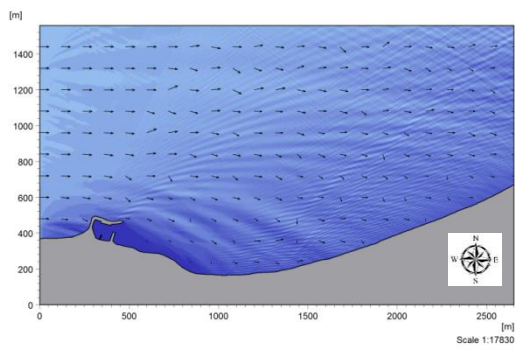
Εικόνα 117: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ



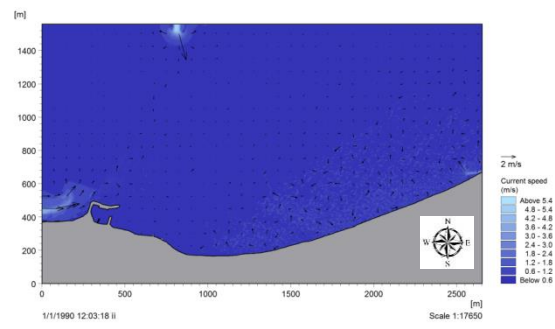
Εικόνα 118: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ



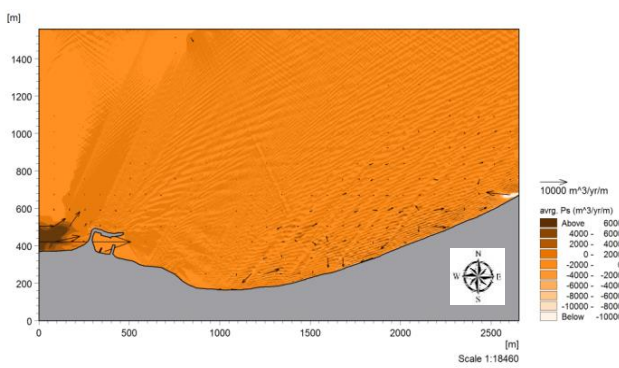
Εικόνα 119: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 6 μποφόρ

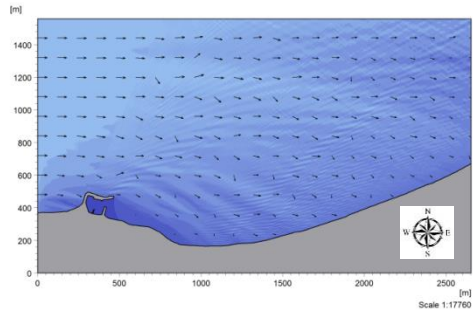


Εικόνα 120: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ

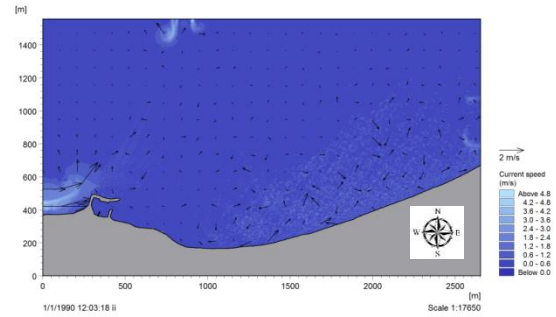


Εικόνα 121: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ

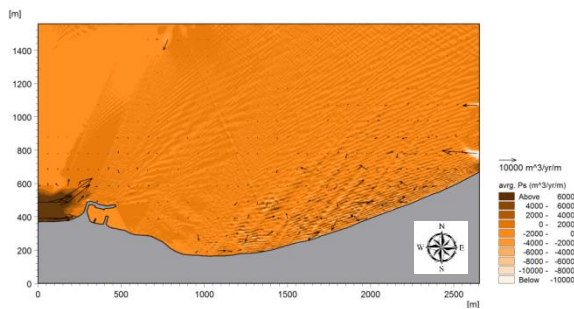




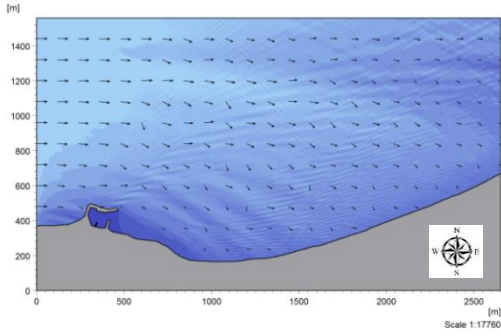
Εικόνα 123: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ



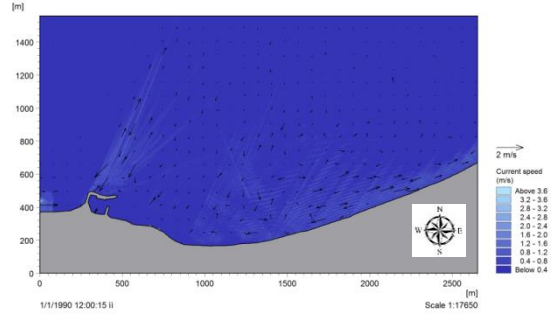
Εικόνα 124: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ



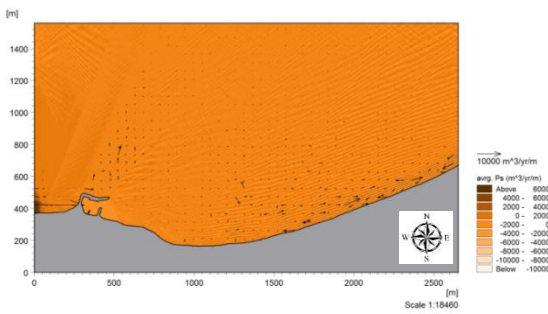
Εικόνα 125: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ



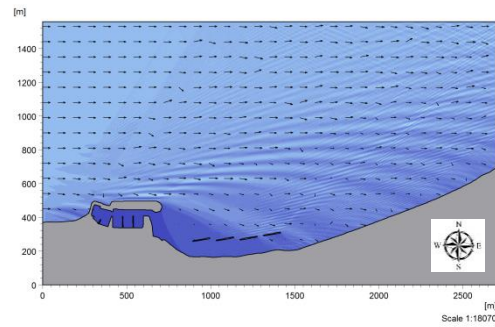
Εικόνα 126: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ



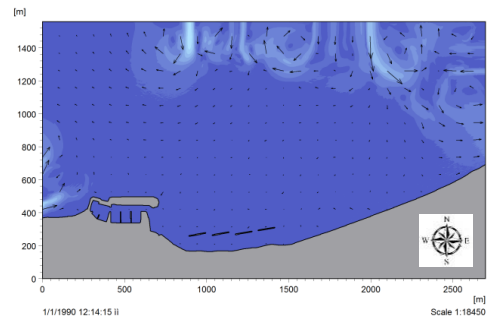
Εικόνα 127: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ



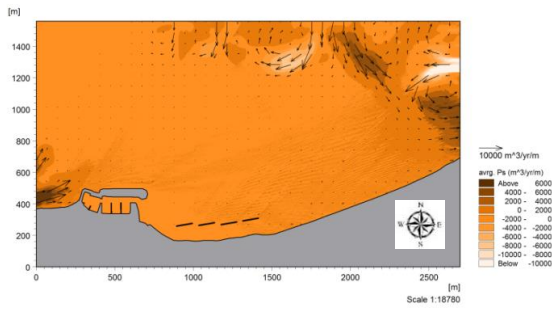
Εικόνα 128: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ



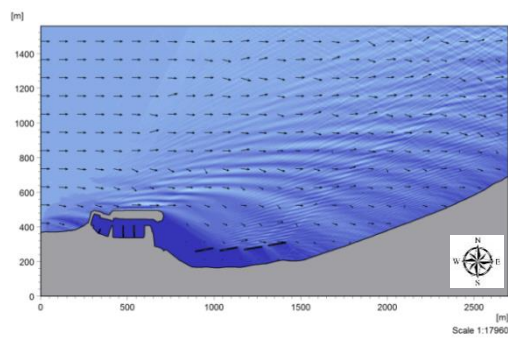
Εικόνα 129: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 5μποφόρ με τα έργα



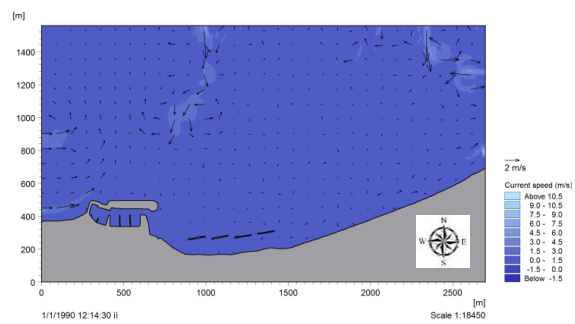
Εικόνα 130: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



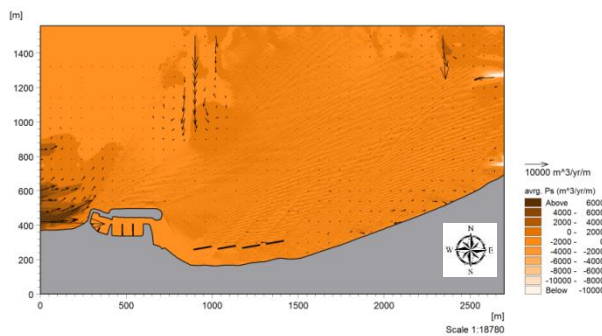
Εικόνα 131: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 5
μποφόρ με τα έργα



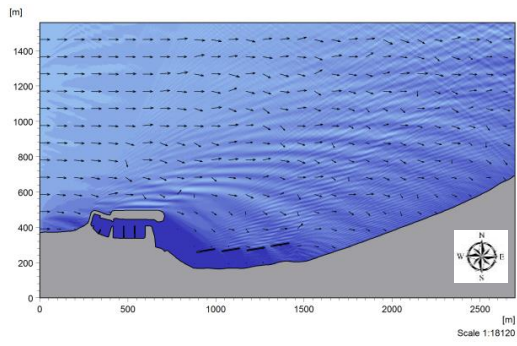
Εικόνα 132: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 6
μποφόρ με τα έργα



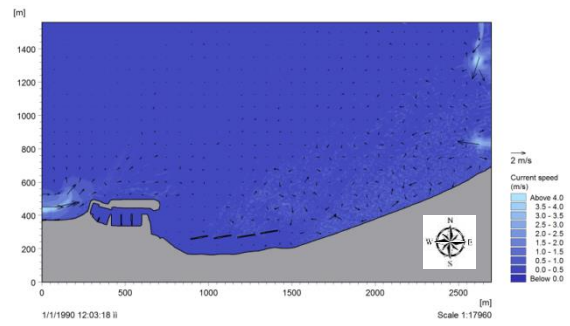
Εικόνα 133: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 6
μποφόρ με τα έργα



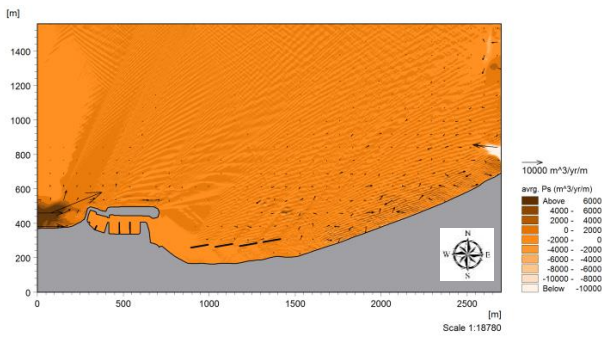
Εικόνα 134: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό
άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



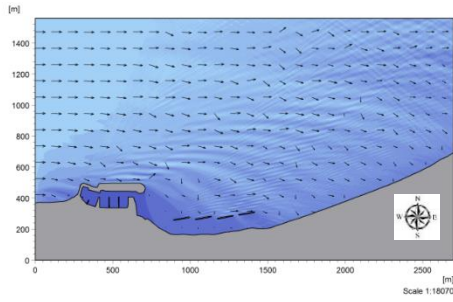
Εικόνα 135: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 7μποφόρ με τα έργα



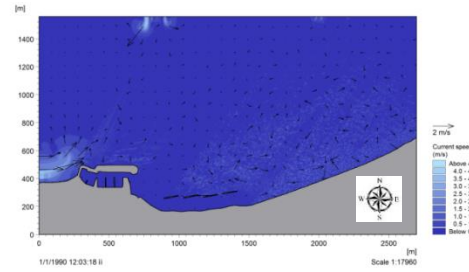
Εικόνα 136: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



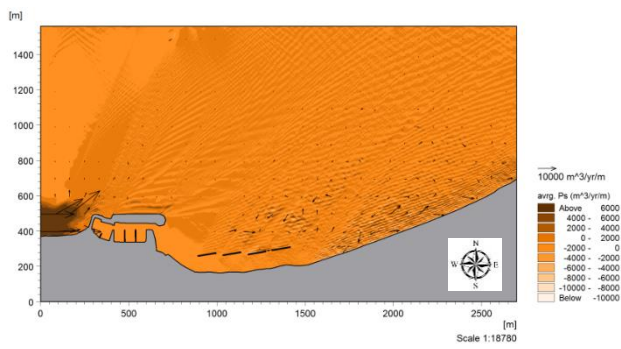
Εικόνα 137: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



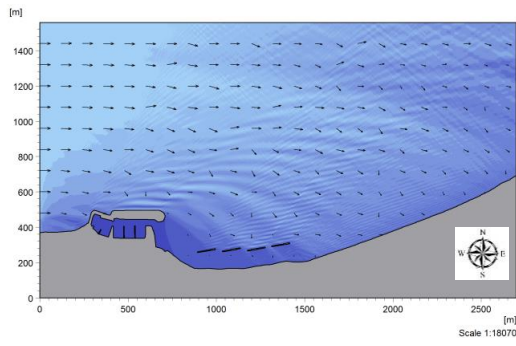
Εικόνα 138: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



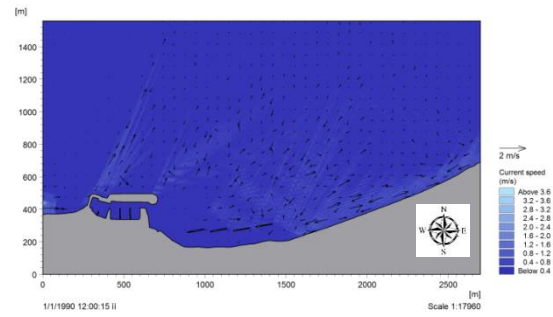
Εικόνα 139: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



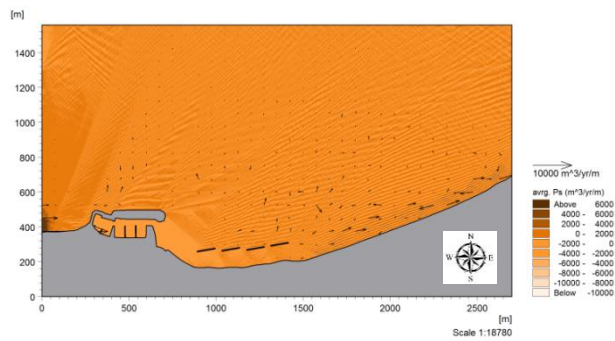
Εικόνα 140: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



Εικόνα 141: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

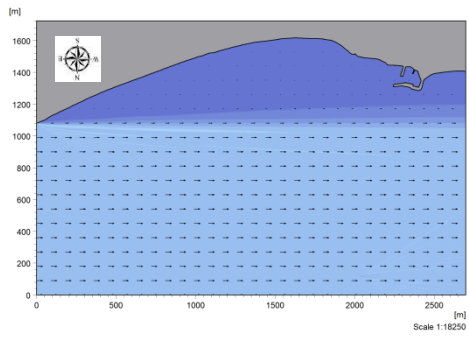


Εικόνα 142: Υδροδυναμικό πεδίο για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

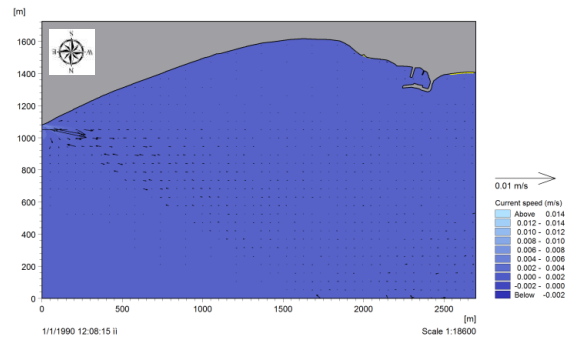


Εικόνα 143: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Δυτικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

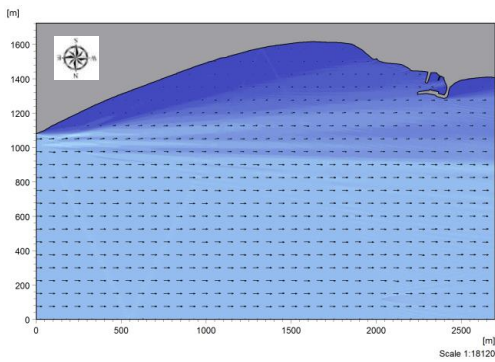
Ανατολική διεύθυνση



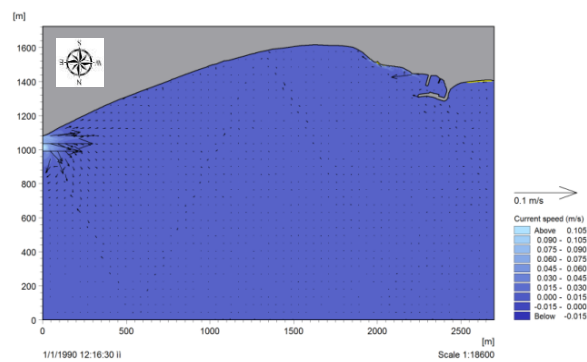
Εικόνα 144: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 3 μποφόρ



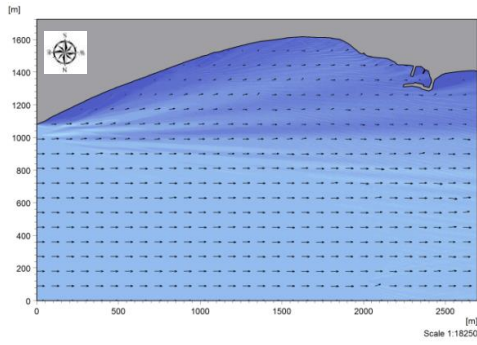
Εικόνα 145: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 3 μποφόρ



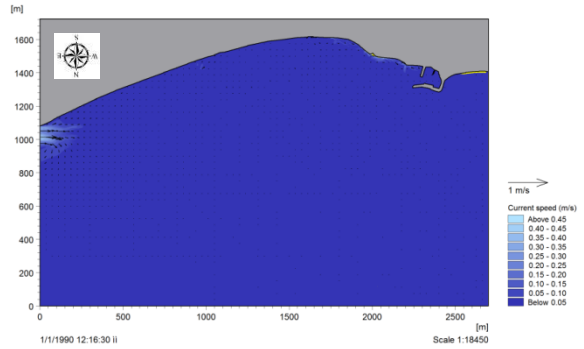
Εικόνα 146: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



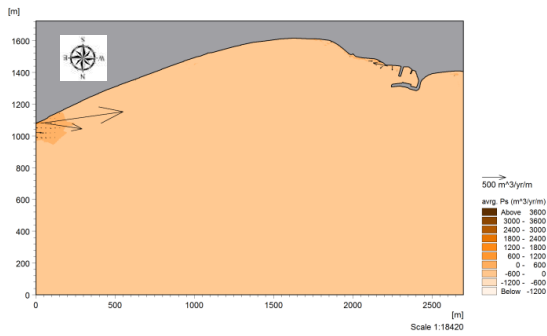
Εικόνα 147: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



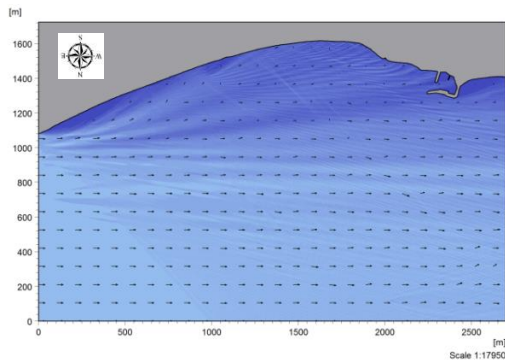
Εικόνα 148: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



Εικόνα 149: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



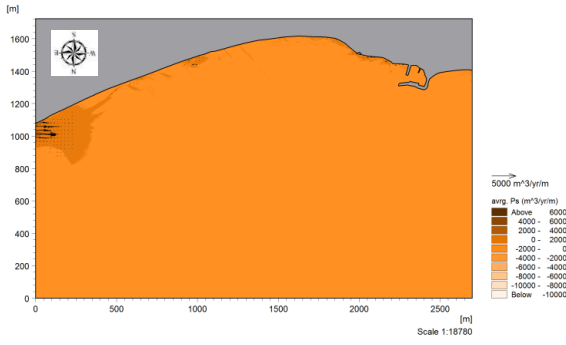
Εικόνα 150: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



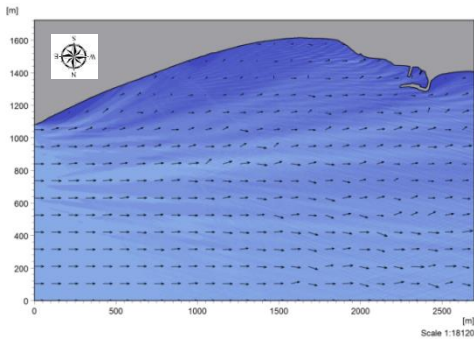
Εικόνα 151: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



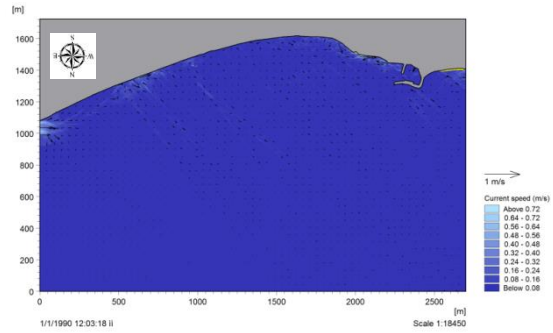
Εικόνα 152: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



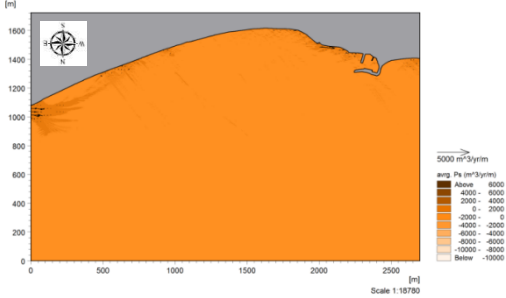
Εικόνα 153: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



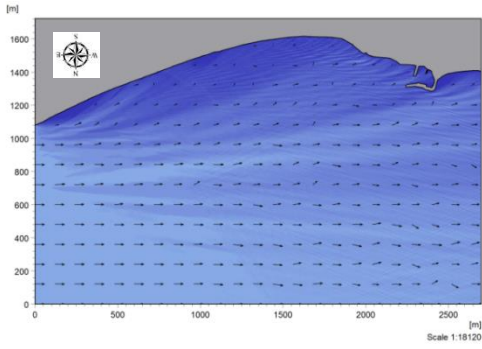
Εικόνα 154: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



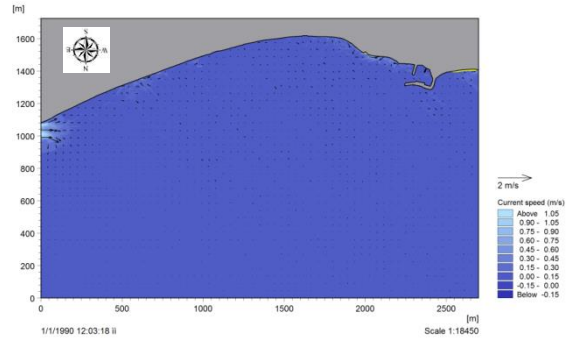
Εικόνα 155: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



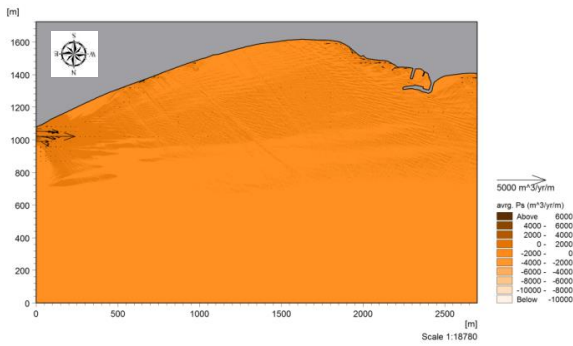
Εικόνα 156: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



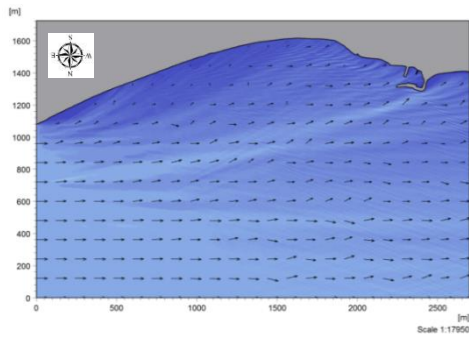
Εικόνα 157: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



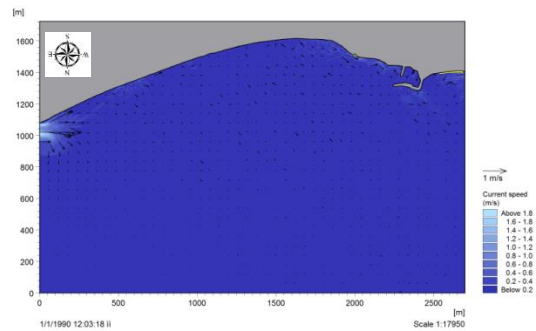
Εικόνα 158: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



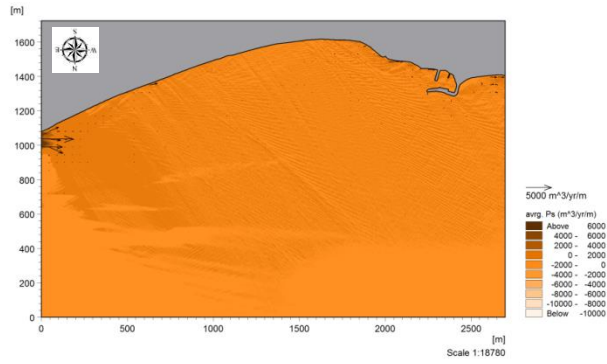
Εικόνα 159: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



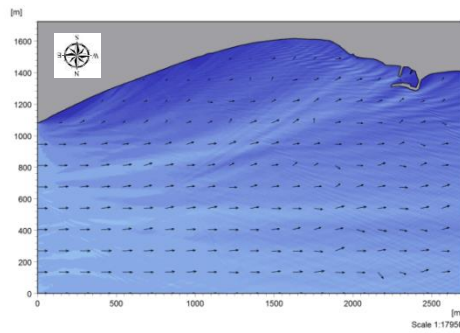
Εικόνα 160: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ



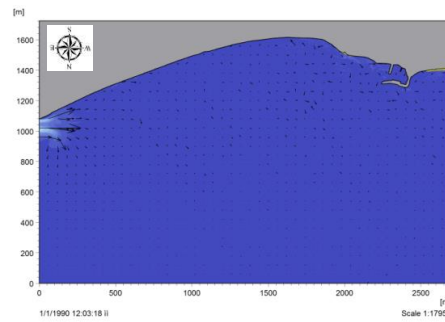
Εικόνα 161: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ



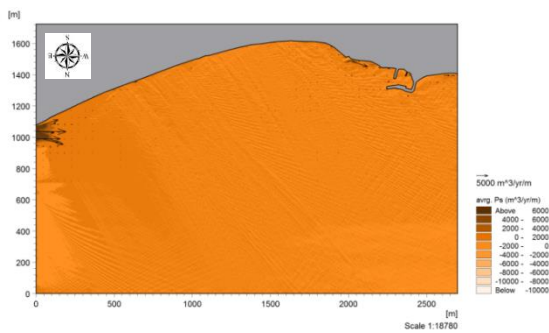
Εικόνα 162: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ



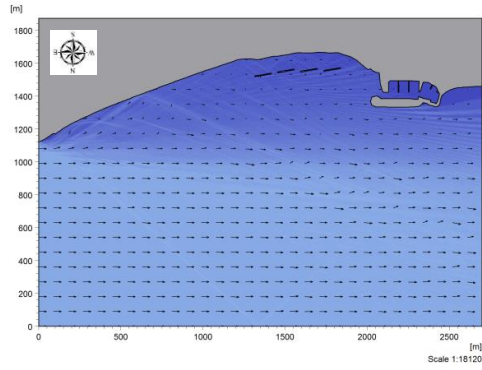
Εικόνα 163: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ



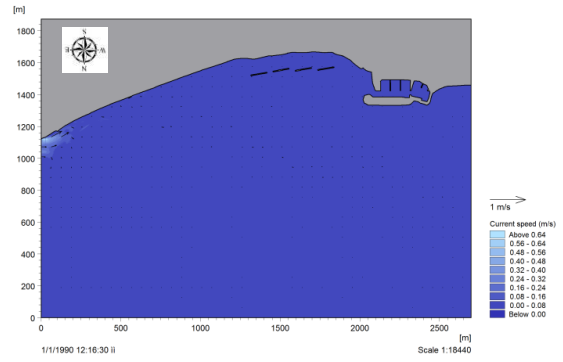
Εικόνα 164: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ



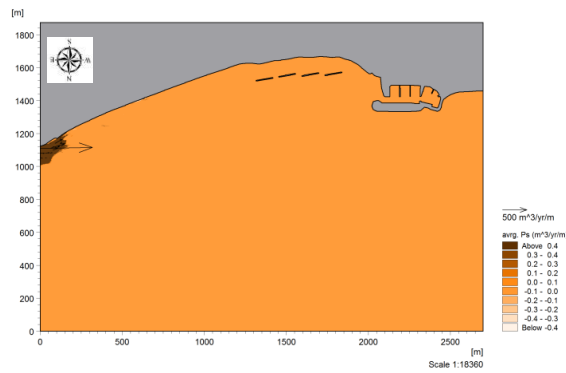
Εικόνα 165: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ



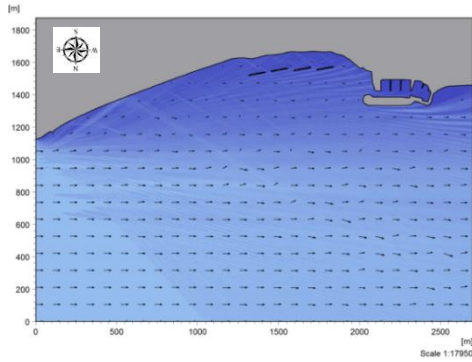
Εικόνα 166: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



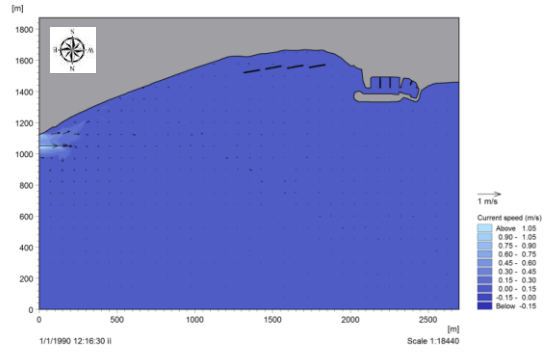
Εικόνα 167: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



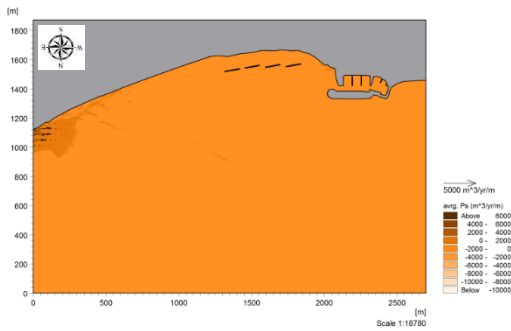
Εικόνα 168: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



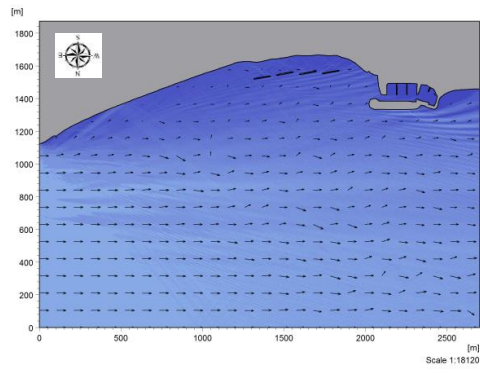
Εικόνα 169: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



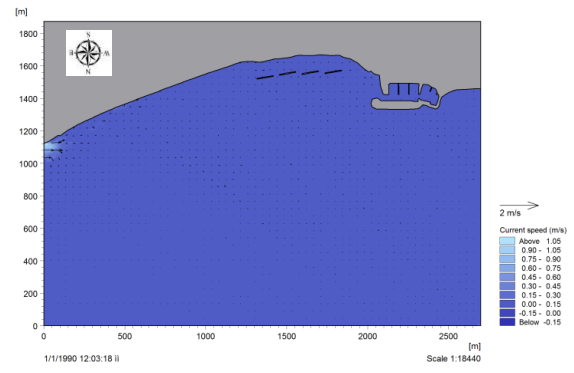
Εικόνα 170: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



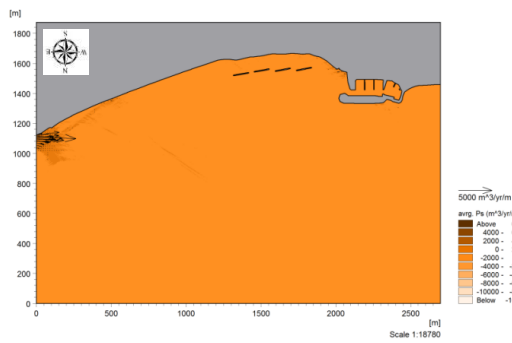
Εικόνα 171: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



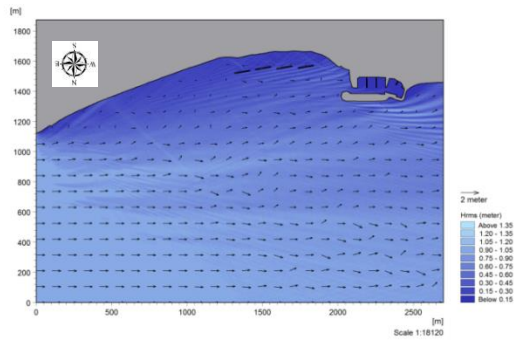
Εικόνα 172: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



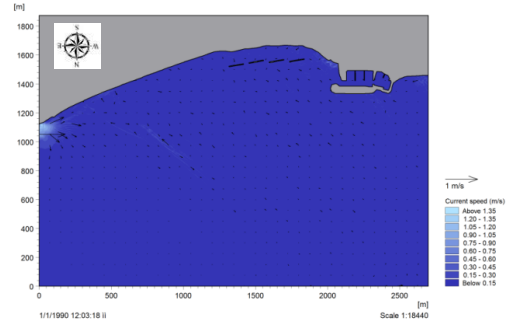
Εικόνα 173: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



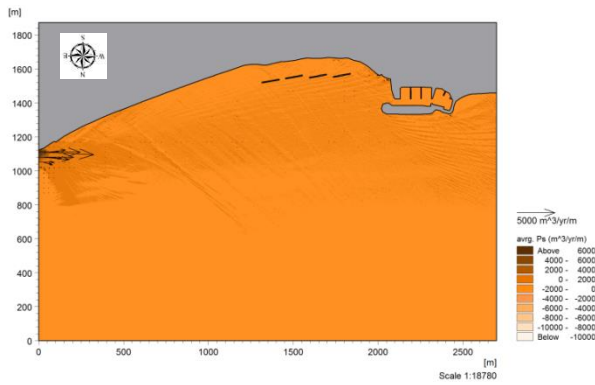
Εικόνα 174: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



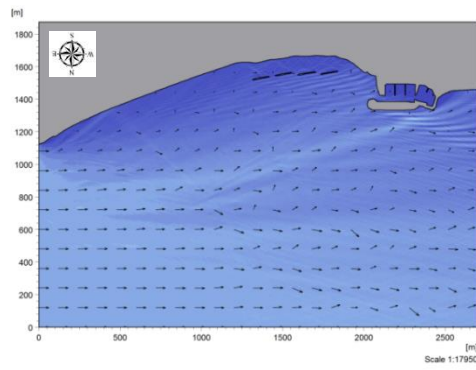
Εικόνα 175: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



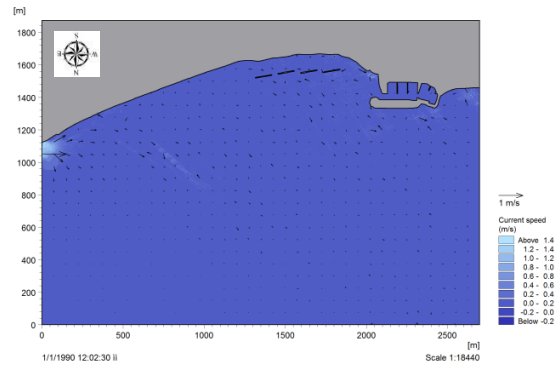
Εικόνα 176: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



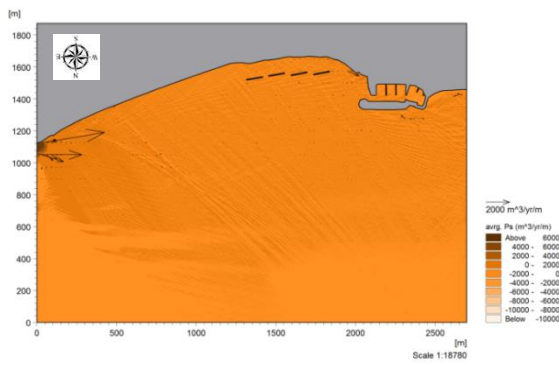
Εικόνα 177: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



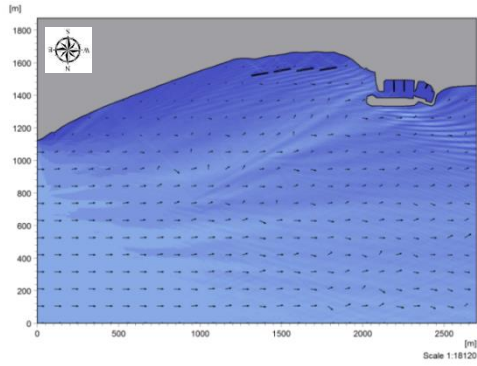
Εικόνα 178: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα



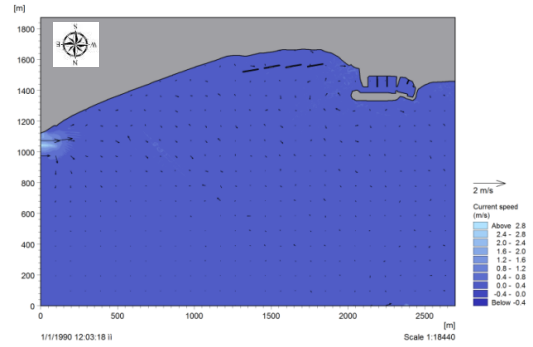
Εικόνα 179: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα



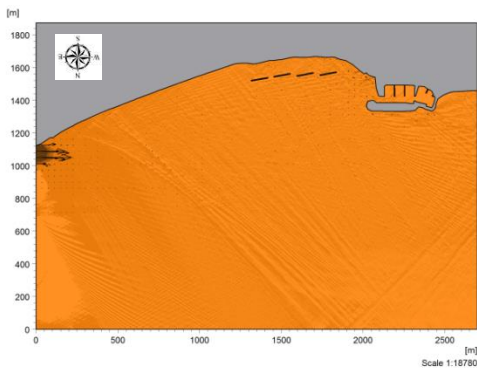
Εικόνα 180: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 9 μποφόρ



Εικόνα 181: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ με τα έργα

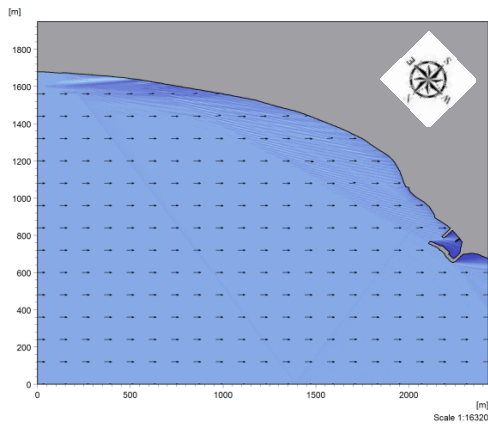


Εικόνα 182: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ με τα έργα

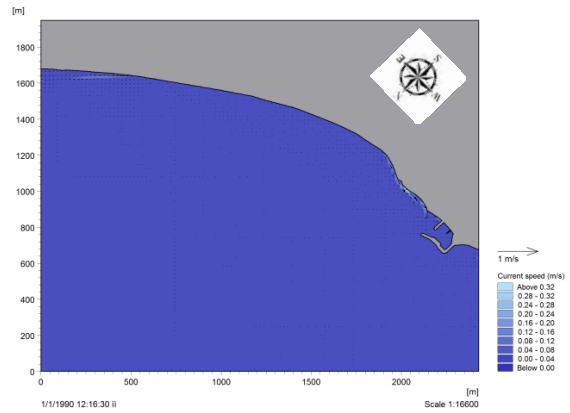


Εικόνα 183: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό άνεμο 10 μποφόρ με τα έργα

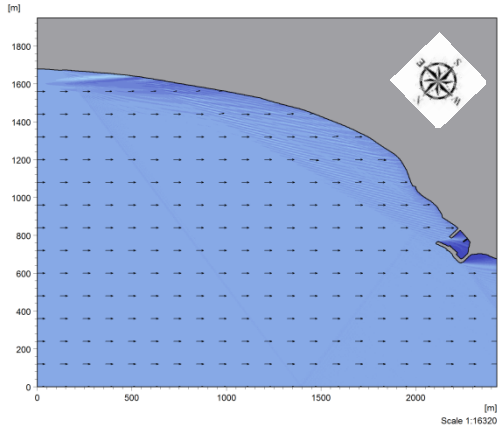
Ανατολική-Βορειοανατολική διεύθυνση



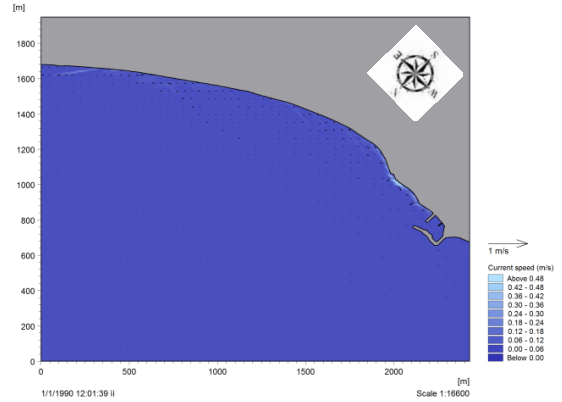
Εικόνα 184: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 3 μποφόρ



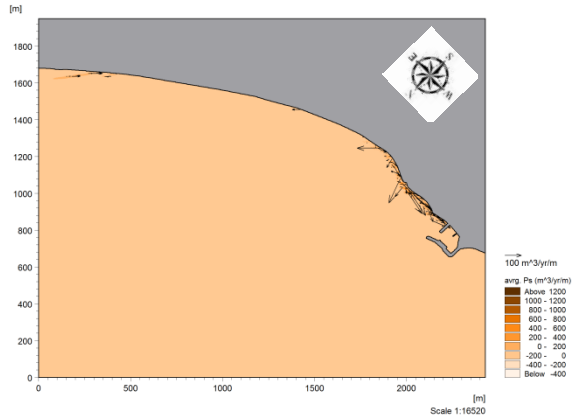
Εικόνα 185: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 3 μποφόρ



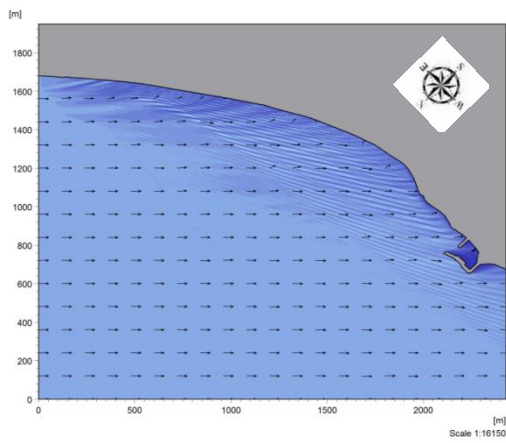
Εικόνα 186: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



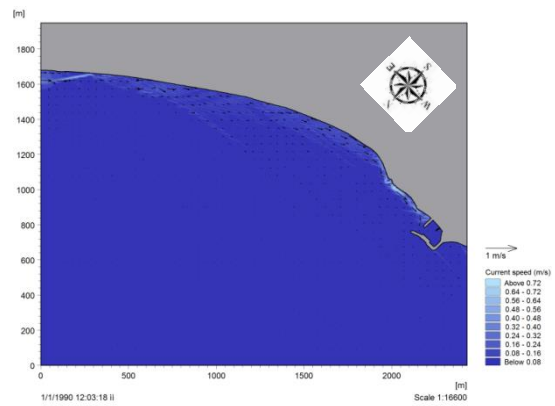
Εικόνα 187: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



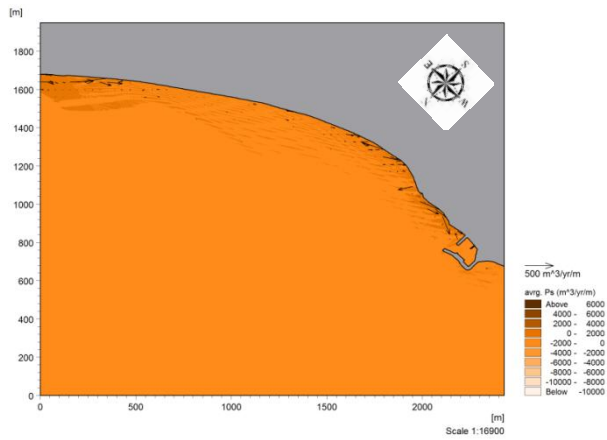
Εικόνα 188: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 4 μποφόρ



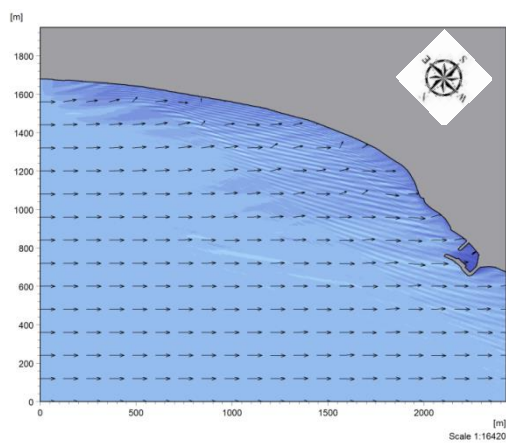
Εικόνα 189: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



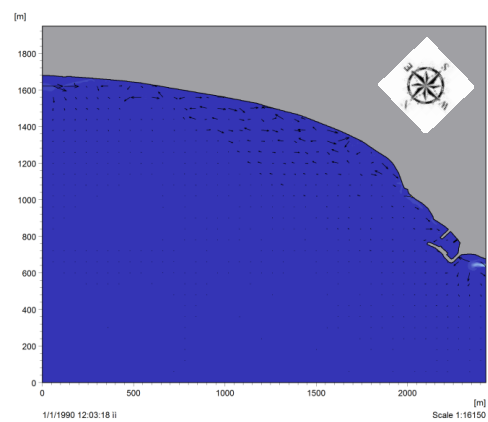
Εικόνα 190: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



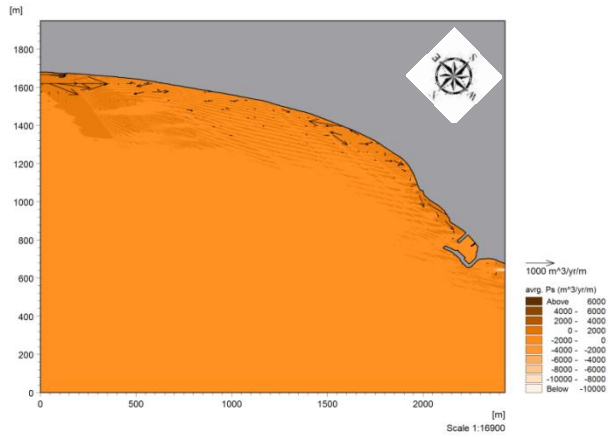
Εικόνα 191: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ



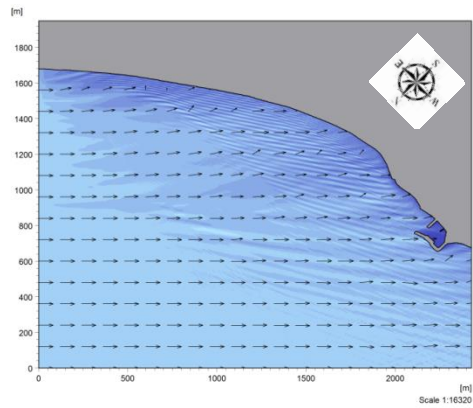
Εικόνα 192: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



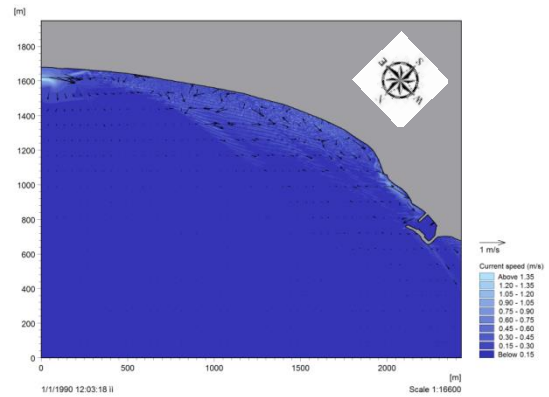
Εικόνα 193: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



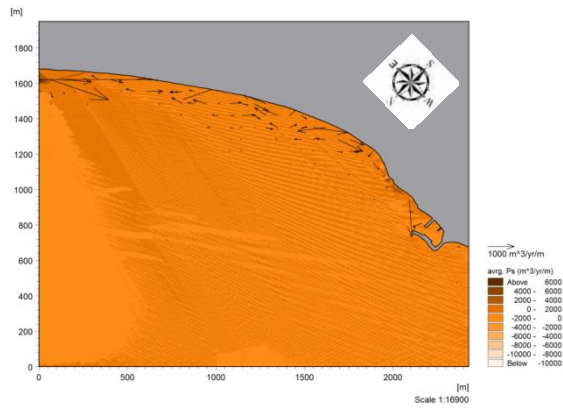
Εικόνα 194: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ



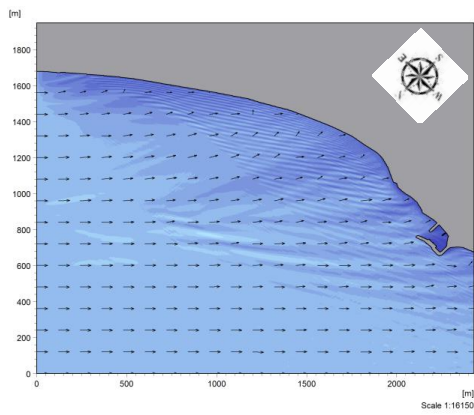
Εικόνα 195: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



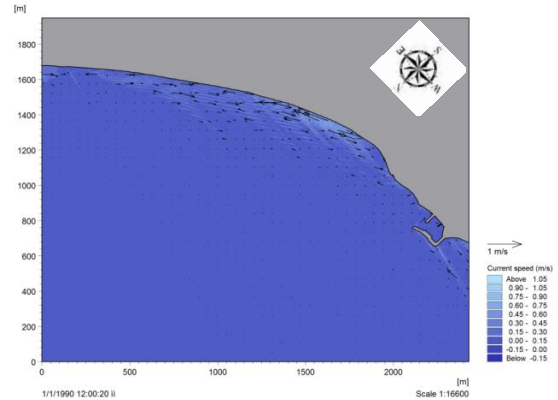
Εικόνα 196: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



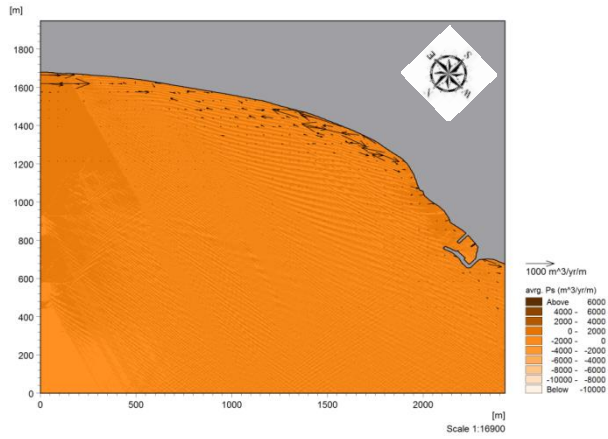
Εικόνα 197: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ



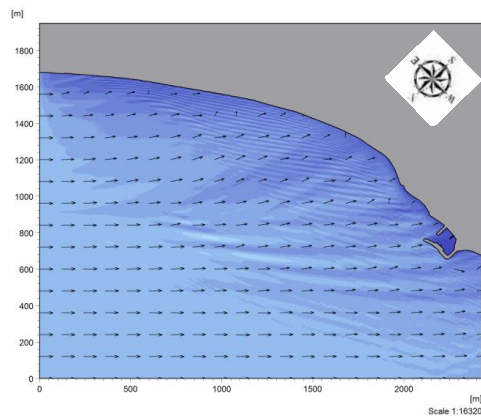
Εικόνα 198: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



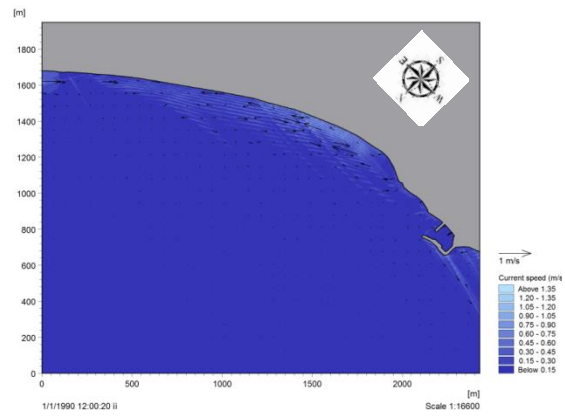
Εικόνα 199: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικο-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



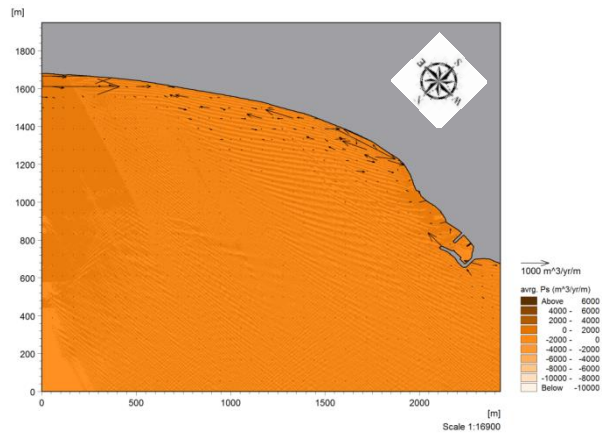
Εικόνα 200: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



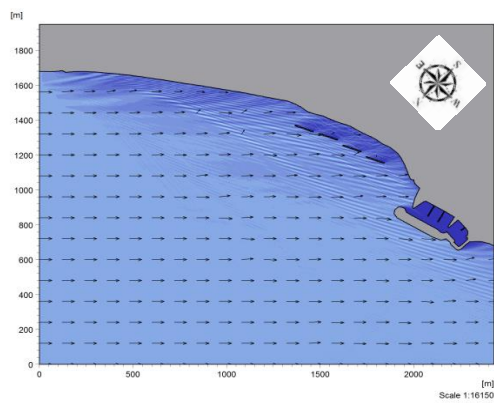
Εικόνα 201: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ



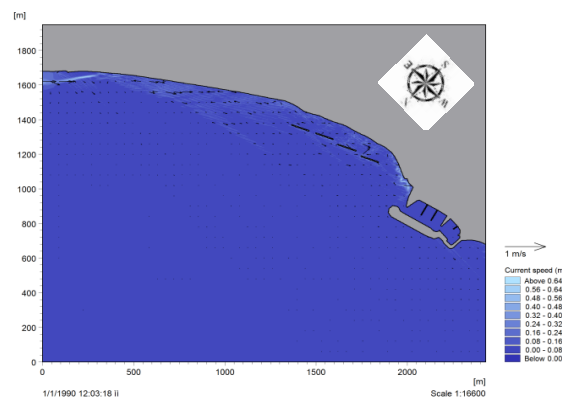
Εικόνα 202: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ



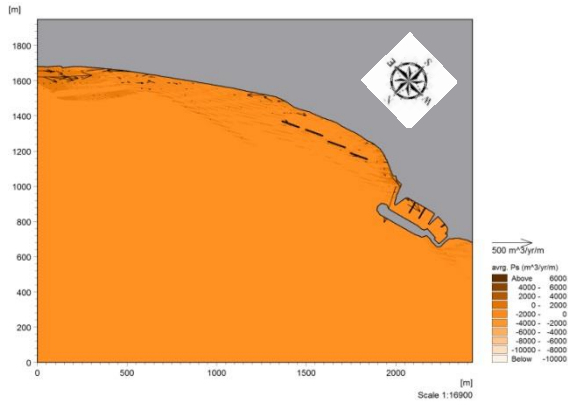
Εικόνα 203: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ



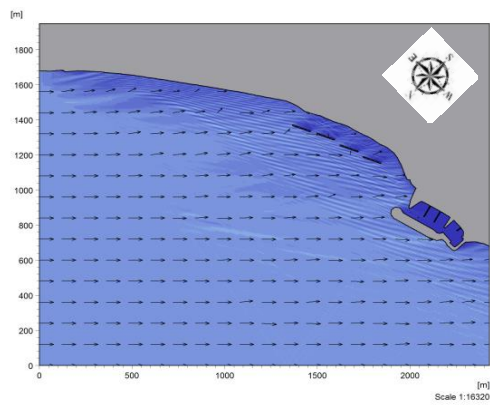
Εικόνα 204: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



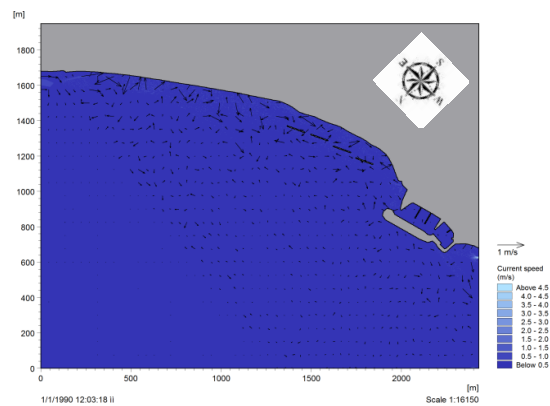
Εικόνα 205: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



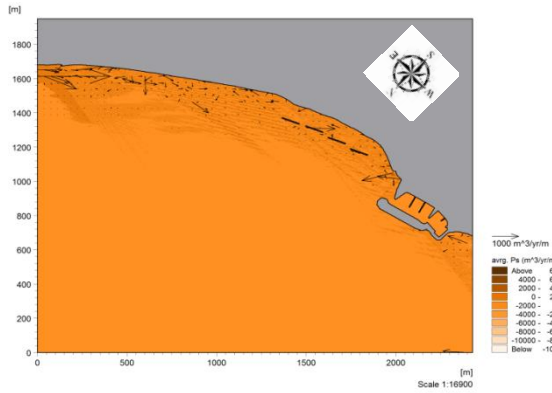
Εικόνα 206: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 5 μποφόρ με τα έργα



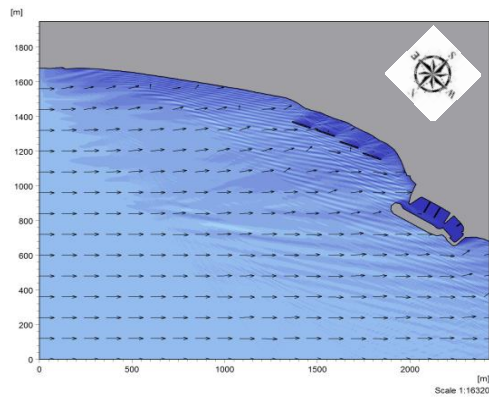
Εικόνα 207: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



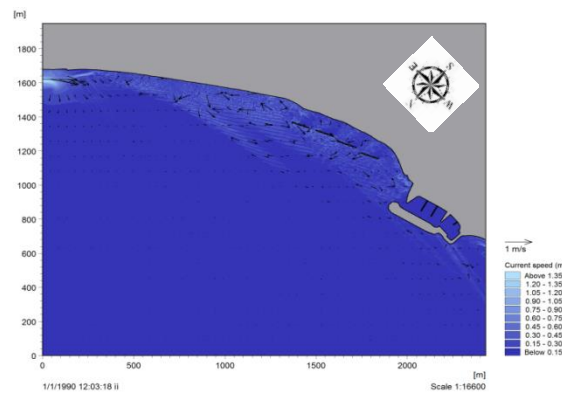
Εικόνα 208: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



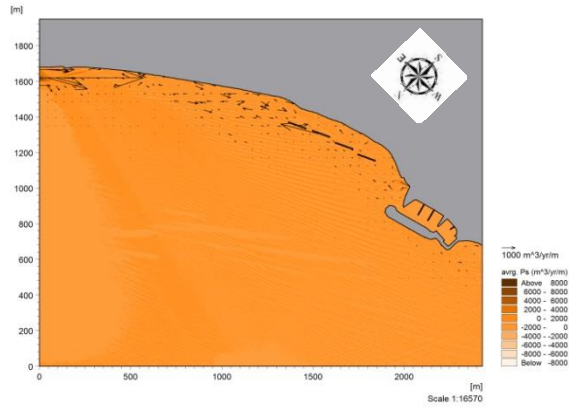
Εικόνα 209: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 6 μποφόρ με τα έργα



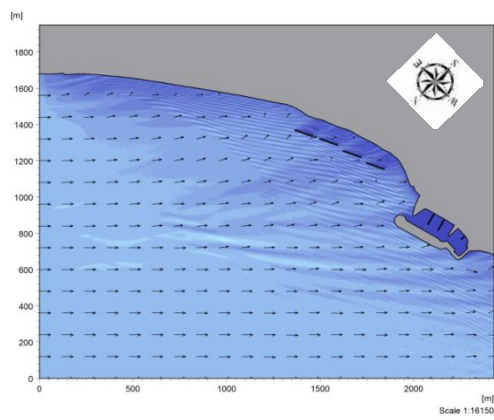
Εικόνα 210: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



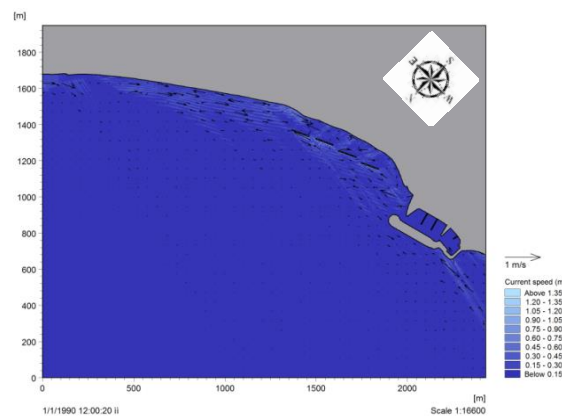
Εικόνα 211: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μποφόρ με τα έργα



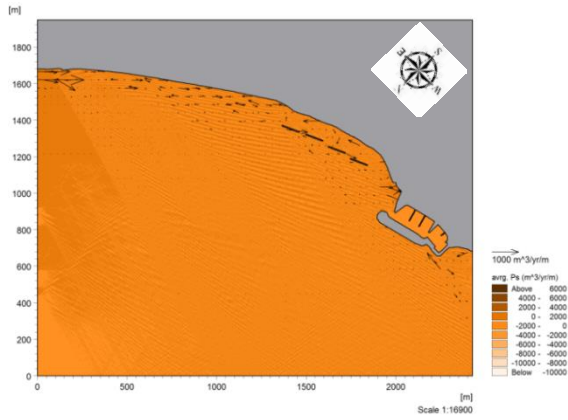
Εικόνα 212: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 7 μπόφόρ με τα έργα



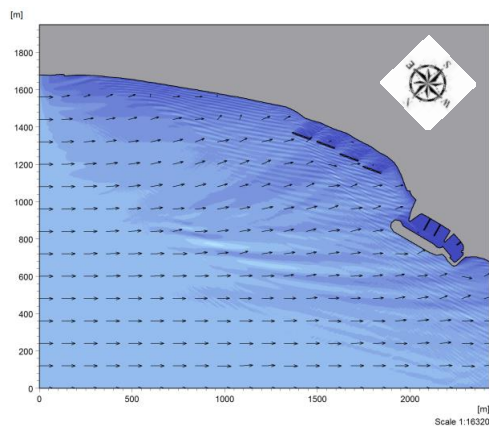
Εικόνα 213: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μπόφόρ με τα έργα



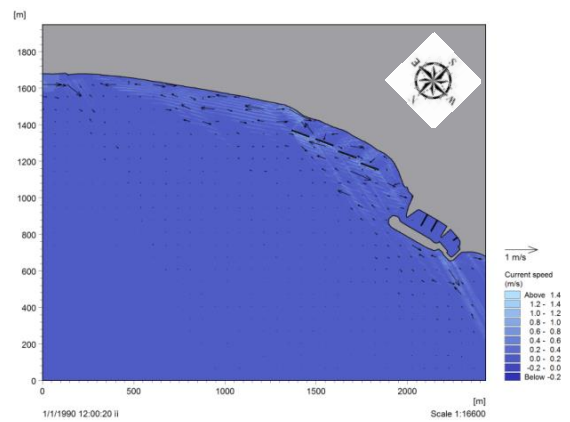
Εικόνα 214: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μπόφόρ με τα έργα



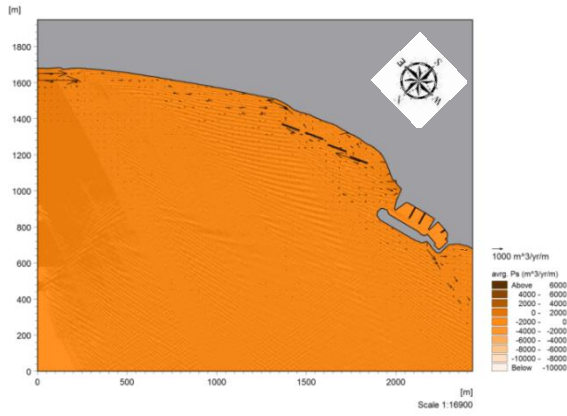
Εικόνα 215: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 8 μποφόρ με τα έργα



Εικόνα 216: Ύψος και διεύθυνση κύματος για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

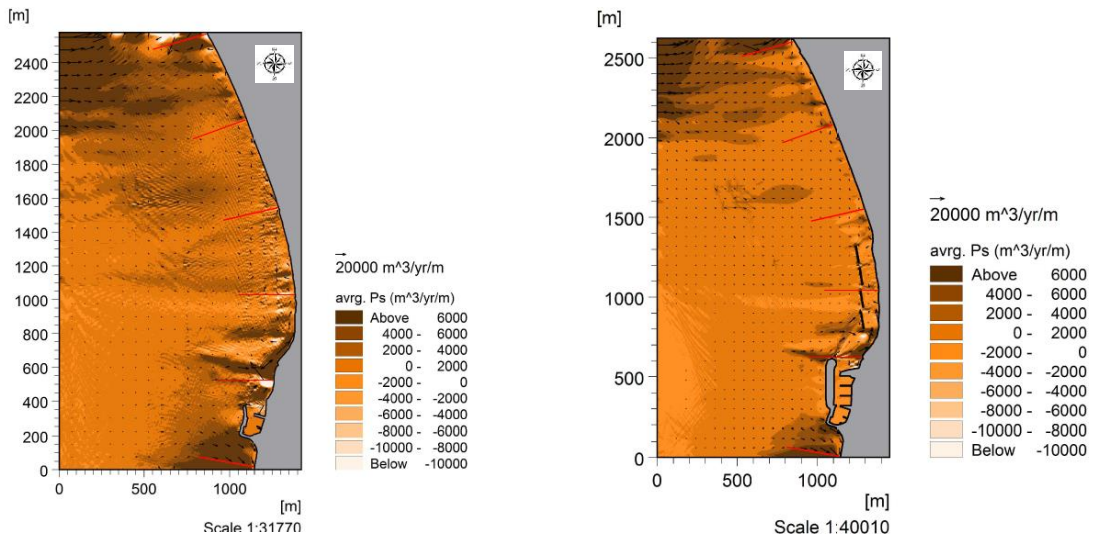


Εικόνα 217: Υδροδυναμικό πεδίο για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

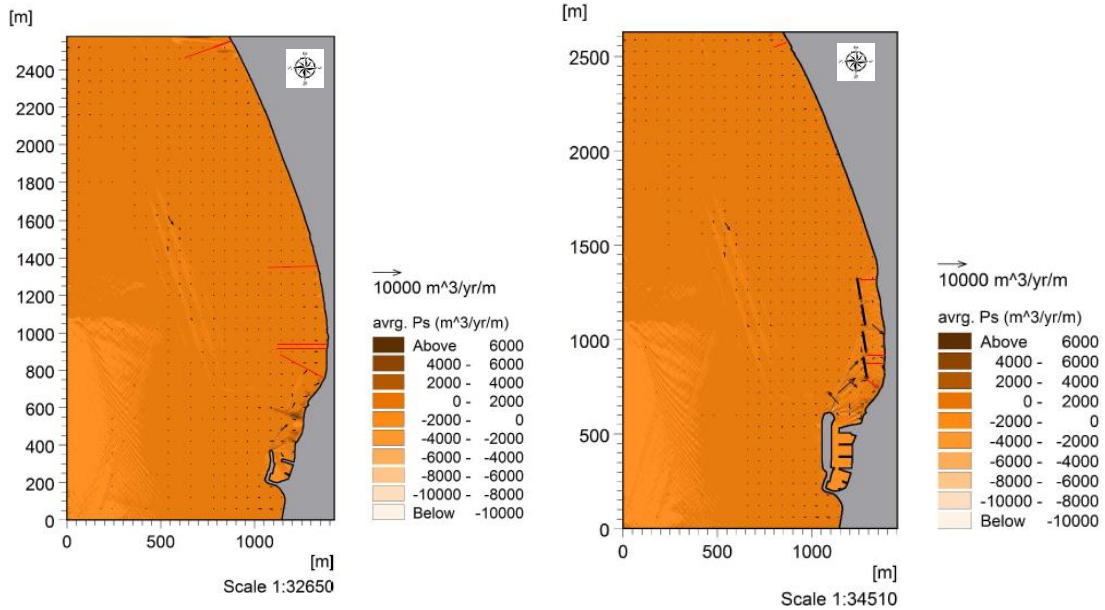


Εικόνα 218: Δυναμικό στερεομεταφοράς για Ανατολικό-Βορειοανατολικό άνεμο 9 μποφόρ με τα έργα

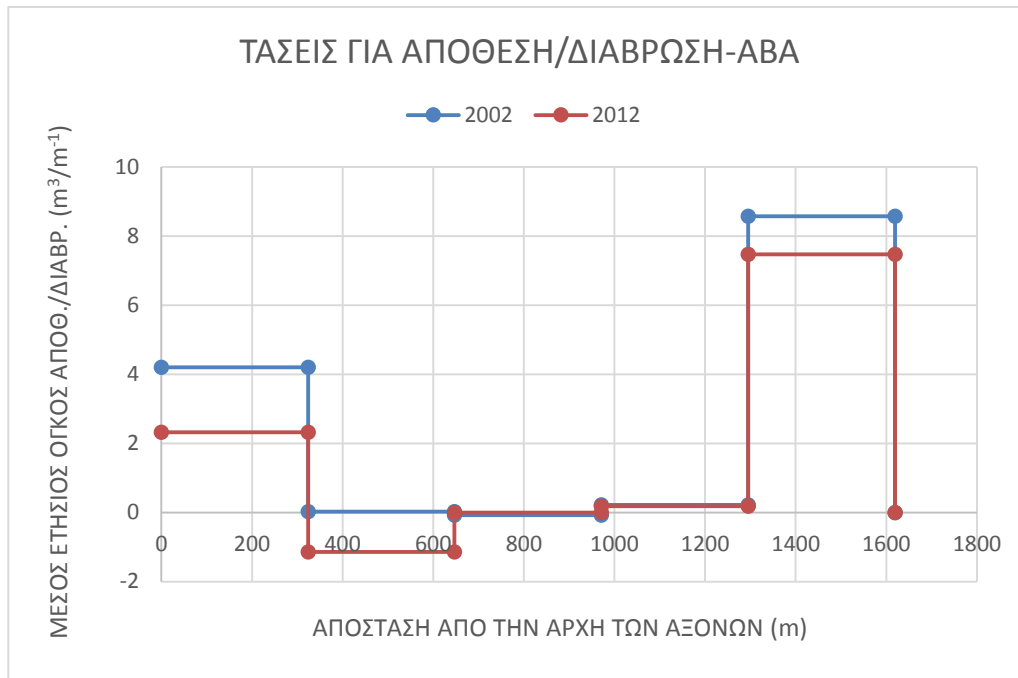
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β



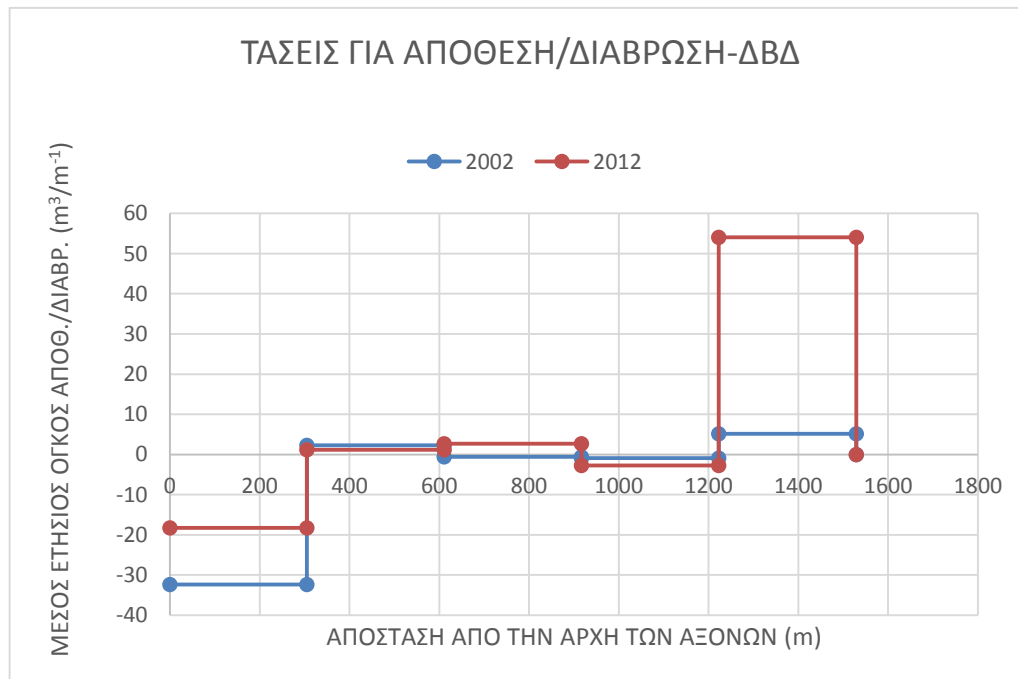
Εικόνα 219 (α), (β): Θέση εγκάρσιων τομών Βόρειας διεύθυνσης



Εικόνα 220 (α), (β): Θέση εγκάρσιων τομών για τη σύγκριση με πραγματικά δεδομένα για τη Βόρεια διεύθυνση



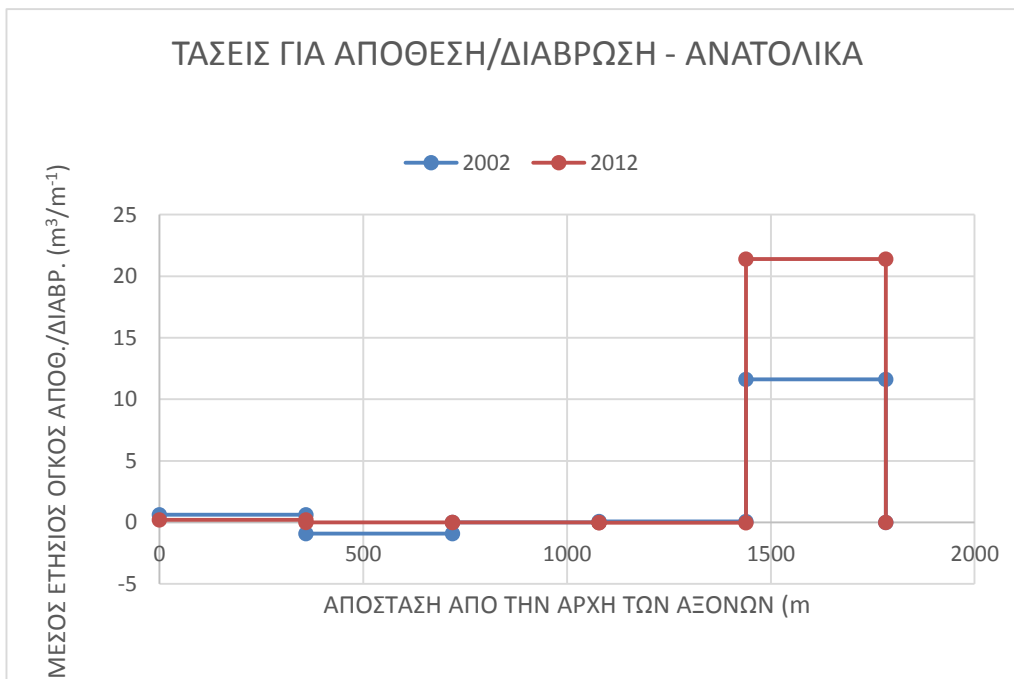
Διάγραμμα 1: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για την Ανατολική-Βορειοανατολική διεύθυνση



Διάγραμμα 2: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για την Δυτική-Βορειοδυτική διεύθυνση



Διάγραμμα 3: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για τη Δυτική διεύθυνση



Διάγραμμα 4: Μέσος ετήσιος όγκος διάβρωσης/απόθεσης για την Ανατολική διεύθυνση

