



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΙ ΚΙΝΗΣΗΣ ΙΖΗΜΑΤΟΣ

ΣΕ ΑΚΤΗ ΤΥΠΟΥ ΘΥΛΑΚΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΓΓΕΛΕΡΟΥ ΠΟΛΥΞΕΝΗ

Επιβλέπουσα : Β. ΤΣΟΥΚΑΛΑ, Επίκουρος Καθηγήτρια

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας συνέβαλαν πολλοί άνθρωποι στους οποίους είμαι ευγνώμων. Κάποιους από αυτούς θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κ. Βασιλική Τσουκαλά για την καθοδήγησή της, χωρίς την οποία η πραγματοποίηση της διπλωματικής θα ήταν αδύνατη.

Δεν υπάρχουν λόγια να ευχαριστήσω τον κ. Μιχάλη Χονδρό για το χρόνο που μου αφιέρωσε και τη συνεισφορά του στην εργασία, καθώς και τον κ. Τάσο Μεταλληνό για τις χρήσιμες συμβουλές του και παρατηρήσεις του. Χάρη σ' αυτούς η εκπόνηση της διπλωματικής ήταν όχι μόνο εποικοδομητική, αλλά και ευχάριστη διαδικασία.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Μιχάλη Καρουζάκη για τις δειγματοληψίες που πραγματοποίησε στην περιοχή μελέτης.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτριά μου Φιλιππίδου Αριάδνη για τις πληροφορίες που μου παρείχε για την περιοχή μελέτης.

Περιεχόμενα

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ | i |
| ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ | iii |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ | x |
| ABSTRACT | xii |
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΘΥΛΑΚΑ | 5 |
| 2.1 Εισαγωγή στις κυματικές και υδροδυναμικές συνθήκες στις ακτές τύπου θύλακα | 3 |
| 2.2 Αποτύπωση Της Περιοχής Μελέτης | 11 |
| 3. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΙΖΗΜΑΤΑ | 15 |
| 3.1 Εισαγωγή | 15 |
| 3.2 Γεωλογικά Χαρακτηριστικά | 17 |
| 4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ | 25 |
| 4.1 Ανεμολογική Δίαιτα | 25 |
| 4.2 Ανάπτυγμα Πελάγους (FETCH) | 26 |
| 4.3 Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Κύματος Στα Βαθεία | 29 |
| 5. ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ | 33 |
| 5.1 Εναρξη Κίνησης Ιζήματος | 35 |
| 5.2 Στερεομεταφορά Κατά Μήκος Της Ακτής | 40 |
| 5.3 Στερεομεταφορά Κάθετα Στην Ακτή | 41 |
| 6. ΕΡΓΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΗΣ | 45 |
| 6.1 Κυματοθραύστες | 45 |
| 6.1.1 Αποσπασμένοι Κυματοθραύστες | 47 |
| 6.1.2 Τοποθέτηση Κυματοθραυστών | 50 |

| | |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 6.2 Διατομές Κυματοθραυστών | 56 |
| 6.2.1 Διαστασιολόγηση Διατομής Κυματοθραύστη..... | 58 |
| 6.2.2 Διαστασιολόγηση Ύφαλων Κυματοθραυστών | 59 |
| 6.3 Προτεινόμενες Διατάξεις Κυματοθραυστών | 61 |
| 6.3.1 Διάταξη Δύο Έξαλων Κυματοθραυστών | 62 |
| 6.3.2 Διάταξη Μεμονωμένου Εξαλου Κυματοθραύστη..... | 69 |
| 6.3.3 Διάταξη Δύο Υφαλων Κυματοθραυστών | 75 |
| 7. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ MIKE..... | 81 |
| 7.1 Κυματικό Μοντέλο PMS..... | 81 |
| 7.1.1 Βασικές Εξισώσεις | 82 |
| 7.1.2 Θραύση Κυματισμών..... | 86 |
| 7.1.3 Τριβή Πυθμένα | 87 |
| 7.1.4 Κυματικές Παράμετροι..... | 88 |
| 7.1.5 Εφαρμογή Μοντέλου | 90 |
| 7.2 Υδροδυναμικό Μοντέλο HD..... | 94 |
| 7.2.1 Θεωρητικές Εξισώσεις Μοντέλου | 95 |
| 7.2.2 Βασικές Παράμετροι Του Μοντέλου | 96 |
| 7.2.3 Εφαρμογή Μοντέλου | 97 |
| 7.3 Μοντέλο Στερεομεταφοράς ST..... | 100 |
| 7.3.1 Θεωρητικές Σχέσεις..... | 101 |
| 7.3.2 Εφαρμογή Μοντέλου | 107 |
| 8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ..... | 111 |
| 8.1 Παρουσίαση Και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων | 111 |
| 8.1.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης PMS..... | 111 |
| 8.1.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης HD | 115 |
| 8.1.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης ST..... | 120 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων | 125 |
| 8.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης Για Τα Τρία Σενάρια Διατάξεων..... | 127 |
| 8.3.1 Αποτελέσματα Για Τη Διάταξη Των Δύο Εξαλων Κυματοθραυστών | 127 |
| 8.3.2 Αποτελέσματα Για Τη Διάταξη Του Μεμονωμένου Κυματοθραύστη..... | 133 |
| 8.3.3 Αποτελέσματα Για Τη Διάταξη Των Δύο Υφαλων Κυματοθραυστών..... | 139 |
| 9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 145 |
| 9.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της στερεομεταφοράς..... | 145 |
| 9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα..... | 145 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... | 149 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α..... | 153 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β..... | 161 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ..... | 169 |

Ευρετήριο πινάκων

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 3.1: Μέση διάμετρος κόκκων όλων των δειγμάτων | 23 |
| Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης..... | 23 |
| Πίνακας 4.1: Πίνακας μέσων ετήσιων συχνοτήτων ανέμου | 26 |
| Πίνακας 4.2: Υπολογισμός ενεργού αναπτύγματος πελάγου (fetch)..... | 29 |
| Πίνακας 4.3: Δυσμενέστερες κυματικές συνθήκες..... | 32 |
| Πίνακας 5.1: Τιμές του θ_c για την υπολογιζόμενη τιμή του D^* | 37 |
| Πίνακας 5.2: Η ταχύτητα ρεύματος ώστε να έχουμε έναρξη κίνησης ιζήματος | 39 |
| Πίνακας 6.1: Συνοπτική αναφορά βασικών χαρακτηριστικών των τριών διατάξεων..... | 62 |
| Πίνακας 6.2:Υπολογισμός βάθους θραύσης κατά Munk και LeMehaute-Koh..... | 63 |
| Πίνακας 6.3: Τιμές συντελεστή στρώσης (K_D) και πλήθους των ογκολίθων (n)..... | 64 |
| Πίνακας 6.4: Παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρακτηριστικών των στρώσεων της διατομής..... | 66 |
| Πίνακας 6.5: Διάγραμμα απόκρισης ακτογραμμής συναρτήσει σχετικού ύψους κύματος $(1-K_t)H_0/D$ (και σχετικού μήκους κύματος L_s/L (πηγή: (Kraus, 2011))..... | 70 |
| Πίνακας 6.6: Μέγιστες τιμές μεταβλητών που επηρεάζουν την απόκριση της ακτογραμμής για τον κυματοθραύστη που προτείνεται..... | 71 |
| Πίνακας 6.7: Συντελεστές στρώσης ύφαλων κυματοθραυστών | 75 |
| Πίνακας 6.8: Στοιχεία ύφαλου κυματοθραύστη και υπολογιζόμενος συντελεστή μετάδοσης | 76 |
| Πίνακας 6.9: Πίνακα υπολογισμού μέγιστου μήκους ύφαλου κυματοθραύστη για salient | 77 |
| Πίνακας 6.10: Στοιχεία στρώσης θωράκισης διατομής ύφαλου κυματοθραύστη..... | 77 |
| Πίνακας 7.1: Τιμές συντελεστών β_1, β_2 και β_3 | 86 |
| Πίνακας 8.1: Κυματικά σενάρια | 111 |

Ευρετήριο Σχημάτων

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Σχήμα 2.1: Κυματικές ακτίνες διάθλασης | 7 |
| Σχήμα 2.2: Φαινόμενο περίθλασης μονοχρωματικού κύματος σε ημί-άπειρο λιμενοβραχίονα (πηγή: CEM-II-7,2008)) | 8 |
| Σχήμα 2.3:Μορφή ρευμάτων στην ακτή (πηγή:CEM-II-7,2008))..... | 10 |
| Σχήμα 2.4: Όρμος Αγίας Πελαγίας, κλίμακα χάρτη 1:50.000 (πηγή: εργαστήριο λιμενικών έργων)..... | 12 |
| Σχήμα 2.5: Όρμος Αγίας Πελαγίας, κλίμακα χάρτη 1:100.000 (πηγή: εργαστήριο λιμενικών έργων)..... | 12 |
| Σχήμα 2.6: Τοπογραφικό όρμου Αγίας Πελαγίας | 14 |
| Σχήμα 3.1: Θέσεις δειγματοληψίας ιζήματος | 19 |
| Σχήμα 3.2: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Α3 | 22 |
| Σχήμα 4.1: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους Ανατολικού ανέμου | 27 |
| Σχήμα 4.2: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους Βόρειου ανέμου | 28 |
| Σχήμα 4.3: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους Βορειοανατολικού ανέμου | 28 |
| Σχήμα 5.1: Δευτερογενές ρεύμα εγκάρσια στην ακτή και μεταφορά φερτών (Καραμπάς, 2004)..... | 35 |
| Σχήμα 5.2: Έναρξη κίνησης ιζήματος (Κουτιτάς ,1998)..... | 36 |
| Σχήμα 5.3: Χειμερινό προφίλ –διάβρωση (κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας) (Καραμπάς, 2004)..... | 43 |
| Σχήμα 5.4: Θερινό προφίλ- πρόσχωση (κυματισμοί μικρής καμπυλότητας) (Καραμπάς, 2004)..... | 43 |
| Σχήμα 6.1:Τύποι κυματοθραυστών ως προς την απόσταση από την ακτογραμμή (πηγή: (Magnor, 2013))..... | 49 |
| Σχήμα 6.2: Σχηματική απεικόνιση των μεγεθών που αναφέρθηκαν (πηγή: (CEM-V-3, 2008))..... | 50 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 6.3: Μορφές salient και tombolo (πηγή: (Magnor, 2013)) | 51 |
| Σχήμα 6.4: Συσχέτιση των αδιάστατων λόγων L_s/L_g και Y/d_s από έργα παράκτιων κυματοθραυστών (πηγή: CEM-V-3,2008) | 53 |
| Σχήμα 6.5: Τυπικές διατομές κυματοθραύστη με κεκλιμένο ή κατακόρυφο μέτωπο | 56 |
| Σχήμα 6.6: Τυπική διατομή κυματοθραύστη με κεκλιμένα πρανή (πηγή:CEM) | 57 |
| Σχήμα 6.7: Κυματοθραύστης με αναμορφώσιμο πρανές..... | 58 |
| Σχήμα 6.8: Ύψη κύματος στην περιοχή μελέτης για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7 beaufort,..... | 63 |
| Σχήμα 6.9:Οριζοντιογραφία της διάταξης δύο έξαλων κυματοθραυστων | 68 |
| Σχήμα 6.10: Έξαλος κυματοθραύστης | 68 |
| Σχήμα 6.11: Οριζοντιογραφία μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη | 73 |
| Σχήμα 6.12: Μεμονωμένος έξαλος κυματοθραύστης | 73 |
| Σχήμα 6.13: Οριζοντιογραφία δύο ύφαλων κυματοθραυστών..... | 79 |
| Σχήμα 6.14: Ύφαλος κυματοθραύστης..... | 79 |
| Σχήμα 7.1: Βαθυμετρία για τον ανατολικό άνεμο | 91 |
| Σχήμα 7.2: Βαθυμετρία για τον βόρειο άνεμο..... | 91 |
| Σχήμα 7.3:Βαθυμετρία για τον βορειοανατολικό άνεμο..... | 92 |
| Σχήμα 8.1: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 9bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=5.05m$ και $T=8.9sec$ | 112 |
| Σχήμα 8.2: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$ | 113 |
| Σχήμα 8.3: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ | 114 |
| Σχήμα 8.4: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 9bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=5.05m$ και $T=8.907sec$ | 116 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 8.5: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33\text{m}$ και $T=6.048\text{sec}$ | 117 |
| Σχήμα 8.6: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ | 118 |
| Σχήμα 8.7: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βορειοανατολικό άνεμο των 5bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1.508\text{m}$ και $T=4.921\text{sec}$ | 119 |
| Σχήμα 8.8: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βόρειο άνεμο των 9bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=5.05\text{m}$ και $T=8.9\text{sec}$ | 120 |
| Σχήμα 8.9: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ | 121 |
| Σχήμα 8.10: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 5bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1.508\text{m}$ και $T=4.921\text{sec}$ | 122 |
| Σχήμα 8.11: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ | 123 |
| Σχήμα 8.12: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33\text{m}$ και $T=6.048\text{sec}$ με την διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών | 128 |
| Σχήμα 8.13: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών..... | 129 |
| Σχήμα 8.14: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών.. | 130 |
| | |
| Σχήμα 8.15: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.81\text{sec}$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών | 131 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 8.16: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών | 132 |
| Σχήμα 8.17: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών | 133 |
| Σχήμα 8.18: Αποτελέσματα PMS για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη..... | 134 |
| Σχήμα 8.19: Αποτελέσματα PMS για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη | 135 |
| Σχήμα 8.20: Αποτελέσματα HD για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη..... | 136 |
| Σχήμα 8.21: Αποτελέσματα HD για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη..... | 137 |
| Σχήμα 8.22: Αποτελέσματα ST για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη..... | 138 |
| Σχήμα 8.23: Αποτελέσματα ST για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη..... | 139 |
| Σχήμα 8.24: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών | 140 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα 8.25: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών | 140 |
| Σχήμα 8.26: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών..... | 141 |
| Σχήμα 8.27: Υδροδυναμικό πεδί για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών .. | 142 |
| Σχήμα 8.28: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ | 143 |
| Σχήμα 8.29: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών | 144 |
| Σχήμα A. 1 : Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειοανατολικό άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,508m$ και $T=4,921sec$ | 153 |
| Σχήμα A. 2: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειοανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,177m$ και $T=5,894sec$ | 154 |
| Σχήμα A. 3: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειοανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,177m$ και $T=5,894sec$ | 154 |
| Σχήμα A. 4: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,601m$ και $T=5,079sec$ | 155 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα A. 5: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,601m$ και $T=5,079sec$ | 155 |
| Σχήμα A. 6: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,33m$ και $T=6,104sec$ | 156 |
| Σχήμα A. 7 : Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,33m$ και $T=6,104sec$ | 156 |
| Σχήμα A. 8: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 7 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=3,15m$ και $T=7,078sec$ | 157 |
| Σχήμα A. 9: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 7 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=3,15m$ και $T=7,078sec$ | 157 |
| Σχήμα A. 10: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 8 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=4,061m$ και $T=8,013sec$ | 158 |
| Σχήμα A. 11: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 8 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=4,061m$ και $T=8,013sec$ | 158 |
| Σχήμα A. 12: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,234m$ και $T=4,435sec$ | 159 |
| Σχήμα A. 13: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,234m$ και $T=4,435sec$ | 159 |
| Σχήμα A. 14: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,7512m$ και $T=5,263sec$ | 160 |
| Σχήμα A. 15: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,7512m$ και $T=5,263sec$ | 160 |
| Σχήμα B. 1: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου A1 | 161 |
| Σχήμα B. 2: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου A2 | 161 |
| Σχήμα B. 3: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου B1 | 162 |
| Σχήμα B. 4: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου B2 | 162 |

| | |
|----------------------------------------------------|-----|
| Σχήμα Β. 5: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Β3 | 163 |
| Σχήμα Β. 6: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Γ1 | 163 |
| Σχήμα Β. 7: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Γ2 | 164 |
| Σχήμα Β. 8: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Γ3 | 164 |
| Σχήμα Β. 9: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Δ1 | 165 |
| Σχήμα Β. 10: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Δ2 | 165 |
| Σχήμα Β. 11: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Δ3 | 166 |
| Σχήμα Β. 12: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Ε1 | 166 |
| Σχήμα Β. 13: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Ε2 | 167 |
| Σχήμα Β. 14: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Ε3 | 167 |
| Σχήμα Γ. 1: Εικόνα από θέση Ε1 | 169 |
| Σχήμα Γ. 2: Εικόνα από θέση Ε2 | 169 |
| Σχήμα Γ. 3: Εικόνα από θέση Γ1 | 170 |
| Σχήμα Γ. 4: Εικόνα από θέση Δ1 | 170 |

Περίληψη

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η ακτή τύπου θύλακα. Αφορά τη διερεύνηση των δυναμικών συνθηκών που επικρατούν σε τέτοιου τύπου ακτές και την τοποθέτηση έργων προστασίας ακτής, συγκεκριμένα κυματοθραυστών, με στόχο τη βελτιστοποίηση της διάταξης αυτών. Η περιοχή εφαρμογής είναι ο όρμος της Αγίας Πελαγίας του νομού Ηρακλείου Κρήτης..

Για την ακριβέστερη προσομοίωση των δυναμικών συνθηκών και συγκεκριμένα των συνθηκών στερεομεταφοράς, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του ιζήματος της περιοχής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες από δεκαπέντε σημεία της ακτής. Οι δειγματοληψίες έγιναν σε πέντε εγκάρσιες διατομές της ακτής, οι οποίες τοποθετούνται ώστε να υπάρχουν δείγματα σε όλο το μήκος της ακτής. Για τα δείγματα αυτά πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση στο εργαστήριο και σχεδιάστηκαν οι κοκκομετρικές καμπύλες. Έτσι, εκτιμήθηκαν τα χαρακτηριστικά του ιζήματος, ως η μέση τιμή των χαρακτηριστικών των δειγμάτων που κρίθηκαν κατάλληλα να το περιγράψουν. Ιδιαίτερα, τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τη μέση διάμετρο των κόκκων του υλικού ($D_{50}=2,11\text{mm}$) και τη γεωμετρική τυπική απόκλιση ($\sigma_g= 1,95$).

Τα ανεμολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό της ΕΜΥ, εκείνον του Ηρακλείου, περιλαμβάνουν τις μέσες ποσοστιαίες μηνιαίες συχνότητες εμφάνισης ανέμου. Για τον προσδιορισμό του κυματικού κλίματος στα ανοιχτά, χρησιμοποιήθηκαν οι ετήσιες συχνότητες που προέκυψαν από τα δεδομένα. Η περιοχή επηρεάζεται από βόρειους, βορειοανατολικούς και ανατολικούς ανέμους. Για την πρόγνωση των ανεμογενών κυματισμών στα βαθιά, εφαρμόστηκε η μέθοδος SMB, αφού προηγήθηκε ο υπολογισμός του ενεργού αναπτύγματος πελάγους. Από τη μέθοδο SMB υπολογίσθηκαν η περίοδος αιχμής φάσματος (T_p) και το σημαντικό ύψος κύματος (H_{m0}) για τους ανέμους κάθε διεύθυνσης, για συνθήκες time-limited και fetch-limited. Για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμογενείς κυματισμοί που προέκυψαν για συνθήκες fetch-limited, καθώς ήταν δυσμενέστεροι. Από αυτούς κρίθηκαν ικανοί να περιγράψουν το κυματικό κλίμα της περιοχής οι άνεμοι των 5 έως 9 beaufort κάθε διεύθυνσης. Έτσι προέκυψαν 11 κυματικά σενάρια.

Για τον προσδιορισμό των δυναμικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε προσομοίωση με το πρόγραμμα MIKE 21 και συγκεκριμένα με τα μοντέλα Parabolic Mild-Slope (PMS), Hydrodynamic (HD) και Non-Cohesive Siment Transport (ST). Για τα 11 κυματικά σενάρια διεξήχθησαν το κυματικό και το υδροδυναμικό μοντέλο. Ύστερα από αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγιναν προσομοιώσεις στερεομεταφοράς για τέσσερα από τα κυματικά σενάρια. Τα σενάρια αυτά είναι οι δυσμενέστεροι κυματισμοί κάθε διεύθυνσης οι ανεμογενείς κυματισμοί των 9bf, 7bf και 7bf του Βόρειου, Βορειοανατολικού και Ανατολικού ανέμου αντίστοιχα. Καθώς και για τον άνεμο των 4bf του Βορειοανατολικού ανέμου επειδή παρουσίασε ιδιαίτερες υδροδυναμικές συνθήκες. Στα τρία πρώτα σενάρια, τα οποία ήταν δυσμενέστερα, βασίσθηκε ο σχεδιασμός των έργων και η βελτιστοποίηση της διάταξής τους.

Ως έργο αναπλήρωσης ακτής επιλέχθηκε ο κυματοθραύστης, εφόσον εκτιμήθηκε ικανός τύπος έργου για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ακτής. Με σκοπό τη βελτιστοποίηση της διάταξης κυματοθραυστών εξετάστηκαν τρία σενάρια διατάξεων. Το πρώτο περιλαμβάνει τη τοποθέτηση δύο έξαλων αποσπασμένων κυματοθραυστών, το δεύτερο τη τοποθέτηση ενός έξαλου κυματοθραύστη, ισοδύναμου μήκους με το σύστημα των δύο έξαλων κυματοθραυστών. Τέλος, το τρίτο αφορά δύο ύφαλους κυματοθραύστες ίδιου μήκους με τους έξαλους του πρώτου σεναρίου.

Για τις τρεις διατάξεις πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για τη περιγραφή των δυναμικών συνθηκών που εμφανίζονται στη περιοχή, μετά την τοποθέτηση των έργων. Από τις τρεις διατάξεις, βέλτιστη ως προς τη μείωση της δράσης των κυματισμών και την εξασθένιση της κίνησης των ιζημάτων προς τα βαθιά, προέκυψε ότι είναι η πρώτη διάταξη των δύο έξαλων κυματοθραυστών.

Abstract

This diploma thesis is focused on the “pocket beach”. The purpose of this study was to investigate the prevailing dynamic conditions in this kind of coasts of interest and to examine the optimal location of the coastal shore protection structures, breakwaters in particular. The region of study is the haven of Agia Pelagia in the municipality of Heraklion, Crete.

In order to thoroughly simulate the dynamic and transport conditions, the determination of the sediment of the area was essential. Therefore samples were taken from fifteen different parts of the coast. The samplings occurred in five sections of the coast. The grain size distribution of the samples resulted in the grain size curves. This analysis indicated the characteristics of the sediment such as the average diameter of the grain ($D=2,11\text{mm}$) and the standard deviation ($\sigma_g=1,95$).

The wind data that were obtained from the nearest weather station of HNMS in Heraklion, provided the average frequencies as percentage occurrence for every month. The annual frequencies that resulted from the data were used to identify the wave diet (climate) in deep water. The area is affected by north, northeast and east winds. The effective fetch length was estimated and the SMB method was applied to predict the wind-driven waves in deep water. The peak period T_p and the energy-based significant wave height H_{m0} were calculated for winds of every direction, for both time-limited and fetch-limited conditions. The wind-driven waves for fetch-limited conditions were less favourable and were used to determine the hydrodynamic conditions. It was deemed that the wave climate of the region can be described by winds of every direction that could rank 5 to 9 on the Beaufort scale. The outcome was eleven wave scenarios.

The program MIKE 21 and specifically the models Parabolic Mild-Slope (PMS), Hydrodynamic (HD) and Non-Cohesive Siment Transport (ST) were used to simulate the dynamic conditions. The PMS and HD model run for all eleven wave scenarios. The results were evaluated and the ST model run for four of these scenarios. Those were the wind-driven waves of the north, northeast and east wind that blows at force 9bf, 7bf and 7bf respectively. The waves of the northeast wind that blows at force 4bf, also presented

interesting hydrodynamic conditions. The design of the structures was based on the first three scenarios which are more unfavourable.

The breakwater was found the more suitable structure as part of the coastal defense. Three options were examined for the optimal placement of the structures. The first includes two segmented detached breakwaters and the second involves a single detached breakwater equivalently long. The third scenario includes two submerged breakwaters as long as the two segmented detached breakwaters.

Simulations were made for all three scenarios in order to assess the dynamic conditions of the area after the installation of the breakwaters. The results of the study revealed that the installation of the two segmented detached breakwaters is the optimum because it reduces the effects of wave action and debilitates the sediment transport.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για το σχεδιασμό λιμενικών και ακτομηχανικών έργων είναι απαραίτητη η γνώση του υδροδυναμικού πεδίου στην περιοχή μελέτης, έτσι ώστε να υπολογιστούν οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά καθώς και για την εκτίμηση μιας σειράς φαινομένων όπως η υπερπήδηση, η στερεομεταφορά κ.α. Κατά τα τελευταία χρόνια έχουν καταστρωθεί πολλές αριθμητικές σχέσεις για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών στα ρηχά νερά παίρνοντας υπόψη φαινόμενα όπως ρήχωση, διάθλαση, περίθλαση και θραύση. Βασιζόμενοι σε αυτές, ερευνητές εξήγαγαν σχέσεις για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής και εγκάρσια αυτής. Παρ' όλ' αυτά οι περισσότερες έρευνες βασίστηκαν στην παραδοχή μίας ακτής με ευθύγραμμες και παράλληλες ισοβαθείς. Η δημοφιλής εικόνα μιας επιμήκου, ευθείας ακτής με άμμο, βλάστηση, αμμόλοφους, και ήπια κλίση όπου εμφανίζονται θραυόμενοι κυματισμοί τύπου εκτινάξεως, μπορεί να είναι η ιδανική εικόνα της ζώνης όπου η γη συναντά τη θάλασσα, αλλά δεν είναι ο κανόνας κατά το μεγαλύτερο ποσοστό των ακτών.

Αντίθετα, συνηθισμένες εικόνες είναι οι ακτές τύπου θύλακα (rocket). Ακτές τύπου θύλακα ονομάζονται οι ακτές που βρίσκονται μεταξύ δύο απόκρημνων ακρωτηρίων και ταυτόχρονα οι ισοβαθείς συνήθως σχηματίζουν καμπύλη μορφή. Τα ρεύματα που αναπτύσσονται δεν είναι προκαθορισμένης και σαφώς ορισμένης διεύθυνσης. Είναι δυνατόν μάλιστα να εμφανιστούν ρεύματα κατά μήκος της ακτής, αντίφορα στο εσωτερικό του κόλπου, όπου η συμβολή τους σχηματίζει ένα εξερχόμενο κάθετο ρεύμα στην ακτή (βελοειδές ρεύμα). Σε αυτές τις περιπτώσεις η εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων μπορεί να δώσει αποτελέσματα μόνο προσεγγιστικά και ο υπολογισμός της στερεοπαροχής και συνεπώς ο σχεδιασμός ακτομηχανικών έργων δυσχεραίνει. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα αριθμητικά μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τη συνολική γεωμορφολογία της ακτής και του πυθμένα της θάλασσας και εξάγουν αποτελέσματα για το κυματικό κλίμα και το υδροδυναμικό πεδίο της περιοχής.

Έχοντας υπόψη τα παραπάνω η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει να διερευνήσει τις υδροδυναμικές συνθήκες που αναπτύσσονται σε τέτοιες περιοχές (ακτές τύπου θύλακα) για ποικίλα ανεμολογικά και κυματικά σενάρια, προσομοιώνοντας αριθμητικά την κυματική μεταμόρφωση και τις ταχύτητες των ρευμάτων και εξετάζοντας εν τέλει την κατεύθυνση και την ένταση της στερεομεταφοράς. Σε επόμενο στάδιο διερευνάται η αλληλεπίδραση των κυματογενών ρευμάτων με συγκεκριμένα ακτομηχανικά έργα, για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη βέλτιστη χωροθέτηση και διάταξη αυτών των έργων όσον αφορά τη δημιουργία συνθηκών ηρεμίας και τον περιορισμό της απομάκρυνσης του ιζήματος.

Στην παρούσα έρευνα αντί μίας ιδεατής περιοχής με τα παραπάνω χαρακτηριστικά εξετάστηκε μια πραγματική όπου υπήρχαν διαθέσιμα ανεμολογικά και γεωλογικά δεδομένα ούτως ώστε τα αποτελέσματα της να είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Συγκεκριμένα επιλέχθηκε η ακτή της Αγίας Πελαγίας στο Ηράκλειο Κρήτης. Οι τύποι των ακτομηχανικών έργων που εξετάστηκαν είναι ένας έξαλος κυματοθραύστης με μήκος ίσο με το των δύο έξαλων, δυο έξαλοι κυματοθραύστες ίσου μήκους και δυο ύφαλοι αποσπασμένοι κυματοθραύστες ίσου μήκους με το μήκος των έξαλων.

Η δομή της εργασίας περιγράφεται στη συνέχεια με μία σύντομη αναφορά στο περιεχόμενο κάθε κεφαλαίου.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη αναφορά στις κυματικές μεταμορφώσεις και στις υδροδυναμικές συνθήκες που αναπτύσσονται στις ακτές τύπου θύλακα και δίνονται στοιχεία για την αντιπροσωπευτική περιοχή έρευνας που επιλέχθηκε.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κατά την δειγματοληψία. Περιγράφονται και υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά του ιζήματος που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη της παράκτιας στερεομεταφοράς.

Στο Κεφάλαιο 4 εκτιμάται το κυματικό κλίμα της περιοχής με τη χρήση ανεμολογικών δεδομένων που δίδονται από την ΕΜΥ. Προσδιορίζεται το ανάπτυγμα πελάγους και παρουσιάζεται η μέθοδος SMB, βάσει της οποίας υπολογίζονται τα χαρακτηριστικά των κυμάτων στα βαθιά.

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται οι διαδικασίες στερεομεταφοράς. Υπολογίζεται η ταχύτητα ρεύματος που προκαλεί έναρξη κίνησης ιζήματος για διάφορα βάθη και κυματισμούς.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται αναφορά στα έργα αναπλήρωσης ακτής, ενώ δίδεται ιδιαίτερη σημασία στα κριτήρια σχεδιασμού και στη διαστασιολόγηση των αποσπασμένων κυματοθραυστών. Περιγράφονται τυπικές διατομές που χρησιμοποιούνται στους κυματοθραύστες. Βάσει των παραπάνω προτείνονται τρία σενάρια έργων προστασίας ακτής τα οποία διαστασιολογούνται και τοποθετούνται στην περιοχή μελέτης.

Στο Κεφάλαιο 7 αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο των τριών μοντέλων του εμπορικού υπολογιστικού κώδικα Mike 21 (PMS, HD , ST) που εφαρμόστηκαν στην εργασία αυτή. Ενώ ακολουθεί περιγραφή της εφαρμογής των μοντέλων.

Στο Κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των μοντέλων του Mike 21. Τα αποτελέσματα αφορούν τις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή πριν και μετά την τοποθέτηση των έργων.

Στο Κεφάλαιο 9 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου ST. Με δεδομένη την στερεομεταφορά στην ακτή πριν την τοποθέτηση κυματοθραυστών καταδεικνύεται, βάσει των αποτελεσμάτων του μοντέλου, όπως ήταν αναμενόμενο ότι η διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών αποτρέπει πιθανή μετακίνηση των ιζημάτων στα βαθιά. Σε αντίθεση με τις άλλες διατάξεις, οι οποίες μειώνουν μόνο την ένταση της στερεομεταφοράς.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΗΣ ΤΥΠΟΥ ΘΥΛΑΚΑ

2.1 Εισαγωγή στις κυματικές και υδροδυναμικές συνθήκες στις ακτές τύπου θύλακα

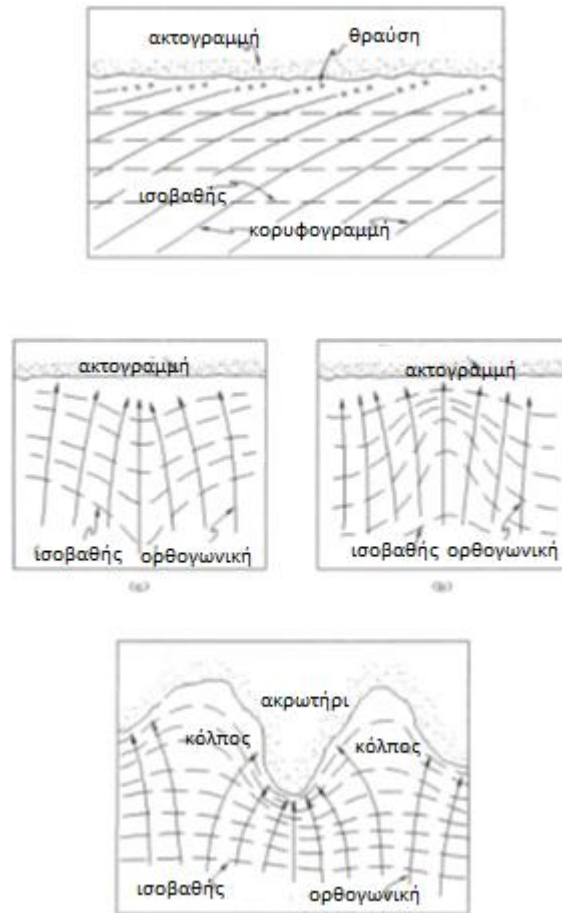
Οι κυματισμοί καθώς εισέρχονται από τα βαθιά ($d/L > 0.5$), όπου d το βάθος νερού και L το μήκος κύματος) στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά ($d/L < 0.5$) υπόκεινται σε μεταμορφώσεις της διατομής τους καθώς επιδρούν πάνω τους τα στερεά όρια όπως είναι ο πυθμένας, φυσικά εμπόδια, ακτομηχανικά, λιμενικά έργα κ.α. Τα φαινόμενα τα οποία κυριαρχούν στην αλλαγή της ενέργειας τους και της κατεύθυνσης τους είναι τα εξής:

- Ρήχωση
- Διάθλαση
- Περίθλαση
- Θραύση
- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους
- Τριβή πυθμένα
- Αλληλεπίδραση με υπάρχοντα ρεύματα

Συνεπώς η αλληλεπίδραση όλων αυτών των φαινομένων κάνει πολύπλοκο τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών σε επιθυμητές θέσεις ακόμα και αν είναι γνωστά τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά στα βαθιά νερά. Για το λόγο αυτό έχει γίνει μια τεράστια ερευνητική προσπάθεια στο παρελθόν για να απλοποιηθεί το πρόβλημα και να υπολογιστούν τα κυματικά χαρακτηριστικά στα ρηχά και ενδιάμεσα νερά. Μια βασική παραδοχή των περισσότερων ερευνών υπήρξε η θεώρηση πρόσπτωσης κυματισμών σε ευθεία ακτή με παράλληλες ισοβαθείς, κάτι το οποίο σπάνια απαντάται βέβαια στη φύση.

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα για το φαινόμενο της διάθλασης και πως αυτό επηρεάζει τους κυματισμούς σε διαφορετικές βαθυμετρίες.

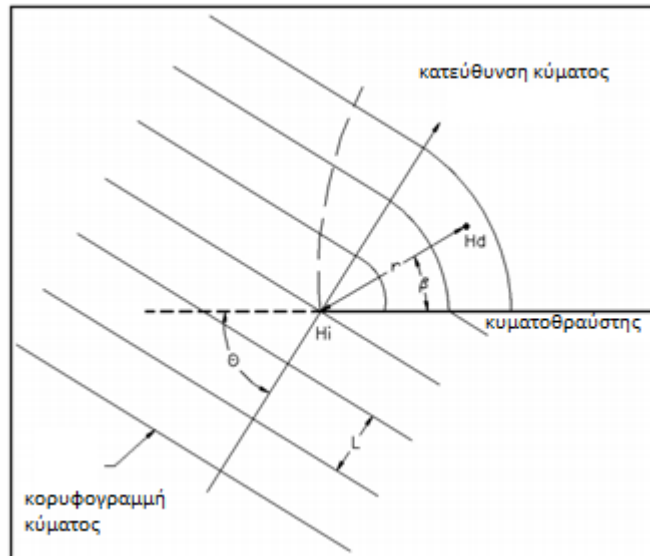
Το πρόβλημα της κυματικής διάδοσης μπορεί συχνά να απεικονιστεί εύκολα με την κατάστρωση κυματικών ακτινών. Αν επιλεγεί ένα σημείο σε μια κορυφή κύματος και σχεδιαστεί η ορθογωνική του, η τροχιά της ορθογωνικής όσο η κυματοκορυφή διαδίδεται προς την ακτή ονομάζεται ακτίνα. Ως εκ τούτου, μια ομάδα των κυματικών ακτινών απεικονίζει τη διαδρομή της στέψης κύματος. Για απλή βαθυμετρία, μια ομάδα των ακτινών μπορεί να κατασκευαστεί με το χέρι για να δείξει το μετασχηματισμό κύματος, αν και είναι μια επίπονη διαδικασία. Οι αναλύσεις διάθλασης και ρήχωσης συνήθως προσπαθούν να καθορίσουν το ύψος κύματος και την κατεύθυνση κατά μήκος μιας ακτίνας. Το Σχήμα 2.1 παρέχει εξιδανικευμένες εικόνες των ακτίνων κύματος για διάφορες τυπικές βαθυμετρίες. Οι απλές παράλληλες ισοβαθείς τείνουν να μειώνουν την ενέργεια των κυματισμών κοντά στην ακτή για εισερχόμενο κυματισμό υπό γωνία. Τα ακρωτήρια τείνουν να εστιάζουν τις ακτίνες πάνω τους και εξαπλώνουν την ενέργεια εκατέρωθεν. Αντίθετα τα φαράγγια τείνουν να εστιάζουν την ενέργεια εκατέρωθεν και να την μειώσουν πάνω από αυτό. Το ποσό της μείωσης ή της ενίσχυσης εξαρτάται όχι μόνο από τη βαθυμετρία, αλλά και από την αρχική γωνία πρόσπτωσης και την περίοδο των κυματισμών.



Σχήμα 2.1: Κυματικές ακτίνες διάθλασης (πηγή:CEM-II -3 , 2008)

Πρόσθετος λόγος για τον οποίο δεν μπορεί να προσεγγισθούν απλοϊκά οι ακτές τύπου θύλακα είναι γιατί τα ακρωτήρια που τις οριοθετούν δρουν ως φυσικά όρια στα οποία περιθλώνται οι κυματισμοί. Η περίθλαση είναι μια διαδικασία διάδοσης κυμάτων που μπορεί να είναι τόσο σημαντική όσο και η διάθλαση και η ρήχωση. Η κλασική εισαγωγή περίθλασης αντιμετωπίζει ένα κύμα διαδιδόμενο πέρα από το άκρο ενός κυματοθραύστη. Οποιαδήποτε διαδικασία που παράγει μια απότομη ή πολύ μεγάλη κλίση στο ύψος κύματος κατά μήκος μιας κυματοκορυφής παράγει επίσης περιθλώμενους κυματισμούς που τείνουν να μετακινούν την ενέργεια από υψηλότερα κύματα στην περιοχή των χαμηλότερων. Έτσι η αρχική ενέργεια μειώνεται καθώς περιθλώμενοι κυματισμοί παράγονται. Το Σχήμα 2.2 απεικονίζει ένα μακρό μονοχρωματικό κύμα που πλησιάζει ένα ημί - άπειρο λιμενοβραχίονα

σε μια περιοχή όπου το βάθος του νερού είναι σταθερό (δεν υπάρχει διάθλαση ή ρήχωση). Ο κυματισμός καθώς προσπίπτει στον κυματοθραύστη όπου θα καταστραφεί μερικώς και μερικώς θα ανακλαστεί. Το τμήμα του κύματος που περνάει την άκρη κυματοθραύστη θα περιθλαστεί στη σκιά του. Οι περιθλώμενες κορυφογραμμές θα αποτελέσουν ουσιαστικά ομόκεντρα κυκλικά τόξα με το ύψος του κύματος να μειώνεται κατά μήκος αυτών.



Σχήμα 2.2: Φαινόμενο περίθλασης μονοχρωματικού κύματος σε ημι-άπειρο λιμενοβραχίονα (πηγή:(CEM-II -7,2008))

Τα παραπάνω φαινόμενα οδηγούν στην κίνηση της υδάτινης μάζας εντός του κόλπου. Τα κυματογενή ρεύματα σε ακτές σύνθετες (και όχι με παράλληλες ισοβαθείς) διαφέρουν σε ένταση και σε κατεύθυνση για τους λόγους που περιγράφονται στη συνέχεια.

Σε παράκτιες ζώνες με τοπογραφικές ανωμαλίες στον πυθμένα, ιδιαίτερα της ζώνης μετά τη θραύση, η κυματογενής κυκλοφορία είναι πιο πολύπλοκη. Αίτιο της πολυπλοκότερης κυκλοφορίας είναι η μεταβολή κατά μήκος της ακτής της τάσεως ακτινοβολίας, που προέρχεται από μεταβολές της τοπογραφίας του πυθμένα και/ή του ύψους κύματος και την παρουσία κυμάτων ακμής. Κάτω από σταθερές συνθήκες προσπιπτόντων κυμάτων και τα τρία παραπάνω αίτια ανάγονται τελικά στην τοπογραφική ανομοιομορφία.

Η μεταβαλλόμενη τάση ακτινοβολίας δημιουργεί παράκτια κύτταρα κυκλοφορίας. Πειραματικά αποτελέσματα σε επίπεδο κεκλιμένο πυθμένα έχουν δείξει πρόσφατα, ότι και η αλληλεπίδραση στάσιμων κυμάτων ακμής και προσπιπτόντων κυμάτων παράγει επίσης κύτταρα κυκλοφορίας. Δεδομένου όμως, ότι η εμφάνιση κυμάτων ακμής συναρτάται με τα χαρακτηριστικά των προσπιπτόντων κυμάτων, είναι δυνατό να λεχθεί συνοπτικά, ότι η περίπλοκη αυτή κυκλοφορία προέρχεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και την τοπογραφία του πυθμένα. Ένα παράκτιο κύτταρο κυκλοφορίας απαρτίζεται κατ' αρχήν από

- Ένα ρεύμα κατά μήκος της ακτής (ρ_{κμα}) και
- Ένα βελοειδές ρεύμα

Η γένεση των ρ_{κμα} οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή του ύψους κύματος στη ζώνη θραύσης και/ή στην κλίση της γραμμής θραύσης ως προς την ακτογραμμή. Η ανομοιόμορφη κατανομή δημιουργεί υδραυλικές βαθμίδες με αποτέλεσμα τη ροή ρευμάτων. Μια τέτοια ανομοιομορφία μπορεί να οφείλεται σε ανωμαλίες του πυθμένα και σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυμάτων. Σε γραμμές θραύσης υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή, ένα μέρος της ενέργειας του κύματος ανακλάται και κινείται παράλληλα προς την ακτογραμμή, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός ρ_{κμα}. (Μουτζούρης, 2005)

Η συμβολή δύο ρευμάτων κ_{μα} αντίθετης φοράς εκτρέπει τη ροή προς τα ανοιχτά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου ρεύματος (Σχήμα 2.3). Καλείται βελοειδές ρεύμα, διασχίζει τη ζώνη θραύσης σε περιοχές μικρών υψών κύματος και συνεχίζει την κίνηση του στη ζώνη πριν τη θραύση, όπου και εκφυλίζεται.

Το βελοειδές ρεύμα είναι στενό, ισχυρό ρεύμα επιστροφής μάζας από τη ζώνη μετά τη θραύση στη ζώνη πριν από τη θραύση. Κατά συνέπεια, συμβάλλει στην κυκλοφορία μέσω της ισχυρής ζώνης θραύσης. Μπορεί να διαιρεθεί σε τρία τμήματα.

- Πηγή

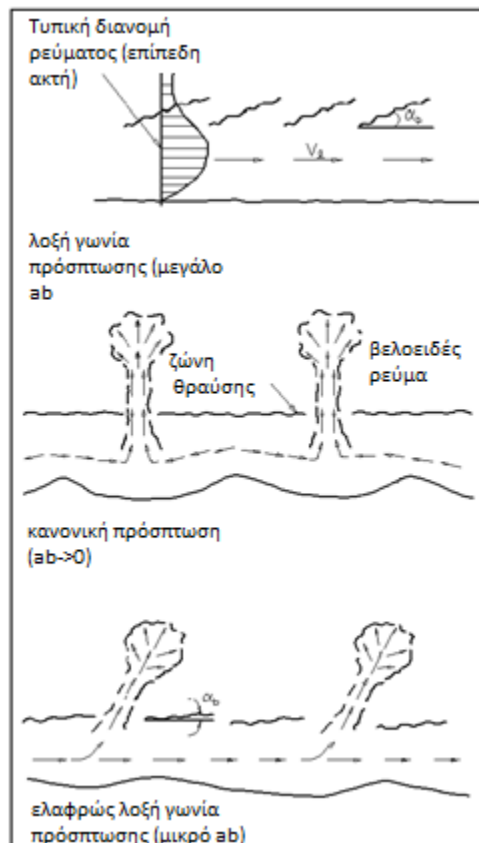
Εμφανίζεται στην περιοχή δημιουργίας του ρεύματος, όπου η ροή είναι σχεδόν παράλληλη στην ακτογραμμή, δηλαδή στη ζώνη μετά τη θραύση.

- Κορμός

Ρέει σχεδόν κάθετα στην ακτογραμμή και συνδέει τις ζώνες μετά και πριν τη θραύση. Το τμήμα αυτό του ρεύματος είναι στενό στη ζώνη μετά τη θραύση (15÷30m) και πλατύνεται στη ζώνη πριν τη θραύση.

- Κεφαλή

Στην κεφαλή του ρεύματος παρουσιάζεται μείωση της ταχύτητας ροής μέχρι μηδενισμού.



Σχήμα 2.3:Μορφή ρευμάτων στην ακτή (πηγή:CEM-II -7,2008)

Συνεπώς, έχοντας υπόψη τα παραπάνω, η πολυπλοκότητα των φαινομένων κάνει δύσκολο τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών, των ταχυτήτων ρευμάτων και ακολούθως τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, για καλύτερη κατανόηση

των διεργασιών που υπεισέρχονται και την λήψη σχετικών μετρήσεων ακολουθούνται δυο οδοί:

α) κατασκευάζονται φυσικά προσομοιώματα σε κατάλληλα εργαστήρια τα οποία αποτελούν ουσιαστικά μια αναπαράσταση του φυσικού φαινομένου υπό κλίμακα, τα όποια δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα

β) και η δεύτερη προσέγγιση είναι η αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου η οποία βασίζεται στην επεξεργασία μαθηματικών μοντέλων.

Στην παρούσα εργασία ακολουθείται η τελευταία διαδικασία για να προσομοιωθεί το υδροδυναμικό πεδίο και η στερεομεταφορά και να προταθεί η βέλτιστη διάταξη κυματοθραυστών σε ακτές τύπου θύλακα.

2.2 Αποτύπωση της περιοχής μελέτης

Στα Σχήματα 2.4 και 2.5 παρατίθενται αποσπάσματα των χαρτών από διάφορες πηγές οι οποίοι χρησιμοποιήθηκαν για την τελική απεικόνιση της ακτογραμμής. Επιλέχθηκε να αποτυπωθεί ολόκληρος ο όρμος, που σημαίνεται με ορθογώνιο στα Σχήματα 2.4, 2.5 καθώς αποτελεί μια ενιαία και αυτοτελή ακτομηχανική ενότητα. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν με την εφαρμογή του προγράμματος Mike 21 ανταποκρίνονται σε μεγαλύτερο βαθμό στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή καθώς λαμβάνεται υπόψη η γεωμετρία ολόκληρου του κόλπου.



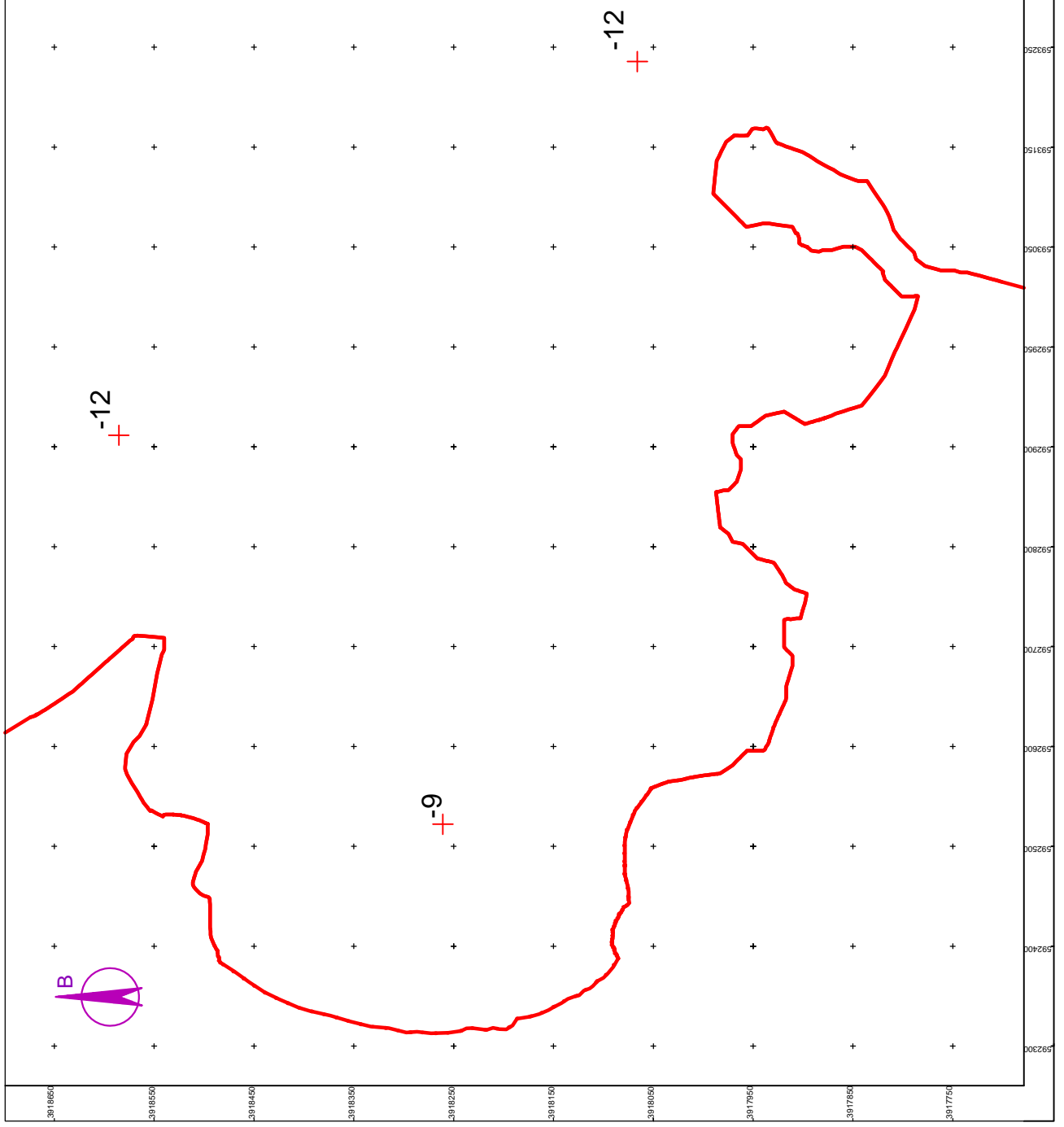
Σχήμα 2.4: Όρμος Αγίας Πελαγίας, κλίμακα χάρτη 1:50.000 (πηγή: εργαστήριο λιμενικών έργων)



Σχήμα 2.5: Όρμος Αγίας Πελαγίας, κλίμακα χάρτη 1:100.000 (πηγή: εργαστήριο λιμενικών έργων)

Από τον βυθομετρικό χάρτη σχήμα 2.4 φαίνονται τα βάθη για τρία σημεία του όρμου και δίδεται η ισοβαθής των 12m.

Η αποτύπωση του όρμου σε ηλεκτρονική μορφή ώστε να είναι αξιοποιήσιμη από το πρόγραμμα MIKE 21 προέκυψε ύστερα από επεξεργασία ενός τοπογραφικού χάρτη της ακτογραμμής σε συνδυασμό με τους βυθομετρικούς χάρτες που φαίνονται στα Σχήματα 2.6 και 2.5.. Τέλος, στην διαμόρφωση της ακτογραμμής του όρμου χρησιμοποιήθηκε και εικόνα από τους χάρτες του google maps. Αφού ταυτίστηκαν τα κοινά σημεία των χαρτών με το δοσμένο τοπογραφικό, προεκτάθηκε η ακτογραμμή του αρχικού τοπογραφικού, με αποτέλεσμα να γίνει η αποτύπωση ολόκληρου του όρμου. Ακολουθεί εικόνα (Σχήμα 2.6) από το τελικό σχέδιο που προέκυψε από τα παραπάνω δεδομένα.



| | |
|---------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| ΣΧΗΜΑ 2.6 : ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΟΡΜΟΥ ΑΓΙΑΣ ΠΕΛΛΑΓΙΑΣ | |
| | ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ |
| | ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΣΤΟ ΕΓΣΑ |
| | ΒΑΘΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ |
| ΚΛΙΜΑΚΑ | 1:5400 |

3. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΙΖΗΜΑΤΑ

3.1 Εισαγωγή

Η κίνηση του ιζήματος από τα υδάτινα σώματα είναι ένα φαινόμενο που δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, με αποτέλεσμα να έχει δημιουργηθεί μεγάλος αριθμός τύπων ώστε να προβλεφθεί η παροχή της στερεομεταφοράς. Οι τύποι είναι συνήθως συναρτήσεις των ιδιοτήτων του υγρού, των συνθηκών της ροής και των χαρακτηριστικών του ιζήματος. Στα χαρακτηριστικά του ιζήματος περιλαμβάνονται: μέγεθος των κόκκων, πυκνότητα των κόκκων, ταχύτητα καθίζησης, γωνία τριβής και συγκέντρωση όγκου καθώς επίσης η κοκκομετρική διαβάθμιση και το σχήμα των κόκκων.

Στη συνέχεια αναφέρονται βασικά χαρακτηριστικά του ιζήματος που είναι χρήσιμα στην επίλυση ακτομηχανικών προβλημάτων.

1) Διάμετρος κόκκου

Είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του ιζήματος. Το μέγεθος του κόκκου ορίζεται σε όρους διαμέτρου. Η διάμετρος προσδιορίζεται από ένα μέγεθος κοσκίνου, από το οποίο ο κόκκος μπορεί να διέλθει.

2) Κοκκομετρική καμπύλη

Δείχνει την κατανομή του μεγέθους των κόκκων ενός εδαφικού υλικού και παρουσιάζεται σε ένα διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης ως προς το μέγεθος του κόκκου (Καββαδας,2009)

3) Διάμεσος

Όλα τα δείγματα ιζημάτων περιέχουν κόκκους με μεγάλη διακύμανση στο μέγεθός τους. Είναι συχνά απαραίτητο το δείγμα να χαρακτηρίζεται χρησιμοποιώντας μια τυπική διάμετρο κόκκων ως μέτρο κεντρικής τάσης της κατανομής. Μπορεί να συμβολιστεί M_d και είναι η διάμετρος

για την οποία το μισό δείγμα, ως προς το βάρος, έχει μεγαλύτερη τιμή και το άλλο μισό μικρότερη. Η ποσότητα αυτή μπορεί να προσδιοριστεί γραφικά, αν το δείγμα ταξινομηθεί με κοσκίνισμα.

Η μέση διάμετρος μπορεί να εκφρασθεί και ως D_{50} άλλα κλάσματα μεγέθους μπορούν να δειχθούν παρόμοια. Για παράδειγμα D_{90} ορίζεται η διάμετρος για την οποία το 90% του ιζήματος, ως προς το βάρος, έχει μικρότερη διάμετρο.

4) Μέσο μέγεθος κόκκων

Συμβολίζεται M_ϕ , υπολογίζεται από την εξίσωση $M_\phi = \frac{(\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84})}{3}$ και εκτιμά το μέσο μέγεθος κόκκων δείγματος σε φι μονάδες. Η μέση διάμετρος και το μέσο μέγεθος κόκκων είναι παρόμοια ή πανομοιότυπα για λογαριθμικές κανονικές κατανομές.

Για τη μέτρηση των κόκκων υπάρχουν τρία μεγέθη: αριθμοί κόσκινου, χιλιοστά και μονάδες φι. Ο αριθμός κόσκινου είναι περίπου το νούμερο των τετραγώνων ανοιγμάτων ανά ίντσα. Η διάσταση σε χιλιοστά είναι το μήκος του εσωτερικού του τετράγωνου ανοίγματος. Η μονάδα του φι ορίζεται ως $\phi = -\log_2 D$.

Όπου D είναι η διάμετρος των κόκκων σε χιλιοστά. Η διάμετρος φι υποδηλώνεται γράφοντας ϕ μετά της αριθμητικής τιμής.

5) Τυπική απόκλιση

Η τυπική απόκλιση δίνει το βαθμό στον οποίο ένα δείγμα απλώνεται γύρω από την μέση τιμή.

Υπολογίζεται από την εξίσωση σε μονάδες φι: $\sigma_\phi = \frac{(\phi_{84} - \phi_{16})}{4} + \frac{(\phi_{95} - \phi_5)}{6}$

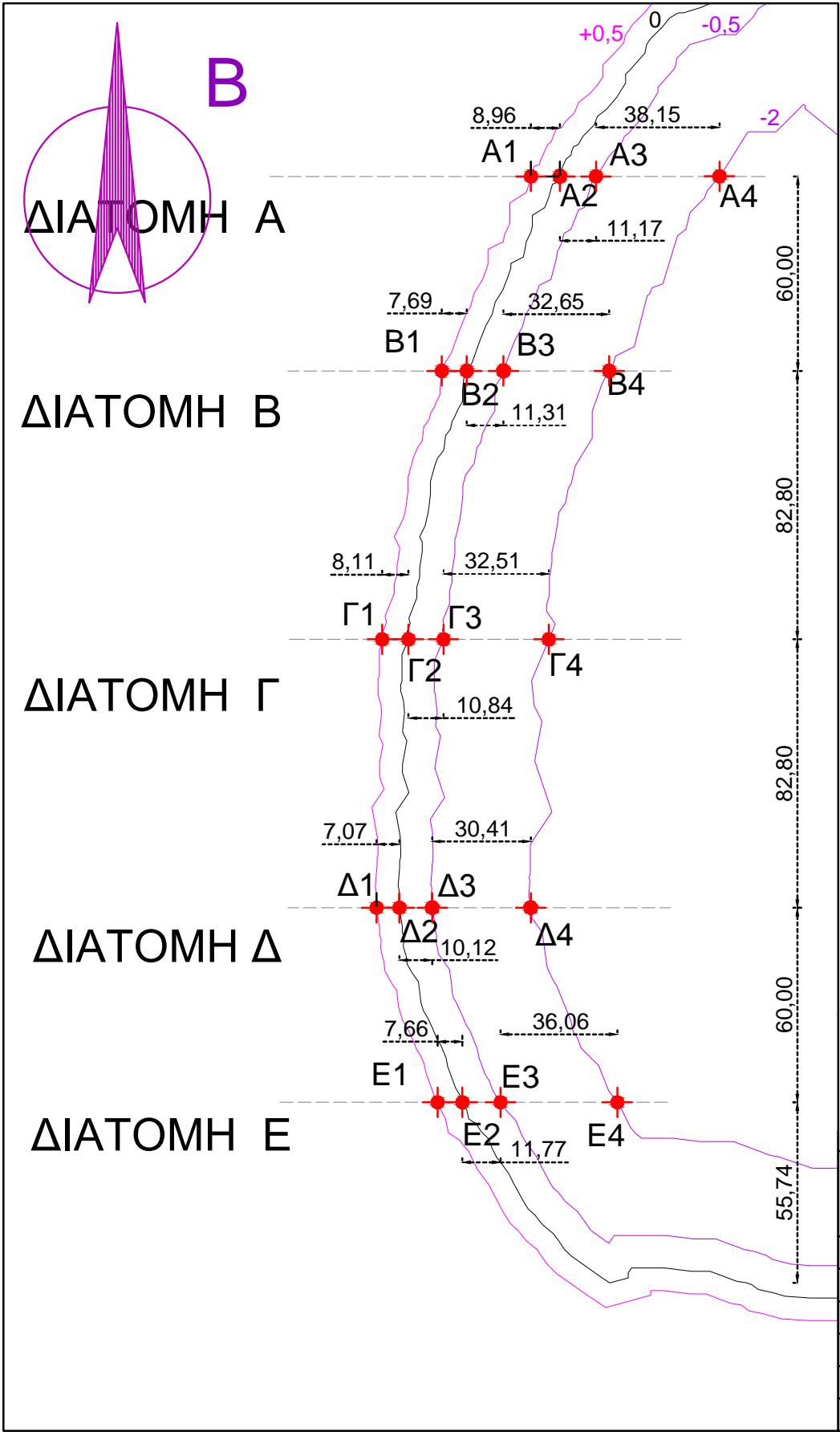
Ένα εντελώς ομοιόμορφο δείγμα έχει μηδενική τυπική απόκλιση. Ένα ίζημα περιγράφεται ως καλά ταξινομημένο, αν όλοι οι κόκκοι έχουν μεγέθη που είναι κοντά στο τυπικό μέγεθος (μικρή τυπική απόκλιση). Αν τα μεγέθη των κόκκων κατανέμονται σε μεγάλο εύρος τότε το δείγμα ονομάζεται καλά διαβαθμισμένο.

3.2 Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Βασικό στοιχείο για την ορθή περιγραφή της περιοχής μελέτης είναι τα χαρακτηριστικά του ιζήματος, καθώς παίζουν κυρίαρχο ρόλο στην ευστάθεια των ακτών και των παράκτιων έργων. Η λήψη ενός δείγματος περιστασιακά επαρκεί για να χαρακτηρίσει χονδροειδώς τα ιζήματα μιας περιοχής, καλύτερο όμως σε περιπτώσεις έργων να λαμβάνεται ένα σύνολο δειγμάτων. Συνδυάζοντας τα δείγματα κατά μήκος της ακτής, μειώνεται η υψηλή μεταβλητότητα της χωρικής κατανομής του μεγέθους των κόκκων. Σύνθετα δείγματα δημιουργούνται αναμιγνύοντας διαφορετικά δείγματα πριν το κοσκίνισμα ή συνδυάζοντας μαθηματικά τα μεμονωμένα βάρη του δείγματος. Το σύνολο των δειγμάτων μπορεί να είναι μικρό, αν ο σκοπός είναι να χαρακτηριστεί η παραλία ως σύνολο. Εντούτοις, αν η πρόθεση είναι να συγκρίνουμε διαφορετικά τμήματα της ακτής, είναι απαραίτητα πολλά περισσότερα δείγματα. Τα δείγματα κατά μήκος της εγκάρσιας διατομής της ακτογραμμής συλλέγονται από όλες τις μεγάλες μορφολογικές μεταβολές της παραλίας (βάση αμμόλοφου, αυλάκι). Στην κατά μήκος διεύθυνση της ακτής, τα δείγματα ιζήματος πρέπει να λαμβάνονται πάνω στην ευθεία κάθε εγκάρσιας διατομής, ώστε να μπορούν να συσχετιστούν με τη μορφολογία του πυθμένα και τις υδροδυναμικές ζώνες.

Για τον προσδιορισμό του ιζήματος στην περιοχή μελέτης, ελήφθησαν δείγματα ιζήματος από την ακτή της Αγίας Πελαγίας. Επειδή πρόκειται για παρατήρηση της εξέλιξης της ακτογραμμής, οι λήψεις δειγμάτων έγιναν σε θέσεις παράλληλα και κάθετα στην ακτή. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1, επειδή πρόκειται για παρατήρηση της εξέλιξης της ακτογραμμής, οι λήψεις δειγμάτων έγιναν σε θέσεις παράλληλα και κάθετα στην ακτή. Επιφανειακές δειγματοληψίες ζητήθηκε να πραγματοποιηθούν σε πέντε εγκάρσιες διατομές κατά μήκος της ακτής. Σε κάθε διατομή επιλέγονται τέσσερα σημεία λήψης. Συγκεκριμένα τα σημεία δειγματοληψίας είναι τα σημεία τομής των εγκάρσιων διατομών με τις ισοβαθείς των -2m, του -0,5m, του 0m και του +0,5m.

Τελικά, από τα είκοσι σημεία που ορίζονται στο Σχήμα 3.1 προέκυψαν δείγματα μόνο για τα δεκαπέντε. Από τα σημεία 4 κάθε διατομής δε λήφθηκε ίζημα, καθώς συναντάται βράχος. Ακολουθεί στο Σχήμα 3.1 το σχέδιο των δειγματοληψιών.



ΣΧΗΜΑ 3.1 ΘΕΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΙΖΗΜΑΤΟΣ

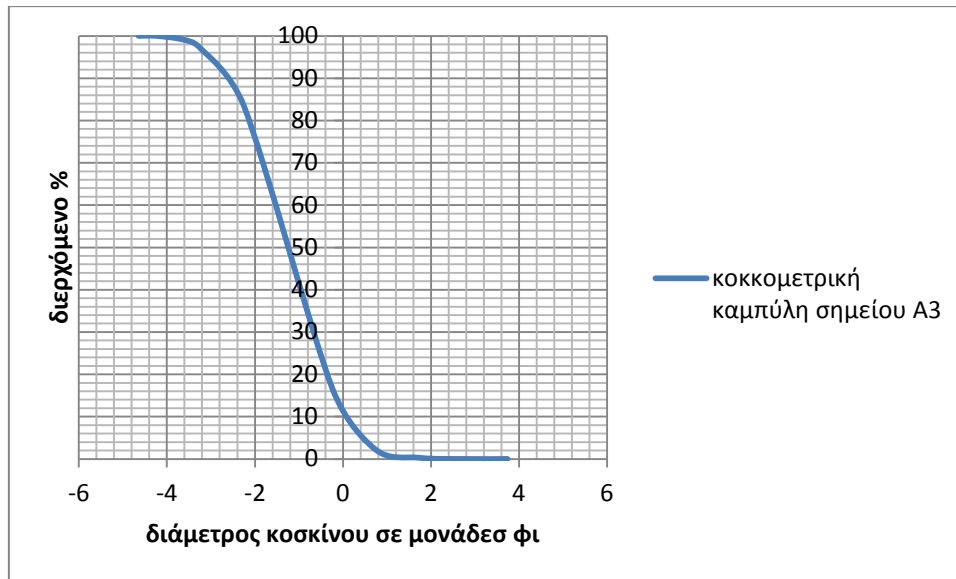
| | |
|---------|-----------------------|
| | ΙΣΟΨΗΣ |
| | ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ |
| | ΙΣΟΒΑΘΗΣ |
| | ΕΓΚΑΡΣΙΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ |
| | ΣΗΜΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ |
| ΚΛΙΜΑΚΑ | 1:1800 |

Η δειγματοληψία είναι σημειακή, ώστε να προκύψουν οι ιδιότητες μιας μόνο ιζηματολογικής μονάδας και όχι επάλληλων ιζηματολογικών γεγονότων (Μουτζούρης, 2005). Από τη διαδικασία της δειγματοληψίας προέκυψαν τα εξής:

- 1) Όταν η θάλασσα βρίσκεται σε ηρεμία, στην ισοβαθή -1m συναντάται βράχος κατά μήκος της ισοβαθούς, που εκτείνεται έως και την ισοβαθή των -2.5m
- 2) Κατά μήκος της ισοβαθούς των -2m εκτείνεται βράχος
- 3) Ο βράχος είναι επίπεδος μέχρι την ισοβαθή -1.7m όπου σχηματίζεται "σκαλοπάτι" μέχρι το βάθος -2.3m περίπου
- 4) Μετά τον βράχο προς τα ανοιχτά υπάρχει ίζημα στον πυθμένα, με εξαίρεση την διατομή Α όπου κατά μήκος της συνεχίζεται βράχος

Όλα τα δείγματα αναλύθηκαν με τη μέθοδο του ξηρού κοσκινίσματος, με σκοπό την εύρεση των χαρακτηριστικών του ιζήματος που έχουν αναφερθεί παραπάνω και κυρίως της μέσης διαμέτρου των κόκκων του υλικού, D_{50} , το οποίο είναι απαραίτητο στοιχείο στην εκτίμηση της στερεομεταφοράς.

Για κάθε δείγμα κατασκευάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη. Παρουσιάζεται αντιπροσωπευτικά η κοκκομετρική καμπύλη του σημείου Α3 (Σχήμα 3.2) και οι υπόλοιπες δίδονται στο παράρτημα Β. Ακολουθεί το παράρτημα Γ με εικόνες από το ίζημα κάποιων δειγμάτων.



Σχήμα 3.2: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου A3

Από τις καμπύλες υπολογίσθηκαν η μέση διάμετρος του υλικού καθώς και η γεωμετρική τυπική απόκλιση (σ_g). Η γεωμετρική τυπική απόκλιση είναι ένα αδιάστατο μέγεθος το οποίο ορίζεται ως:
$$\sigma_g = \sqrt{\frac{D_{84}}{D_{16}}}$$

Η γεωμετρική τυπική απόκλιση ζητείται από το πρόγραμμα Mike 21 για τη περιγραφή του ιζήματος στο μοντέλο ST, καθώς είναι μέγεθος που προσδιορίζει, πόσο καλά ταξινομημένο είναι το δείγμα και παρέχει στοιχεία ως προς τους μηχανισμούς μεταφοράς του ιζήματος. Η τυπική απόκλιση του δείγματος χρησιμοποιείται με πολλούς τρόπους, συμπεριλαμβανομένων του σχεδιασμού αναπλήρωσης ακτής και της διαπερατότητας των ιζημάτων.

Στον Πίνακα 3.1 δίδονται οι τιμές της μέσης διαμέτρου κάθε δείγματος που υπολογίσθηκαν από τις κοκκομετρικές καμπύλες. Για την περιγραφή του ιζήματος της ακτής χρησιμοποιήθηκε ενιαία μέση διάμετρος η οποία προέκυψε από την μέση τιμή των δειγμάτων 2 και 3. Εξαιρέθηκαν οι θέσεις 1, καθώς τοποθετούνται πάνω από τη στάθμη 0 και το δείγμα της θέσης Γ3 επειδή η μέση διάμετρος παρουσιάζει μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες τιμές.

Πίνακας 3.1: Μέση διάμετρος κόκκων όλων των δειγμάτων

| ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΙΣΟΒΑΘΟΥΣ +0,5m | D50 (mm) | ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΙΣΟΒΑΘΟΥΣ 0m | D50 (mm) | ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΙΣΟΒΑΘΟΥΣ -0,5m | D50 (mm) | ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ |
|--------------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|--------------------------------|---------------|--------------|
| A1 | 0,467 | A2 | 0,727 | A3 | 2,965 | 1,39 |
| B1 | 0,406 | B2 | 0,412 | B3 | 3,352 | 1,39 |
| Γ1 | 0,492 | Γ2 | 0,47 | Γ3 | 14,094 | 5,02 |
| Δ1 | 3,09 | Δ2 | 2,72 | Δ3 | 2,85 | 2,89 |
| Ε1 | 0,911 | Ε2 | 0,954 | Ε3 | 3,486 | 1,78 |
| ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ | 1,07 | | 1,06 | | 5,35 | 2,49 |

Ο πίνακας 3.2 παρουσιάζει τη μέση διάμετρο και την τυπική απόκλιση των δειγμάτων, που αξιοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του ιζήματος. Δίδονται, επίσης, οι τιμές της μέσης διαμέτρου του ιζήματος της ακτής και της γεωμετρικής τυπικής απόκλισης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση της στερεομεταφοράς.

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

| ΘΕΣΕΙΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ | ΒΑΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ(kg) | D ₅₀ (mm) | σ _g |
|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------|
| A2 | 1,08 | 0,727 | 1,68 |
| A3 | 1,42 | 2,965 | 2,07 |
| B2 | 1,054 | 0,412 | 2,1 |
| B3 | 1,202 | 3,352 | 2,26 |
| Γ2 | 1,206 | 0,47 | 1,54 |
| Δ2 | 1,108 | 2,72 | 1,82 |
| Δ3 | 1,104 | 2,85 | 1,85 |
| Ε2 | 1,226 | 0,954 | 1,91 |
| Ε3 | 1,286 | 3,486 | 2,31 |
| Μέση τιμή | | 2,11 | 1,95 |

4. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ

Η μετεωρολογία μιας περιοχής αποτελεί σημαντικό δεδομένο για το σωστό παράκτιο σχεδιασμό. Κυρίαρχη παράμετρο αποτελούν τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής καθώς οι άνεμοι σχετίζονται άμεσα με τη παραγωγή κυματισμών.

4.1 Ανεμολογική δίαιτα

Για την περιγραφή του ανεμολογικού κλίματος στην περιοχή της Αγίας Πελαγίας χρησιμοποιήθηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) από το σταθμό του Ηρακλείου. Ο σταθμός του Ηρακλείου είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός καθώς είναι ο πλησιέστερος στην περιοχή μελέτης, ενώ λόγω της θέσης του είναι εκτεθειμένος στο ίδιο ανάπτυγμα πελάγους. Επιπλέον, ο σταθμός είναι τοποθετημένος στην επιφάνεια της θάλασσας, οπότε δεν είναι απαραίτητη κάποια διόρθωση των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, δόθηκαν από την Ελληνική Μετεωρολογική Υπηρεσία, ΕΜΥ, οι μηνιαίες συχνότητες εμφάνισης ανέμου συγκεκριμένης έντασης και διεύθυνσης για την περίοδο λειτουργίας του μετεωρολογικού σταθμού από 1/1/1955 έως 1/1/2012. Λόγω της γεωγραφικής θέσης της περιοχής, οι άνεμοι που προκαλούν κυματισμούς είναι ο βόρειος, ο βορειοανατολικός και ο ανατολικός. Συνεπώς, έγινε επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων των ανέμων των τριών αυτών διευθύνσεων. Από αυτά υπολογίσθηκαν οι μέσες ετήσιες τιμές των συχνοτήτων εμφάνισης των ανέμων και ακολουθεί πίνακας με τις τιμές αυτές (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Πίνακας μέσων ετήσιων συχνοτήτων ανέμου

| ετήσιες συχνότητες εμφάνισης (%) (fe) | | | |
|------------------------------------------|--------|-------|-------|
| Beaufort | N | NE | E |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1,036 | 0,434 | 0,356 |
| 2 | 4,750 | 1,597 | 1,124 |
| 3 | 5,333 | 0,873 | 0,64 |
| 4 | 4,723 | 0,266 | 0,18 |
| 5 | 2,033 | 0,070 | 0,031 |
| 6 | 0,866 | 0,026 | 0,011 |
| 7 | 0,197 | 0,002 | 0,004 |
| 8 | 0,057 | 0 | 0 |
| >= 9 | 0,005 | 0 | 0 |
| SUM | 19,005 | 3,271 | 2,348 |

4.2 Ανάπτυγμα πελάγους (Fetch)

Ως ενεργό ανάπτυγμα πελάγους (Fetch) ορίζεται η γραμμική διάσταση του θαλάσσιου πεδίου από ακτή σε ακτή, πάνω στο οποίο αναπτύσσεται ο κυματισμός. Στην περιοχή αυτή η ταχύτητα του ανέμου και η κατεύθυνση μπορούν να θεωρηθούν σταθερές. Η τιμή του ενεργού αναπτύγματος πελάγους δίνεται από την εξίσωση:

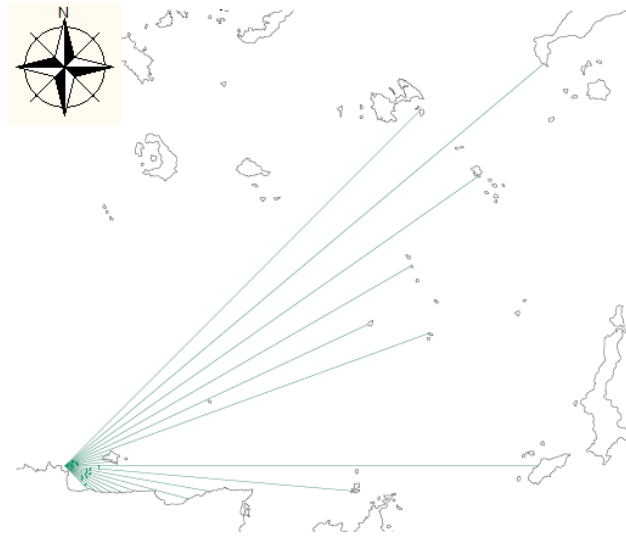
$$F_{\text{eff}} = \frac{\sum_i F_i (\cos a_i)^2}{\sum_i \cos a_i} \quad (4.1)$$

Όπου i ο αριθμός κάθε ακτίνας

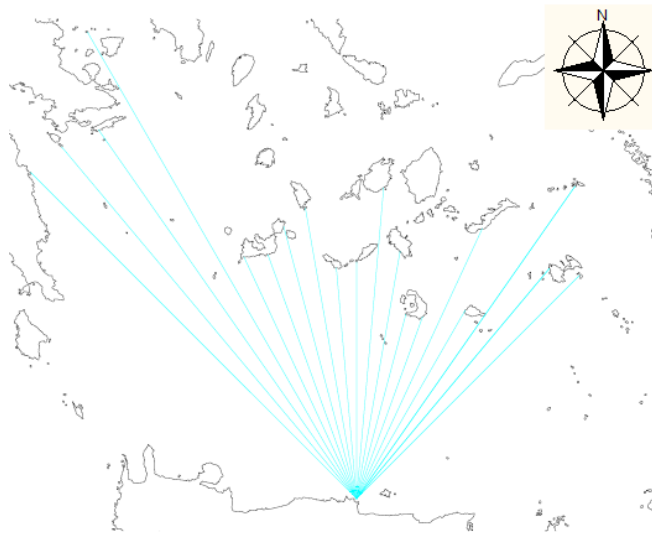
F_i το μήκος κάθε ακτίνας από το σημείο στο οποίο υπολογίσθηκε η τιμή Fetch έως να ανακοπεί από μια ακτή και δίνεται σε μέτρα (m)

a_i η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της ακτίνας και της διεύθυνσης του ανέμου

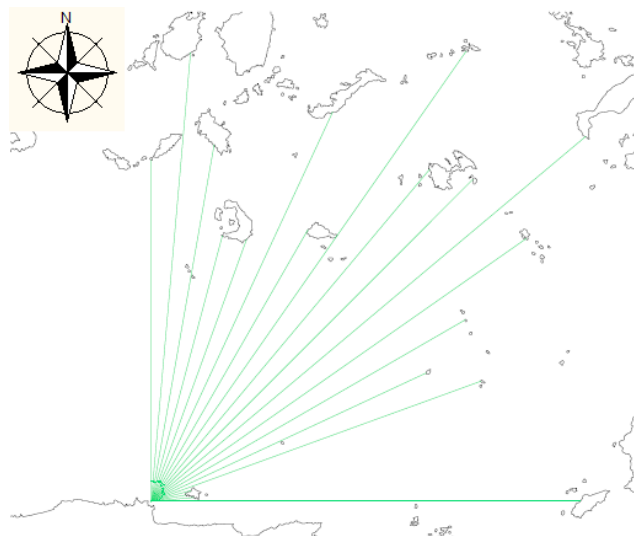
Το ενεργό ανάπτυσμα πελάγους υπολογίσθηκε συντηρητικά με εύρος τομέα εκατέρωθεν της διεύθυνσης του ανέμου $\pm 45^\circ$ ανά 5° , σε αντίθεση με το CEM το οποίο προτείνει εύρος τομέα $22,5^\circ$. Η διαδικασία προσδιορισμού του Fetch πραγματοποιήθηκε για τις τρεις διευθύνσεις ανέμου που είναι εκτεθειμένη η περιοχή μελέτης (Βόρειο, Βορειοανατολικό, Ανατολικό άνεμο). Στα Σχήματα 4.1÷4.3 παρουσιάζεται ο τομέας επίδρασης κάθε ανέμου. Για τον υπολογισμό της τιμής των ακτινών, θεωρήθηκε ένα εξωτερικό σημείο στην είσοδο του όρμου. Το Fetch μετρήθηκε για κάθε διεύθυνση ανέμου και ακολουθεί πίνακας των αποτελεσμάτων (Πίνακας 4.2)



Σχήμα 4.1: Ενεργό ανάπτυσμα πελάγους Ανατολικού ανέμου



Σχήμα 4.2: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους Βόρειου ανέμου



Σχήμα 4.3: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους Βορειοανατολικού ανέμου

Πίνακας 4.2: Υπολογισμός ενεργού αναπτύγματος πελάγου (fetch)

| | | ΒΟΡΕΙΟΣ | | ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ | | ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ | |
|-------------------|----------|---------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| A | cos(A) | Fi (km) | Fi*cos ² (A) | Fi (km) | Fi*cos ² (A) | Fi (km) | Fi*cos ² (A) |
| -45 | 0,707107 | 260,324 | 130,162 | 133,443 | 66,7215 | 178,086 | 89,043 |
| -40 | 0,766044 | 259,059 | 152,0221 | 176,145 | 103,36613 | 222,06 | 130,3102 |
| -35 | 0,819152 | 253,934 | 170,3923 | 141,698 | 95,080785 | 179,337 | 120,3369 |
| -30 | 0,866025 | 303,731 | 227,7983 | 107,418 | 80,5635 | 141,895 | 106,4213 |
| -25 | 0,906308 | 150,485 | 123,6074 | 109,122 | 89,632135 | 118,736 | 97,52901 |
| -20 | 0,939693 | 146,28 | 129,1685 | 168,138 | 148,46959 | 137,263 | 121,2063 |
| -15 | 0,965926 | 159,048 | 148,3938 | 122,689 | 114,4704 | 16,145 | 15,06349 |
| -10 | 0,984808 | 166,301 | 161,2864 | 215,071 | 208,58582 | 13,777 | 13,36157 |
| -5 | 0,996195 | 130,594 | 129,602 | 169,556 | 168,26803 | 16,681 | 16,55429 |
| 0 | 1 | 133,443 | 133,443 | 178,086 | 178,086 | 168,066 | 168,066 |
| 5 | 0,996195 | 176,145 | 174,807 | 222,06 | 220,3732 | 103,047 | 102,2642 |
| 10 | 0,984808 | 141,698 | 137,4253 | 179,336 | 173,92836 | 52,543 | 50,95863 |
| 15 | 0,965926 | 107,418 | 100,2224 | 141,895 | 132,38984 | 45,396 | 42,35504 |
| 20 | 0,939693 | 109,122 | 96,35715 | 118,736 | 104,84653 | 26,001 | 22,95946 |
| 25 | 0,906308 | 168,138 | 138,1075 | 137,263 | 112,74698 | 22,78 | 18,71135 |
| 30 | 0,866025 | 122,689 | 92,01675 | 16,145 | 12,10875 | 18,794 | 14,0955 |
| 35 | 0,819152 | 215,071 | 144,3148 | 13,777 | 9,2445058 | 16,499 | 11,071 |
| 40 | 0,766044 | 169,556 | 99,49955 | 16,681 | 9,7888126 | 14,001 | 8,216124 |
| 45 | 0,707107 | 178,086 | 89,043 | 168,066 | 84,033 | 11,758 | 5,879 |
| FETCH (km) | | 152,502 | | 124,953 | | 68,297 | |

Από τον πίνακα 4.2 προκύπτει, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι ο ανατολικός άνεμος παρουσιάζει το μικρότερο ανάπτυγμα πελάγους καθώς συναντά στεριά σε μικρή απόσταση. Το μήκος του αναπτύγματος πελάγους λαμβάνεται στους υπολογισμούς: 152,5km για τον Βόρειο, 124,9km για τον Βορειοανατολικό και 68,3km για τον ανατολικό άνεμο.

4.3 Υπολογισμός χαρακτηριστικών κύματος στα βαθιά

Η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του κύματος είναι μια υπολογιστική διαδικασία που απαιτεί πολλά μετεωρολογικά δεδομένα. Η μέθοδος υπολογισμού των κυμάτων απλοποιείται εάν ληφθούν περιορισμοί ως προς την ανάπτυξη των κυματικών συνθηκών. Όσον αφορά τη δεύτερη περίπτωση διακρίνονται 3 κατηγορίες:

- 1) Συνθήκες fetch-limited: ο άνεμος πνέει για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα κατά μήκος του αναπτύγματος, ώστε να αναπτύσσονται οι μέγιστοι δυνατοί κυματισμοί για τις συγκεκριμένες συνθήκες
- 2) Συνθήκες duration-limited: τα ύψη κύματος δεν λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές καθώς περιορίζονται από τη διάρκεια πνοής του ανέμου
- 3) Συνθήκες πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας: τα κύματα δημιουργούνται από άνεμο μακράς διάρκειας που πνέει κατά μήκος μεγάλου αναπτύγματος πελάγους

Οι κυματισμοί που προκύπτουν από τις τελευταίες συνθήκες, είναι σχεδόν αδύνατο να εμφανιστούν στη φύση γι' αυτό δεν λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς για τη δημιουργία του δυσμενέστερου κύματος στην παρούσα εργασία.

Ο κυματικός σχεδιασμός έγινε σε υπολογιστικό φύλλο ακολουθώντας το μοντέλο SMB. Με το μοντέλο SMB υπολογίζονται το ύψος H_s και η περίοδος T_s του χαρακτηριστικού κύματος σαν μονοσήμαντες συναρτήσεις της ταχύτητας U του ανέμου, του αναπτύγματος πελάγου f και τη διάρκειας πνοής του ανέμου D . Αρχικά, στο υπολογιστικό πρόγραμμα εισήχθησαν οι μέσες ετήσιες συχνότητες εμφάνισης του κάθε ανέμου (f_e) όπως αυτές προκύπτουν από τον Πίνακα 4.2 σε μορφή πίνακα. Επιπλέον δεδομένο που αξιοποιήθηκε από το πρόγραμμα, είναι το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους του κάθε ανέμου. Ταυτόχρονα, εφαρμόζεται το ίδιο πρόγραμμα για συνθήκες fetch-limited, επιλέγοντας όμως ετήσια συχνότητα πνοής ανέμου 10% για όλες τις περιπτώσεις. Τελικά αξιοποιούνται τα χαρακτηριστικά των κυμάτων με συνθήκες fetch-limited, καθώς είναι δυσμενέστερα (Πίνακας 4.3).

Η διαδικασία που ακολούθησε το υπολογιστικό φύλλο και οι τύποι που εφάρμοσε περιγράφονται στη συνέχεια. Η βασική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι υπάρχει ένα κύμα, το οποίο κατά κάποιο τρόπο αντιπροσωπεύει τη διαταραχή της θαλάσσιας επιφάνειας (χαρακτηριστικό κύμα). Αντιστοιχεί προσεγγιστικά στο φυσικό κύμα, του οποίου το ύψος είναι δυνατόν να εκτιμηθεί από την ακτή.

Από την εξίσωση (2.1) εισάγοντας τα δεδομένα f_e , δίνεται η ετήσια διάρκεια πνοής του ανέμου

$$t_d = \frac{f_e}{100} * 365 * 24 * 3600 \quad (4.2)$$

Όπου το t_d δίνεται σε δευτερόλεπτα (sec)

Στη συνέχεια αναφέρονται οι εξισώσεις που εφαρμόζονται στο μοντέλο και ακολουθεί η περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού:

$$\frac{g^{H_s}}{U^2} = 0,283 \tanh(0,0125\Phi^{0,42}) \quad (4.3)$$

$$\frac{g^{T_s}}{U} = 7,540 \tanh(0,077\Phi^{0,25}) \quad (4.4)$$

$$\frac{g^{t_d}}{U} = 6,588 \exp\{0,0161(\ln\Phi)^2 - 0,369(\ln\Phi) + 2,2024\}^{0,5} + 0,8798(\ln\Phi) \quad (4.5)$$

Όπου Φ είναι ο συντελεστής αναπτύγματος πελάγους:

$$g f/U^2 \quad (4.6)$$

Με γνωστή τη διάρκεια πνοής ανέμου και το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους που αντιστοιχεί στον άνεμο, υπολογίζονται δύο συντελεστές αναπτύγματος πελάγους (Φ). Ο ένας δίνεται απευθείας από το Fetch της περιοχής (4.6) και ο δεύτερος από την εξίσωση (4.5) με δεδομένη τη διάρκεια πνοής. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών κύματος λαμβάνεται υπόψη ο μικρότερος από τους δύο.

Όταν ο συντελεστής Φ , που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών κύματος, υπολογίζεται από το πραγματικό fetch της περιοχής, τότε οι συνθήκες είναι fetch-limited. Στην περίπτωση που ο συντελεστής Φ στις εξισώσεις (4.3) και (4.4) υπολογίζεται από τη εξίσωση (4.5) τότε οι συνθήκες είναι duration-limited.

Σύμφωνα με αυτά παρατίθενται ο πίνακας υπολογισμού (Πίνακας 4.3) των παραμέτρων των χαρακτηριστικών κυμάτων για τις δύο διευθύνσεις των ανέμων που είναι δυσμενέστερες για την υπό μελέτη περιοχή.

Πίνακας 4.3: Δυσμενέστερες κυματικές συνθήκες

| | ΒΟΡΕΙΟΣ | | ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ | | ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ | |
|----------|------------------------|-------------|------------------|-------------|-------------|-------------|
| | Συνθήκες Fetch-limited | | | | | |
| Beaufort | Hmo(m) | Tp(sec) | Hmo(m) | Tp (sec) | Hmo(m) | Tp(sec) |
| 1 | 0,02 | 0,69 | 0,02 | 0,68 | 0,023 | 0,68 |
| 2 | 0,18 | 1,8 | 0,18 | 1,78 | 0,17 | 1,7 |
| 3 | 0,51 | 2,93 | 0,5 | 2,87 | 0,43 | 2,66 |
| 4 | 0,98 | 4,01 | 0,93 | 3,9 | 0,79 | 3,56 |
| 5 | 1,6 | 5,08 | 1,51 | 4,92 | 1,23 | 4,43 |
| 6 | 2,33 | 6,1 | 2,18 | 5,89 | 1,75 | 5,26 |
| 7 | 3,15 | 7,08 | 2,93 | 6,82 | 2,33 | 6,05 |
| 8 | 4,06 | 8,01 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 5,05 | 8,91 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Διεξήχθησαν μοντέλα για τις τρεις διευθύνσεις ανέμων που πλήττουν την περιοχή μελέτης. Με σκοπό μια καλύτερη προσέγγιση του κυματικού κλίματος της περιοχής μελέτης, κρίθηκε ορθό να μην ληφθούν υπόψη μόνο οι δυσμενέστεροι κυματισμοί κάθε ανέμου. Έτσι, σε κάθε διεύθυνση ανέμου, οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τους ανεμογενείς κυματισμούς από 5 έως 9 beaufort.

Στον Πίνακα 4.3 εμφανίζονται με μαύρο χρώμα τα έντεκα κυματικά σενάρια για τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι αριθμητικές προσομοιώσεις του κυματικού και υδροδυναμικού πεδίου στο πρόγραμμα MIKE 21.

5. ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ

Η στερεομεταφορά στο παράκτιο περιβάλλον έχει κυρίαρχη επίδραση στη μεταβολή του πυθμένα. Στον παράκτιο χώρο, όπου δρουν σε συνδυασμό τα κύματα και τα ρεύματα, η παροχή του φορτίου των φερτών υλών είναι ιδιαίτερα σημαντική. Η εκτίμηση της στερεομεταφοράς είναι συνεπώς καθοριστικός παράγοντας για τον ορθό σχεδιασμό των λιμενικών έργων και των έργων προστασίας ακτής.

Στερεομεταφορά ονομάζεται η κίνηση του παράκτιου φορτίου. Διακρίνεται σε κάθετη και παράλληλη (κατά μήκος) στην ακτή. Η στερεομεταφορά προκαλείται είτε ως φορτίο σε αιώρηση, είτε ως φορτίο πυθμένα. Το φορτίο σε αιώρηση δημιουργείται όταν οι κόκκοι του ιζήματος βρίσκονται σχεδόν συνέχεια σε αιώρηση στη στήλη νερού λόγω τύρβης. Η τύρβη παράγεται κοντά στον πυθμένα λόγω τριβής ή κοντά στην επιφάνεια λόγω θραύσης των κυματισμών. Ως φορτίο πυθμένα, χαρακτηρίζεται η κίνηση των κόκκων με κύλιση ή ολίσθηση στον πυθμένα, που συνεπάγονται περιοδική επαφή των κόκκων με τον πυθμένα (Μουτζούρης, 2005).

Κατά τη μεταφορά του ιζήματος εμφανίζονται και οι δύο τύποι φορτίων, αλλά είναι δύσκολο να διαχωριστεί σε ποιο σημείο το ίζημα από φορτίο πυθμένα μεταφέρεται σε αιώρηση. Αυτό που μπορεί να προσδιοριστεί είναι το είδος της κίνησης του υγρού, που ξεκινάει την κίνηση του ιζήματος.

Έτσι διακρίνουμε δύο ζώνες: τη ζώνη πριν τη θραύση όπου η μεταφορά του ιζήματος οφείλεται σε κυματογενείς κινήσεις και την ζώνη απόσβεσης όπου η έναρξη της κίνησης οφείλεται στην θραύση των κυματισμών. Σε γενικές γραμμές, η μεταφορά στη ζώνη απόσβεσης γίνεται κατά τις δύο συνιστώσες (κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή) ενώ στη ζώνη πριν τη θραύση η ύπαρξη παράλληλης μεταφοράς εξαρτάται από τη διεύθυνση προσπτώσεως των κυμάτων.

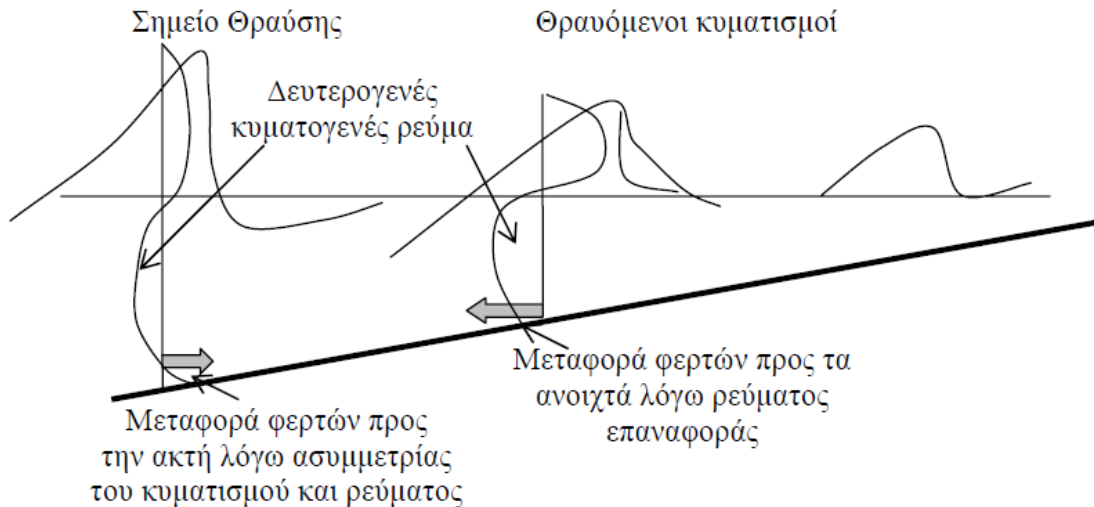
Στην ζώνη απόσβεσης, η τάση του νερού στον πυθμένα λόγω στροβιλισμών και της κλίσης της κυματογενούς ταχύτητας κινούν τα ιζήματα. Η στερεομεταφορά στη ζώνη αυτή οφείλεται και σε φορτίο αιώρησης και σε φορτίο πυθμένα. Το φορτίο αιώρησης προκαλείται γενικά

λόγω των κυματισμών, όμως στη συγκεκριμένη ζώνη παρατηρείται αύξηση του φορτίου αυτού, λόγω της ύπαρξης τύρβης από τη θραύση των κυμάτων. Όσο μεγαλώνει το μέγεθος της τύρβης, το αιωρούμενο υλικό αναμιγνύεται σε μεγαλύτερες κατακόρυφες αποστάσεις. Οι αποστάσεις αυτές είναι σχεδόν ίσες με το τοπικό βάθος. Συνεπώς, στη ζώνη αυτή παρατηρούνται μεγάλες ποσότητες φορτίου σε αιώρηση που καλύπτουν τα περισσότερα βάθη της ζώνης. Εφόσον τα θραυόμενα κύματα θέτουν σε αιώρηση το ίζημα, η ποσότητα του φορτίου προσδιορίζεται μερικώς από το είδος της θραύσης. Για παράδειγμα, από μετρήσεις έχει δειχθεί ότι η θραύση μετώπου συνήθως παράγει χαμηλότερες συγκεντρώσεις αιωρούμενου υλικού σε σχέση με τη θραύση στην κορυφή του κύματος. Η συνολική παροχή του φορτίου φερτών υλών είναι το άθροισμα της παροχής των δυο προαναφερθέντων φορτίων (Cem-III,2002).

Η μεταφορά φερτών κατά βάση οφείλεται στα πρωτογενή κυματογενή ρεύματα στη ζώνη θραύσης και στην κυματική ασυμμετρία (Καραμπάς, 2004):

- 1) Στην πρώτη περίπτωση η κυματική κίνηση των θραυόμενων και μη κυματισμών αυξάνουν τη διατμητική τάση του πυθμένα, προκαλώντας αποκόλληση των κόκκων, οι οποίοι στη συνέχεια μεταφέρονται προς την κατεύθυνση του ρεύματος.
- 2) Στην δεύτερη περίπτωση κάτω από την κορυφή του κύματος λόγω της κατεύθυνσης της ταχύτητας προς την ακτή, πραγματοποιείται μεταφορά φερτών προς αυτήν, ενώ κάτω από την κοιλία όπου η ταχύτητα είναι αντίθετης κατεύθυνσης, πραγματοποιείται στερεομεταφορά προς τα ανοιχτά. Η ασύμμετρη αυτή κίνηση των φερτών έχει συνολικό αποτέλεσμα τη στερεομεταφορά στη διεύθυνση μετάδοσης των κυματισμών. Από τις δύο αυτές κατευθύνσεις της στερεομεταφοράς υπερισχύει αυτή προς την ακτή καθ' ότι η ταχύτητα του κύματος κάτω από την κορυφή είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα κάτω από την κοιλία.
- 3) Διακρίνεται και μια τρίτη περίπτωση όπου η μεταφορά οφείλεται σε δευτερογενή κυματογενή ρεύματα: του τρισδιάστατου ρεύματος επαναφοράς με κατεύθυνση προς τα ανοιχτά και του ρεύματος κοντά στον πυθμένα, στο οριακό στρώμα του

κυματισμού με κατεύθυνση την κατεύθυνση μετάδοσης του κυματισμού (Σχήμα 5.1).



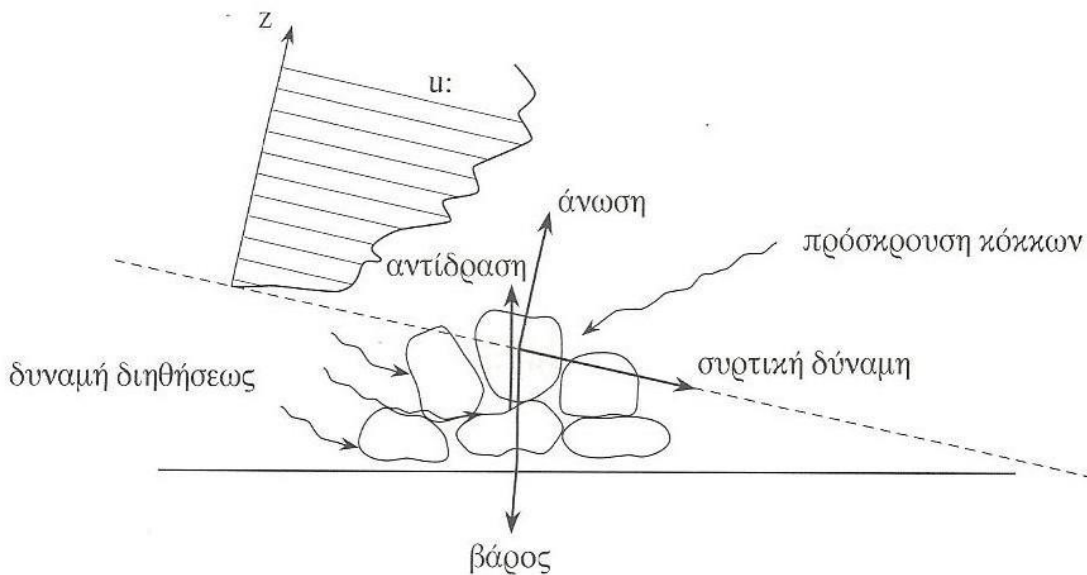
Σχήμα 5.1: Δευτερογενές ρεύμα εγκάρσια στην ακτή και μεταφορά φερτών (Καραμπάς, 2004)

5.1 Έναρξη κίνησης ιζήματος

Η έναρξη κίνησης ιζήματος θα συμβεί όταν ασκηθεί στον κόκκο μια δύναμη από το ρευστό, η οποία να ξεπερνά στιγμιαία τη δύναμη αντίστασης που σχετίζεται με το βάρος του κόκκου και το συντελεστή τριβής. Η θέση του κόκκου σε σχέση με τους περιβάλλοντες κόκκους (καλυπτόμενος από μικρότερα σωματίδια σε ακινησία ή κινούμενος ανάμεσα σε μεγαλύτερου μεγέθους σωματίδια) καθορίζει σημαντικά τις δυνάμεις κατά την έναρξη κίνησης ιζήματος (Rijn, 1995). Οι κινήσεις μπορούν να προέρχονται από επαλληλία κύματος και ρεύματος και συνεχίζονται όταν εκλείψουν τα γενεσιουργά αίτια ή συναντήσουν παράκτια εμπόδια. Η τροχιακή κίνηση των υγρών σωματιδίων θέτει σε κίνηση το ίζημα, που στη συνέχεια μεταφέρεται από το ρεύμα.

Σε φάση ηρεμίας τα ιζήματα ισορροπούν σε ορισμένες θέσεις. Η κατανομή των ιζημάτων και η βαθυμετρία στην παράκτια ζώνη αντανακλούν το βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο κλίμα κυμάτων και ρευμάτων στην περιοχή. Το κλίμα αντιπροσωπεύει μια ολόκληρη σειρά χαρακτηριστικών κυμάτων στα ανοιχτά.

Η μεταφορά ιζημάτων που πραγματοποιείται στο παράκτιο περιβάλλον αποτελείται κυρίως από κίνησή τους στη ζώνη θραύσης. Οι ορθές και οι διατμητικές τάσεις από το κινούμενο νερό, η αντίδραση στήριξης σε άλλους κόκκους, οι υδροδυναμικές υποπιέσεις λόγω διήθησης και οι δυνάμεις πρόσκρουσης άλλων κόκκων δημιουργούν τις κατάλληλες δυναμικές συνθήκες αποκόλλησης των επιφανειακών κόκκων του πυθμένα (Σχήμα 5.2). Η έναρξη κίνησης των κόκκων συνδέεται άμεσα με το πεδίο ταχυτήτων που επικρατεί κοντά στον πυθμένα.



Σχήμα 5.2: Έναρξη κίνησης ιζημάτων (Κουτιτάς, 1998)

Η έναρξη της κινήσεως εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη διατμητική τάση στον κόκκο. Όταν η διατμητική τάση υπερβεί μια οριακή κρίσιμη τιμή, πραγματοποιείται η αποκόλληση αυτών. Το κατώφλι της κίνησης υπολογίζεται με τη χρήση της παραμέτρου θ_c του Shields. Η τιμή της οποίας δίνεται από την εξίσωση (Καραμπάς, 2004):

$$\theta_c = \frac{\tau_{cr}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}} \quad (5.1)$$

- Το D_* είναι το αδιάστατο μέγεθος των κόκκων και δίνεται από την εξίσωση:

$$D_* = D_{50} \left(\frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (5.2)$$

Όπου D_{50} η μέση διάμετρος των κόκκων, ν το κινηματικό ιξώδες, Δ η σχετική πυκνότητα, $\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$, η ρ_s η πυκνότητα της άμμου και ρ η πυκνότητα του νερού.

Στον Πίνακα 5.1 δίδεται πως διαμορφώνεται η εξίσωση (5.1) για διάφορες τιμές του D_* .

Πίνακας 5.1: Τιμές του θ_c για την υπολογιζόμενη τιμή του D_*

| θ_c | D_* |
|--------------------|------------------|
| $0.24D_*^{-1}$ | $1 < D_* < 4$ |
| $0.14 D_*^{-0.64}$ | $4 < D_* < 10$ |
| $0.04 D_*^{-1}$ | $10 < D_* < 20$ |
| $0.013 D_*^{0.29}$ | $20 < D_* < 150$ |
| 0.055 | $D_* > 150$ |

- Η τ_{cr} είναι η κρίσιμη διατμητική τάση στον πυθμένα

Η διατμητική τάση στον πυθμένα από συνδυασμένη δράση κύματος ρεύματος δίνεται από την εξίσωση:

$$\tau_{cw} = \frac{1}{2} \rho f_{cw} u_b^2 \quad (5.3)$$

Όπου

- $f_{cw} = \lambda f_c + (1 - \lambda) f_w$ ο συντελεστής τριβής πυθμένα για συνδυασμό ρεύματος και κύματος
- $\lambda = \frac{u}{u + u_o}$ όπου u η ταχύτητα ρεύματος και $u_o = \pi \left(\frac{H}{T} \right) \sinh(kd)$ ταχύτητα ρευστού σωματιδίου στον πυθμένα λόγω κυματισμού
- $f_c = 2g/C^2$

- $C = 18 \log(12h/k_s)$ αριθμός Chezy ($m^{1/2}/s$)
- $f_w = \exp \left\{ 5.123 \left(\frac{k_s}{\xi} \right)^{0.19} - 5.977 \right\}$
- $\xi = \frac{u_o T}{2\pi}$ T περίοδος κυματισμού
- $k_s = 2.5D_{50}$
- η μέγιστη τιμή της οριζόντιας τροχιακής ταχύτητας στον πυθμένα (u_b): $u_{max} = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\sinh kd}$

Από τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίσθηκε η ταχύτητα του ρεύματος (u) ώστε να τεθεί το ίζημα σε κίνηση. Οι υπολογισμοί έγιναν για τους δυσμενέστερους κυματισμούς των τριών ανέμων. Ενδεικτικά θεωρήθηκε βάθος υπολογισμού ίσο με το βάθος στη ζώνη θραύσης, όπως αυτό υπολογίζεται βάσει του κριτηρίου $H_{mo,b}=0.6d$ (CEM II-4-10). Από την επίλυση των παραπάνω εξισώσεων χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τα χαρακτηριστικά του ιζήματος (Κεφάλαιο 3.2) και των κυμάτων στο συγκεκριμένο βάθος προκύπτει η ελάχιστη ταχύτητα ρεύματος, για την οποία η διατμητική τάση στο πυθμένα ισούται με την κρίσιμη. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραπάνω μεθοδολογίας.

Πίνακας 5.2: Η ταχύτητα ρεύματος ώστε να έχουμε έναρξη κίνησης ιζήματος

| | Βορειοανατολικός Άνεμος (NE) | Ανατολικός Άνεμος (E) | Βόρειος Άνεμος (N) |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| θ_{cr} | 0,03866 | | |
| D_{50} (m) | 0,00211 | | |
| g (m/s^2) | 9,81 | | |
| Δ | 1,5828 | | |
| ν (m^2/s) | 0,00000136 | | |
| D^* | 42,88 | | |
| P | 1,026 | | |
| ρ_s | 2,65 | | |
| τ_{cw} | 0,0013 | | |
| f_{cw} | 0,024 | 0,0176 | 0,0132 |
| Λ | 0,31 | 0,52 | 0,54 |
| f_c | 0,0037 | 0,0039 | 0,0033 |
| f_w | 0,0332 | 0,0325 | 0,0251 |
| u_o (m/s) | 0,18 | 0,2153 | 0,2554 |
| C ($m^{1/2}/s$) | 72,68 | 70,86 | 77,06 |
| L (m) | 43,5 | 34,3 | 75,1 |
| k_s (m) | 0,0053 | | |
| K | 0,144 | 0,183 | 0,084 |
| T (sec) | 6,817 | 6,048 | 8,907 |
| H (m) | 4,8 | 3,8 | 8,4 |
| ξ (m) | 0,198 | 0,207 | 0,362 |
| H | 0,53 | 0,55 | 0,95 |
| u_b | 0,355 | 0,379 | 0,439 |
| U | 0,0825 | 0,2339 | 0,3031 |

5.2 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής

Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής προκαλείται κυρίως από τη θραύση των κυματισμών υπό γωνία στην ακτογραμμή. Η μετατόπιση αυτή οφείλεται στην κατά μήκος της ακτής συνιστώσα κίνησης των κυμάτων και των ρευμάτων που δημιουργούνται από τους θραυόμενους κυματισμούς.

Η παροχή στερεομεταφοράς εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων και την ενέργειά τους. Ως παροχή στερεομεταφοράς προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά (Q_r, Q_l), ορίζεται η παροχή κμα που διέρχεται από μια εγκάρσια διατομή της ακτογραμμής με φορά προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά αντίστοιχα, για ένα παρατηρητή στην ακτογραμμή με μέτωπο στραμμένο προς τα ανοιχτά. Παροχή αθροιστικής στερεομεταφοράς καλείται το άθροισμα των παροχών στερεομεταφοράς κμα προς τα δεξιά και αριστερά $Q_g = Q_r + Q_l$. Ως Καθαρή παροχή, τέλος, προσδιορίζεται η διαφορά μεταξύ των παροχών στερεομεταφοράς των δύο διευθύνσεων $Q_g = |Q_r - Q_l|$ (Μουτζούρης, 2005).

Η μέθοδος CERC (Corps of Engineers Research Center) ή μέθοδος ροής ενέργειας, υπολογίζει το ολικό φορτίο (πυθμένα και αιώρησης) κατά μήκος της ακτής. Βασίζεται στην υπόθεση ότι η κατά μήκος μεταφορά Q εξαρτάται από την κατά μήκος συνιστώσα της ροής ενέργειας στη ζώνη απόσβεσης. Η ροή ενέργειας ανά μονάδα μήκους της κορυφογραμμής του κύματος ή ισοδύναμα η παροχή με την οποία η κυματική ενέργεια μεταφέρεται κατά μήκος ενός επιπέδου μοναδιαίου πλάτους κάθετα στην κατεύθυνση του κύματος, δίνεται από την εξίσωση (Μουτζούρης, 2005):

$$\bar{P} = \bar{E}C_g = \frac{\rho g}{8} H^2 C_g \quad (5.4)$$

Αν η κορυφογραμμή του κύματος σχηματίζει γωνία α με την ακτογραμμή, η ροή ενέργειας στην κατεύθυνση του κύματος ανά μονάδα μήκους ακτής είναι:

$$\bar{P} \cos \alpha = \frac{\rho g}{8} H^2 C_g \cos \alpha \quad (5.5)$$

Η συνιστώσα κατά μήκος είναι:

$$P_l = \bar{P} \cos a \sin a = \frac{\rho g}{8} H^2 C_g \cos a \sin a = \frac{\rho g}{16} H^2 C_g \sin 2a \quad (5.6)$$

Για τη γραμμή θραύσης ισχύει:

$$P_{ls} = \frac{\rho g}{16} H_b^2 C_{gb} \sin 2a_b \quad (5.7)$$

Όπου με δείκτη b προσδιορίζονται τα μεγέθη στη ζώνη θραύσης

Η παροχή κατά μήκος προκύπτει από την εφαρμογή της γραμμικής εμπειρικής σχέσης,

$$Q_l = cP_{ls} \quad (5.8)$$

Όπου $c=7,5 \cdot 10^3 \gamma d^3 / lb$ έτος, C_g η ταχύτητα ομάδας και H ύψος κύματος.

5.3 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή

Η εγκάρσια στερεομεταφορά περιλαμβάνει μεταφορά εκτός της παράκτιας περιοχής που προκαλείται κατά τη διάρκεια καταιγίδας και εντός της παράκτιας περιοχής η οποία κυριαρχεί κατά τη διάρκεια ήπιας κυματικής δραστηριότητας. Η υπεράκτια στερεομεταφορά είναι η απλούστερη και τείνει να συμβεί με μεγαλύτερη ταχύτητα και ως πιο τακτική διαδικασία με περισσότερη ή λιγότερη μεταφορά σε όλο το ενεργό προφίλ της ακτής. Αυτό είναι θετικό διότι η υπεράκτια στερεομεταφορά σχετίζεται περισσότερο με τα μηχανικά έργα, καθώς μπορεί να προκαλέσει βλάβες ενώ ταυτόχρονα ευθύνεται για την απώλεια γης. Στην παράκτια στερεομεταφορά, μέσα στην περιοχή που οριοθετείται από την υπεράκτια ζώνη, η κίνηση οφείλεται στη δράση των κυμάτων. Τα ιζήματα τίθενται σε κίνηση από την κάθετη συνιστώσα της τροχιακής κίνησης των υγρών σωματιδίων και στη συνέχεια μεταφέρονται από το κυματογενές ρεύμα. Η ολοκληρωμένη κατανόηση της κάθετης στην ακτή στερεομεταφοράς, περιπλέκεται από την ταυτόχρονη συνεισφορά του πυθμενικού και σε αιώρηση φορτίου. Ο διαχωρισμός μεταξύ των δύο εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων,

την κυματική ενέργεια, την ταχύτητα της ροής μεταφοράς και τη μορφή του πυθμένα (CEM-III-3,2008).

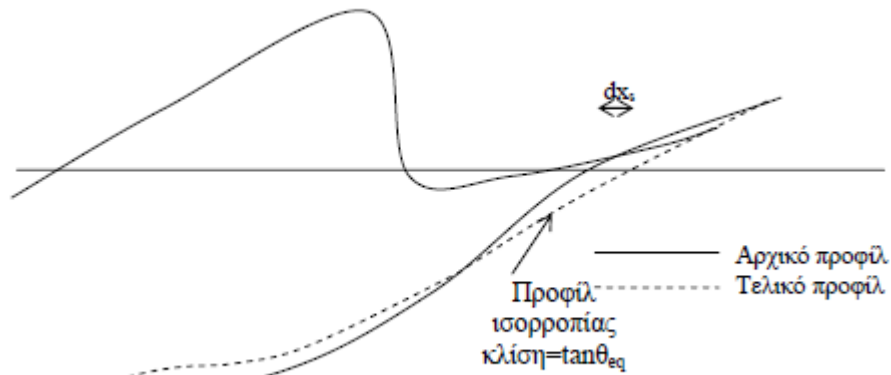
Η εγκάρσια στερεομεταφορά σχετίζεται με αρκετά ακτομηχανικά προβλήματα όπως: η απόκριση της παραλίας και των αμμοθινών στις καταιγίδες, η απόκριση της ακτογραμμής στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας, οι εποχιακές μεταβολές της ακτογραμμής, η ροή των ιζημάτων γύρω από τα παράκτια τεχνικά έργα και τα έργα αναπλήρωσης ακτής.

Πολλές διαφορετικές δυνάμεις στη παράκτια ζώνη επηρεάζουν τη κίνηση του ιζήματος και τη μεταβολή του προφίλ της παραλίας. Το μέγεθος των δυνάμεων διαφέρει σημαντικά μέσα και έξω από τη ζώνη απόσβεσης. Υπό συνθήκες ισορροπίας το προφίλ παραμένει λίγο πολύ σταθερό. Η στερεομεταφορά κάθετα στην ακτογραμμή πραγματοποιείται όταν οι υδροδυναμικές συνθήκες μέσα στην παράκτια ζώνη αλλάξουν.

Συναντώνται δύο προφίλ από τη δράση των κυματισμών και των κυματογενών ρευμάτων (Κουτιτάς, 1994):

1) χειμερινό προφίλ

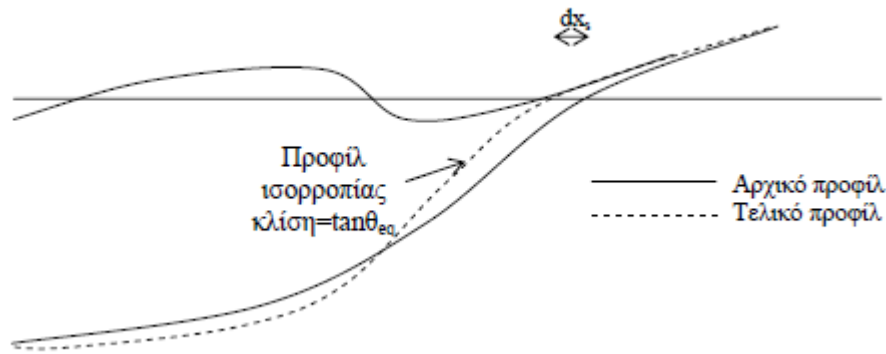
Οι κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας διαβρώνουν μέρος του υλικού του μετώπου της ακτής και τμήματος του βυθού μεταξύ γραμμής θραύσης και ακτογραμμής και το μεταφέρουν στη περιοχή θραύσης, δημιουργώντας έναν επιμήκη ύφαλο (longshore bar) παράλληλα προς την ακτή που έχει αποστολή τη θραύση των κυματισμών και τη μείωση του ύψους των διαδιδόμενων, πίσω από αυτόν, κυμάτων αποτελώντας μια προφυλακή της ακτής.



Σχήμα 5.3: Χειμερινό προφίλ –διάβρωση (κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας (Καραμπάς, 2004)

2) Θερινό προφίλ

Θερνοί κυματισμοί μικρής καμπυλότητας επαναφέρουν υλικό στο έξαλο μέτωπο της ακτής, μειώνοντας το ύψος του ύφαλου και εμπλουτίζουν την ακτή σε κοκκώδες υλικό.



Σχήμα 5.4: Θερινό προφίλ- πρόσχωση (κυματισμοί μικρής καμπυλότητας) (Καραμπάς, 2004)

6. ΕΡΓΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΗΣ

Οι παράκτιες κατασκευές χρησιμοποιούνται ως συστήματα άμυνας με στόχο να εμποδίσουν τη διάβρωση των ακτογραμμών και την πλημμύρα της ενδοχώρας. Άλλους στόχους αποτελούν η προφύλαξη των λιμενολεκανών και των εισόδων τους από τα κύματα, η σταθεροποίηση της ναυσιπλοΐας καθώς και η προστασία υδροληψιών και εκβολών. Τα έργα αναπλήρωσης ακτής είναι ακτομηχανικά έργα των οποίων βασικός σκοπός είναι η προστασία των ακτογραμμών από διάβρωση. Κατατάσσονται ανάλογα με τον προσανατολισμό του διαμήκους άξονα τους και την απόστασή τους από την ακτογραμμή στις παρακάτω κατηγορίες:

- 1) Θωράκιση μετώπου ακτής ή έργα στην ακτογραμμή
- 2) Έργα παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα σε απόσταση από την ακτογραμμή
- 3) Έργα κάθετα ή σχεδόν κάθετα ή υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή
- 4) Αναπλήρωση παράκτιας ζώνης

Έργα προστασίας ακτής των οποίων ο διαμήκης άξονας είναι παράλληλος προς την ακτογραμμή μπορούν να κατασκευαστούν είτε στο μέτωπο της ακτής είτε σε κάποια απόσταση από αυτήν. Δύο βασικές κατηγορίες των έργων σε απόσταση από την ακτή είναι οι κυματοθραύστες και οι φυσικοί αναβαθμοί. Τα έργα της πρώτης κατηγορίας είναι τεχνητά από διάφορα υλικά ενώ οι αναβαθμοί σχηματίζονται κατά βάση από φυσικές διεργασίες και αποτελούνται από λεπτόκοκκο ίζημα (Μουτζούρης, 2005).

6.1 Κυματοθραύστες

Οι κυματοθραύστες είναι έργα που αποσκοπούν στην προστασία των ακτών ή των δραστηριοτήτων κατά μήκος των ακτογραμμών από τη δράση των κυματισμών. Οι κυματοθραύστες κατασκευάζονται με σκοπό να μειώνουν τη δράση του κυματισμού στην

υπήνεμη περιοχή του έργου. Η δράση του κυματισμού μειώνεται μέσω συνδυασμού ανάκλασης και διάχυσης της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας. Όταν χρησιμοποιούνται για τους λιμένες, οι κυματοθραύστες κατασκευάζονται ώστε να δημιουργούν επαρκή ηρεμία λιμενολεκάνης για την ασφαλή αγκυροβόληση και την φορτοεκφόρτωση των πλοίων, καθώς και για τη προστασία των εγκαταστάσεων του λιμένος. Επίσης, βελτιώνουν τις συνθήκες για να πραγματοποιηθούν οι ελιγμοί των πλοίων στην είσοδο των λιμένων και ρυθμίζουν τη καθίζηση, κατευθύνοντας τα ρεύματα και δημιουργώντας περιοχές με διαφορετικά επίπεδα κυματικών διαταραχών. Τέλος, μπορούν να εφαρμοστούν για την προστασία υδροληψιών σταθμών παραγωγής ενέργειας και ακτογραμμών από κύματα tsunami. Οι κυματοθραύστες που λειτουργούν ως έργο προστασίας ακτής, τοποθετούνται στην παράκτια ζώνη και συνήθως είναι προσανατολισμένοι παράλληλα στην ακτή, όπως οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες.

Οι κυματοθραύστες επιτυγχάνουν μείωση της ενέργειας των κυματισμών με την παρακάτω διαδικασία. Ένα μέρος της ενέργειας του κύματος θα ανακλαστεί και θα δημιουργήσει ένα κύμα που θα επιστρέψει στο πέλαγος. Ένα άλλο ποσοστό της ενέργειας θα καταστραφεί σε συγκρούσεις μεταξύ των μορίων (καθώς αυτά ακολουθούν διαφορετικές τροχιές γύρω από τα φυσικά υλικά κατασκευής των μετώπων του κυματοθραύστη και συναντιούνται) ή και θα δαπανηθεί σε τριβές των μορίων πάνω στις επιφάνειες των υλικών του πρανούς. Ένα άλλο μέρος της ενέργειας θα αποθηκευτεί στη μάζα του νερού που μπαίνει μέσα στα κενά του σώματος του κυματοθραύστη και θα διαβιβασθεί στη μάζα του νερού που βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά του. Τέλος, το υπόλοιπο ποσοστό θα αποθηκευθεί στη μάζα του κύματος που θα υπερπηδήσει τον κυματοθραύστη (Δασκαλάκη, 2009).

Αυτή η διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη να δημιουργείται ηπιότερο κυματικό κλίμα. Ταυτόχρονα μειώνεται και η ικανότητα μεταφοράς ιζήματος πίσω από το κυματοθραύστη. Η θραύση του κυματισμού και η υπερπήδηση σημαίνει, επίσης, ότι θα έχουμε μεταφορά μάζας νερού πάνω από τη κατασκευή. Προφανώς,

η μετάδοση του κύματος, η μεταφορά μάζας νερού και η μείωση της στερεομεταφοράς συνδέονται με το ύψος της στέψης της κατασκευής, το πλάτος και το ύψος κύματος.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυματοθραυστών από τους οποίους ο πιο διαδεδομένος είναι ο αποσπασμένος κυματοθραύστης. Άλλοι τύποι κυματοθραυστών είναι οι πλωτοί και οι ειδικού τύπου κυματοθραύστες. Οι παράμετροι που καθορίζουν τις επιπτώσεις στην ακτογραμμή και βάσει αυτών γίνεται ο σχεδιασμός των συστημάτων των κυματοθραυστών είναι:

- 1) Με Εκτεθειμένη /βυθισμένη στέψη, πλωτοί
- 2) Απόσταση από την ακτογραμμή και θέση ως προς τη ζώνη θραύσης
- 3) Μήκος και προσανατολισμός
- 4) Μεμονωμένος κυματοθραύστης ή σύστημα κυματοθραυστών
- 5) Ειδικά σχήματα

6.1.1 Αποσπασμένοι κυματοθραύστες

Οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες χρησιμοποιούνται ως μέτρα προστασίας ακτής. Είναι μικρές, σχετικά βραχείες κατασκευές που δε συνδέονται με την ακτογραμμή, σχεδιάζονται παράλληλα με την ακτογραμμή σε σχετικά μικρά βάθη. Σε γενικές γραμμές ένα αποσπασμένος κυματοθραύστης είναι μια κατασκευή παράλληλη στην ακτή που τοποθετείται εντός ή κοντά στη ζώνη απόσβεσης. Κάθε κυματοθραύστης αντανακλά και διαχέει μέρος της ενέργειας των προσπιπτόντων κυμάτων, με αποτέλεσμα τη μείωση του ύψους κύματος στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής και μείωση της διάβρωσης της ακτής. Το ίζημα που μεταφέρεται κατά μήκος της ακτής παγιδεύεται στη περιοχή που προστατεύεται από τον κυματοθραύστη.

Η θέση των κυματοθραυστών ελέγχει τον τρόπο λειτουργίας τους. Οι κυματοθραύστες ανάλογα με τη θέση τους σε σχέση με την ζώνη απόσβεσης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Στη συνέχεια αναφέρονται οι τρεις θέσεις που τοποθετούνται οι

κυματοθραύστες οι οποίες προσδιορίζονται από την αδιάστατη απόσταση του κυματοθραύστη (x^*) (Magnor, 2013).

- $x^* = x/x_{80}$

όπου x : απόσταση κυματοθραύστη από ακτογραμμή

x_{80} : πλάτος ζώνης απόσβεσης όπου πραγματοποιείται το 80% της στερεομεταφοράς

1) Υπεράκτιοι κυματοθραύστες (offshore breakwaters)

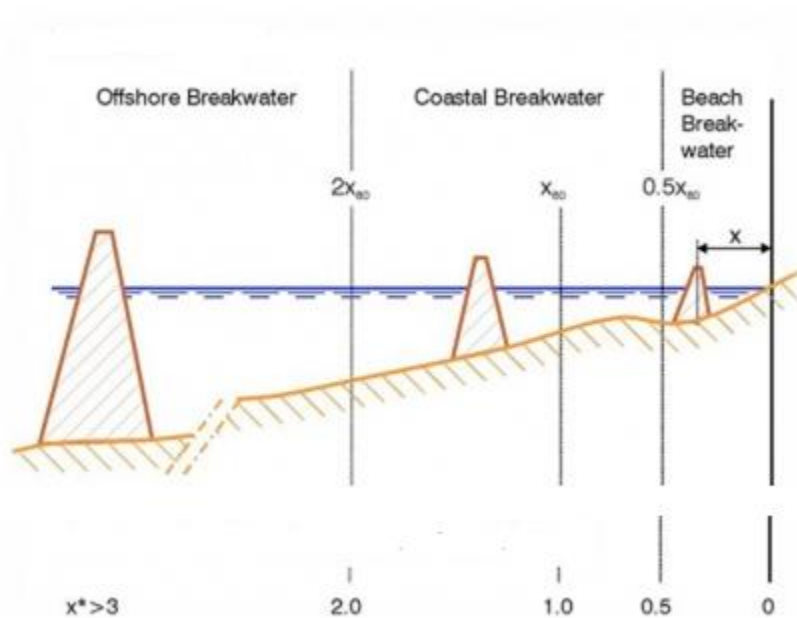
Οι υπεράκτιοι κυματοθραύστες τοποθετούνται μακριά από τη ζώνη απόσβεσης με $x^* > 3$. Ο σκοπός αυτών των κυματοθραυστών είναι να προστατεύσει έναν προβλήτα από τη κυματική δράση, πράγμα που σημαίνει ότι ο υπεράκτιος κυματοθραύστης είναι ένας ειδικός τύπος λιμένος. Χρησιμοποιείται όταν η παράκτια κατατομή είναι πολύ επίπεδη. Σε τέτοιες περιοχές ένας παραδοσιακού τύπου λιμένας θα έπρεπε να επεκταθεί σε μεγάλη απόσταση από την ακτή ενώ ταυτόχρονα θα έπρεπε να πραγματοποιηθούν εκτεταμένες βυθοκορήσεις ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση στον λιμένα. Η φιλοσοφία πίσω από ένα υπεράκτιο κυματοθραύστη είναι να παρέχει καταφύγιο σε έναν προβλήτα, να ελαχιστοποιηθούν οι καθιζήσεις στη περιοχή κοντά στην ακτή και να μειωθούν οι επιπτώσεις στην ακτογραμμή. Εντούτοις, στην πράξη έχει δειχθεί ότι αυτές οι κατασκευές προκαλούν συσσώρευση ιζήματος στην υπήνεμη ζώνη με αποτέλεσμα τη διάβρωση των παρακείμενων περιοχών. Συνεπώς τέτοια έργα δε μπορούν να εφαρμοστούν για τη διαχείριση ακτογραμμών.

2) Παράκτιοι κυματοθραύστες (coastal breakwaters)

Οι παράκτιοι κυματοθραύστες τοποθετούνται μέσα σε μια απόσταση από την ακτογραμμή που κυμαίνεται από το μισό του πλάτους της ζώνης απόσβεσης έως το διπλάσιο του πλάτους της ($2 > x^* > 0,5$). Αυτού του είδους οι κυματοθραύστες παγιδεύουν το ίζημα στην υπήνεμη περιοχή, προστατεύοντας έτσι το τμήμα της ακτογραμμής στη σκιά των έργων από τη διάβρωση.

3) Κυματοθραύστες κοντά στην ακτή (beach breakwaters)

Οι συγκεκριμένοι κυματοθραύστες κατασκευάζονται σε απόσταση μικρότερη από το μισό του πλάτους της ζώνης απόσβεσης $x^* < 0,5$. Λειτουργούν παγιδεύοντας το ίζημα στην ακτογραμμή χωρίς να παρεμβαίνουν σημαντικά στον τρόπο κίνησης του ιζήματος στην περιοχή. Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται οι τύποι κυματοθραυστών που αναφέρθηκαν.

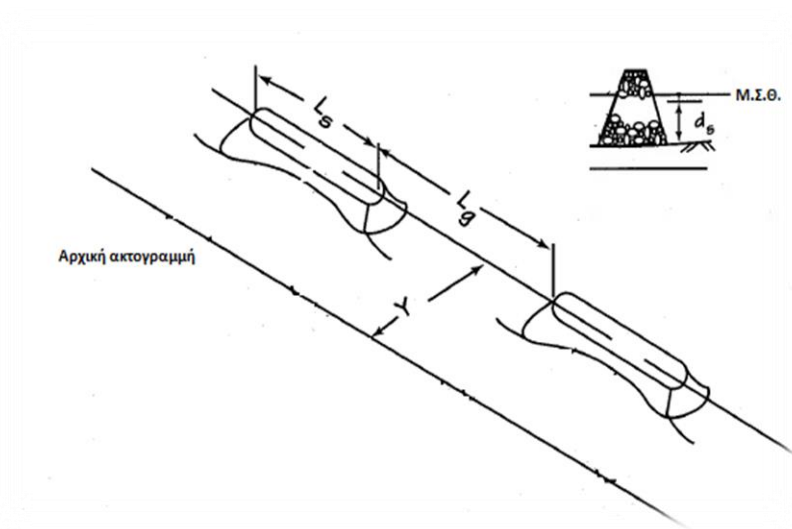


Σχήμα 6.1: Τύποι κυματοθραυστών ως προς την απόσταση από την ακτογραμμή (πηγή: (Magnor, 2013))

6.1.2 Τοποθέτηση κυματοθραυστών

Ένας αποσπασμένος κυματοθραύστης μπορεί να χαρακτηριστεί από διάφορες παραμέτρους. Από τις οποίες οι πιο σημαντικές είναι:

- 1) L_s μήκος στέψης κυματοθραύστη
- 2) Y απόσταση κυματοθραύστη από την ακτογραμμή
- 3) L_g απόσταση γειτονικών κυματοθραυστών
- 4) d_s μέσο βάθος έργου κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας



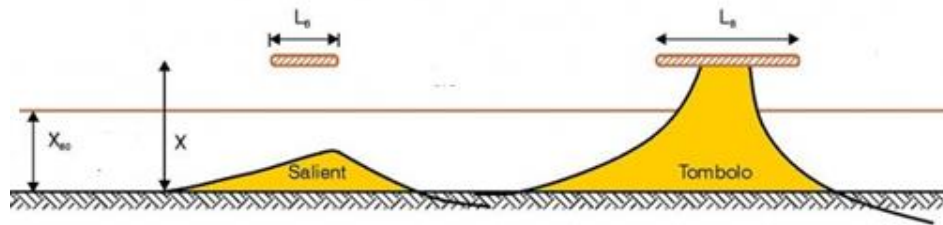
Σχήμα 6.2: Σχηματική απεικόνιση των μεγεθών που αναφέρθηκαν (πηγή: (CEM-V-3,2008))

Από τις παραπάνω παραμέτρους εξαρτάται ο σχηματισμός του ιζήματος που θα συσσωρευθεί. Οι σχηματισμοί που συναντώνται είναι δύο:

- 1) salient: στον τύπο αυτό σχηματίζονται προεξοχές κωνοειδούς μορφής στην ακτή στη σκιά των έργων σε μορφή καμπάνας

- 2) tombolo: στον τύπο αυτό δημιουργείται μια γεωμορφή αμμώδους σύστασης στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη που τον συνδέει την ακτή.

Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζονται οι δύο τύποι συσσώρευσης του ιζήματος.



Σχήμα 6.3: Μορφές salient και tombolo (πηγή: (Magnor, 2013))

Ο σχηματισμός salient προτιμάται ως αποτέλεσμα της λειτουργίας των κυματοθραυστών καθώς επιτρέπει την κίνηση του ιζήματος κατά μήκος της ακτής. Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής συνεχίζεται μέσω του προστατευόμενου από τα έργα τμήματος της ακτογραμμής και καταλήγει στην κατάντη περιοχή των έργων. Ο σχηματισμός αυτός υπερσχύει όταν το έργο είναι:

- αρκετά απομακρυσμένο από την ακτή,
- μικρότερου μήκους σε σχέση με το μήκος κύματος του προσπίπτοντος κυματισμού
- σχετικά διαπερατό (χαμηλή στέψη ή μεγάλα κενά που επιτρέπουν μικρής ποσότητας στερεομεταφορά).

Όσον αφορά το σχηματισμό tombolo, επικρατεί σε ακτογραμμές όπου τα έργα:

- είναι τοποθετημένα πολύ κοντά στην ακτή
- έχουν μήκος μεγαλύτερο του μήκους κύματος
- είναι αδιαπέρατα (υψηλή στέψη, αδιαπέρατο υλικό κατασκευής).

Γενικά, η δράση των κυματισμών και η ύπαρξη ρευμάτων κατά μήκος της ακτής εμποδίζουν το σχηματισμό salient να μετατραπεί σε tombolo, δηλαδή η ακτή να έρθει σε επαφή με τα έργα. Αντίστροφα, ο σχηματισμός tombolo σε συνδυασμό με τον αποσπασμένο κυματοθραύστη λειτουργούν ως πρόβολος σε σχήμα T, ανακόπτοντας τη κατά μήκος στερεομεταφορά, προωθώντας την προς τα ανοιχτά και δημιουργώντας βελοειδή ρεύματα. Η διακοπή της κατά μήκος στερεομεταφοράς έχει ως συνέπεια την διάβρωση της κατάντη των έργων περιοχής.

Η πρόβλεψη του σχηματισμού που θα προκαλέσει το έργο είναι αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού του. Για το διαχωρισμό των δύο σχηματισμών σε σχέση με τις παραμέτρους του έργου που αναφέρθηκαν προηγουμένως αναδεικνύονται τρεις αδιάστατοι λόγοι: Y/d_s , L_s/L_g , L_s/Y .

Από το CEM-V-3 (2008) ,σύμφωνα με τους Dally and Pope, για το σχηματισμό tombolo προτείνονται:

$$\text{Μοναχικός αποσπασμένος κυματοθραύστης: } \frac{L_s}{Y} = 1.5 \div 2 \quad (6.1)$$

$$\text{Σύστημα κυματοθραυστών: } \frac{L_s}{Y} = 1.5 \quad L \leq L_g \leq L_s \quad (6.2)$$

όπου L το μήκος κύματος στη θέση του έργου

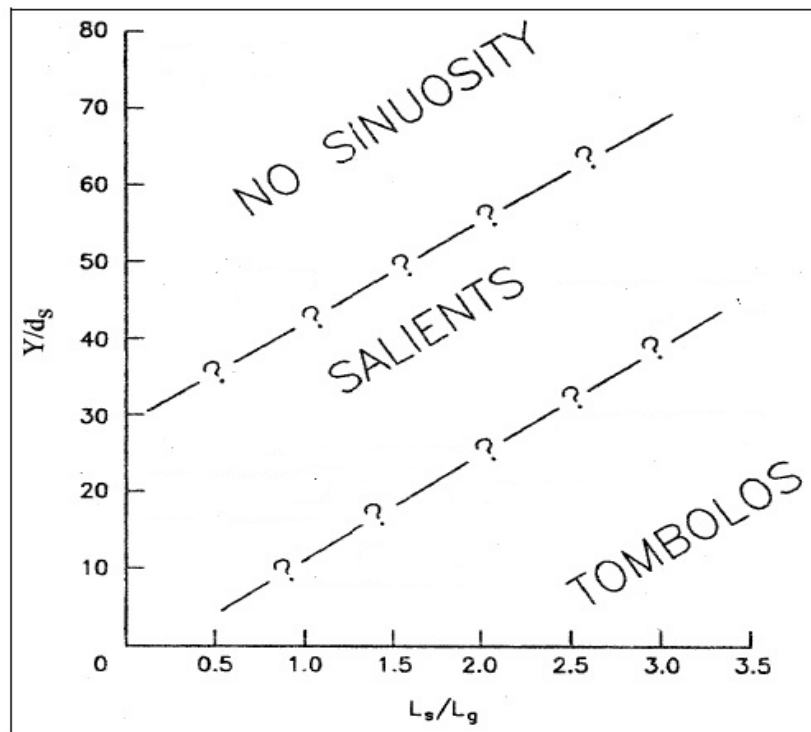
$$\text{Από τους ίδιους για σχηματισμό salient προτείνεται και για μεμονωμένους και για κατά διαστήματα κυματοθραύστες να ισχύει: } \frac{L_s}{Y} = 0.5 \div 0.67 \quad (6.3)$$

$$\text{Στις περιπτώσεις όπου το σύστημα κυματοθραυστών εκτείνεται σε μεγάλη απόσταση ο λόγος συστήνεται να λαμβάνει την τιμή: } \frac{L_s}{Y} = 0.125 \quad (6.4)$$

$$\text{Σε πολλές αναφορές ως ικανή συνθήκη για tombolo θεωρείται όταν } \frac{L_s}{Y} > 1 \div 2 \quad (6.5)$$

$$\text{Αντίθετα για salient πρέπει } \frac{L_s}{Y} < 1 \quad (6.6)$$

Το Σχήμα 6.4 διαμορφώθηκε από παρατηρήσεις σε ήδη υπάρχοντα έργα και συσχετίζει τους λόγους L_s/L_g και Y/d_s .



Σχήμα 6.4: Συσχέτιση των αδιάστατων λόγων L_s/L_g και Y/d_s από έργα παράκτιων κυματοθραυστών (πηγή: CEM-V-3,2008)

Στην περίπτωση των ύφαλων ή χαμηλής στέψης κυματοθραυστών, όπου είναι επιθυμητό να συμπεριληφθεί η καταβύθιση προτείνεται από τον Pilarczyk (2003), ως πρώτη προσέγγιση, ένας επιπρόσθετος παράγοντας $1-K_t$ στα ήδη υπάρχοντα κριτήρια.

Συνεπώς τα κριτήρια τροποποιούνται για τους κυματοθραύστες χαμηλής στέψης ως εξής:

$$\text{Tombolo: } \frac{L_s}{Y} > (1 \div 1.5)/(1 - K_t) \quad (6.7)$$

$$\text{Salient: } \frac{L_s}{Y} < 1/(1 - K_t) \quad (6.8)$$

$$\text{Salient για σύστημα κυματοθραυστών: } \frac{L_g Y}{L_s^2} > 0.5(1 - K_t) \quad (6.9)$$

$$\text{Το πλάτος του κενού συνήθως είναι } L \leq L_g \leq 0.8L_s \quad (6.10)$$

$$\text{Όπου το μήκος κύματος στην περιοχή του έργου ορίζεται ως } L = T(gh)^{0.5} \quad (6.11)$$

Και T η περίοδος κύματος και h τοπικό βάθος στον κυματοθραύστη.

Τα κριτήρια αυτά λειτουργούν για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ενός μοναχικού διαπερατού κυματοθραύστη. Το φάσμα των δεδομένων επαλήθευσης είναι πολύ μικρό για να επιτρέψει την εκτίμηση των ύφαλων κυματοθραυστών βάσει της προσέγγισης αυτής.

Ο συντελεστής μετάδοσης ορίζεται ως ο λόγος $K_t = H_t/H_i$ με H_i το ύψος προσπίπτοντος κύματος στο προσήνεμο μέτωπο του έργου και H_t το ύψος του μεταδιδόμενου κύματος στην υπήνεμη περιοχή. Στα κριτήρια 6.7÷6.9 είναι ορισμένος για τις ετήσιες κυματικές συνθήκες. Οι τιμές του συντελεστή μετάδοσης κυμαίνονται από 0 έως 1, όπου η τιμή μηδέν υπονοεί καμία μετάδοση κυματισμού (αδιαπέρατος, υψηλός κυματοθραύστης) ενώ η τιμή 1 σημαίνει απουσία κυματοθραύστη, ολική μετάδοση κυματισμού. Στους παράγοντες που καθορίζουν το βαθμό μετάδοσης κυματισμού περιλαμβάνονται: ύψος και πλάτος στέψης, κλίση έργου, πυρήνας και υλικό θωράκισης, παλίρροια και στάθμη σχεδιασμού, ύψος και περίοδος κύματος. Όσο η μετάδοση των κυματισμών αυξάνεται, η επίδραση της περίθλασης μειώνεται, έτσι το μέγεθος της συσσώρευσης της άμμου μειώνεται καθώς τα ρεύματα λόγω περίθλασης που μετακινούν το ίζημα στην σκιά του έργου αποδυναμώνονται.

Σύμφωνα με την εξίσωση των d Angremond & Van der Merr&de Jong (1996) για έξαλους και ύφαλους κυματοθραύστες ισχύει (Pilarczyk, 2003):

$$K_t = -\frac{0.4R_c}{H_i} + \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.31} [1 - \exp(-0.5\xi)] C \quad (6.12)$$

$$\xi = \tan \theta / \left(\frac{H_i}{L_o}\right)^{0.5} \quad (6.13)$$

R_c η στέψη του έργου

B το πλάτος στέψης

H_i ύψος προσπίπτοντος κύματος

C αριθμητικοί συντελεστές ($C=0.64$ για διαπερατά έργα και $C=0.80$ για αδιαπέρατα έργα)

Οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία στις ακτές όπου το παλιρροιακό εύρος είναι αμελητέο ή μικρό. Προσφέρουν σημαντικά οφέλη, συγκριτικά με τους προβόλους, όταν εφαρμόζονται σε ευρείες προάκτιες περιοχές με ψιλή άμμο όπου ο κυρίαρχος μηχανισμός στερεομεταφοράς είναι κάθετος στην ακτογραμμή.

Υπάρχουν δύο συνιστώσες μεταφοράς ιζήματος:

- 1) Στερεομεταφορά ως αποτέλεσμα θραύσης κύματος λοξά από την ακτογραμμή
- 2) Στερεομεταφορά από ρεύματα που προκαλούνται από τις κλίσεις του ύψους κύματος

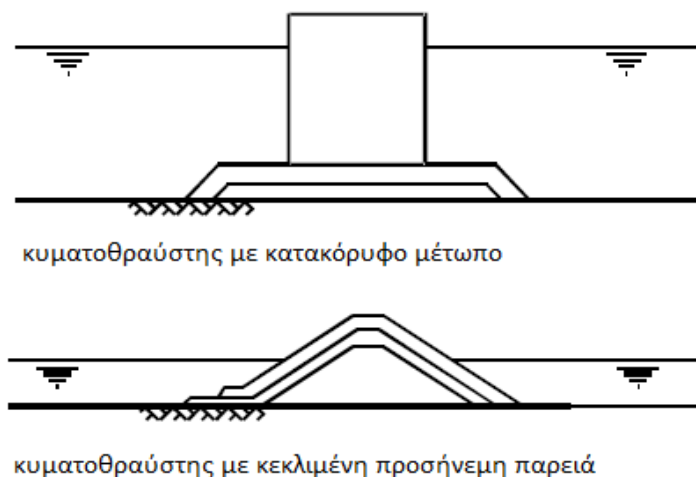
Ο σχηματισμός tombolo μπορεί να επιτραπεί εάν

- 1) Η διάβρωση κατάντη του έργου δεν απαιτεί στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής
- 2) Απαιτείται η παραλία πίσω από το έργο να αξιοποιηθεί ως τουριστικό θέρετρο

Το ενδιάμεσο κενό δυο κυματοθραυστών είναι συνάρτηση της απαιτούμενης μείωσης της ενέργειας του παράκτιου κύματος ώστε να προστατευτεί το μέτωπο της ακτής ή να εμποδιστεί η απώλεια υλικού. Η μείωση της ενέργειας δεν επηρεάζεται μόνο από το κενό αλλά και από το ύψος στέψης του κυματοθραύστη. Η παράταξη σε σειρά των κυματοθραυστών δεν πρέπει απαραίτητα να είναι παράλληλη στην τοπική ακτογραμμή, ειδικά αν υπάρχει μια κυρίαρχη κατεύθυνση κυματισμού ή περιορισμένο εύρος κυματικών κατευθύνσεων. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι προτιμότερο τα έργα να τοποθετηθούν παράλληλα στο μέτωπο των κυμάτων. Τα ρεύματα παράλληλα στην ακτή, τα οποία μπορούν να περάσουν ανάμεσα των κυματοθραυστών και της ακτής, είναι δυνατόν να αναιρέσουν τη δράση του κυματογενούς ρεύματος και να οδηγήσουν σε έκπλυση του υλικού πίσω από τη κατασκευή. Οι επιπτώσεις του φαινομένου αυτού μπορούν να μειωθούν ή να εξαλειφθούν με τη δημιουργία σύνδεσης του κυματοθραύστη με την ακτή. Ένας τρόπος να επιτευχθεί αυτό είναι η κατασκευή ύφαλου έργου. Εάν οι κυματοθραύστες είναι τοποθετημένοι έτσι ώστε να ευνοείται ο σχηματισμός tombolo, πρέπει να ληφθούν υπόψη μέτρα ασφαλείας καθ' ότι θα υπάρχει πλήρης πρόσβαση του κοινού στη κατασκευή (CIRIA;CUR:CETMEF, 2007).

6.2 Διατομές κυματοθραυστών

Οι κυματοθραύστες διακρίνονται σε δύο κατηγορίες σε σχέση με τη κλίση του μετώπου: α) κυματοθραύστες με κεκλιμένη προσήνεμη παρειά και β) με κατακόρυφο μέτωπο (Σχήμα 6.5). Οι κυματοθραύστες με κεκλιμένη παρειά στις περισσότερες περιπτώσεις είναι κατασκευές με πρανή διαμορφωμένα με φυσικούς ή τεχνητούς ογκολίθους, με ή χωρίς έργα υπερπήδησης. Τα έργα με κατακόρυφο μέτωπο είναι συνήθως κατασκευασμένα με σκυροδετημένα κιβώτια με άμμο ως υλικό πλήρωσεως.



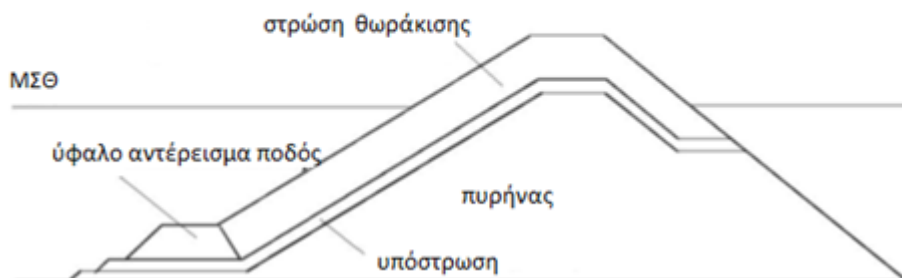
Σχήμα 6.5: Τυπικές διατομές κυματοθραύστη με κεκλιμένο ή κατακόρυφο μέτωπο (πηγή: CIRIA;CUR:CETMEF, 2007)

Κυματοθραύστες με κεκλιμένα πρανή είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος κυματοθραυστών (rubble-mound breakwaters). Τα πρανή αποτελούνται από λιθορριπές με συνεχώς αυξανόμενη διάμετρο και βάρος λίθων από τον πυρήνα προς την επιφάνεια. Στην πιο απλή του μορφή είναι ανάχωμα από ογκολίθους. Μια συμβατική διατομή με κεκλιμένες παρειές συνίσταται από ένα πυρήνα με λεπτόκοκκο υλικό καλυμμένο από μεγαλύτερους ογκολίθους σχηματίζοντας έτσι μια στρώση θωράκισης. Για να αποτραπεί η απόπλυση του λεπτόκοκκου υλικού μέσω της στρώσης θωράκισης, προβλέπεται να υπάρχουν ενδιάμεσες στρώσεις με μικρότερο μέγεθος ογκολίθων από τις στρώσεις θωράκισης που λειτουργούν ως φίλτρα. Η στρώση κάτω από τη στρώση θωράκισης ονομάζεται υπόστρωση. Στο χαμηλότερο κομμάτι

της στρώσης θωράκισης συνήθως διαμορφώνεται ένα μικρού πλάτους οριζόντιο κατάστρωμα από λίθους της δεύτερης στρώσης και ονομάζεται ύφαλο αντέρεισμα ποδός (toe berm). Το στοιχείο αυτό στηρίζει τη θωράκιση έναντι ολίσθησης ενώ δε τοποθετείται στα έργα που κατασκευάζονται σε μικρά βάθη. Τυπική διατομή συμβατικού κυματοθραύστη με κεκλιμένες παρειές δίνεται στο Σχήμα 6.6. Εκτός από τους φυσικούς ογκόλιθους μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις στρώσεις θωράκισης τεχνητοί ογκόλιθοι συνήθως από άοπλο σκυρόδεμα που προκατασκευάζονται σε τυποποιημένα σχήματα. Χρησιμοποιούνται για έργα σε περιοχές με έντονες κυματικές συνθήκες, όταν απαιτείται μεγαλύτερο βάρος ογκολίθων από αυτό που διατίθεται από το λατομείο. Οι κυματοθραύστες με κεκλιμένα πρανή μπορούν να κατασκευαστούν και ύφαλοι, δηλαδή η στέψη τους να είναι βυθισμένη.

Άλλος τύπος κυματοθραύστη είναι ο αναδιαμορφώσιμος κυματοθραύστης διαβαθμισμένου υλικού (reshaping rubble-mound breakwater). Ο σχεδιασμός του βασίζεται στην φυσική προσαρμογή του προσήνεμου μετώπου του στην κυματική δράση όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7. Έτσι, αποκτάει η διατομή το πιο αποδοτικό προφίλ για δεδομένα μέγεθος και ποσότητα ογκολίθων. Ο κυματοθραύστης με τέτοιου τύπου διατομή μπορεί να κατασκευαστεί αρκετά απλά, απορρίπτοντας αρχικά το υλικό του πυρήνα και εν συνεχεία τους λίθους θωράκισης, σχηματίζοντας έτσι ένα τεθλασμένο προφίλ με κλίση στην προσήνεμη παρειά ίση με τη γωνία τριβής του υλικού. Εξαιτίας της φυσικής προσαρμογής της διατομής επιτρέπεται η χρήση μικρότερου μεγέθους λίθων θωράκισης συγκριτικά με τις διατομές συμβατικού τύπου.

ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗΣ ΜΕ ΠΡΑΝΗ



Σχήμα 6.6: Τυπική διατομή κυματοθραύστη με κεκλιμένα πρανή (πηγή:CEM)



Σχήμα 6.7: Κυματοθραύστης με αναμορφώσιμο πρανές

6.2.1 Διαστασιολόγηση διατομής κυματοθραύστη

Προτείνονται τρεις διατάξεις κυματοθραυστών, των οποίων ο σχεδιασμός βασίζεται στα κριτήρια σχεδιασμού καθώς στα χαρακτηριστικά που εμφανίζουν τα ρεύματα στην περιοχή, όπως αυτά παρουσιάζονται και αναλύονται στο κεφάλαιο 8.

Η ευστάθεια των λίθων θωράκισης απέναντι στις φορτίσεις των κυμάτων διασφαλίζεται με χρήση ημιεμπειρικών σχέσεων που δίδουν το βάρος των ογκολίθων. Η διαστασιολόγηση της διατομής των κυματοθραυστών έγινε βάση του τύπου Hudson (Μέμος, 2008):

$$B = \frac{\gamma \times H^3}{K_D \times (\delta - 1)^3 \times \cot \theta} \quad (6.14)$$

Ενώ το πάχος των ζωνών θωράκισης και υπόστρωσης καθώς και το πλάτος της στέψης υπολογίσθηκαν από την εξίσωση:

$$r = nk_{\Delta} \left(\frac{B_{\text{υπ}}}{\gamma} \right)^{1/3} \quad (6.15)$$

Ο δυσμενέστερος κυματισμός στην περιοχή μελέτης προκαλείται από το Βορειοανατολικό άνεμο των 7 beaufort. Από τα αποτελέσματα του μοντέλου PMS βρέθηκε το μέγιστο ύψος κύματος στο μέτωπο του έργου.

Για θωράκιση με φυσικούς ογκόλιθους η τιμή της μέγιστης υπερύψωσης δίδεται με την παρακάτω εξίσωση σε συνάρτηση με τα προσπίπτοντα κύματα: (Μουτζούρης, 2005)

$$\frac{\max R}{H} = \frac{0.96}{0.4 + \left(\frac{H}{L_0}\right)^{0.5} \times \cot \theta} \quad (6.16)$$

6.2.2 Διαστασιολόγηση ύφαλων κυματοθραυστών

Τα έργα χαμηλής ή βυθισμένης στέψης όπως οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες και τα τεχνητά ύφαλα είναι αρκετά εφαρμόσιμα ως μέτρα παράκτιας προστασίας (χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή και σε συνδυασμό με τεχνητή αναπλήρωση ακτής). Ο σκοπός τους είναι η μείωση του υδραυλικού φορτίου σε ένα επιθυμητό επίπεδο ώστε να διατηρείται το δυναμικό ισοζύγιο της ακτογραμμής. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, οι κυματοθραύστες σχεδιάζονται ώστε να επιτρέπουν μετάδοση συγκεκριμένου ποσού κυματικής ενέργειας. Για τους έξαλους αυτό επιτυγχάνεται με την υπερπήδηση πάνω από την κατασκευή και με μερική μετάδοση μέσω των πόρων της κατασκευής. Αντίστοιχα για τους ύφαλους πραγματοποιείται με τη θραύση κυματισμών και την καταστροφή της ενέργειας λόγω της ρήξης της στέψης.

Οι κυματοθραύστες χαμηλής ή βυθισμένης στέψης χρησιμοποιούνται με μεγαλύτερη επιτυχία σε περιοχές όπου η διακύμανση της παλίρροιας είναι μικρή. Μπορούν να συνδυαστούν με προβόλους σχήματος L ή T ή με υψηλούς κυματοθραύστες ώστε να διαμορφώσουν μικρές παραλίες. Προκαλούν τη θραύση των μεγαλύτερων (πιο καταστροφικών) κυματισμών, αλλά έχουν μικρή επίδραση στην κανονική καθημερινή δραστηριότητα.

Βυθισμένης και χαμηλής στέψης κυματοθραύστες κατασκευάζονται συχνά για να προστατεύσουν

- 1) τα θεμέλια παραλιακών έργων από τις υποσκαφές και τις δυναμικές ενέργειες που προκαλούν τα κύματα

- 2) τις αμμώδεις ακτές και παραλίες που κινδυνεύουν με σοβαρές περιοδικές διαβρώσεις από τις συρτικές δυνάμεις των κυμάτων
- 3) τις χαμηλές παραλιακές περιοχές που πλημμυρίζουν εξαιτίας των κυματισμών που θραύονται κοντά στην ακτή
- 4) τέλος για να προστατεύσουν μερικώς την ηρεμία της λεκάνης που σχηματίζεται από τον κυματοθραύστη και την ακτογραμμή, σε περιπτώσεις όπου δεν είναι απαραίτητη η απόλυτη νηνεμία σ' αυτή

Η κατασκευή ύφαλων ή χαμηλής στέψης κυματοθραυστών προτιμάται καθώς εναρμονίζονται αισθητικά με το περιβάλλον. Σημαντικό στοιχείο για περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλους ή ιστορικής παράδοσης. Ακόμη, δεν απομονώνουν εντελώς την προστατευόμενη περιοχή από την ανοιχτή προς το πέλαγος θάλασσα ώστε να εξασφαλίζεται η συνεχής κυκλοφορία των ρευμάτων και των θαλάσσιων μαζών και συνεπώς η ανανέωση και ο καθαρισμός κατά φυσικό τρόπο των νερών της προστατευόμενης λεκάνης. Βασικό πλεονέκτημα αποτελεί επίσης το χαμηλό κόστος της κατασκευής. Τέλος, οι βυθισμένοι κυματοθραύστες λειτουργούν και ως φυσικοί ύφαλοι. Προσελκύουν ψάρια οπότε είναι κατασκευές ιδιαίτερα προσφιλείς για τους αλιείς.

Οι κατασκευές αυτές παρουσιάζουν και μειονεκτήματα. Η υπερπήδηση του νερού δημιουργεί ρεύματα επικίνδυνα για τους κολυμβητές, ενώ η ύφαλη κατασκευή αποτελεί κίνδυνο για τα μικρά σκάφη. Μια ύφαλη ή χαμηλής στέψης κατασκευή παρέχει μόνο μερική εξασθένιση στη δράση του κύματος και κατά συνέπεια μερική προστασία των ακτών. Γενικά, ο σχεδιασμός ενός τέτοιου έργου είναι δύσκολος επειδή η σωστή λειτουργία του εξαρτάται ταυτόχρονα από τη στάθμη του νερού και τις κυματικές συνθήκες καθώς και από τη συγκεκριμένη κατασκευή.

6.2.2.1 Υπολογισμός ύψους ύφαλου κυματοθραύστη

Η κλίση του προσήνεμου πρανούς έχει μεγάλη επίδραση στις μη υπερπηδητές κατασκευές, αλλά στην περίπτωση των βυθισμένων έργων ο παράγοντας που επηρεάζει τα χαρακτηριστικά κύματος και δέχεται την ενέργεια των κυματισμών είναι η στέψη και λιγότερο η κλίση από τη μεριά της ανοιχτής θάλασσας. Η ευστάθεια των ύφαλων κυματοθραυστών εμφανίζεται να είναι συνάρτηση μόνο του σχετικού ύψους στέψης $\frac{h'_c}{h}$, το επίπεδο ζημιών και του φασματικού αριθμού ευστάθειας N_s . Η δοσμένη εξίσωση είναι βασισμένη στην εκ νέου ανάλυση των δοκιμών του Givler and Sorensen(1986) από τον Van der Meer (1990) (Meer, 1995). Η σταθερότητα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$\frac{h'_c}{h} = (2.1 + 0.1S)e^{-0.14N_s^*} \quad (6.17)$$

Όπου ο φασματικός αριθμός ευστάθειας δίνεται από τον τύπο :

$$N_s = \frac{H_s}{\Delta D_{n50}} \frac{1}{s_p^{1/3}} \quad (6.18)$$

Όπου s_p είναι η τοπική κλίση κύματος $s_p = H_s/L_p$

$D_{n50} = \left(\frac{B}{\gamma}\right)^{1/3}$ η ονομαστική διάμετρος των λίθων θωράκισης

Για σύστημα κυματοθραυστών και τεχνητών υφάλων, το κενό μεταξύ των έργων αποτελεί ακόμα μια πρωταρχική παράμετρο. Η αποδοτικότητα του ύφαλου έργου και η προκύπτουσα απόκριση ακτής εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά μετάδοσης και το λειτουργικό σχέδιο (στρώσεις) του έργου και την ευστάθεια των ογκολίθων.

6.3 Προτεινόμενες διατάξεις κυματοθραυστών

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο σχεδιασμού καθώς και στην μεθοδολογία διαστασιολόγησης των κυματοθραυστών. Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά κάθε διάταξης. Ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των έργων.

Πίνακας 6.1: Συνοπτική αναφορά βασικών χαρακτηριστικών των τριών διατάξεων

| | Δύο έξαλοι κυματοθραύστες | Μεμονωμένος έξαλος κυματοθραύστης | Δύο ύφαλοι κυματοθραύστες |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|
| d_s (m) | 5 | 5 | 5 |
| Y (m) | 100 | 100 | 100 |
| L_s (m) | 90 | 180 | 90 |
| L_g (m) | 95 | | 95 |
| R_c (m) | 2,3 | 2,3 | -0,8 |
| L (m)(μήκος κυματοθραύστη) | 126,5 | 216,5 | 111 |
| b (m) πλάτος στέψης | 1,6 | 1,6 | 3,48 |

6.3.1 Διάταξη δύο έξαλων κυματοθραυστών

Η πρώτη διάταξη (Σχήματα 6.9 και 6.10) αφορά την τοποθέτηση δύο έξαλων κυματοθραυστών συμβατικής διατομής. Ο τύπος κυματοθραυστών αυτός διαμορφώνεται με κεκλιμένα πρηνή όπως περιγράφεται στο υποκεφάλαιο 6.2. Σε μη κανονικούς κυματισμούς, η θραύση μπορεί να προκύψει σε μια ευρεία ζώνη όταν οι μεμονωμένοι κυματισμοί διαφορετικών υψών και περιόδων κύματος προσεγγίζουν τη γραμμή θραύσης τους. Στην κορεσμένη ζώνη θραύσης για μη κανονικά κύματα το ύψος κύματος μπορεί να συσχετισθεί με το τοπικό βάθος d από το κριτήριο $H_{m0,b}=0.6d$ (CEM-II-4,2003).

Για την εκτίμηση του H_b εφαρμόστηκε η εξίσωση (Μουτζούρης, 2009):

$$\frac{H_b}{H_0} = \beta \gamma_0^\delta + \zeta \quad (6.19)$$

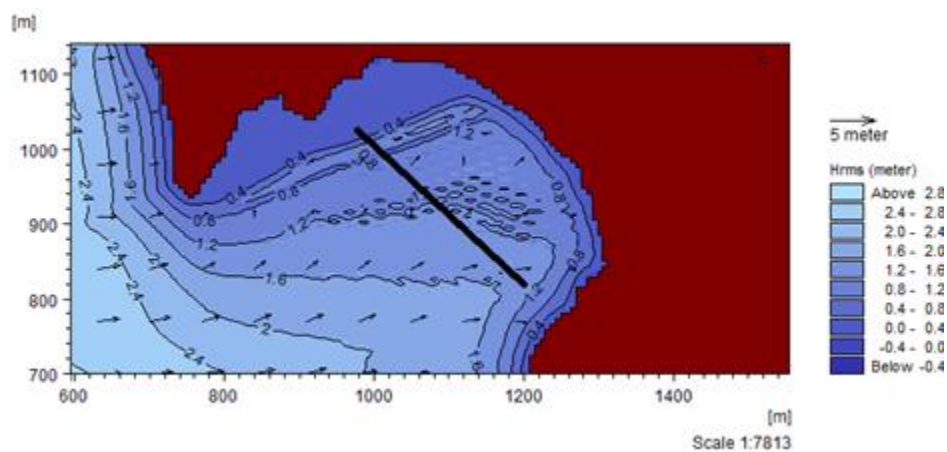
Οι εμπειρικοί συντελεστές β , ζ και δ υπολογίσθηκαν κατά Munk και LeMehaute-Koh.

Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του βάθους θραύσης.

Πίνακας 6.2:Υπολογισμός βάθους θραύσης κατά Munk και LeMehaute-Koh

| | Munk | LeMehaute-Koh |
|-------------|-------|---------------|
| $H_o(m)$ | 2.93 | 2.93 |
| γ_o | 0.04 | 0.04 |
| B | 0.3 | 0.495 |
| Δ | -0.33 | -0.25 |
| Z | 0 | 0 |
| $Tan\alpha$ | 0.05 | 0.05 |
| $T_o(sec)$ | 6.817 | 6.817 |
| $L_o(m)$ | 72.56 | 72.56 |
| $H_b(m)$ | 2.54 | 3.23 |
| $h_b(m)$ | 4.22 | 5.4 |

Το μεγαλύτερο ύψος κύματος στην περιοχή είναι $H=2.93m$ που προέρχεται από τον βορειοανατολικό άνεμο των 7 beaufort. Από τον Πίνακα 6.2 προκύπτει ότι η ζώνη θραύσης θα αρχίζει περίπου σε βάθος 4-5m, ο άξονας των κυματοθραυστών τοποθετείται σε βάθος 5m στη ζώνη θραύσης. Επομένως, η διαστασιολόγηση της διατομής του έργου θα γίνει για μη θραυόμενους κυματισμούς. Στο σχήμα 6.8 σημειώνεται με μαύρη γραμμή το προσήνεμο μέτωπο του έργου.



Σχήμα 6.8: Ύψη κύματος στην περιοχή μελέτης για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7 beaufort,

Οι κυματοθραύστες θα σχεδιαστούν σύμφωνα με τις τυπικές διατομές για έργα με κεκλιμένα πρανή. Θα διαμορφωθούν από στρώση έδρασης, κεντρικό πυρήνα από κοκκώδη υλικά και από στρώσεις μεγαλύτερων λίθων κατάλληλης διαβάθμισης.

Αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη αναρρίχηση του κύματος από την εξίσωση 6.16.

$$\frac{\max R}{1.6} = \frac{0.96}{0.4 + (1.6/72.5)^{0.5} \times 2} \rightarrow \max R = 2.3\text{m}$$

Εφόσον το βάθος της θάλασσας στον άξονα του κυματοθραύστη είναι 5m το ύψος της διατομής είναι 7,3m. Ακολουθεί υπολογισμός του απαιτούμενου μέσου βάρους του ογκολίθου στη στοιβάδα θωράκισης από τον τύπο του Hudson.

Για τον κορμό του κυματοθραύστη (εξίσωση 6.14):

$$B = \frac{2.6 \times 1.6^3}{4 \times \left(\frac{2.6}{1.035} - 1\right)^3 \times 2} = 0.39\text{tn}$$

Για το ακρομώλιο του κυματοθραύστη (εξίσωση 6.14):

$$B = \frac{2.6 \times 1.6^3}{3.2 \times \left(\frac{2.6}{1.035} - 1\right)^3 \times 2.5} = 0.39\text{tn}$$

Στη συνέχεια δίνονται λεπτομέρειες για τη διατομή μη θραυόμενου κυματισμού και τη διακύμανση της κοκκομετρίας των ζωνών της. Επιλέγονται τραχείς γωνιώδεις φυσικοί ογκόλιθοι. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας υπολογισμού παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.4. Από πίνακα, ο οποίος δίδεται από τη βιβλιογραφία (Μέμος, 2008), για τραχείς γωνιώδεις φυσικούς ογκολίθους δίνονται οι τιμές για τους συντελεστές στρώσης (K_D) και το πλήθος των ογκολίθων (n) στην εξίσωση 6.15:

Πίνακας 6.3: Τιμές συντελεστή στρώσης (K_D) και πλήθους των ογκολίθων (n)

| | |
|--------------------------------------------|------------|
| N | 2 |
| $K_{D\text{κορμού}}$ | 4 |
| $K_{D\text{ακρομωλίου}}$ | 3,2 |

Η κλίση του πρανούς στον κορμό επιλέγεται 1:2 και στο ακρομώλιο 1:2,5.

Διακύμανση κοκκομετρίας θωράκισης

$$B_{\theta}=0,75B-1,25B=0,293tn-0,488tn$$

Πάχος θωράκισης $K_{\Delta}=1$ (τύπος 6.15)

$$r = 2 \times 1 \times \left(\frac{0,39}{2,6}\right)^{1/3}=1,05m$$

Διακύμανση κοκκομετρίας υπόστρωσης

$$B_{\pi}=B/10-B/15=0,039tn-0,026tn$$

Πάχος υπόστρωσης(6.15)

$$r = 2 \times 1 \times \left(\frac{0,033}{2,6}\right)^{1/3} = 0,46m$$

Διακύμανση κοκκομετρίας πυρήνα (6.15)

$$B_{\pi}=B/200-B/6000=1,95kg-0,065kg$$

Πλάτος στέψης

$$b = 3 \times 1 \times \left(\frac{0,39}{2,6}\right)^{1/3} = 1,6m$$

Η θέση των κυματοθραυστών προκύπτει από την επιλογή του σχηματισμού που επιθυμείται να προκαλέσουν τα έργα και αναλύονται εκτενώς στο υποκεφάλαιο 6.2. Επιλέγεται ο συνδυασμός salient καθώς δεν ανακόπτεται την κατά μήκος στερεομεταφορά και έτσι αποτρέπεται η διάβρωση κατάντη των έργων. Λόγω του μικρού μήκους της ακτογραμμής ο σχηματισμός salient έχει καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα. Η τοποθέτηση των έργων για τον έλεγχο του σχηματισμού salient θα βασιστεί στα κριτήρια 6.3 και 6.6.

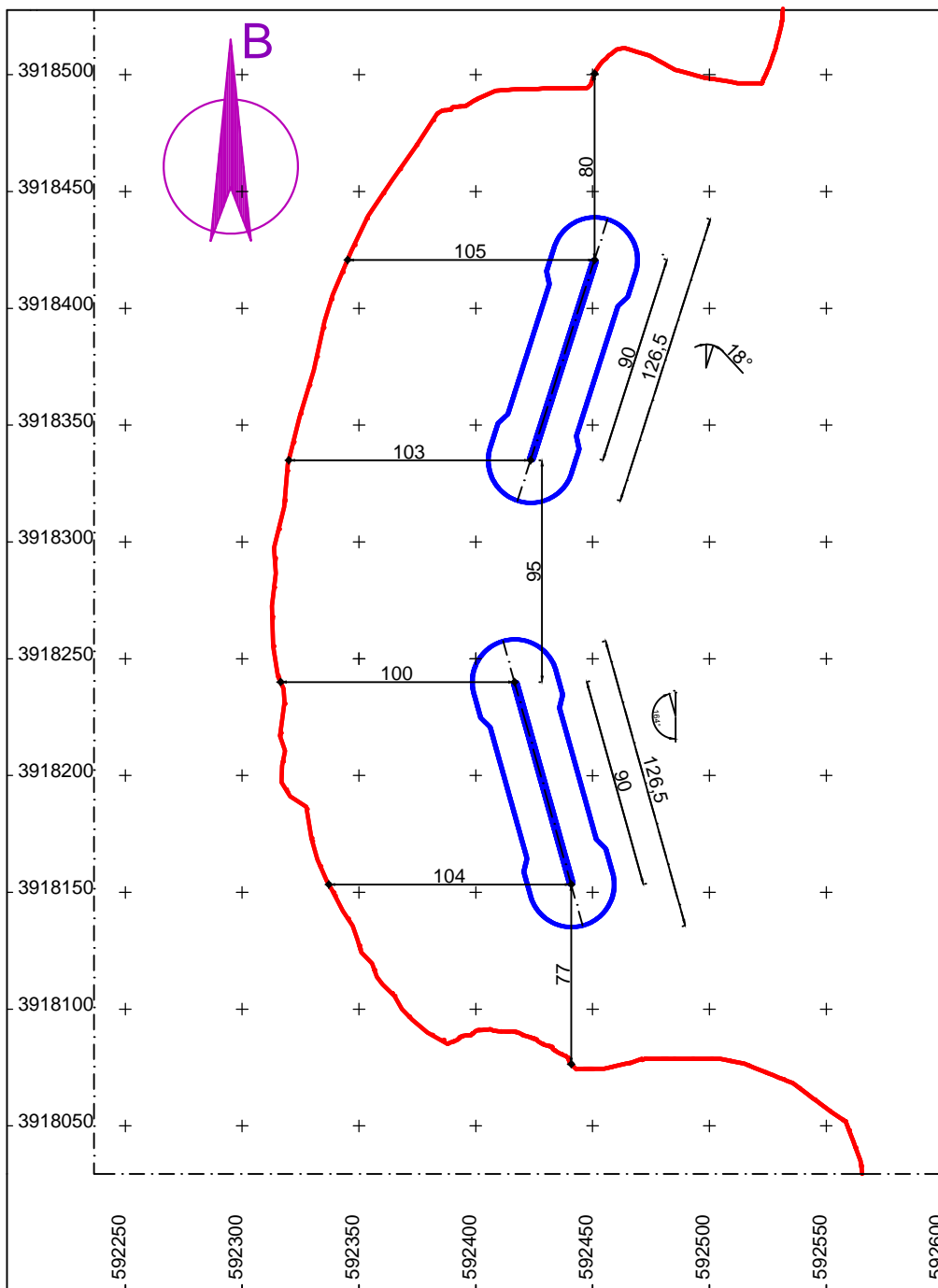
Σχεδιάζονται δύο κυματοθραύστες με τον άξονα τους παράλληλα στην ακτή στην αρχή της ζώνης θραύσης, το τμήμα της παράκτιας ζώνης που πραγματοποιείται το μεγαλύτερο ποσοστό της στερεομεταφοράς. Οι κυματοθραύστες τοποθετούνται σε απόσταση 100m από την ακτογραμμή, όπως υπολογίζεται από την κλίση πυθμένα. Καθώς η θέση του κυματοθραύστη έχει επιλεγεί ώστε αυτός να επιδρά σε όλο το πλάτος της ζώνης απόσβεσης

για να αυξηθεί η αποδοτικότητα των έργων, αυξάνεται το μήκος των κυματοθραυστών. Σύμφωνα με το κριτήριο 6.6 επιλέγεται μέγιστο δυνατό μήκος 90m.

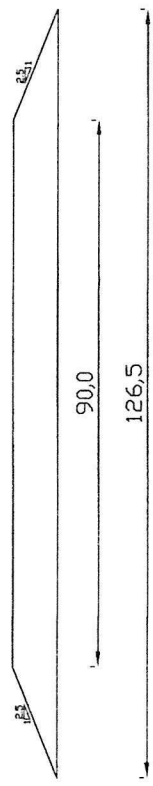
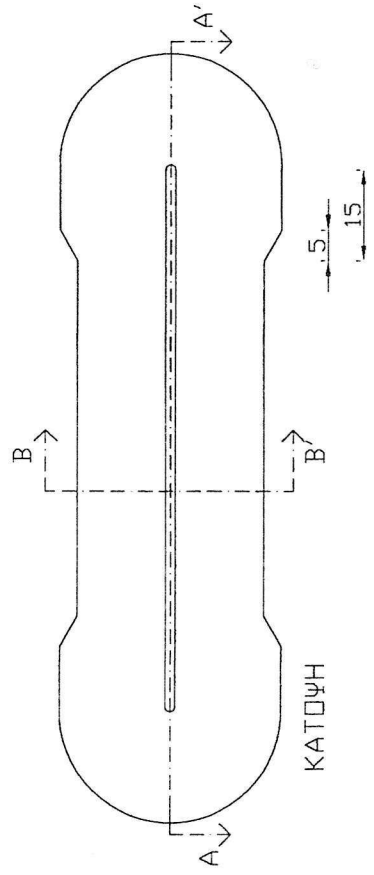
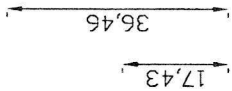
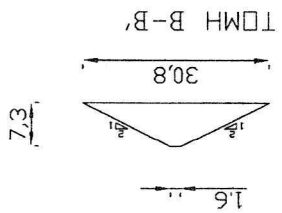
Πίνακας 6.4: Παρουσίαση αποτελεσμάτων χαρακτηριστικών των στρώσεων της διατομής

| ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΕΞΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ | | | | | |
|-----------------------------------------------|------------|-----------|-----------|------------------|-----------|
| | Πυρήνας | Υπόστρωση | | Στρώση θωράκισης | |
| | | κορμός | ακρομώλιο | κορμός | ακρομώλιο |
| B_θ (tn) | | | | 39 | 39 |
| B (kg) | 1,95÷0,065 | 39÷26 | 39÷26 | 293÷488 | 293÷488 |
| r (m) | | 0,46 | 0,46 | 1,05 | 1,05 |
| Κλίση πρανούς | | | | 1:2 | 1:2,5 |

Στα σχήματα 6.9 και 6.10 παρουσιάζεται η οριζοντιογραφία της περιοχής με τους έξαλους κυματοθραύστες (Σχήμα 6.9) και η οριζοντιογραφία, η κάτοψη και μια διατομή του κυματοθραύστη (Σχήμα 6.10).



ΣΧΗΜΑ 6.9
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΥΟ
ΕΞΑΛΩΝ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ



ΣΧΗΜΑ 6.10:
ΕΙΛΛΟΣ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗΣ

ΚΛΙΜΑΚΑ 1:1250

6.3.2 Διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη

Η Δεύτερη διάταξη (Σχήματα 6.11 και 6.12) περιλαμβάνει την κατασκευή ενός αποσπασμένου κυματοθραύστη που τοποθετείται σε απόσταση 100m στην αρχή της ζώνης θραύσης στο κέντρο της ακτογραμμής. Είναι ίδιας διατομής με τους έξαλους κυματοθραύστες ενώ επιλέχθηκε μήκος 180m, το άθροισμα του μήκους των έξαλων κυματοθραυστών, για να μπορούν να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Για τη διάταξη του μεμονωμένου κυματοθραύστη προκύπτει λόγος $\frac{L_s}{Y} = 1.8$. Από το κριτήριο 6.1 στο Κεφάλαιο 6.2.1 εκτιμάται ότι ο σχηματισμός του μεμονωμένου κυματοθραύστη είναι tombolo.

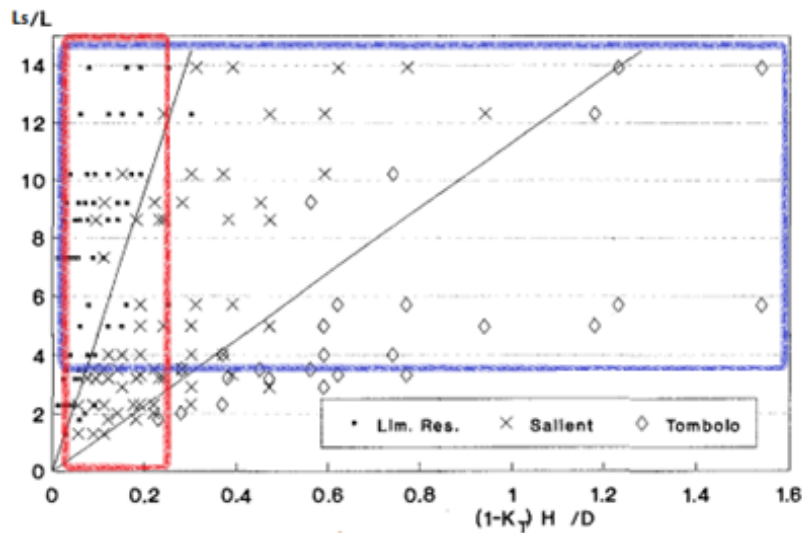
Η απόκριση της ακτογραμμής σε ένα κυματοθραύστη ελέγχεται από τουλάχιστον 14 μεταβλητές σύμφωνα με τους Hanson and Kraus (1989,1990,1991) των οποίων 8 λαμβάνονται υπόψη πρωταρχικά (Pilarczyk, 2003):

- η απόσταση από την ακτή,
- το μήκος του έργου,
- τα χαρακτηριστικά μετάδοσης του έργου,
- η κλίση παράκτιας περιοχής και/ή το βάθος του έργου (ελέγχεται μερικώς από το μέγεθος του κόκκου της άμμου),
- το μέσο ύψος κύματος, μέση περίοδος, ο προσανατολισμός του έργου
- και επικρατέστερη διεύθυνση κυματισμών.

Λόγω της εξάρτησης της επίδρασης του έργου στην ακτογραμμή από πολλές παραμέτρους, δεν μπορεί να προσδιοριστεί με βεβαιότητα ο σχηματισμός που προκύπτει. Πειράματα για την απόκριση ακτογραμμής στους μεμονωμένους αποσπασμένους κυματοθραύστες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι διατηρώντας σταθερές τις 13 μεταβλητές, όσο το μήκος του κυματοθραύστη μεγαλώνει, η απόκριση της ακτογραμμής μεταβάλλεται από tombolo σε salient έως σε πολύ περιορισμένη. Αυτό

συμβαίνει διότι η ποσότητα του μεταφερόμενου υλικού μέσα στην υπήνεμη περιοχή του κυματοθραύστη κατανέμεται σε μεγαλύτερο τμήμα της ακτής (Hanson and Kraus, 2011). Από τη συγκεκριμένη εργασία των Hanson H. and Kraus C. N. (2011) έχει προκύψει ένας πίνακας που συνδέει διάφορες μεταβλητές ενός αποσπασμένου κυματοθραύστη με την απόκριση της ακτογραμμής.

Πίνακας 6.5: Διάγραμμα απόκρισης ακτογραμμής συναρτήσει σχετικού ύψους κύματος $(1-K_r)H_o/D$ (και σχετικού μήκους κύματος L_s/L (πηγή: (Kraus, 2011))



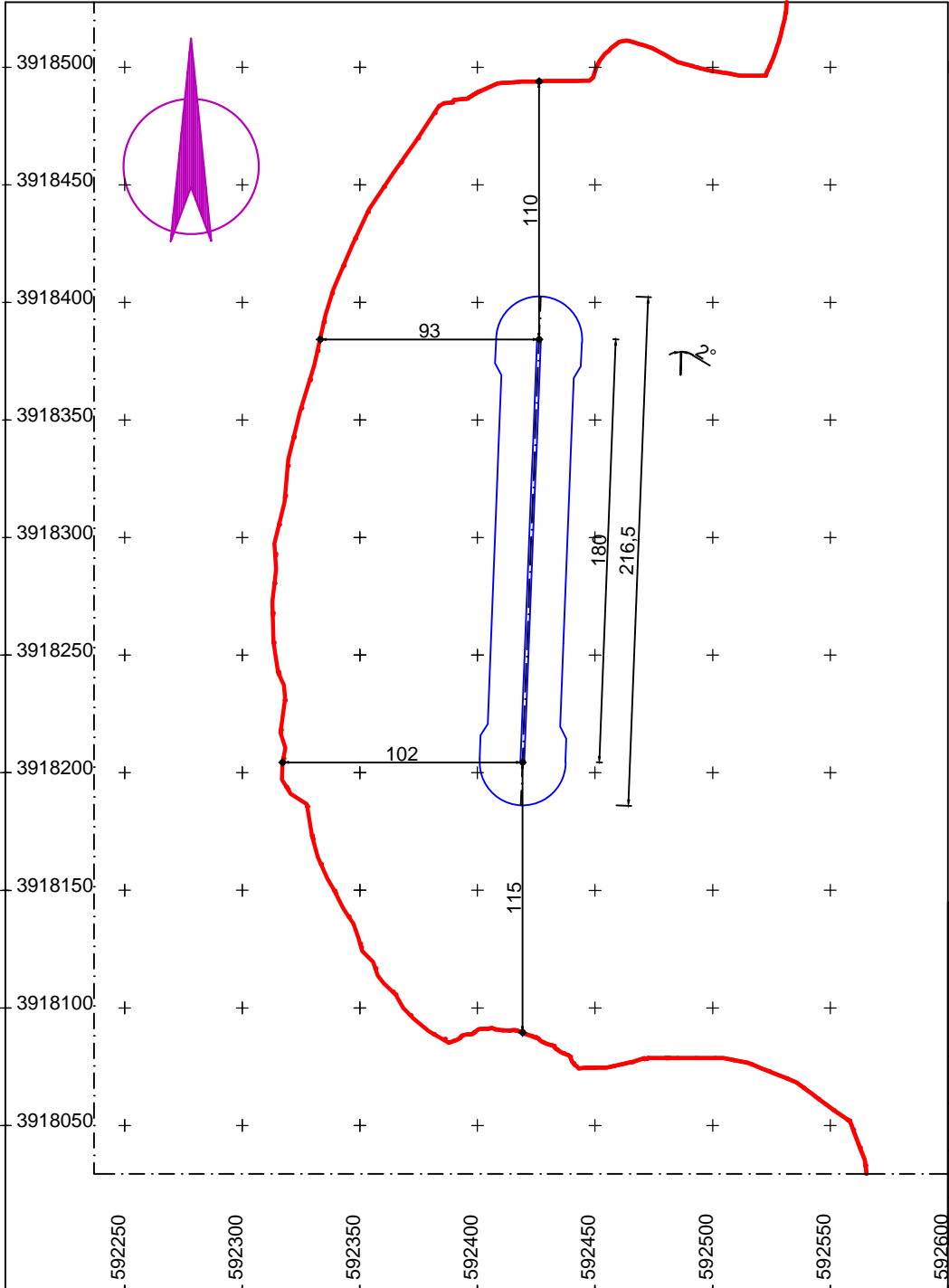
Με σκοπό την αξιοποίηση της μελέτης αυτής, βάσει της θέσης και του τύπου του έργου υπολογίζονται οι μεταβλητές που αναφέρονται στον Πίνακα 6.2. Αφού υπολογισθούν το μέγιστο σχετικό ύψος κύματος και το ελάχιστο σχετικό μήκος του κυματοθραύστη με τα στοιχεία του πίνακα 6.2, παρουσιάζονται οι περιοχές στον πίνακα 6.1. Στην τομή των σχημάτων δίδεται η απόκριση της ακτογραμμής σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μελέτη, η οποία κυμαίνεται από μορφής salient έως περιορισμένη.

Πίνακας 6.6: Μέγιστες τιμές μεταβλητών που επηρεάζουν την απόκριση της ακτογραμμής για τον κυματοθραύστη που προτείνεται



| | |
|------------------------------|------|
| L_s (m) | 180 |
| L (μήκος κύματος) (m) | 47,8 |
| D βάθος νερού (m) | 6 |
| K_t | 0 |
| H (ύψος κύματος) (m) | 1,6 |

Η επιλογή του μήκους του αποσπασμένου κυματοθραύστη αποφασίσθηκε ώστε τα αποτελέσματα και των τριών διατάξεων Πίνακας 6.1 να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Η αναφορά στην παραπάνω εργασία έγινε με σκοπό να καταδείξει ότι ο σχηματισμός που προκύπτει από την εφαρμογή των έργων δεν μπορεί να προβλεφθεί μόνο από αριθμητικά κριτήρια και βασιζόμενος μόνο στις παραμέτρους του μήκους του κυματοθραύστη και της απόστασης του από την ακτογραμμή.

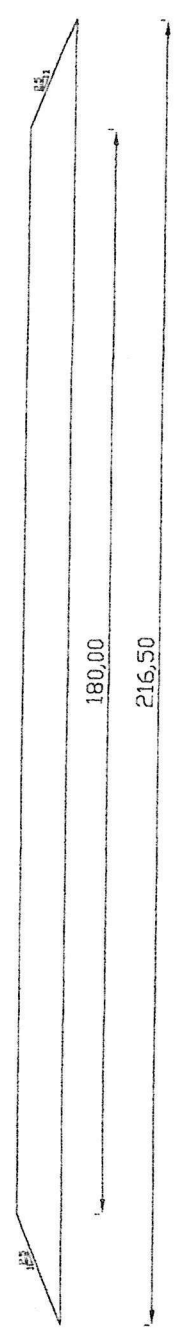
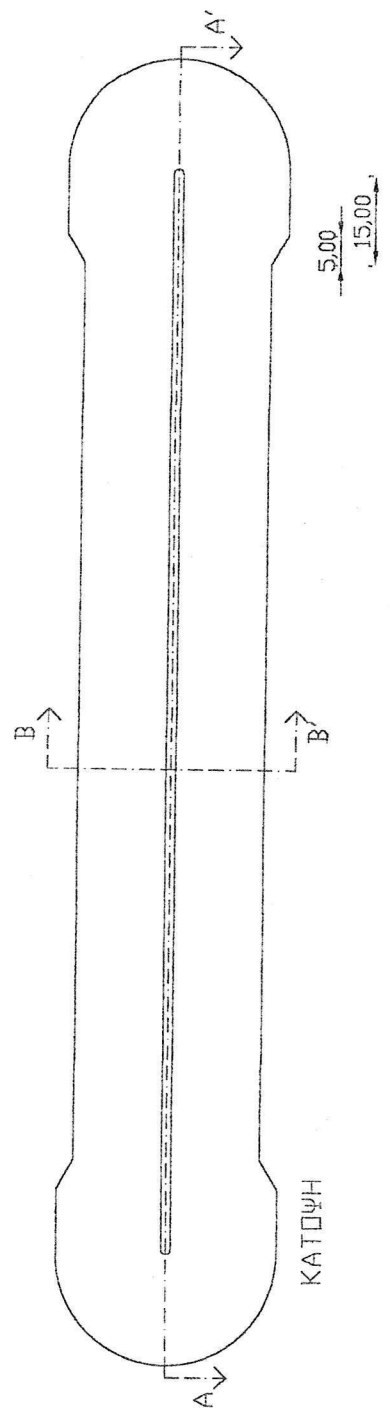
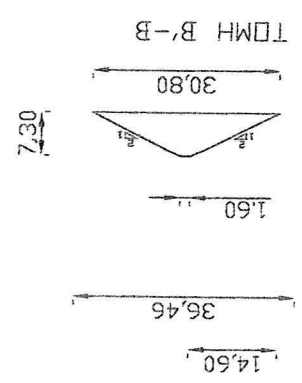
Στα σχήματα 6.11 και 6.12 παρουσιάζονται η οριζοντιογραφία της περιοχής με τον μεμονωμένο έξαλο κυματοθραύστες (Σχήμα 6.11) και η οριζοντιογραφία, η κάτοψη και μια διατομή του κυματοθραύστη (Σχήμα 6.12).



ΣΧΗΜΑ 6.11:
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ
ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΕΞΑΛΟΥ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|  | ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ |
|  | ΕΞΑΛΟΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ |
| ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΞΟΝΑΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ | |
| + | ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΣΤΟ ΕΓΣΑ |
| ΚΛΙΜΑΚΑ: | 1:2800 |

ΣΧΗΜΑ 6.12:
ΜΕΜΟΡΟΜΕΝΟΣ
ΕΙΛΩΔΣ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗΣ
ΚΑΙΜΑΚΑ 1:1250



6.3.3 Διάταξη δύο ύφαλων κυματοθραυστών

Ως τρίτη διάταξη έργων (Σχήματα 6.13 και 6.14) προτείνεται ο σχεδιασμός δύο ύφαλων κυματοθραυστών. Σχεδιάζονται δύο ύφαλοι κυματοθραύστες με μήκος 90m των οποίων οι άξονες ταυτίζονται με τους άξονες των έξαλων κυματοθραυστών. Επιλέγονται όπως και στους συμβατικούς κυματοθραύστες τραχείς γωνιώδεις φυσικοί ογκόλιθοι με μια ζώνη θωράκισης. Στον Πίνακα 6.7 δίνονται οι τιμές για τους συντελεστές στρώσης (K_D) και το πλήθος των ογκολίθων (n) (Μέμος, 2008) :

Πίνακας 6.7: Συντελεστές στρώσης για ύφαλους κυματοθραύστες

| | |
|--------------------------|-----|
| n | 2 |
| $K_{D\text{κορμού}}$ | 4 |
| $K_{D\text{ακρομωλίου}}$ | 3,2 |

Η κλίση του πρανούς στον κορμού στην προσήνεμη πλευρά 1:1,5 και του ακρομωλίου 1:2,5. Ο ύφαλος κυματοθραύστης θα σχεδιαστεί για το δυσμενέστερο άνεμο, όπως ο έξαλος κυματοθραύστης. Με ύψος κύματος σχεδιασμού στον πόδα του έργου $H=1.6\text{m}$ (Σχήμα 6.8). Από τον τύπο του Hudson υπολογίζεται το μέσο βάρος των λίθων θωράκισης για τον κορμό.

$$B = \frac{2.6 \times 1.6^3}{4 \times \left(\frac{2.6}{1.035} - 1\right)^3 \times 1.5} = 0.51 \text{tn}$$

Για το ακρομώλιο του κυματοθραύστη

$$B = \frac{2.6 \times 1.6^3}{3.2 \times \left(\frac{2.6}{1.035} - 1\right)^3 \times 2.5} = 0.39 \text{tn}$$

Από τον τύπο του Van der Meer υπολογίζεται το ύψος του ύφαλου κυματοθραύστη για μηδενικό ποσοστό ζημιών ($S=0$)

$$D_{50} = \left(\frac{0.51}{2.6}\right)^{1/3} = 0.58$$

$$s_p = \frac{1.6}{72.5} = 0.022$$

$$N_s = \frac{1.6}{\left(\frac{2.6}{1.035}-1\right)0.58} \frac{1}{0.022^{1/3}} = 6.51$$

$$\frac{h'_c}{5} = (2.1)e^{-0.14 \times 6.51} = 0.84 \rightarrow h'_c = 4.2\text{m}$$

Το πλάτος του ύφαλου κυματοθραύστη υπολογίζεται $b = 6 \times D_{50} = 6 \times 0.58 = 3.48\text{m}$ (CEM-VI-5,2002).

Βασική παράμετρος που ρυθμίζει την αποδοτικότητα των ύφαλων κυματοθραυστών είναι ο συντελεστής μετάδοσης K_t , που δίδεται από την εξίσωση 6.12.

Πίνακας 6.8:Στοιχεία ύφαλου κυματοθραύστη και υπολογιζόμενος συντελεστή μετάδοσης

| | |
|--------------------------|------|
| R_c (m) | -0,8 |
| B (m) | 3,5 |
| C | 0,8 |
| H_i (m) | 1,6 |
| ξ | 10,1 |
| L_o (m) | 72,5 |
| K_t | 0,82 |

Όσον αφορά τον σχηματισμό που προκαλείται, τα κριτήρια μεταβάλλονται για τους διαπερατούς κυματοθραύστες. Κατά τον πρωταρχικό σχεδιασμό για να ελεγχθεί θεωρητικά ο σχηματισμός μπορούν να εφαρμοστούν τα κριτήρια για τους κυματοθραύστες χαμηλής στέψης 6.8 και 6.9. Από τον Πίνακα 6.9 επαληθεύονται τα όρια για salient.

Πίνακας 6.9: Πίνακα υπολογισμού μέγιστου μήκους ύφαλου κυματοθραύστη για salient

| | | | |
|--------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------|-------|
| Για σχηματισμό Salient: $L_s/Y < 1/(1 - K_t)$ | | Για σύστημα κυματοθραυστών: $L_g Y/L_s^2 > 0.5(1 - K_t)$ | |
| K_t | 0,82 | L_s | 90 |
| Y (m) | 100 | L_g | >7,29 |
| L_s (m) | <555 | | |

Τέλος, για τη ζώνη θωράκισης κορμού και ακρομωλίου επιλέγεται η τοποθέτηση 2 ογκολίθων. Το πλάτος της ζώνης κορμού και ακρομωλίου υπολογίζεται από την εξίσωση (6.15):

$$r_{\text{κορμού}} = 2 \times 1 \times \left(\frac{0.51}{2.6}\right)^{1/3} = 1,16\text{m}$$

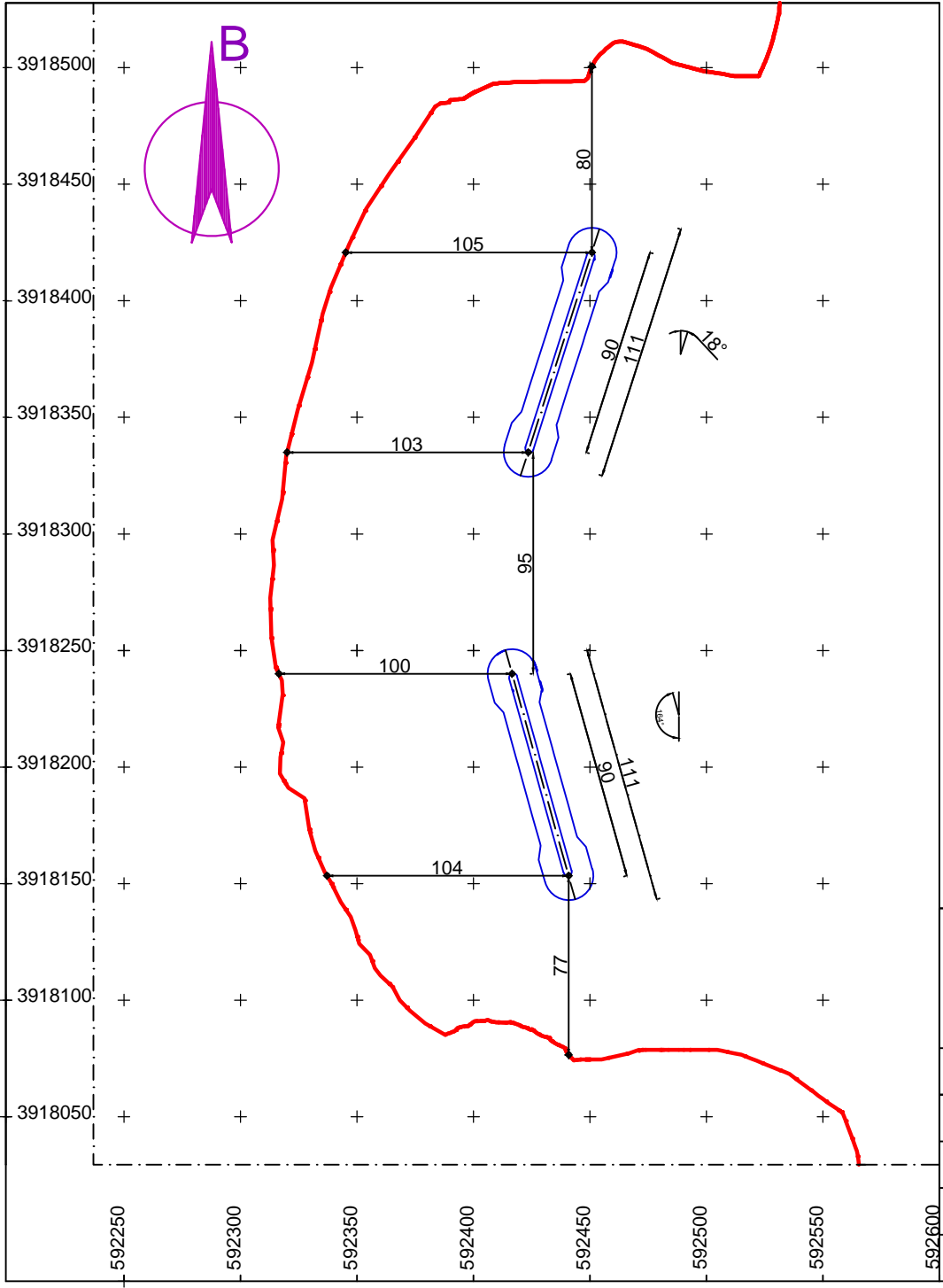
$$r_{\text{ακρομωλίου}} = 2 \times 1 \times \left(\frac{0.39}{2.6}\right)^{1/3} = 1,05\text{m}$$

Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται στοιχεία της διατομής του ύφαλου κυματοθραύστη που αφορούν τη στρώση θωράκισης.

Πίνακας 6.10: Στοιχεία στρώσης θωράκισης διατομής ύφαλου κυματοθραύστη

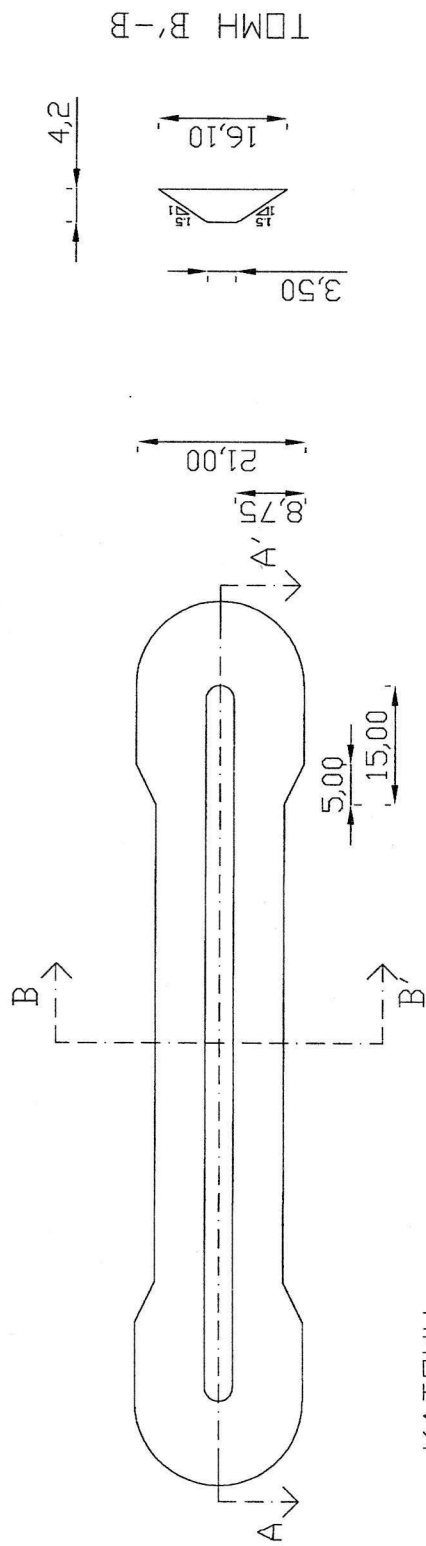
| | Στρώση θωράκισης | |
|-------------------|------------------|-----------|
| | κορμός | ακρομώλιο |
| B_{θ} (tn) | 51 | 39 |
| r (m) | 1,16 | 1,05 |
| Κλίση πρανούς | 1:1,5 | 1:2,5 |

Στα σχήματα 6.13 και 6.14 παρουσιάζεται η οριζοντιογραφία της περιοχής με τους ύφαλους κυματοθραύστες (Σχήμα 6.13) και η οριζοντιογραφία, η κάτοψη και μια διατομή του κυματοθραύστη (Σχήμα 6.14).



ΣΧΗΜΑ 6.13:
 ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΥΟ
 ΥΦΑΛΩΝ
 ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ

| | |
|----------|-------------------------------------------|
| | ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗ |
| | ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ |
| | ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΑΞΟΝΑΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ |
| + | ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ ΣΤΟ ΕΓΣΑ |
| ΚΛΙΜΑΚΑ: | 1:2800 |



ΣΧΗΜΑ 6.14:
 ΥΦΑΛΟΣ
 ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗΣ
 ΚΛΙΜΑΚΑ 1:950

7. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ MIKE

7.1 Κυματικό μοντέλο PMS

Το Mike 21 PMS είναι ένα γραμμικό μοντέλο διάθλασης-περίθλασης το οποίο βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης (Mild Slope Equation). Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα της διάθλασης και της ρήχωσης, εξαιτίας της μεταβολής του πυθμένα, της περίθλασης κατά μήκος της καθέτου στην κύρια διεύθυνση των κυματισμών και των ενεργειακών απωλειών, εξαιτίας της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης των κυματισμών. Ακόμη, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την επίδραση της διασποράς συχνοτήτων και της κατευθυντικής διάδοσης χρησιμοποιώντας γραμμική επαλληλία.

Τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν από το μοντέλο είναι ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι, όπως η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος (H_{rms}), η περίοδος αιχμής (T_p) και η μέση κατεύθυνση των κυματισμών (θ). Άλλα αποτελέσματα που μπορεί να δώσει το μοντέλο είναι οι τάσεις ακτινοβολίας (s_{xx}, s_{xy}, s_{yy}) και η στιγμιαία ανύψωση της επιφάνειας.

Το Mike 21 PMS μπορεί να εφαρμοσθεί για την μελέτη της κυματικής διαταραχής σε ανοιχτές παράκτιες περιοχές και για τον υπολογισμό του κυματικού πεδίου σε περιοχές με τεχνικά έργα (πχ πρόβολοι, αποσπασμένοι κυματοθραύστες), όταν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η ανάκλαση των προσπιπτόντων κυματισμών και η περίθλαση είναι κάθετη στην κύρια διεύθυνση. Όπως σε όλες τις παραβολικές προσεγγίσεις έτσι και σε αυτό το μοντέλο δεν περιγράφονται η περίθλαση και η ανάκλαση με ακρίβεια (η περίθλαση κατά τη διεύθυνση x θεωρείται αμελητέα, καθώς επίσης και η διάχυση στη σκιά των έργων (back-scatter)). Επομένως το μοντέλο αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η περίθλαση αποτελεί το πιο σημαντικό φαινόμενο στην περιοχή μελέτης, όπως για παράδειγμα στα λιμάνια αν ο σκοπός είναι να μελετηθεί η κυκλοφορία στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Τα φαινόμενα που λαμβάνει υπόψη του το μοντέλο στους υπολογισμούς του είναι:

- 1) η ρήχωση (shoaling)
- 2) η διάθλαση (refraction)

- 3) η περίθλαση (diffraction)
- 4) ανάκλαση (reflection)
- 5) η τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- 6) η γένεση των κυματισμών λόγω ανέμου (wind generation)
- 7) η θραύση (wave breaking)
- 8) η διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- 9) η κατευθυντική διασπορά (directional spreading)
- 10) η αλληλεπίδραση κύματος-ρεύματος (wave-current interaction)

Στο Mike 21 PMS μπορούν να εφαρμοστούν τρεις διαφορετικοί τύποι παραβολικής προσέγγισης για την επίλυση του μοντέλου προσομοίωσης, οι οποίοι είναι: το απλό μοντέλο (simple model), το μοντέλο Pade (Pade's model) και το Minimax μοντέλο (Minimax model).

Το απλό μοντέλο αντιστοιχεί στον απλούστερο τύπο παραβολικής προσέγγισης στο ελλειπτικό μοντέλο ήπιας κλίσης. Το μοντέλο αυτό απαιτεί η γωνία ανάμεσα στην θετική κατεύθυνση του άξονα x και τη διεύθυνση του κυματισμού να είναι πολύ μικρή ($<10^\circ$), ώστε να μην παρουσιαστούν σημαντικά σφάλματα στην επίλυση. Το μοντέλο του Pade αποτελεί μια βελτίωση του απλού μοντέλου καθώς επιτρέπει μεγαλύτερες γωνίες μέχρι ± 45 . Τέλος, το μοντέλο Minimax βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του μέγιστου σφάλματος στην παραβολική προσέγγιση για ένα δεδομένο πλάτος ανοίγματος. Έτσι υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα Minimax για 10° , 20° , 30° κλπ. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο για παράδειγμα γωνία 60° εφαρμόζεται μια παραβολική προσέγγιση που ελαχιστοποιεί το σφάλμα που προκύπτει για διάδοση κυματισμών υπό 60° γωνία ως προς τον άξονα x. Ωστόσο, μπορεί να παρουσιαστούν μικρά σφάλματα για κυματισμό που διαδίδεται σε μικρότερες γωνίες.

7.1.1 Βασικές εξισώσεις

Το Mike 21 PMS βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης με την οποία περιγράφονται η διάθλαση, η περίθλαση και η ανάκλαση των γραμμικών

αρμονικών κυματισμών σε μια παράκτια περιοχή με ήπια κλίση πυθμένα. Η εξίσωση αυτή παρουσιάστηκε πρώτα από τον Berckhoff το 1972.

Η ελλειπτική εξίσωση ήπιας κλίσης γράφεται ως:

$$\nabla(CC_g \nabla \varphi) + (k^2 C C_g + i\omega W)\varphi = 0 \quad (7.1)$$

Όπου

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ διδιάστατος τελεστής κλίσης

$C(x,y)$ η φασική ταχύτητα

$C_g(x,y)$ η ταχύτητα ομάδας κυματισμών

$\varphi(x,y)$ το δυναμικό ταχύτητας της μέσης ελεύθερης επιφάνειας, το οποίο συνδέεται με το δυναμικό της ταχύτητας με τη σχέση

$$\varphi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} \varphi(x, y) \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \quad (7.2)$$

$W = \frac{Ediss}{E}$ όρος διάχυσης

$Ediss$ ο μέσος ρυθμός διάχυσης της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας

E η μέση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας

$k = 2\pi/L$ ο κυματαριθμός

$\omega = 2\pi f$ η κυκλική συχνότητα

L το μήκος κύματος

f η συχνότητα

Επίσης να σημειωθεί ότι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (η) μπορεί να γραφτεί ως (Dean & Darymple, 1984)

$$\eta = \left. \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|_{z=0} \quad (7.3)$$

$$\eta = \varphi(x, y) e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (7.4)$$

Για διαδιδόμενους κυματισμούς μιας κατεύθυνσης, το δυναμικό της μέσης ελεύθερης επιφάνειας εκφράζεται από τη σχέση

$$\varphi = A^*(x, y) e^{i\psi} \quad (7.5)$$

$$\text{Όπου } \psi = \int k \cos \theta dx + \int k \sin \theta dy \quad (7.6)$$

Και θ η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών με τον άξονα x . Θεωρώντας ότι οι επικρατέστεροι κυματισμοί διαδίδονται κατά μήκος του άξονα x , η συνάρτηση ψ να μπορεί γραφτεί $\psi = \int k dx$.

Μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης (7.1) προκύπτει θεωρώντας ως επικρατούσα διεύθυνση των κυματισμών τη διεύθυνση x και θεωρώντας αμελητέα τα φαινόμενα της διασποράς (back-scatter) και της περίθλασης κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης. Η ελλειπτική εξίσωση μπορεί να μετατραπεί στην

$$(CC_g \varphi_x)_x + (CC_g \varphi_y)_y + (k^2 CC_g + i\omega W) \varphi = 0 \quad (7.7)$$

Όπου οι δείκτες x, y εκφράζουν παραγωγούς ως προς x και y αντίστοιχα.

Λαμβάνοντας υπόψη της εξίσωση (7.4) οι όροι κλίσης μπορούν να εκφραστούν ως

$$\varphi_x = (ikA^* + A_x^*) e^{i\psi} \quad (7.8)$$

$$CC_g = (i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) e^{i\psi} \quad (7.9)$$

$$(CC_g \varphi_x)_x = [ik(i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) + i\omega C_g A_x^* + i\omega A^* (C_g)_x + (CC_g A_x^*)_x] e^{i\psi} \quad (7.10)$$

Ο τελευταίος όρος $(CC_g A_x^*)_x$ της σχέσης 7.10 εκφράζει την επίδραση της διασποράς και της περίθλασης κατά μήκος της διεύθυνσης x και επομένως παραλείπεται στην παραβολική προσέγγιση. Έτσι,

$$(CC_g \varphi_x)_x \cong [-k\omega C_g + i\omega (C_g)] A^* + 2i\omega C_g A_x^* e^{i\psi} \quad (7.11)$$

Τελικά, χρησιμοποιώντας την σχέση της μέσης ελεύθερης στάθμης (7.5) προκύπτει:

$$(CC_g \varphi_y)_y = (CC_g A_x^*) e^{i\psi} \quad (7.12)$$

Αντικαθιστώντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις στην (7.7) προκύπτει η εξίσωση:

$$A_x^* - \frac{i}{2\omega C_g} = (CC_g A_y^*)_y + A^* \frac{(C_g)_x}{2C_g} + A^* \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (7.13)$$

Με την υπόθεση ότι $\varphi = A(x, y) e^{ik_0 x}$, όπου k_0 είναι ένας κυματαριθμός αναφοράς και $A(x, y)$ μια σύνθετη μεταβλητή. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι:

$$A^*(x, y) = A(x, y) e^{i\theta} \quad (7.14)$$

Όπου $\theta = k_0 x - \int k dx$. Έτσι, η σχέση (7.13) γράφεται :

$$A_x - i(k - k_0)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y)_y + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (7.15)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την απλούστερη παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης και ισχύει για τη διάδοση κυματισμών κατά μήκος μιας επικρατούσας διεύθυνσης (θετικός ημιάξονας x) ή υπό γωνία ως προς τον άξονα x . Ο Kirby(1986) τροποποίησε την τελευταία σχέση ώστε να ισχύει και στην περίπτωση διάδοσης κυματισμών υπό μεγαλύτερη γωνία και παρήγαγε την εξίσωση:

$$A_x - i(k_0 - \beta_1 k)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} (CC_g A_y)_y - \frac{\sigma_2}{\omega C_g} (CC_g A_y)_{yx} + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (7.16)$$

Όπου σ_1 και σ_2 δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\sigma_1 = i \left(\beta_2 - \beta_3 \frac{k_0}{k} \right) + \beta_3 \left(\frac{k_x}{k^2} - \frac{(C_g)_x}{2kC_g} \right) \quad (7.17)$$

$$\sigma_2 = -\frac{\beta_3}{k} \quad (7.18)$$

Οι τιμές των συντελεστών β_1, β_2 και β_3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 για διαφορετικές παραβολικές προσεγγίσεις. Σημειώνεται ότι η σχέση 7.16 ονομάζεται παραβολική εξίσωση ήπιας κλίσης και είναι η βασική εξίσωση επίλυσης του κυματικού μοντέλου Mike 21 PMS.

Πίνακας 7.1: Τιμές συντελεστών β_1, β_2 και β_3

| Aperture | β_1 | β_2 | β_3 |
|----------|-------------|--------------|--------------|
| Simple | 1 | -0.50 | 0 |
| Pade | 1 | -0.75 | -0.25 |
| 10° | 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° | 0.985273164 | -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 |

7.1.2 Θραύση κυματισμών

Το φαινόμενο της θραύσης οφείλεται στην υδροδυναμική αστάθεια των κυματισμών. Στην ανοιχτή θάλασσα η αστάθεια αυτή εκφράζεται με μια κρίσιμη τιμή της καμπυλότητας (H/L) των κυματισμών, ενώ στα ρηχά νερά με μια κρίσιμη τιμή του λόγου του ύψους κύματος προς το βάθος του νερού (H/d).

Στο Mike 21 PMS η θραύση των κυματισμών βασίζεται στο μοντέλο των Battjes and Janssen (1978), σύμφωνα με το οποίο ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας εξαιτίας της θραύσης των κυματισμών είναι

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{\alpha}{8\pi} Q \omega H_{\max}^2 \quad (7.19)$$

Όπου E η συνολική ενέργεια, ω η κυκλική συχνότητα, Q το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών και α μια σταθερά από την οποία ελέγχεται ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας. Στην παραπάνω εξίσωση H_{\max} είναι το μέγιστο επιτρεπτό ύψος κυματισμών και υπολογίζεται από τη σχέση

$$H_{\max} = \gamma_1 k^{-1} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kd}{\gamma_1}\right) \quad (7.20)$$

Όπου $k=2\pi/L$ ο κυματαριθμός, d το βάθος του νερού, γ_1 μια παράμετρος της θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη της καμπυλότητας και γ_2 μια άλλη παράμετρος που έχει σχέση με τη συνθήκη του οριακού βάθους.

Η παραπάνω έκφραση της διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών κατά τη θραύση τους χρησιμοποιείται τόσο για μονοχρωματικούς όσο και για τυχαίους κυματισμούς.

Ανάλογα με τον τύπο των κυματισμών γίνεται και ο υπολογισμός του ποσοστού Q των θραυόμενων κυματισμών. Στην περίπτωση των μονοχρωματικών κυματισμών το ποσοστό αυτό είναι 0 όταν θραύονται τα κύματα, δηλαδή όταν $H > H_{\max}$ και 1 όταν δε συμβαίνει θραύση, δηλαδή $H < H_{\max}$. Για τυχαίους κυματισμούς το ποσοστό αυτό υπολογίζεται κάνοντας την υπόθεση της κατανομής Rayleigh για το ύψος των κυματισμών, οπότε ισχύει

$$\frac{1-Q_b}{\ln(Q_b)} = - \left(\frac{H_{\text{rms}}}{H_{\max}} \right)^2 \quad (7.21)$$

7.1.3 Τριβή πυθμένα

Η τριβή στον πυθμένα συνεπάγεται απώλεια ενέργειας του κύματος. Το φαινόμενο είναι αθροιστικό και το ποσό της απωλεσθείσας ενέργειας αυξάνεται με την απόσταση, το ύψος κύματος και την περίοδο ενώ μειώνεται με το βάθος. Το Mike 21 PMS, όσον αφορά την απώλεια ενέργειας λόγω τριβής στον πυθμένα, χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξίσωση για μονοχρωματικούς κυματισμούς:

$$\frac{dE}{dt} = - \frac{1}{6\pi} \frac{c_{fw}}{g} \left(\frac{\omega H}{\sinh(kd)} \right)^3 \quad (7.22)$$

Όπου $E = (H_{\text{rms}})^2/8$ η συνολική ενέργεια του κύματος και $c_{fw} = f_w/2$ ο παράγοντας τριβής

που προσδιορίζεται από την εξίσωση (Jonsson 1966, Swart 1974):

$$f_w = 0,24 \quad a\beta/k_N < 2 \quad (7.23 \alpha)$$

$$f_w = \exp\left(-5,977 + 5,213 \left(\frac{a_\beta}{k_N}\right)^{-0,914}\right), \quad \frac{a_\beta}{k_N} \geq 2 \quad (7.23 \text{ b})$$

Όπου k_N η τραχύτητα κατά Nikuradse και το a_β το εύρος της κίνησης σωματιδίου στον πυθμένα. Τέλος, για τυχαίους κυματισμούς, ο ρυθμός απώλειας ενέργειας λόγω τριβής στον πυθμένα δίνεται από την εξίσωση (Dingemans,1983):

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{8\sqrt{\pi}} \frac{c_{fw}}{g} \left(\frac{\omega H_{rms}}{\sinh(kd)}\right)^3 \quad (7.24)$$

7.1.4 Κυματικές παράμετροι

Από τους υπολογισμούς του μοντέλου προκύπτουν οι τρεις ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι: η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος H_{rms} η περίοδος T_p και η μέση διεύθυνση θ του κύματος. Η μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος H_{rms} και το σημαντικό ύψος κύματος H_{m0} ορίζονται αντίστοιχα από τις εξισώσεις

$$H_{rms} = 2\sqrt{2E_1} \quad (7.25)$$

$$H_{m0} = 4\sqrt{4E_1} \quad (7.26)$$

Όπου E_1 η ολική κυματική ενέργεια που δίνεται από την εξίσωση:

$$E_1 = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f, \theta) df d\theta \quad (7.27)$$

Όπου θ_{max} και θ_{min} τα όρια της διεύθυνσης του κυματισμού και f_{max} και f_{min} το ανώτατο και κατώτατο όριο αντίστοιχα για την κυματική συχνότητα που χρησιμοποιείται στην παραγωγή του ενεργειακού φάσματος. Η περίοδος αιχμής T_p ορίζεται ως η περίοδος μέγιστης ενεργειακής πυκνότητας.

Η μέση διεύθυνση κύματος θ ορίζεται ως

$$\theta = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (7.28)$$

Όπου a, b σταθερές που δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\alpha = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \cos\theta E(\theta) d\theta \quad (7.29)$$

$$b = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \sin\theta E(\theta) d\theta \quad (7.30)$$

Από το κυματικό μοντέλο Mike 21 PMS, προκύπτουν επίσης οι τρεις συνιστώσες των τάσεων ακτινοβολίας S_{xx} , S_{yy} και S_{xy} οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία των κυματογενών ρευμάτων. Οι τάσεις ακτινοβολίας ορίζονται από τις εξισώσεις:

$$S_{xx} = \rho \frac{g}{2} (F_u + F_p) \quad (7.31a)$$

$$S_{yy} = \rho \frac{g}{2} (F_u + F_p) \quad (7.31.b)$$

$$S_{xy} = \rho \frac{g}{2} F_{uv} \quad (7.31.c)$$

Οι δυνάμεις F δίδονται από τις εξισώσεις:

$$F_u = \int_0^{2\pi} \cos^2(1 + G) E(\theta) d\theta \quad (7.32)$$

$$F_v = \int_0^{2\pi} \sin^2(1 + G) E(\theta) d\theta \quad (7.33)$$

$$F_{uv} = \int_0^{2\pi} \sin\theta \cos\theta (1 + G) E(\theta) d\theta \quad (7.34)$$

$$F_p = \int_0^{2\pi} G E(\theta) d\theta \quad (7.35)$$

Με την παράμετρο G να δίνεται από την εξίσωση:

$$G = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \quad (7.36)$$

Τέλος, από το μοντέλο προκύπτουν οι συνιστώσες ενός διανύσματος ταχύτητας $U(u,v)$ που απεικονίζει τη μέση διεύθυνση κύματος στην περιοχή μελέτης, οι οποίες δίνονται στην ακόλουθη σχέση:

$$u = H_{m0} \cos\theta \quad (7.37)$$

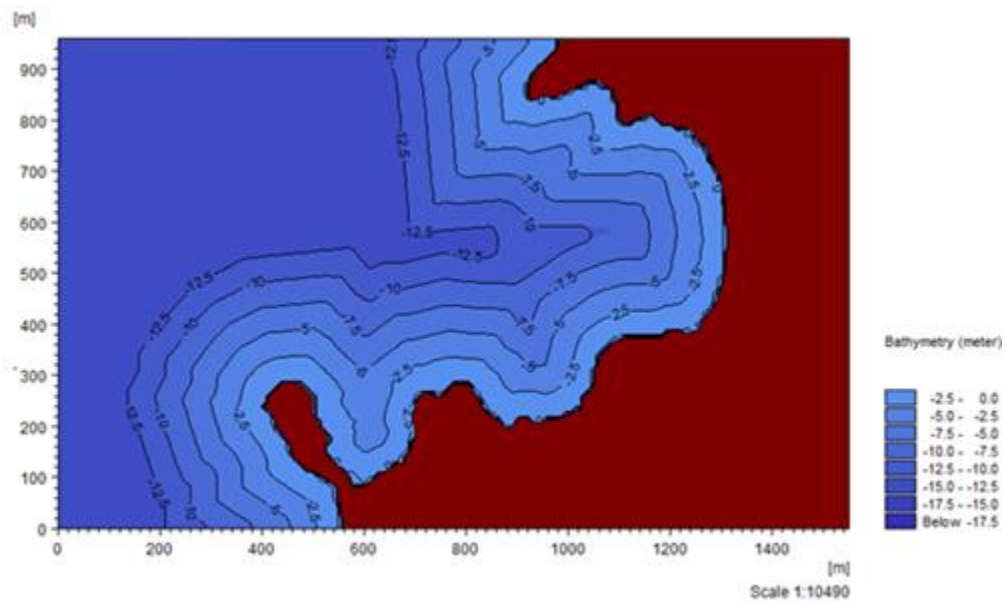
$$v = H_{m0} \sin\theta \quad (7.38)$$

7.1.5 Εφαρμογή μοντέλου

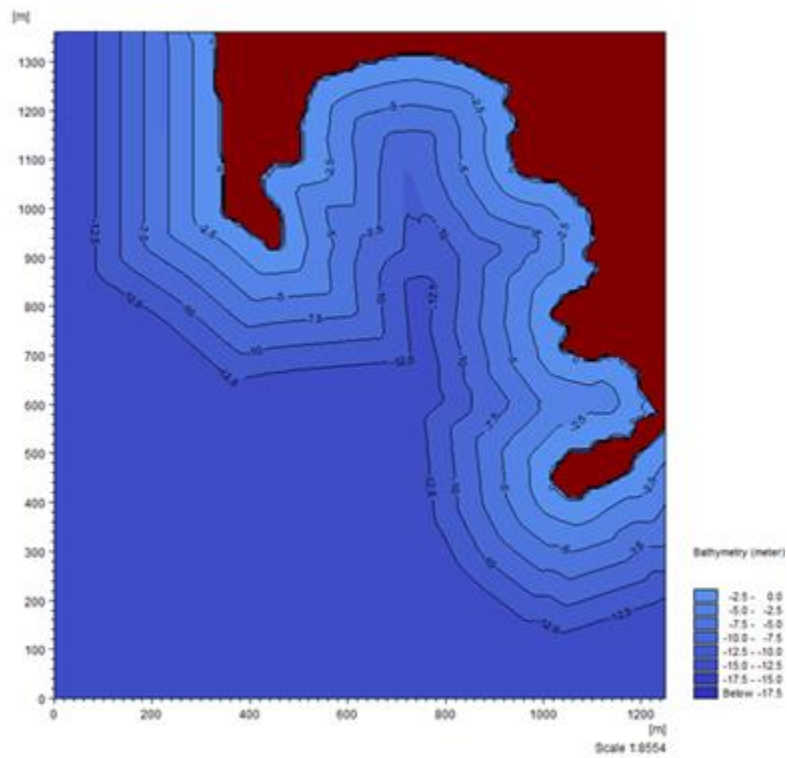
7.1.5.1 Βαθυμετρία

Βασική παράμετρος του μοντέλου αποτελεί η βαθυμετρία, καθώς είναι σημαντικό στοιχείο για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων από το μοντέλο. Για την διεξαγωγή των προσομοιώσεων, κατασκευάστηκε η βαθυμετρία στο σχέδιο που προέκυψε από την αποτύπωση της περιοχής μελέτης (Σχήμα 2.6). Από τα δεδομένα βάθης (Παράγραφος 2.2) θεωρήθηκε μέση ομοιόμορφη κλίση ακτής 5%. Από τα παραπάνω προκύπτει η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης, η οποία παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.1÷7.3, ύστερα από επεξεργασία με εργαλείο του προγράμματος MIKE 21.

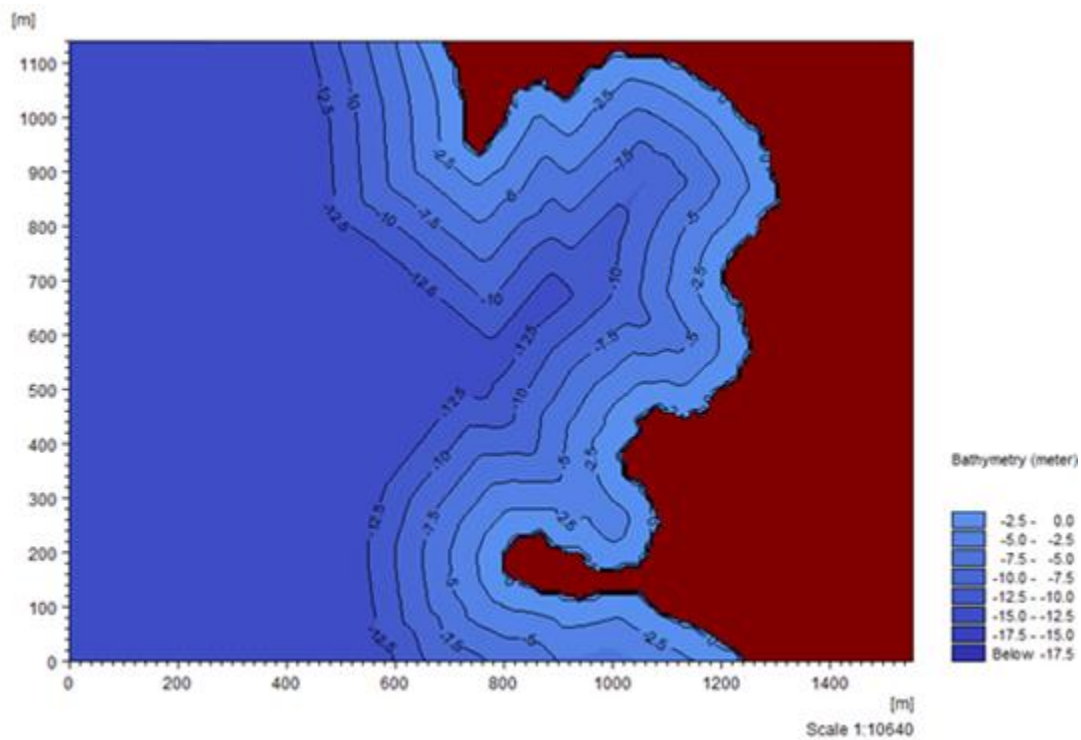
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι άνεμοι που επηρεάζουν τη περιοχή μελέτης είναι ο Βόρειος, ο Βορειοανατολικός και ο Ανατολικός. Το πρόγραμμα Mike 21 επιτρέπει την εισαγωγή των κυματισμών μόνο από το δυτικό όριο, ενώ εξάγει καλύτερα αποτελέσματα όταν αυτοί εισέρχονται παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα με τον άξονα x του καννάβου. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και με σκοπό την ακριβέστερη αναπαράσταση των κυματικών φαινομένων, η περιοχή μελέτης στράφηκε προς τα δυτικά και ταυτόχρονα περιστράφηκε κατάλληλα ανάλογα με την διεύθυνση των ανέμων. Έτσι, προέκυψαν τρεις βαθυμετρίες. Σε κάθε βαθυμετρία η ακτογραμμή έχει προσανατολιστεί ώστε οι κυματισμοί συγκεκριμένης διεύθυνσης να εισέρχονται κάθετα στον άξονα δυτικό όριο του καννάβου.



Σχήμα 7.1: Βαθυμετρία για τον ανατολικό άνεμο



Σχήμα 7.2: Βαθυμετρία για τον βόρειο άνεμο



Σχήμα 7.3: Βαθυμετρία για τον βορειοανατολικό άνεμο

Μια σημαντική παράμετρος για την εφαρμογή του μοντέλου, η οποία δεν γίνεται εμφανής στα παραπάνω σχήματα είναι η επιλογή των κενών του καννάβου, ώστε η βαθυμετρία να εισαχθεί στο μοντέλο. Η επιλογή των κελιών του πλέγματος είναι σημαντική για την επαρκή ανάλυση της βαθυμετρίας και του κυματικού πεδίου του επιπέδου x-y. Είναι απαραίτητο να υπάρχει ικανός αριθμός σημείων του πλέγματος στη ζώνη απόσβεσης στην περίπτωση προσομοίωσης κυματογενών ρευμάτων. Από το πρόγραμμα προτείνεται να αντιστοιχούν 8-10 σημεία του καννάβου στο μήκος κύματος. Εξαιτίας του μεγάλου εύρους των τιμών των μηκών κύματος προτιμώνται διαφορετικά κελιά καννάβων ανάλογα με το μήκος κύματος κάθε κυματισμού ώστε να πληρούται το κριτήριο. Έτσι, υπολογίστηκε το μήκος κύματος στα βάθη για κάθε κυματισμό από την εξίσωση:

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (7.39)$$

Από την περίοδο των κυματισμών βρέθηκε το μήκος κύματος στα βαθιά σύμφωνα με την εξίσωση 7.39 δημιουργήθηκαν κάρναβοι με διάσταση πλέγματος 3m, 5m και 7m.

7.1.5.2 Διαδικασία προσομοίωσης

Βασικές παράμετροι

Αρχικά, επιλέγεται normal PMS, δηλαδή προσομοίωση σε δύο διαστάσεις και εισάγεται το αρχείο της βαθυμετρίας. Από το αρχείο της βαθυμετρίας προκύπτουν οι γεωμετρικές συντεταγμένες και ορίζεται ως πραγματική γη η τιμή πάνω από 10m ύψος. Στις βαθυμετρίες που συμπεριλήφθηκαν τα έργα ως πραγματική γη θεωρήθηκε διαφορετική τιμή μεγαλύτερη του 0. Στη συνέχεια θεωρείται περίοδος προσομοίωσης στάσιμη (stationary) διότι λαμβάνεται υπόψη ένα κυματικό γεγονός το οποίο δε μεταβάλλεται με τον χρόνο.

Συνθήκες ορίων (boundary conditions)

Οι παράμετροι που ακολουθούν αφορούν στο ανοικτό όριο, από το οποίο εισέρχεται ο κυματισμός στον κάρναβο. Ο κυματισμός θεωρείται τυχαίος παραμετρικός (Parametric random) και ζητούνται να χαρακτηριστικά του (περίοδος αιχμής, μέσο τετραγωνικό ύψος και μέση διεύθυνση κύματος). Σημειώνεται εδώ ότι λόγω των τριών βαθυμετριών όλοι οι κυματισμοί έχουν ίδια μέση διεύθυνση κύματος ίση με 270° . Ακολούθως, όλες οι εφαρμογές του μοντέλου έχουν πραγματοποιηθεί με συμμετρικά όρια (symmetrical), επειδή οι ισοβαθείς κοντά στα όρια είναι ευθείες και παράλληλες. Η επιλογή αυτή συστήνεται από το ίδιο το πρόγραμμα για όλες σχεδόν τις εφαρμογές.

Παράμετροι μοντέλου (model parameters)

Στις παραμέτρους του μοντέλου περιλαμβάνονται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας, ο τύπος της παραβολικής προσέγγισης και παραμέτρους που καθορίζουν τη θραύση και την τριβή πυθμένα. Η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας επιλέγεται σταθερή και ίση με το μηδέν

καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα. Ο τύπος της παραβολικής προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε είναι το simple model, επειδή η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση του προσπίπτοντος κυματισμού με τον άξονα x είναι μηδέν. Ενώ δε λήφθηκε υπόψη φίλτρο για την εξομάλυνση της θραύσης. Η τριβή πυθμένα συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς με σταθερή τιμή σε όλη τη περιοχή. Επιλέγεται συντελεστής τραχύτητας Nikuradse k_N και διατηρείται η προεπιλεγμένη τιμή 0,002. Τέλος, καθορίζονται οι παράμετροι κυματικής θραύσης. Επιλέγονται οι προκαθορισμένες τιμές καθώς χρησιμοποιείται το μοντέλο Battjes and Janssen (1978).

Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν είναι δύο αρχεία, εκ των οποίων το ένα περιλαμβάνει το ύψος κύματος, τη διεύθυνση διάδοσης και τις ταχύτητες κατά την οριζόντια u και κατά την κατακόρυφη v και το άλλο περιλαμβάνει τις τάσεις ακτινοβολίας s_{xx}, s_{xy}, s_{yy} .

7.2 Υδροδυναμικό μοντέλο HD

Το Mike 21 Flow Model είναι ένα μοντέλο υπολογισμού δισδιάστατων ροών με ελεύθερη επιφάνεια, το οποίο βρίσκει εφαρμογή στην προσομοίωση υδραυλικών και περιβαλλοντικών φαινομένων, σε λίμνες, εκβολές ποταμών, παράκτιες περιοχές και στην ανοιχτή θάλασσα. Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) αποτελεί τη βάση του μοντέλου Mike 21 Flow model (FM) καθώς προσομοιώνει τη μεταβολή της στάθμης του νερού και τη ροή, παράγοντας στοιχεία που αποτελούν δεδομένα για άλλα μοντέλα όπως αυτό της στερεομεταφοράς (ST). Μεταξύ άλλων, μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό των ανεμογενών και κυματογενών ρευμάτων σε μια παράκτια περιοχή, των κυματικών καταιγίδων και τη μοντελοποίηση των παλιρροιών.

Στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη :

- η διατμητική τάση στον πυθμένα (bottom shear stress)

- η διατμητική τάση από τον άνεμο (wind shear stress)
- οι μεταβολές της βαρομετρικής πίεσης (Barometric pressure gradients)
- η δύναμη Coriolis (Coriolis force)
- η διασπορά της ορμής (momentum dispersion)
- οι παροχές εισόδου και εξόδου (sources and sinks)
- η εξάτμιση (evaporation)
- οι μεταβολές της στάθμης της θάλασσας (flooding and drying)
- οι τάσεις ακτινοβολίας (wave radiation stresses)

7.2.1 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

Το Mike 21 HD είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει δισδιάστατες μη μόνιμες ροές (ομογενείς κατά βάθος) σε κάθε σημείο του κάναβου. Οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης κατά x και y, ολοκληρωμένες στο βάθος, περιγράφουν τη ροή και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας και αποτελούν τη βάση για την επίλυση του υδροδυναμικού μοντέλου. Οι προαναφερθείσες σχέσεις παρουσιάζονται ακολούθως:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d_t}{\partial t} \quad (7.40)$$

Όπου $\eta(x,y,t)$ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $p,q(x,y,t)$ η ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις διατήρησης ποσότητας κίνησης κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα είναι οι εξής:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 d^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{xx}) \right] = 0 \quad (7.41a)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2+q^2}}{c^2 d^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[\frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xy}) \right] - \Omega_p - fV_w V_{wy} + \frac{d}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (7.41b)$$

Όπου $\eta(x,y,t)$ η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας $d=h-d_t$ το βάθος νερού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, $C(x,y)$ ο συντελεστής Chezy, ρ_w η πυκνότητα του νερού, $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$ οι ενεργές διατμητικές τάσεις, $\Omega(x,y)$ ο συντελεστής Coriolis, εξαρτώμενος από το γεωγραφικό πλάτος, $V_w(x,y,t)$ η ταχύτητα του ανέμου με V_{wx}, V_{wy} τις συνιστώσες της κατά x και y αντίστοιχα, $f(V)$ ο συντελεστής τριβών ανέμου, p_a η ατμοσφαιρική πίεση, x, y οι χωρικές συντεταγμένες και t ο χρόνος. Το Mike 21 HD χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο ADI (Alternating Direction Implicit) για την ολοκλήρωση των εξισώσεων συνέχειας και διατήρησης της ποσότητας στο χώρο και το χρόνο.

7.2.2 Βασικές παράμετροι του μοντέλου

Η διατμητική τάση στον πυθμένα εμπεριέχει μεταβολές λόγω τύρβης και διακυμάνσεων μικρής κλίμακας των υδάτων. Το παραπάνω φαινόμενο εισάγεται στο μοντέλο ως διατύπωση τυβρώδους ιξώδους E_v που περιγράφει την απόσβεση ταλαντώσεων κυμάτων με μικρό μήκος κύματος L και αντιπροσωπεύει τέτοια φαινόμενα μικρής κλίμακας (Madsen et al., 1988; Wang 1990). Το τυβρώδες ιξώδες εισάγεται στην εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά x είτε σε όρους ορμής είτε σε όρους ταχύτητας, όπως περιγράφεται πιο κάτω:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ E_v \frac{\partial p}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ E_v \frac{\partial p}{\partial y} \right\} \quad (7.42.a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ dE_v \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ dE_v \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \quad (7.42.b)$$

Όπου p η ορμή στην οριζόντια διεύθυνση και u η ταχύτητα στην οριζόντια διεύθυνση.

Η πρώτη έκφραση είναι πιο ακριβής όταν το βάθος είναι σταθερό, ενώ η δεύτερη σε γενικές περιπτώσεις αν και ενδέχεται να οδηγήσει σε αριθμητικές αστάθειες, γι αυτό το τυβρώδες ιξώδες πρέπει να πληροί το ακόλουθο κριτήριο:

$$\frac{E_v \Delta t}{\Delta x^2} \leq 0.5 \quad (7.43)$$

Όπου Δx η ισοδιάσταση του καννάβου και Δt το χρονικό βήμα του μοντέλου. Το τυρβώδες ιζώδες E_v μπορεί να θεωρηθεί σταθερό όπως περιγράφηκε παραπάνω, ή χρονικά μεταβαλλόμενο, σύμφωνα με την εξίσωση του Smagorinsky, η οποία είναι η εξής:

$$E_v = C_s^2 \Delta x^2 \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x}} \quad (7.44)$$

Όπου U, V οι μέσες κατά βάθος ταχύτητες στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα και C_s μια σταθερά που παίρνει τιμές μεταξύ 0.25 και 10.

Η αντίσταση R στον πυθμένα περιγράφεται είτε με τον αριθμό Chezy είτε με τον αριθμό Manning. Και στις δύο περιπτώσεις, η εξίσωση είναι η εξής:

$$R = \frac{g|u|}{C^2} \quad (7.45)$$

Όπου u η ταχύτητα και C ο αριθμός Chezy, ο οποίος σχετίζεται με τον αριθμό Manning με την ακόλουθη σχέση :

$$C = M d^{1/6} \quad (7.46)$$

7.2.3 Εφαρμογή μοντέλου

Βασικές παράμετροι

Το υδροδυναμικό μοντέλο εφαρμόστηκε για όλες τις περιπτώσεις κυμάτων και είναι προφανές ότι οι βασικές παράμετροι μεταβάλλονται για κάθε ομάδα ανεμογενών κυματισμών.

Σε όλες τις εφαρμογές επιλέχθηκε το είδος ανάλυσης να είναι μόνο υδροδυναμική. Εισήχθη η βαθυμετρία, συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς οι δυνάμεις Coriolis και επειδή κανένα μοντέλο δεν αποτέλεσε συνέχεια κάποιου άλλου ορίστηκε τύπος μοντέλου cold start.

Καθοριστική παράμετρο αποτελεί η περίοδος προσομοίωσης. Στην παράμετρο αυτή πρέπει να επιλεχθεί χρονικό βήμα και χρονική περίοδος. Κριτήριο για την επιλογή του χρονικού βήματος αποτελεί ο αριθμός Courant, ο οποίος κρίνει τη σταθερότητα του μοντέλου και δεν πρέπει να υπερβαίνει το 8 με 10. Ο αριθμός Courant δίνεται από την εξίσωση:

$$Cr = C \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (7.47)$$

Όπου το Δx είναι το χωρικό βήμα του καννάβου, οπότε και μεταβάλλεται ανάλογα με τη βαθυμετρία, Δt το χρονικό βήμα και C η ταχύτητα που δίνεται από τη σχέση $C = (gd)^{1/2}$ όπου d το βάθος. Γενικά, ο Cr_{\max} δεν πρέπει να ξεπερνά το 5. Η περίοδος προσομοίωσης επιλέγεται αρχικά με δοκιμές και τελικά προκύπτει μια τιμή ώστε να είναι επαρκής για να δημιουργηθούν συνθήκες ισορροπίας στο σύστημα. Ανάλογα με τον κυματισμό η περίοδος προσομοίωσης μπορεί να αλλάζει, στόχος είναι να υπάρχει σταθεροποίηση της κίνησης των ρευμάτων και των ταχυτήτων τους. Επιπλέον, ενεργοποιείται η επιλογή warm-up period, όπου δίνεται ένας αριθμός βημάτων ώστε οι μεταβλητές σταδιακά να αυξηθούν από το μηδέν στο 100% της πραγματικής τους τιμής, πριν ξεκινήσει το πρόγραμμα να δίνει αποτελέσματα. Με την εισαγωγή της βαθυμετρίας το πρόγραμμα προσδιορίζει τα ανοιχτά όρια. Οι επιλογές που αφορούν πηγές και καταβόθρες καθώς και το καθορισμό του ισοζυγίου μάζας μένουν ανενεργές. Παρ' όλο που δεν εμφανίζονται παλιρροιακά ρεύματα στη περιοχή, ενεργοποιείται η εντολή Flood and Dry με την οποία καθορίζεται ένα ελάχιστο επιτρεπτό βάθος για κάθε σημείο (drying depth) ίσο με 0.2 κάτω από το οποίο τα σημεία αποθηκεύονται από το πρόγραμμα και λαμβάνονται υπόψη ξανά στους υπολογισμούς όταν το βάθος τους γίνει ίσο με 0.3m (flooding depth). Οι τιμές που λήφθηκαν υπόψη είναι προεπιλεγμένες από το μοντέλο.

Υδροδυναμικές παράμετροι

Πρώτη παράμετρος εισάγεται η αρχική ανύψωση της στάθμης της θάλασσας. Λαμβάνεται σταθερή σε όλη τη περιοχή ίση με 0, όπως αυτή επιλέχθηκε και το κυματικό μοντέλο PMS.

Στη συνέχεια, γίνεται ο προσδιορισμός των συνθηκών που επικρατούν στα όρια του καννάβου. Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς μπορεί να δώσει λανθασμένη μορφή των κυματογενών ρευμάτων σε σχέση με αυτή που αναμένεται να προκύψει πραγματικά από τις κυματικές συνθήκες που έχουν εισαχθεί. Γενικά, το εγχειρίδιο δίνει κάποιες πληροφορίες για τους τύπους των ορίων και πώς γίνεται ο υπολογισμός της ροής σε αυτά, όμως παρατηρήθηκαν διαφορετικά ποιοτικά αποτελέσματα για ίδια επιλογή ορίων για κύματα που προέρχονται από τον ίδιο άνεμο αλλά έχουν διαφορετικά κυματικά χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό και με σκοπό τα αποτελέσματα του μοντέλου να προσομοιάζουν τη πραγματικότητα όσο το δυνατόν καλύτερα, έγιναν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί τύπων ορίου που οδήγησαν στην τελική επιλογή. Σε όλα τα μοντέλα το δυτικό όριο από το οποίο εισέρχεται ο κυματισμός περιγράφηκε από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (level) ενώ το άνω και το κάτω από τη ποσότητα κίνησης (flux), δηλαδή τη ποσότητα του ρευστού που περνάει από το όριο. Η στάθμη του νερού στο όριο level και η ποσότητα κίνησης στα όρια flux επιλέχθηκαν σταθερά στο χρόνο σε όλα τα σημεία του συνόρου, επειδή απαιτείται σταθερό πεδίο ροής. Ακολούθως, προσδιορίζεται πως θα πραγματοποιείται η ροή κατά μήκος του συνόρου (FAB). Σε όλες τις εφαρμογές στο αριστερό όριο (άξονας y) έχει ορισθεί επιλογή FAB 0 καθώς η ροή στο όριο είναι σχεδόν κάθετη. Ανάλογα με το μοντέλο τα άνω και κάτω όρια έχουν τεθεί επιλογή είτε 1 ή 2 είτε 12.

Άλλη παράμετρος που ρυθμίζεται είναι η τιμή του συντελεστή τυρβώδους διάχυσης (Eddy viscosity), η οποία επηρεάζει σημαντικά στην επιτυχή πορεία του μοντέλου καθώς εξασφαλίζει την απουσία ασταθειών εξαιτίας στροβιλισμών της ροής. Η τιμή του συντελεστή λήφθηκε υπόψη ως σταθερή στο πεδίο ροής και υπολογίζεται από τη ροής (flux based formulation). Ο υπολογισμός του συντελεστή βάσει της ταχύτητας δημιουργούσε αστάθειες σε κάποια μοντέλα και αυτά δε μπορούσαν να ολοκληρωθούν, έτσι για να υπάρχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα για όλους τους κυματισμούς προτιμήθηκε η επιλογή flux based. Γενικά η τιμή της επιλέχθηκε ώστε να πληροί το κριτήριο που αναφέρθηκε παραπάνω (7.43). Ο συντελεστής έλαβε τιμές 1.5 ή 2. Η αντίσταση του πυθμένα στη ροή επιλέγεται σταθερή

ίση με $32\text{m}^{1/3}$ και εκφράζεται με τον αριθμό Manning, ο οποίος σε σχέση με τον αριθμό Chezy είναι πιο ακριβής. Εισάγεται το αρχείο με τις τάσεις ακτινοβολίας που έχει προκύψει από το μοντέλο PMS. Τέλος, δεν θεωρήθηκε ότι υπάρχει άνεμος. Πραγματοποιήθηκαν υδροδυναμικά μοντέλα όπου υπήρχε άνεμος με σταθερά χαρακτηριστικά ίδια με του ανέμου από τον οποίο προήλθαν οι κυματισμοί, τα αποτελέσματα όμως ποιοτικά παρέμεναν ίδια ενώ ποσοτικά ήταν πιο συντηρητικά. Επομένως προτιμήθηκε να μη ληφθεί υπόψη ο άνεμος.

Αποτελέσματα

Από το υδροδυναμικό μοντέλο εξήχθησαν δύο αρχεία. Το ένα δίνει τις ταχύτητες του κυματογενούς ρεύματος κατά τον άξονα x και κατά τον άξονα y και το δεύτερο δίνει τη βάθος του νερού και τις παροχές ανά μονάδα μήκους κατά του άξονες x και y.

7.3 Μοντέλο στερεομεταφοράς ST

Το Mike 21 ST είναι ένα αριθμητικό μοντέλο του λογισμικού Mike 21 που υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων (Non-cohesive sediment transport module) σε περιπτώσεις αμιγούς ρεύματος ή σε συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος. Επιπλέον, υπολογίζονται και οι αρχικοί ρυθμοί μεταβολής της στάθμης του πυθμένα. Το Mike 21 ST δεν αποτελεί ένα πλήρες μορφολογικό μοντέλο, αλλά είναι δυνατόν με αυτό να προσδιορισθούν οι περιοχές πιθανής διάβρωσης ή απόθεσης ιζήματος. Υπάρχει δυνατότητα να ληφθούν υπόψη στην προσομοίωση η παλίρροια, ο άνεμος, οι κυματισμοί και τα ρεύματα. Το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή σε φυσικά περιβάλλοντα, όπως εκβολές ποταμών και ακτογραμμές, καθώς επίσης και σε ανθρώπινες κατασκευές, όπως λιμάνια και γέφυρες.

7.3.1 Θεωρητικές σχέσεις

Στο μοντέλο Mike 21 ST είναι διαθέσιμες πέντε διαφορετικές θεωρίες υπολογισμού της στερεομεταφοράς σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος.

* Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund and Hansen

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται από τις εξισώσεις:

$$\Phi_t = 0,1 \frac{C^2}{2g} \tau_\theta^{2,5} \quad (7.48)$$

$$\Phi_t = \frac{q_t}{(s-1)gD^3} \quad (7.49)$$

Όπου C ο αριθμός Chezy, s η σχετική πυκνότητα ρ_s/ρ , D η διάμετρος κόκκου και q_t ο ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου και τ_θ η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα που προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gD} \quad (7.50)$$

Όπου U_f η διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με την συνολική τριβή.

* Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund and Fredsøe

Ο ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου (q_t) υπολογίζεται ως το άθροισμα του φορτίου πυθμένα (q_b) και του φορτίου σε αιώρηση (q_s), δηλαδή $q_t = q_b + q_s$. Γίνεται η θεώρηση ότι η στερεομεταφορά στον πυθμένα λαμβάνει χώρα σε ένα στρώμα πάχους ίσο με τη διάμετρο των κόκκων του ιζήματος και η στερεοπαροχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_b = 5\rho(\sqrt{\theta'} - 0,07\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gD} \quad , \theta' > \theta_c \quad (7.51)$$

Όπου ρ η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι σε κάποιο στρώμα να βρίσκονται σε κίνηση, θ' η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) και θ_c η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης. Η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα σε σχέση με την τριβή

της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) θ' και η πιθανότητα p δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\theta' = \frac{U_f'^2}{(s-1)gD} \quad (7.52)$$

$$p = \left[1 + \left(\frac{\frac{\pi\beta_f}{6}}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-0,25} \quad (7.53)$$

Όπου U_f' η διατμητική ταχύτητα σχετιζόμενη με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) και β_f ο δυναμικός συντελεστής τριβής. Το φορτίο σε αιώρηση υπολογίζεται ως:

$$q_s = 11.6U_f'^2 c_b a \left[I_1 \ln \left(\frac{30d}{K_N} \right) + I_2 \right] \quad (7.54)$$

Όπου c_b η συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος, $\alpha=2d$ το επίπεδο αναφοράς για το c_b , I_1 και I_2 τα ολοκληρώματα του Einstein, d το βάθος του νερού και $K_N=2.5D$ η ισοδύναμη τραχύτητα του Nikuradse. Τα ολοκληρώματα I_1 και I_2 αποτελούν μια συνάρτηση του αδιάστατου επιπέδου αναφοράς $A=r/d$ και του αριθμού Rouse $z^* = W_f/kU_{f,wc}$, με W_f να απεικονίζει την ταχύτητα καθίζησης του αιωρούμενου ιζήματος $\kappa=0,4$ η σταθερά του Von Karman και $U_{f,wc}$ η διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος και έχουν όρια το διάστημα (α,d) όπου το y μετράται πάνω από υο σταθερό επίπεδο του πυθμένα. Στο επίπεδο αναφοράς $\alpha=2d$ συγκέντρωση c_b υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση

$$c_b = \frac{0,65}{\left(1 + \frac{1}{\lambda}\right)^3} \quad (7.55)$$

Όπου λ παράμετρος που δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \frac{\pi p \beta}{6}}{0,027s\theta'}} \quad , \theta' > \theta_c + \frac{\pi p \beta}{6} \quad (7.56)$$

Λόγω του ότι η θεωρία των Engelund and Fredsøe αναπτύχθηκε βάσει αποτελεσμάτων που προέκυψαν με αμμώδες υλικό πυθμένα, η θεωρία ισχύει μόνο σε περιπτώσεις στις οποίες το υλικό πυθμένα, η θεωρία ισχύει μόνο σε περιπτώσεις στις οποίες το υλικό που εισάγεται ως δεδομένο να έχει διάμετρο κόκκων παρεμφερή της άμμου.

Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς των Zyserman and Fredsøe

Η διατύπωση ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς Zyserman and Fredsøe είναι μια μέθοδος υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς του συνολικού φορτίου q_t είναι παρόμοια με αυτή των Engelund and Fredsøe, με μόνη διαφορά ότι η συγκέντρωση του φορτίου στον πυθμένα υπολογίζεται από την ακόλουθη εμπειρική σχέση:

$$c_b = \frac{A(\theta' - \theta_c)^n}{1 + \frac{A}{c_m}(\theta' - \theta_c)^n}, \quad \theta' > \theta_c \quad (7.57)$$

Όπου $A=0,331$, $n=1,75$, $c_m=0,46$, $\theta_c=0,045$ σταθερές.

Θεωρία μεταφοράς φορτίου πυθμένα των Meyer-Peter and Müller

Κατά τη θεωρία αυτή, ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του πυθμένα υπολογίζεται ως:

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1,5} \quad (7.58)$$

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gD^3}} \quad (7.59)$$

Σε περιπτώσεις όπου το ίζημα είναι πολύ λεπτόκοκκο και /ή η ταχύτητα του ρεύματος μεγάλη, με τη φόρμουλα αυτή υπολογίζονται μικρότεροι ρυθμοί στερεομεταφοράς από τους πραγματικούς καθώς λαμβάνεται υπόψη μόνο η συνεισφορά του φορτίου πυθμένα.

Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς των Ackers and White

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Phi_b = C \left(\frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (7.60)$$

Όπου C, A και m σταθερές που εξαρτώνται από το αδιάστατο μέγεθος D_{gr} το οποίο υπολογίζεται από την σχέση:

$$D_{gr} = D \left[\frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (7.61)$$

Όπου D το μέγεθος των κόκκων του ιζήματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, s η σχετική πυκνότητα του ιζήματος και v το κινηματικό ιξώδες του νερού. Τέλος, η παράμετρος F_{gr} , που περιγράφει το γενικό αριθμό της κινηματικότητας του ιζήματος, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$F_{gr} = \frac{U_f^n}{\sqrt{gD(s-1)}} \left[\frac{V}{\sqrt{32 \log\left(\frac{10d}{D}\right)}} \right]^{1-n} \quad (7.62)$$

Όπου U_f η διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με την συνολική τριβή, d το βάθος του νερού, V η μέση κατά βάθος ταχύτητα του ρεύματος, n μια σταθερά που εξαρτάται από το D_{gr} και κυμαίνεται στο διάστημα (0,1) από τα πιο χονδόκοκκα προς τα πιο λεπτόκοκκα υλικά.

Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες κύματος-ρεύματος

Στο μοντέλο Mike 21 ST είναι διαθέσιμες 2 διαφορετικές μέθοδοι προσομοίωσης της στερεομεταφοράς, για συνδυασμό ρεύματος και κύματος.

Θεωρία μεταφοράς του Bijker

Το ολικό φορτίο μεταφοράς ιζημάτων q_t στην θεωρία αυτή, υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_t = q_b + q_s = q_b(1 + 1.83Q) \quad (7.63)$$

Όπου q_b το φορτίο πυθμένα, q_s το αιωρούμενο φορτίο και Q αδιάστατος συντελεστής που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Q = \left[I_1 \ln \left(\frac{33d}{r} \right) + I_2 \right] \quad (7.64)$$

Όπου d το βάθος του νερού, r είναι η τραχύτητα πυθμένα, I_1 και I_2 τα ολοκληρώματα του Einstein, που πρέπει να εκτιμηθούν αριθμητικά βάσει του αδιάστατου επιπέδου αναφοράς $A=r/d$ και z^* με το τελευταίο να δίνεται από τη σχέση:

$$z^* = \frac{W_f}{\kappa U_{f,wc}} \quad (7.65)$$

Όπου W_f η ταχύτητα καθίζησης του αιωρούμενου ιζήματος, κ η σταθερά του Von Karman και $U_{f,wc}$ η διατμητική ταχύτητα κάτω από συνθήκες συνδυασμένης δράσης κύματος και ρεύματος. Η επίδραση των κυματισμών στη μεταφορά του αιωρούμενου φορτίου λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς μέσω της διατμητικής ταχύτητας $U_{f,wc}$. Η τραχύτητα r μπορεί να συσχετιστεί με τον αριθμό Chezy C , με την ακόλουθη σχέση:

$$C = 18 \log \left(\frac{12d}{r} \right) \quad (7.66)$$

Όσον αφορά το μέγεθος $U_{f,wc}$ υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$U_{f,wc} = U_{f,c} \sqrt{1 + 0,5 \frac{\xi u_b}{V}} = \frac{V\sqrt{g}}{C} \sqrt{1 + 0,5 \left(\frac{\xi u_b}{V} \right)^2} \quad (7.67)$$

Όπου $U_{f,c}$ είναι η ταχύτητα διάτμησης που σχετίζεται με το ρεύμα, V η ταχύτητα ρεύματος κατά μέσο όρο βάθους, u_b το εύρος της προκαλούμενης από το κύμα ταχύτητας ταλαντώσεων στον πυθμένα και ξ ένας αδιάστατος συντελεστής που μπορεί να εκφραστεί σε όρους του συντελεστή κυματικής τριβής f_w και του αριθμού C και υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (7.68)$$

Ο παράγοντας κυματικής τριβής f_w υπολογίζεται από την εξίσωση (Swart):

$$f_w = \exp \left[-5,977 + 5,213 \left(\frac{\alpha_p}{r} \right)^{-0,194} \right] \quad , 1,47 < \frac{\alpha_p}{r} < 3000 \quad (7.69.a)$$

$$f_w = 0,32 \quad , \frac{\alpha_p}{r} < 1,47 \quad (7.69.b)$$

Όπου α_p το πλάτος της κυματικής κίνησης που δίνεται από την εξίσωση:

$$\alpha_p = \frac{u_b T}{2\pi} \quad (7.70)$$

Το φορτίο πυθμένα q_b υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$q_b = BD_{50} U_{f,c} \exp \left(- \frac{0,27 \Delta D_{50} g}{\mu U_{f,wc}^2} \right) \quad (7.71)$$

Όπου B ένας αδιάστατος συντελεστής του φορτίου πυθμένα, Δ η σχετική πυκνότητα του ιζήματος που δίνεται από τη σχέση $\Delta = s - 1$ και μ ο παράγοντας πτυχώσεων (Ripple factor). Αξίζει να αναφερθεί ότι η επίδραση των κυμάτων στο φορτίο πυθμένα q_b λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός όρου ανατάραξης, δηλαδή ο εκθέτης στην προαναφερθείσα εξίσωση. Ο όρος μεταφοράς σχετίζεται μόνο με το ρεύμα του $u_{f,c}$.

Ο παράγοντας πτυχώσεων ορίζεται από την εξίσωση:

$$\mu = \left(\frac{C}{C'} \right)^{1,5} \quad (7.72)$$

Όπου C' είναι ο αριθμός Chezy που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού του πυθμένα και υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C' = 18 \log \left(\frac{12d}{D_{90}} \right) \quad (7.73)$$

Όπου D_{90} το μέγεθος των ιζημάτων για το οποίο 90% (κατά βάρος) του υλικού του πυθμένα είναι λεπτότερο.

Ντετερμινιστικό μοντέλο μεταφοράς STP

Το ντετερμινιστικό διακυματικό πρόγραμμα μεταφοράς ιζημάτων STP της DHI χρησιμοποιείται για να υπολογίζει τους ρυθμούς μεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων σε συνθήκες συνδυασμένης δράσης κύματος-ρεύματος. Το μοντέλο είναι ένα προηγμένο πρόγραμμα μεταφοράς που λαμβάνει υπόψη μεταξύ άλλων την επίδραση στους υπολογιζόμενους ρυθμούς διεργασιών, όπως η κυματική διάδοση σε αυθαίρετη γωνία σε σχέση με το κύμα, θραυόμενα ή μη θραυόμενα κύματα, επίπεδο θαλάσσιο πυθμένα ή πυθμένα με πτυχώσεις, ομοιόμορφο ή βαθμονομημένο ίζημα.

Προκειμένου να γίνει η παρούσα μέθοδος κατά το δυνατόν αποδοτική από υπολογιστική άποψη, το μοντέλο Mike 21 ST παρεμβάλλει τα ποσοστά μεταφοράς ιζημάτων από πίνακες μεταφοράς που δημιουργούνται εκ των προτέρων. Οι πίνακες αυτοί δημιουργούνται χρησιμοποιώντας τη δισδιάστατη (2DH) ή την εν μέρει τρισδιάστατη προσέγγιση (Q3D). Στην κλασική, η ροή περιγράφεται κυρίως από τα κυματογενή ρεύματα, που σχηματίζουν γωνία με τη διεύθυνση των κυματισμών που κυμαίνεται μεταξύ 0° και 90° . Η προσέγγιση Q3D καλύπτει όλο το εύρος ενός πλήρους κύκλου και είναι κατάλληλη σε περιπτώσεις που εξετάζουν την εκροή ποταμών ή που είναι έντονη η παρουσία παλίρροιας.

7.3.2 Εφαρμογή μοντέλου

Οι παράμετροι που ρυθμίζουν το μοντέλο ST διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τις βασικές (basic parameters) και του μοντέλου (model parameters)

Στις βασικές παραμέτρους επιλέγεται αρχικά ο τύπος της ανάλυσης ανάμεσα στις συνθήκες αμιγούς ρεύματος ή συνδυασμού ρεύματος και κύματος. Εδώ επιλέγονται ο συνδυασμός ρεύματος και κύματος καθώς οι άνεμοι που μελετήθηκαν προκαλούν και τα δύο. Εισάγονται τα αποτελέσματά του υδροδυναμικού μοντέλου και επιλέγεται η ανάλυση να γίνει για όλη

την περιοχή μελέτης με χρονικό βήμα ίσο με το βήμα του υδροδυναμικού μοντέλου. Έτσι, η ανάλυση αξιοποιεί τα αποτελέσματα κάθε χρονικού βήματος του μοντέλου HD.

Για τις παραμέτρους του μοντέλου καθορίζεται η μέθοδος υπολογισμού της στερεομεταφοράς. Επιλέγεται το ντετερμινιστικό μοντέλο (STP) για τις δύο διαστάσεις και εισάγεται ένας πίνακας μεταφοράς ιζήματος (Sediment Transport Table), βάσει του οποίου γίνεται ο υπολογισμός των ρυθμών κυκλοφορίας.

- Δημιουργία πίνακα μεταφοράς ιζήματος (STP)

Ο πίνακας κατασκευάζεται από την εφαρμογή Mike 21 Toolbox με τη χρήση του εργαλείου Generation of sediment table. Αρχικά, επιλέγονται γενικές παράμετροι όπως η σχετική πυκνότητα του ιζήματος, η θερμοκρασία του νερού, η ακρίβεια των υπολογισμών, ο μέγιστος αριθμός περιόδων κύματος και μια κρίσιμη τιμή της παραμέτρου Shields. Ταυτόχρονα επιλέγονται να ληφθούν υπόψη τα αμμοκύματα και να μην περιληφθεί στους υπολογισμούς η κλίση πυθμένα. Τέλος, ορίζεται το εύρος διακύμανσης των υδροδυναμικών παραμέτρων: ταχύτητα ρεύματος, ύψος κύματος, περίοδος κύματος, λόγος ύψους κύματος προς βάθος νερού και των παραμέτρων του ιζήματος: μέγεθος και διακύμανση κόκκων. Τα παραπάνω μεγέθη θα πρέπει σε κάθε βήμα υπολογισμού να είναι μεγαλύτερα από τα δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο.

Στην συνέχεια εισάγονται τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο PMS. Επιλέγονται οι παράμετροι θραύσης ίδιοι με του μοντέλου PMS. Η τριβή πυθμένα επιλέγεται σταθερή, υπολογίζεται με τον αριθμό Manning με τιμή ίδια με του μοντέλου HD. Τέλος, καθορίζονται τα χαρακτηριστικά του ιζήματος τα οποία επιλέγονται να είναι σταθερά και περιλαμβάνουν το πορώδες, τη μέση διάμετρο και την διακύμανση των κόκκων. Τα δύο τελευταία υπολογίσθηκαν από την κοκκομετρική ανάλυση και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2 ενώ για το πορώδες λαμβάνεται μια μέση τιμή 0.4.

Από το μοντέλο της στερεομεταφοράς, προκύπτουν ο ρυθμός ως προς τον οριζόντιο άξονα (P_s) και ως προς τον κατακόρυφο άξονα (Q_s) στερεομεταφοράς και ο ρυθμός μεταβολής του πυθμένα (dz/dt).

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

8.1 Παρουσίαση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Αφού βρέθηκαν οι δυσμενέστεροι κυματισμοί που εμφανίζονται στη περιοχή, αποφασίστηκε να μελετηθούν οι κυματισμοί για τους ανέμους 5-9 beaufort για όλες τις κατευθύνσεις. Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων για τα οποία διεξήχθησαν προσομοιώσεις στο πρόγραμμα MIKE 21 δίνονται στον Πίνακα 8.1 .

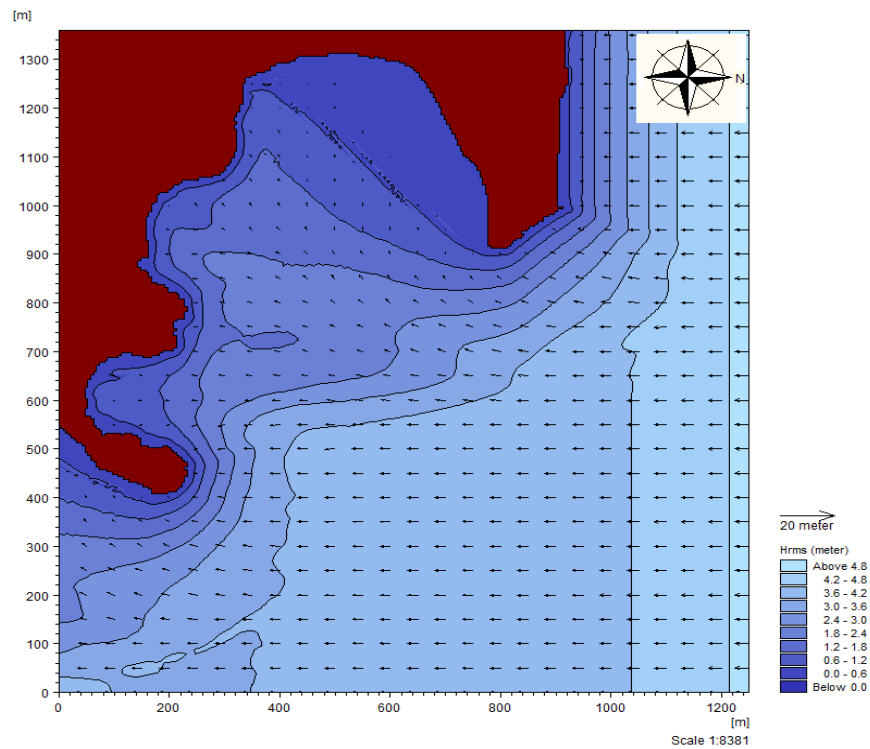
Πίνακας 8.1: Κυματικά σενάρια

| Συνθήκες Fetch-limited | | | | | | |
|------------------------|---------|----------|------------------|----------|------------|----------|
| | ΒΟΡΕΙΟΣ | | ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ | | ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ | |
| Beaufort | Hmo(m) | Tp (sec) | Hmo(m) | Tp (sec) | Hmo(m) | Tp (sec) |
| 5 | 1,601 | 5,079 | 1,508 | 4,921 | 1,234 | 4,435 |
| 6 | 2,33 | 6,104 | 2,177 | 5,894 | 1,751 | 5,263 |
| 7 | 3,15 | 7,078 | 2,93 | 6,817 | 2,331 | 6,048 |
| 8 | 4,061 | 8,013 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 5,05 | 8,907 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του κυματικού, υδροδυναμικού πεδίου και της στερεομεταφοράς. Πρέπει να υπογραμμισθεί ότι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του υδροδυναμικού πεδίου και κυρίως της στερεομεταφοράς λαμβάνονται υπόψη μόνο ποιοτικά. Όπως διαπιστώνεται για το μοντέλο ST προκύπτουν πολύ μεγάλες τιμές στους ρυθμούς μεταβολής της στερεομεταφοράς.

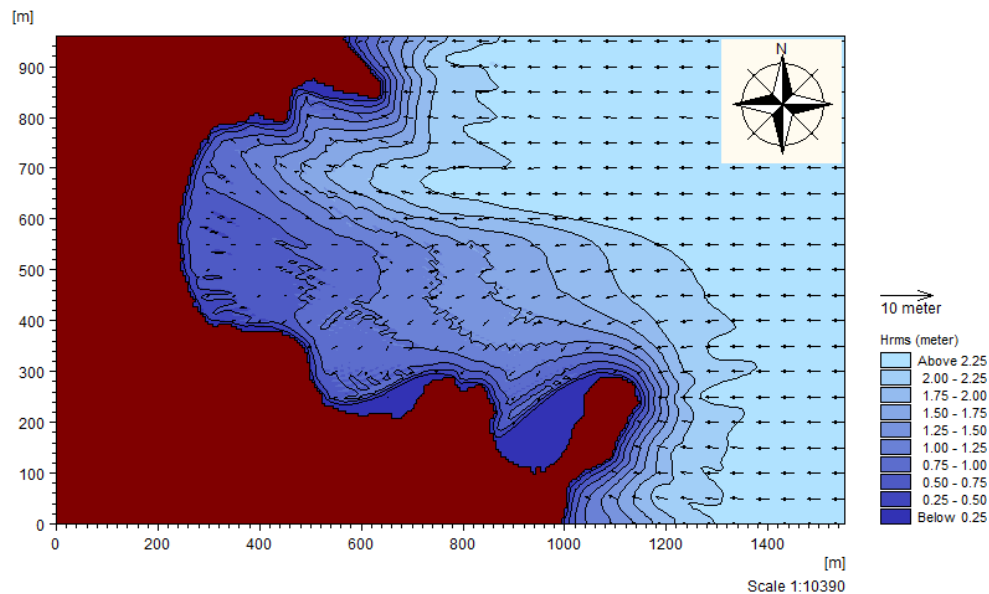
8.1.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης PMS

Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζονται το σημαντικό ύψος κύματος (H_{rms}) και η διεύθυνσή του. Δίνονται αντιπροσωπευτικά τα αποτελέσματα των μέγιστων κυματισμών, καθώς όπως ήταν αναμενόμενο τα αποτελέσματα για κυματισμούς ίδιας διεύθυνσης είναι ποιοτικά όμοια, αλλά με μειωμένης έντασης κυματικά χαρακτηριστικά στα βαθιά.



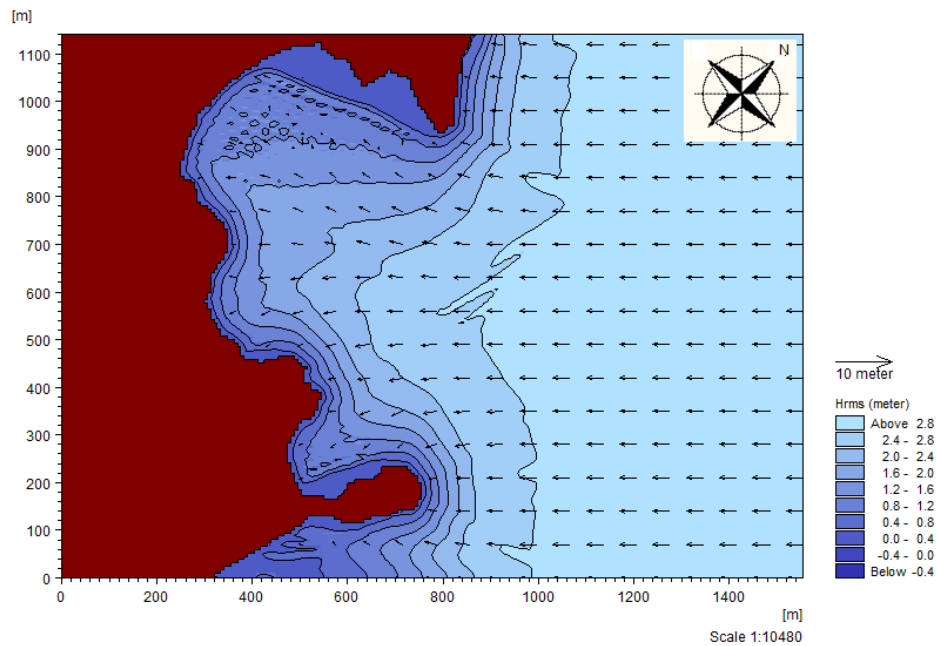
Σχήμα 8.1: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 9bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=5.05m$ και $T=8.9sec$

Διαπιστώνεται από το σχήμα 8.1 ότι ο βόρειος άνεμος δεν επηρεάζει την ακτή. Αυτό συμβαίνει διότι αρχικά ο κυματισμός συναντά εμπόδιο που ανακόπτει τη διάδοσή του στη περιοχή, ενώ ταυτόχρονα, ο κυματισμός που κατευθύνεται προς την ακτή, λόγω διάθλασης και περίθλασης είναι αρκετά εξασθενημένος. Τα κύματα προσπίπτουν σε ένα πολύ μικρό κομμάτι της ακτής στο νότιο τμήμα της με ύψη μικρότερα του 0,6m.



Σχήμα 8.2: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$

Ο κόλπος είναι εκτεθειμένος στον ανατολικό άνεμο λόγω προσανατολισμού. Τα ύψη κύματος κυμαίνονται από 1,25m έως 0,25m σε απόσταση περίπου 150m από την ακτή. Η ζώνη θραύσης ξεκινάει σε βάθος 4m, δηλαδή περίπου 80m απόσταση από την ακτογραμμή. Εξαιτίας της ρήξης των κυματισμών παρατηρείται συνεχής μείωση του ύψους κύματος, γεγονός που δυσκολεύει τον ακριβή προσδιορισμό της γραμμής θραύσης από το σχήμα.



Σχήμα 8.3: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθεία $H=2.93m$ και $T=6.817sec$

Από το Σχήμα 8.3 συμπεραίνεται ότι ο βορειοανατολικός άνεμος προκαλεί κυματισμούς με το μεγαλύτερο ύψος κύματος κοντά στην ακτή. Παρ' όλο που δημιουργείται μια περιοχή στο βόρειο τμήμα της ακτής που δεν επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τον συγκεκριμένο άνεμο. Σε απόσταση περίπου 150m το ύψος κύματος κυμαίνεται από 1.6m έως 0.4m. Εδώ ο κυματισμός αρχίζει να θραύεται περίπου στα 4÷5m βάθος, δηλαδή σε απόσταση 100m από την ακτογραμμή.

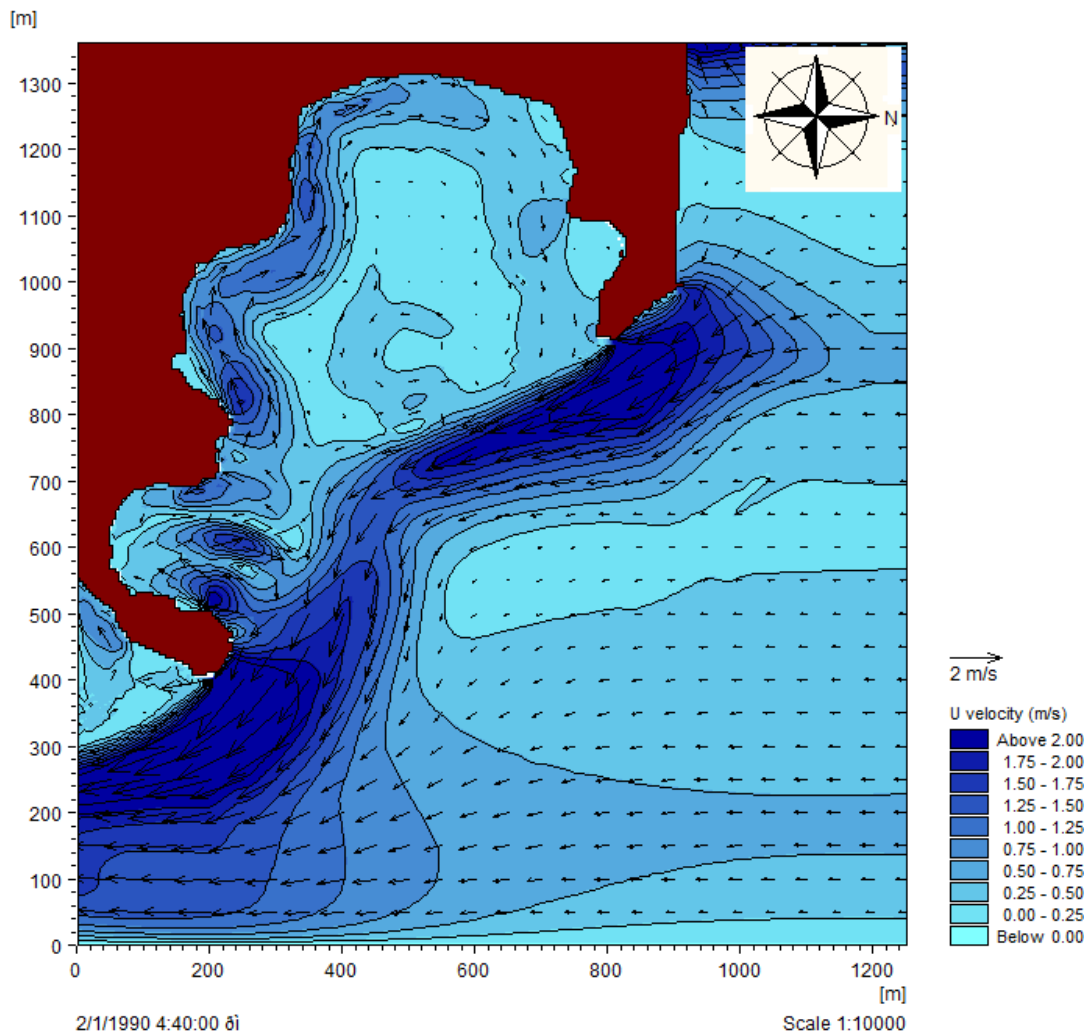
Η εκτίμηση του βάθους θραύσης έχει γίνει με το κριτήριο $H_b/h_b=0.6$ (Παράγραφος 6.5.1) που σχετίζει το ύψος κύματος με το τοπικό βάθος στην κορεσμένη ζώνη θραύσης (CEM II-4-10). Σε μη κανονικούς κυματισμούς, η θραύση μπορεί να προκύψει σε μια ευρεία ζώνη όταν οι μεμονωμένοι κυματισμοί διαφορετικών υψών και περιόδων κύματος προσεγγίζουν τη γραμμή θραύσης τους. Έτσι, από την εφαρμογή του κριτηρίου και με τη θεώρηση του κύματος ως μονοχρωματικού προκύπτει χονδρικά η αρχή της ζώνης θραύσης.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους υπόλοιπους κυματισμούς είναι ευμενέστερα και ποιοτικά παρόμοια με τα παραπάνω όποτε απλά παρατίθενται στο παράρτημα.

Συμπερασματικά, από σύγκριση των αποτελεσμάτων επιλέγεται ο σχεδιασμός να γίνει με τον βορειανατολικό άνεμο των 7 bf.

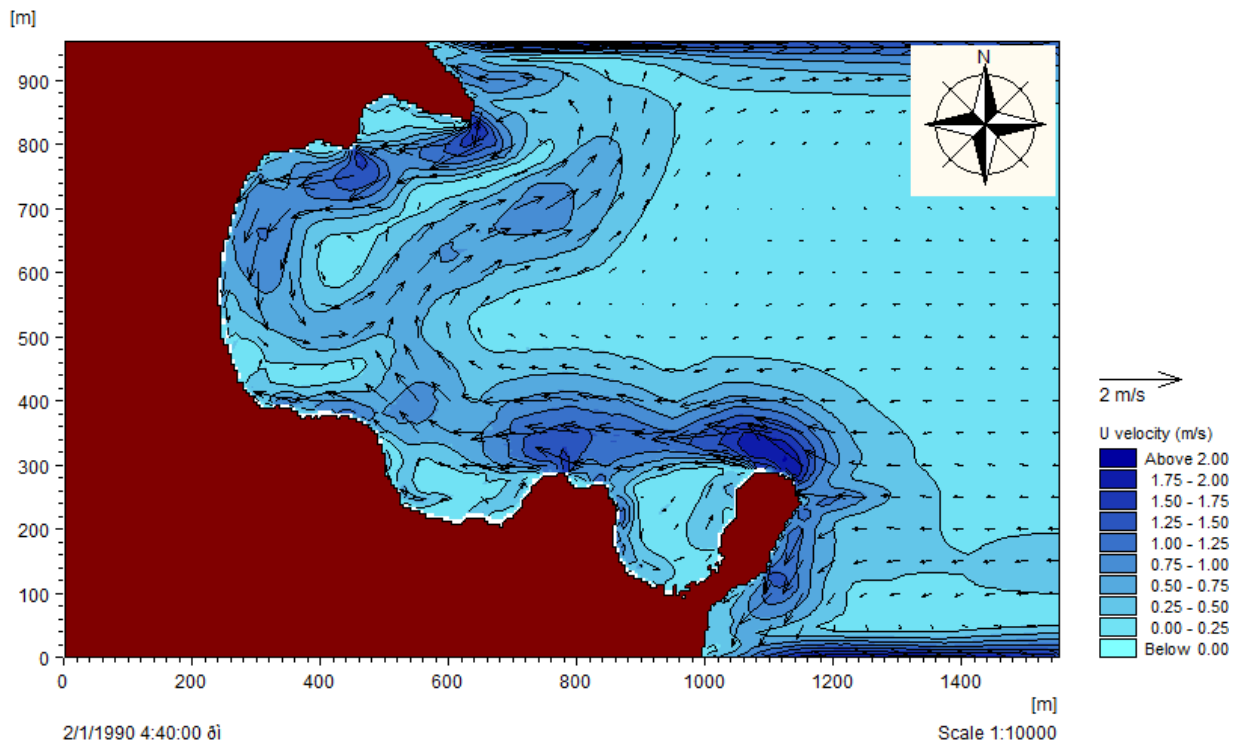
8.1.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης HD

Ο ορθός σχεδιασμός των έργων προκύπτει από συνδυασμό των αποτελεσμάτων του μοντέλου PMS και HD. Η ολοκληρωμένη εικόνα της κίνησης των ιζημάτων, που προέρχεται από επαλληλία κύματος και ρεύματος, θα προκύψει ύστερα από συνδυασμό των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του κυματικού και υδροδυναμικού πεδίου. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου και δίνουν κατεύθυνση και μέτρο της ταχύτητας των κυματογενών ρευμάτων. Στην περιγραφή των αποτελεσμάτων δίνονται και κάποιες ενδεικτικές τιμές των ταχυτήτων που εμφανίζονται κοντά στην ακτή ώστε πέρα από τη μορφή των ρευμάτων να μπορούν να συγκριθούν οι κυματισμοί μεταξύ τους ως τις ταχύτητες των ρευμάτων που προκαλούν.



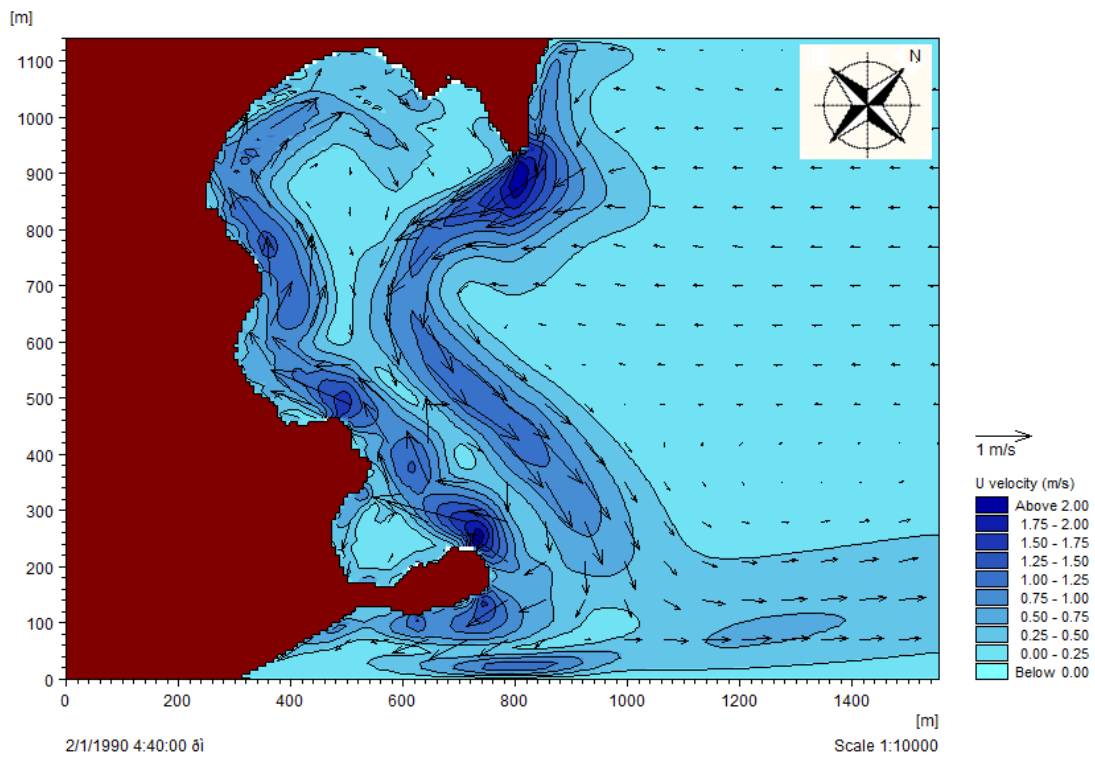
Σχήμα 8.4: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 9bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=5.05m$ και $T=8.907sec$

Ο βόρειος άνεμος δημιουργεί ένα ρεύμα κατά μήκος της ακτογραμμής που κινείται βορειοδυτικά με ταχύτητες που κυμαίνονται από 0,25m/sec έως 1,25m/sec.



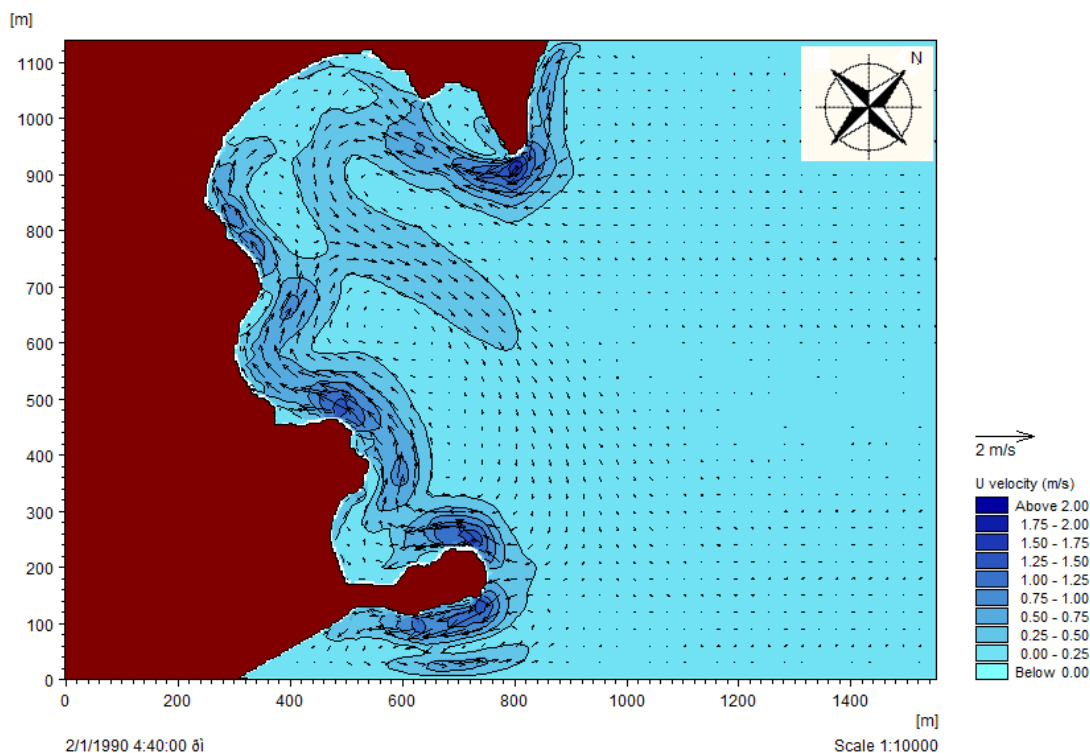
Σχήμα 8.5: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηρισικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$

Ο ανατολικός άνεμος δημιουργεί δύο αντίθετα κατά μήκος της ακτής ρεύματα η συμβολή των οποίων στο νότιο τμήμα της δημιουργεί βελοειδές ρεύμα. Στη περιοχή της ακτής οι ταχύτητες κυμαίνονται από 1.25m/sec έως 0.5m/sec. Το βελοειδές ρεύμα εξέρχεται από το κόλπο με ταχύτητες 0.5m/sec έως 0.75m/sec και με κατεύθυνση βορειοανατολικά.



Σχήμα 8.6: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$

Οι κυματισμοί με τα μεγαλύτερα ύψη κύματος (Σχήμα 8.6) παράγουν ένα ρεύμα κατά μήκος της ακτής προς τον Βορρά, ενώ το ρεύμα προς τα νοτιοδυτικά εκτρέπεται εκτός του κόλπου από το βόρειο ακρωτήριο. Για τον άνεμο των 7bf οι ταχύτητες λαμβάνουν τιμές από 0.5m/sec με 1.25m/sec.



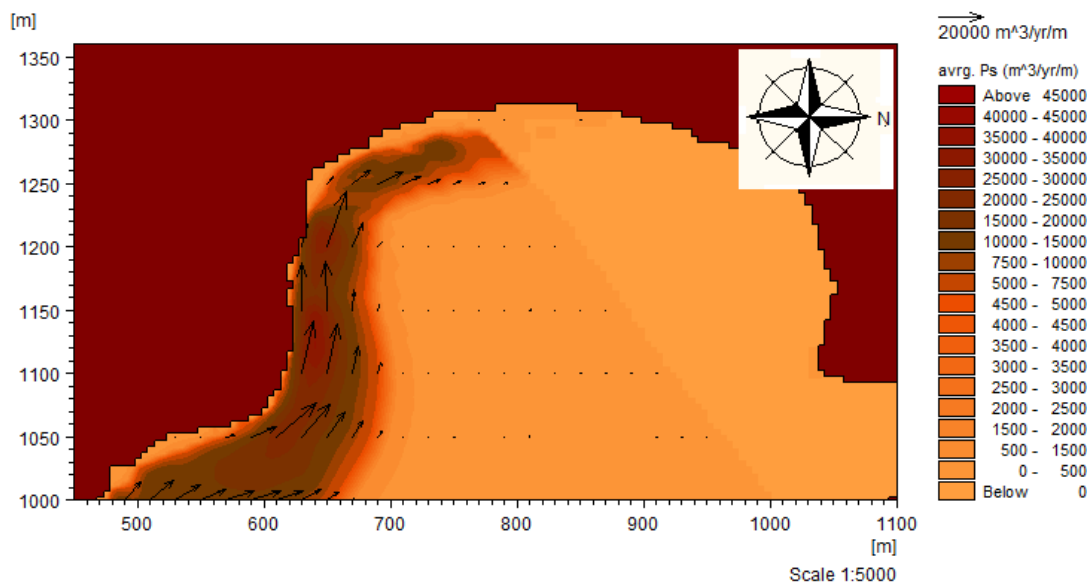
Σχήμα 8.7: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βορειοανατολικό άνεμο των 5bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1.508m$ και $T=4.921sec$

Ο βορειοανατολικός άνεμος παρατηρείται ότι προκαλεί διαφορετικές υδροδυναμικές συνθήκες στον κόλπο για τον ανεμογενή κυματισμό των 5 beaufort. Ο ανεμογενής κυματισμός των 5bf (Σχήμα 8.7) διαμορφώνει δύο ρεύματα που κινούνται αντίθετα κατά μήκος της ακτής με ταχύτητες από 0,25 έως 0,75m/sec, συμβάλλουν περίπου στο μέσον της και παράγουν βελοειδές ρεύμα με ταχύτητα 0,25 που δε ξεπερνά τα 0,5/sec. Τα βελοειδή ρεύματα έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικός μηχανισμός υπεράκτιας στερεομεταφοράς. Το σχέδιο της στερεομεταφοράς στα βελοειδή ρεύματα είναι άμεσης σημασίας για τη μορφοδυναμική της ενδιάμεσης παραλίας, μιας και αυτό το σχέδιο είναι που μπορεί να δρα και για να διατηρεί και για να περιορίζει τη μορφολογική εξέλιξη της παράκτιας περιοχής. Έτσι, για το σχεδιασμό των έργων προστασίας ακτής είναι ορθότερο να ληφθούν υπόψη οι υδροδυναμικές συνθήκες Σχήμα 8.7 παρά όλο που δεν είναι οι δυσμενέστερες για τη συγκεκριμένη διεύθυνση ανέμου.

Συμπερασματικά, από τα μοντέλα HD του ανατολικού και βορειοανατολικού ανέμου για τους δυσμενέστερους κυματισμούς παρατηρείται ότι παρουσιάζουν αντίστροφες συνθήκες. Δημιουργούν ρεύματα που κινούνται κατά μήκος της ακτής με αντίθετη φορά σε κάθε περίπτωση. Για τον μεν ανατολικό το ρεύμα κινείται με κατεύθυνση Β-Ν, για τον δε βορειοανατολικό με Ν-Β.

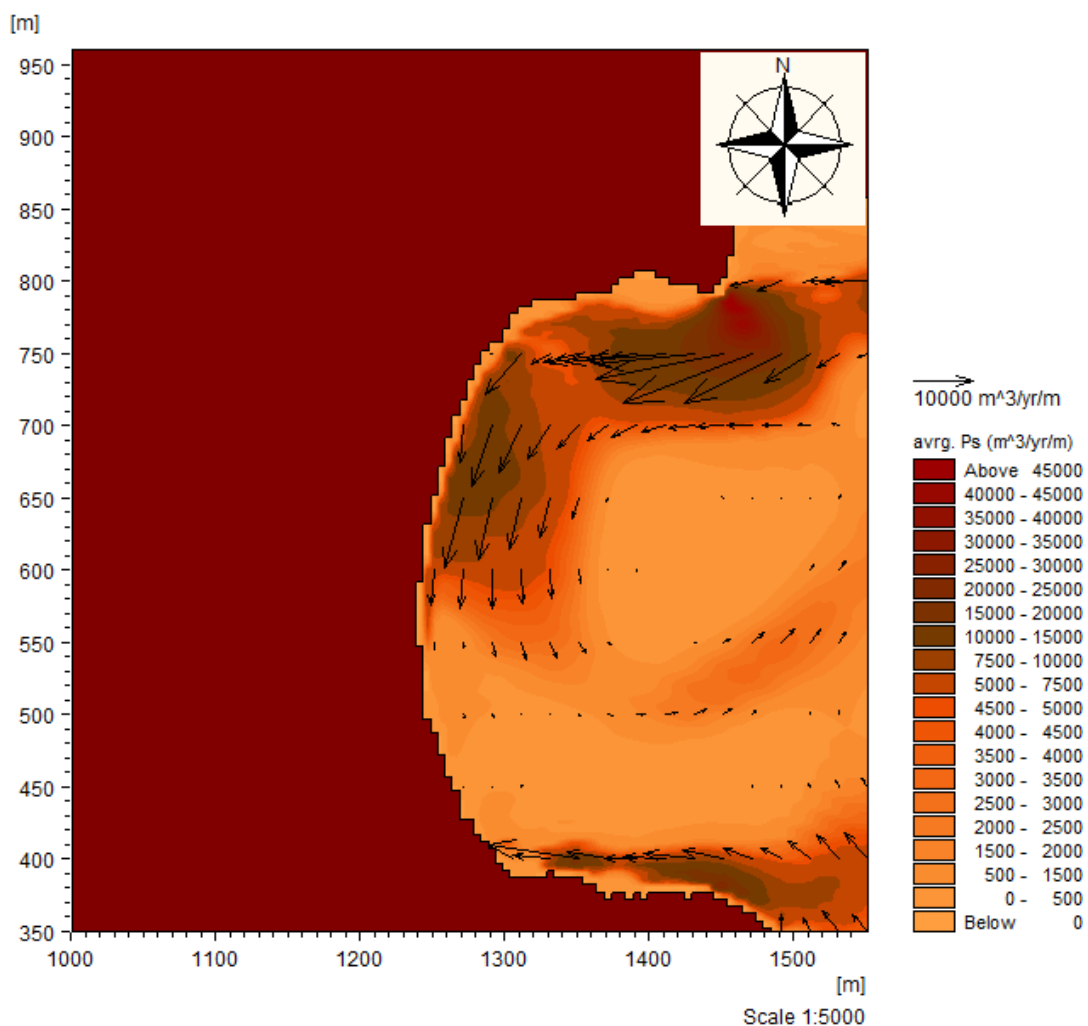
8.1.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης ST

Η μέση στερεομεταφορά στην περιοχή απεικονίζεται στα παρακάτω διαγράμματα σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ST. Γίνεται αναφορά κάποιων τιμών του ρυθμού στερεομεταφοράς με σκοπό να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταξύ τους, οι τιμές δε λαμβάνονται υπόψη καθώς δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Τα αποτελέσματα λαμβάνονται υπόψη κυρίως ποιοτικά, καθώς η μορφολογία του πυθμένα της περιοχής όπως αυτή περιγράφεται στο κεφάλαιο τρία, δεν έχει αποτυπωθεί με λεπτομέρεια στο μοντέλο του ST. Ενώ ταυτόχρονα το μοντέλο θεωρεί ότι υπάρχει άπειρη ποσότητα ιζήματος καθώς και άπειρο πάχος πυθμένα.



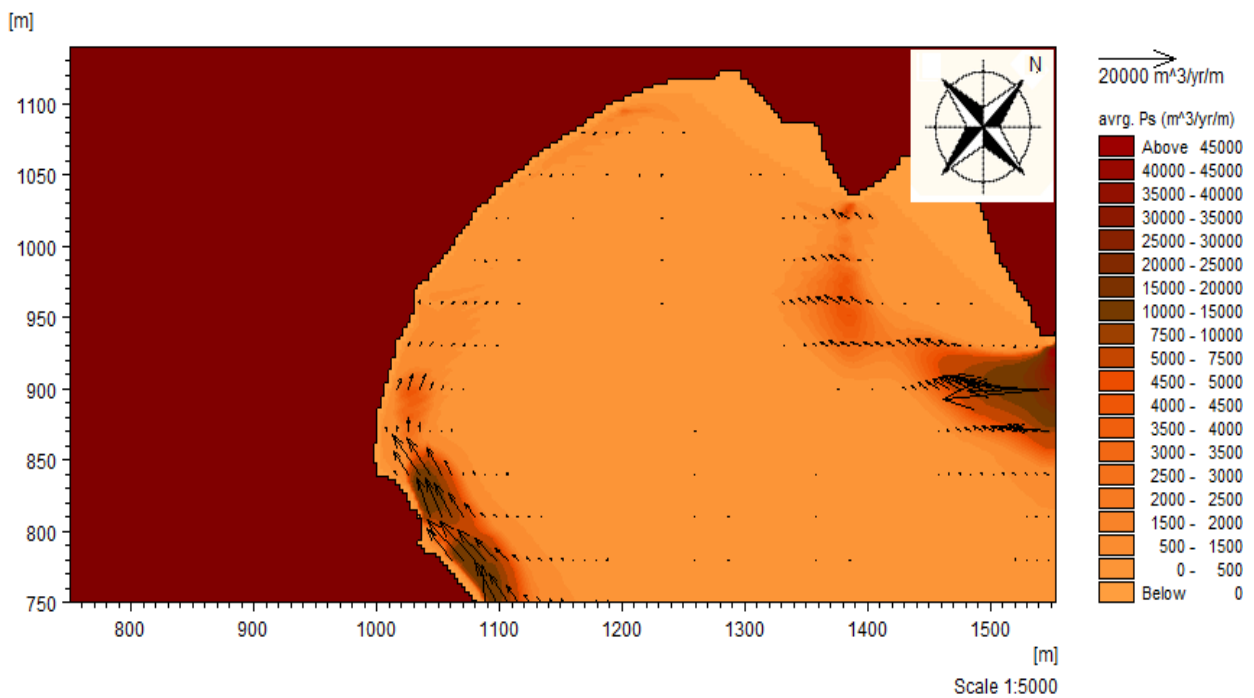
Σχήμα 8.8: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βόρειο άνεμο των 9bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βάθια $H=5.05m$ και $T=8.9sec$

Από το Σχήμα 8.8 επιβεβαιώνεται, όπως ήταν αναμενόμενο από το κυματικό μοντέλο Σχήμα 8.1, ότι ο βόρειος άνεμος δεν επηρεάζει δραστικά τη στερεομεταφορά στην περιοχή. Συνεπώς, δεν είναι ικανός να προκαλέσει προβλήματα διάβρωσης. Το ίζημα κινείται κατά μήκος του νότιου τμήματος της ακτογραμμής και περίπου στη μέση της παραλίας η στερεομεταφορά γίνεται μηδενική, ενώ η κίνηση του ιζήματος προς τα βαθιά είναι αμελητέα.

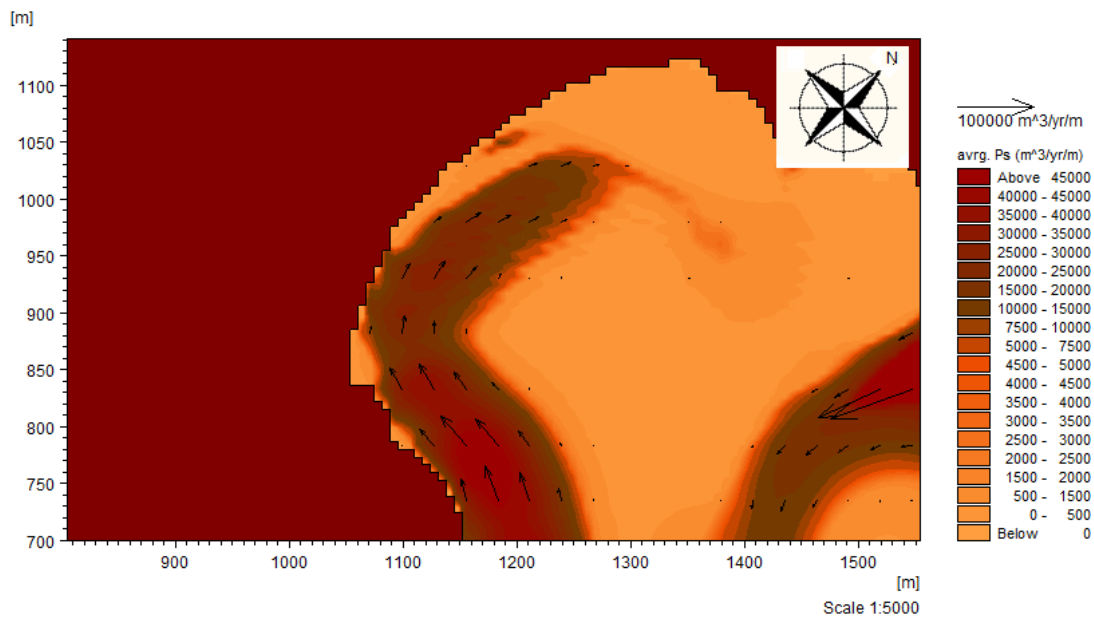


Σχήμα 8.9: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά H=2.93m και T=6.817sec

Στο Σχήμα 8.9 παρατηρείται η στερεομεταφορά για τον ανατολικό άνεμο των 7bf, η οποία ακολουθεί τη ροή των κυματογενών ρευμάτων. Διακρίνεται από το διάγραμμα μέγιστη τιμή ρυθμού στερεομεταφοράς 10000-15000 m³/yr/m. Στην ακτή το ίζημα εισέρχεται κυρίως από τη βόρεια πλευρά της, ενώ στο σημείο που συμβάλλουν τα ρεύματα, στο νότιο τμήμα, Σχήμα 8.9, το εισερχόμενο υλικό απομακρύνεται από την ακτή με μικρότερους ρυθμούς στερεομεταφοράς. Η στερεομεταφορά με κατεύθυνση Α-Δ στη νότια περιοχή μειώνεται, μέχρι που μηδενίζεται όταν προσεγγίσει την ακτογραμμή.



Σχήμα 8.10: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 5bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά H=1.508m και T=4.921sec



Σχήμα 8.11: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$

Στον βορειοανατολικό άνεμο παρατηρείται μετακίνηση του ιζήματος από το νότιο προς το βόρειο τμήμα με μέγιστο ρυθμό στερεομεταφοράς $25000\text{-}3000\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$. Από το Σχήμα 8.10 συμπεραίνεται ότι ο ανεμογενής κυματισμός των 5 beaufort δημιουργεί υδροδυναμικές συνθήκες που προκαλούν κίνηση ιζήματος και προς τις δύο διευθύνσεις κατά μήκος της ακτής, σε αντίθεση με τον άνεμο των 7 bf, Σχήμα 8.11. Παρ' όλα αυτά, η στερεομεταφορά που προκαλεί είναι αμελητέα σε σύγκριση με αυτή που προκαλείται από τον άνεμο τον 7 bf. Για το λόγο αυτό ο κυματισμός των 5 bf δε λαμβάνεται υπόψη στις προσομοιώσεις με τις διατάξεις των κυματοθραυστών.

8.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου ST, προκύπτει ότι η στερεομεταφορά στην περιοχή, καθορίζεται κυρίως από τους δυσμενέστερους κυματισμούς του βορειοανατολικού και του ανατολικού ανέμου, καθώς σ' αυτούς εμφανίζει τη μεγαλύτερη ένταση. Συνεπώς, η επιτυχημένη διάταξη των έργων θα προσδιορισθεί από τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν κατά την εφαρμογή τους στην πρόπτωση αυτών των κυματικών διευθύνσεων.

Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει, ότι ο βόρειος άνεμος προκαλεί απόθεση ιζήματος στο νότιο τμήμα της ακτογραμμής. Ο βορειοανατολικός μετακινεί το ίζημα με πολύ μεγαλύτερους ρυθμούς από τον ανατολικό, με κατεύθυνση από το νότιο προς το βόρειο τμήμα της παραλίας, όπου μέρος της ποσότητα αυτής εξέρχεται από τον κόλπο. Ο ανατολικός όπως διακρίνεται και στο σχήμα 8.11 δημιουργεί αντίστροφες συνθήκες, με αποτέλεσμα μετακίνηση υλικού από το βορρά προς το νότο.

Η διάβρωση συναντάται πιθανόν στις δύο άκρες της ακτής (βόρεια και νότια). Τα έργα που προτείνονται πρέπει να στοχεύουν στην δημιουργία συνθηκών ηρεμίας στα συγκεκριμένα τμήματα της ακτής. Όπως απεικονίζεται και στα αποτελέσματα του μοντέλου ST, σχήματα 8.9 και 8.11, η στερεομεταφορά πραγματοποιείται κατά μήκος της ακτογραμμής, ενώ το ίζημα απομακρύνεται από την ακτή στη διεύθυνση του βελοειδούς (σχήμα 8.9) και του κατά μήκος ρεύματος (σχήμα 8.11).

Τα έργα αναπλήρωσης της ακτής που προτείνονται, είναι τρεις διατάξεις κυματοθραυστών. Σκοπός των έργων είναι να ανασχέσουν μερικώς τα ρεύματα και των δύο κατευθύνσεων ώστε να διατηρηθεί παρόμοιο υδροδυναμικό πεδίο με μικρότερη ένταση και να πραγματοποιείται η κυκλοφορία του ιζήματος στη περιοχή της ακτής με χαμηλότερους ρυθμούς. Παράλληλα, οι αποσπασμένοι κυματοθραύστες δεν εμποδίζουν την κατά μήκος στερεομεταφορά όπως θα συνέβαινε με έναν πρόβολο. Το ίζημα εισέρχεται στην περιοχή της ακτής και με τις συνθήκες ηρεμίας που εξασφαλίζουν οι κυματοθραύστες στην υπήνεμη περιοχή τους, συγκρατείται μέρος του ιζήματος και να παγιδεύεται στην σκιά αυτών. Επομένως, είναι δυνατόν να παρατηρηθούν προσχώσεις στις άκρες της ακτής που

εμφανίζεται πρόβλημα έλλειψης ιζήματος. Με την εφαρμογή των κυματοθραυστών και το σχηματισμό salient στην ακτογραμμή, αποτρέπεται η διάβρωση κατόπιν των έργων καθώς επιτρέπεται κίνηση ιζήματος κατά μήκος της ακτής.

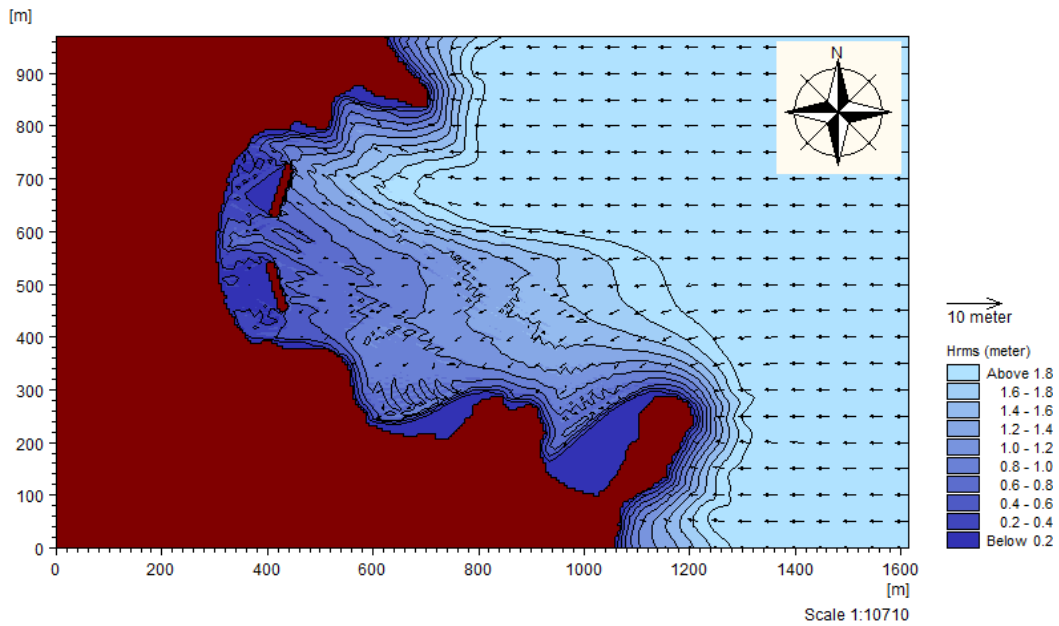
8.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για τα τρία σενάρια διατάξεων

Στο Κεφάλαιο 8.1 έγινε διερεύνηση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης. Από τη διεξαγωγή των συμπερασμάτων που προέκυψαν και ύστερα από δοκιμές στο πρόγραμμα MIKE 21, προτάθηκαν τρεις διατάξεις κυματοθραυστών. Παρακάτω παρουσιάζονται εκτενώς τα τελικά αποτελέσματα των τριών μοντέλων του MIKE 21 για κάθε μια διάταξη.

8.3.1 Αποτελέσματα για τη διάταξη των δύο έξαλων κυματοθραυστών

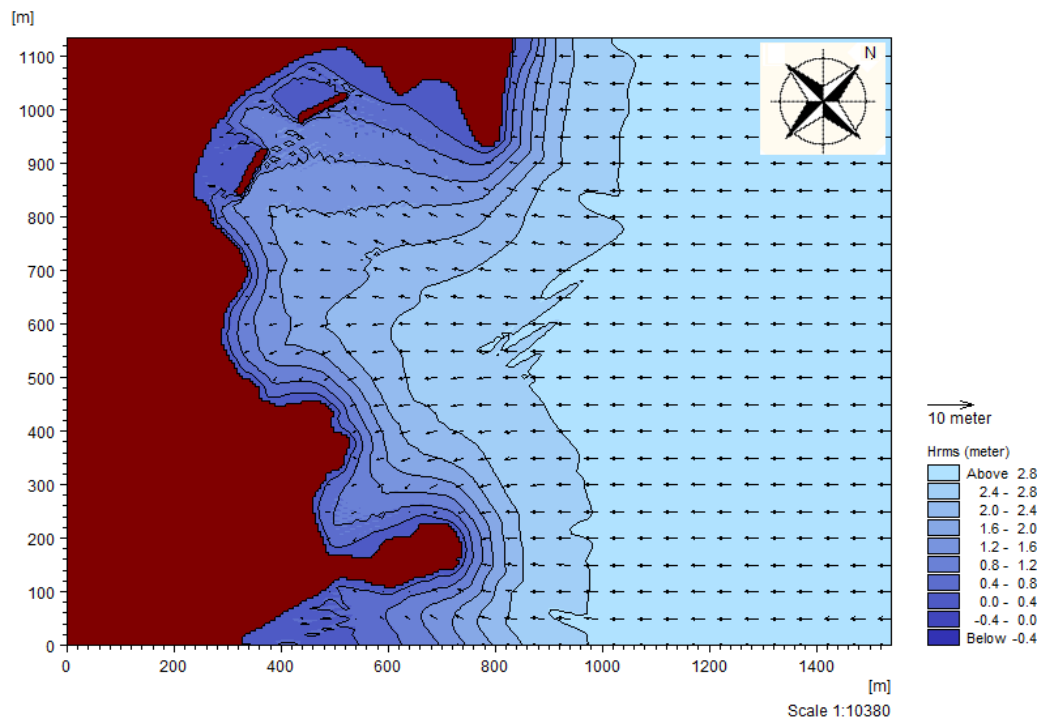
Η πρώτη διάταξη έργων αφορά δύο έξαλους κυματοθραύστες των οποίων τα χαρακτηριστικά δίδονται στην Παράγραφο 6.5.1. Τα μοντέλα PMS, HD και ST διεξήχθησαν για τους κρίσιμους κυματισμούς του βορειοανατολικού και ανατολικού ανέμου. Ο σκοπός των έργων είναι να περιορίσουν την ένταση του κυματικού πεδίου όποτε, εφόσον τα αποτελέσματα κάθε ανέμου είναι ποιοτικά όμοια, επιλέγεται ο κυματισμός που δημιουργεί τις δυσμενέστερες συνθήκες.

8.3.1.1 Αποτελέσματα μοντέλου PMS



Σχήμα 8.12: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$ με την διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών

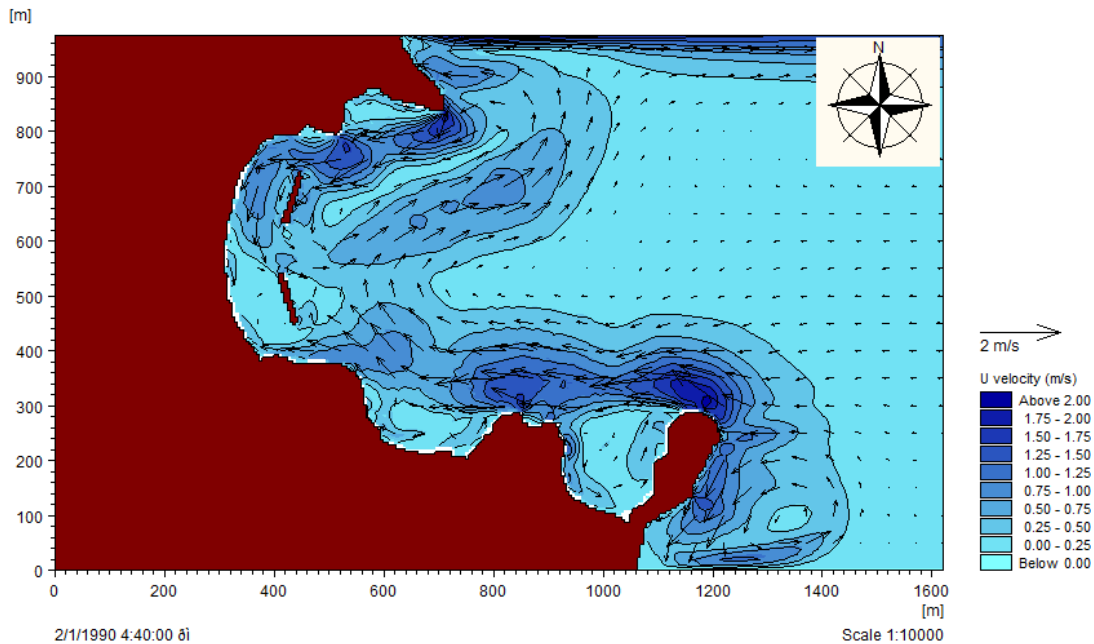
Από το Σχήμα 8.12 παρατηρείται για την περιοχή της ακτής ότι το ύψος κυματισμού κυμαίνεται από 0,5m έως 0. Οι τιμές 0,5m έως 0,25m εμφανίζονται στο κενό μεταξύ των κυματοθραυστών ενώ στη σκιά των έργων τα ύψη κυματισμού είναι μικρότερα του 0,25m.



Σχήμα 8.13: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών

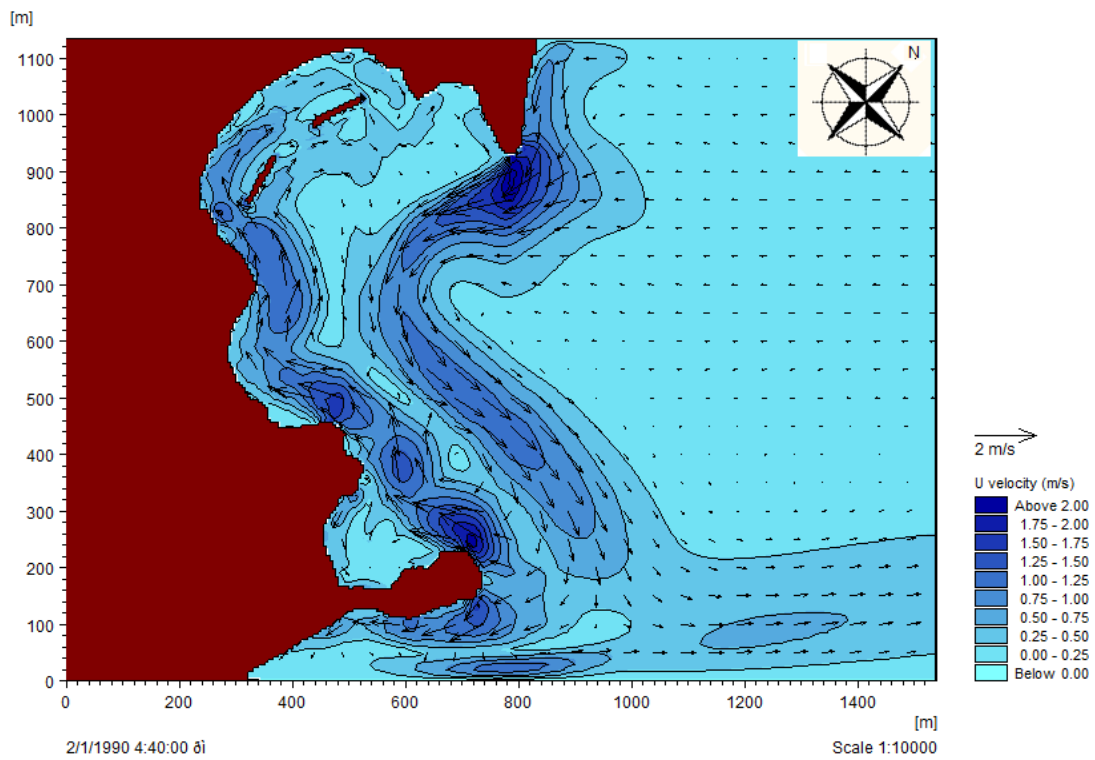
Από το Σχήμα 8.13 παρουσιάζονται τα ύψη κυματισμού, όπου στην περιοχή ενδιαφέροντος κυμαίνονται από 1,2m έως 0. Συγκεκριμένα, ύψη από 1,2 έως 0,4m εμφανίζονται σε μια κάθετη στην ακτή ζώνη που δημιουργείται από το κενό των έργων. Στη σκιά των κυματοθραυστών η τιμή των υψών κύματος δίδεται μικρότερη από 0,4m.

8.3.1.2 Αποτελέσματα μοντέλου HD



Σχήμα 8.14: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ με τη διάταξη των ξάλων κυματοθραυστών

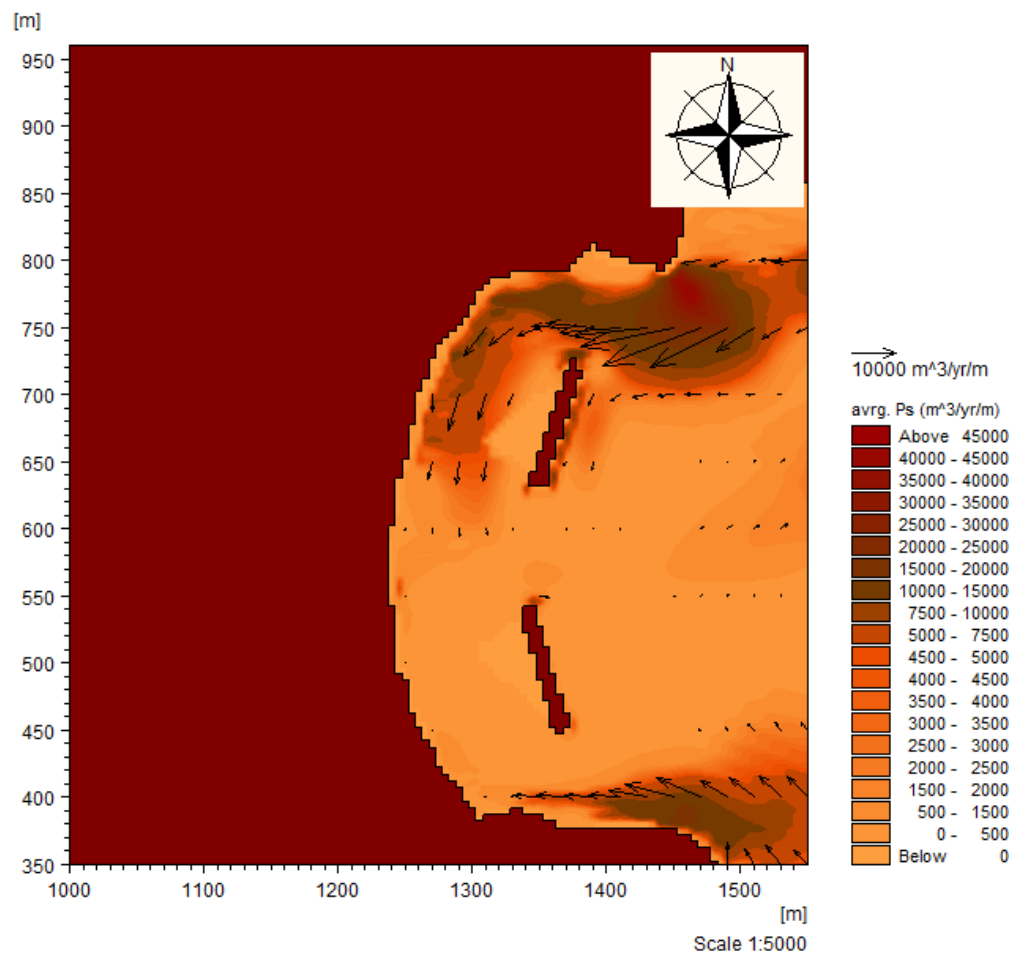
Από το Σχήμα 8.14 φαίνεται η επίδραση των έργων στο υδροδυναμικό πεδίο. Το κατά μήκος ρεύμα στο νότιο τμήμα της ακτής φαίνεται να ανακόπτεται από τον νότιο κυματοθραύστη και να εισέρχεται στην περιοχή της ακτής με μειωμένο πλάτος, με τιμές μικρότερες των $0,75\text{m/sec}$. Όσον αφορά το κατά μήκος ρεύμα με κατεύθυνση από το Βορρά προς το Νότο, ο βόρειος κυματοθραύστης περιορίζει ελαφρώς το εύρος και τις ταχύτητες του ενώ ο νότιος κυματοθραύστης φαίνεται να το εγκλωβίζει μερικώς στην υπήνεμη περιοχή. Οι ταχύτητες δίνονται στη σκιά του νότιου κυματοθραύστη είναι μικρότερες από $0,25\text{m/sec}$.



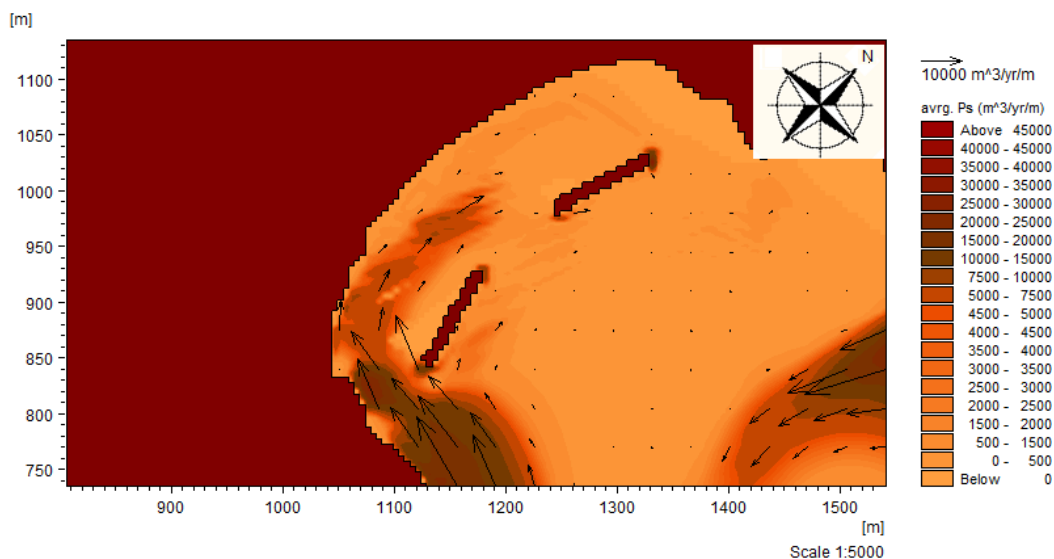
Σχήμα 8.15: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.81sec$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών

Στο Σχήμα 8.15 παρατηρείται ένα ρεύμα κατά μήκος της ακτής με κατεύθυνση N-B. Ο νότιος κυματοθραύστης φαίνεται να μειώνει την ταχύτητα του ρεύματος κατά την είσοδό του στην υπήνεμη περιοχή. Οι τιμές των ταχυτήτων κυμαίνονται στη σκιά του νότιου κυματοθραύστη από 1m/sec έως 0,25m/sec, ενώ στο βόρειο είναι χαμηλότερες του 0,5m/sec.

8.3.1.3 Αποτελέσματα μοντέλου ST



Σχήμα 8.16: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά H=2.93m και T=6.817sec με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών



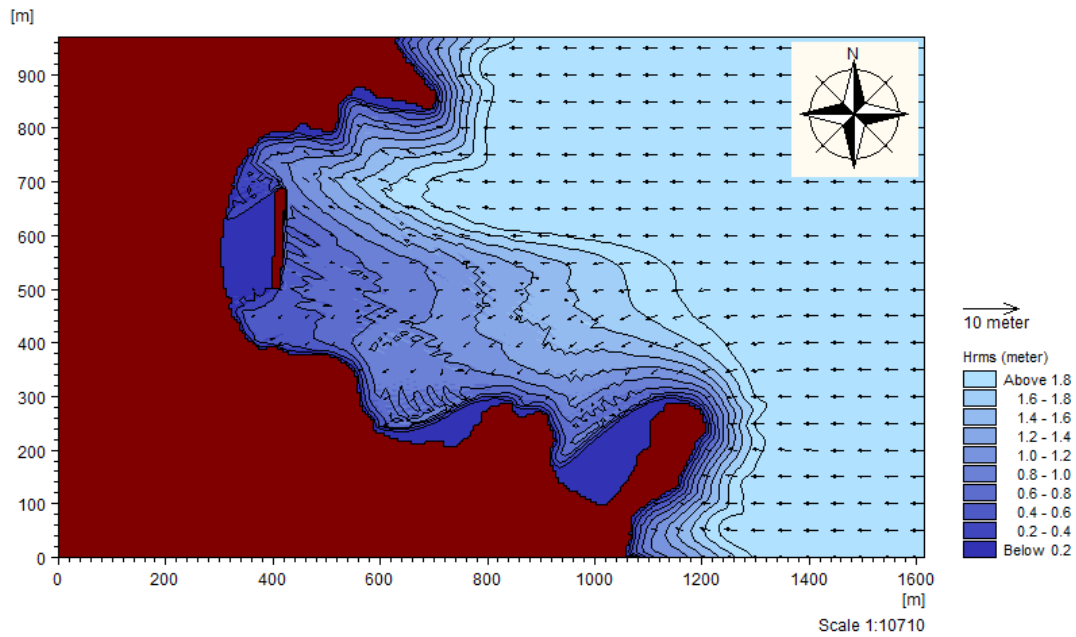
Σχήμα 8.17: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη των έξαλων κυματοθραυστών

Ο ρυθμός στερεομεταφοράς όπως παρουσιάζεται από το Σχήματα 8.16 και 8.17 ακολουθεί την κίνηση του ρεύματος. Αν και ο βορειοανατολικός είναι ο κρίσιμος κυματισμός οι ρυθμοί στερομεταφοράς είναι μικρότεροι από αυτούς που υπολογίζονται για τον ανατολικό. Στο σχήμα 8.16 ο ρυθμός στερεομεταφοράς είναι μικρότερος των $15000m^3/yr/m$ και μηδενίζονται οι τιμές στην υπήνεμη περιοχή του νότιου κυματοθραύστη. Στο σχήμα 8.17 ο ρυθμός στερεομεταφοράς είναι μικρότερος των $10000 m^3/yr/m$ πίσω από τον νότιο κυματοθραύστη, ενώ στη σκιά του βόρειου έργου εμφανίζεται μέγιστος ρυθμός στερεομεταφοράς περίπου $2000 m^3/yr/m$.

8.3.2 Αποτελέσματα για τη διάταξη του μεμονωμένου κυματοθραύστη

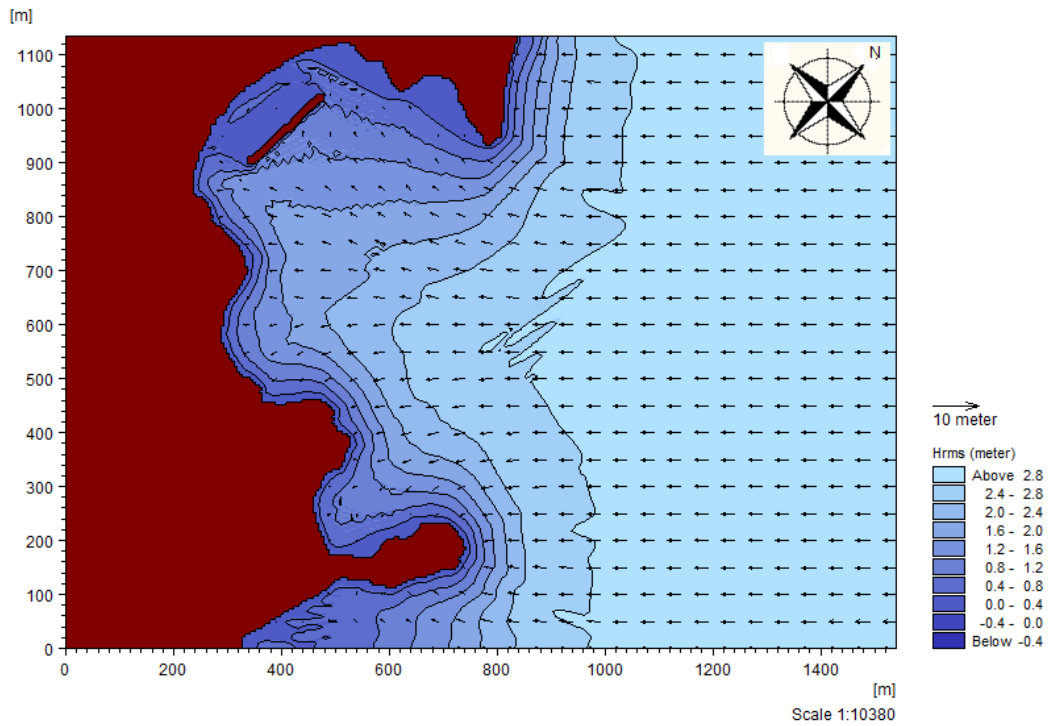
Το δεύτερο σενάριο έργων αποτελεί την τοποθέτηση ενός μεμονωμένου κυματοθραύστη του οποίου τα στοιχεία δίδονται στην Παράγραφο 6.5.2. Ακολουθούν τα αποτελέσματα των μοντέλων του MIKE 21 ύστερα από το σχεδιασμό του έργου στη βαθυμετρία.

8.3.2.1 Αποτελέσματα μοντέλου PMS



Σχήμα 8.18: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη

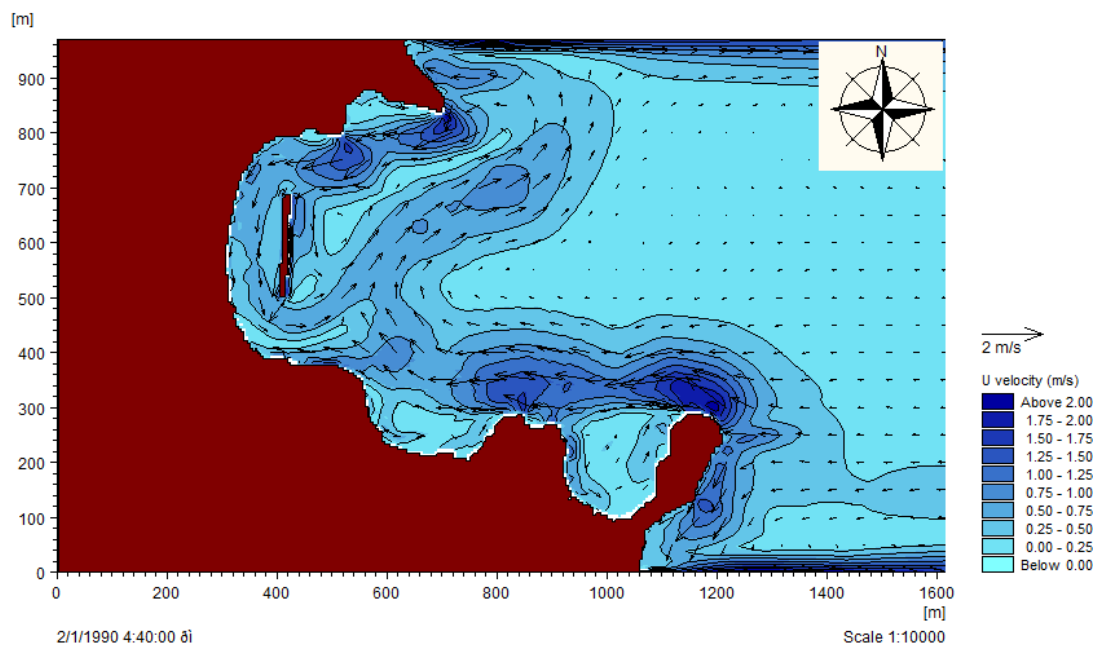
Στο Σχήμα 8.18 φαίνεται ο μεμονωμένος κυματοθραύστης να παρέχει πλήρη προστασία από τη μετάδοσή των κυματισμών στην ακτή. Στην υπήνεμη περιοχή παρατηρούνται ύψη κυματισμών μικρότερα του 0,25m. Ενώ εκατέρωθεν του κυματοθραύστη τα ύψη κυμαίνονται από 0,75m έως 0.



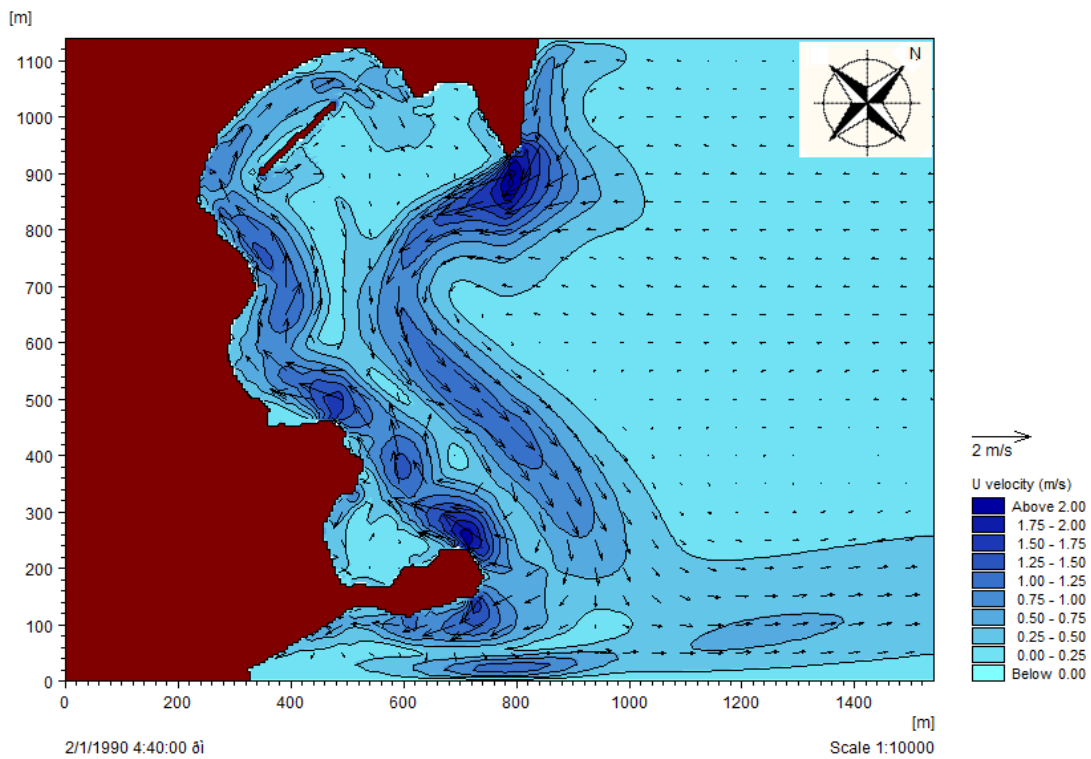
Σχήμα 8.19: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη

Όμοια ποιοτικά αποτελέσματα παρατηρούνται και στο Σχήμα 8.19 για τον βορειοανατολικό άνεμο. Σε όλη τη ζώνη ανάμεσα στην ακτή και τον κυματοθραύστη οι τιμές του υψών κύματος δεν ξεπερνά το 0,4m. Κοντά στο νότιο ακρομώλιο του κυματοθραύστη δίδεται μέγιστο ύψος κύματος 1,2m.

8.3.2.2 Αποτελέσματα μοντέλου HD



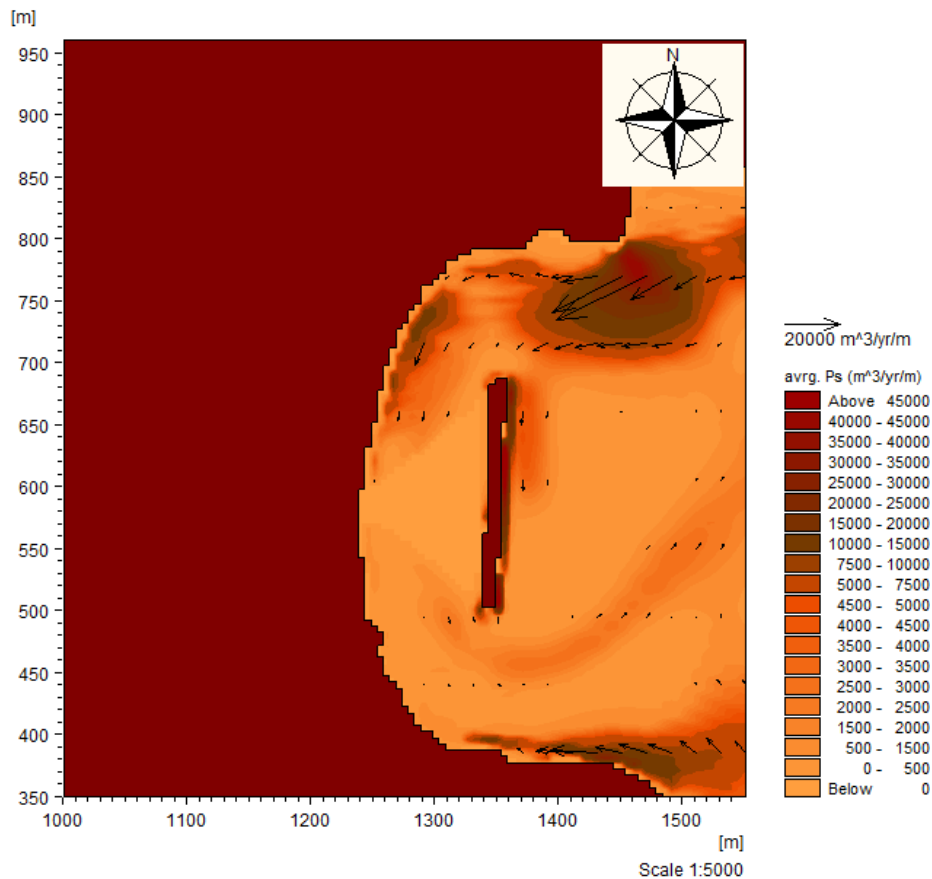
Σχήμα 8.20: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη



Σχήμα 8.21: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθεία $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη

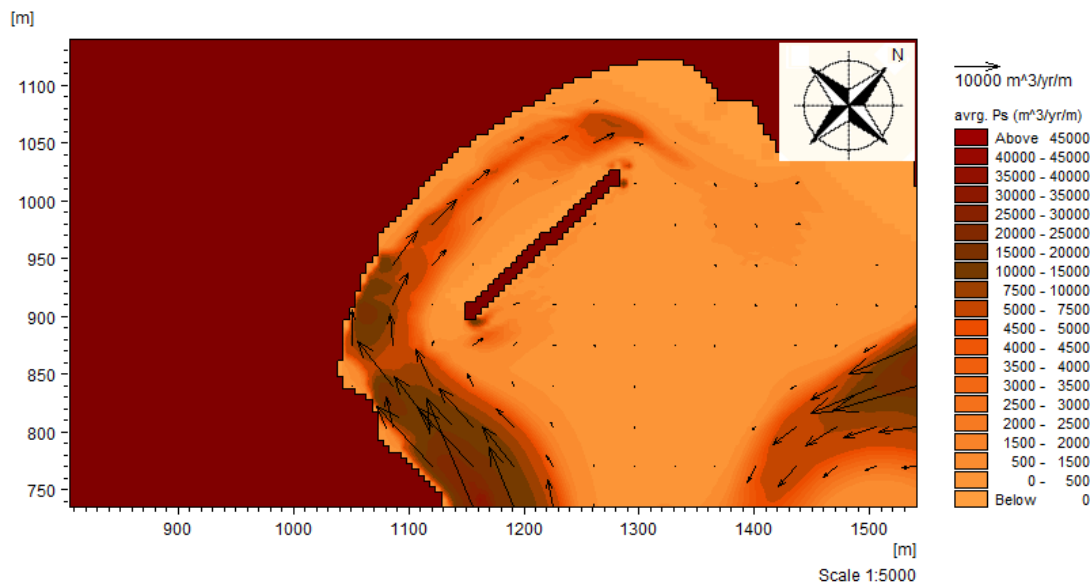
Από τα Σχήματα 8.20 και 8.21 φαίνεται το υδροδυναμικό πεδίο της περιοχής όπως αυτό διαμορφώνεται μετά την τοποθέτηση του κυματοθραύστη. Και στις δύο περιπτώσεις το κατά μήκος ρεύμα εισέρχεται στην περιοχή πίσω από τον κυματοθραύστη με μειωμένες τιμές και εξέρχεται από αυτή χωρίς να εμποδίζεται από το έργο. Στο Σχήμα 8.20, οι ταχύτητες του ρεύματος κυμαίνονται από 0,5m/sec έως 0,25m/sec ενώ στο Σχήμα 8.21 οι ταχύτητες λαμβάνουν τιμές από 0,75m/sec έως 0,25m/sec. Στον ανατολικό άνεμο Σχήμα 8.20 το ρεύμα κατά μήκος της ακτής είναι αρκετά εξασθενημένο.

8.3.2.3 Αποτελέσματα μοντέλου ST



Σχήμα 8.22: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βάθη $H=2.33\text{m}$ και $T=6.048\text{sec}$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη

Κατ' αντιστοιχία με τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών μοντέλων Σχήματα 8.20, 8.21, παρατηρείται κίνηση ιζήματος κατά μήκος της ακτής (Σχήματα 8.22,8.23). Στο σχήμα 8.22 για τον ανατολικό άνεμο, παρουσιάζονται πολύ χαμηλές τιμές ρυθμού στερεομεταφοράς στη σκιά του κυματοθραύστη, σχεδόν μηδενικές. Στο βόρειο τμήμα ο ρυθμός στερεομεταφοράς κυμαίνεται από $15000\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ έως $4500\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ με κατεύθυνση προς την ακτή. Στο νότιο ακρομώλιο η στερεομεταφορά είναι μικρότερη των $4000\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ με κατεύθυνση προς τα ανοιχτά.



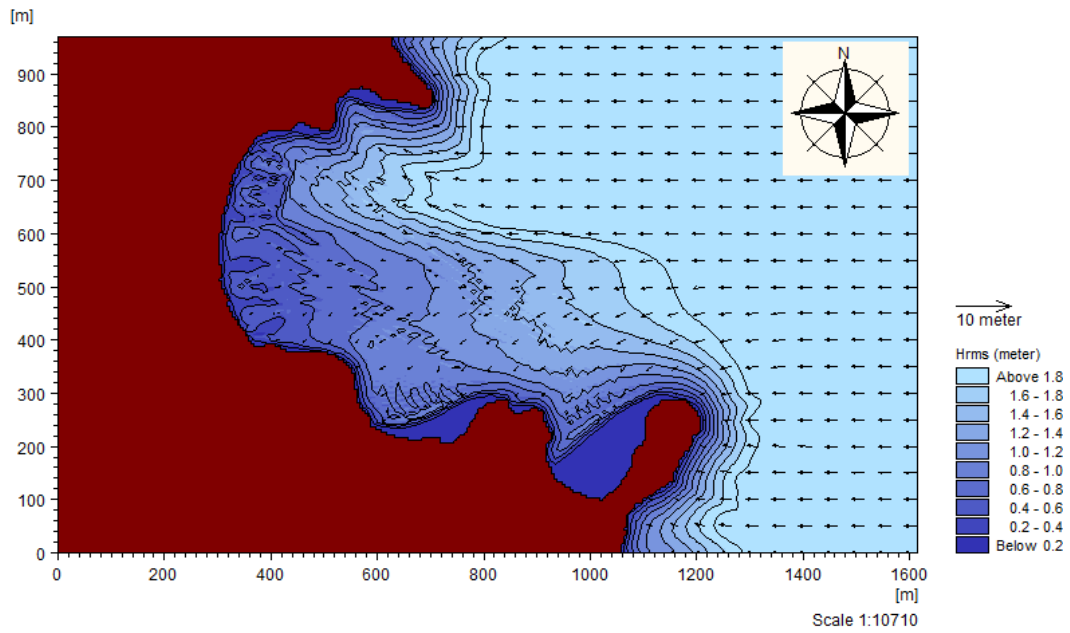
Σχήμα 8.23: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη μεμονωμένου έξαλου κυματοθραύστη

Για τον βορειοανατολικό άνεμο (Σχήμα 8.23), η στερεομεταφορά πραγματοποιείται καθ' όλο το μήκος της ακτογραμμής με κατεύθυνση N-B και τιμές από $20000m^3/yr/m$ έως $5000m^3/yr/m$. Οι ρυθμοί μειώνονται από το νότο προς το βορρά. Ενώ και στα δύο σχήματα 8.22 και 8.23 η στερεομεταφορά μειώνεται εγκάρσια της κίνησης από την ακτή προς τα βαθιά. Το ίζημα κινείται με κατεύθυνση προς τα βαθιά, στο βόρειο ακρομώλιο του κυματοθραύστη, με μέγιστο ρυθμό $10000m^3/yr/m$.

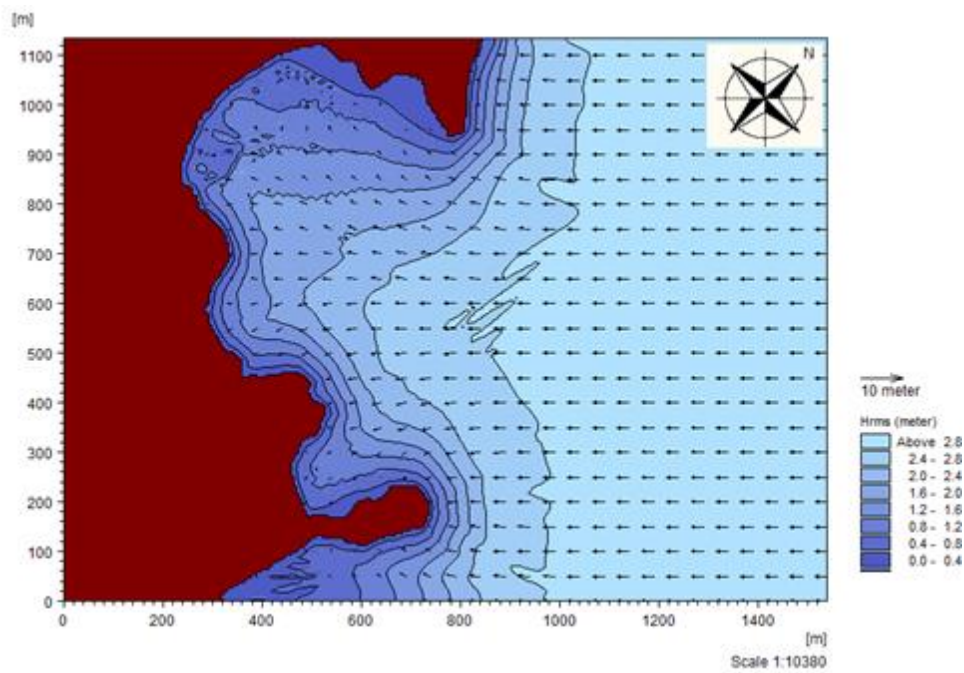
8.3.3 Αποτελέσματα για τη διάταξη των δύο ύφαλων κυματοθραυστών

Η τρίτη προτεινόμενη διάταξη αφορά δύο ύφαλους κυματοθραύστες των οποίων λεπτομέρειες υπολογισμού περιγράφονται στην Παράγραφο 6.6.1. Ακολουθούν τα αποτελέσματα του προγράμματος MIKE 21.

8.3.3.1 Αποτελέσματα PMS



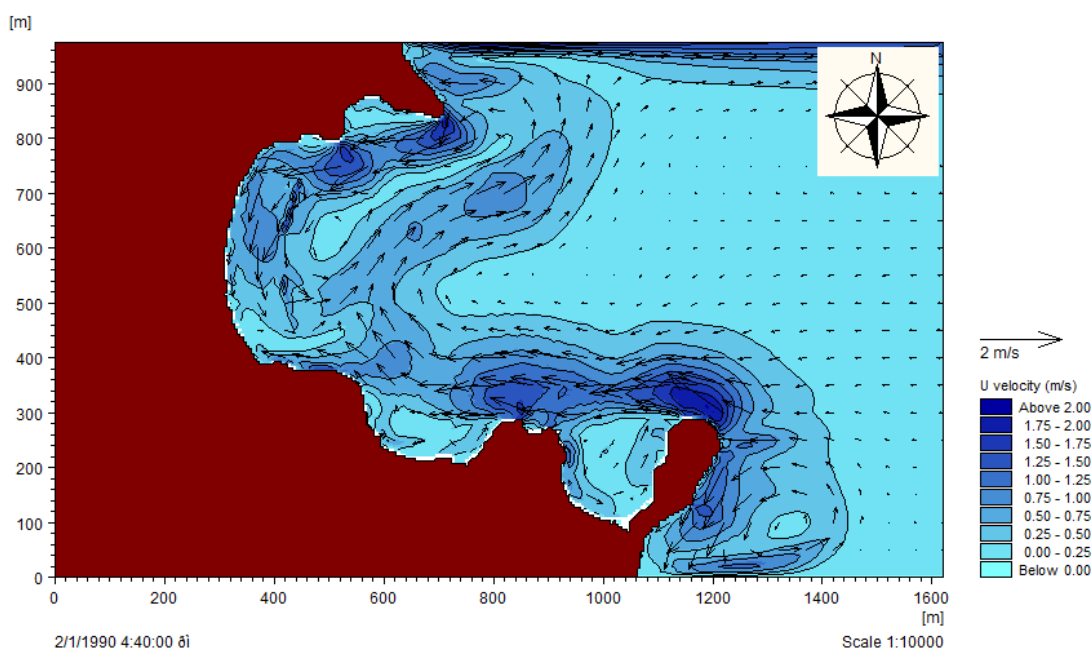
Σχήμα 8.24: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33\text{m}$ και $T=6.048\text{sec}$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών



Σχήμα 8.25: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών

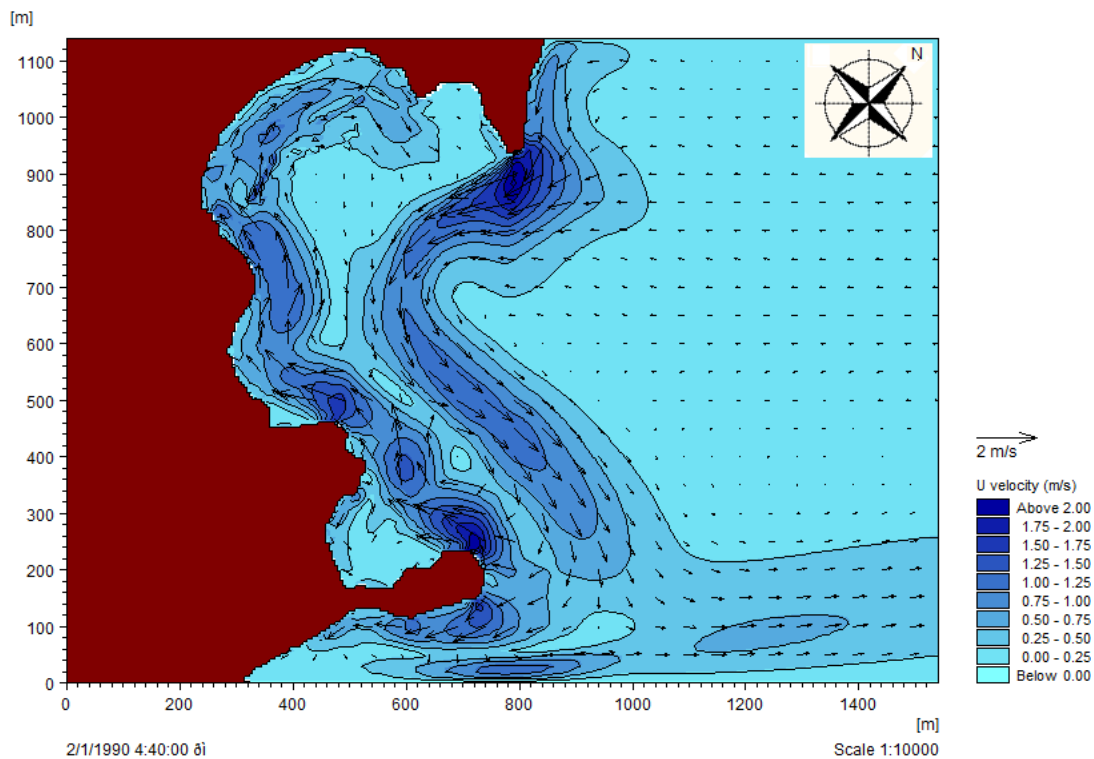
Στα Σχήματα 8.24 και 8.25 παρουσιάζονται τα ύψη κύματος για τον ανατολικό και βορειοανατολικό άνεμο. Η θέση των ύφαλων κυματοθραυστών γίνεται ευδιάκριτη από τη μορφή που παίρνει η ισοϋψής των 0,4m και 0,8m στα σχήματα 8.24 και 8.25 αντίστοιχα. Κοντά στην ακτή, στην περιοχή πίσω από τους κυματοθραύστες, παρατηρούνται ύψη κύματος χαμηλότερα του 0,75m για τον ανατολικό άνεμο (Σχήμα 8.24) και του 0,8m για τον βορειοανατολικό (σχήμα 8.25).

8.3.3.2 Αποτελέσματα HD



Σχήμα 8.26: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθεία $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών

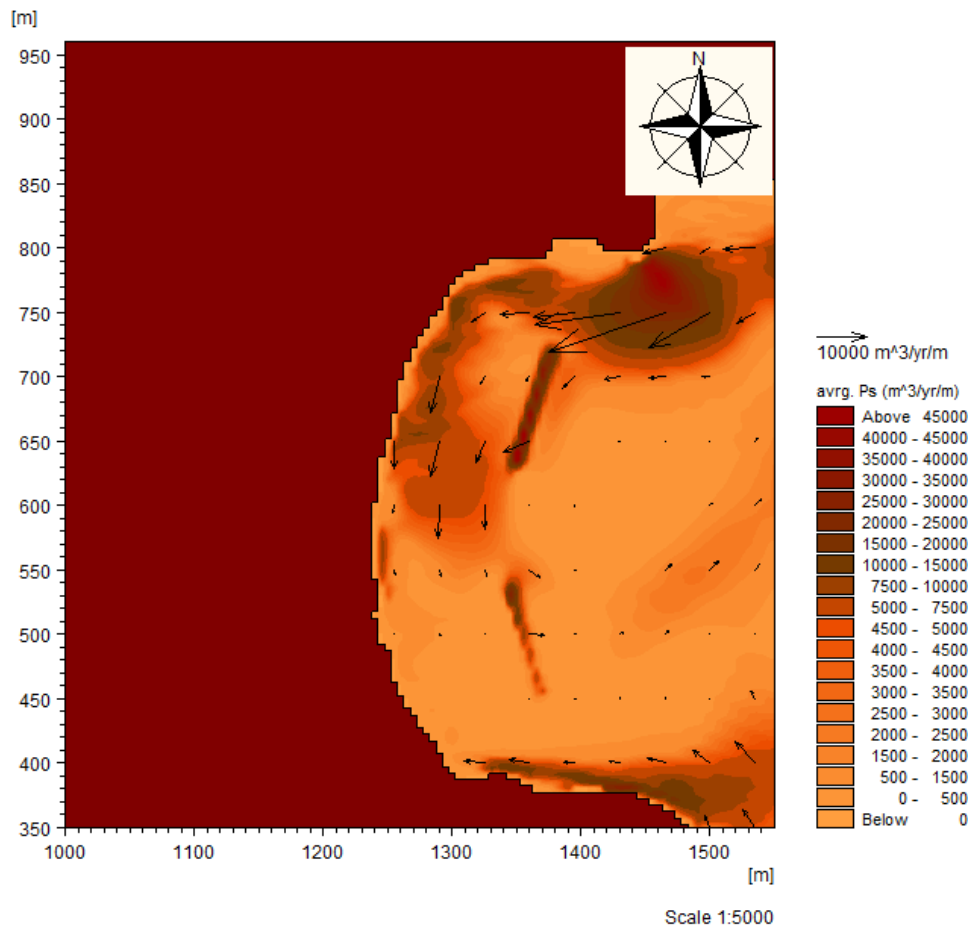
Στο Σχήμα 8.26 φαίνεται ο βόρειος ύφαλος κυματοθραύστης να εξασθενεί το κατά μήκος ρεύμα, το οποίο στη σκιά του κυματοθραύστη λαμβάνει τιμές χαμηλότερες του 0,5m/sec. Στο κενό μεταξύ των κυματοθραυστών οι ταχύτητες αυξάνονται έως 0,75m/sec. Όσο το ρεύμα κατευθύνεται προς το νότιο τμήμα της παραλίας μειώνεται σταδιακά η ταχύτητά του και δημιουργείται ένα βελοειδές ρεύμα που κινείται βορειοανατολικά.



Σχήμα 8.27: Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93\text{m}$ και $T=6.817\text{sec}$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών

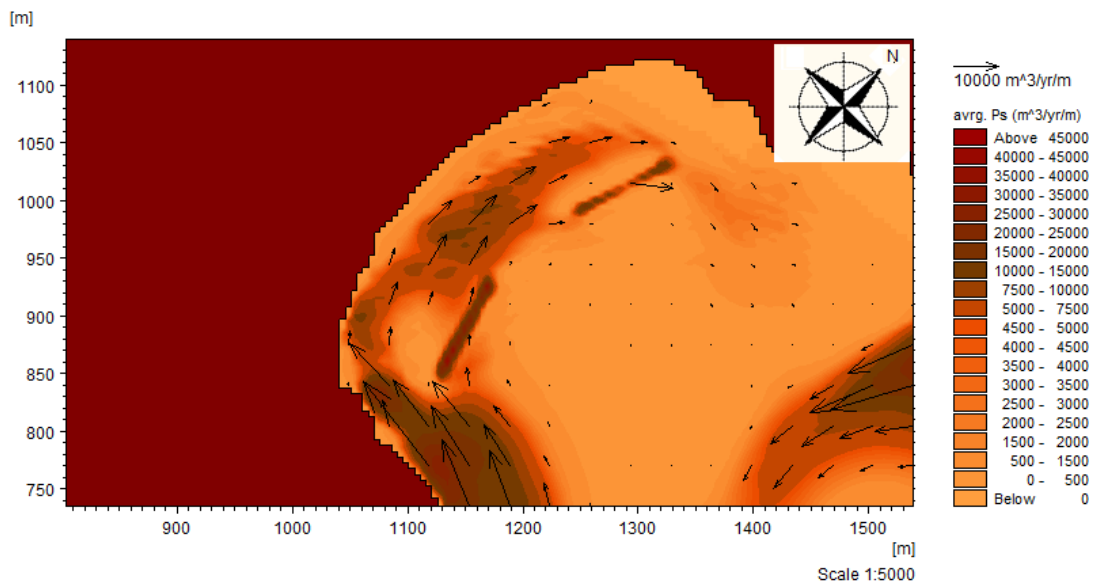
Αντίστοιχο φαινόμενο με το Σχήμα 8.26 παρατηρείται και στο Σχήμα 8.27 με το ρεύμα να κινείται με αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή N-B. Οι ταχύτητες κυμαίνονται πάλι από 0,75m/sec έως 0, με τη διαφορά ότι οι ταχύτητες του ρεύματος στο μεγαλύτερο κομμάτι της περιοχής κυμαίνονται μεταξύ των τιμών 0,75-0,5m/sec .

8.3.3.3 Αποτελέσματα ST



Σχήμα 8.28: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον ανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.33m$ και $T=6.048sec$

Στην υπήνεμη πλευρά του βόρειου κυματοθραύστη πραγματοποιείται κατά μήκος στερεομεταφορά από το Βορά προς τον Νότο με μέγιστο ρυθμό $10000 m^3/yr/m$ που μειώνεται προς τα βαθιά. Στην υπήνεμη πλευρά του νότιου κυματοθραύστη η στερεομεταφορά είναι πολύ μικρή, κάτω από $1500 m^3/yr/m$ έως μηδενική.



Σχήμα 8.29: Μέτρο και κατεύθυνση στερεομεταφοράς για τον βορειοανατολικό άνεμο των 7bf με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2.93m$ και $T=6.817sec$ με τη διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών

Όπως είναι αναμενόμενο από τις υδροδυναμικές συνθήκες (Σχήμα 8.27) γίνεται στερεομεταφορά κατά μήκος όλης της ακτής από το Νότο προς το Βορρά με αυξημένο ρυθμό στο κενό των ύφαλων κυματοθραυστών περίπου στη περιοχή που παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές του ρεύματος. Γενικά, και στα αποτελέσματα του βορειοανατολικού ανέμου η στερεομεταφορά είναι μικρότερη των $10000 m^3/yr/m$.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της στερεομεταφοράς

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε παρουσίαση και περιγραφή των αποτελεσμάτων από την εφαρμογή των μοντέλων. Συγκεκριμένα, η περιγραφή επικεντρώθηκε σε αποτελέσματα που αφορούν την περιοχή της ακτής και όχι σε ολόκληρο τον όρμο, ενώ παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των έργων μεμονωμένα.

Αρχικά, διαπιστώνεται ότι η ισχυρότερη στερεομεταφορά πραγματοποιείται στο νότιο τμήμα της ακτής από τον βορειοανατολικό άνεμο και σταδιακά μειώνεται μεταφέροντας ίζημα προς τα βαθειά. Στα αποτελέσματα των έξαλων κυματοθραυστών προκύπτει ότι συνδυάζουν δύο λειτουργίες. Ο νότιος περιορίζει ικανοποιητικά το ρεύμα που μεταφέρει το ίζημα με συνέπειες στους ρυθμούς στερεομεταφοράς και ο βόρειος εμποδίζει το ρεύμα να κινηθεί προς τα ανοιχτά και κατά συνέπεια και το ίζημα παραμένει στην περιοχή πίσω από αυτόν.

Στον βορειοανατολικό άνεμο ο μεμονωμένος κυματοθραύστης μειώνει την εισερχόμενη στην ακτή στερεομεταφορά όμως τη διατηρεί στην υπήνεμη περιοχή του την κατά μήκος κίνηση του ιζήματος έως που το ίζημα εξέρχεται από το βόρεια ακρομώλιο του κυματοθραύστη προς τα βαθειά. Αντίστοιχο αποτέλεσμα παρουσιάζεται να έχει και η διάταξη των ύφαλων κυματοθραυστών με τη διαφορά ότι η εισερχόμενη στερεομεταφορά λαμβάνει τη μικρότερη τιμή σε σχέση με τις δύο άλλες διατάξεις. Παράλληλα, στο κενό μεταξύ των ύφαλων κυματοθραυστών ο ρυθμός κυκλοφορίας του ιζήματος αυξάνεται και με το ρεύμα μεταφέρεται προς τα βόρεια της ακτής και στη συνέχεια προς τα ανοιχτά.

Για τον ανατολικό άνεμο βασικός στόχος του έργου είναι να ανακόψει το βελοειδές ρεύμα, το οποίο όπως αποδεικνύεται στο Σχήμα 8.9 πραγματοποιεί στερεομεταφορά. Η διάταξη του των ύφαλων κυματοθραυστών μειώνει τους ρυθμούς εισροής του ιζήματος στην ακτή και ταυτόχρονα δεν εμποδίζει το ίζημα να απομακρυνθεί από αυτή. Για τον μεμονωμένο κυματοθραύστη φαίνεται να υπάρχει στερεομεταφορά στο νότιο ακρομώλιο του έργου προς τα ανοιχτά, στη διεύθυνση του βελοειδούς ρεύματος. Σημαντικό μειονέκτημα των ύφαλων

κυματοθραυστών είναι ότι στην περιοχή ανάμεσα στους δύο κυματοθράυστες η στερεομεταφορά ενισχύεται, καθώς εκεί το υδροδυναμικό πεδίο δεν φαίνεται να αποδυναμώνεται από την κατασκευή.

Από τα τρία προτεινόμενα σενάρια, αυτό που εμφανίζεται να έχει τα πιο επιθυμητά αποτελέσματα, όπως ήταν αναμενόμενο είναι αυτό των δύο έξαλων κυματοθραυστών. Καθώς λόγω της στέψης του δεν επιτρέπει την υπερπήδηση του κυματισμού και εξαιτίας της μορφής του υδροδυναμικού πεδίου εμποδίζει την απομάκρυνση του ιζήματος και για τις δύο διευθύνσεις του ανέμου. Με αυτή τη διάταξη επιτυγχάνεται η μείωση της στερεομεταφοράς στη διεύθυνση του ρεύματος πίσω από τη διάταξη των έργων και ταυτόχρονα ανακόπτεται η κίνηση του ιζήματος προς τα ανοιχτά. Η διάταξη των ύφαλων κυματοθραυστών και του μεμονωμένου κυματοθραύστη αποδεικνύονται μη αποτελεσματικές, καθώς δεν αποτρέπουν την απομάκρυνση του ιζήματος από την ακτή, απλά μειώνουν τον εισερχόμενο ρυθμό στερεομεταφοράς.

9.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η διπλωματική εργασία διερεύνησε το υδροδυναμικό πεδίο και τη στερεομεταφορά σε περιοχή τύπου θύλακα βασιζόμενη στα αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων. Όπως προαναφέρθηκε μια άλλη μέθοδος μελέτης και κατανόησης των κυματικών φαινομένων που εμφανίζονται και αλληλεπιδρούν σε ακτές τύπου θύλακα είναι με φυσικά προσομοιώματα. Συνέχεια αυτής της εργασίας θα μπορούσε να αποτελεί η κατασκευή ενός φυσικού προσομοιώματος της συγκεκριμένης περιοχής στο εργαστήριο. Καθώς στην παρούσα εργασία δίδονται πληροφορίες για την περιγραφή του ιζήματος, για την μορφολογία του κόλπου και για την κλίση της ακτής. Τα στοιχεία που θα προκύψουν από την πειραματική αυτή διαδικασία μπορούν να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων ώστε να διεξαχθούν συμπεράσματα για την αξιοπιστία του προγράμματος ως προς την αντιμετώπιση περιοχών με περίπλοκη μορφολογία.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

- Γαδ Φ., 2011. Βελτιστοποίηση Διάταξης Συστήματος προβόλων. Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Δασκαλάκη Μ. Κ., 2009. Λιμάνια Θαλάσσια κύματα Λιμενικά έργα Τόμος Β. ΤεκΔΟΤΙΚΗ Αθηνά.
- Καββαδάς Μ.Ι., 2009. Στοιχεία Εδαφομηχανικής. Συμεών, Αθήνα.
- Καραμπάς Θ. Β., 2004. Υπολογιστική Κυματομηχανική και Ακτομηχανική. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Καραμπάς Θ. Β., 2004. Στοιχεία Κυματομηχανικής. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη.
- Καραπάνου Σ.Κ. , 2011. Δίαυλος της Λευκάδας: Δυναμικές Συνθήκες στη βόρεια είσοδο . Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Κατωπόδη Δ.Ι. , 2009. Μεταφορά Ιζημάτων κατά μήκος μη ευθειογενούς ακτής- Περίπτωση Αγίου Ιωάννη Λευκάδα.
- Κουτιτάς Χρ., 1994. Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Μαυραντωνάκης Α. , 2013. Διερεύνηση Σχεδιασμού Διάταξης Μαρίνας σε σχέση με τη Στερεομεταφορά στην είσοδο και προτάσεις βελτίωσης. Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Μέμος Κ.Δ., 2008. Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα. Συμμετρία, Αθήνα.
- Μουτζούρης Κ.Ι., 2005. Εισαγωγή στην Ακτομηχανική. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μουτζούρης Κ.Ι., 2009. Θαλάσσια Υδραυλική. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Ουρλόγλου Ο., 2009. Παράκτια Διάβρωση και Εφαρμογή στο Δήμο Αλυκών Ζακύνθου. Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.

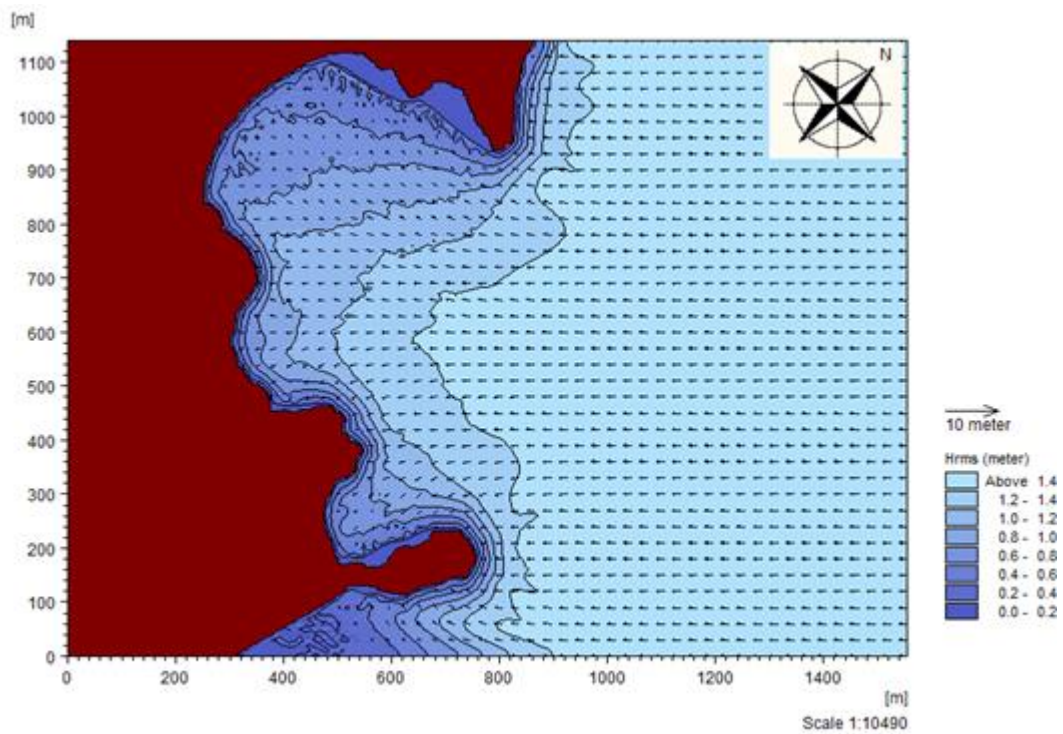
Ξένη βιβλιογραφία

- DHI, 2012. User Guide and Reference Manual. Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark
- CIRIA;CUR:CETMEF, 2007. The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition).C683,CIRIA,London
- Hanson H. and Kraus C. N., 2011. Shoreline Response to a single transmissive detached breakwater. Coastal Engineering Research Council.
- Magnor K., (2013,). Detached Breakwaters, Coastal Wiki. Viewed 12 December 2013. < http://www.coastalwiki.org/wiki/Detached_breakwaters>
- Meer j. W. 1995. Conceptual design of rubble mound breakwaters
- Pilarczyk, K. W. 2003. Design of low crested (submerged) structures. 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Colombo.
- Pilarczyk, K. W. 2003. Alternative systems for coastal protection. International Conference on Estuaries and Coasts, Hangzhou.
- Rijn, 1995. Simple General Formulae For Sand Transport in River, Estuaries and Coastal Waters.
- US Army Corps of Engineers, 2006. Coastal Engineering Manual (CEM)
- Yang C. T., 2006. Erosion and Sedimentation Manual, Chapter 3, Noncohesive sediment transport
- Yulastuti D.I. and Hashim M.A., 2011. Wave Transmission on Submerged Rubble Mound Breakwater Using L-Blocks. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology, Singapore.

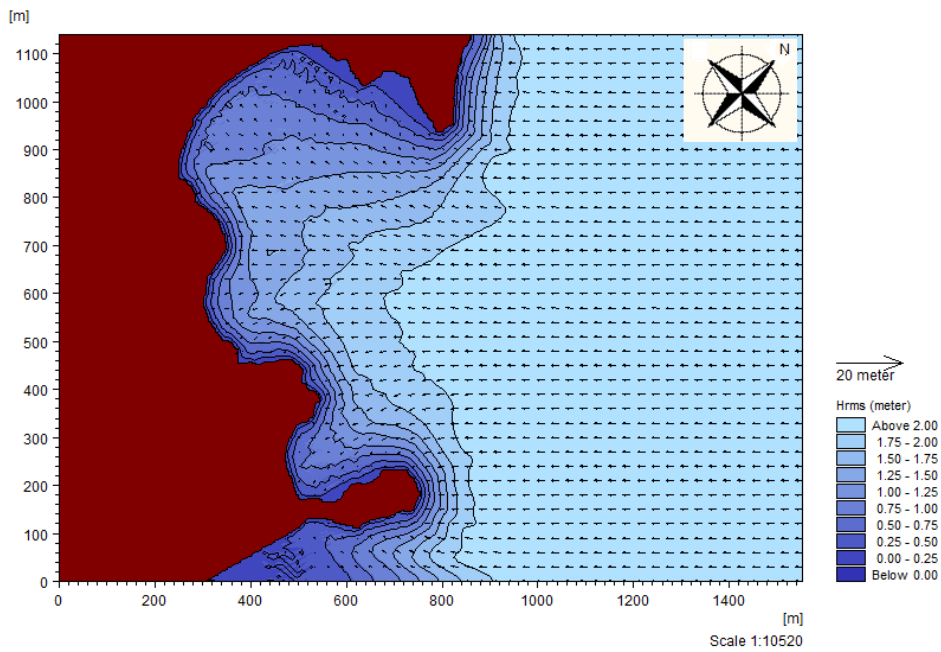
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

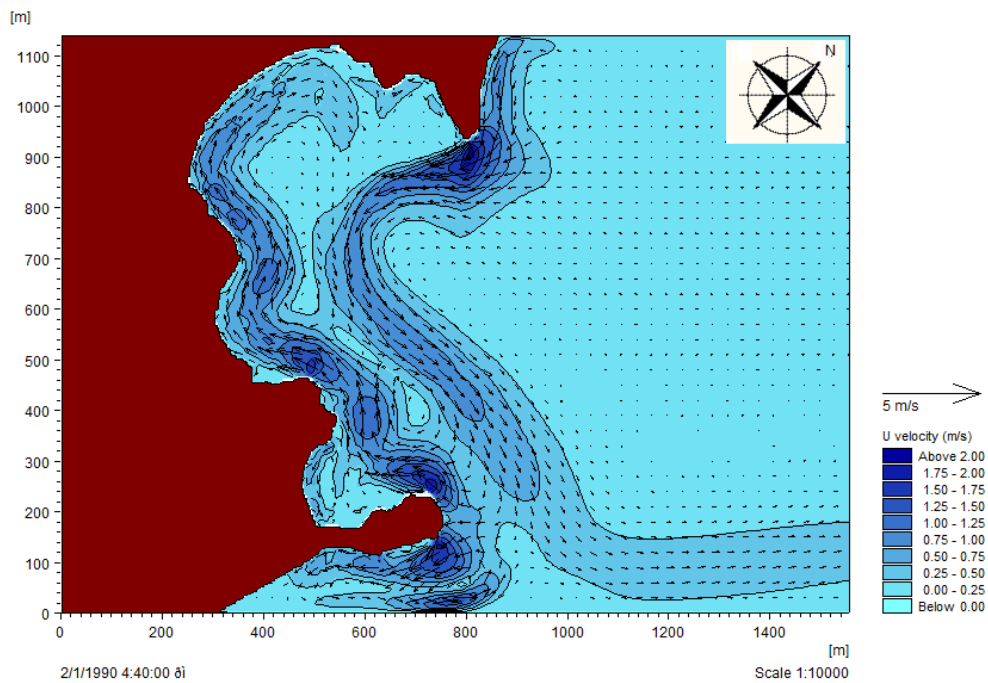
Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κυματικού και υδροδυναμικού πεδίου των ανέμων που δε λήφθηκαν υπόψη στον σχεδιασμό των έργων και για τα οποία δε διεξήχθησαν προσομοιώσεις στερεομεταφοράς, ύστερα από αξιολόγηση του υδροδυναμικού πεδίου.



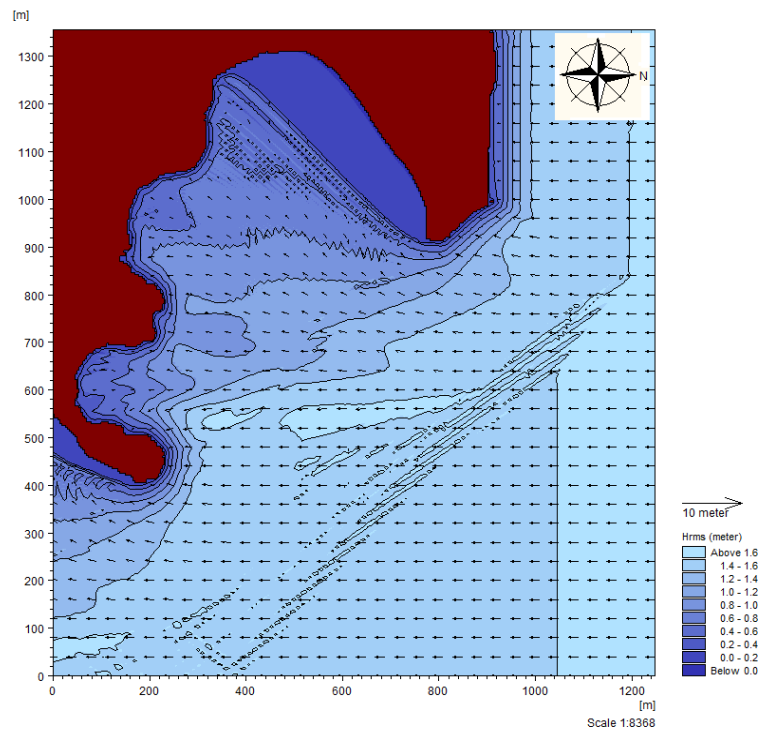
Σχήμα Α. 1: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,508m$ και $T=4,921sec$



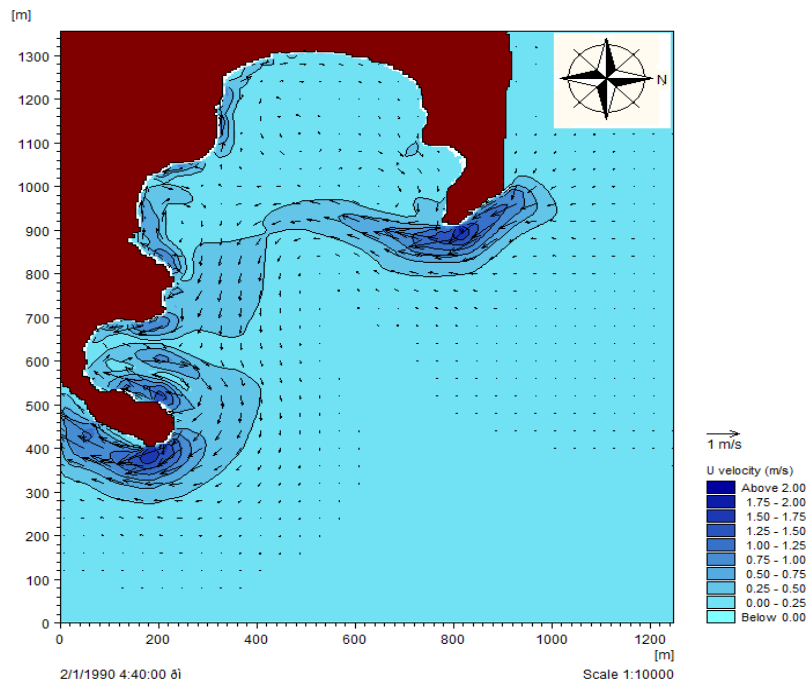
Σχήμα Α. 2: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βορειοανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,177m$ και $T=5,894sec$



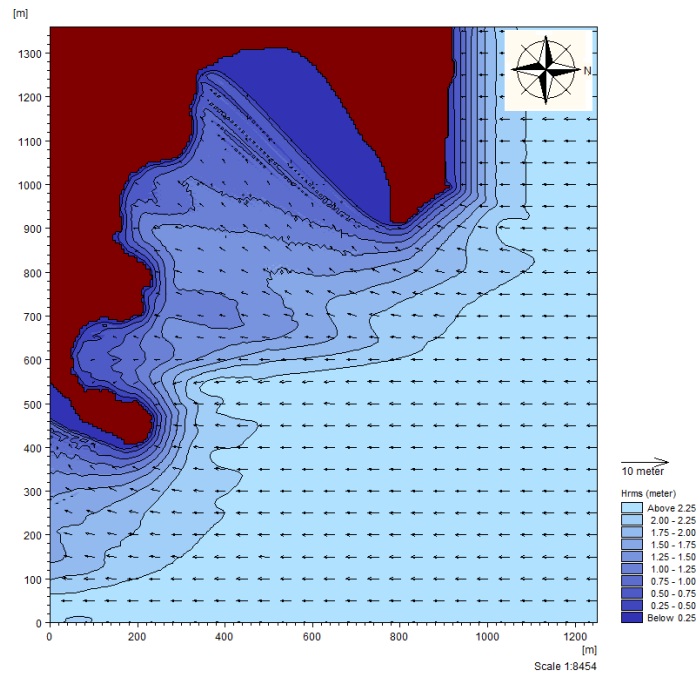
Σχήμα Α. 3 : Υδροδυναμικό πεδίο για τον βορειοανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,177m$ και $T=5,894sec$



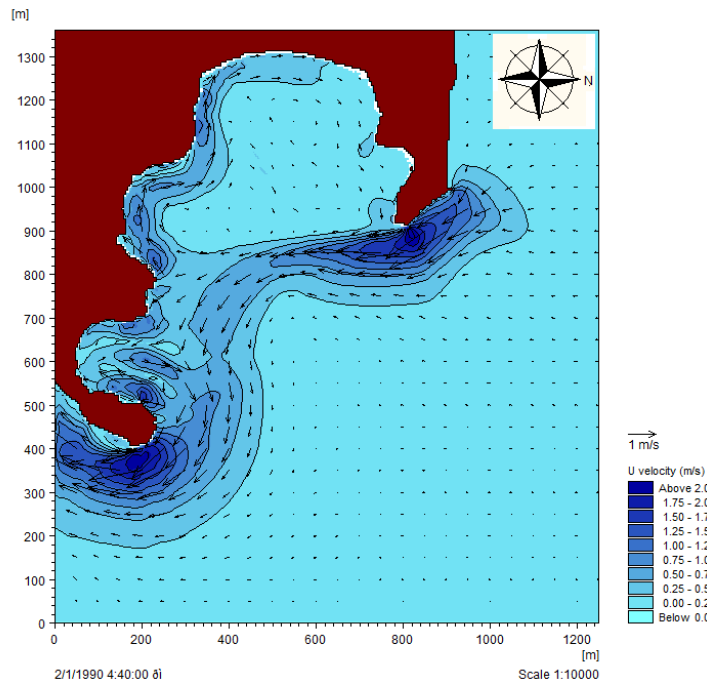
Σχήμα Α. 4: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,601m$ και $T=5,079sec$



Σχήμα Α. 5: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,601m$ και $T=5,079sec$

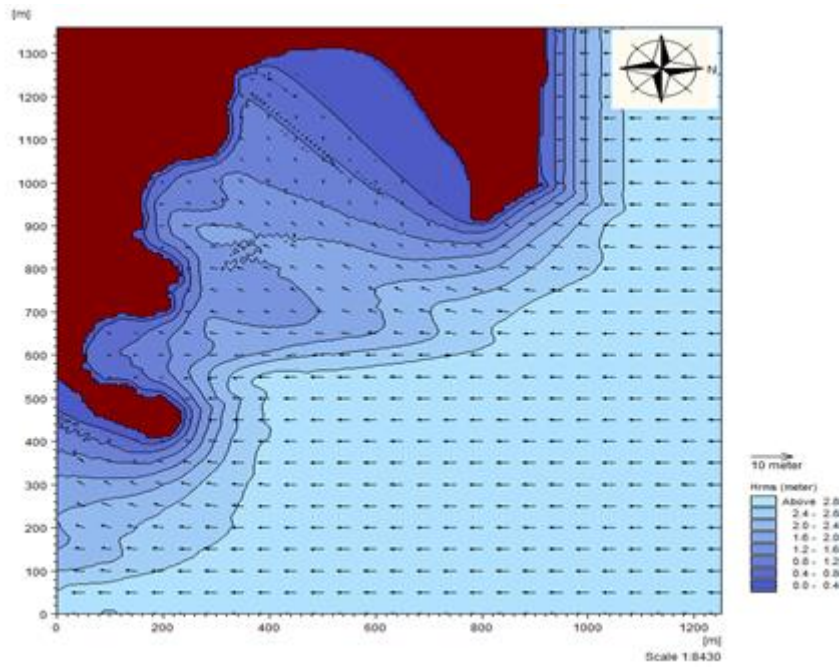


Σχήμα Α. 6: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,33m$ και $T=6,104sec$

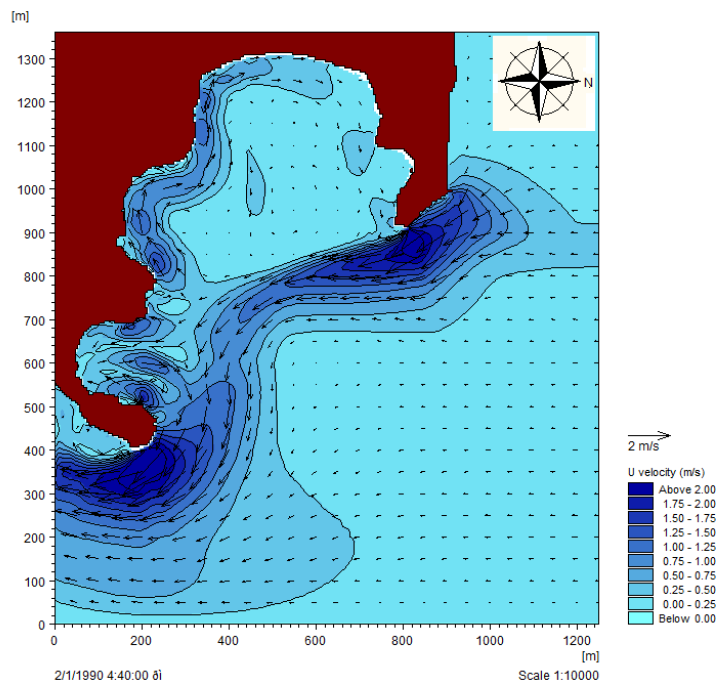


Σχήμα Α. 7: Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,33m$ και $T=6,104sec$

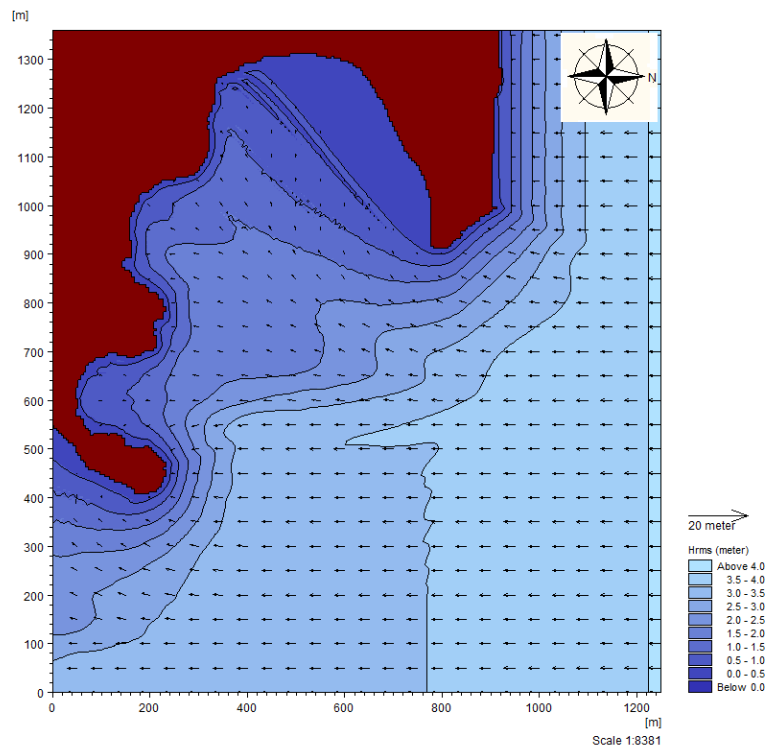
Αριθμητική προσομοίωση υδροδυναμικού πεδίου και κίνησης ιζήματος
σε ακτή μορφής θύλακα



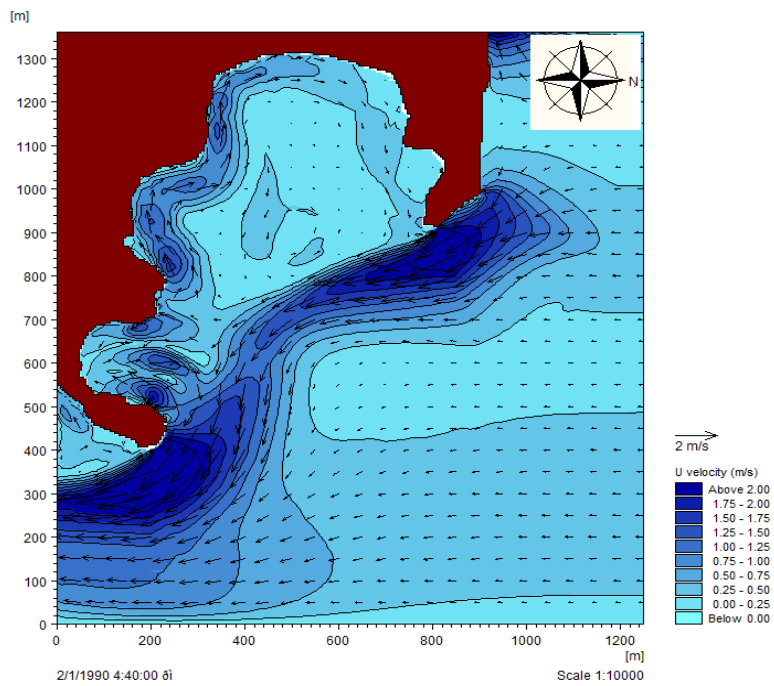
Σχήμα Α. 8: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 7 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=3,15m$ και $T=7,078sec$



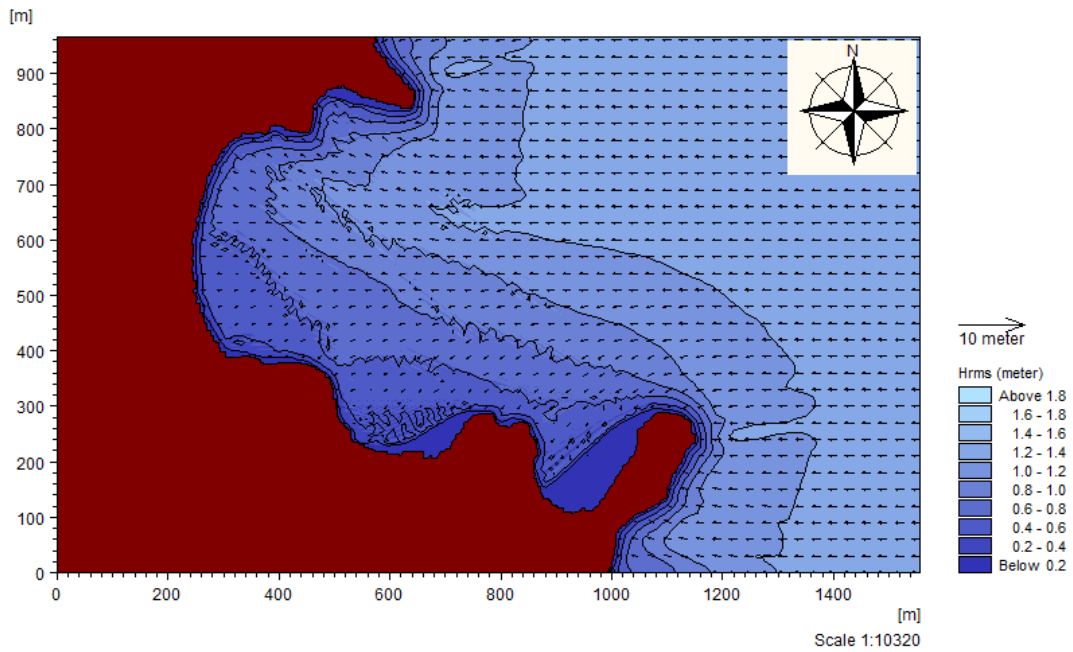
Σχήμα Α. 9: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 7 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=3,15m$ και $T=7,078sec$



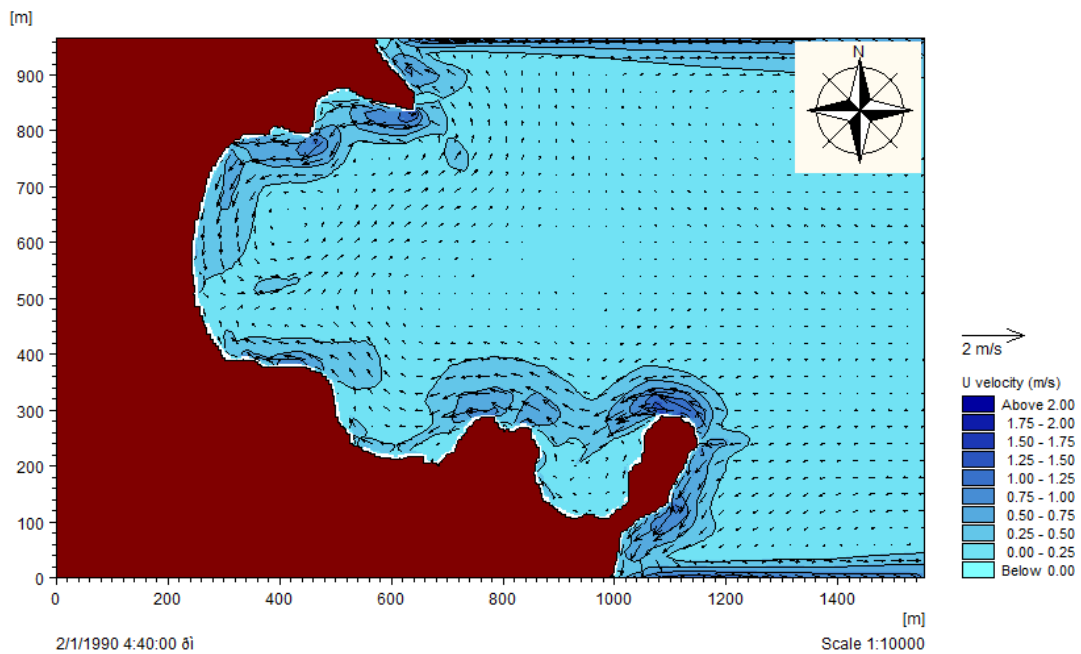
Σχήμα Α. 10: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον βόρειο άνεμο των 8 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=4,061m$ και $T=8,013sec$



Σχήμα Α. 11: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον βόρειο άνεμο των 8 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=4,061m$ και $T=8,013sec$

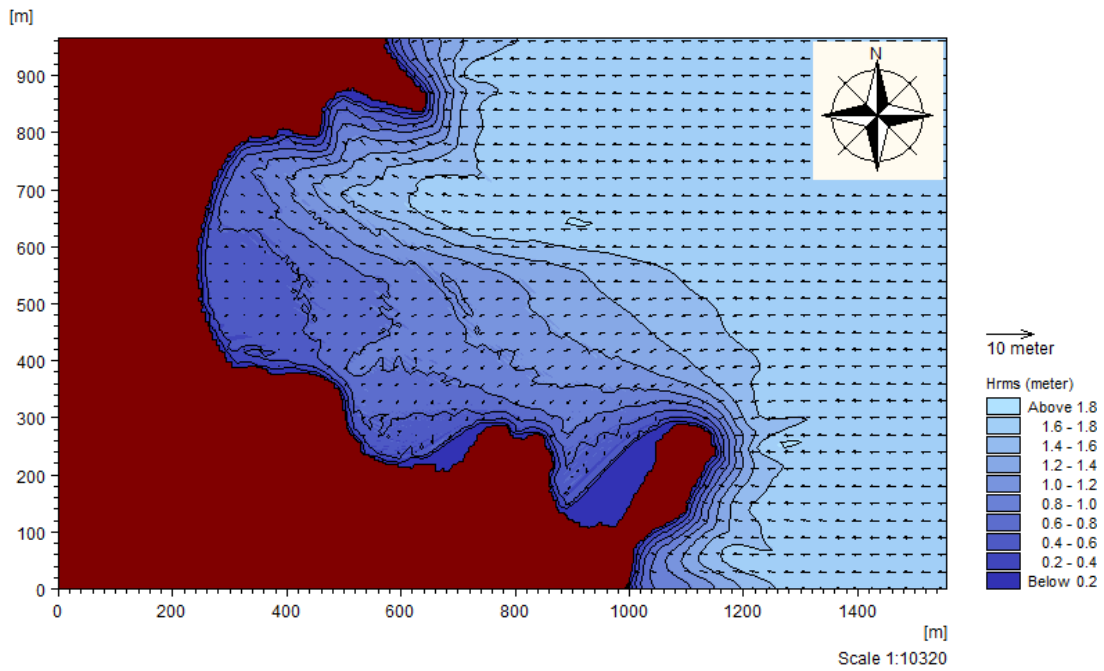


Σχήμα Α. 12: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,234m$ και $T=4,435sec$

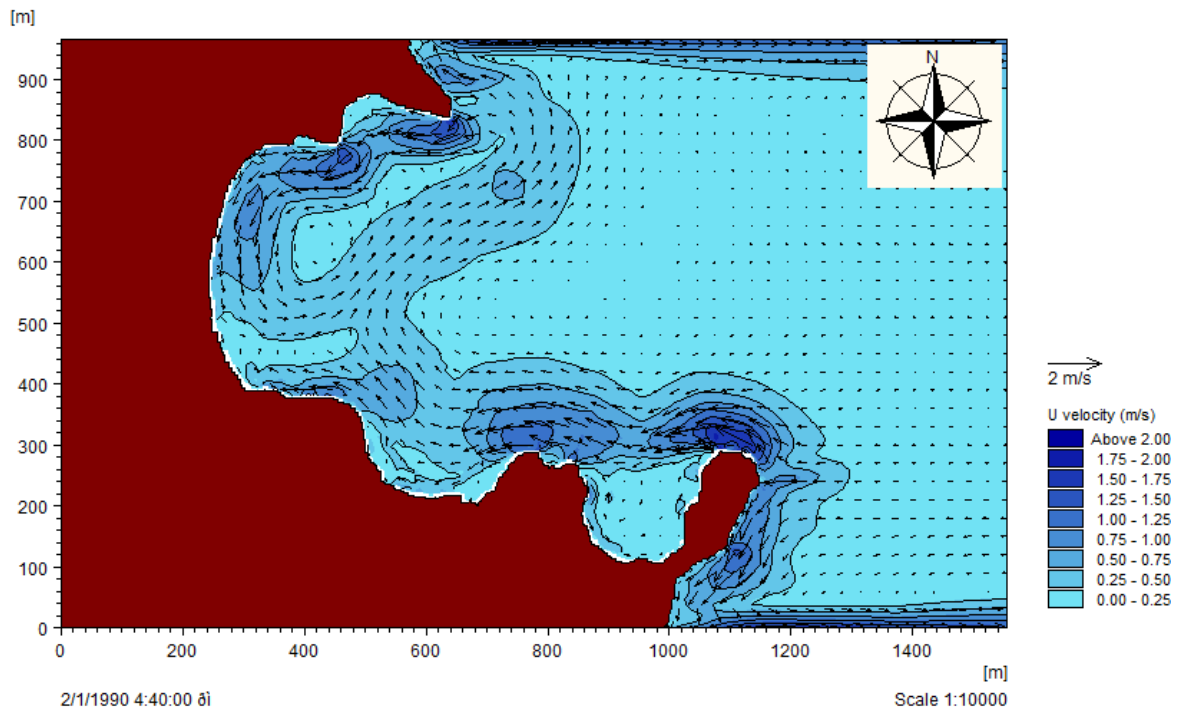


Σχήμα Α. 13: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 5 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=2,234m$ και $T=4,435sec$

Αριθμητική προσομοίωση υδροδυναμικού πεδίου και κίνησης ιζήματος
σε ακτή μορφής θύλακα



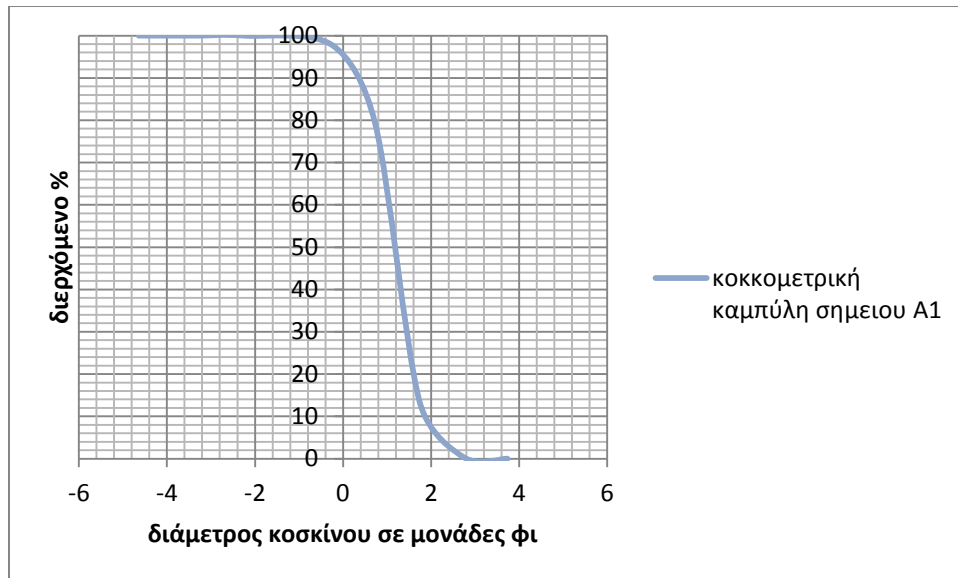
Σχήμα Α. 14: Χωρική κατανομή υψών και διεύθυνσης κυματισμού για τον ανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,7512m$ και $T=5,263sec$



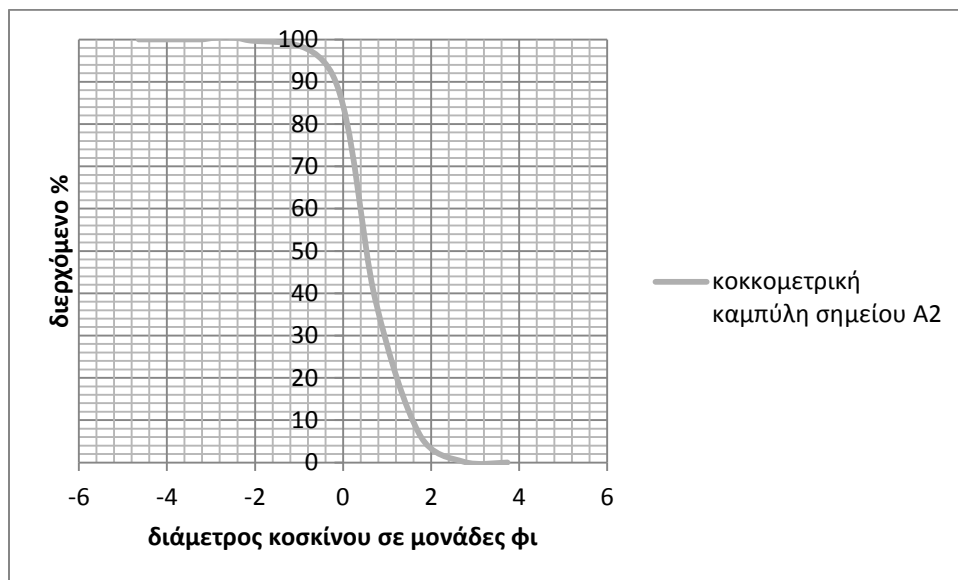
Σχήμα Α. 15: : Υδροδυναμικό πεδίο για τον ανατολικό άνεμο των 6 beaufort με χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά $H=1,7512m$ και $T=5,263sec$

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

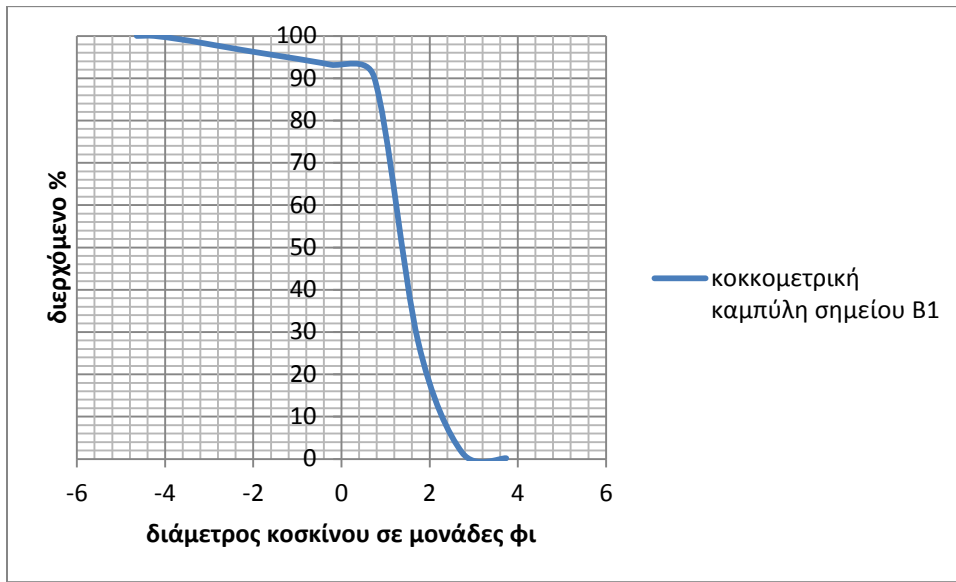
Στο παράρτημα Β παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες που προέκυψαν από τη κοκκομετρική διαβάθμιση των δειγμάτων



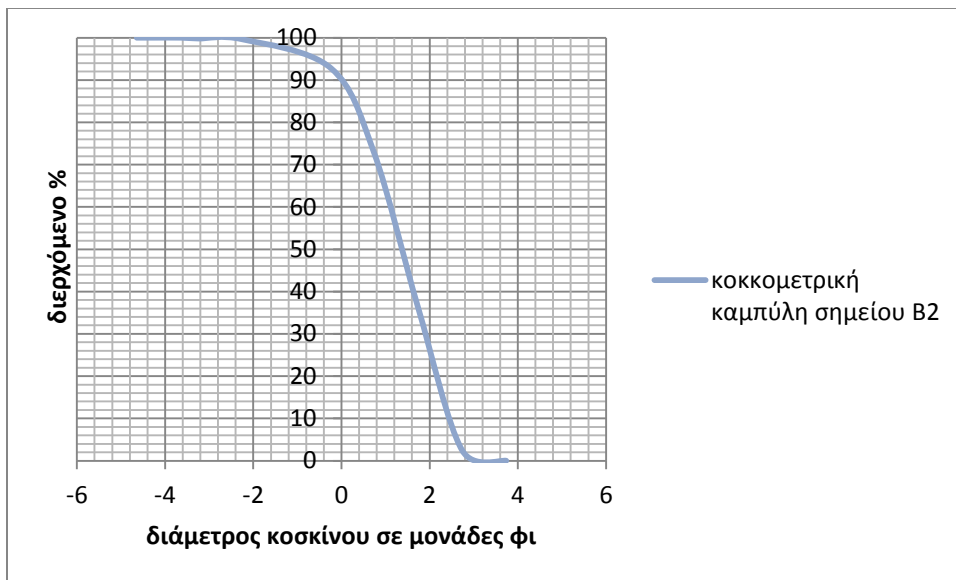
Σχήμα Β. 1: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου A1



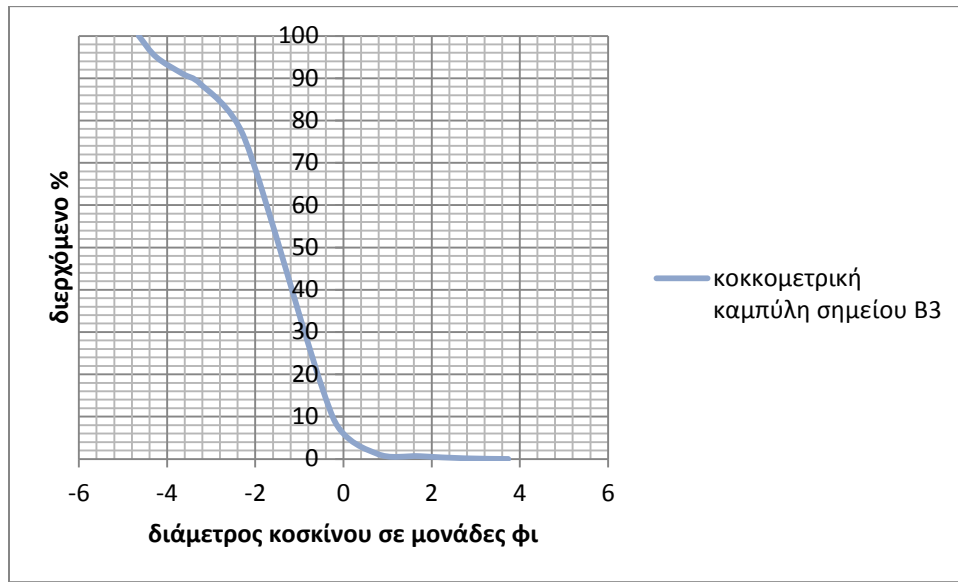
Σχήμα Β. 2: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου A2



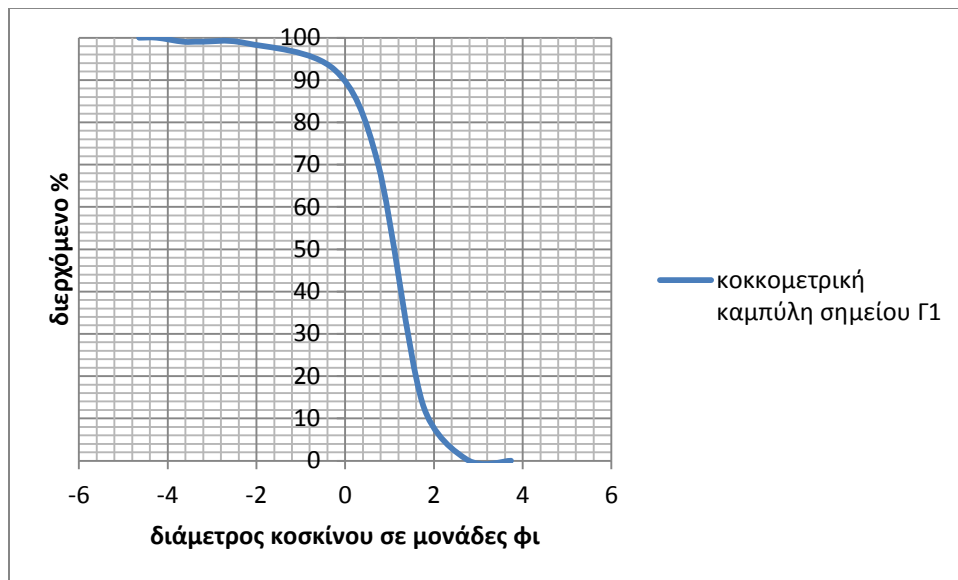
Σχήμα Β. 3: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου B1



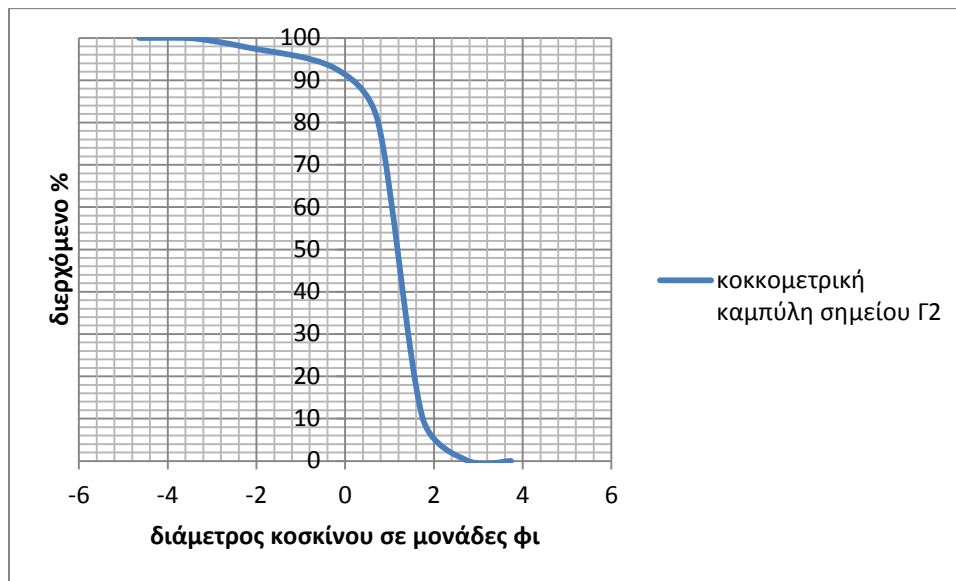
Σχήμα Β. 4: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου B2



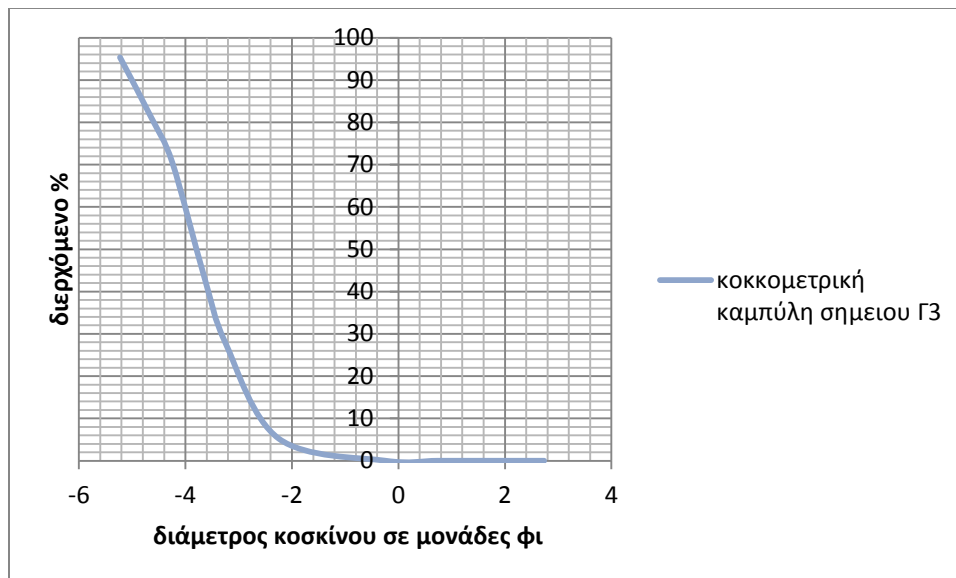
Σχήμα Β. 5: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Β3



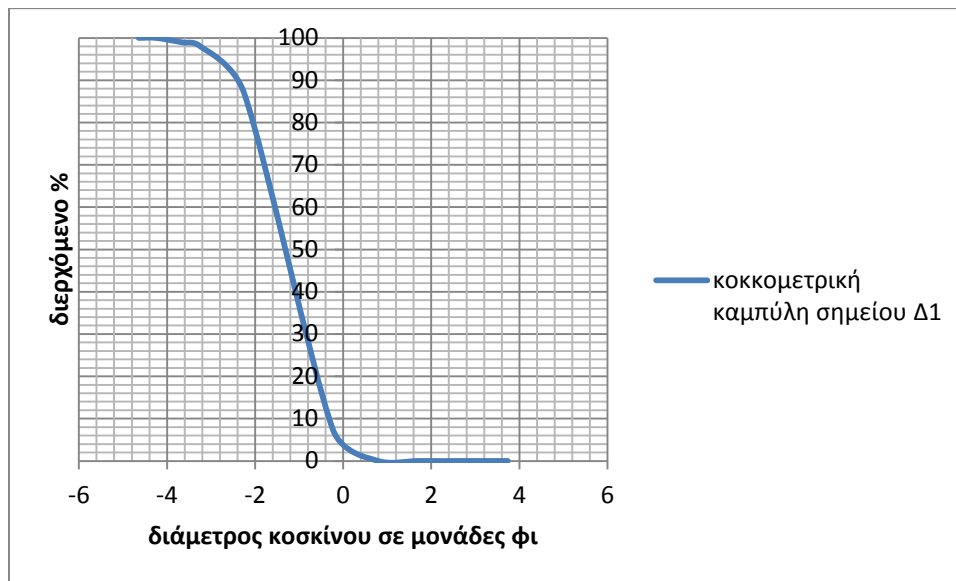
Σχήμα Β. 6: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Γ1



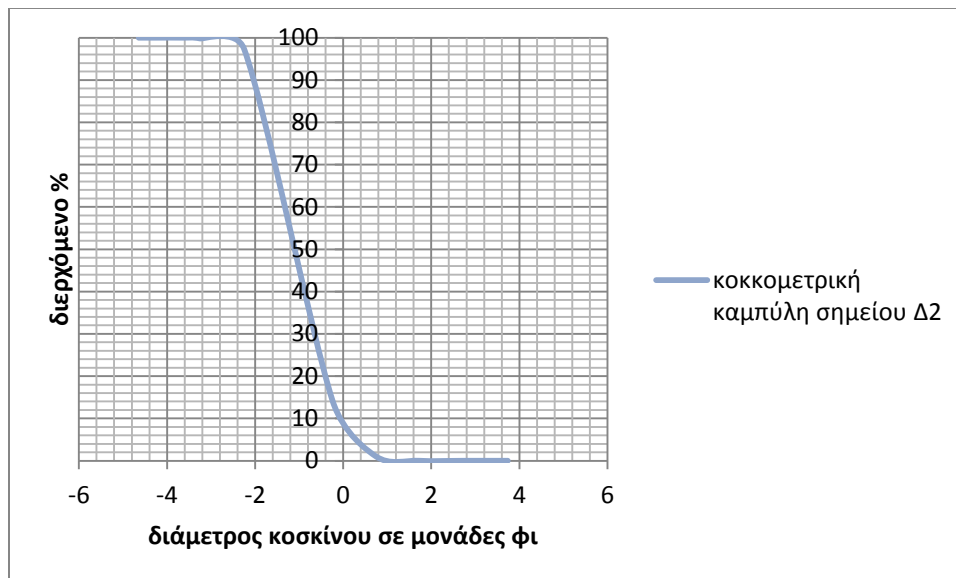
Σχήμα Β. 7: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Γ2



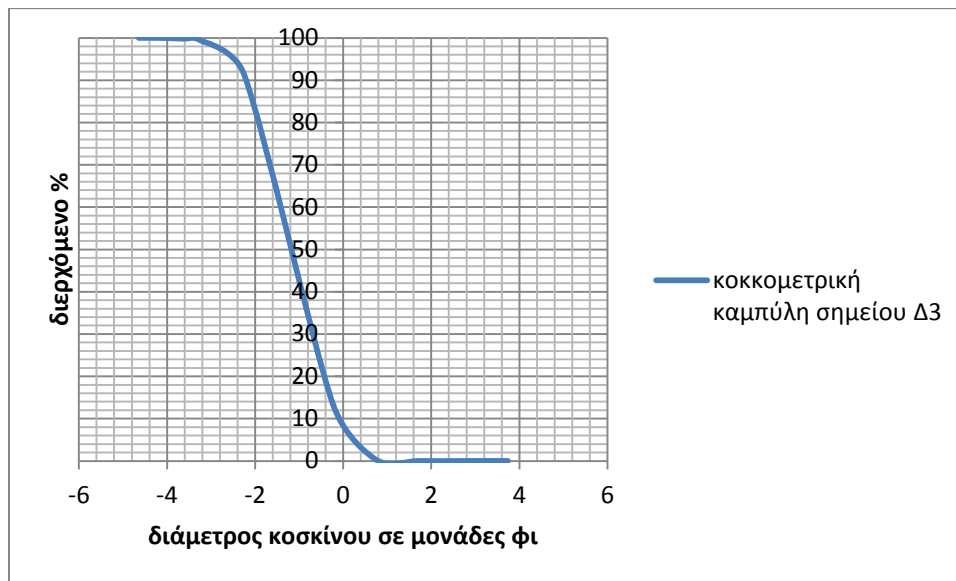
Σχήμα Β. 8: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Γ3



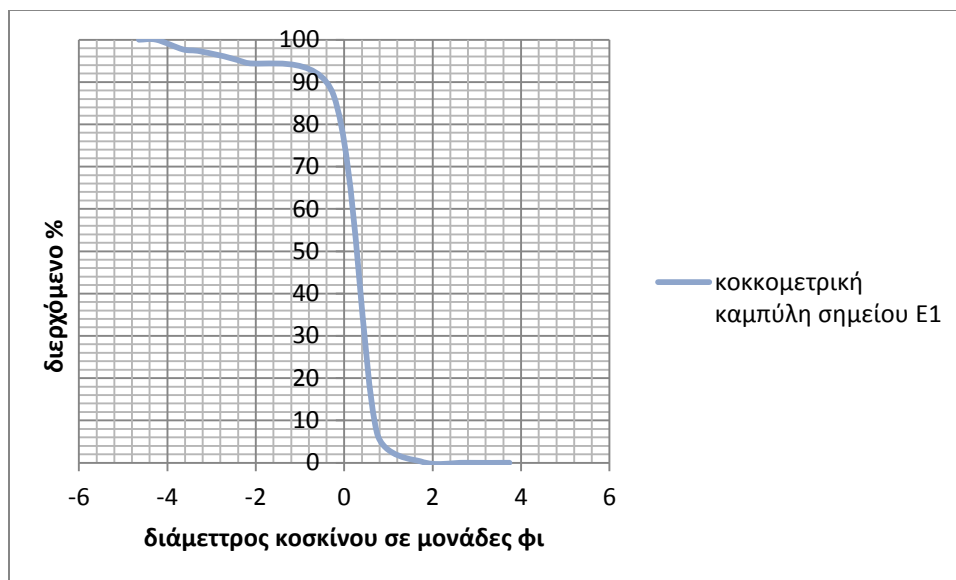
Σχήμα Β. 9: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Δ1



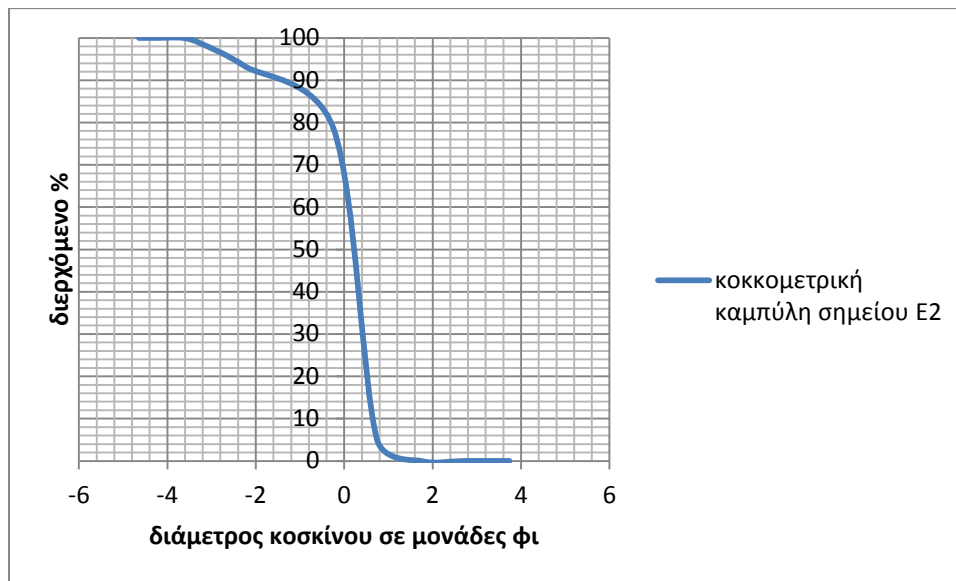
Σχήμα Β. 10: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Δ2



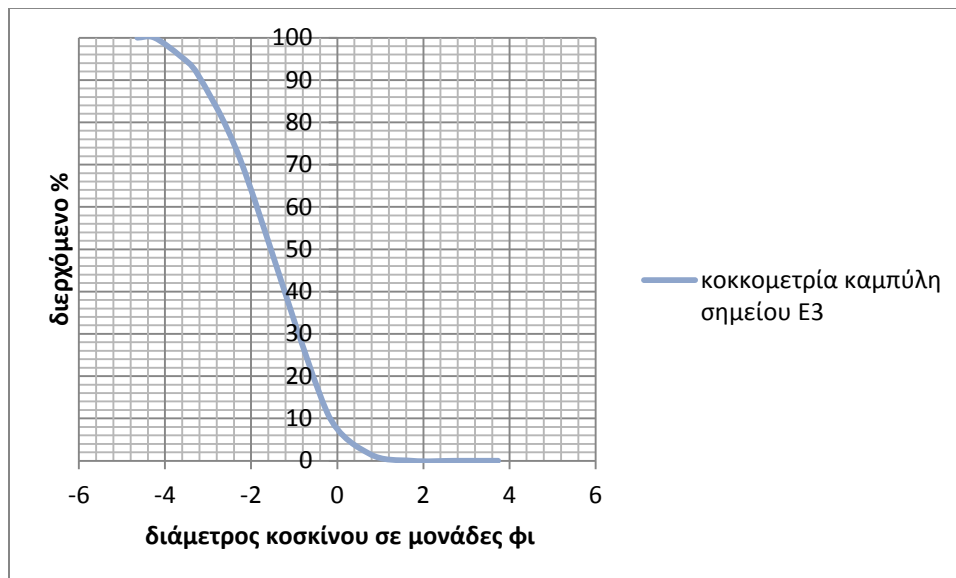
Σχήμα Β. 11: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Δ3



Σχήμα Β. 12: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου E1



Σχήμα Β. 13: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Ε2



Σχήμα Β. 14: Κοκκομετρική καμπύλη σημείου Ε3

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

Δίδονται ενδεικτικά εικόνες από κάποια σημεία λήψης ιζήματος.



Σχήμα Γ. 1: Εικόνα από θέση Ε1



Σχήμα Γ. 2: Εικόνα από θέση Ε2



Σχήμα Γ. 3: Εικόνα από θέση Γ1



Σχήμα Γ. 4: Εικόνα από θέση Δ1