



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΜΑΡΙΝΑΣ**

**ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΙΣΟΔΟ**

**ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ**

**Αντώνιος Μαυραντωνάκης**

Αθήνα, Ιούνιος 2013

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Καθηγητής Κ. Μέμος



Στη γιαγιά μου,

Άννα Μαυραντωνάκη-Κυριακάκη

## Ευχαριστίες

---

Φτάνοντας στο τέλος της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με βοήθησαν στην προσπάθεια αυτή.

Κατ' αρχάς, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Μέμο, ο οποίος με την καθοδήγηση και τις επιστημονικές παρατηρήσεις του συντέλεσε ουσιαστικά στην αποπεράτωση της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους Αναστάσιο Μεταλληνό, Μιχάλη Χονδρό, Γεώργιο Κλωνάρη και Κωνσταντίνο Παπαδόπουλο για τη συμπαράσταση και τις χρήσιμες συμβουλές τους.

Αντώνιος Μαυραντωνάκης

Αθήνα, Ιούνιος 2013

# Περιεχόμενα

---

Ευχαριστίες.....	i
Περιεχόμενα .....	ii
Ευρετήριο Πινάκων .....	vi
Ευρετήριο Σχημάτων .....	viii
Ορισμός συμβόλων .....	xiv
Περίληψη.....	xix
Extended Abstract.....	xxi
Introduction.....	xxi
Coastal zone .....	xxi
Sediment transport.....	xxi
Marinas in coastal areas .....	xxiii
Posing the siltation problem .....	xxiii
Alternative solutions.....	xxiv
Study area .....	xxv
Mike DHI 2012 .....	xxviii
Results .....	xxix
Conclusions.....	xxx
Εισαγωγή .....	1
<b>1. Παράκτια Ζώνη .....</b>	<b>3</b>
1.1 Εισαγωγή .....	3
1.2 Παράκτιοι κυματισμοί .....	5

1.3 Παράκτια ρεύματα .....	6
1.4 Παράκτια ιζήματα .....	9
1.5 Έναρξη κίνησης ιζήματος .....	15
1.6 Διαδικασίες στερεομεταφοράς στην ακτή .....	17
1.6.1 Στερεομεταφορά παράλληλα στην ακτή .....	18
1.6.1.1 Μέθοδοι υπολογισμού στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής ....	19
1.6.2 Μέθοδοι υπολογισμού στερεομεταφοράς κάθετα στην ακτή.....	23
1.6.2.1 Μέθοδοι υπολογισμού στερεομεταφοράς κάθετα στην ακτή .....	26
1.7 Ισοζύγιο φερτών υλών .....	26
<b>2. Μαρίνες και παράκτια ζώνη .....</b>	<b>28</b>
2.1 Γενικά στοιχεία μαρίνων .....	28
2.2 Αλληλεπίδραση παράκτιου περιβάλλοντος – τεχνικών έργων .....	31
2.3 Προσαμμώσεις σε μαρίνες .....	33
2.3.1 Εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες στερεομεταφοράς σε μαρίνες ....	34
2.4 Βυθοκορήσεις .....	36
2.4.1 Είδη βυθοκόρων .....	37
2.4.2 Κόστος και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι βυθοκορήσεων .....	38
2.5 Εναλλακτικοί τρόποι αντιμετώπισης προσαμμώσεων .....	40
2.5.1 Βασικές αρχές λειτουργίας .....	41
2.5.2 Μέθοδοι μείωσης των προσαμμώσεων .....	41
2.5.3 Αποτελεσματικότητα μεθόδων σε σχέση με την ανταλλαγή ρευστού λιμενολεκάνης-περιβάλλοντος. ....	47

<b>3. Περιοχή μελέτης και ανάλυση δεδομένων .....</b>	<b>49</b>
3.1 Ανάλυση δεδομένων και σεναρίων μελέτης .....	49
3.1.1 Πορεία υπολογισμών .....	50
3.1.2 Ανάλυση στόχου εργασίας .....	50
3.2 Σχεδιασμός παράκτιας περιοχής .....	51
3.2.1 Σχεδιασμός βαθυμετρίας .....	51
3.3 Διατάξεις μαρίνων .....	54
3.4 Διατάξεις για την αντιμετώπιση των προσαμμώσεων .....	59
3.4.1 Εφαρμογή συστοιχίας πασσάλων .....	59
3.4.2 Εφαρμογή τοιχώματος εκτροπής ρεύματος .....	60
3.4.3 Εφαρμογή προβόλου .....	61
<b>4. Μοντέλο Mike 21 .....</b>	<b>63</b>
4.1 Κυματικό μοντέλο PMS .....	63
4.1.1 Εισαγωγή .....	63
4.1.2 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου .....	64
4.1.2.1 Περιγραφή βασικών παραμέτρων του μοντέλου .....	68
4.1.2.2 Υπολογισμός Κυματικών Παραμέτρων .....	70
4.1.3 Εφαρμογή μοντέλου .....	72
4.2 Υδροδυναμικό μοντέλο HD .....	75
4.2.1 Εισαγωγή .....	75
4.2.2 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου .....	76
4.2.2.1 Περιγραφή βασικών παραμέτρων του μοντέλου .....	77

4.2.3 Εφαρμογή μοντέλου .....	79
4.3 Μοντέλο στερεομεταφοράς ST .....	82
4.3.1 Εισαγωγή .....	82
4.3.2 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου .....	82
4.3.2.1 Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος .....	82
4.3.2.2 Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες ρεύματος-κύματος.....	86
4.3.3 Εφαρμογή μοντέλου .....	89
<b>5. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων .....</b>	<b>93</b>
5.1 Πορεία αποτελεσμάτων για τη διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο .....	93
5.2 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για την παράκτια περιοχή χωρίς την παρουσία μαρίνας .....	95
5.2.1 Επίδραση κατασκευής μαρίνας στην παράκτια περιοχή.....	96
5.3 Αποτελέσματα διερεύνησης στερεομεταφοράς στις διατάξεις μαρίνων.....	96
5.3.1 Πρώτο κυματικό σενάριο .....	97
5.3.2 Δεύτερο κυματικό σενάριο .....	98
5.4 Αποτελέσματα προτάσεων βελτίωσης .....	100
5.4.1 Προτάσεις βελτίωσης για τη διάταξη 1.....	101
5.4.2 Προτάσεις βελτίωσης για τη διάταξη 4.....	102
<b>6. Συμπεράσματα-Προτάσεις .....</b>	<b>105</b>
Βιβλιογραφία.....	107
Παράρτημα Α. Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	109



## Ευρετήριο Πινάκων

---

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες άμμων και αργίλων (CEM, 2006).....	11
Πίνακας 2.1 Μαρίνες στην Ελλάδα (Πηγή: World Marine guide).....	29
Πίνακας 2.2 Μαρίνες στη Μεσόγειο θάλασσα (Πηγή: World Marine guide) .....	30
Πίνακας 2.3 Ρυθμοί στερεομεταφοράς σε λιμενολεκάνες σε Ευρώπη, Ασία και ΗΠΑ (PIANC, 2008) .....	39
Πίνακας 3.1 Κυματικά σενάρια .....	49
Πίνακας 3.2 Κατασκευαστικά στοιχεία διατάξεων μαρίνων .....	55
Πίνακας 4.1 Τιμές συντελεστών $\beta_1$ , $\beta_2$ και $\beta_3$ της εξίσωσης ήπιας κλίσης (PMS).....	68
Πίνακας 4.2 Κατασκευή πίνακα ιδιοτήτων ιζήματος (μοντέλο ST, διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο).....	91
Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ταχύτητας ρεύματος $V_b$ και στερεομεταφοράς $ST_b$ στη ζώνη θραύσης χωρίς την παρουσία μαρίνας.....	96
Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος $V_{max}$ και στερεομεταφοράς $TC_{max}$ στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος $V$ και στερεομεταφοράς $TC$ στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το πρώτο κυματικό σενάριο .....	97
Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος $V_{max}$ και στερεομεταφοράς $TC_{max}$ στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος $V$ και στερεομεταφοράς $TC$ στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το δεύτερο κυματικό σενάριο .....	99
Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος $V_{max}$ και στερεομεταφοράς $TC_{max}$ στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος $V$ και στερεομεταφοράς $TC$ στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για τις προτάσεις βελτίωσης στη διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο .....	101
Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος $V_{max}$ και στερεομεταφοράς $TC_{max}$ στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος $V$ και στερεομεταφοράς $TC$ στην	

περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για τις προτάσεις βελτίωσης στη διάταξη 4, για το  
δεύτερο κυματικό σενάριο ..... 103

## Ευρετήριο Σχημάτων

---

Σχήμα 1.1 Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής (Μέμος, 2009) .....	4
Σχήμα 1.2 Υποδιαιρέσεις παράκτιας ζώνης (Μουτζούρης, 2005) .....	5
Σχήμα 1.3 Τροχιές υγρών σωματιδίων σε βαθιά και ρηχά νερά (Μουτζούρης, 2005).....	6
Σχήμα 1.4 Εγκάρσιο προφίλ του κατά μήκος της ακτής ρεύματος (CEM, 2006) .....	8
Σχήμα 1.5 Παράκτια ρεύματα κατά μήκος της ακτής (Μουτζούρης, 2005).....	9
Σχήμα 1.6 Κατηγοριοποίηση ιζημάτων κατά ASTM και Wentworth (CEM,2006) .....	12
Σχήμα 1.7 Ταχύτητα καθίζησης σφαίρας χαλαζία σε νερό ή αέρα (CEM, 2006).....	14
Σχήμα 1.8 Έναρξη κινήσεως ιζήματος (Κουτίτας, 1998) .....	16
Σχήμα 1.9 Μεταφορά ιζημάτων κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή (Μουτζούρης, 2005) .....	17
Σχήμα 1.10 Καθαρή και συνολική στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής ( $\gamma d^3/\eta\mu\epsilon\rho\alpha$ , $1\gamma d=0.9144\text{m}$ ) (CEM, 2006).....	21
Σχήμα 1.11 Θεωρητική κατανομή παροχής κατά μήκος της ακτής στη ζώνη μετά τη θραύση (Bijker, 1980).....	22
Σχήμα 1.12 Ζώνες κατά την εγκάρσια στερεομεταφορά (Κουτίτας, 1998).....	23
Σχημα 1.13 Τροχιές σωματιδίων πριν και μετά τη ζώνη θραύσης (Μουτζούρης, 2005).....	24
Σχήμα 1.14 Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ εγκάρσιας στερεομεταφοράς (Κουτίτας, 1998).....	25
Σχήμα 2.1 Αλληλεπίδραση τεχνικών έργων-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Κουτίτας, 1998).....	32
Σχήμα 2.2 Αλληλεπίδραση μαρίνας-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μέμος, 2008).....	33

Σχήμα 2.3 Ανταλλαγή υδάτων μεταξύ μαρίνας και περιβάλλοντος διαμέσου της εισόδου (PIANC, 2008).....	35
Σχήμα 2.4 Είδη βυθοκόρων (Μέμος, 2008) .....	37
Σχήμα 2.5 Συστοιχία από πασσάλους (Pile array).....	42
Σχήμα 2.6 Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος (Current deflecting wall) .....	43
Σχήμα 2.7 Κατώφλι εισόδου (sill entrance) .....	44
Σχήμα 2.8 Σπείρα (spur) .....	45
Σχήμα 2.9 Κλείσιμο δεύτερης ή πλευρικής εισόδου .....	46
Σχήμα 2.10 Κουρτίνα προσχώσεως (Silt curtain) .....	46
Σχήμα 2.11 Συσσκευή εκτόξευσης καθαρισμού (jet array) .....	47
Σχήμα 2.12 Διάφορες γεωμετρίες εισόδου και επίδραση αυτών στον οριζόντιο συντελεστή ανταλλαγής ρευστού $f_1$ .....	48
Σχήμα 3.1 Κλίση πυθμένα περιοχής μελέτης .....	51
Σχήμα 3.2 Σχεδιασμός ισοβαθών στο AutoCad 2012.....	52
Σχήμα 3.3 Σχεδιασμός βαθυμετρίας στο Mike 21.....	53
Σχήμα 3.4 Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.....	54
Σχήμα 3.5 Διατάξεις και διαστασιολόγηση μαρίνων .....	56
Σχήμα 3.6 Διατάξεις μαρίνων στο πρόγραμμα Mike 21 .....	57
Σχήμα 3.7 Σχεδιασμός διάταξης 1 στην περιοχή μελέτης .....	58
Σχήμα 3.8 Συστοιχία πασσάλων σε διάφορες διευθύνσεις για τη διάταξη 1 .....	60
Σχήμα 3.9 Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος για τη διάταξη 1 .....	61
Σχήμα 3.10 Πρόβολος για τη διάταξη 1 .....	61

Σχήμα 3.11 Συστοιχία προβόλων, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος και πρόβόλος για τη διάταξη 4 .....	62
Σχήμα 4.1 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του κυματικού μοντέλου Mike 21 PMS προσαρμοσμένη στα δεδομένα της παρούσας μελέτης.....	75
Σχήμα 4.2 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του υδροδυναμικού μοντέλου Mike 21 HD προσαρμοσμένη στα δεδομένα της παρούσας μελέτης.....	81
Σχήμα 4.3 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του υδροδυναμικού μοντέλου Mike 21 ST προσαρμοσμένη στα δεδομένα της παρούσας μελέτης.....	92
Σχήμα 5.1 Ύψος κύματος $H_{rms}$ (m), διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο .....	93
Σχήμα 5.2 Τάσεις ακτινοβολίας $S_{xy}$ ( $m^3/s^2$ ), διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο .....	93
Σχήμα 5.3 Ταχύτητα ρεύματος $V$ (m/s), διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο .....	94
Σχήμα 5.4 Στερεομεταφορά $TC$ ( $m^3/gr/m$ ), διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο.....	94
Σχήμα 5.5 Αποτελέσματα Mike 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το πρώτο κυματικό σενάριο .....	98
Σχήμα 5.6 Αποτελέσματα Mike 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το δεύτερο κυματικό σενάριο .....	100
Σχήμα 5.7 Αποτελέσματα Mike 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο.....	102
Σχήμα 5.8 Αποτελέσματα Mike 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη διάταξη 4, για το δεύτερο κυματικό σενάριο ...	104
Σχήμα A.1 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος ( $m/s$ ), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, πρώτο κυματικό σενάριο.....	109
Σχήμα A.2 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/y/m$ ), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, πρώτο κυματικό σενάριο .....	109

Σχήμα A.3 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, δεύτερο κυματικό σενάριο.....	110
Σχήμα A.4 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	110
Σχήμα A.5 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	111
Σχήμα A.6 Ρυθμός στερεομεταφοράς, ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 1, δεύτερο κυματικό σενάριο .	111
Σχήμα A.7 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 2, πρώτο κυματικό σενάριο .....	112
Σχήμα A.8 Ρυθμός στερεομεταφοράς, ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 2, πρώτο κυματικό σενάριο .....	112
Σχήμα A.9 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 2, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	113
Σχήμα A.10 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 2, δεύτερο κυματικό σενάριο .	113
Σχήμα A.11 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 3, πρώτο κυματικό σενάριο .....	114
Σχήμα A.12 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 3, πρώτο κυματικό σενάριο ...	114
Σχήμα A.13 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 3, δεύτερο κυματικό σενάριο.....	115
Σχήμα A.14 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 3, δεύτερο κυματικό σενάριο	115
Σχήμα A.15 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πρώτο κυματικό σενάριο .....	116
Σχήμα A.16 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, πρώτο κυματικό σενάριο ...	116
Σχήμα A.17 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	117
Σχήμα A.18 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, δεύτερο κυματικό σενάριο	117

Σχήμα A.19 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 5, πρώτο κυματικό σενάριο .....	118
Σχήμα A.20 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 5, πρώτο κυματικό σενάριο ...	118
Σχήμα A.21 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 5, δεύτερο κυματικό σενάριο.....	119
Σχήμα A.22 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 5, δεύτερο κυματικό σενάριο	119
Σχήμα A.23 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθετα στην είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο .....	120
Σχήμα A.24 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθετα στην είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο .....	120
Σχήμα A.25 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο .....	121
Σχήμα A.26 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο, πρώτο κυματικό σενάριο .....	121
Σχήμα A.27 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο.....	122
Σχήμα A.28 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο .....	122
Σχήμα A.29 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s,) διάταξη 1, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος πρώτο κυματικό σενάριο .....	123
Σχήμα A.30 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ) διάταξη 1, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος πρώτο κυματικό σενάριο .....	123
Σχήμα A.31 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πρόβολος πρώτο κυματικό σενάριο.....	124
Σχήμα A.32 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 1, πρόβολος πρώτο κυματικό σενάριο.....	124

Σχήμα A.33 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθιστα στην είσοδο, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	125
Σχήμα A.34 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθιστα στην είσοδο, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	125
Σχήμα A.35 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο, δεύτερο κυματικό σενάριο.....	126
Σχήμα A.36 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο, δεύτερο κυματικό σενάριο.....	126
Σχήμα A.37 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	127
Σχήμα A.38 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	127
Σχήμα A.39 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο σε ανάντη περιοχή, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	128
Σχήμα A.40 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο σε ανάντη περιοχή, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	128
Σχήμα A.41 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος , δεύτερο κυματικό σενάριο.....	129
Σχήμα A.42 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	129
Σχήμα A.43 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πρόβολος, δεύτερο κυματικό σενάριο .....	130
Σχήμα A.44 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/\gamma/m$ ), διάταξη 4, πρόβολος, δεύτερο κυματικό σενάριο.....	130



## Ορισμός Συμβόλων

---

### Λατινικά σύμβολα

$C$  ταχύτητα διάδοσης των κυματισμών (m/s)

$C(x,y)$  συντελεστής Chezy ( $m^{0.5}/s$ )

$C'(x,y)$  αριθμός Chezy που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυθμενικού υλικού ( $m^{0.5}/s$ )

$C_D$  συντελεστής συμπαράσυρσης (-)

$C_f$  συντελεστής τριβής του πυθμένα (-)

$C_g$  ταχύτητα ομάδας κυματισμών (m/s)

$C_{gb}$  ταχύτητα ομάδας των κυματισμών στη θραύση (m/s)

$c_a$  συγκέντρωση ιζήματος του περιβάλλοντος (εκτός λιμενολεκάνης) ( $kg/m^3$ )

$c_b$  συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος ( $kg/m^3$ )

$c_h$  συγκέντρωση ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης ( $kg/m^3$ )

$c_e$  συγκέντρωση ισορροπίας της λεκάνης ( $kg/m^3$ )

$Cr$  αριθμός Courant (-)

$D$  διάμετρος κόκκου εδαφικού υλικού (m)

$D_{50}$  μέση διάμετρος κόκκου εδαφικού υλικού (m)

$d$  βάθος του νερού (m)

$d_b$  βάθος θραύσης (m)

$d_t(x,y,t)$  το χρονικά μεταβαλλόμενο βάθος νερού (m)

$E$  ενέργεια του κύματος ( $kg/m/s^2$ )

$E_1$  ολική κυματική ενέργεια του κύματος ( $kg/m/s^2$ )

$E_v$  τυρβώδεις ιξώδεις ( $m^2/s$ )

$F_b$  βαρυτική δύναμη (N)

$F_s$  ρυθμός προσάμμωσης στο εσωτερικό της λεκάνης ( $m^3/yr$ )

$F_{s,T^*}$  ρυθμός προσάμμωσης ημι-ισορροπίας στο εσωτερικό της λεκάνης ( $m^3/yr$ )

f συχνότητα ( $s^{-1}$ )

$f_w$  συντελεστής τραχύτητας στον πυθμένα (m)

$f(V)$  ο συντελεστής τριβών ανέμου (-)

g επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m/s^2$ )

$H_{max}$  μέγιστο επιτρεπτό ύψος των κυματισμών (m)

H ύψος κύματος (m)

$H_b$  ύψος κύματος στη ζώνη θραύση (m)

$H_{m0}$  σημαντικό ύψος κύματος (m)

$H_{rms}$  μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος (m)

$I_1, I_2$  ολοκληρώματα του Einstein

k κυματαριθμός ( $m^{-1}$ )

$k_N$  τραχύτητα κατά Nikuradse (m)

L μήκος κύματος (m)

M αριθμός Manning ( $m^{1/3}/s$ )

n πορώδες (-)

$P_s$  στερεομεταφορά κατά την οριζόντια διεύθυνση ( $m^3/yr/m$ )

$P_l$  ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής ( $J/m/s$ )

p πιθανότητα όλοι οι κόκκοι εδαφικού στρώματος να βρίσκονται σε κίνηση (%)

$p_a$  ατμοσφαιρική πίεση (Pa)

$p, q(x, y, t)$  ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα ( $m^3/s/m$ )

$Q_s$  στερεομεταφορά κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ( $m^3/yr/m$ )

Q ρυθμός (παροχή) ανταλλαγής ροής μεταξύ λιμενολεκάνης-περιβάλλοντος ( $m^3/s$ )

$Q_b$  ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών (%)

$Q_r$  στερεομεταφορά που διέρχεται δεξιά από μια εγκάρσια διατομή κάθετη στην ακτογραμμή, για ένα παρατηρητή στην ακτογραμμή με το μέτωπο προς τα ανοικτά ( $m^3/yr$ )

$Q_l$  στερεομεταφορά που διέρχεται αριστερά από μια εγκάρσια διατομή κάθετη στην ακτογραμμή, για ένα παρατηρητή στην ακτογραμμή με το μέτωπο προς τα ανοικτά ( $m^3/yr$ )

$Q_g$  παροχή αθροιστικής στερεομεταφοράς ( $m^3/yr$ )

$Q_n$  κατ' απόλυτη τιμή καθαρή παροχή στερεομεταφοράς ( $m^3/yr$ )

$Q_{ix}$  στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής ( $m^3/yr$ )

$Q_v$  μέση χρονικά εγκάρσια στερεοπαροχή ( $m^3$ )

$q_t$  ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου ( $[N/s]/m$ )

$q_b$  ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα ( $[N/s]/m$ )

$q_s$  ρυθμός μεταφοράς του φορτίου σε αιώρηση ( $[N/s]/m$ )

$R_{cu}^{ot}$  παράγοντας που συνδέει το φορτίο του πυθμένα με τις διακυμάνσεις των ταχυτήτων μη γραμμικών κυμάτων (-)

Re αριθμός Reynolds (-)

S επιφάνεια της λιμενολεκάνης ( $m^2$ )

$S_{xx}, S_{yy}, S_{xy}$  τάσεις ακτινοβολίας ( $m^3/s^2$ )

s σχετική πυκνότητα  $\rho_s/\rho$  (-)

$T_h$  χρόνος παραμονής των αιωρούμενων ιζημάτων στη λιμενολεκάνη στην οριζόντια διεύθυνση (s)

$T_p$  περίοδος αιχμής κυματισμών (s)

$T_v$  χρόνος παραμονής των αιωρούμενων ιζημάτων στη λιμενολεκάνη στην κατακόρυφη διεύθυνση (s)

$T^*$  χαρακτηριστική περίοδος για την οποία υπολογίζεται ο ρυθμός προσάμμωσης ημισορροπίας (s)

t χρόνος (s)

$U(u, v)$  διάνυσμα ταχύτητας που απεικονίζει τη μέση διεύθυνση κύματος (m/s)

$U_f$  διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με την συνολική τριβή (m/s)

$U'_f$  διατμητική ταχύτητα σχετιζόμενη με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) (m/s)

$U_{f,c}$  διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με το ρεύμα (m/s)

$U_{f,wc}$  διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος (m/s)

$u_{max}$  μέγιστη τιμή της οριζόντιας ταχύτητας στον πυθμένα (m/s)

$u^*$  ταχύτητα τριβής στον πυθμένα (m/s)

$u_b$  εύρος της προκαλούμενης από κύμα ταχύτητας ταλαντώσεων στον πυθμένα (m/s)

$V$  ταχύτητα του κατά μήκος της ακτής ρεύματος (m/s)

$V_{mid}$  ταχύτητα του κατά μήκος της ακτής ρεύματος στο μέσον της ζώνης θρασύως (m/s)

$V_w(x,y,t)$  ταχύτητα του ανέμου (m/s)

$V_b$  ταχύτητα ρεύματος στη ζώνη θραύσης (m/s)

$V_0$  θεωρητική ταχύτητα ρεύματος στη θραύση απουσία πλευρικής ανάμιξης (m/s)

$V_e$  όγκος της λιμενολεκάνης (m<sup>3</sup>)

$v_{y1}$  τιμή της ταχύτητας σε ύψος  $y_1$  πάνω από τον πυθμένα (m/s)

$\nu$  κινηματικό ιξώδες (m<sup>2</sup>/s)

$W_b$  εύρος της ζώνης θραύσης (m)

$W_f$  ταχύτητα καθίζησης κόκκων εδαφικού υλικού (m/s)

$z^*$  αριθμός Rouse (-)

### Ελληνικά σύμβολα

$\alpha$  γωνία μεταξύ μετώπου κυματισμών και ισοβαθών (°)

$\alpha_\phi$  λοξότητα κόκκων εδαφικού υλικού ( $\rho_{hi}$ )

$\alpha_b$  γωνία μεταξύ μετώπου και ισοβαθών στη θραύση (°)

$\alpha_p$  εύρος της κίνησης σωματιδίου στον πυθμένα (m)

$\alpha_p$  πλάτος της κυματικής κίνησης (m)

$\beta$  κλίση του πυθμένα (°)

$\beta_b$  κλίση του πυθμένα στη ζώνη θραύσης (°)

$\beta_\phi$  Κύρτωση κόκκων εδαφικού υλικού ( $\rho_{hi}$ )

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$  συντελεστές της εξίσωσης ήπιας κλίσης (-)

$\gamma_1$  παράμετρος θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη της καμπυλότητας (-)

$\gamma_2$  παράμετρος θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη του οριακού βάθους (-)

$\Delta x, \Delta y$  ισοδιάσταση κανάβου μοντέλου (m)

$\Delta t$  χρονικό βήμα μοντέλου (s)

$\eta(x,y,t)$  ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (m)

$\theta$  διεύθυνση διάδοσης κύματος ( $^{\circ}$ )

$\theta'$  αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) (-)

$\theta_c$  κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης ( $\text{kg/m/s}^2$ )

$\kappa$  σταθερά του Von Karman (-)

$M_\phi$  μέσο μέγεθος των κόκκων ( $\rho_{hi}$ )

$\mu$  παράγοντας πτυχώσεων (Ripple factor) (-)

$\rho$  πυκνότητα του ρευστού ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_s$  πυκνότητα του εδαφικού υλικού ( $\text{kg/m}^3$ )

$\sigma_\phi$  διαβάθμιση κόκκων εδαφικού υλικού ( $\rho_{hi}$ )

$\sigma_g$  διαβάθμιση κόκκων εδαφικού υλικού (m)

$\tau_0$  διατμητική τάση στον πυθμένα ( $\text{kg/m/s}^2$ )

$\tau_\theta$  αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (-)

$\tau_c$  διατμητική τάση στον πυθμένα από ρεύμα ( $\text{kg/m/s}^2$ )

$\tau_w$  διατμητική τάση στον πυθμένα από κύμα  $\tau_w$  ( $\text{kg/m/s}^2$ )

$\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yy}$  συνιστώσες ενεργών διατμητικών τάσεων ( $\text{kg/m/s}^2$ )

$\Phi_t$  αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου (-)

$\Phi_b$  αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου πυθμένα (-)

$\phi$  παράμετρος που συνδέει την κλίμακα  $\rho_{hi}$  με την κλίμακα μέτρησης σε mm (-)

$\phi_a$  γωνία αποθέσεως των ιζημάτων ( $^{\circ}$ )

$\phi(x,y)$  δυναμικό ταχύτητας της μέσης ελεύθερης επιφάνειας (-)

$\Omega(x,y)$  συντελεστής Coriolis εξαρτώμενος από το γεωγραφικό πλάτος (rad/s)

$\omega$  κυκλική συχνότητα (rad/s)

## Περίληψη

---

Θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση του σχεδιασμού μιας μαρίνας σε σχέση με τη στερεομεταφορά στην είσοδό, καθώς και η καταγραφή τρόπων βελτίωσης του φαινομένου αυτού. Το παρόν θέμα είναι πολύ σημαντικό καθώς οι προσαμμώσεις στην είσοδο μιας μαρίνας δυσχεραίνουν την διέλευση των σκαφών.

Αρχικά, περιγράφονται οι διαδικασίες που διέπουν την παράκτια ζώνη και αφορούν τους κυματισμούς, τα παράκτια ρεύματα και κατά βάση τα παράκτια ιζήματα και τις διεργασίες μεταφοράς τους.

Στη συνέχεια, παρατίθενται κάποια βασικά στοιχεία που αφορούν μαρίνες και περιγράφεται η αλληλεπίδραση των παράκτιων έργων και κυρίως των μαρίνων με το παράκτιο περιβάλλον. Γίνεται αναφορά στους συμβατικούς τρόπους αντιμετώπισης των προσαμμώσεων (βυθοκορήσεις) αλλά και στα προβλήματα που αυτοί δημιουργούν, ενώ παρουσιάζονται εναλλακτικές προτάσεις βελτίωσης.

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα δεδομένα της εργασίας, δηλαδή τα δύο κυματικά σενάρια (κύρια αιτία της στερεομεταφοράς θεωρούνται τα κυματογενή ρεύματα) και ο σχεδιασμός της περιοχής μελέτης. Αρχικά, αναλύεται ο σχεδιασμός της βαθυμετρίας της παράκτιας περιοχής και στη συνέχεια παρουσιάζονται πέντε διατάξεις μαρίνων που τοποθετούνται στην περιοχή. Τέλος, γίνεται αναφορά σε τρεις προτάσεις βελτίωσης που θα χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση του φαινομένου των προσαμμώσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν την τοποθέτηση συστοιχίας πασσάλων σε διάφορες διευθύνσεις, τοίχου εκτροπής ρεύματος και προβόλου.

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο Mike DHI 2012. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα κυματικό μοντέλο ήπιας κλίσης (PMS, parabolic mild slope) για τον προσδιορισμό του ύψους κύματος και των τάσεων ακτινοβολίας, ένα υδροδυναμικό μοντέλο διδιάστατης ανάλυσης (HD, hydrodynamic) για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του κυματογενούς ρεύματος και ένα μοντέλο υπολογισμού ρυθμών στερεομεταφοράς (ST, sediment transport) για τον προσδιορισμό της στερεομεταφοράς στην περιοχή.

Στο επόμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης με χρήση πινάκων και γραφική απεικόνιση και στο τελευταίο αναφέρονται τα συμπεράσματα. Γενικά, συμπεραίνεται κατ' αρχάς ότι οι επιφάνειες που προσπίπτει το ρεύμα πρέπει να σχεδιάζονται κατά το δυνατόν καμπύλες. Επίσης, πρέπει η είσοδος της μαρίνας να σχεδιάζεται κατά το δυνατόν προστατευμένη ως προς τους επικρατούντες κυματισμούς. Με βάση τα παραπάνω, αξίζει να εφαρμόζεται σε μικρές μαρίνες σχεδιασμός κυκλικής διάταξης στην είσοδό της οποίας καταγράφονται οι ασθενέστεροι ρυθμοί στερεομεταφοράς. Τέλος, όσον αφορά τις προτάσεις βελτίωσης, αξίζει να διερευνηθεί στην πράξη η τοποθέτηση συστοιχίας πασσάλων, η οποία είχε τα καλύτερα αποτελέσματα, τοποθετημένη μάλιστα σε  $45^\circ$  γωνία με τη διεύθυνση της εισόδου της μαρίνας.

# Extended Abstract

---

## Introduction

The coastal zone is one of the most variable natural systems as destabilizing forces and mechanisms are in a dynamic balance between them. The sediment transport processes are related to the evolution of the coastline. From a physical perspective, these mechanisms are mainly related to waves and currents.

The subject of this study is to investigate whether the geometry of a small harbour (marina), can affect sediment transport rates in the area of the entrance. The study also contains proposals to improve siltation. A pile array, a current deflecting wall and a groyne were used to investigate in what extent these interventions are able to reduce siltation in the entrance of the marina.

## Coastal zone

The main mechanisms of the energy production required for the physical processes in the coastal zone are the wave breaking and the wave actions.. The zone where the waves break is called breaker zone and it is considered to be the most active and unstable area of the coastal environment. The basic features of the waves are the wave height  $H$ , the wave length  $L$  and the wave direction  $\theta$ .

Due to wave action and wave breaking, wave generated currents occur in the breaker zone. Coastal currents are also generated by wind action, tides and density differences between water layers. These coastal currents are divided in three categories: longshore currents (these are the most important ones as far as the breaker zone is concerned), cross-shore currents and rip currents.

## Sediment transport

Coastal sediments are the solid materials of the coastal area. They may be divided into two main groups: "sands", that are made up of solid grains bigger than, say 0.06mm in diameter and held together only by gravity and "clays", that are held together by electrolytic forces.



The sediment transport, in the absence of any tidal forces, takes place mainly in the breaker zone and shallow waters. Sand grains of the sea bed get destabilized by the strong shear stresses produced by near-bottom velocity gradients of the moving water masses. Consequently, sediment transport is strongly related to the wave action, wave breaking and wave generated currents.

Sediment transport is divided in two components: a longshore and a cross-shore. The longshore component is one of the most important processes that affect the morphology of a coast and actually controls whether erosion or deposition will occur. The intensity of the phenomenon is maximized in the breaker zone. The cross-shore component is the result of wave action and it is responsible for the beach profile. Contrary to the longshore sediment transport, the cross-shore component can cause significant short term changes to a shoreline.

It must be mentioned that the sediment transport processes cannot be seen separately. In fact, cross-shore currents are mainly responsible for bringing the bed grains to incipient motion, while longshore currents for sediment transportation along the coast.

### **Marinas in coastal zone**

A marina is a dock or basin with moorings and supplies for yachts and small boats and it differs from a port as it does not handle large passenger ships or cargo from freighters. In Greece, due to fact that the whole mainland is surrounded by sea, there have been many marinas constructed. The number of berths is related to the special needs of every marina and can range from a few dozen boats, such as the marina Lakki, in Leros up to more than a thousand boats, such as the marina of Alimos, in Attiki. Beyond the number of the berths, other aspects of great importance consist the width of the entrance and the depth of the marina.

The presence of structures, such as groynes, breakwaters, sea walls and harbours (or marinas) in the coastal environment are interventions that disturb the balance of the wave field. Consequently, the sediment transport is affected. Generally, deposition of sediment is pointed upstream of a coastal structure, due to the increase of flow velocity that takes place because of the presence of the structure. The aforementioned provokes the reduction of

the sediment transport rates. In contrast, erosion takes place downstream of the structure due to lack of sediment entrainment along the coast and a decrease in the flow velocity.

### Posing the siltation problem

Beyond the fact that the coastal area is affected by the presence of the marina, as far as sediment transport processes are concerned, the area near the marina is an area that concludes intense currents and sediment transport rates. The aforementioned, are combined with small velocities that take place in the entrance and the harbour basin. Consequently, sediment is gathered in these areas provoking a problem that exists as long as harbours exist and is related to their basic function, providing shelter by creating quiescent conditions. Many harbour entrances have been found to be difficult for ships to navigate owing to waves, currents and siltation.

Table 1 Sediment transport rates in harbor basins in Europe, Asia and U.S.A. (PIANC, 2008).

Harbour sites Europe, Asia, USA	Dis- tance to open sea  (km)	$A_{\text{basin}}$  ( $10^6 \text{ m}^2$ )	$A_{\text{entrance}}$ below MSL  ( $\text{m}^2$ )	Tidal range and dura- tion  (m)	Peak tidal current outside entrance $u_o$ (m/s)	Concen- tration outside (yearly- average) $c_o$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Density diffe- rence  $\Delta\rho_{o,\text{max}}$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Sedimen- tation volume per year (dredging volume) ( $10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ )	Sedi- men- tation thick- ness  (m/yr)
Um Qasr, Khor al Zubair, (Shatt al Arab), Irak (DH, 1981)	7	1.2	$A=4100$ ( $b=300$ , $h_o=13.5$ m)	2.2-3.7 (12 h)	1-2	0.2-0.4 (soft clayey silt) $w_s=0.1-0.3$ mm/s	1.5	1.3	1.1
Bintulu Port <sup>1)</sup> Sarawak, Indonesia (DH, 1991)	0-1	0.82	$A=1875$ ( $b=125$ , $h_o=15$ m)	1 (24 h)	0.1	0.05 (mud)	1-2	0.077 (1982-1988)	0.1
New Mangalore Port Kerala coast, ZW India (DH, 1994)	0-1	1.1	$A=3400-3700$ ( $h_o=11.5-13.5$ m)	1 (12 h)	0.1-0.3	0.05 0.4 (mon- soon period)	0-0.3 (river outflow at 10 km)	0.9 (1982-1997)	0.8
Mayport Naval Basin, Florida, USA (Headland, 1991)	3	0.5	$A=2300$ ( $b=185$ , $h_o=12.5$ )	1.5 (12 h)	0.7	0.01-0.04 (mud; 0.02 mm)	1-3	0.38	0.75
Parkhafen Hamburg, Germany (DH, 1992, 2001)	100	1.5	$A=8650$ ( $b=515$ , $h_o=16.8$ )	3.2 (12 h)	1	0.05-0.1	0	0.13-0.52 (1977-1995)	0.1-0.35

So far, this problem is tackled with dredging. The sediment that causes the problem of siltation is excavated, removed and relocated (maintenance dredging). Many millions of cubic meters of such sediment are dredged annually from harbour approaches, fairways and

basins in order to safeguard navigation. Volumes are expected to increase due to continued economic growth and increases in vessel draught. Dredging is necessary at both large commercial and small craft harbours and its cost can threaten the financial viability of both. This solution though has both great economical and environmental disadvantages. Firstly, the costs are of high significance if someone takes into consideration a mean cost of 1 €/m<sup>3</sup> along with the quantities of sediment that are dredged every year (Table 1), not to mention that this action is not permanent and must be repeated in the future. Secondly, the potential environmental effects of maintenance dredging are also very important. During the dredging process, effects may arise due to the excavation of sediments at the bed, loss of material during transport to the surface, overflow from the dredger whilst loading and loss of material from the dredger and/or pipelines during transport. The removal of contaminated sediments and their relocation to safe, contained areas, and the possible improvement of water quality made by the restoration of water depth and flow are also aspects that could provoke serious problems to the environment.

### **Alternative solutions**

The amount of siltation appears to be strongly related to the physical and environmental conditions and the geometry of the harbour entrance. Modifications of the entrance geometry may have a substantial influence on the siltation rates. It is worth mentioning that these solutions are permanent. They are divided in three categories according to their purpose:

1. KSO: Keep sediment out - minimise sediment flux to the harbour area
2. KSM: Keep sediment moving - minimise sediment settling in the harbour area
3. KSN: Keep sediment navigable - take advantage of transitional properties of fluid mud or prevent it consolidating so that ships can navigate through the suspension

The solutions that can be constructed in order to modify the marina entrance are:

- Pile array: The presence of a permeable pile array extending over a small distance into the area upstream the entrance prevents the generation of large eddies typical of mixing layers in the entrance of the basin.

- CDW (current deflecting wall): The main purpose of the CDW is to prevent flow separation at the upstream corner of the entrance and reduce the exchange volume related to horizontal circulation and hence the input of sediment into the basin.
- Spur: A spur at the upstream corner could be constructed to reduce the water exchange. The spur heads are designed rounded.
- Sill: The construction of a sill at the entrance can be used to reduce siltation due to density currents in relatively small-scale enclosed harbour basins located in high tidal range areas.
- Silt curtain: Various types of silt curtains have been used in the entrance of harbour basins: air bubble barrier; flexible barrier blocking the entrance in the lower part of the water column.
- Lock: The most drastic solution at the entrance of a basin is the construction of a lock, which may offer a good solution for relatively large basins in conditions with high tidal ranges, salinity-induced density currents and large mud concentrations.
- Closure of side entrance: It is often believed that the siltation in a basin with two entrances (one at each end of the basin) is less than that in a blind-ending basin (one entrance), because in the former case the flow goes through the basin keeping the sediments partly in suspension.
- Resuspending methods: Various techniques aimed at resuspending the bed sediments have been developed. These methods are also known as agitation dredging methods. The most common methods are: mechanical devices such as rakes, harrows, scrapers and hydrofoils; water scour jet devices.

## Study area

The coastal area was designed using the software AutoCad 2012. The slope of the seabed is approximately 5%, with the maximum depth reaching at 10 m. The combination of the waves and wave currents is considered to be the only cause of sediment transport in this study. There are two wave scenarios that are illustrated in Table 2. As far as the sediments of the sea bed are concerned, a sandy shore is considered, with median size of particle  $D_{50}=1\text{mm}$  and gradation  $\sigma_g=1.25$ .

Table 2 Wave Scenarios

Wave Scenarios	$H_{rms}$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta$ (°)
First	2	6	45
Second	2.5	6.5	10

Five figures of marinas are considered. It is worth mentioning that they were designed with specific geometry differences, as can be seen clearly in figure 1, in order to examine the relationship between the marina geometry and the sediment transport.

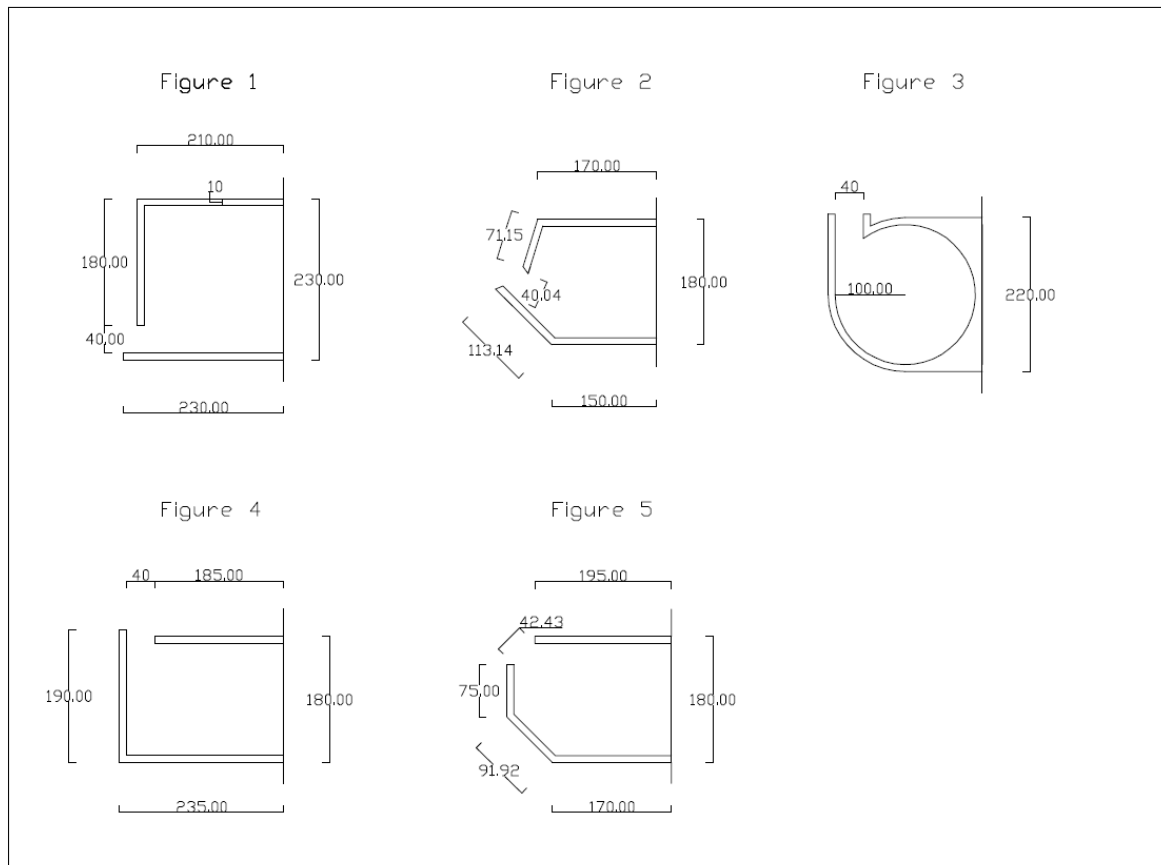


Figure 1 Figures of marinas

As discussed above, the first target of the study is to examine the impact of the marina geometry to the sediment transport. The second target though, is to design some of the alternatives solutions that mentioned above in order to reduce siltation rates.

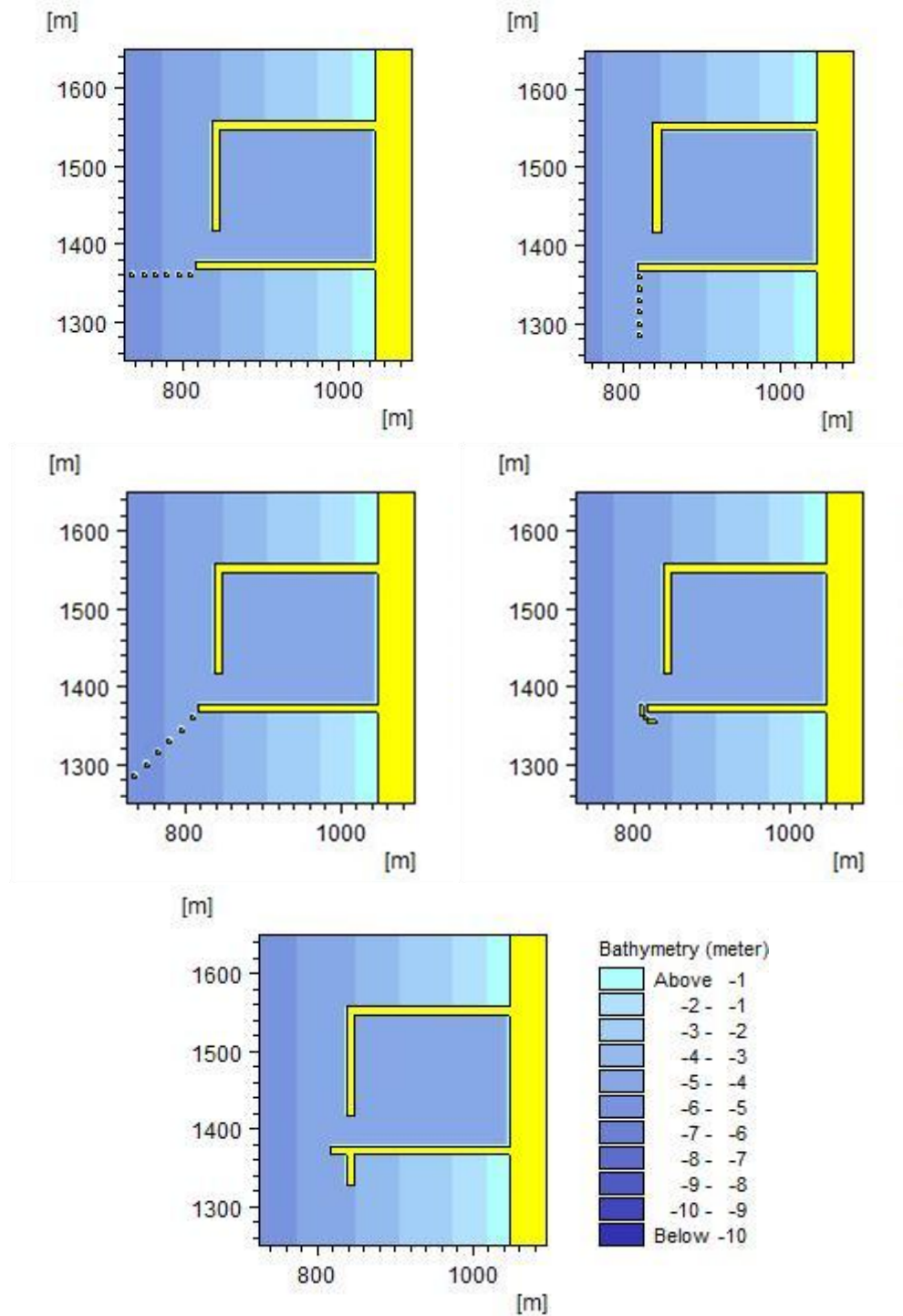


Figure 2 Pile array (a) parallel, (b) vertical to the entrance, (c) forming 45 ° angle with the entrance, current deflecting wall and groyne that designed in order to reduce siltation

These structures are the pile array in three different directions and a current deflecting wall. Furthermore, a groyne designed upstream the marina as the most common solution to reduce siltation. These interventions are illustrated in Figure 2.

## Mike DHI 2012

In the present study, the computational model Mike 21 was used to calculate the wave height, the velocity of the wave generated current and the sediment transport rates using PMS, HD and ST module, respectively.

**Mike 21 PMS** (parabolic mild-slope): This is a module based on mild slope equation and can be applied to any water depth on a gently sloping bathymetry. It is capable of reproducing phenomena, such as shoaling, refraction, dissipation due to bed friction and wave breaking, forward scattering and partial diffraction. Mike 21 PMS is used to determine wave fields in open coastal areas, in coastal areas with structures where reflection and diffraction along the x-direction are negligible, in navigation channels, etc. Furthermore, Mike 21 PMS can produce the wave radiation stresses required for the simulation of wave-induced currents, which is very important in the computation of coastal sediment transport. It is pointed that with PMS, the wave field cannot be defined in the harbour basin where diffraction is dominant. Consequently, using this module, wave height and radiation stresses are defined for the whole coastal area except the marina basin.

**Mike 21 HD** (hydrodynamic): This module is a 2-D flow model that simulates the water level variation and flow in response to a variety of forcing functions in lakes, estuaries, bays and coastal areas. The water levels and flows are resolved on either a rectilinear grid, a curvilinear grid, a triangular element mesh or any combination here of covering the area of interest. Mike 21 HD includes formulations for the effects of convective and cross momentum, bottom shear stress, wind shear stress at the surface, barometric pressure gradients, Coriolis forces, momentum dispersion and wave-induced currents. This module requires a radiation stress file from PMS as input in order to calculate the velocity of the wave generated current.

**Mike 21 ST** (sediment transport): The ST module is the sediment transport module for the assessment of the sediment transport rates and initial rates of bed level change for non-cohesive sediment resulting from currents or combined wave-current flows. It concludes five current theories and two methods of combined presence of waves and currents. It must be mentioned though, that this module is not an integrated morphological model but it can define the areas that erosion or deposition will take place. This module requires a wave

height file from PMS and a current velocity file from HD as input in order to calculate the sediment transport rates.

## Results

First and foremost, it is clear that the construction of the marinas in the coastal area is a large-scale intervention that affects coastal currents and sediment transport. Both wave current velocity and sediment transport rate have a significant increase in their figures for both scenarios. It must be mentioned though, that this growth is more intense in the first scenario because of the mean wave direction ( $\theta=45^\circ$  provokes the most intense longshore currents).

As far as the results of the five figures are concerned, it is clear that, for the first scenario, the area near the entrance of the figure 1 suffers the most from siltation, followed by figure 2 and figure 5. The intensity of the wave generated currents and sediment transport is minimised for figure 3 and 4. It should be noted that these figures are situated vertically to the coastline so that their entrance is protected from the dominant waves. In the second scenario, the siltation is generally less significant due to the mean wave direction. Figure 1 suffers the most from siltation and it is followed by figure 2 and 4. Finally, siltation is minimised for figures 3 and 5.

As far as the results of the alternative solutions are concerned, it is clear that, all interventions achieved their goal. The intense of the wave generated currents and sediment transport decreased in all cases, with the pile array being clearly the most successful measure. Especially, the pile array which poses  $45^\circ$  with the entrance proved to reduce siltation the most for both figures. Groyne and the current deflecting wall also declined the siltation near the entrance, but in a smaller extent.

The results of the sediment transport rates for figure 1, for the first scenario, are illustrated in Figure 3 with and without the presence of a pile array which poses  $45^\circ$  with the entrance. It can be seen clearly that the siltation in the marina entrance decreased significantly.



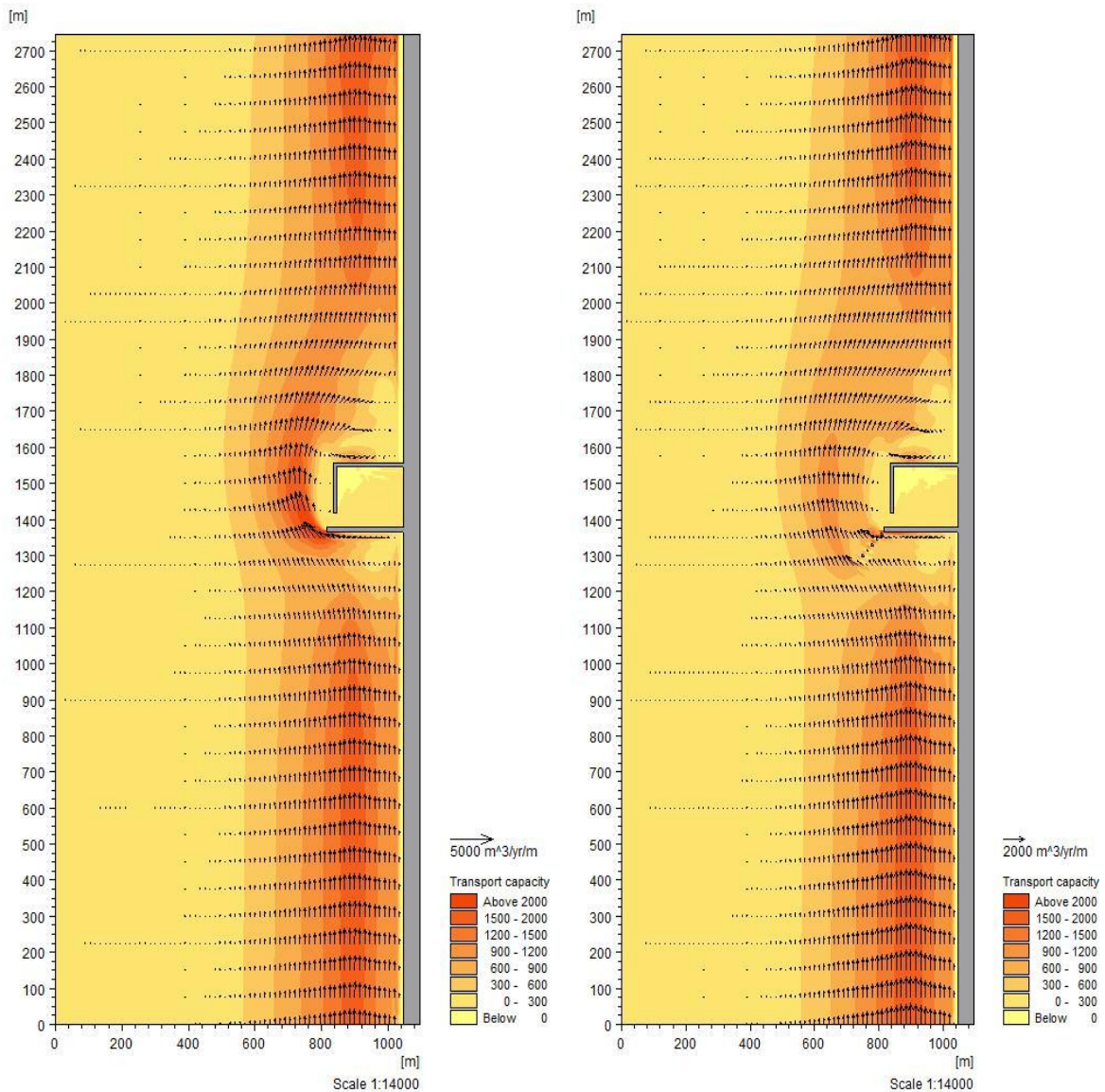


Figure 3 Sediment transport rates for figure 1, (a) first wave scenario and (a) for a pile array which poses 45° angle with the entrance

## Conclusions

Three specific conclusions can be extracted from the results of the design of the five marinas:

1. The structures should be designed curvy. When the current encounters straight structures, perpendicular to the current direction (figure 1 and 4), intense current velocities and thus sediment transport rates are developed near the entrance of the marina. In cases that the structures designed straight but angled (figure 2 and 5)

related to the direction of the wave generated current, the intensity of the wave current is lower, while the figure, 3 which is actually a circle, suffers the minimum from the aforementioned phenomena.

2. From the above, it should be noted that as far as the sediment transport is concerned, small marinas are proposed to be designed as the figure 3. Such a marina seems unconventional and dysfunctional for the mooring, but for small boats this design could be very useful.
3. The study also indicates that the entrance of the marina should be designed in order to be protected from the dominant waves. Indeed, in cases that the cross shore component of sediment is of high significance strong eddies can be generated. These eddies increase the intensity of the currents and thus the siltation in the entrance of the marina.

As far as the solutions are concerned, (pile array, current deflecting wall and groyne) the following are concluded:

1. The pile array should be tested in real conditions because it seems to have the best results. Constructing them posing angle of  $45^\circ$  with the direction of the entrance of the marina reduces the velocity of the wave current and sediment transport rate to the greatest extent.
2. The current deflecting wall and the groyne do not seem to reduce significantly the current speed and the sediment transport but they divert the current and hence the amount of the sediment in an area away from the marina so that the entrance is less influenced.

## Εισαγωγή

---

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα από τα πιο ευμετάβλητα φυσικά συστήματα καθώς αποσταθεροποιητικές δυνάμεις και μηχανισμοί βρίσκονται σε δυναμική ισορροπία μεταξύ τους. Οι διαδικασίες στερεομεταφοράς παρουσιάζουν τεράστιο ενδιαφέρον καθώς σχετίζονται με την εξέλιξη της ακτογραμμής. Από φυσικής πλευράς, οι μηχανισμοί αυτοί συνδέονται κυρίως με την κυματική δράση και τα παράκτια ρεύματα.

Μια ανθρώπινη παρέμβαση, όπως η κατασκευή ενός παράκτιου έργου μεταβάλλει την ισορροπία ως προς τα ιζήματα διαμορφώνοντας μια νέα διά μέσου μιας σχέσης αλληλεπίδρασης παράκτιου περιβάλλοντος-τεχνικού έργου. Εκτός της αναμενόμενης απόθεσης/διάβρωσης που λαμβάνει χώρα στην παράκτια περιοχή, το τεχνικό έργο επηρεάζεται από τις διαδικασίες αερομεταφοράς. Ειδικότερα, στην περίπτωση λιμένα ή μαρίνας και σε συνθήκες έντονης στερεομεταφοράς στην περιοχή εισόδου, καταγράφονται προσαμμώσεις οι οποίες δημιουργούν προβλήματα στην είσοδο των σκαφών στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί κατά πόσο η γεωμετρία της μαρίνας μπορεί να επηρεάσει τη στερεομεταφορά στην είσοδό της. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται πέντε διατάξεις μαρίνων και δύο κυματικά σενάρια. Επίσης, σε δεύτερο επίπεδο, εξετάζονται προτάσεις βελτίωσης των προσαμμώσεων για τις προαναφερθείσες διατάξεις με κατασκευή συστοιχίας πασσάλων, τοιχώματος εκτροπής ρεύματος και προβόλου για να διερευνηθεί κατά πόσο οι παρεμβάσεις αυτές δύνανται να μειώσουν τις προσαμμώσεις στην είσοδο της μαρίνας.

Όσον αφορά τη διάρθρωση της εργασίας, αυτή διαμορφώνεται ως εξής: στο πρώτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι διαδικασίες που συντελούνται στην παράκτια ζώνη σε σχέση με τη στερεομεταφορά. Στο αμέσως επόμενο, αναφέρονται κάποια βασικά στοιχεία για μαρίνες, η αλληλεπίδρασή τους με το παράκτιο περιβάλλον καθώς και στοιχεία που αφορούν το πρόβλημα των προσαμμώσεων (siltation). Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης και αναλύονται οι διατάξεις και οι προτάσεις βελτίωσης ενώ στο τέταρτο, παρουσιάζεται το υπολογιστικό πακέτο Mike DHI 2012, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση. Στο επόμενο κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός

αποτελεσμάτων ενώ στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της μελέτης. Τέλος, στο Παράρτημα Α, παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα που αφορούν την ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος και τη στερεομεταφορά από την ανάλυση με το πρόγραμμα Mike DHI 2012.

# 1. Παράκτια ζώνη

---

## 1.1 Εισαγωγή

Οι παράκτιες ζώνες είναι σε παγκόσμια κλίμακα οι πιο σημαντικές και οι πιο εντατικά αξιοποιήσιμες εκτάσεις από τον άνθρωπο. Στις μέρες μας, υπολογίζεται ότι σε ολόκληρο τον κόσμο, ο αριθμός των κατοίκων των παράκτιων περιοχών είναι ισοδύναμος με τον πληθυσμό της Γης κατά τη δεκαετία του 1950.

Ένας αναλυτικός ορισμός για την παράκτια ζώνη είναι ο εξής: παράκτια ζώνη είναι η ζώνη που περιλαμβάνει θαλάσσια και χερσαία τμήματα, τα οποία βρίσκονται σε αλληλεπίδραση μεταξύ τους, και η οποία επεκτείνεται, είτε προς τη θάλασσα, είτε προς την ξηρά, μέχρι το σημείο στο οποίο μηδενίζονται ή ελαχιστοποιούνται οι επιπτώσεις από τις φυσικές διεργασίες ή τις ανθρώπινες δραστηριότητες ή τον συνδυασμό τους. Ο χερσαίο τμήμα της παράκτιας ζώνης μπορεί να περιλαμβάνει ακόμη και ολόκληρη λεκάνη απορροής των επιφανειακών υδάτων, ενώ το θαλάσσιο τμήμα τουλάχιστον μέχρι την ισοβαθή στην οποία διαπιστώνεται η ύπαρξη μεγάλης βιοποικιλότητας, ή μέχρι την ισοβαθή που περιλαμβάνει την θαλάσσια εκείνη περιοχή που επηρεάζεται από τις χερσαίες ή θαλάσσιες δραστηριότητες και μπορεί να περιλαμβάνει όλη την υφαλοκρηπίδα, να επεκτείνεται, δηλαδή, μέχρι το βάθος των 200 m.

Η παράκτια ζώνη και η ακτή (παραθαλάσσια ζώνη της ξηράς) αποτελούν έκφραση της δυναμικής ισορροπίας μεταξύ προσφοράς ιζημάτων από τη λιθόσφαιρα και απομάκρυνσης ή συσσώρευσης τους από την υδρόσφαιρα, υπό τη δράση των κυματισμών και των ρευμάτων, τα οποία εξαρτώνται από την ατμόσφαιρα (Παναγιωτίδης & Χατζημπίρος, 2004). Οι παράκτιες διεργασίες που παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της μορφολογίας της ακτής, όπως η μεταφορά των ιζημάτων και η μεταβολή της ακτογραμμής, οφείλονται είτε σε φυσικά (κυματισμοί, ρεύματα, άνεμος) είτε σε ανθρωπογενή (παράκτια ή λιμενικά έργα) αίτια.

Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά από τα οποία αποτελείται η παράκτια ζώνη, αυτά συνοψίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- τα αβιοτικά, όπως οι κλιματολογικές και οι γεωμορφολογικές συνθήκες

- τα βιοτικά, που σχετίζονται με τη χλωρίδα και την πανίδα
- τα ανθρωπογενή, όπως οι κοινωνικοοικονομικές δραστηριότητες, οι χρήσεις γης και οι τεχνικές υποδομές

Οι ζώνες που έχουν οριστεί κατά πλάτος μιας παραλίας (Μέμος, 2009) είναι οι εξής:

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



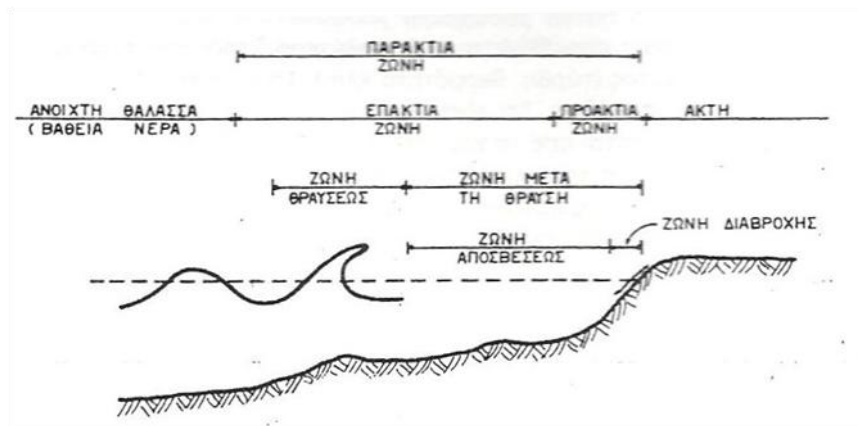
Σχήμα 1.1 Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής (Μέμος, 2009)

Η παράκτια ζώνη υποδιαιρείται στην επάκτια (inshore) και την προάκτια (foreshore) ζώνη ή μέτωπο ακτής, των οποίων το όριο είναι η γραμμή κατώτατης ρηχίας (mean low water line).

Επιπλέον περιλαμβάνει τις ακόλουθες ζώνες:

- ζώνη πριν από τη θραύση (before breaker zone), όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυματισμών που τελικά οδηγούν στη θραύση
- τη ζώνη θραύσης (breaker zone) η οποία αποτελεί το πιο δυναμικό τμήμα της παράκτιας ζώνης που είναι και ο γενεσιουργός μηχανισμός των περισσότερων διαδικασιών της ακτομηχανικής
- τη ζώνη μετά τη θραύση (after breaker zone). Η τελευταία υποδιαιρείται στη ζώνη απόσβεσης (surf zone), όπου αποσβήνεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του θραυόμενου κύματος και αναπτύσσονται τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής με το εύρος της να εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων και την κλίση του

πυθμένα, και στη ζώνη διαβροχής (swash zone) με όρια την κατώτερη και την ανώτερη θέση της ακτογραμμής.



Σχήμα 1.2 Υποδιαιρέσεις παράκτιας ζώνης (Μουτζούρης, 2005)

## 1.2 Παράκτιοι κυματισμοί

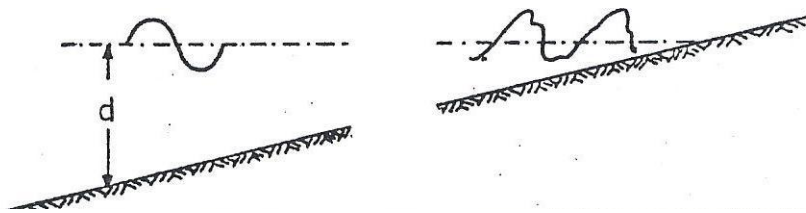
Στο θαλάσσιο περιβάλλον εξελίσσεται ταυτόχρονα ένα πλήθος κυματικών φαινομένων, αρκετά από τα οποία βρίσκονται σε ουσιώδη σύζευξη μεταξύ τους. Χρησιμοποιώντας φαινομενολογικά κριτήρια, μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες κύριες κατηγορίες κυματικών φαινομένων στη θάλασσα (Phillips 1977, LeBlond and Mysak 1978):

- Επιφανειακά κύματα (surface waves) με τα ανεμογενή κύματα, δηλαδή κύματα ανέμου (wind waves), και τις αποθαλασιές, (swell) να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα του φάσματος
- Εσωτερικά κύματα (internal waves)
- Γυροσκοπικά κύματα (inertial or gyroscopic waves)
- Πλανητικά κύματα (planetary or Rossby waves)
- Παλίρροιες (tides)

Τα κυματικά φαινόμενα και κατ' επέκταση οι μηχανισμοί στους οποίους υπόκεινται είναι η αιτία για το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που είναι απαραίτητη για τις δράσεις στην παράκτια ζώνη. Οι σημαντικότεροι μηχανισμοί είναι η κυματογενής κυκλοφορία και η θραύση των κυμάτων. Όσον αφορά τα βασικά χαρακτηριστικά των κυματισμών, αυτά είναι το ύψος κύματος  $H$ , το μήκος κύματος  $L$  και η διεύθυνση διάδοσης  $\theta$ . Στο σημείο αυτό,

επισημαίνεται η διάκριση μεταξύ βαθιών και ρηχών νερών. Το όριο των ζωνών αυτών καθορίζεται με τη συνθήκη  $d=0.5L$ , όπου  $d$  το βάθος του νερού. Όταν  $d>0.5L$ , τα μεγέθη αυτά παραμένουν σταθερά, καθώς εκεί οι τροχιές των υγρών σωματιδίων είναι κυκλικές. Στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά ( $d<0.5L$ ) οι τροχιές τείνουν να γίνουν ελλειπτικές. Οι κυματισμοί εκεί υπόκεινται σε φυσικές διεργασίες, όπως διάθλαση, ρήγωση και θραύση λόγω ρηχότητας.

Η κυματογενής κυκλοφορία διαφέρει σημαντικά στις ζώνες πριν και μετά από τη θραύση. Στην πρώτη, η ύπαρξη των κυκλικών τροχιών που περιγράφηκαν παραπάνω δημιουργεί κυκλοφορία κατά την κατεύθυνση μετάδοσης του κύματος. Στη ζώνη μετά τη θραύση οι πεπλατυσμένες τροχιές εμφανίζουν μεγαλύτερη ασυμμετρία με αποτέλεσμα να δημιουργείται εντονότερη κυκλοφορία κατά την τοπική διεύθυνση προσπτώσεως των κυματισμών, που σε μεγάλο βαθμό τείνει να είναι κάθετη στην ακτογραμμή (Σχήμα 1.3). Η ένταση της κυκλοφορίας είναι σημαντικά μεγαλύτερη στη ζώνη μετά τη θραύση λόγω προσθήκης στο παράκτιο σύστημα πρόσθετης υψηλής ενέργειας που εκλύεται στη ζώνη θραύσεως. Η εντατικοποίηση της κυκλοφορίας οφείλεται στην αύξηση της τάσεως ακτινοβολίας. Οι τάσεις ακτινοβολίας (radiation stresses) εκφράζουν τη μεταφορά ορμής λόγω παρουσίας των κυμάτων και θεωρείται γενεσιουργός δύναμη των παράκτιων ρευμάτων (Longuet-Higgins and Stewart, 1964).



Σχήμα 1.3 Τροχιές υγρών σωματιδίων σε βαθιά και ρηχά νερά (Μουτζούρης, 2005)

### 1.3 Παράκτια ρεύματα

Στο παράκτιο περιβάλλον και ειδικότερα στη ζώνη θραύσεως συνυπάρχουν ρεύματα που ανάλογα με τα αίτια γεννήσεώς τους, διαχωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κυματογενή ρεύματα, που προέρχονται από τη θραύση των κυματισμών



- Ανεμογενή ρεύματα, που δημιουργούνται από τη δράση του ανέμου και των ανεμογενών κυμάτων
- Παλιρροιακά ρεύματα, λόγω αστρονομικών και πλανητικών παλιρροιών
- Ρεύματα πυκνότητας, λόγω στρωμάτωσης αλατότητας ή θερμοκρασίας

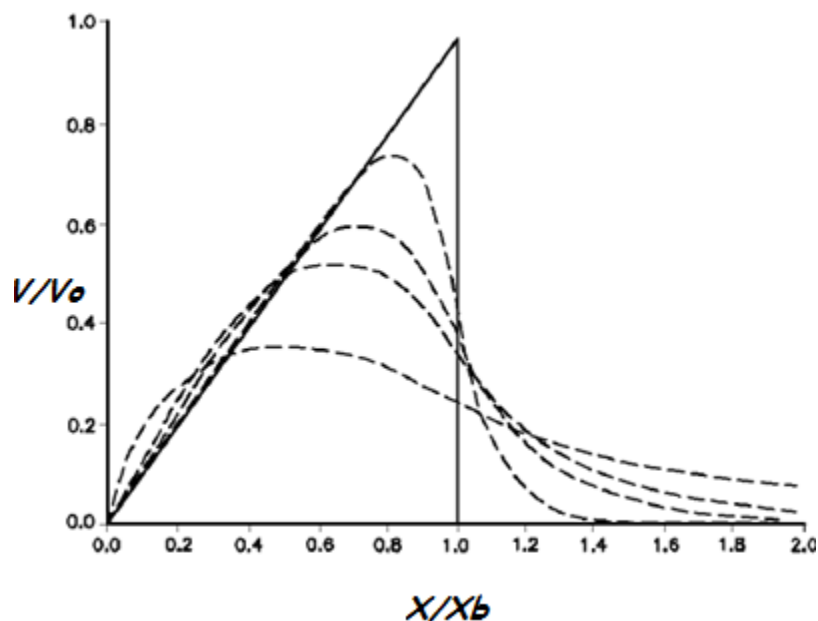
Σημειώνεται ότι τα πρώτα κυριαρχούν στη ζώνη θραύσης ανεπτυγμένων ακτών. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά, όπου οι κυματισμοί υφίστανται διάθλαση, περίθλαση και θραύση λόγω ρηχότητας είναι δυνατό να προκληθούν κυματογενή παράκτια ρεύματα. Στις περιοχές αυτές, οι τροχιές των υγρών σωματιδίων δεν είναι κλειστές και δημιουργείται ένα οριζόντιο κυματογενές ρεύμα κατά τη διεύθυνση μετάδοσης των κυματισμών, η ένταση του οποίου αυξάνει καθώς μειώνεται το σχετικό βάθος και μεγιστοποιείται στη ζώνη θραύσης. Το σύστημα παράκτιας κυκλοφορίας περιλαμβάνει κυρίως ρεύματα κατά μήκος της ακτής, εγκάρσια και βελοειδή ρεύματα.

Η δημιουργία του ρεύματος κατά μήκος της ακτής οφείλεται στις υδραυλικές βαθμίδες που προκαλούνται από την ανομοιόμορφη κατανομή του ύψους κύματος στη ζώνη θραύσης. Επίσης, η δημιουργία αυτού του ρεύματος οφείλεται στην κλίση της γραμμής θραύσης ως προς την ακτογραμμή καθώς ένα μέρος της κυματικής ενέργειας ανακλάται και κινείται παράλληλα προς την ακτή. Επιμήκη ρεύματα αναπτύσσονται περισσότερο κατά μήκος ευθύγραμμων παραλιών. Η φορά αυτών των ρευμάτων καθορίζεται από τη μορφή της ακτογραμμής και τη διεύθυνση των προσπιπτόντων κυματισμών. Τα εν λόγω ρεύματα είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα καθ' ύψος με τυπικές τιμές ταχύτητας περί τα 0.3 m/s. Ευνοϊκή πνοή του ανέμου μπορεί να αυξήσει την προαναφερθείσα τιμή στο 1 m/s. Η ταχύτητα ενός τέτοιου ρεύματος αυξάνεται με την αύξηση του ύψους θραύσης  $d_b$  των κυματισμών, τη μείωση της περιόδου  $T$ , την αύξηση της γωνίας μεταξύ της γραμμής θραύσης και της ακτής, και τέλος, με την αύξηση της κλίσης των πρανών της ακτής. Κάνοντας τις παραδοχές της ομοιόμορφης κλίσης πυθμένα  $\beta$ , της μικρής γωνίας  $\alpha$  μεταξύ μετώπου και ισοβαθών, της ομοιόμορφης θραύσης των κυματισμών σε όλο το πλάτος της ζώνης θραύσης και της γραμμικής θεωρίας κυματισμών, η ταχύτητα του κατά μήκος της ακτής ρεύματος δίνεται από τον ακόλουθο τύπο (Longuet-Higgins, 1970):

$$V = \frac{5\pi \tan\beta^*}{16 C_f} \kappa (gd_b)^{0.5} \sin\alpha \cos\alpha \quad (1.1)$$

όπου  $\tan\beta^* = \tan\beta / (1 + 3\kappa^2/8)$  η κλίση του πυθμένα τροποποιημένη ώστε να περιλαμβάνει το wave setup,  $C_f$  ο συντελεστής τριβής του πυθμένα,  $\kappa = 0.8$  σταθερά,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $d_b$  το βάθος θραύσης.

Η εγκάρσια κατανομή του κατά μήκος της ακτής ρεύματος έχει τριγωνική μορφή με μέγιστο στη γραμμή θραύσης και μηδενική τιμή στην ακτογραμμή όταν θεωρείται αμελητέα η εγκάρσια ανάμειξη. Η παρουσία οριζόντιας ανάμειξης, καθώς και οποιασδήποτε μεταβολής του ύψους κύματος και της θέσης της γραμμής θραύσης, τροποποιεί το προφίλ της ταχύτητας του ρεύματος, μετατοπίζοντας το μέγιστο προς την ακτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4. Η παράμετρος  $V_0$  είναι η μέγιστη ταχύτητα του ρεύματος στην περίπτωση όπου η εγκάρσια ανάμειξη θεωρηθεί αμελητέα και χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση του ρεύματος, ενώ  $x$  είναι η απόσταση από την ακτή και  $x_b$  η απόσταση από την ακτή της ζώνης θραύσης.



Σχήμα 1.4 Εγκάρσιο προφίλ του κατά μήκος της ακτής ρεύματος (CEM, 2006)

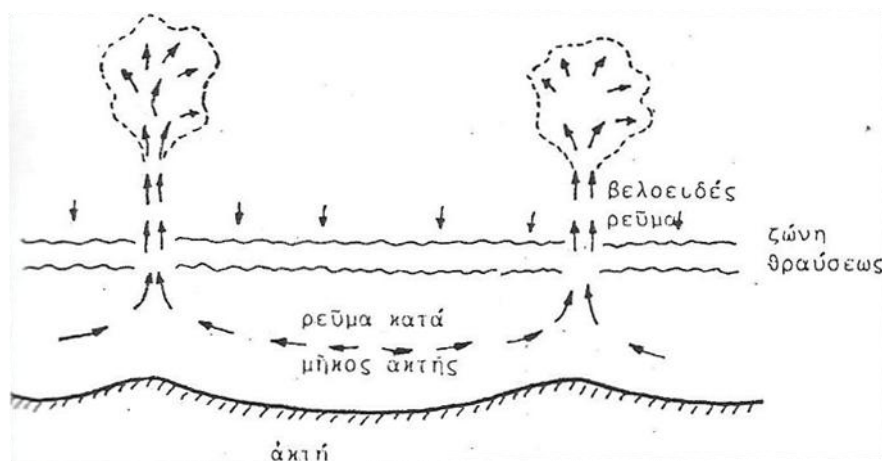
Μια αντιπροσωπευτική ταχύτητα ρεύματος στο μέσον της ζώνης θραύσεως είναι η εξής (Komar, 1979):

$$V_{mid} = 1.17 (gH_{rms,b})^{0.5} \sin\alpha_b \cos\alpha_b \quad (1.2)$$

όπου  $H_{rms,b}$  το μέσο τετραγωνικό ύψος κύματος στη θραύση και  $\alpha_b$  η γωνία μεταξύ μετώπου και ισοβαθών στη θραύση.

Το εγκάρσιο ρεύμα δεν είναι σταθερό ως προς το βάθος. Η μεταφορά μάζας προς την ακτή λαμβάνει χώρα κυρίως μεταξύ κορυφής και κοιλάς του κύματος. Ένα άλλο σημαντικό γεγονός που αφορά το κύμα αυτό, είναι ότι υπάρχει αντίστροφη ροή κοντά στον πυθμένα. Το προφίλ της ταχύτητας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση προσδιορίζεται από το ισοζύγιο της τάσης ακτινοβολίας με την κλίση της πίεσης λόγω της ανύψωσης της μέσης στάθμης αλλά και από την ανάμειξη κατά την κατακόρυφο.

Τα βελοειδή ρεύματα είναι έντονα ρεύματα που δημιουργούνται ως αποτέλεσμα συμβολής δύο ρευμάτων κατά μήκος της ακτής αντίθετης φοράς ή από μεταβολές του setup κατά μήκος της ακτής λόγω αντίστοιχης μεταβολής του ύψους θραύσεως των κυμάτων. Το ρεύμα αυτό, διασχίζει τη ζώνη θραύσεως σε περιοχές μικρών υψών κύματος και συνεχίζει την κίνησή του στη ζώνη πριν τη θραύση, όπου και εκφυλίζεται. Είναι στενό, ισχυρό ρεύμα επιστροφής μάζας από τη ζώνη μετά τη θραύση στη ζώνη πριν από τη θραύση. Η ταχύτητα μάλιστα βελοειδούς ρεύματος έχει μετρηθεί μέχρι τα 2 m/s, σε περίπτωση που εμφανίστηκε στην Ιαπωνία. Τα παράκτια ρεύματα σχηματοποιούνται στο επόμενο Σχήμα 1.5.



Σχήμα 1.5 Παράκτια ρεύματα κατά μήκος της ακτής (Μουτζούρης, 2005)

## 1.4 Παράκτια ιζήματα

Οι ακτές και ο θαλάσσιος πυθμένας από γεωλογική άποψη μπορεί να είναι βραχώδεις ή αμμώδεις/γαιώδεις. Οι βραχώδεις ακτές έχουν σταθερή μορφή και εξελίσσονται σε χρονικές κλίμακες γεωλογικών αιώνων. Οι ακτές της δεύτερης κατηγορίας συντίθενται από κοκκώδη υλικά (άργιλο, άμμο, κροκάλες) και υφίστανται έντονη επίδραση από τους κυματισμούς και τα ρεύματα με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται μορφολογικά σε όλες τις χρονικές κλίμακες (ακόμα και κατά τη διάρκεια θυελλών και τρικυμιών). Η γεωλογική σύσταση των ιζημάτων της παράκτιας ζώνης μπορεί να είναι χαλαζιακή, ασβεστολιθική, αργιλική ή οργανική. Η περιεκτικότητα εξαρτάται κυρίως από την πηγή τροφοδοσίας.

Τα ιζήματα των ακτών είναι τα προϊόντα αποσάθρωσης των πετρωμάτων της ξηράς και μεταφέρονται σε αυτές κυρίως με τα υδατορεύματα, αλλά και με τον άνεμο και τους παγετώνες. Επίσης στο θαλάσσιο πυθμένα αποτίθενται ως ιζήματα κελύφη θαλάσσιων οργανισμών, διαλυμένες ουσίες στο νερό της θάλασσας και σωματίδια μετεωριτών. Με βάση την προέλευσή τους τα ιζήματα υποδιαιρούνται σε: (α) μηχανικά ή κλαστικά, (β) βιογενή ή οργανικά, (γ) χημικά ή υδρογενή, (δ) ηφαιστιογενή και (στ) κοσμογενή.

Επίσης, διαχωρίζονται με βάση το μηχανισμό μεταφοράς τους στον πυθμένα, ανάλογα δηλαδή αν προέρχονται από μεταφορά μετά από διάβρωση της ακτής, και ονομάζονται γαιογενή, ή αν προέρχονται από καθίζηση στον πυθμένα μετά από θαλάσσια ιζηματογένεση, οπότε καλούνται πελαγογενή. Τα πρώτα είναι πιο χονδρόκοκκα και έχουν την τάση να συσσωρεύονται σε φυσικά κοιλάματα στην παράκτια ζώνη ενώ τα πελαγογενή, που είναι ποσοτικά σαφώς λιγότερα, βρίσκονται σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένα στον πυθμένα, ακόμη και σε φυσικές εξάρσεις.

Οι κινήσεις του θαλάσσιου νερού μεταβάλλουν τη σύσταση και τη μορφή των ιζημάτων. Ανάλογα με το χρόνο επιδράσεως, το ίζημα διακρίνεται στις ακόλουθες κατηγορίες: (α) ανώριμο, το οποίο περιέχει αργιλικούς κόκκους σε ποσοστό μεγαλύτερο από 5% οι οποίοι έχουν γωνιακά σημεία, (β) υποώριμο, με χαμηλή έως και μηδενική περιεκτικότητα σε άργιλο και μέτρια διαβάθμιση, (γ) ώριμο, με καλή διαβάθμιση και κόκκους με λίγα γωνιακά σημεία και (δ) υπερώριμο, με καλή διαβάθμιση και στρογγυλεμένους κόκκους.

Η σημαντικότερη ταξινόμηση των γαιωδών ιζημάτων, τα οποία παρουσιάζουν τεράστιο ενδιαφέρον στην ακτομηχανική λόγω των έντονων μεταβολών στις οποίες υπόκεινται και μάλιστα σε μικρές χρονικά κλίμακες, είναι σε μη συνεκτικά (άμμοι) ή συνεκτικά (άργιλοι) ιζήματα. Τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικές ιδιότητες άμμων και αργίλων (CEM, 2006)

Ίζημα	Σύνθεση	Μέγεθος κόκκου (mm)	Ιδιότητες
Άργιλος	φύλλα πυριτίου	<0.0039	Συνεκτικό, αδιαπέρατο, ολισθηρό
Άμμος	Χαλαζίας (μόρια SiO <sub>2</sub> )	0.0625-2.00	Μη συνεκτικό, διαπερατό, τραχύ

Τα ιζήματα, περιγράφονται επίσης από διάφορα φυσικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη μορφή, το μέγεθος και τη σύνθεσή τους. Κατ' αρχάς, η πιο σημαντική παράμετρος είναι το μέγεθος των κόκκων. Στον Σχήμα 1.6, παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση αυτή κατά ASTM (American Society for Testing Materials) και Wentworth (1963).

Η παράμετρος  $\phi$ , που συνδέει την κλίμακα  $\rho\phi$  με την κλίμακα μέτρησης σε mm, ορίζεται κατά τον Wentworth από τη σχέση  $\phi = -\log_2 D$ , με  $D$  τη διάμετρο κόκκου (mm). Σημαντικά στοιχεία για τα ιζήματα περιγράφονται και από άλλες παραμέτρους, όπως το Μέσο μέγεθος των κόκκων  $D_{50}$  ή με βάση την κλίμακα  $\rho\phi$   $M_\phi$ , που απεικονίζει τη διάμετρο με συχνότητα εμφάνισης 50%, τη Διαβάθμιση  $\sigma_\phi$ , που απεικονίζει την απόκλιση από το μέσο μέγεθος (όσο μικρότερη είναι η διαβάθμιση τόσο πιο ομοιόμορφο είναι το δείγμα), τη Λοξότητα  $\alpha_\phi$  που απεικονίζει το βαθμό ασυμμετρίας κατανομής των κόκκων (συμμετρικές κοκκομετρικές καμπύλες έχουν μηδενική λοξότητα, ενώ αρνητική λοξότητα σημαίνει ότι υπερτερούν τα χονδρόκοκκα υλικά και στην περιοχή μελέτης πιθανότατα υπάρχει κάποιο έντονο ρεύμα που προκαλεί διάβρωση) και την Κύρτωση  $\beta_\phi$  που εκφράζει την απόκλιση της κατανομής των κόκκων από την κανονική κατανομή (πλατύκυρτη καμπύλη σημαίνει ότι το ίζημα έχει πολύ καλή διαβάθμιση).

Table III-1-2 Sediment Particle Sizes						
ASTM (Unified) Classification <sup>1</sup>	U.S. Std. Sieve <sup>2</sup>	Size in mm	Phi Size	Wentworth Classification <sup>3</sup>		
Boulder	12 in. (300 mm)	4096.	-12.0	Boulder		
		1024.	-10.0			
Cobble	3 in. (75 mm)	256.	-8.0	Large Cobble		
		128.	-7.0	Small Cobble		
		107.64	-6.75			
		90.51	-6.5			
		76.11	-6.25			
Coarse Gravel	3/4 in. (19 mm)	64.00	-6.0	Very Large Pebble		
		53.82	-5.75			
		45.26	-5.5			
		38.05	-5.25			
		32.00	-5.0			
		Fine Gravel	4 (4.75 mm)	26.91	-4.75	Large Pebble
				22.63	-4.5	
				19.03	-4.25	Medium Pebble
				16.00	-4.0	
				13.45	-3.75	
11.31	-3.5					
9.51	-3.25					
Coarse Sand	10 (2.0 mm)			8.00	-3.0	Small Pebble
				6.73	-2.75	
				6.35	-2.5	
		5.66	-2.25	Granule		
		4.76	-2.0			
		4.00	-1.75			
		3.36	-1.5			
		2.83	-1.25			
		2.38	-1.0			
		2.00	-0.75			
Medium Sand	40 (0.425 mm)	1.68	-0.75	Very Coarse Sand		
		1.41	-0.5			
		1.19	-0.25			
		1.00	0.0	Coarse Sand		
		0.84	0.25			
		0.71	0.5			
		0.59	0.75			
		0.50	1.0			
		0.420	1.25			
		0.354	1.5			
Fine Sand	200 (0.075 mm)	0.297	1.75	Medium Sand		
		0.250	2.0			
		0.210	2.25	Fine Sand		
		0.177	2.5			
		0.149	2.75			
		0.125	3.0			
		0.105	3.25			
		0.088	3.5	Very Fine Sand		
		0.074	3.75			
		0.0625	4.0			
0.0526	4.25					
0.0442	4.5					
Fine-grained Soil: Clay if PI ≥ 4 and plot of PI vs. LL is on or above "A" line and the presence of organic matter does not influence LL. Silt if PI < 4 and plot of PI vs. LL is below "A" line and the presence of organic matter does not influence LL. (PI = plasticity limit; LL = liquid limit)	400	0.0372	4.75	Coarse Silt		
		0.0312	5.0	Medium Silt		
		0.0156	6.0	Fine Silt		
		0.0078	7.0	Very Fine Silt		
		0.0039	8.0	Coarse Clay		
		0.00195	9.0	Medium Clay		
		0.00098	10.0	Fine Clay		
		0.00049	11.0	Colloids		
		0.00024	12.0			
		0.00012	13.0			
		0.000061	14.0			

<sup>1</sup> ASTM Standard D 2487-92. This is the ASTM version of the Unified Soil Classification System. Both systems are similar (from ASTM (1994)).

<sup>2</sup> Note that British Standard, French, and German DIN mesh sizes and classifications are different.

<sup>3</sup> Wentworth sizes (in mm) cited in Krumbein and Sloss (1963).

Σχήμα 1.6 Κατηγοριοποίηση ιζημάτων κατά ASTM και Wentworth (CEM,2006).

Οι προαναφερθείσες παράμετροι παρουσιάζονται στις ακόλουθες σχέσεις:

$$M_{\varphi} = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}}{3} \quad (1.3)$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\varphi_{84} - \varphi_{16}}{4} + \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{6} \quad (1.4)$$

$$\alpha_{\varphi} = \frac{\varphi_{16} + \varphi_{84} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{84} - \varphi_{16})} + \frac{\varphi_5 + \varphi_{95} - 2\varphi_{50}}{2(\varphi_{95} - 2\varphi_{50})} \quad (1.5)$$

$$\beta_{\varphi} = \frac{\varphi_{95} - \varphi_5}{2.44(\varphi_{75} - \varphi_{25})} \quad (1.6)$$

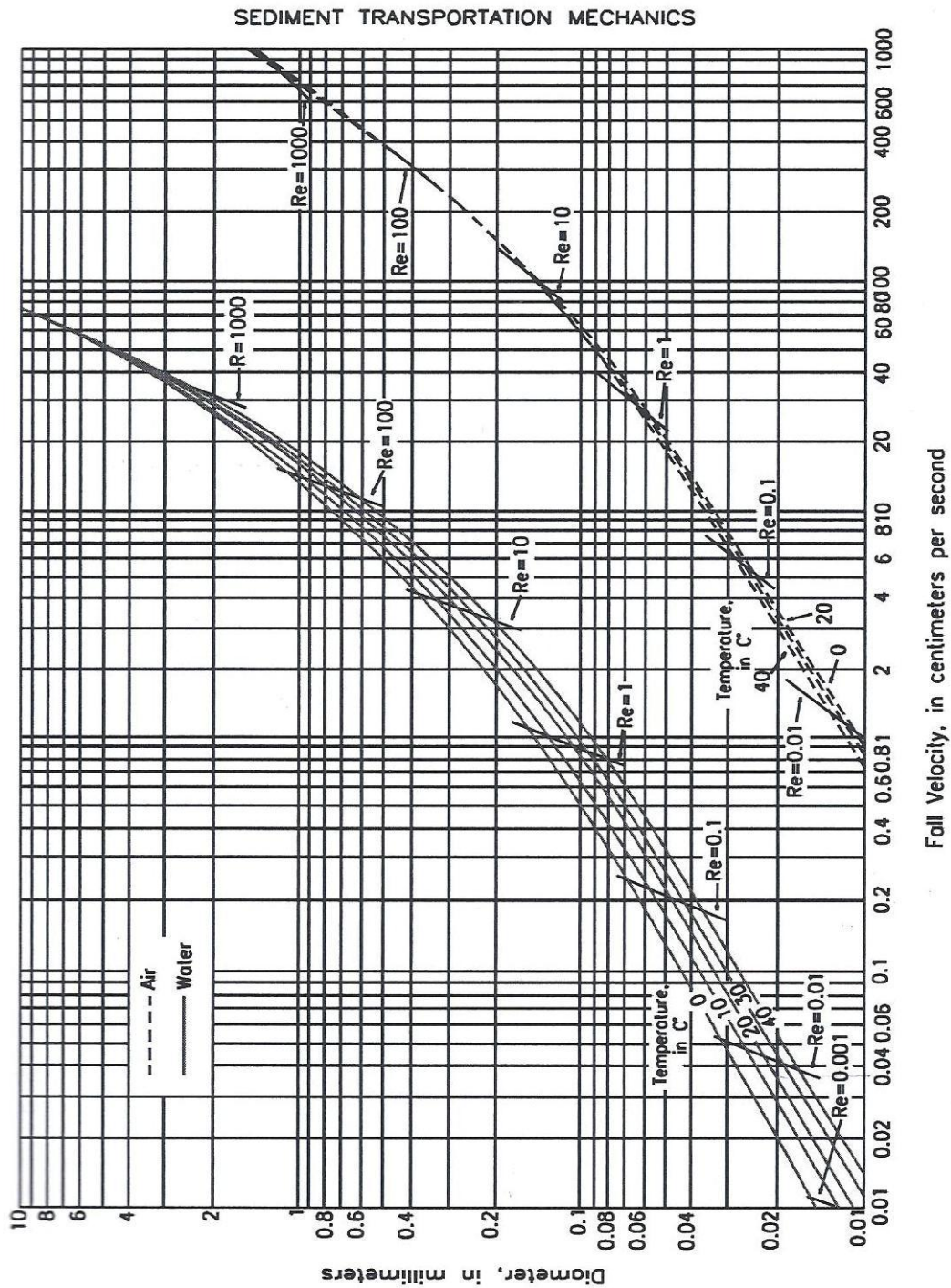
Από τις παραπάνω στατιστικές παραμέτρους καθώς επίσης και από το σχήμα, τη μορφή και τον προσανατολισμό των κόκκων μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα σχετικά με τη δυναμική του μέσου μεταφοράς των φερτών και του περιβάλλοντος απόθεσής τους (Κονισπολιάτης, 2009).

Πέραν των προαναφερθέντων παραμέτρων, αξίζει να αναφερθούν οι υπόλοιπες φυσικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τα ιζήματα, οι οποίες είναι η πυκνότητα, το ειδικό βάρος και η τάση αστοχίας, δηλαδή το φορτίο που μπορεί να παραλάβει ένας κόκκος πριν αστόχησε. Επίσης, σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των ιζημάτων διαδραματίζουν παράμετροι όπως το πορώδες, που ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ του όγκου των κενών προς το συνολικό όγκο, η διαπερατότητα, που είναι η ικανότητα του νερού να διηθείται στον πυθμένα και η γωνία αποθέσεως, που είναι η κλίση της επιφάνειας του κώνου κατάκλισης.

Τέλος, μια πολύ σημαντική παράμετρος που διαδραματίζει βαρυσήμαντο ρόλο στις παράκτιες διαδικασίες είναι η ταχύτητα καθίζησης. Όταν ένα σωματίδιο αφεθεί μέσα στο νερό επιταχύνει έως ότου η δύναμη πτώσης αυτού εξισωθεί με τη βαρυτική δύναμη  $F_b = mg$ . Από τη στιγμή εκείνη, καθιζάνει με σταθερή ταχύτητα η οποία ονομάζεται ταχύτητα καθίζησης. Η ταχύτητα αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι το σχήμα, το μέγεθος και η πυκνότητα του σωματιδίου. Ένας γενικός τύπος για τον υπολογισμό της ταχύτητας καθίζησης, για μια σφαίρα που πέφτει σε ακίνητο ρευστό απείρου βάθους είναι ο εξής:

$$W_f = \left\{ \frac{4}{3} \frac{gD}{C_D} \left[ \frac{\rho_s}{\rho} - 1 \right] \right\}^{0.5} \quad (1.7)$$

όπου  $C_D$  ο συντελεστής συμπαράσυρσης,  $D$  η διάμετρος του κόκκου,  $\rho_s$  και  $\rho$  η πυκνότητα του κόκκου και του ρευστού αντίστοιχα.



Σχήμα 1.7 Ταχύτητα καθίζησης σφαίρας χαλαζία σε νερό ή αέρα (CEM, 2006)



Σημειώνεται ότι ο συντελεστής συμπαράσυρσης εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds, η τιμή του οποίου διαμορφώνει την παραπάνω εξίσωση. Με γνωστά τον αριθμό Re και τη διάμετρο κόκκου D, η ταχύτητα καθίζησης σφαίρας χαλαζία σε νερό ή αέρα υπολογίζεται από το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.7 (Vanoni, 1975).

### 1.5 Έναρξη κίνησης ιζήματος

Η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στον πυθμένα από την κίνηση των υγρών σωματιδίων είναι η αιτία που προκαλεί την έναρξη κίνησης των ιζημάτων. Η κίνηση συνεχίζεται έως ότου να εκλείψουν τα γενεσιουργά αίτια, να συναντηθούν παράκτια εμπόδια ή να υπάρξει συνδυασμός των παραπάνω. Στη φάση ηρεμίας, τα ιζήματα ισορροπούν σε ορισμένες θέσεις. Η κατανομή των ιζημάτων στην παράκτια ζώνη και η βαθυμετρία της αντανακλούν το βραχυπρόθεσμο και το μακροπρόθεσμο κλίμα κυμάτων και ρευμάτων στην περιοχή. Το κλίμα αντιπροσωπεύει μια ολόκληρη σειρά χαρακτηριστικών κυμάτων στα ανοιχτά. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο ευρύτερα επηρεάζονται τα ιζήματα. Σε μια κλίμακα χρόνου μηνών ή ετών, τα ιζήματα και η βαθυμετρία είναι σε ισορροπία με τα κύματα και τα ρεύματα.

Η μεταφορά των ιζημάτων που λαμβάνει χώρα στο παράκτιο περιβάλλον αποτελείται κυρίως από την κίνηση των ιζημάτων 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.

Η έναρξη της κίνησης των κόκκων συνδέεται άμεσα με το πεδίο ταχυτήτων που επικρατεί κοντά στον πυθμένα. Μετά την αποσταθεροποίηση των κόκκων η κίνηση τους γίνεται είτε σε επαφή με τον πυθμένα (φορτίο πυθμένα) είτε σε αιώρηση (φορτίο αιωρήσεως). Κρίσιμη παράμετρος που καθορίζει αν η στερεομεταφορά θα γίνει σε σύρση ή σε αιώρηση αποτελεί ο λόγος  $W_f/u^*$ , δηλαδή ο λόγος της ταχύτητας καθίζησης προς την ταχύτητα τριβής  $u^*=(\tau_0/\rho)^{0.5}$ , με  $\tau_0$  τη διατρητική τάση στον πυθμένα και  $\rho$  την πυκνότητα του νερού. Το φυσικό μέγεθος που παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο στην αποσταθεροποίηση των κόκκων είναι η διατρητική τάση του πυθμένα, η οποία είναι επαλληλία των τάσεων από τους κυματισμούς και τα ρεύματα. Για την αποκόλληση και την έναρξη της κίνησης ενός κόκκου του ιζήματος (Σχήμα 1.8) πρέπει η διατρητική τάση να αποκτήσει μια κρίσιμη τιμή,

η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα του νερού, την ταχύτητα ροής και τις παραμέτρους του ιζήματος (πυκνότητα, κοκκομετρία). Η μέγιστη διατμητική τάση στον πυθμένα από κύμα  $\tau_w$  και από ρεύμα  $\tau_c$  φανέτα στις ακόλουθες σχέσεις:

$$\tau_w = 0.5 f_w \rho u_{max}^2 \quad (1.8)$$

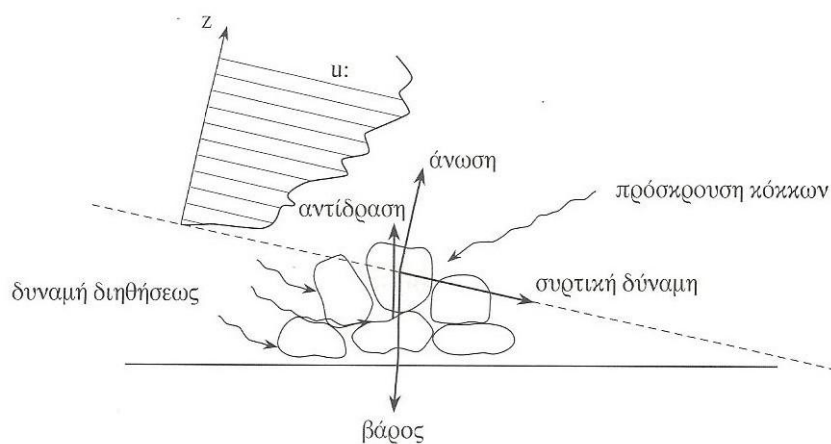
$$\tau_c = \rho k^2 v_{y1}^2 \quad (1.9)$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $f_w$  ο συντελεστής τραχύτητας στον πυθμένα,  $k=0.4$  σταθερά του Von Karman,  $u_{max}$  η μέγιστη τιμή της οριζόντιας ταχύτητας στον πυθμένα,  $v_{y1}$  η τιμή της ταχύτητας σε ύψος  $y_1$  πάνω από τον πυθμένα.

Η έναρξη της κινήσεως ενός κόκκου λοιπόν εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη διατμητική τάση στον κόκκο. Η εκτίμηση της ενάρξεως κύματος γίνεται συνήθως απευθείας με την ταχύτητα ροής. Οι Migniot και Bonafille συνέδεσαν την ταχύτητα τριβής  $u_*$  με τη μέγιστη οριζόντια τροχιακή ταχύτητα στον πυθμένα λόγω κύματος  $u_{max}$  και τη διάμετρο κόκκου  $D$  με τις παρακάτω σχέσεις:

$$u_*^4 = \frac{8\nu u_{max}^2}{\pi T} \quad (1.10)$$

$$u_* = \frac{\nu Re_*}{D} \quad (1.11)$$



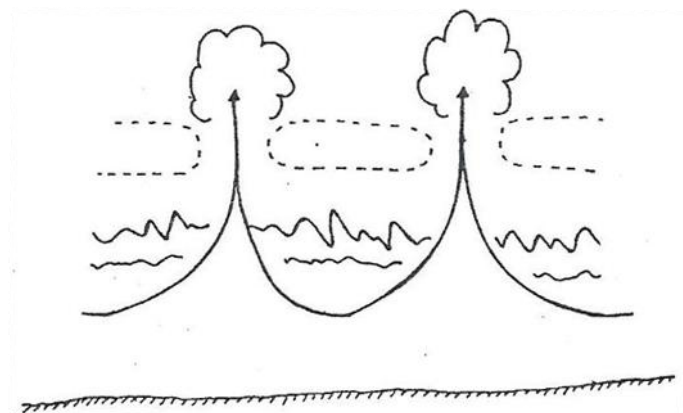
Σχήμα 1.8 Έναρξη κινήσεως ιζήματος (Κουτίτας, 1998)

## 1.6 Διαδικασίες στερεομεταφοράς στην ακτή

Τα ιζήματα μεταφέρονται υπό την αποσταθεροποιητική δράση των κυματισμών και τη μεταφορική δράση των ρευμάτων (Bagnold, 1964). Η μεταφορά των ιζημάτων ονομάζεται στερεομεταφορά και εξαρτάται κατά βάση από τη θαλάσσια διαταραχή που την προκαλεί. Γενικά, τα παράκτια ρεύματα μεταφέρουν κυρίως λεπτόκοκκα ιζήματα, ενώ τα χονδρόκοκκα μεταφέρονται κατά τις διαδικασίες κυματικής δράσης. Κύματα υπό γωνία επίσης μπορούν να μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες ιζήματος. Θεωρείται μάλιστα, όσον αφορά τη διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών, ότι για  $45^\circ$  γωνία η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά μεγιστοποιείται.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η κίνηση των κόκκων γίνεται είτε σε επαφή με τον πυθμένα (φορτίο πυθμένα) είτε με τους κόκκους να αιωρούνται (φορτίο σε αιώρηση). Μεγάλες ταχύτητες και μικρή διάμετρος υλικού συνιστούν κίνηση σε αιώρηση. Άλλες παράμετροι μικρότερης σημασίας είναι ο τύπος και η μορφή του πυθμένα, ο τύπος ροής (στρωτή ή τυρβώδης) και η ύπαρξη αμμοκυμάτων. Έχει διαπιστωθεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ιζηματομεταφοράς στο παράκτιο περιβάλλον λαμβάνει χώρα ως φορτίο πυθμένα.

Επίσης, σημειώνεται ότι απουσία ρευμάτων παλίρροιας, όπως συμβαίνει στη χώρα μας, οι μηχανισμοί μεταφοράς ιζήματος δρουν αποτελεσματικά στα ρηχά νερά. Δεν θα ήταν υπερβολή να λεχθεί πως ένα πολύ μεγάλο μέρος της συνολικής στερεομεταφοράς λαμβάνει χώρα σε μια περιοχή χωρίς παλίρροια μεταξύ της ακτογραμμής και της ζώνης θραύσης των κυματισμών. (Μέμος, 1992)



Σχήμα 1.9 Μεταφορά ιζημάτων κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή (Μουτζούρης, 2005)

Η παράκτια στερεομεταφορά διαχωρίζεται σε δύο συνιστώσες, την παράλληλη και την κάθετη στην ακτή (Σχήμα 1.9). Για τον υπολογισμό της στερεοπαροχής, της εξέλιξης της ακτογραμμής και της μεταβολής του πυθμένα στην παράκτια ζώνη, χρησιμοποιούνται συνήθως απλοποιημένες σχέσεις τόσο για την παράλληλη όσο και για την εγκάρσια στην ακτή κίνηση των ιζημάτων. Η εγκάρσια στερεομεταφορά ενδιαφέρει κυρίως όταν μελετάται η μεταβολή της ακτογραμμής και του πυθμένα της θάλασσας κατά τη διάρκεια ενός κυματικού επεισοδίου. Η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του ισοζυγίου των μεταφερόμενων ιζημάτων στη διάρκεια αλληλουχίας κυματικών επεισοδίων (συνήθως στη διάρκεια ενός έτους).

### 1.6.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής

Η κατά μήκος της ακτής συνιστώσα της στερεομεταφοράς είναι μείζονος σημασίας όσον αφορά τη μορφολογία μιας ακτής και ελέγχει σε μεγάλο βαθμό κατά πόσο θα συμβεί διάβρωση, απόθεση ή αν η ακτογραμμή θα παραμένει σταθερή. Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής οφείλεται κυρίως στο φαινόμενο της λοξής θραύσης, δηλαδή στην περίπτωση θραύσης των κυμάτων υπό γωνία με την ακτογραμμή. Η ένταση του φαινομένου μεγιστοποιείται στη ζώνη θραύσης, καθώς πριν η συνιστώσα κινήσεως κατά μήκος της ακτής είναι μικρή. Κατά τη θραύση των κυματισμών και σε συνδυασμό με την τροχιακή επιταχυνόμενη κίνηση των υγρών μορίων, τα ιζήματα διαταράσσονται και τίθενται σε αιώρηση με αποτέλεσμα να σημειώνεται ανακατανομή της ορμής και δημιουργία ρευμάτων με διεύθυνση παράλληλη στην ακτή, τα οποία μεταφέρουν το ίζημα.

Ανάλογα με τη φορά κινήσεως του ιζήματος που διέρχεται από μια εγκάρσια διατομή κάθετη στην ακτογραμμή, για ένα παρατηρητή στην ακτογραμμή με το μέτωπο προς τα ανοικτά, η παροχή στερεομεταφοράς χαρακτηρίζεται προς τα δεξιά ( $Q_r$ ) ή προς τα αριστερά ( $Q_l$ ) αντίστοιχα. Το άθροισμα των προαναφερθέντων τιμών καλείται παροχή αθροιστικής στερεομεταφοράς ή συνολική παροχή ( $Q_g$ ), ενώ η διαφορά τους κατ' απόλυτη τιμή καθαρή παροχή στερεομεταφοράς ( $Q_n$ ).

Η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά πιθανόν να διαφέρει σημαντικά από έτος σε έτος ή από εποχή σε εποχή, και αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό των παράκτιων έργων. Για παράδειγμα, η καθαρή στερεομεταφορά σε μια περιοχή μπορεί να γίνεται προς τη μια κατεύθυνση τη μια χρονιά και προς την αντίθετη την επόμενη. Η

αθροιστική στερεοπαροχή παρουσιάζει επίσης σημαντική μεταβλητότητα, με μεγάλους ρυθμούς σε περιόδους με ιδιαίτερα έντονες κυματικές συνθήκες και μικρότερους σε περιόδους με κυματισμούς σχετικά ήπιας δράσης.

### 1.6.1.1 Μέθοδοι υπολογισμού στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής

Ο υπολογισμός της στερεοπαροχής κατά μήκος μιας ακτής μπορεί να γίνει με μετρήσεις στην ακτή, προσαρμογή της τιμής της στερεοπαροχής μιας γειτονικής ακτής στην εξεταζόμενη ακτή ή ακόμα με χρήση δεδομένων χρονικών μεταβολών της παράκτιας ζώνης. Επίσης, όταν υπάρχει έλλειψη μετρήσεων πραγματικών φυσικών μεγεθών, εφαρμόζονται εμπειρικά μοντέλα. Ακολούθως, αναφέρονται οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι υπολογισμού της στερεομεταφοράς.

- **Μέθοδος CERC**

Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα μέτρησης της κατά μήκος στερεομεταφοράς είναι τα μοντέλα ροής ενέργειας, τα οποία συναρτούν την παροχή με τη ροή της ορμής. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η μέθοδος CERC (Corps of Engineers Research Center) και είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη διεθνώς. Η μέθοδος αυτή βρίσκει εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου η στερεοπαροχή προκαλείται αποκλειστικά από κυματογενή ρεύματα παράλληλα στην ακτή και υπολογίζει το ολικό φορτίο (φορτίο πυθμένα και φορτίο αιωρήσεως) κατά μήκος μιας ακτής. Το υπολογιζόμενο φορτίο θεωρείται ότι διακινείται στις ζώνες θραύσης (breaker zone) και απόσβεσης (surf zone). Ο ρυθμός της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς υπολογίζεται κατά τη μέθοδο CERC ως εξής:

$$Q_{lx} = \frac{k}{(\rho_s - \rho)g(1 - n)} P_l \quad (1.12)$$

όπου  $Q_{lx}$  η στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής,  $k$  εμπειρικός αδιάστατος συντελεστής,  $\rho_s$  η μέση πυκνότητα ιζήματος,  $\rho$  η μέση πυκνότητα θαλασσινού νερού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $n$  το πορώδες του ιζήματος και  $P_l$  η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$P_l = \frac{1}{16} \rho g H_b^2 C_{gb} \sin 2\alpha_b \quad (1.13)$$

όπου  $H_b$  ύψος κύματος στη θραύση,  $C_{gb}=(g d_b)^{0.5}$  η ταχύτητα ομάδας των κυματισμών στη θραύση και  $\alpha_b$  η γωνιά θραύσης.

Μια άλλη γνωστή μέθοδος είναι αυτή του κυματογενούς ρεύματος, η οποία συνδυάζει δράση ρεύματος και κύματος. Η ροή ενέργειας υπολογίζεται από τη σχέση (Walton, 1980 & 1982):

$$P_l = \frac{\rho g H_b W_b V_b C_f}{\frac{5\pi V}{2 V_0}} \quad (1.14)$$

όπου  $W_b$  το εύρος της ζώνης θραύσης,  $V_b$  η ταχύτητα ρεύματος στη ζώνη θραύσης,  $C_f$  συντελεστής τριβής στον πυθμένα,  $V$  η ταχύτητα ρεύματος και  $V_0$  η θεωρητική ταχύτητα ρεύματος στη θραύση απουσία πλευρικής ανάμειξης. Η Σχέση 1.14 αντικαθίσταται στην 1.12 και προκύπτει η στερεομεταφορά.

- **Χρήση νομογραφημάτων**

Ένας άλλος διαδεδομένος τρόπος είναι με τη χρήση νομογραφημάτων, όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 1.10 για ακτές με ήπια καμπυλότητα και ισοβαθείς σχετικά παράλληλες προς την ακτή σε σχέση με τη γωνία διεύθυνσης των κυματισμών.

- **Αναλυτικά μοντέλα**

Σε στερεομεταφορά αμμώδους ιζήματος προτάθηκε από τους Bakker και Edelman (1965) η ακόλουθη σχέση σε συνάρτηση με την αρχική στερεοπαροχή, σταθερές  $K_a$  και  $K_b$  και τη γωνία θραύσης  $\alpha_b$ :

$$Q_{lx} = Q_0 K_a \tan \alpha_b \quad , 0 \leq \tan \alpha_b \leq 1.23 \quad (1.15a)$$

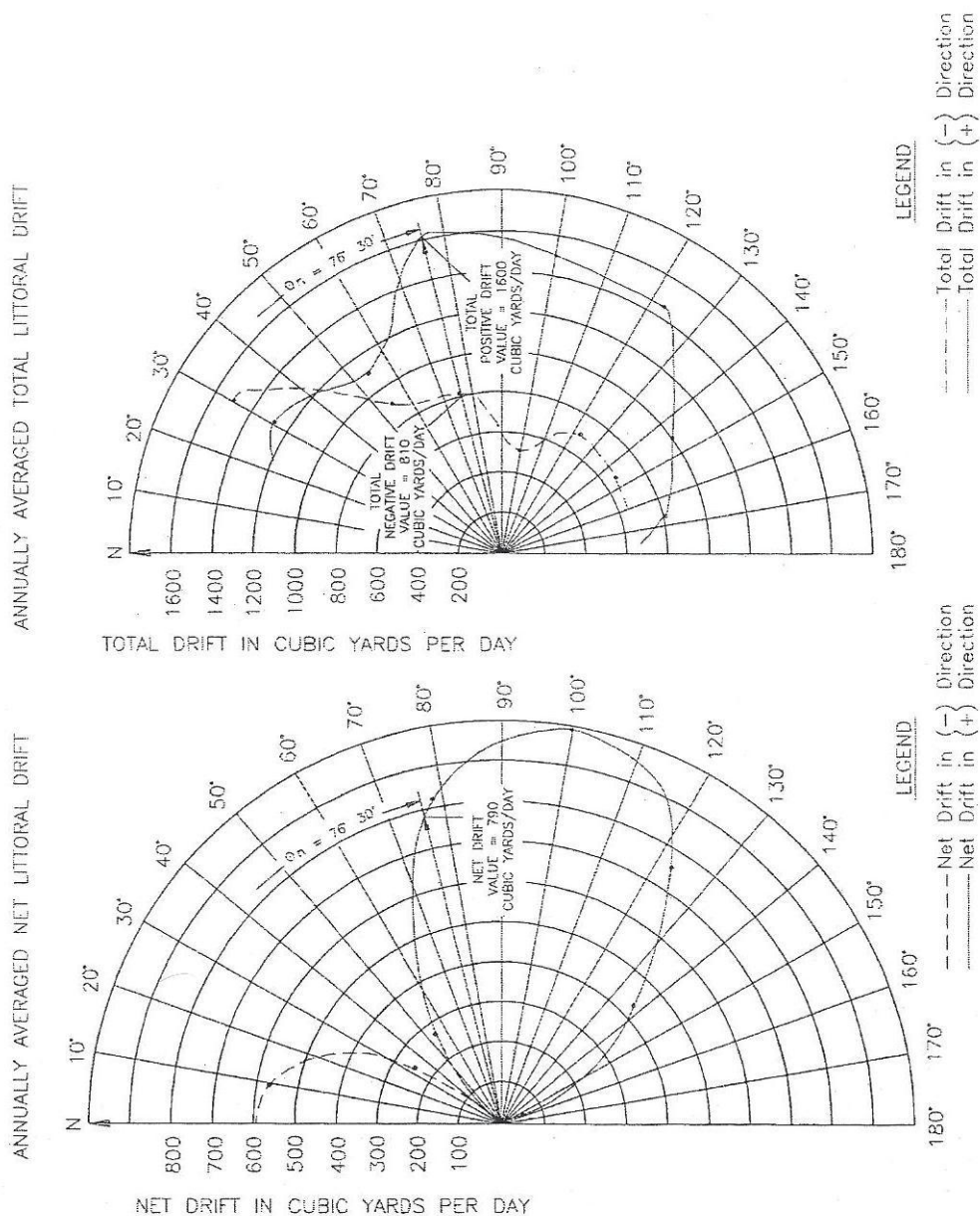
$$Q_{lx} = Q_0 \frac{K_b}{\tan \alpha_b} \quad , 1.23 < \tan \alpha_b \quad (1.15b)$$

- **Υπολογιστικά μοντέλα**

Το πιο διαδεδομένο υπολογιστικό μοντέλο είναι το μοντέλο GENESIS που υπολογίζει

αλλαγές στην ακτογραμμή χωρικά και χρονικά λόγω θραύσης κυματισμών. Η σχέση που προβλέπει την κατά μήκος στερεομεταφορά συναρτήσει σταθερών  $\alpha_1$  και  $\alpha_2$  είναι (Hanson & Krus, 1989):

$$Q_{lx} = H_b^2 C_{gb} (a_1 \sin 2a_b - a_2 \cos a_b \frac{dH_b}{dx}) \quad (1.16)$$



Σχήμα 1.10 Καθαρή και συνολική στερεοπαροχή κατά μήκος της ακτής (yd<sup>3</sup>/ημερα, 1yd=0.9144m) (CEM, 2006)

• **Εμπειρικές σχέσεις**

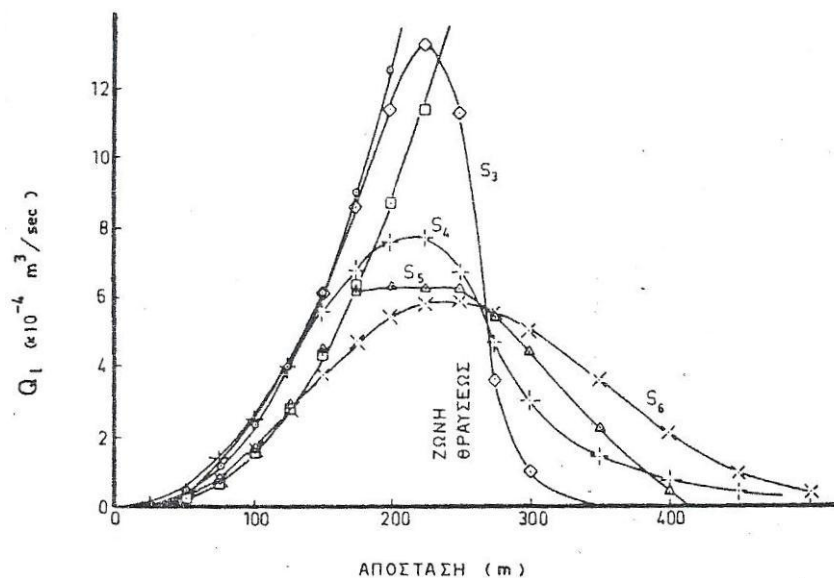
Τέλος, άλλες εμπειρικές σχέσεις είναι οι ακόλουθες (Κουτίτας, 1998 και Kamphuis, 1991):

$$Q_{lx} = 1200P_l \tag{1.17}$$

$$Q_{lx} = 6.40 \cdot 10^4 H_{sb}^2 T_p^{1.5} \beta_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6} 2\alpha_b \tag{1.18}$$

όπου  $T_p$  η περίοδος αιχμής του φάσματος,  $\beta_b$  η κλίση του πυθμένα στη ζώνη θραύσης και  $D_{50}$  η μέση διάμετρος κόκκου.

Οι εκφράσεις της στερεομεταφοράς υποθέτουν άπειρη ποσότητα ιζήματος κατά μήκος της ακτής και ακτή άπειρου μήκους, επομένως η στερεοπαροχή που υπολογίζεται αποτελεί τη δυνητική στερεοπαροχή. Επιπλέον, από τις παραπάνω σχέσεις υπολογίζεται μια μέση τιμή της στερεοπαροχής στη ζώνη θραύσης. Το στοιχείο αυτό δεν αποτυπώνει την πραγματικότητα, καθώς είναι διαπιστωμένο ότι το μεγαλύτερο μέρος των διαδικασιών λαμβάνει χώρα στη γραμμή θραύσεως και αμέσως κατάντη αυτής. Η κατανομή της στερεοπαροχής φαίνεται στο Σχήμα 1.11

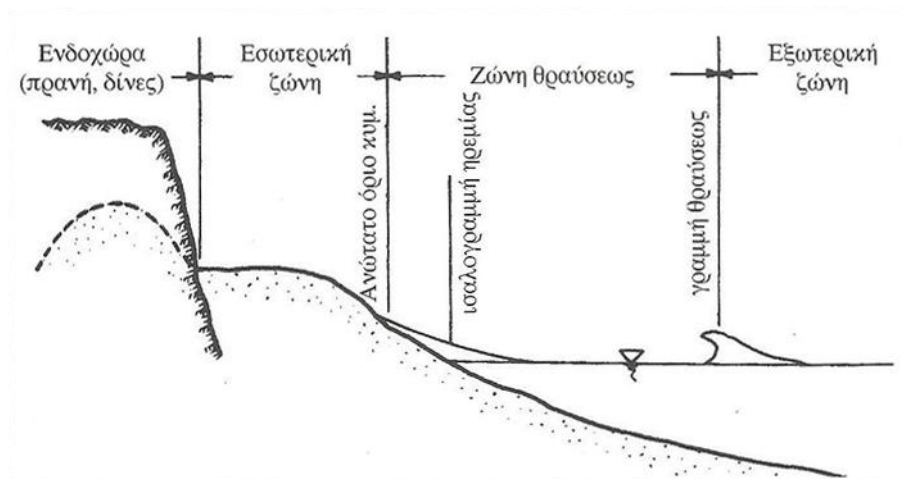


Σχήμα 1.11 Θεωρητική κατανομή παροχής κατά μήκος της ακτής στη ζώνη μετά τη θραύση (Bijker, 1980)

**1.6.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή**



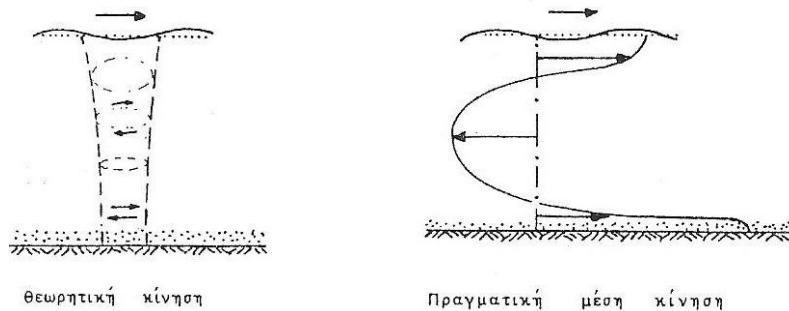
Η μεταφορά των ιζημάτων κάθετα στην ακτογραμμή οφείλεται κατά κύριο λόγο στη δράση των κυμάτων. Επίσης, αίτια αποτελούν η δράση της παλίρροιας και του ανέμου. Τα ιζήματα τίθενται σε κίνηση από την κάθετη συνιστώσα της τροχιακής κίνησης των υγρών σωματιδίων και στη συνέχεια μεταφέρονται από το κυματογενές ρεύμα. Η εγκάρσια στερεομεταφορά συμβάλλει στη διαμόρφωση του προφίλ μιας ακτής και του βάθους του νερού ή του έξαλλου υψομέτρου των διαφόρων τμημάτων της παράκτιας ζώνης. Με την προαναφερθείσα διαδικασία δημιουργείται μια συνεχής κίνηση φερτών, είτε ως φορτίο πυθμένα είτε ως αιωρούμενο φορτίο. Εγκάρσια στην ακτή διακρίνεται το όριο της επιδράσεως των κυματισμών προς την ανοιχτή θάλασσα, μια ζώνη (offshore) μεταξύ αυτού του ορίου και της γραμμής θραύσεως και μια ζώνη (inshore surf zone) μεταξύ της γραμμής θραύσεως και του ανοιχτού ορίου αναρριχήσεως των κυματισμών. Στη δεύτερη ζώνη, το τμήμα μεταξύ ακτογραμμής και ορίου αναρριχήσεως κυματισμών είναι το μέτωπο της ακτής (foreshore). Πίσω από τις ζώνες αυτές είναι η ράχη της ακτής (backshore), που φτάνει ως το μέγιστο όριο αναρριχήσεως των χειμερινών κυματισμών, και ακολουθούν είτε ζώνη θινών είτε γαιώδη πρανή. Τα παραπάνω φαίνονται στο ακόλουθο Σχήμα 1.12 (Κουτίτας, 1998)



Σχήμα 1.12 Ζώνες κατά την εγκάρσια στερεομεταφορά (Κουτίτας, 1998)

Η διαδικασία διαφέρει σημαντικά πριν και μετά από τη ζώνη θραύσεως. Πριν τη ζώνη θραύσεως, οι τροχιές των υγρών σωματιδίων είναι κλειστές. Κατά την επαφή με το στρώμα του ιζήματος η τροχιά γίνεται σε μεγάλο βαθμό πεπλατυσμένη και τείνει σε μια ευθύγραμμη ταλάντωση, με τη μέση κίνηση των ιζημάτων να κατευθύνεται προς την ακτή.

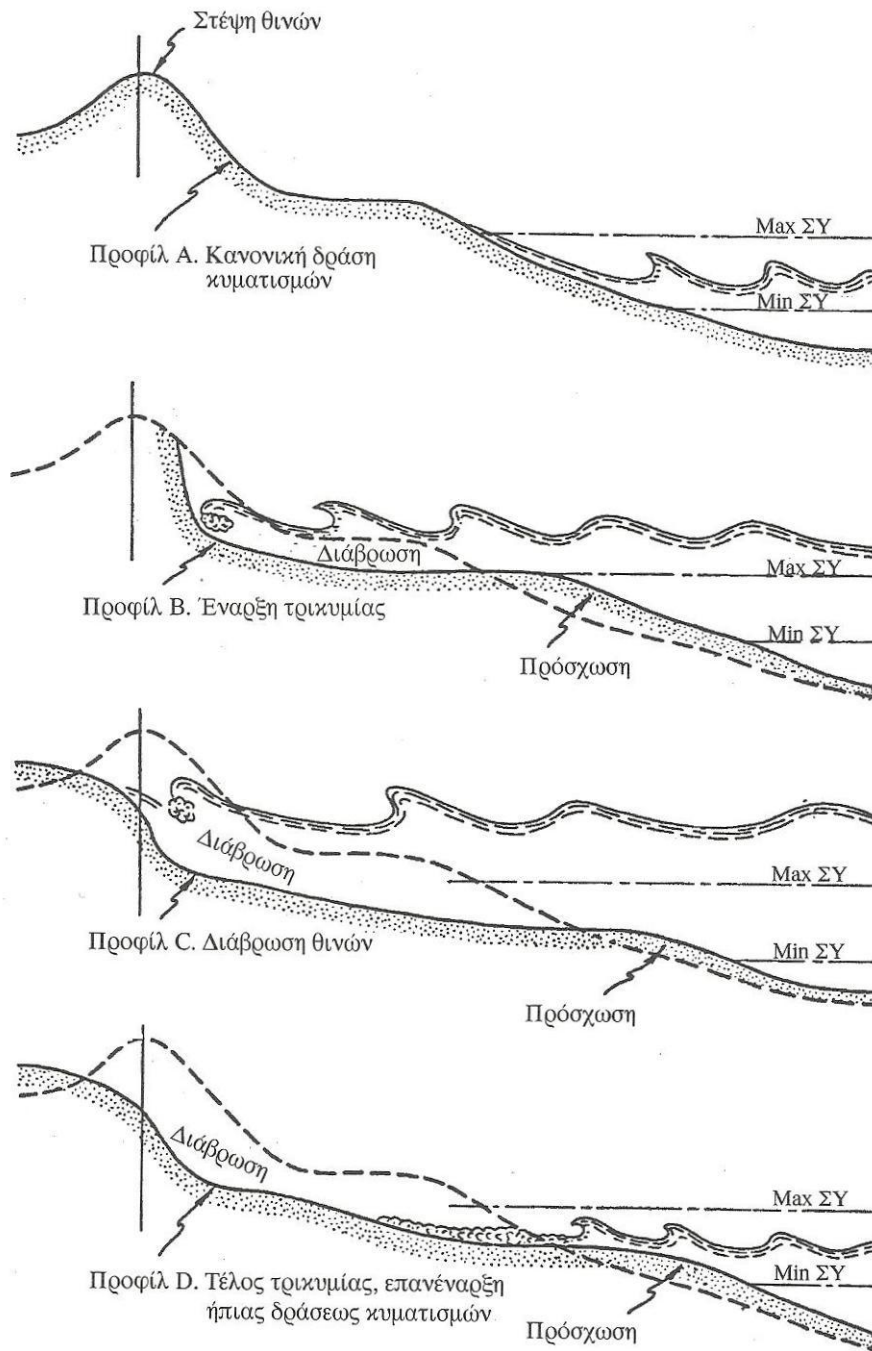
Με την επίδραση όμως του οριακού στρώματος, καταγράφεται μια αναστροφή της μέσης κινήσεως κατά την κατακόρυφο.



Σχήμα 1.13 Τροχιές σωματιδίων πριν και μετά τη ζώνη θραύσεως (Μουτζούρης, 2005)

Στη ζώνη θραύσεως και στις ακόλουθες ζώνες η στερεομεταφορά μπορεί να είναι σημαντική και κινείται προς την ακτή και τον ύφαλο αναβαθμό, ανάλογα με την καμπυλότητα του κύματος ( $H/L$ ). Όταν ένα κύμα πλησιάζει τη ζώνη θραύσεως, η ταχύτητα μειώνεται λόγω της επίδρασης του πυθμένα. Επίσης το κύμα τείνει να προσκρούσει κάθετα στην ακτογραμμή λόγω διάθλασης. Τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια το ίζημα να τείνει να μεταφερθεί στην ακτή. Στη ζώνη θραύσεως όμως, η δομή του μεταβάλλεται, καθώς τα ιζήματα τίθενται σε αιώρηση, όπου η αναρρίχηση των κυμάτων τα μεταφέρει στην ακτή, όπου σχηματίζεται έξαλλος αναβαθμός. Μέρος της ενέργειας του κύματος μετατρέπεται σε τύρβη, γεγονός που αυξάνει την ενέργεια καθόδου με αποτέλεσμα να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια ανόδου και να οδηγεί σε καθίζηση των ιζημάτων.

Σε αντίθεση με την κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, η εγκάρσια μεταφορά των ιζημάτων μπορεί να προκαλέσει σημαντικές μεταβολές σε μια ακτή ακόμα και σε μικρό χρονικό διάστημα. Αποτέλεσμα της δράσης των κυματισμών και των ρευμάτων εγκάρσια στην ακτή σε συνδυασμό με τις εποχιακές μεταβολές στο κυματικό καθεστώς είναι η διαμόρφωση δύο διακεκριμένων προφίλ, του χειμερινού και του θερινού. Κατά το χειμερινό προφίλ, οι κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας ( $H_0/L_0$ , ύψος και μήκος κύματος στα βαθιά νερά) διαβρώνουν μέρος του υλικού του μετώπου της ακτής και τμήματος του βυθού στη ζώνη θραύσεως δημιουργώντας έναν επιμήκη ύφαλο παράλληλο στην ακτογραμμή.



Σχήμα 1.14 Διάκριση χειμερινού και θερινού προφίλ εγκάρσιας στερομεταφοράς (Κουτίτας, 1998)

Ο ύφαλος αυτός προκαλεί θραύση των κυματισμών σε μεγαλύτερα βάθη, αποτελώντας έτσι ένα είδος προστασίας της ακτής. Η μεταφορά των φερτών γίνεται προς τα ανοιχτά οπότε το μέτωπο της ακτής μετακινείται προς την ξηρά και η ακτή τείνει να γίνει στενότερη με απότομη κλίση. Κατά το θερινό προφίλ, οι κυματισμοί μικρής καμπυλότητας και ήπιας δράσης έχουν ως αποτέλεσμα η μεταφορά των ιζημάτων να γίνεται προς την ακτή

εμπλουτίζοντάς την με κοκκώδες υλικό. Έτσι αυξάνεται το πλάτος της παραλίας και παράλληλα η ακτή αποκτά ομαλότερη κλίση. Στο θερινό προφίλ δεν υπάρχουν επιμήκεις ύφαλοι καθώς υλικό από αυτούς μεταφέρεται και αποτίθεται στο έξαλλο μέτωπο της ακτής. Η διάκριση αυτή φαίνεται στο Σχήμα 1.14.

### 1.6.2.1 Μέθοδοι υπολογισμού στερεομεταφοράς κάθετα στην ακτή

Για τη στερεομεταφορά κάθετα της ακτής, υπάρχουν πολλές εμπειρικές σχέσεις. Μια εξ αυτών, η οποία έχει δοθεί από τον Darlymple, (1991) και αφορά γραμμικά κύματα και τη μέση χρονικά εγκάρσια στερεοπαροχή  $Q_v$ , είναι η εξής:

$$Q_v = \frac{E}{\rho C} \quad (1.19)$$

όπου  $E$  η ενέργεια του κύματος,  $C$  η ταχύτητα διάδοσης των κυματισμών και  $\rho$  η πυκνότητα του νερού. Μια ακόμη εμπειρική σχέση έχει δοθεί από τους Plant et al (2001) για τη μέση χρονικά εγκάρσια στερεοπαροχή, η οποία είναι η εξής:

$$Q_v = c_2 \frac{1}{16\sqrt{2}} \frac{\rho\sqrt{g}}{\tan\varphi_\alpha} H_{rms}^3 d^{-3/2} \left\{ - \left( \frac{1 + c_1\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \right) y + c_1 \left( \frac{2 \tan\beta}{\sqrt{\pi} \tan\varphi_\alpha} + R_{cu}^{ot} \right) \right\} \quad (1.20)$$

όπου  $c_1$  και  $c_2$  σταθερές,  $\varphi_\alpha$  η γωνία αποθέσεως των ιζημάτων,  $\beta$  η κλίση του πυθμένα,  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $H_{rms}$  το μέσο τετραγωνικό ύψος κύματος,  $d$  το βάθος του νερού και  $R_{cu}^{ot}$  παράγοντας που συνδέει το φορτίο του πυθμένα με τις διακυμάνσεις των ταχυτήτων μη γραμμικών κυμάτων.

## 1.7 Ισοζύγιο φερτών υλών

Στη μελέτη για το ισοζύγιο φερτών υλών, εξετάζεται χωριστά κάθε τμήμα της ακτής το οποίο εξελίσσεται λόγω στερεομεταφοράς ανεξάρτητα από την υπόλοιπη ακτή. Ένα τέτοιο τμήμα ορίζεται ως παράκτια φυσιογραφική μονάδα ή παράκτιο κελί και εμπεριέχει πηγές και παγίδες φερτών υλών.

Κυριότερες πηγές φερτών υλών είναι τα υδατορεύματα, τα οποία μεταφέρουν ετησίως περί τα 14 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα φερτών υλικών που προέρχονται από τη

διάβρωση χερσαίων εκτάσεων γης (Κουτίτας, 1998). Τα πλέον χονδρόκοκκα ιζήματα παραμένουν στις ακτές, ενώ τα υπόλοιπα καθιζάνουν σε μεγαλύτερα βάθη. Η διάβρωση γαιωδών όγκων σε ακτές αποτελεί μια δεύτερη πηγή ιζήματος. Τέλος, η μεταφορά κόκκων από τους ανέμους, η βιογενής απόθεση από κελύφη νεκρών θαλάσσιων οργανισμών και η τεχνητή αναπλήρωση ακτών είναι συμπληρωματικές πηγές ιζήματος.

Οι κυριότερες παγίδες φερτών υλών είναι τα παλιρροιακά στόμια, όπου οι προς την ακτή στερεοπαροχές κατά την πλήμμη είναι μεγαλύτερες από αυτές προς την ανοιχτή θάλασσα κατά την άμπωτη. Επίσης, ιζήματα παγιδεύονται στα υφαλοπρανή και τα υποβρύχια φαράγγια. Μια ακόμη παγίδα φερτών υλών είναι οι αμμοληψίες, οι οποίες αφαιρούν ιζήματα από την ακτή ενώ τα έργα αντιδιαβρωτικής και αντιπλημμυρικής προστασίας χερσαίων περιοχών στερούν τις ακτές από μεγάλες παροχές φερτών. Τέλος, σημαντικές παγίδες φερτών αποτελούν και τα παράκτια τεχνικά έργα, τα οποία κάποιες φορές δημιουργούνται για το σκοπό αυτό, όπως πρόβολοι, ενώ σε άλλες περιπτώσεις, όπως σε λιμάνια και μαρίνες δημιουργούνται σημαντικά προβλήματα από την παγίδευση φερτών υλικών λόγω ρήξης της λεκάνης η οποία μπορεί με αυτόν τον τρόπο να καταστεί μη λειτουργική. Σημειώνεται, ότι το τελευταίο αυτό φαινόμενο και η αντιμετώπισή του αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και θα αναλυθεί παρακάτω.

Το ισοζύγιο φερτών υλών ποσοτικοποιείται για μια ακτή κατά τη διάρκεια ενός έτους. Ξεκινώντας από ένα όριο της φυσιογραφικής μονάδας, χωρίζεται η ακτή σε τμήματα και υπολογίζεται το αλγεβρικό άθροισμα των όγκων φερτών που μεταφέρονται προς τη μια και την άλλη κατεύθυνση. Με αυτό τον τρόπο υπολογίζεται αν το ισοζύγιο παρουσιάζει περίσσειμα ή έλλειμμα φερτών υλών κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η εξής:

$$\sum_{i=1}^N \varepsilon_i Q_i f_i \quad (1.21)$$

όπου  $i$  το πλήθος των διακεκριμένων καταστάσεων,  $\varepsilon_i$  το πρόσημο ανάλογα με τη φορά κινήσεως,  $Q_i$  ο ετήσιος όγκος φερτών,  $f_i$  η συχνότητα εμφανίσεως της κατάστασης.

## 2. Μαρίνες και παράκτια ζώνη

---

### 2.1 Γενικά στοιχεία μαρίνων

Κατ' αρχάς, ως μαρίνα ορίζεται μια αποβάθρα ή λιμενολεκάνη με αγκυροβόλια για σκάφη αναψυχής και μικρές βάρκες. Διαφέρει από ένα λιμάνι κατά το γεγονός ότι δε δύναται να φιλοξενήσει μεγάλα επιβατηγά πλοία ή εμπορεύματα από φορτηγά πλοία. Ο όρος μαρίνα επίσης χρησιμοποιείται για να περιγράψει τις αποβάθρες σε ποταμούς και διώρυγες που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά από μη-βιομηχανικά σκάφη αναψυχής.

Στη χώρα μας, λόγω φυσιογραφίας, έχουν κατασκευαστεί πολλές μαρίνες (Πίνακας 2.1) για την εξυπηρέτηση των διαφόρων σκαφών, ελληνικών ή μη. Η δυνατότητα ελλιμενισμού τους διαφέρει ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε περίπτωσης και μπορεί να κυμαίνεται από λίγες δεκάδες σκάφη, όπως η μαρίνα Λακκί, στη Λέρο μέχρι και πάνω από χίλια σκάφη, όπως στις περιπτώσεις της μαρίνας του Αλίμου και της Γουβιάς στην Κέρκυρα. Αναλόγως των αναγκών ελλιμενισμού και των διαστάσεων των σκαφών που αναμένεται να φιλοξενήσει μια μαρίνα επιλέγονται τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού της, που είναι το πλάτος ανοίγματος εισόδου, το βάθος κατασκευής και η επιφάνεια που καλύπτει, η οποία συνεπάγεται τον αριθμό των σκαφών που θα φιλοξενηθούν. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, όσον αφορά τον ελληνικό χώρο, το πλάτος ανοίγματος εισόδου κυμαίνεται μεταξύ 20-80 m, ενώ το βάθος κατασκευής μεταξύ 3-9 m, αντίστοιχα. Στόχος μιας μαρίνας, λόγω του ότι σχετίζεται άμεσα με τον τουρισμό, περάν του ελλιμενισμού των σκαφών είναι η παροχή υπηρεσιών διαμονής και ασφαλείας στους κατόχους των σκαφών για όσο διάστημα τη χρησιμοποιήσουν. Υπηρεσίες όπως φώτα εισόδου για ασφαλή πλοήγηση, παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και νερού, ανεφοδιασμού καυσίμων, αναψυχής, εξοπλισμός πρώτων βοηθειών και ασφάλειας είναι απαραίτητες για την εύρυθμη λειτουργία μιας μαρίνας.

Όσον αφορά τον ελληνικό χώρο, έχει παρατηρηθεί, ότι σε αντίθεση με το μέγεθος και την ποιότητα των φυσικών πόρων που διαθέτει η χώρα μας, οι οποίοι ενδείκνυνται για την ανάπτυξη του θαλάσσιου τουρισμού, η Ελλάδα υστερεί ποσοτικά και ποιοτικά έναντι των άλλων Μεσογειακών χωρών στην ανάπτυξη δικτύων λιμένων σκαφών αναψυχής. Ιδιαίτερα έντονη γίνεται η αντίθεση με τις γειτονικές χώρες (Κροατία, Τουρκία) που έχουν μεγάλη δραστηριότητα στον τομέα αυτό (Καμαρινάκης, 1997).

Πίνακας 2.1 Μαρίνες στην Ελλάδα (Πηγή: World Marine guide)

Μαρίνα	Μέγιστο βάθος (m)	Πλάτος ανοίγματος (m)	Ικανότητα Ελλιμενισμού (Σκάφη)
<b>Ιόνιο Πέλαγος</b>			
Αργοστόλι (Κεφαλονιά)	3.5	30	250
Κλεοπάτρα (Πρέβεζα)	8	30	100
Γουβιά (Κέρκυρα)	5.5	80	1235
Καλαμάτα	3	25	250
Λευκάδα	4	40	630
Τζιρόνια	4	82	150
Οδυσσεάς (Μεγανήσι)	8	60	68
Πάτρα	3	45	450
<b>Αιγαίο Πέλαγος</b>			
Άλιμος	6.5	40	1000
Φλοίσβος	-	70	303
Κως	-	40	250
Λακκί (Λέρος)	5	38	45
Μανδράκι (Ρόδος)	-	50	120
Μέθανα	3	25	70
Ολυμπία (Σούνιο)	-	65	680
Πόρτο Καρράς (Χαλκιδική)	5	35	315
Sani Resort (Χαλκιδική)	3	24	215
Αρετσού (Καλαμαριά)	-	30	242
Βουλιαγμένη	5.5	55	115
Ζέα (Πειραιάς)	9	80	670
<b>Κρήτη</b>			
Αγ. Νικόλαος	4.5	50	255
Γούβες (Ηράκλειο)	3	18	74
Ηράκλειο	-	40	130
Ρέθυμνο	3.5	40	174

Οι μαρίνες είναι παράκτια έργα που σχετίζονται με την ανάπτυξη μιας χώρας. Σε παγκόσμιο επίπεδο λοιπόν, η κατασκευή και αξιοποίηση τους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται η ικανότητα ελλιμενισμού και τα βασικά χαρακτηριστικά μαρίνων που έχουν κατασκευαστεί σε χώρες της Μεσογείου.

Πίνακας 2.2 Μαρίνες στη Μεσόγειο θάλασσα (Πηγή: World Marine guide)

<b>Μαρίνα</b>	<b>Μέγιστο βάθος (m)</b>	<b>Πλάτος ανοίγματος (m)</b>	<b>Ικανότητα Ελλιμενισμού (Σκάφη)</b>
<b>Finike (Τουρκία)</b>	5	90	350
<b>Kas (Τουρκία)</b>	15	150	472
<b>Limassol (Κύπρος)</b>	22	100	800
<b>Karraz Gate (Κύπρος)</b>	5.5	55	300
<b>Mandalina (Κροατία)</b>	-	140	350
<b>Kornati (Κροατία)</b>	6.5	40	450
<b>Villa Igiea Palmero(Σικελία)</b>	9.5	65	380
<b>Brindisi (Ιταλία)</b>	11	35	638
<b>Rimini (Ιταλία)</b>	5	35	622
<b>St Elmo (Σαρδηνία)</b>	4.8	60	100
<b>Manoel Island (Μάλτα)</b>	9	110	245
<b>Esterona (Ισπανία)</b>	4	35	447
<b>Atunara (Ισπανία)</b>	3	16	323
<b>Villefranche (Γαλλία)</b>	4	30	560
<b>Napolean (Γαλλία)</b>	4.5	30	360
<b>Yasmine (Τυνησία)</b>	6	110	700
<b>Bizerte (Τυνησία)</b>	12	110	800
<b>Herzliya (Ισραήλ)</b>	6	35	680
<b>Tel Aviv (Ισραήλ)</b>	-	20	320
<b>Ocean Village (Γιβραλτάρ)</b>	4.5	100	323



Στον παραπάνω πίνακα, παρουσιάζονται μαρίνες σε διάφορες χώρες της Μεσογείου, προκειμένου να συγκριθούν η ικανότητα ελλιμενισμού αλλά και τα κατασκευαστικά στοιχεία που αφορούν το πλάτος ανοίγματος εισόδου και το μέγιστο κατασκευαστικό βάθος τους με τα αντίστοιχα στοιχεία που αφορούν τον ελληνικό χώρο. Το μέγιστο βάθος κυμαίνεται μεταξύ 3-22 m, ενώ το πλάτος ανοίγματος εισόδου από 15 έως 150 m ανάλογα με τη φυσιογραφία της περιοχής, το ανεμολογικό και κυματικό καθεστώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των σκαφών που πρόκειται να φιλοξενήσει η μαρίνα.

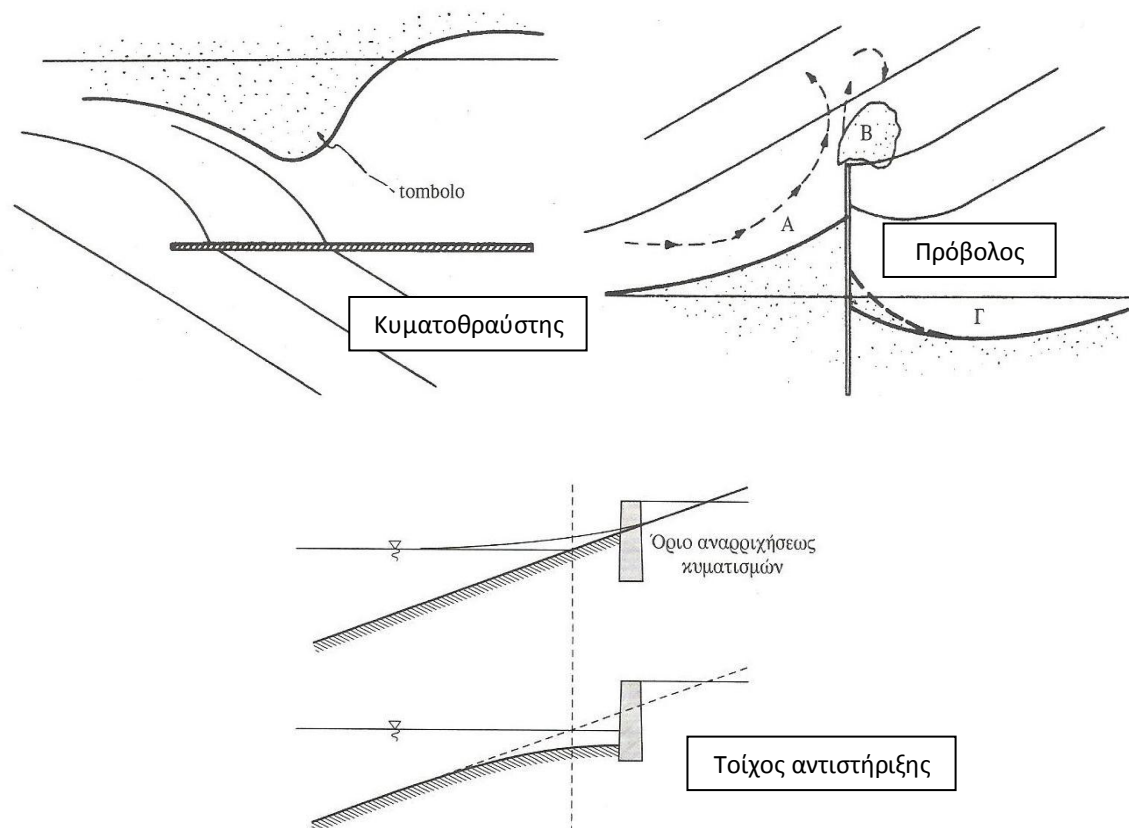
## **2.2 Αλληλεπίδραση παράκτιου περιβάλλοντος – τεχνικών έργων**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το παράκτιο περιβάλλον χαρακτηρίζεται από μια δυναμική ισορροπία, όσον αφορά το ισοζύγιο των φερτών υλών. Η παρουσία παράκτιων έργων στο φυσικό περιβάλλον διαταράσσει την προαναφερθείσα ισορροπία καθώς αναμορφώνει τα κυματολογικά δεδομένα με την προκαλούμενη ανάκλαση, περίθλαση και θραύση λόγω ρηχότητας σε περιοχές που δε συνέβαινε πριν, αλλά και με την παρέμβασή τους μέσα στη ζώνη θραύσης όσον αφορά τις διαδικασίες της στερεομεταφοράς. Τα τεχνικά έργα επηρεάζουν τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ακτή, με το εύρος να είναι ανάλογο του μεγέθους της παρέμβασης, ενώ κι αυτά με τη σειρά τους επηρεάζονται καθώς τοπικά καταγράφεται απόθεση ή διάβρωση ιζημάτων. Είναι λοιπόν ευνόητο ότι συντελείται μια αμφιμονοσήμαντη επιρροή μεταξύ παράκτιων έργων-παράκτιου περιβάλλοντος.

Γενικά, παρατηρείται απόθεση ιζημάτων ανάντη των τεχνικών έργων, η οποία οφείλεται στην αύξηση της ταχύτητας ροής κατά μήκος της ακτής λόγω της παρουσίας του έργου και κατά συνέπεια στην αύξηση της δυνατότητας μεταφοράς ιζημάτων. Στη ζώνη αμέσως στα κατάντη του έργου, υπάρχει απόθεση φερτών, η οποία λαμβάνει χώρα λόγω απουσίας δυνάμεων παράσυρσης. Η εμφανιζόμενη διάβρωση της ακτής στα κατάντη του έργου οφείλεται στην απουσία ιζημάτων για παράσυρση από το ρεύμα κατά μήκος της ακτής και σε μείωση της ταχύτητας ροής. Σημειώνεται, ότι η μείωση της ταχύτητας ροής οφείλεται είτε σε ανάκλαση της ενέργειας και περίθλαση, όπως συμβαίνει στην περίπτωση ενός μόλου, είτε σε ανυπαρξία συνθηκών θραύσης λόγω αύξησης του βάθους πυθμένα, όπως συμβαίνει σε μια περίπτωση βυθοκορημένου δίαυλου ναυσιπλοΐας. Οι προαναφερθείσες διαφοροποιήσεις είναι μεγάλης χρονικής κλίμακας και περιγράφουν τις μέσες μεταβολές

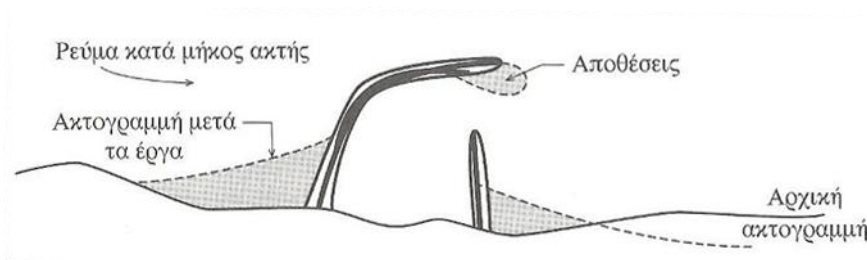
της ακτής. Σημειώνεται, ότι σε μικρότερη χρονική κλίμακα, δεν αποκλείονται μεταβολές αντίθετες των προαναφερθέντων.

Οι παραπάνω διαδικασίες αφορούν όλα τα παράκτια τεχνικά έργα. Στην περίπτωση κυματοθραυστών παράλληλων με την ακτή, καταγράφεται αλλαγή της κατεύθυνσης και του ύψους κύματος λόγω περιθλάσεως. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παγίδευση ποσοτήτων φερτών στο τμήμα της ζώνης θραύσης πίσω από το έργο, προκαλώντας προσάμμωση και την εμφάνιση “tombolo” που τείνει να ενώσει το έργο με την ακτή. Έργα κάθετα στην ακτογραμμή, όπως πρόβολοι ή μόλοι, λειτουργούν ως παγίδες φερτών λόγω στροβίλων αδρανειακής αποκολλήσεως από το άκρο τους που αναμορφώνουν το παράκτιο ρεύμα. Τοίχοι αντιστήριξης κατασκευασμένοι παράλληλα στην ακτογραμμή, οι οποίοι τοποθετούνται μέσα στη ζώνη αναρρίχησης, προκαλούν ανάκλαση του κύματος και διάβρωση της ακτής μπροστά τους, με κίνδυνο υποσκαφής αν η θεμελίωση τους δε γίνει σε επαρκές βάθος. Τα παραπάνω συνοψίζονται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Αλληλεπίδραση τεχνικών έργων-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Κουτίτας, 1998)

Στην περίπτωση λιμένα ή μαρίνας, που είναι προσανατολισμένοι προς τους κυματισμούς, παρατηρείται παγίδευση φερτών, τα οποία εισέρχονται από το κυματικά διαταραγμένο περιβάλλον και αποθέτονται στο αδιατάρακτο χώρο της λιμενολεκάνης. Οι μεγάλες διαφορές ταχύτητας μεταξύ της περιοχής ανάντη της λιμενολεκάνης και της περιοχής εισόδου και εσωτερικού αυτής προκαλούν καθίζηση των φερτών. Οι προσαμμώσεις λαμβάνουν χώρα με βάση τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και καταγράφονται κυρίως στην είσοδο αυτής, στη θαλάσσια ζώνη ανάντη του έργου ή στο δίαυλο εισόδου, αν υπάρχει. Σε μια μαρίνα, πέραν των αλληλεπιδράσεων με την ακτή και της κατάντη διάβρωσης που θα λάβει χώρα, υπάρχει ο κίνδυνος, αν το βάθος κατασκευής ως προς την εξυπηρέτηση του βυθίσματος των σκαφών είναι οριακό, η παρουσία και καθίζηση των ιζημάτων να καταστήσει μη λειτουργική τη μαρίνα, εμποδίζοντας τα σκάφη να εισέλθουν σε αυτή.



Σχήμα 2.2 Αλληλεπίδραση μαρίνας-παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μέμος, 2008)

### 2.3 Προσαμμώσεις σε μαρίνες

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πρόβλημα σε μια μαρίνα ή ένα λιμάνι, έγκειται στο γεγονός, ότι πέρα από τα ζητήματα που συνεπάγεται μια τέτοιου μεγέθους παρέμβαση στο παράκτιο περιβάλλον και σχετίζεται με τη μεταφορά ιζημάτων (διάβρωση στα κατάντη του έργου), οι διαδικασίες στερεομεταφοράς επηρεάζουν το ίδιο το έργο το οποίο μπορεί να καταστήσουν ανενεργό και ακατάλληλο προς χρήση. Όσον αφορά τις μαρίνες, αυτό εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, πολλές φορές αλληλοεμπλεκόμενους μεταξύ τους. Κατ' αρχάς, βαρυσήμαντο ρόλο διαδραματίζει το είδος του ιζήματος. Γενικά, όσο πιο λεπτόκοκκο είναι το ίζημα τόσο πιο εύκολα μεταφέρεται. Επίσης, αναφορικά με το ίζημα, συνεκτικά ιζήματα δημιουργούν ισχυρότερα προβλήματα σε σχέση με τα αμμώδη, καθώς

εκτοπίζουν το νερό δημιουργώντας ένα αδιαπέρατο στρώμα. Μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι το κυματικό και το ανεμολογικό καθεστώς, αφού η ένταση των δημιουργούμενων ρευμάτων είναι ανάλογη με την ποσότητα ιζήματος που θα μεταφερθεί και όσο εντονότερη είναι η θραύση, τόσο περισσότερη ποσότητα θα θέσει σε κίνηση απομακρύνοντας την από τον πυθμένα. Επίσης, η ύπαρξη παλιρροιών στην περιοχή ενισχύει την μεταφορά ιζημάτων, καθώς τα παλιρροιακά ρεύματα δρουν προς την κατεύθυνση αυτή. Ακόμη, αν υπάρχουν υδατορεύματα που εκβάλλουν κοντά στην περιοχή κατασκευής ενός έργου, αυτό συνιστά μια κοθοριστική αιτία προσαμμώσεων στη μαρίνα. Σημαντικό ρόλο ακόμα διαδραματίζει η γεωμετρία της μαρίνας και κυρίως η είσοδος της, καθώς, όσο πιο ευρεία είναι, τόσο πιο εύκολα εισέρχονται στο εσωτερικό της φερτά υλικά.

Πέραν όμως της ποσότητας ιζήματος που θα μεταφερθεί στην περιοχή στην οποία έχει κατασκευαστεί το τεχνικό έργο, είναι μείζονος σημασίας σε ποιο βαθμό αυτό θα καθιζάνει στη λιμενολεκάνη. Σε αυτό, ένας σημαντικός παράγοντας, όπως έχει διαπιστωθεί, είναι η πυκνότητα των υδάτων, καθώς όσο πιο ισχυρή στρωμάτωση καταγράφεται, τόσο πιο εύκολα καθιζάνει το ίζημα. Το παραπάνω καταδεικνύεται από μετρήσεις στερεομεταφοράς που έδειξαν ότι οι προσαμμώσεις ήταν σημαντικά πιο έντονες σε αλμυρά και υφάλμυρα ύδατα σε σχέση με ύδατα χαμηλής αλατότητας (Nasner, 1992).

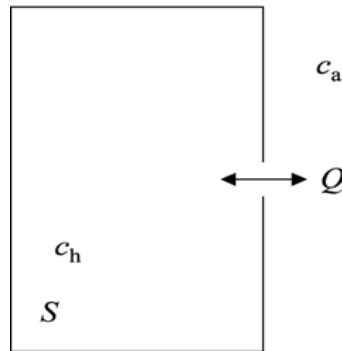
### **2.3.1 Εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες στερεομεταφοράς σε μαρίνες**

Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα νερά στη λιμενολεκάνη μιας μαρίνας είναι σχετικά ήρεμα, το εσωτερικό αυτής είναι επιρρεπές σε προσαμμώσεις. Τα ύδατα της λεκάνης έρχονται σε επαφή με αυτά εκτός της λεκάνης, τα οποία εμπεριέχουν ιζήματα, διαμέσου της εισόδου αυτής. Μόλις τα ιζήματα εισέρχονται στη λεκάνη, τείνουν να καθιζάνουν λόγω των χαμηλών ταχυτήτων ροής. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια μέθοδος για τον υπολογισμό του ρυθμού προσάμμωσης στη λιμενολεκάνη.

Η διαφορική εξίσωση που διέπει το προαναφερθέν φαινόμενο και δίνει το ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης  $c_h$  ως προς το χρόνο  $t$  είναι η εξής :

$$\frac{dc_h}{dt} = \frac{Q}{V_e} (c_a - c_h) \left( \frac{Q}{V_e} + \frac{aW_f}{d} \right) \quad (2.1)$$

όπου  $Q$  ο ρυθμός ανταλλαγής ροής,  $V_e$  ο όγκος της λιμενολεκάνης,  $c_a$  η συγκέντρωση ιζήματος του περιβάλλοντος (εκτός λιμενολεκάνης),  $W_f$  η ταχύτητα καθίζησης,  $\alpha$  συντελεστής που παίρνει τιμές (0,1,10) και  $d$  το βάθος του λιμένα.



Σχήμα 2.3 Ανταλλαγή υδάτων μεταξύ μαρίνας και περιβάλλοντος διαμέσου της εισόδου (PIANC, 2008)

Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική συνθήκη, δηλαδή ότι για  $t=0$  ισχύει ότι  $c_h=c_0$ , όπου  $c_0$  η αρχική συγκέντρωση της λιμενολεκάνης σε ιζήματα, πριν έρθει σε επαφή με το περιβάλλον, η προαναφερθείσα εξίσωση γίνεται:

$$c_h = \frac{Q}{Q + \alpha S W_f} c_a + \left( c_0 - \frac{Q}{Q + \alpha S W_f} c_a \right) \exp \left\{ - \left( \frac{Q}{V_e} + \frac{\alpha W_f}{d} \right) t \right\} \quad (2.2)$$

$$= c_e + (c_0 - c_e) \exp \left\{ - \left( \frac{Q}{V_e} + \frac{\alpha W_f}{d} \right) t \right\}$$

όπου  $S$  η επιφάνεια της λιμενολεκάνης,  $c_e$  η συγκέντρωση ισορροπίας της λεκάνης που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$c_e = \frac{Q c_a}{Q + \alpha S W_f} \quad (2.3)$$

Ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων ιζημάτων στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση της λιμενολεκάνης είναι  $T_h=V_e/Q$  και  $T_v=d/\alpha W_f$ , αντίστοιχα. Ο ρυθμός προσάμμωσης στο εσωτερικό της λεκάνης  $F_s$ , λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_s = \left[ \frac{T_V}{T_h + T_V} + \left( \frac{c_0}{c_a} - \frac{T_V}{T_h + T_V} \right) \exp \left\{ - \left( \frac{1}{T_h} + \frac{1}{T_V} \right) t \right\} \right] aSW_f c_a \quad (2.4)$$

Αν θεωρηθεί ότι ο χρόνος κατά την κατακόρυφο είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν κατά την οριζόντια, ήτοι  $T_V \gg T_h$  η προαναφερθείσα σχέση γίνεται:

$$F_s = \left[ 1 + \left( \frac{c_0}{c_a} - 1 \right) \exp \left\{ - \frac{t}{T_h} \right\} \right] aSW_f c_a = aSW_f c_a \quad (2.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι η συγκέντρωση ιζημάτων στη λεκάνη  $c_h$  ακολουθεί τη συγκέντρωση περιβάλλοντος  $c_a$  κατά χρονική υστέρηση ανάλογη προς το χρόνο παραμονής στην οριζόντια διεύθυνση  $T_h$ . Αυτό σημαίνει ότι για  $T_V \gg T_h$ , ο ρυθμός προσάμμισης στο εσωτερικό της λεκάνης  $F_s$  γίνεται σχεδόν ανεξάρτητος από το ρυθμό ανταλλαγής ροής  $Q$ . Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μείωση του  $Q$  με κάποιο τρόπο δε θα μειώσει ή θα επιδράσει μόνο οριακά στη μείωση του ρυθμού προσάμμισης στο εσωτερικό της λεκάνης. Σε άλλες περιπτώσεις, η μείωση του  $Q$  επηρεάζει το  $F_s$  και μπορεί μάλιστα να επιτελέσει καθοριστικό ρόλο στην ελαχιστοποίησή του.

Για σημαντικά μικρές λεκάνες, ο ρυθμός προσάμμισης ημι-ισορροπίας στο εσωτερικό της λεκάνης  $F_{s,T^*}$  για μια χαρακτηριστική περίοδο  $T^*$  δίνεται από την εξής σχέση:

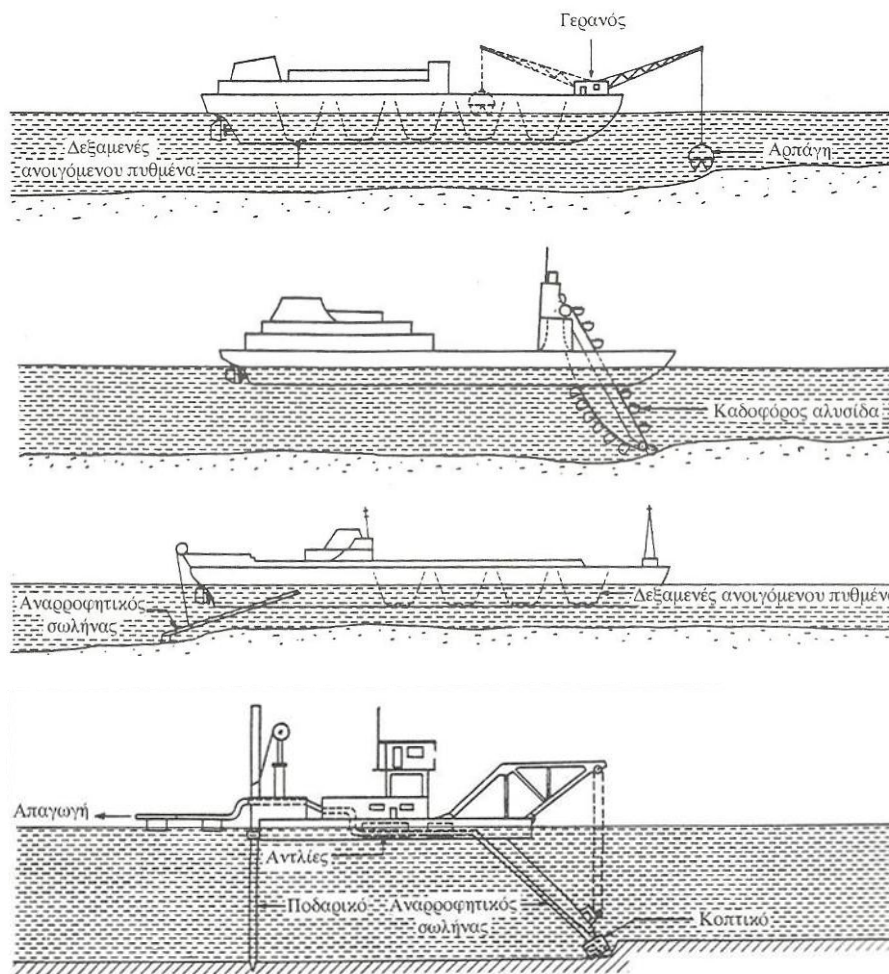
$$F_{s,T^*} = SW_f \frac{Q}{Q + SW_f} c_a T^* \quad (2.6)$$

## 2.4 Βυθοκορήσεις

Όπως είναι ευνόητο, η φύση του προβλήματος είναι τέτοια που οι λύσεις πρέπει να είναι άμεσες και αποτελεσματικές. Η πιο κοινή πρακτική αντιμετώπισης των προσαμμώσεων είναι οι βυθοκορήσεις (maintenance dredging), δηλαδή η εκσκαφή, μεταφορά και απόθεση του εδαφικού υλικού που δημιουργεί πρόβλημα στη μαρίνα. Πολλά εκατομμύρια κυβικά μέτρα ιζήματος βυθοκορούνται ετησίως από παράκτιες περιοχές ανάντη λιμένων, κανάλια και λιμενολεκάνες, προκειμένου να διασφαλιστεί η ομαλή ναυσιπλοΐα. Οι όγκοι αυτοί αναμένεται να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια λόγω της συνεχιζόμενης οικονομικής ανάπτυξης και των κατασκευαστικών απαιτήσεων στο βύθισμα πλοίου.

### 2.4.1 Είδη βυθοκόρων

Κατ' αρχάς, η πιο διαδεδομένη διάταξη στη χώρα μας είναι η βυθοκόρος με αρπάγες (grab dredger). Εμπεριέχει γερανούς με αρπάγες που συγκεντρώνουν το ίζημα και το εναποθέτουν σε προκαθορισμένη θαλάσσια περιοχή, γεγονός που αποτελεί επιβάρυνση για το περιβάλλον. Συγκεντρώνουν υλικό έως και μέτριας σκληρότητας. Επίσης, χρησιμοποιούνται βυθοκόροι με κάδους (bucket dredgers), αυτοκινούμενες ή μη, εφοδιασμένες με ατέρμονα καδοφόρες αλυσίδες που στηρίζονται σε στέλεχος.



Σχήμα 2.4 Είδη βυθοκόρων (Μέμος, 2008)

Λόγω της ελεύθερης διαδρομής των βυθοκορημάτων δημιουργούνται σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα, γι αυτό και οι βυθοκόροι με κάδους τείνουν να εξαλειφθούν. Η τελευταία κατηγορία, και η πιο διαδεδομένη παγκοσμίως είναι οι αναρροφητικές βυθοκόροι (suction dredgers). Αυτές λειτουργούν με τη βοήθεια αντλητικών

συγκροτημάτων και σωληνώσεων, γι αυτό και καλούνται υδραυλικές. Απαντώνται σε μεγάλη ποικιλία, ενώ λειτουργούν αναρροφώντας τα ιζήματα με σωλήνα και στη συνέχεια, είτε τα αποθέτουν άμεσα είτε τα αποθηκεύουν προσωρινά σε ειδικές δεξαμενές του σκάφους. Όταν υπάρχουν σκληρά υλικά εφοδιάζονται με κοπτικά εξαρτήματα αλλά υπάρχει και η δυνατότητα χρήσεως εκτοξευτήρα νερού ή αέρα υπό πίεση για αποδόμηση των πετρωμάτων. Μια άλλη παράμετρος που τις κάνει να κυριαρχούν σε σχέση με τις προαναφερθείσες είναι το γεγονός ότι είναι οι πλέον φιλικές προς το περιβάλλον. Τα είδη των βυθοκόρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4.

#### **2.4.2 Κόστος και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι βυθοκορήσεων**

Οι βυθοκορήσεις είναι απαραίτητες σε μεγάλα εμπορικά λιμάνια αλλά και σε μαρίνες και το κόστος τους μπορεί να απειλήσει την οικονομική βιωσιμότητα αμφοτέρων. Η λύση της βυθοκορήσης δεν είναι μόνιμη, καθώς εργασίες εξόρυξης και απομάκρυνσης εδαφικού υλικού πρέπει να λαμβάνουν χώρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, συνήθως ανά κάποια έτη. Επίσης, το κόστος τέτοιων διεργασιών είναι σημαντικό και σε πολλές περιπτώσεις δημιουργούνται σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα.

Το κόστος και η έκταση των βυθοκορήσεων για τη διατήρηση της λειτουργικότητας ενός λιμένα ή μιας μαρίνας, όσον αφορά τα ιζήματα (maintenance dredging) είναι διόλου ευκαταφρόνητο. Αξίζει να αναφερθούν κάποια παραδείγματα που να στοιχειοθετούν την προαναφερθείσα άποψη. Το λιμάνι της περιοχής Neustadt στη Βρέμη της Γερμανίας εκτάσεως 290000 m<sup>2</sup> με έντονη παρουσία παλιρροιακών ρευμάτων αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα, αφού με ιζηματομεταφορά 257000 m<sup>3</sup>/έτος (μετρήσεις περιόδου 1986-1964), το συνολικό κόστος εκσκαφής, μεταφοράς και απόθεσης των βυθοκορημάτων έφτασε τα 6.8 εκατομμύρια €/έτος (Pianc, 2008). Ένα ακόμη παράδειγμα αποτελεί το λιμάνι του Bremerhaven στη Βόρεια Θάλασσα, στα δυτικά της Γερμανίας, εκτάσεως 187000 m<sup>2</sup> με έντονη την παρουσία παλιρροιακών ρευμάτων και ρευμάτων πυκνότητας. Ο ρυθμός της στερεομεταφοράς φτάνει τα 350000 m<sup>3</sup>/έτος (μετρήσεις περιόδου 1986-1964) και το κόστος βυθοκορήσεων ξεπερνά τα 10 εκατομμύρια € ετησίως. Ένα τελευταίο παράδειγμα, πιο πρόσφατο, είναι το λιμάνι Maruto στη Δανία στο οποίο πρόκειται να λάβουν χώρα εργασίες βυθοκορήσης ώστε να αποκαταστήσει το βάθος σχεδιασμού στα -11m, το οποίο αυξήθηκε από το αρχικό βάθος -9.4 m τα τελευταία χρόνια. Πρόκειται να αφαιρεθεί



500000 m<sup>3</sup> αργιλώδους και 800000 m<sup>3</sup> αμμώδους υλικού από τα κανάλια πρόσβασης και το εσωτερικό του λιμένα. Άλλες περιπτώσεις που καταδεικνύουν τους όγκους φερτών που απαιτείται να βυθοκορούνται ετησίως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3 Ρυθμοί στερεομεταφοράς σε λιμενολεκάνες στην Ευρώπη, την Ασία και τις ΗΠΑ (PIANC, 2008)

Harbour sites Europe, Asia, USA	Distance to open sea (km)	A <sub>basin</sub> (10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> )	A <sub>entrance</sub> below MSL (m <sup>2</sup> )	Tidal range and duration (m)	Peak tidal current outside entrance u <sub>o</sub> (m/s)	Concentration outside (yearly-average) c <sub>o</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Density difference Δρ <sub>o,max</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Sedimentation volume per year (dredging volume) (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /yr)	Sedimentation thickness (m/yr)
Um Qasr, Khor al Zubair, (Shatt al Arab), Irak (DH, 1981)	7	1.2	A=4100 (b=300, h <sub>o</sub> =13.5 m)	2.2-3.7 (12 h)	1-2	0.2-0.4 (soft clayey silt) w <sub>s</sub> =0.1-0.3 mm/s	1.5	1.3	1.1
Bintulu Port <sup>1)</sup> Sarawak, Indonesia (DH, 1991)	0-1	0.82	A=1875 (b=125, h <sub>o</sub> =15 m)	1 (24 h)	0.1	0.05 (mud)	1-2	0.077 (1982-1988)	0.1
New Mangalore Port Kerala coast, ZW India (DH, 1994)	0-1	1.1	A=3400-3700 (h <sub>o</sub> =11.5-13.5 m)	1 (12 h)	0.1-0.3	0.05 0.4 (monsoon period)	0-0.3 (river outflow at 10 km)	0.9 (1982-1997)	0.8
Mayport Naval Basin, Florida, USA (Headland, 1991)	3	0.5	A=2300 (b=185, h <sub>o</sub> =12.5)	1.5 (12 h)	0.7	0.01-0.04 (mud; 0.02 mm)	1-3	0.38	0.75
Parkhafen Hamburg, Germany (DH, 1992, 2001)	100	1.5	A=8650 (b=515, h <sub>o</sub> =16.8)	3.2 (12 h)	1	0.05-0.1	0	0.13-0.52 (1977-1995)	0.1-0.35

Όσον αφορά τον ελληνικό χώρο, τα μεγαλύτερα προβλήματα εμφανίζονται στα λιμάνια της Αλεξανδρούπολης, λόγω των φερτών που εισρέουν από τον ποταμό Εύρο και της Ηγουμενίτσας. Ενδεικτικά αναφέρονται στοιχεία που αφορούν τη βυθοκόρηση που έλαβε χώρα στα λιμάνια του Πειραιά και της Πάτρας το 2009. Ο όγκος των βυθοκορημένων ιζημάτων έφτασε τα 150000 m<sup>3</sup> σε αμφότερα. Η κατάσταση λαμβάνει ακόμη μεγαλύτερη σημασία αν σκεφτεί κανείς ότι αυτή η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται, ανάλογα με την έκταση του προβλήματος, ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Οι πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βυθοκόρησης συντήρησης είναι γενικά δύο. Κατ' αρχάς, μπορεί να είναι αποτέλεσμα της διαδικασίας εκβάθυνσης ή συνέπεια της απόθεσης του υλικού βυθοκόρησης. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκβάθυνσης μπορεί να προκύψουν προβλήματα λόγω της ανασκαφής των ιζημάτων στον πυθμένα, όπως

απώλεια υλικού κατά τη μεταφορά προς την επιφάνεια, υπερχείλιση υλικού από τη βυθοκόρο κατά τη φόρτωση και απώλεια υλικού από την βυθοκόρο κατά τη μεταφορά.

Λόγω του κόστους της εκβάθυνσης και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, έχει προκύψει η ανάγκη να υπάρξει μείωση του όγκου βυθοκόρησης και να δοθεί έμφαση σε μεθόδους μόνιμου χαρακτήρα που κρατούν τα ιζήματα στο σύστημα (Keep Sediments In the System, KSIS) κατά το βαθμό που είναι δυνατόν.

## **2.5 Εναλλακτικοί τρόποι αντιμετώπισης προσαμμώσεων**

Είναι γεγονός ότι πολλές λεκάνες κατά μήκος ποταμών και ακτών υποφέρουν από προσαμμώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να απαιτούνται βυθοκορήσεις για τη διατήρηση της λειτουργικότητας της λιμενολεκάνης και της ομαλής ναυσιπλοΐας, το κόστος των οποίων είναι πολύ υψηλό (L.C. van Rijn, 1993). Μικρά λιμάνια, όπως μαρίνες είναι από οικονομική άποψη, πολύ πιο ευάλωτα από τα εμπορικά λιμάνια και μπορεί ακόμη και να κινδυνεύουν να τεθούν εκτός λειτουργίας εάν δεν ληφθούν μέτρα για την μείωση των ιζημάτων που συγκεντρώνονται στην περιοχή αυτή.

Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, έχουν σχεδιαστεί εναλλακτικές στρατηγικές προστασίας από τις προσαμμώσεις, πέραν των βυθοκορήσεων, οι οποίες μάλιστα έχουν μόνιμο χαρακτήρα. Τα μέτρα αυτά διακρίνονται σε ενεργητικά ή παθητικά ανάλογα με το αν απαιτείται κατανάλωση ενέργειας και υπάρχουν κινούμενα μέρη. Μια άλλη διάκριση έχει να κάνει με το σκοπό που στοχεύεται να επιτελέσουν. Διακρίνονται τρεις κατηγορίες: (α) τα μέτρα που σαν στόχο έχουν να κρατήσουν τα ιζήματα εκτός της λιμενολεκάνης (Keep sediments out, KSO), (β) τα μέτρα που στοχεύουν να κρατήσουν τα ιζήματα σε κίνηση ώστε να μην καθιζάνουν στη λιμενολεκάνη (Keep sediments moving, KSM) και (γ) τα μέτρα που στοχεύουν να μην απομακρύνουν τα ιζήματα αλλά να δημιουργήσουν τις κατάλληλες συνθήκες ώστε τα σκάφη να μπορούν να διέρχονται μέσα από τη μάζα τους (Keep sediments navigable, KSN).

### **2.5.1 Βασικές αρχές λειτουργίας**

Προκειμένου να επιτευχθεί μείωση των προσαμμώσεων σε ένα λιμένα ή μια μαρίνα, και πριν αναφερθούν συγκεκριμένες μέθοδοι, αξίζει να καταγραφούν οι βασικές αρχές που διέπουν τις μεθόδους αυτές (L.C. van Rijn, 1993):

- Κατασκευή ορθογώνιας εισόδου λιμενολεκάνης με ελάχιστες διαστάσεις (πλάτος και βάθος)
- Εξορθολογισμός της γεωμετρίας εισόδου ώστε να μειωθεί κατά το δυνατόν η εμφάνιση και η ένταση των δινών που έχουν ως αποτέλεσμα την οριζόντια ανάμειξη
- Μείωση των διαφορών πυκνότητας μεταξύ του περιβάλλοντος εκτός λιμενολεκάνης και του εσωτερικού αυτής
- Κατασκευή κατάλληλων δομών στην είσοδο για τη μείωση ανταλλαγής νερού μεταξύ εσωτερικού λιμενολεκάνης και εξωτερικού περιβάλλοντος
- Μείωση του χρόνου κατακράτησης του νερού στη λιμενολεκάνη ώστε να μειωθεί η παγίδευση των ιζημάτων με τον εξορθολογισμό της γεωμετρίας εισόδου
- Σε περιπτώσεις με έντονα παλιρροιακά ρεύματα απαιτείται μείωση της συγκέντρωσης των ιζημάτων του νερού που εισέρχεται κατά τη διάρκεια της φάσης της πλημμυρίδας κατά τον παλιρροϊκό κύκλο. Η λεκάνη πρέπει να πληρωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο με το νερό που προέρχεται από τα ανώτερα στρώματα, όπου οι συγκεντρώσεις των ιζημάτων είναι μικρότερες.

### 2.5.2 Μέθοδοι μείωσης των προσαμμώσεων

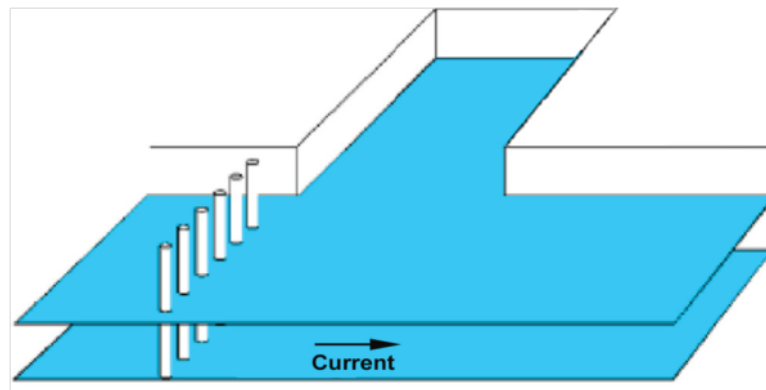
Ακολούθως, περιγράφονται μέθοδοι που σαν στόχο έχουν τη μείωση των προσαμμώσεων σε μια μαρίνα και αφορούν τη βελτίωση της γεωμετρίας της εισόδου, κατασκευές στον εγγύς χώρο αυτής και συστήματα επαναιώρησης των ιζημάτων.

- **Συστοιχία πασσάλων ανάντη της λιμενολεκάνης (Pile array)**

Η ανάμειξη των υδάτων του εξωτερικού περιβάλλοντος της λιμενολεκάνης και του εσωτερικού αυτής μπορεί να μειωθεί αν ελαττωθεί η μεταβολή της ταχύτητας ροής μεταξύ των δύο περιοχών. Μια συστοιχία πασσάλων, η οποία μπορεί να εγκατασταθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 ανάντη της εισόδου της μαρίνας, επιδρά στην ομαλή μετάβαση της ταχύτητας μεταξύ του εξωτερικού περιβάλλοντος και του εσωτερικού της λεκάνης. Δοκιμές έχουν δείξει ότι μια διαπερατή συστοιχία πασσάλων μπορεί να μειώσει την ανταλλαγή ρευστού μέχρι και 50% (Van Schijndel & Kranenburg, 1998). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διάταξη αυτή θα πρέπει να κατασκευάζεται σε περιορισμένη έκταση προκειμένου να

διευκολυνθεί η ευελιξία των σκαφών γύρω από τον είσοδο της μαρίνας. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε ύδατα με πολύ μεγάλη αλατότητα, μπορεί να προκληθεί κροκίδωση η οποία θα μπορούσε να αυξήσει την ταχύτητα καθίζησης και να επιδεινώσει τις προσαμμώσεις.

Κατασκευαστικά, το μήκος της διάταξης πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το 25% του πλάτους εισόδου. Επίσης, πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση περίπου 10%-15% του πλάτους εισόδου από την ανάντη παρειά. Οι αποστάσεις μεταξύ των πασσάλων πρέπει να είναι μεταβλητές, από μηδέν κοντά στη μαρίνα ως μια τιμή ίση με το πάχος του κάθε πασσάλου (περίπου 1.0 m).



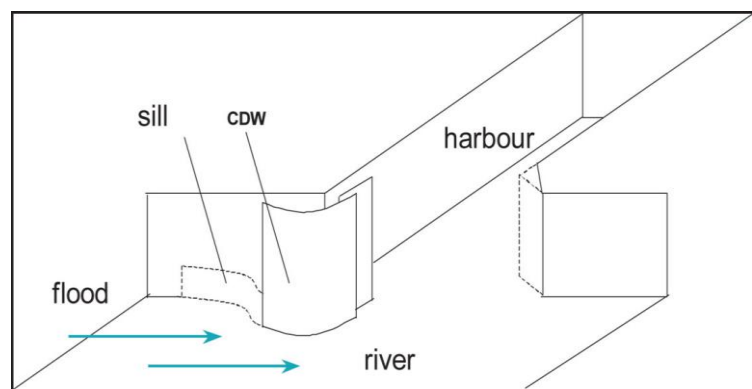
Σχήμα 2.5 Συστοιχία πασσάλων (Pile array), (PIANC, 2008)

- **Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος (Current deflecting wall)**

Ένα άλλο μέτρο μείωσης της εισροής φερτών στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης επικεντρώνεται στην τροποποίηση της ανάντη περιοχής της εισόδου ώστε να μεταβληθεί η κατεύθυνση που ακολουθεί το κυματογενές ρεύμα. Με αυτόν τον τρόπο, πρακτικά “μεταφέρεται” η περιοχή πιθανής καθίζησης των φερτών σε μια άλλη που θα επηρεάζει λιγότερο τη μαρίνα. Μια τέτοια διάταξη ονομάζεται τοίχωμα εκτροπής ρεύματος (Current deflecting wall) και παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6. Η διάταξη αποτελείται από τρία μέρη: ένα καμπυλωτό τοίχωμα, ένα κανάλι μεταξύ του τοιχώματος και της μαρίνας, και μια διάταξη ανάμεσά τους για την παγίδευση των φερτών (sill). Η καμπυλότητα του τοιχώματος οδηγεί στον περιορισμό του διαχωρισμού της ροής και μειώνει αμφότερους τους ρυθμούς ανάμειξης και συμπαράσυρσης των φερτών. Με κατάλληλη σχεδίαση, το στρώμα αναμίξεως μπορεί να οδηγηθεί μέσα στο κανάλι, μετατοπίζοντας έτσι και τους

μεγάλους ρυθμούς καθίζησης από την είσοδο της μαρίνας. Η παγίδευση φερτών (sill) κατακρατεί τα εισερχόμενα στο κανάλι φερτά ώστε να μην εισέλθουν διαμέσου αυτού στο εσωτερικό της μαρίνας. Τέλος, σε περίπτωση παλίρροιας, το τοίχωμα εκτροπής ρεύματος διευκολύνει την πλήρωση της λεκάνης μέσα από το κανάλι αντί της εισόδου της μαρίνας. Έτσι, λόγω της παρουσία της παγίδευσης (sill), η λεκάνη πληρώνεται με νερό απαλλαγμένο από φερτά.

Κατασκευαστικά, το συνολικό μήκος της διάταξης είναι περίπου 30%-40% του πλάτους εισόδου. Ένα τέτοιο μέσο έχει αναπτυχθεί και σχεδιασθεί από το H. Christiansen για λιμένα που επικοινωνεί με ποτάμι. Μια διάταξη όμως με τέτοια φιλοσοφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις μαρίνων σε θαλάσσιο περιβάλλον, αρκεί να μην καταγράφονται μεγάλες διαφορές πυκνότητας που συνεπάγονται μείωση της αποτελεσματικότητάς της λόγω στρωμάτωσης. Σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι μια τέτοια διάταξη έχει πολύ μεγάλο κόστος.

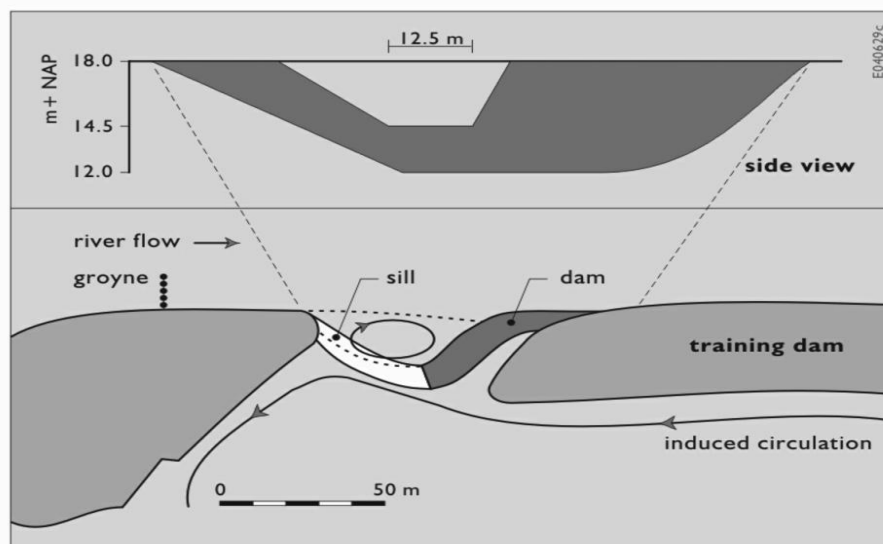


Σχήμα 2.6 Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος (Current deflecting wall), (PIANC, 2008)

- **Μείωση της διατομής εισόδου της μαρίνας - Κατώφλι εισόδου (Sill entrance)**

Το λεγόμενο κατώφλι εισόδου (Sill entrance) μειώνει τη διατομή της εισόδου της λιμενολεκάνης. Με δεδομένο ότι θα γίνει σωστή ευθυγράμμιση της στην είσοδο της μαρίνας, τόσο οι επιπτώσεις από τη μικρή κινητικότητα των φερτών στην περιοχή όσο και από τις δυνάμεις συμπαράσυρσης ιζήματος προς το εσωτερικό της μαρίνας μπορεί να μειωθεί (Van Schijndel & Kranenburg, 1998).

Η κατασκευή μιας τέτοιας διάταξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση προσαμμώσεων λόγω ρευμάτων πυκνότητας σε σχετικά μικρής κλίμακας κλειστές λιμενολεκάνες. Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ότι περιορίζει την πλοήγηση μέσα και έξω από τη λεκάνη καθώς μειώνει το βάθος εισόδου. Η λειτουργία της προαναφερθείσας διάταξης φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 2.7.

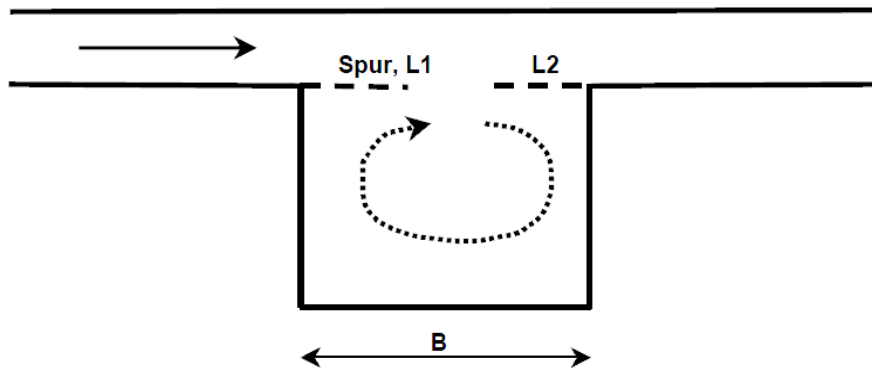


Σχήμα 2.7 Κατώφλι εισόδου (sill entrance), (PIANC, 2008)

- **Μείωση του ανοίγματος εισόδου της μαρίνας – σπιρούνι (spur)**

Ένα κατασκευαστικό μέτρο που μπορεί να εφαρμοστεί για τη μείωση της εισροής φερτών στη μαρίνα είναι ο περιορισμός του πλάτους ανοίγματος της λιμενολεκάνης. Είναι εύλογο, ότι όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος της εισόδου της μαρίνας, τόσο μεγαλύτερος όγκος φερτών θα εισρεύσει και τελικά θα καθιζάνει στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Αυτό μπορεί να γίνει με την κατασκευή του λεγόμενου σπιρουνιού (spur), που είναι τοίχωμα το οποίο κατασκευάζεται και στα δύο άκρα ή μόνο στο ανάντη σε σχέση με το ροή των ρευμάτων (Σχήμα 2.8) και παράλληλα προς αυτήν. Κατασκευαστικά, το μήκος του διάταξης μπορεί να φτάνει το 1/3 του πλάτους του ανοίγματος εισόδου και η κεφαλή του κατασκευάζεται στρογγυλεμένη. Αυτό που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη σε μια τέτοια παρέμβαση είναι να μην εμποδίζεται η λειτουργικότητα της μαρίνας ως προς τη διέλευση των σκαφών.



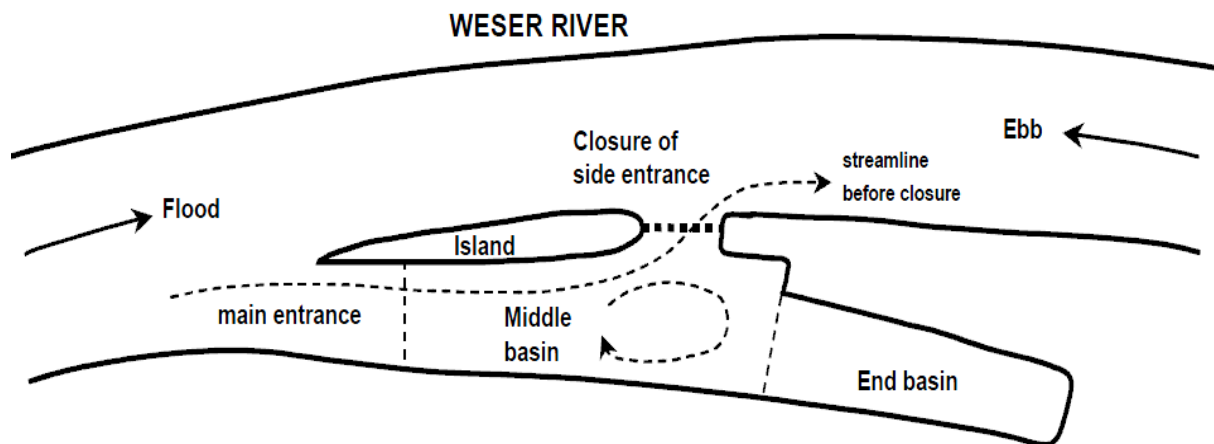
Σχήμα 2.8 Σπιρούνι (spur), (PIANC, 2008)

- **Έμφραξη της εισόδου (Lock)**

Η πιο δραστική λύση στην είσοδο μίας λεκάνης είναι η κατασκευή μιας διάταξης έμφραξης της εισόδου (Lock), η οποία μπορεί να προσφέρει μια καλή λύση για σχετικά μεγάλες λεκάνες σε συνθήκες με έντονα παλιρροιακά ρεύματα, ρεύματα πυκνότητας και μεγάλες συγκεντρώσεις ιζημάτων. Τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας διάταξης είναι ότι παρέχει τη δυνατότητα πλήρους αποκοπής της λεκάνης από το εξωτερικό περιβάλλον και έτσι μειώνεται η βυθοκόρηση συντήρησης, υπάρχει σταθερή στάθμη νερού στη λεκάνη και μείωση της υφαλμύρωσης στο εσωτερικό του λιμένα. Τα μειονεκτήματα είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε να εισέλθουν τα σκάφη στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και το σχετικά μεγάλο κόστους κατασκευής, λειτουργίας και συντήρησης.

- **Κλείσιμο δεύτερης ή πλευρικής εισόδου**

Έχει αποδειχτεί ότι η προσάμμωση σε μια λεκάνη με δύο εισόδους (μία σε κάθε άκρο της λεκάνης) είναι μεγαλύτερη από ότι σε μια λεκάνη με μία είσοδο, γιατί στην πρώτη περίπτωση η ροή περνάει διαμέσου της λεκάνης εμπεριέχοντας ποσότητες ιζήματος. Η προαναφερθείσα άποψη ισχύει με την προϋπόθεση ότι οι ταχύτητες ροής είναι αρκετά μεγάλες ( $>0.5$  m/s) και επίσης ότι υπάρχει στερεομεταφορά μέσα από το σύνολο της λεκάνης. Σε τέτοιες περιπτώσεις λοιπόν, προτείνεται η απενεργοποίηση (κλείσιμο) της δεύτερης εισόδου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9.

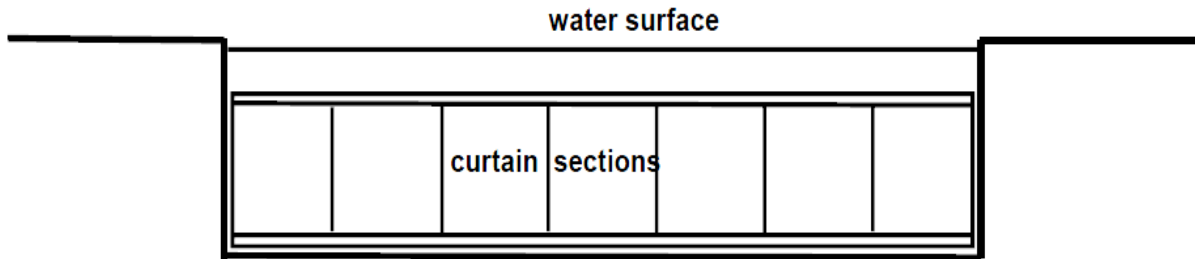


Σχήμα 2.9 Κλείσιμο δεύτερης ή πλευρικής εισόδου (PIANC, 2008)

- **Κουρτίνα προσχώσεως (silt curtain)**

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κουρτινών προσχώσεως που έχουν χρησιμοποιηθεί στην είσοδο του λιμανιού: (α) όριο με φυσαλίδες αέρα και (β) εύκαμπτο όριο εμποδίζοντας την είσοδο στο κάτω μέρος της στήλης νερού (Σχήμα 2.10). Οι διατάξεις της πρώτης κατηγορίας παρέχουν μια ανοδική ροή φυσαλίδων αέρα κατά μήκος της γραμμής στην είσοδο λεκάνης με σκοπό να αυξηθεί η κατακόρυφη ανάμιξη και να τροποποιηθεί η κυκλοφορία του νερού και ιζήματος κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα ιζήματα να μην καθιζάνουν σε μεγάλες ποσότητες στη λεκάνη. Τα πειράματα πεδίου, ωστόσο, έχουν δείξει ότι οι διατάξεις αυτού του τύπου δεν είναι πολύ αποτελεσματικές στην πράξη (Kirby, 1994). Οι διατάξεις της δεύτερης κατηγορίας χρησιμοποιούνται για να εμποδίσουν την εισροή ιζημάτων στη λιμενολεκάνη στα στρώματα κοντά στον πυθμένα αφού σε αυτά λαμβάνει χώρα το μεγαλύτερο ποσοστό της στερεομεταφοράς.

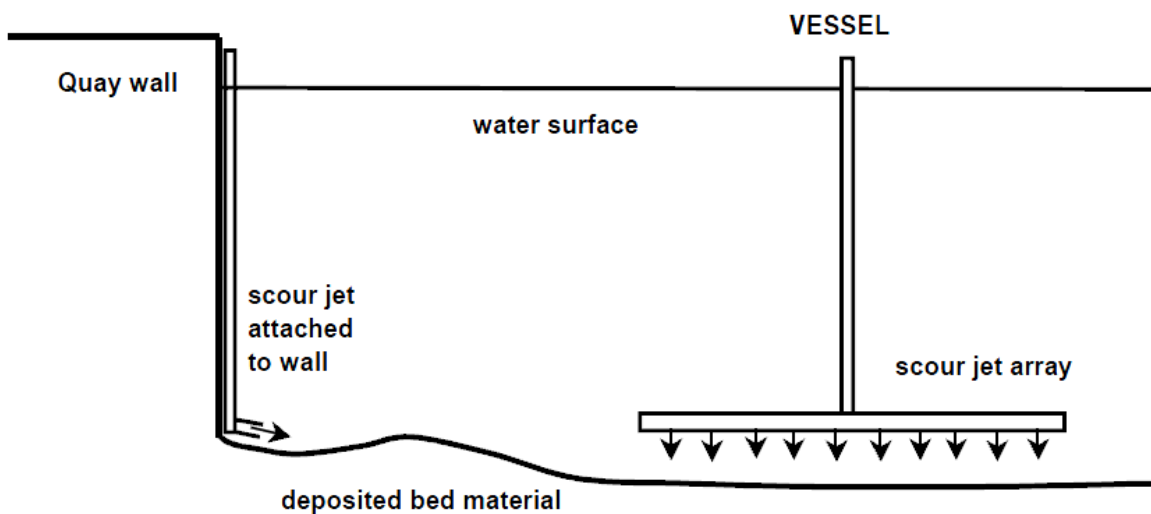




Σχήμα 2.10 Κουρτίνα προσχώσεως (Silt curtain), (PIANC, 2008)

- **Συστήματα επαναϊώρησης**

Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές που αποσκοπούν στην επαναϊώρηση των ιζημάτων του πυθμένα της εισόδου της λιμενολεκάνης ή του εσωτερικού αυτής. Αυτές οι μέθοδοι είναι επίσης γνωστές ως μέθοδοι αναδευόμενης βυθοκόρησης (agitation dredging methods). Οι πιο κοινές μέθοδοι είναι: (α) μηχανικές συσκευές, όπως σβάρνες τσουγκράνες και ξύστρες και (β) συσκευές εκτόξευσης ύδατος (jet array).



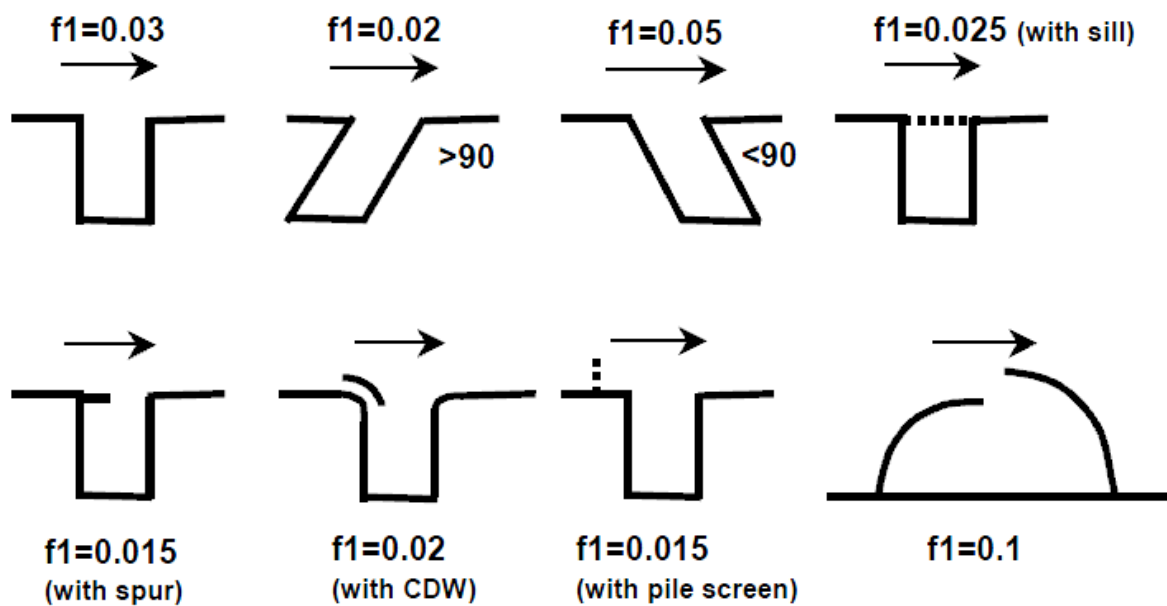
Σχήμα 2.11 Συσκευή εκτόξευσης καθαρισμού (jet array), (PIANC, 2008)

Μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος απομακρύνσεως ιζημάτων είναι η συστοιχία εκτόξευσης καθαρισμού (scour jet array) που είτε συνδέεται με μια σταθερή δομή (κρηπίδωμα, quay wall) ή έλκεται από ένα σκάφος (vessel) (Σχήμα 2.11). Τέτοιες διατάξεις είναι αποτελεσματικές σε περιπτώσεις που το στρώμα των ιζημάτων του πυθμένα είναι

αρκετά μεγάλο και η λιμενολεκάνη είναι σχετικά μικρή, ορθογώνια και με μεγάλο πλάτος εισόδου (Nasner, 1997).

### 2.5.3 Αποτελεσματικότητα μεθόδων σε σχέση με την ανταλλαγή ρευστού λιμενολεκάνης-περιβάλλοντος.

Ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν οι διάφορες προαναφερθείσες παράμετροι σε μια λιμενολεκάνη φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Με δεδομένη μια περίπτωση αναφοράς που αφορά ορθογώνια λιμενολεκάνη κάθετη προς την κύρια διεύθυνση της ροής με συντελεστή ανταλλαγής περίπου  $f_1 = 0.03$  (Booij, 1986) φαίνεται η επίδραση διαφόρων παραγόντων στην τιμή αυτή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12, η συστοιχία πασσάλων και η μείωση του πλάτους ανοίγματος της μαρίνας με σπείρα παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αποδοτικότητα.



Σχήμα 2.12 Διάφορες γεωμετρίες εισόδου και επίδραση αυτών στον οριζόντιο συντελεστή ανταλλαγής ρευστού  $f_1$  (L.C. van Rijn, 2012)

## 3. Περιοχή μελέτης και ανάλυση δεδομένων

### 3.1 Ανάλυση δεδομένων και σεναρίων μελέτης

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, γενικός στόχος είναι να μελετηθεί η στερεομεταφορά στο βαθμό που επηρεάζει τη λειτουργία μιας μαρίνας και κατά πόσο το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τη γεωμετρία της μαρίνας. Η στερεομεταφορά λαμβάνει χώρα με τους μηχανισμούς που έχουν ήδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Επισημαίνεται όμως, ότι για την παρούσα μελέτη, αίτιο αποτελούν μόνο τα κυματογενή ρεύματα, καθώς δε λαμβάνονται υπόψη άλλες αιτίες δημιουργίας ρευμάτων που μπορούν να θέσουν σε κίνηση και να μεταφέρουν τα ιζήματα, όπως ρεύματα ανεμογενή, παλιρροιακά ή πυκνότητας καθώς κάτι τέτοιο θα περιέπλεκε πολύ τη μελέτη δεδομένου ότι το πρόβλημα είναι πολυπαραμετρικό. Σημειώνεται ότι, απουσία ισχυρής παλιρροίας, όπως συμβαίνει στον ελληνικό χώρο, τα κυματογενή ρεύματα και οι διαδικασίες που τα διέπουν, είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός που συμβάλει στη στερεομεταφορά.

Στην παρούσα εργασία, θεωρούνται τυχαίοι σύνθετοι κυματισμοί με δεδομένα τη ρίζα του μέσου τετραγωνικού ύψους κύματος  $H_{rms}$ , την περίοδο αιχμής  $T_p$  και τη μέση γωνία διεύθυνσης  $\theta$ . Στην παρούσα εργασία επιλέγονται δύο κυματικά σενάρια τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Επισημαίνεται, ότι οι γωνίες είναι μετρημένες ως προς τον θετικό ημιάξονα  $x$  του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων και ότι η πρώτη γωνία διεύθυνσης  $\theta=45^\circ$  θεωρείται η δυσμενέστερη περίπτωση ως προς την ένταση του δημιουργηθέντος κατά μήκος κυματογενούς ρεύματος. Επίσης, παρά το γεγονός ότι δεν αποτελούν πραγματικές μετρήσεις κάποιας παράκτιας περιοχής, τα δεδομένα είναι προσαρμοσμένα στον ελληνικό χώρο.

Πίνακας 3.1 Κυματικά σενάρια

Κυματικό Σενάριο	$H_{rms}$ (m)	$T_p$ (s)	$\theta$ (°)
Πρώτο	2	6	45
Δεύτερο	2.5	6.5	10

### 3.1.1 Πορεία υπολογισμών

Πρώτο μέλημα, κατά τη διαδικασία των υπολογισμών είναι, δεδομένου του κυματικού σεναρίου, να ευρεθεί το το ύψος κύματος  $H_{rms}$  και οι τάσεις ακτινοβολίας  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$  και  $S_{yy}$  για όλη την περιοχή. Πρέπει να ξεκαθαριστεί σε αυτό το σημείο, ότι στην παρούσα μελέτη και με τα δεδομένα υπολογιστικά μέσα αυτό είναι εφικτό για όλη την παράκτια περιοχή εκτός του εσωτερικού της λιμενολεκάνης. Τούτο ισχύει καθώς με τα δεδομένα υπολογιστικά εργαλεία δεν παρέχεται δυνατότητα να ληφθεί στους υπολογισμούς το φαινόμενο της περίθλασης που είναι κυρίαρχο όσον αφορά το εσωτερικό της λιμενολεκάνης. Για τη μελέτη όμως της εισόδου της μαρίνας και της περιοχής εγγύς αυτής, η οποία είναι και η πιο κρίσιμη από άποψη προσαμμώσεων, τα απαραίτητα στοιχεία υπολογίζονται με ακρίβεια.

Δεύτερο βήμα της διαδικασίας αποτελεί η εύρεση της ταχύτητας  $V$  του δημιουργούμενου κυματογενούς ρεύματος για όλη την παράκτια περιοχή δεδομένων των τάσεων ακτινοβολίας που έχουν υπολογιστεί νωρίτερα. Εν συνεχεία, υπολογίζεται ο ρυθμός μεταφοράς ιζημάτων, για ίζημα δεδομένης κοκκομετρίας το οποίο στην παρούσα εργασία θεωρείται αμμώδες, με μέσο μέγεθος κόκκου  $D_{50}=1\text{mm}$ , σχετικά καλής διαβάθμισης με  $\sigma_g=(D_{84}/D_{16})^{0.5}=(1.28/0.82)^{0.5}=1.25$  (τιμές που έχουν υπολογιστεί από την κοκκομετρία του εδαφικού υλικού του πυθμένα) προσαρμοσμένο κι αυτό στα ελληνικά δεδομένα. Ο ρυθμός στερεομεταφοράς υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τα ύψη κύματος και τις ταχύτητες του κυματογενούς ρεύματος που έχουν ευρεθεί στα προηγούμενα στάδια. Τελικό ζητούμενο είναι η εύρεση πιθανών περιοχών απόθεσης ή διάβρωσης πάντα με το ενδιαφέρον να εστιάζεται στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας.

### 3.1.2 Ανάλυση στόχου εργασίας

Εμβαθύνοντας το στόχο της παρούσας μελέτης, σημειώνεται ότι αυτός είναι διττός. Κατ' αρχάς, μελετώνται πέντε διατάξεις μαρίνων, διαφορετικές κατά το δυνατόν μεταξύ τους για τα δύο προαναφερθέντα κυματικά σενάρια, ώστε να καταδειχτεί αν η γεωμετρία της μαρίνας μπορεί να επηρεάσει τη στερεομεταφορά στην περιοχή της εισόδου με σταθερούς τους υπόλοιπους παράγοντες που την επηρεάζουν, δηλαδή βαθυμετρία, κυματικό καθεστώς και είδος ιζήματος. Πρώτος στόχος λοιπόν είναι να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά το σχεδιασμό μιας μαρίνας ώστε να ελαχιστοποιούνται κατά το δυνατόν οι προσαμμώσεις. Δεύτερος στόχος είναι να χρησιμοποιηθούν κάποιες από τις

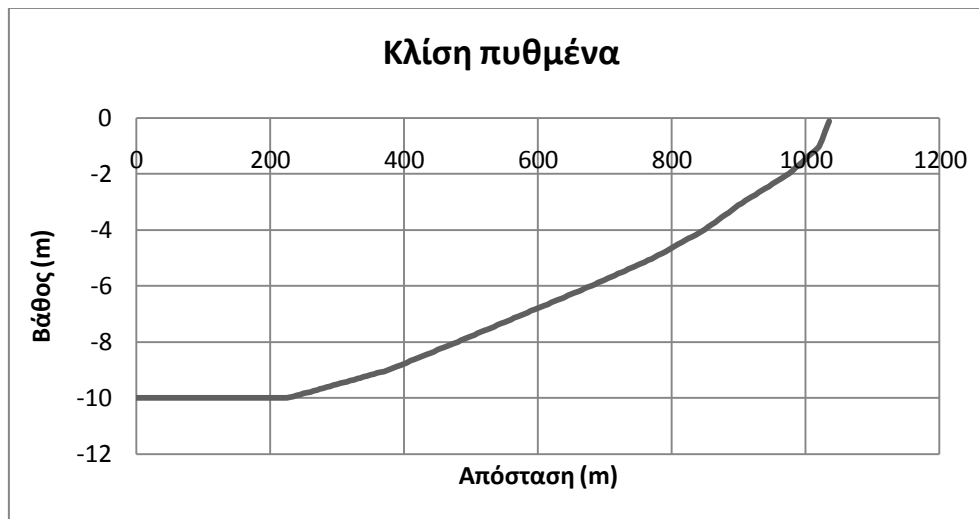
μεθόδους περιορισμού των προσαμμώσεων που καταγράφονται στο προηγούμενο κεφάλαιο, και είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη στο υπολογιστικό μοντέλο και να καταδειχτεί πόσο μπορούν να επιδράσουν, ποιοτικά πάντα, περιορίζοντας το φαινόμενο.

### 3.2 Σχεδιασμός παράκτιας περιοχής

Η περιοχή μελέτης δεν αποτελεί κάποιο πραγματικό παράδειγμα αλλά είναι μια απλουστευμένη φανταστική περιοχή που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα AutoCad 2012. Στο παρόν εδάφιο, περιγράφεται ο σχεδιασμός της βαθυμετρίας και των διατάξεων. Σημειώνεται, ότι για τα λογισμικά υδροδυναμικής ανάλυσης, ο καθορισμός της βαθυμετρίας αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα για την επιτυχία του μοντέλου. Πρέπει να υπάρχουν επαρκή στοιχεία για τα βάθη της παράκτιας περιοχής. Πέραν αυτού, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η εκλογή των κατάλληλων διαστάσεων της περιοχής μελέτης οι οποίες πρέπει να είναι επαρκείς ώστε να μπορεί να καταστεί δυνατή η καταγραφή όλων των εξεταζόμενων φυσικών διεργασιών.

#### 3.2.1 Σχεδιασμός βαθυμετρίας

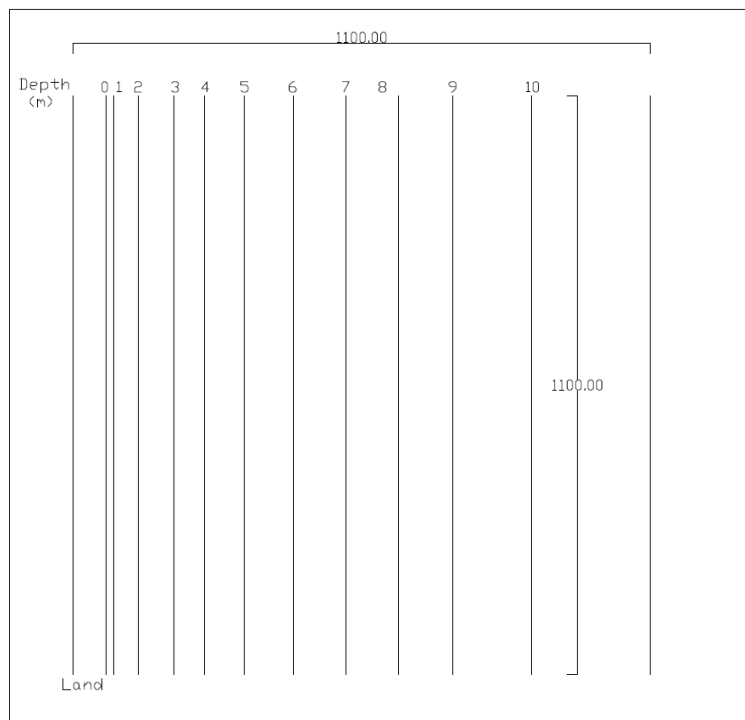
Στην εξεταζόμενη περιοχή, ο πυθμένας είναι επίπεδος, με κλίση περίπου 5% (Σχήμα 3.1), ενώ το μέγιστο βάθος φτάνει τα 10m.



Σχήμα 3.1 Κλίση πυθμένα περιοχής μελέτης

Οι ισοβαθείς είναι ευθύγραμμες και παράλληλες μεταξύ τους. Επίσης, η ακτή είναι ευθύγραμμη και παράλληλη προς τις ισοβαθείς. Αρχικά, σχεδιάζονται οι ισοβαθείς με

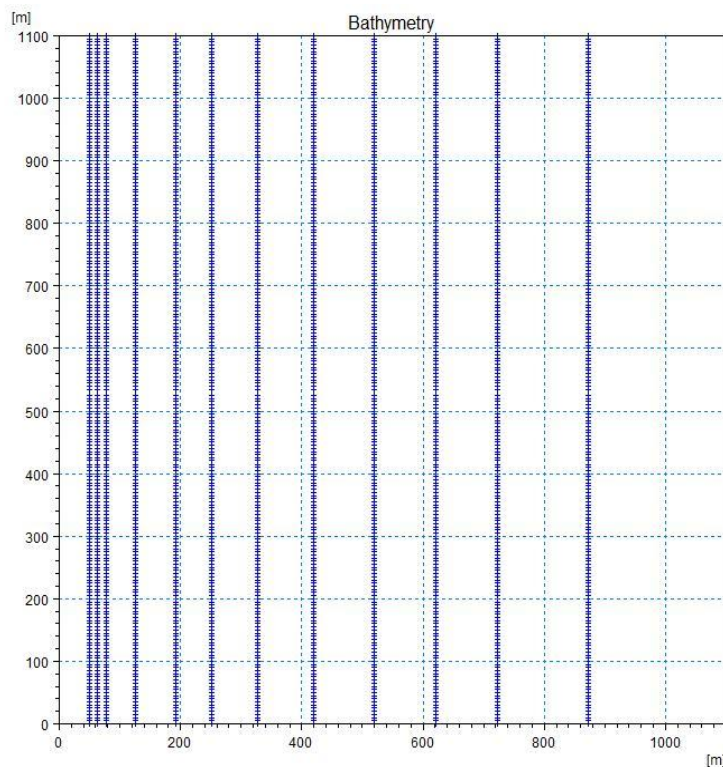
χρήση του λογισμικού AutoCad 2012 ανά 1m βάθος (Σχήμα 3.2). Σημειώνεται ότι αφήνεται περιθώριο 50 m μεταξύ της αρχικής ευθείας του μοντέλου και της ισοβαθούς 0, μήκος το οποίο θεωρείται ίσο με το πλάτος της ακτογραμμής. Στη συνέχεια, και με χρήση εφαρμογής, εξάγονται οι συντεταγμένες (x,y) των σημείων που αποτελούν τις ισοβαθείς. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία στο πρόγραμμα Microsoft Excel, τα σημεία μετατρέπονται σε αρχεία (x,y,z) τριών διαστάσεων με τη μεταβλητή z να δηλώνει το βάθος τους. Πλέον, τα σημεία είναι έτοιμα να εισαχθούν στο λογισμικό προσομοίωσης Mike 21. Σημειώνεται ότι στο παρόν κεφάλαιο αναφέρεται μόνο η προεργασία που αφορά το σχεδιασμό της περιοχής μελέτης. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Στο Mike21, αυτό γίνεται με την επιλογή Bathymetries του Mike Zero, στην οποία, αφού καθοριστεί το μέγεθος της περιοχής μελέτης, εισάγονται τα αρχεία .xyz που έχουν κατασκευαστεί. Στην παρούσα μελέτη, μετά από δοκιμές και σε συνάφεια με άλλες παρόμοιες εφαρμογές, επιλέγεται περιοχή μήκους 1100 m και ύψους 2750 m. Το πλάτος είναι το καθοριστικό μέγεθος, αφού ορίζεται σε σχέση με το σχεδιασμό των ισοβαθών. Στη συνέχεια, αποφασίστηκε το ύψος της περιοχής μελέτης να είναι 2.5 φορές μεγαλύτερο.



Σχήμα 3.2 Σχεδιασμός ισοβαθών στο AutoCad 2012

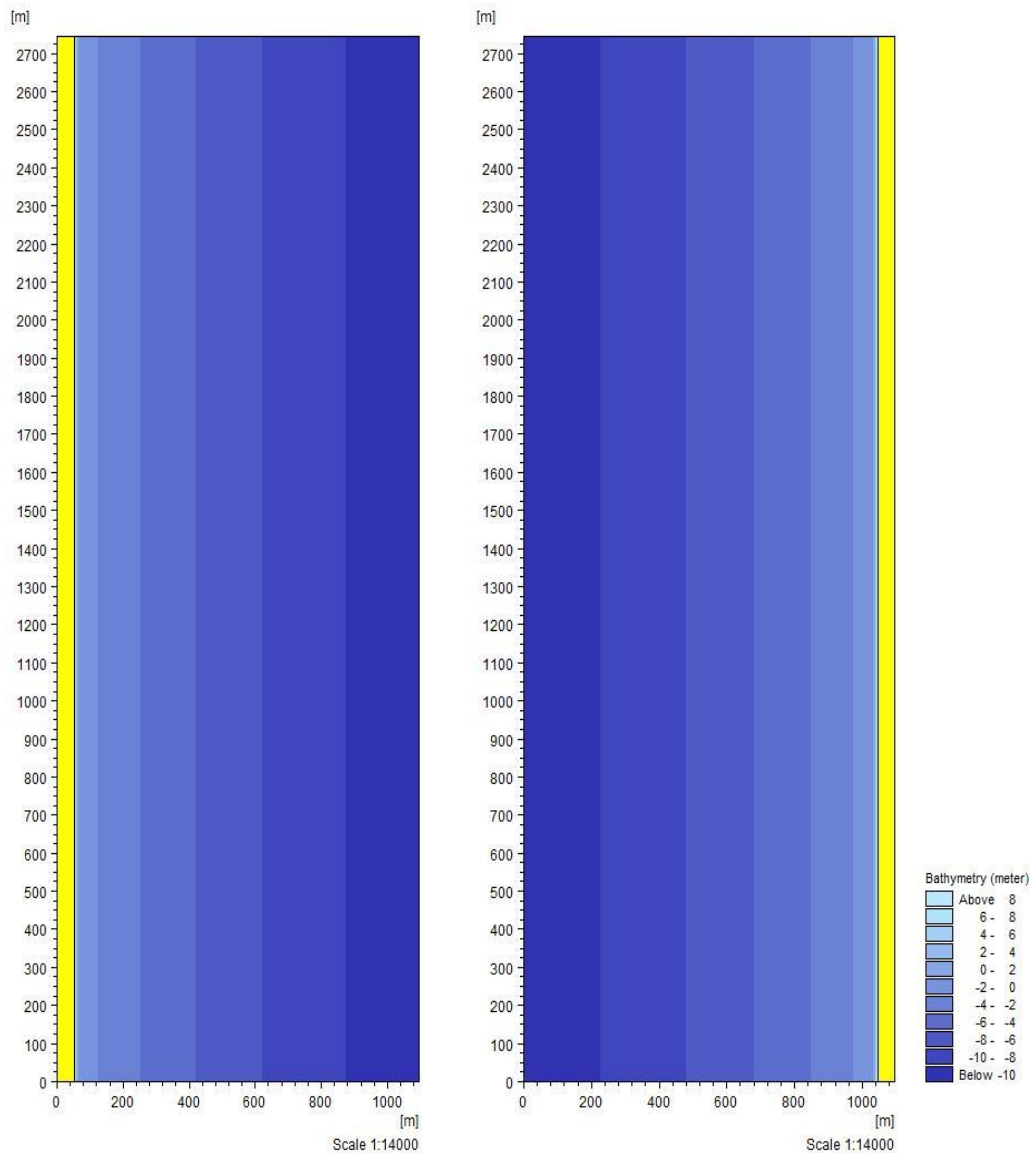
Εν συνεχεία, κατασκευάζεται ο κάναβος του μοντέλου, που στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε να είναι διάστασης 5m (περιοχή 220x550 κελιά) στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση. Αυτό έγινε με βάση τις απαιτήσεις του προγράμματος, οι οποίες θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Το δημιουργηθέν αρχείο βαθυμετρίας .Batsf (Σχήμα 3.3) δημιουργεί τιμές βάθους για όλα τα κελιά. Αυτό γίνεται δια μέσου του προγράμματος με παρεμβολή των τιμών βάθους που έχουν ήδη εισαχθεί. Έχοντας ως δεδομένα τα βάθη των σημείων που φαίνονται στο Σχήμα 3.3 παρεμβάλλονται τιμές βάθους για όλα τα υπόλοιπα κελιά του μοντέλου. Σημειώνεται εδώ, ότι στα Σχήματα 3.2 και 3.3 δεν παρουσιάζεται ολόκληρη η περιοχή. Από το προαναφερθέν αρχείο, εξάγεται ένα αρχείο αποτελεσμάτων .dfs2 (Σχήμα 3.4). Σημειώνεται εδώ, ότι η βαθυμετρία πρέπει να εισαχθεί στο πρόγραμμα στραμμένη κατά 180° για να συνάδει με τις επιταγές του λογισμικού. Τούτο, γίνεται με χρήση της επιλογής Rotate Grid της καρτέλας Transformation του Mike Zero toolbox με την οποία δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να στρέψει την περιοχή μελέτης. Η τελική βαθυμετρία που θα χρησιμοποιηθεί στη μελέτη φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.3 Σχεδιασμός βαθυμετρίας στο Mike 21

Στο Σχήμα 3.4 φαίνονται οι ισοβαθείς σχεδιασμένες ανά δύο μέτρα, ενώ με κίτρινο χρώμα απεικονίζεται η στεριά. Σημειώνεται επίσης, ότι η κλίμακα που χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων είναι 1:14000.



Σχήμα 3.4 Βαθυμετρία περιοχής μελέτης

### 3.3 Διατάξεις μαρίνων

Οι πέντε διατάξεις μαρίνων έχουν σχεδιαστεί με βάση διερεύνηση της κατασκευής ελληνικών μαρίνων με αντίστοιχη ικανότητα ελλιμενισμού, επιφάνεια και πλάτος ανοίγματος εισόδου. Έγινε προσπάθεια να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το σχεδιασμό, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση αυτού στη στερεομεταφορά. Οι πέντε διατάξεις (Σχήμα 3.5) σχεδιάστηκαν ώστε να έχουν ίδιο πλάτος ανοίγματος εισόδου 40m, περίπου ίδια



επιφάνεια και ικανότητα ελλιμενισμού (Πίνακας 3.2). Το πλάτος σχεδιασμού της μαρίνας είναι 10m και το βάθος είναι 4m σταθερό καθ' όλη την επιφάνεια των μαρίνων. Για την παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι το κάθε σκάφος καταλαμβάνει 5 m κρηπιδώματος, το μέγιστο κατασκευαστικό ύψος των σκαφών φτάνει τα 2m και η πληρότητα των μαρίνων αγγίζει το 80%.

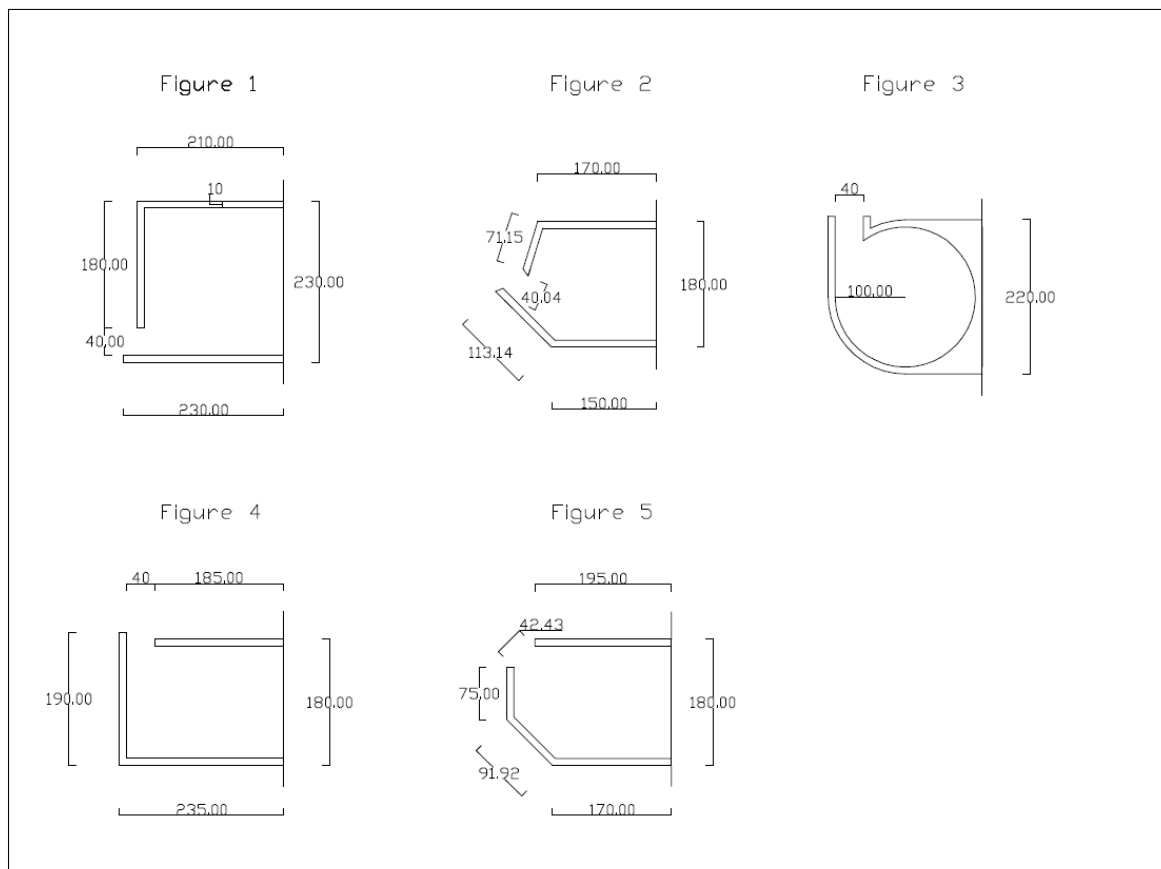
Πίνακας 3.2 Κατασκευαστικά στοιχεία διατάξεων μαρίνων

Διατάξεις μαρίνων	Πλάτος ανοίγματος (m)	Επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	Περίμετρος (m)	Ικανότητα Ελλιμενισμού (Σκάφη)
Διάταξη 1	40.00	34000.00	700.00	112
Διάταξη 2	40.04	34150.00	663.00	106
Διάταξη 3	40.00	31416.00	628.00	100
Διάταξη 4	40.00	36000.00	730.00	116
Διάταξη 5	42.43	34487.50	677.78	110

Όσον αφορά το σχεδιασμό τους, αξίζει να αναφερθεί ότι η είσοδος είναι παράλληλη προς τις ισοβαθείς στη διάταξη 1, κάθετη στις διατάξεις 3 και 4, ενώ στις διατάξεις 2 και 5 τα σκάφη εισέρχονται υπό γωνία. Επίσης, για να επιτευχθούν οι απαιτήσεις σχεδιασμού που προαναφέρθηκαν χρειάζεται να γίνουν επιπλέον εκσκαφές κοντά στην περιοχή της εισόδου για την κατασκευή των διατάξεων 2, 3 και 4. Αυτό χρειάζεται όταν στις περιοχές αυτές υπάρχουν βάθη λίγο μικρότερα των 4m προκειμένου να μην υπάρχει πρόβλημα κατά την είσοδο των σκαφών στη μαρίνα.

Ακόμη, όσον αφορά τη διάταξη των μαρίνων σε σχέση με τα κυματικά σενάρια, παρατηρείται ότι η διάταξη 1 δεν είναι προστατευμένη ως προς τους επικρατούντες κυματισμούς. Αυτό έχει γίνει για να εξεταστεί κατά το δυνατό η δυσμενέστερη περίπτωση. Το προαναφερθέν γεγονός συμβαίνει εν μέρει για τις διατάξεις 2 και 5, ενώ η 3 και 4 είναι προστατευμένες. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η τρίτη διάταξη είναι μια διάταξη με μη συμβατικό σχεδιασμό για να καταδειχτεί κατά πόσο μια ομαλή-καμπύλη επιφάνεια πρόσκρουσης με το κυματογενές ρεύμα μπορεί να έχει ευεργετικό χαρακτήρα. Στο Σχήμα

3.5 φαίνονται τα σκαριφήματα των διατάξεων διαστασιολογημένα όπως σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα AutoCad 2012.

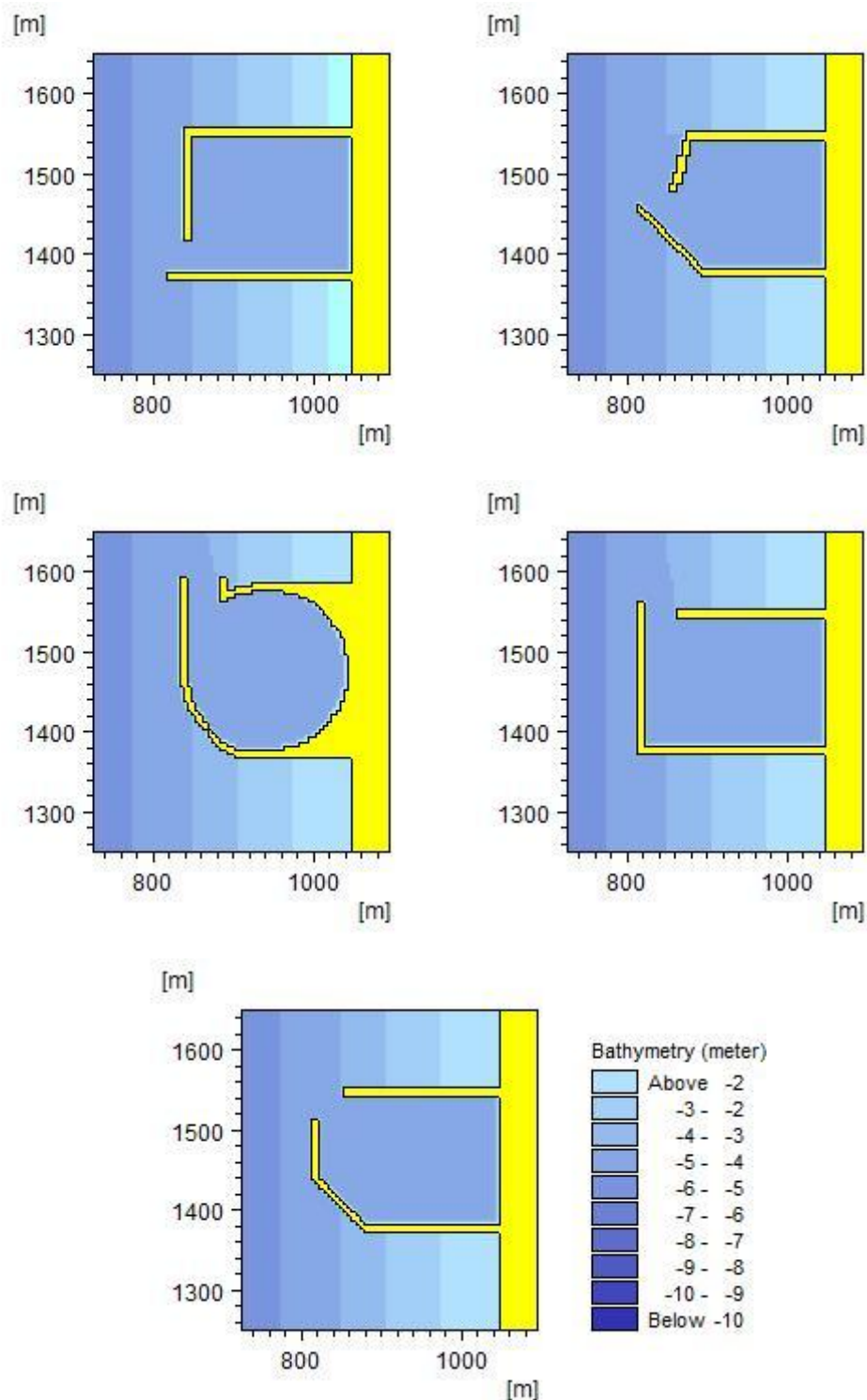


Σχήμα 3.5 Διατάξεις και διαστασιολόγηση μαρίνων

Αξίζει να τονιστεί ότι, όσον αφορά το πρόγραμμα, οι μαρίνες εισάγονται ως στεριά και θεωρείται ότι έχουν την ίδια λειτουργία με αυτή. Σημειώνεται λοιπόν, ότι δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς το υλικό κατασκευής της μαρίνας και η λειτουργία του με κάποιο τρόπο. Τούτο γίνεται μεταβάλλοντας τα βάθη που έχουν υπολογιστεί από το πρόγραμμα και δίνοντας τους τιμή βάθους +10 m, το οποίο θεωρείται στεριά. Στο Σχήμα 3.6, φαίνονται σε κάτοψη οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των διατάξεων σε περιβάλλον Mike 21.

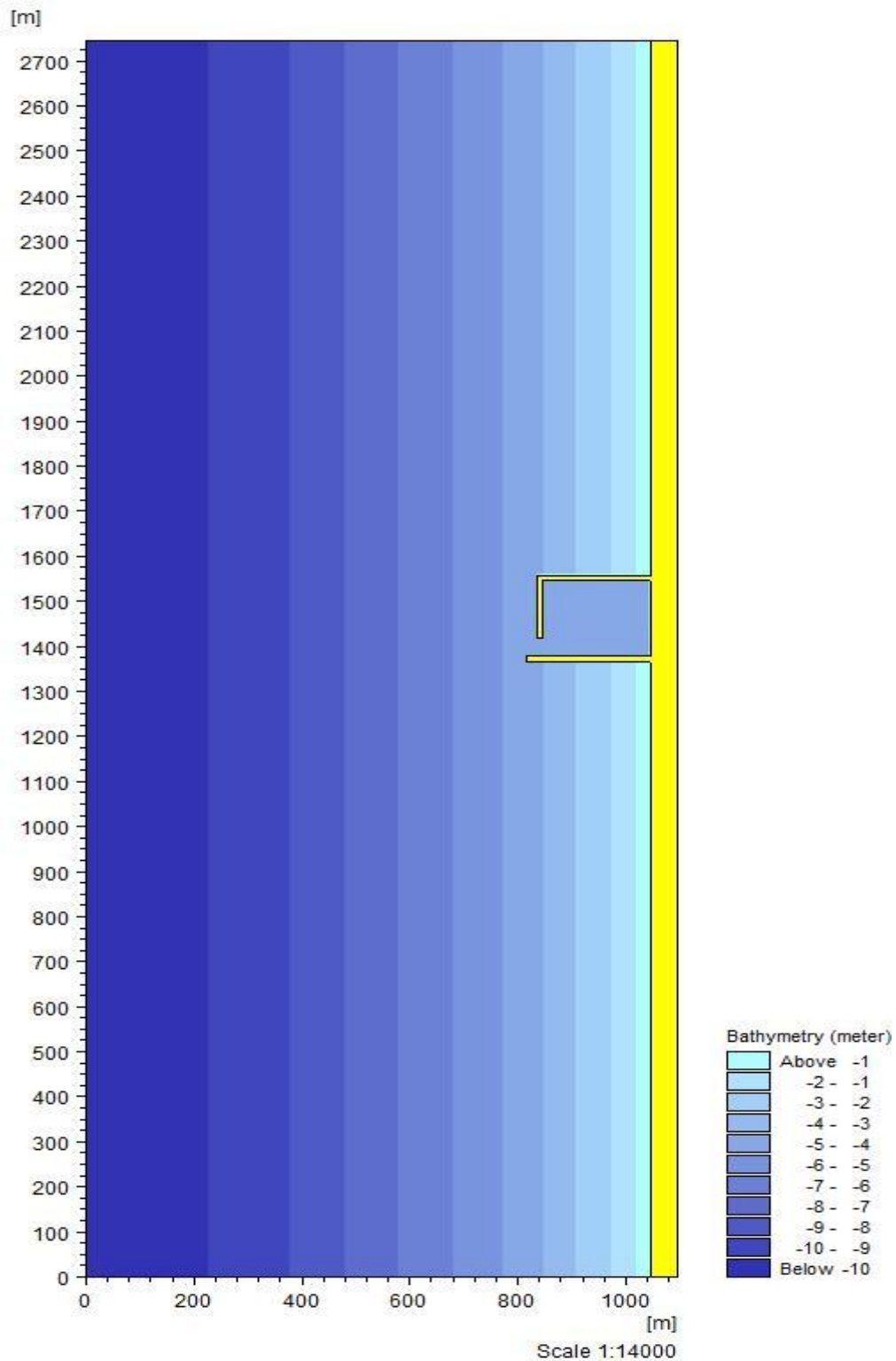
Οι διατάξεις σχεδιάζονται κατά το δυνατό στο μέσο της περιοχής. Τούτο έγινε μετά από δοκιμές και διαφορετικές πιθανές θέσεις κατασκευής της μαρίνας καθ' ύψος αυτής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σχεδιασμός της παράκτιας περιοχής, η επιλογή του κανάβου

αλλά ακόμη και η σωστή τοποθέτηση του λιμενικού έργου στο μοντέλο είναι μείζονος σημασίας για την επιτυχία της προσομοίωσης.



Σχήμα 3.6 Διατάξεις μαρίνων στο πρόγραμμα Mike 21

Στο ακόλουθο Σχήμα 3.7, φαίνεται πως τοποθετείται η διάταξη 1 στην εξεταζόμενη περιοχή μελέτης. Η διάταξη τοποθετείται σε ύψος περίπου 1300 m και φτάνει περί τα 1600 m, στοιχείο που είναι κοινό για όλες τις διατάξεις.



Σχήμα 3.7 Σχεδιασμός διάταξης 1 στην περιοχή μελέτης

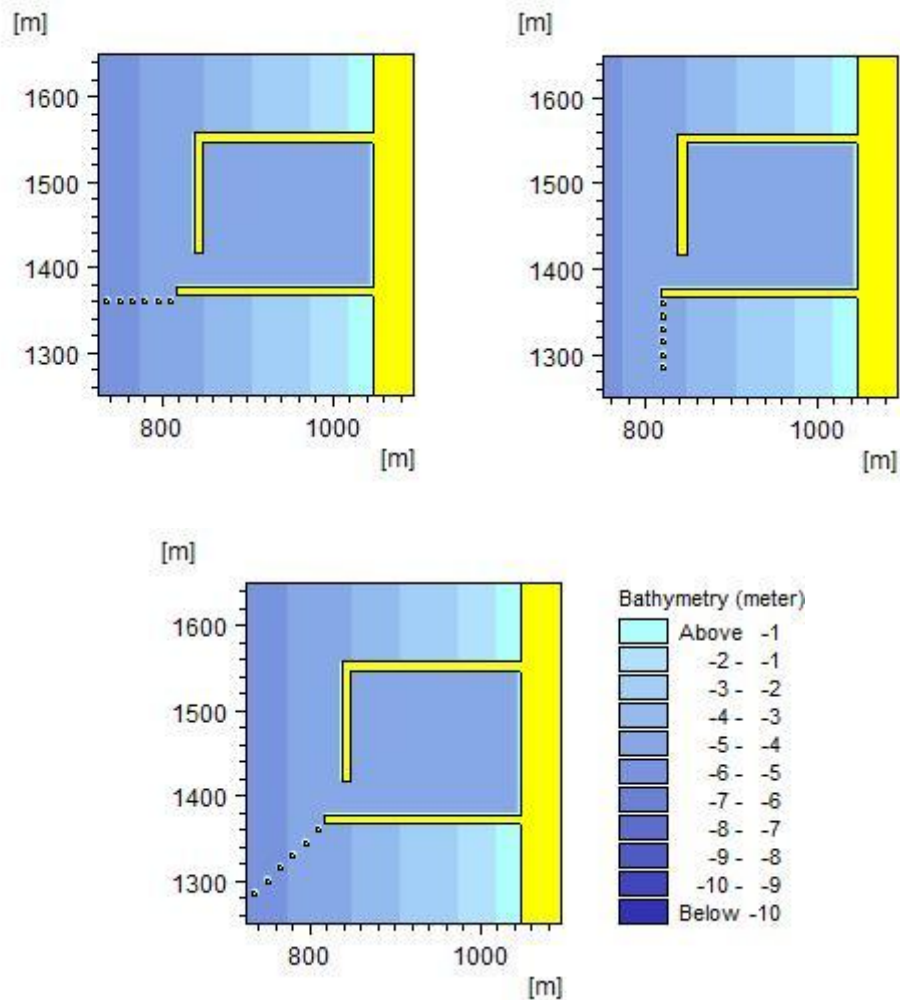
### 3.4 Διατάξεις για την αντιμετώπιση των προσαμμώσεων

Στο εδάφιο αυτό, παρουσιάζονται οι κατασκευές που χρησιμοποιήθηκαν για την αντιμετώπιση των προσαμμώσεων ώστε να καταδειχτεί κατά πόσο διορθώνεται το πρόβλημα στις πέντε διατάξεις μαρίνων. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις λύσεις, κυρίως με βάση τις μεθόδους που αναφέρθηκαν στο εδάφιο 2.5. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε συστοιχία πασσάλων που τοποθετήθηκαν σε τρεις διαφορετικές διευθύνσεις (Pile array), τοίχωμα εκτροπής ρεύματος (Current deflecting wall) καθώς και πρόβολος (grogne). Οι διατάξεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν σε δύο περιπτώσεις: (α) στη διάταξη 1 για το πρώτο κυματικό σενάριο και (β) στη διάταξη 4 για το δεύτερο κυματικό σενάριο δεδομένου ότι αυτές κρίθηκαν ως οι δυσμενέστερες περιπτώσεις, αντίστοιχα.

#### 3.4.1 Εφαρμογή συστοιχίας πασσάλων

Το πρώτο μέτρο που χρησιμοποιήθηκε είναι η συστοιχία πασσάλων. Τοποθετήθηκαν πέντε πάσσαλοι διαστάσεων μήκους και πλάτους 5m ο πιο κοντινός στο λιμένα σε απόσταση 5m και οι υπόλοιποι ανά 10m μεταξύ τους. Σημειώνεται, ότι παρά τη θεωρία που προτείνει το πάχος να είναι 0.5-1m, εδώ χρησιμοποιήθηκε πάχος 5m αφού αυτή είναι η ισοδιάσταση του κανάβου, όποτε επιλέχθηκε να απεικονιστεί ο κάθε πάσσαλος με ένα κελί. Πέραν της τοποθέτησής τους κάθετα στην είσοδο της λιμενολεκάνης, όπως ορίζεται στη θεωρία, και φαίνεται στην πρώτη διάταξη, γίνεται δοκιμή τοποθέτησης της διάταξης παράλληλα στην είσοδο της μαρίνας. Επίσης, μετά από δοκιμές για τοποθέτησή των πασσάλων σε διάφορες γωνίες, αποφασίστηκε να γίνει δοκιμή βάζοντας τους σε γωνία 45° σε σχέση με τη διεύθυνση εισόδου της λιμενολεκάνης. Σημειώνεται τέλος, ότι όσον αφορά τη διάταξη 4, λόγω θέσης της μαρίνας, τοποθετήθηκαν πάσσαλοι παράλληλα της διεύθυνσεως του ανοίγματος της μαρίνας σε μια περιοχή ανάντη αυτής και συγκεκριμένα στο ανάντη άκρο της μαρίνας σαν μια τέταρτη δοκιμή τοποθέτησης συστοιχίας πασσάλων (Σχήμα 3.11).

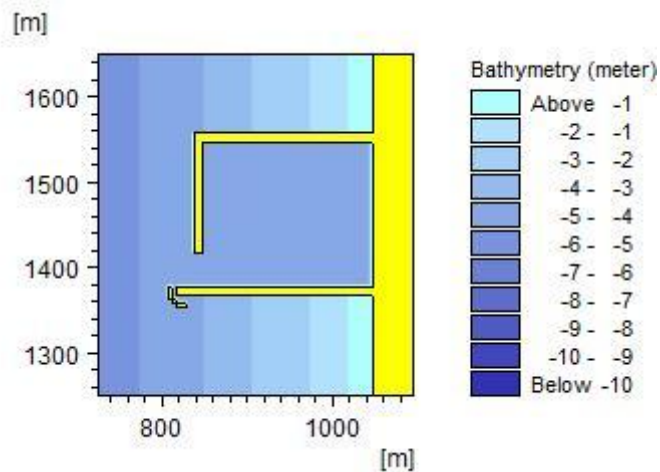
Οι πάσσαλοι θεωρούνται από το λογισμικό ως στεριά, όπως δηλαδή και οι μαρίνες, ενώ το ύψος τους θεωρείται ότι είναι τέτοιο που να φτάνει στην ελεύθερη επιφάνεια των υδάτων, άρα είναι 4.5-5.5 m στην πρώτη περίπτωση, σταθερό και ίσο με 4.38 m στη δεύτερη περίπτωση και μεταξύ 4.5 και 5.5 m όταν αυτοί τοποθετούνται διαγώνια.



Σχήμα 3.8 Συστοιχία πασσάλων σε διάφορες διευθύνσεις για τη διάταξη 1

### 3.4.2 Εφαρμογή τοιχώματος εκτροπής ρεύματος

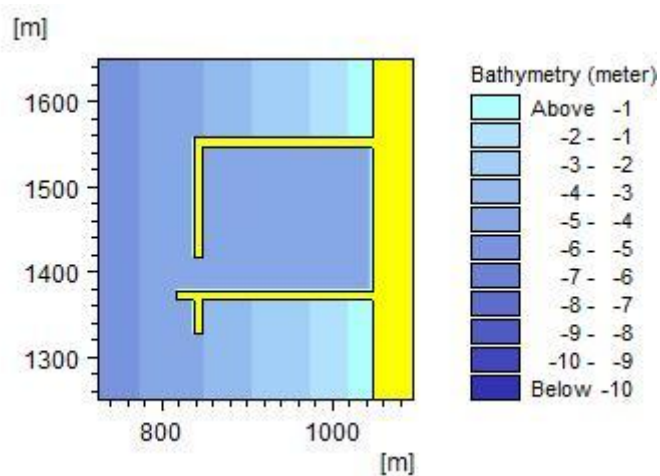
Το τοίχωμα εκτροπής ρεύματος είναι μια διάταξη βασισμένη στο εδάφιο 2.5 και σαν στόχο έχει να εκτρέψει το δημιουργηθέν κυματογενές ρεύμα ώστε να μεταφερθεί κατά το δυνατόν μακριά από την παράκτια περιοχή εγγύς της λιμενολεκάνης. Σημειώνεται, ότι στην παρούσα εργασία το τοίχωμα τοποθετείται αυτόνομο, χωρίς την κατασκευή παγίδευσης φερτών (sill). Η διάταξη έχει 5 m πλάτος και τοποθετείται σε κατακόρυφη απόσταση 10 m και οριζόντια 5 m από την είσοδο της λιμενολεκάνης. Το ύψος της διάταξης κυμαίνεται μεταξύ 4.3-4.5 m, ενώ όπως και στην προηγούμενη περίπτωση το τοίχωμα θεωρείται στεριά και η στέψη του φτάνει την ελεύθερη επιφάνεια των υδάτων. Τέλος, επισημαίνεται ότι έχει τοποθετηθεί κατ' αυτόν τον τρόπο ώστε να είναι κάθετο στη διεύθυνση του κυματογενούς ρεύματος για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.



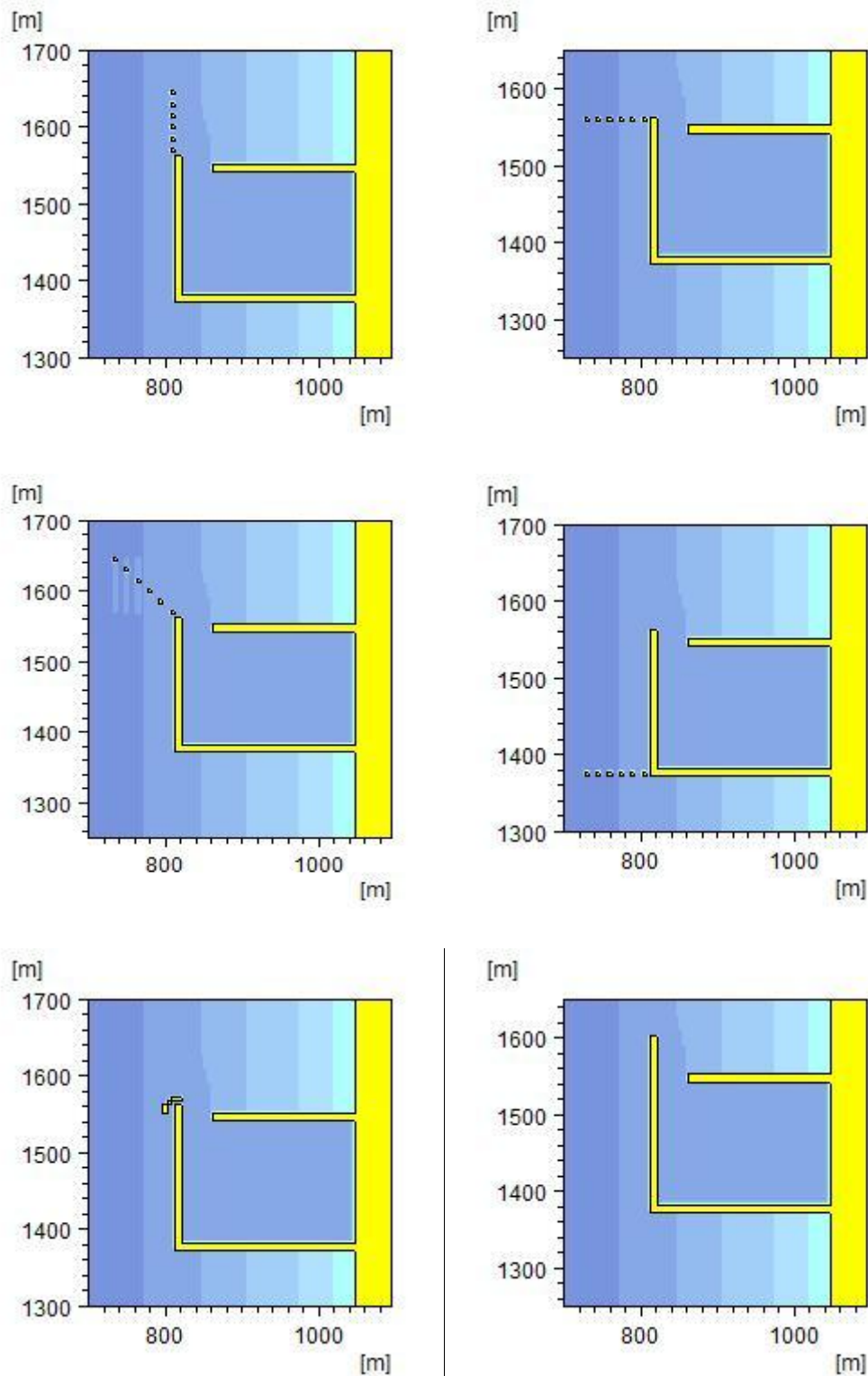
Σχήμα 3.9 Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος για τη διάταξη 1

### 3.4.3 Εφαρμογή προβόλου

Σε αυτήν την περίπτωση, επεκτείνεται η είσοδος της μαρίνας ώστε να απομακρύνεται το ρεύμα μακριά από την περιοχή της εισόδου αλλά και να παγιδεύονται φερτά ανάντη του προβόλου. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια πολύ κοινή πρακτική που ακολουθείται για την αντιμετώπιση των προσαμμώσεων. Το πλάτος της διάταξης είναι 10 m και το μήκος 40 m. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, η κατασκευή θεωρείται από το πρόγραμμα στεριά και η στέψη φτάνει την ελεύθερη επιφάνεια. Το ύψος της κατασκευής στη συγκεκριμένη θέση που έχει τοποθετηθεί ο πρόβολος ξεπερνάει μόλις τα 4 m, τιμή που συμπίπτει με το βάθος της λιμενολεκάνης.



Σχήμα 3.10 Πρόβολος για τη διάταξη 1



Σχήμα 3.11 Συστοιχία προβόλων, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος και πρόβολός για τη διάταξη 4

Σημειώνεται ότι στην τελευταία περίπτωση του Σχήματος 3.11 (προτάσεις βελτίωσης για τη διάταξη 4), που αφορά την κατασκευή προβόλου, κατασκευάζεται πρόβολος ώστε να επεκταθεί η είσοδος της μαρίνας για να προστατευτεί από τη στερεομεταφορά.



## 4. Μοντέλο Mike 21

---

Οι παράκτιες διαδικασίες που περιγράφηκαν θεωρητικά, δηλαδή η μεταβολή του ύψους κύματος, το κυματογενές ρεύμα και η μεταφορά ιζημάτων στην εξεταζόμενη περιοχή προσομοιώνονται με το υπολογιστικό πακέτο MIKE 21 της DHI (Danish Hydraulic Institute, 2012). Για τον προαναφερθέν σκοπό χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα μοντέλα PMS (parabolic mild slope, κυματικό μοντέλο ήπιας κλίσης), HD (hydrodynamic, υδροδυναμικό μοντέλο διδιάστατης ανάλυσης) και ST (sediment transport, μοντέλο υπολογισμού ρυθμών στερεομεταφοράς).

### 4.1 Κυματικό μοντέλο PMS

#### 4.1.1 Εισαγωγή

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 ρήξης, 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 ( $\theta$ ), καθώς επίσης και οι τάσεις ακτινοβολίας  $S$  ( $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$ ), οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη δημιουργία κυματογενών ρευμάτων. Το Mike 21 PMS χρησιμοποιείται στη μελέτη του κυματικού πεδίου μιας ανοιχτής παράκτιας περιοχής καθώς και σε περιοχές όπου υπάρχουν τεχνικά έργα (π.χ. πρόβολοι, κυματοθραύστες), όταν μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα η ανάκλαση των προσπιπτόντων κυματισμών και η περίθλαση είναι κάθετη στην κύρια διεύθυνσή τους. 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 σκοπός είναι να μελετηθεί η κυκλοφορία στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης. Σημειώνεται, ότι στην παρούσα εργασία, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, σκοπός είναι η μελέτη της κυκλοφορίας και τελικά του ρυθμού στερεομεταφοράς στην είσοδο της μαρίνας και σε μια περιοχή εγγύς αυτής και όχι στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

Τα φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου είναι:

- η ρήχωση (shoaling)
- η διάθλαση (refraction)
- η περίθλαση (diffraction)
- η ανάκλαση (reflection)
- η τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- η θραύση (wave breaking)
- η γένεση των κυματισμών λόγω ανέμου (wind generation)
- η διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- η κατευθυντική διασπορά (directional spreading)
- η αλληλεπίδραση μεταξύ των κυματισμών (wave-wave interaction) και
- η αλληλεπίδραση κύματος-ρεύματος (wave-current interaction)

#### 4.1.2 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

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:

$$\nabla(CC_g \nabla \varphi) + (k^2 CC_g + i\omega W)\varphi = 0 \quad (4.1)$$

όπου  $\nabla = (\frac{\partial y}{\partial x}, \frac{\partial y}{\partial x})$  διδιάστατος τελεστής κλίσης,  $C(x,y)$  η φασική ταχύτητα,  $C_g(x,y)$  η ταχύτητα ομάδας κυματισμών,  $\varphi(x,y)$  το δυναμικό ταχύτητας της μέση ελεύθερης επιφάνειας το οποίο συνδέεται με το δυναμικό της ταχύτητας με την ακόλουθη σχέση:

$$\varphi(x, y, z, t) = \frac{g}{\omega} \varphi(x, y) \frac{\cosh k(z + d)}{\cosh kd} e^{-i\omega t} \quad (4.2)$$

όπου  $k=2\pi/L$  ο κυματαριθμός, με  $L$  το μήκος κύματος,  $z$  η ανύψωση της στάθμης του νερού μετρημένη από τη μέση στάθμη,  $d$  το βάθος του νερού,  $\omega=2\pi f$  η κυκλική συχνότητα, με  $f$  τη συχνότητα,  $W=E_{\text{diss}}/E_m$  όρος διάχυσης με  $E_{\text{diss}}$  να απεικονίζει το μέσο ρυθμό διάχυσης της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας και  $E_m$  η μέση ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας.

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

$$\eta = \frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad , \text{για } z = 0 \quad (4.3)$$

$$\eta = \varphi(x, y) e^{-i(\omega t + \frac{\pi}{2})} \quad (4.4)$$

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

$$\varphi = A^*(x, y) e^{i\psi} \quad (4.5)$$

$$\psi = \int^x k \cos \theta dx + \int^y k \sin \theta dy \quad (4.6)$$

όπου  $\theta$  η γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών με τον άξονα  $x$ . Θεωρώντας ότι οι επικρατέστεροι κυματισμού διαδίδονται κατά μήκος του άξονα  $x$  η συνάρτηση  $\psi$  μπορεί να γραφτεί  $\psi = \int^x k dx$ .

Μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης (4.1) προκύπτει θεωρώντας ως επικρατούσα διεύθυνση των κυματισμών τη διεύθυνση  $x$  και θεωρώντας αμελητέα τα φαινόμενα της διασποράς και της περίθλασης κατά μήκος αυτής της διεύθυνσης. Η ελλειπτική εξίσωση μπορεί να μετατραπεί στην:

$$(CC_g\varphi_x)_x + (CC_g\varphi_y)_y + (k^2CC_g + i\omega W)\varphi = 0 \quad (4.7)$$

όπου οι δείκτες  $x, y$  εκφράζουν παραγώγους ως προς την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (4.5) οι όροι κλίσης μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\varphi_x = (ikA^* + A_x^*)e^{i\psi} \quad (4.8)$$

$$CC_g\varphi_x = (i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*)e^{i\psi} \quad (4.9)$$

$$(CC_g\varphi_x)_x = [ik(i\omega C_g A^* + CC_g A_x^*) + i\omega C_g A_x^* + i\omega A^*(C_g)_x + (CC_g A_x^*)_x]e^{i\psi} \quad (4.10)$$

Ο τελευταίος όρος  $(CC_g A_x^*)_x$  της Σχέσης 4.10 εκφράζει την επίδραση της διασποράς και της περίθλασης κατά μήκος της διεύθυνσης  $x$  και επομένως παραλείπεται στην παραβολική προσέγγιση. Έτσι,

$$(CC_g\varphi_x)_x \cong [-k\omega C_g + i\omega(C_g)_x]A^* + 2i\omega C_g A_x^* e^{i\psi} \quad (4.11)$$

Τελικά, χρησιμοποιώντας την σχέση της μέσης ελεύθερης στάθμης (4.5) προκύπτει:

$$(CC_g\varphi_y)_y = (CC_g A_y^*)e^{i\psi} \quad (4.12)$$

Αντικαθιστώντας τις δύο τελευταίες εξισώσεις στην (4.7) προκύπτει η εξίσωση:

$$A_x^* - \frac{i}{2\omega C_g} = (CC_g A_y^*)_y + A^* \frac{(C_g)_x}{2C_g} + A^* \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.13)$$

Με την υπόθεση ότι  $\phi = A(x, y)e^{ik_0x}$ , όπου  $k_0$  είναι ένας κυματαριθμός αναφοράς και  $A(x, y)$  μια σύνθετη μεταβλητή. Από τα παραπάνω συνάγεται ότι:

$$A^*(x, y) = A(x, y)e^{i\theta} \quad (4.14)$$

όπου  $\theta = k_0x - \int^x k dx$ . Έτσι η Σχέση (4.13) γράφεται:

$$A_x - i(k - k_0)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} - \frac{i}{2\omega C_g} (CC_g A_y)_y + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.15)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την απλούστερη παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης και ισχύει για διάδοση κυματισμών κατά μήκος μιας επικρατούσας διεύθυνσης (θετικός ημιάξονας  $x$ ) ή υπό μικρή 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:

$$A_x - i(k_0 - \beta_1 k)A + A \frac{(C_g)_x}{2C_g} + \frac{\sigma_1}{\omega C_g} (CC_g A_y)_y - \frac{\sigma_2}{\omega C_g} (CC_g A_y)_{yx} + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.16)$$

όπου  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\sigma_1 = i(\beta_2 - \beta_3 \frac{k_0}{k}) + \beta_3 (\frac{k_x}{k^2} - \frac{(C_g)_x}{2kC_g}) \quad (4.17)$$

$$\sigma_2 = -\frac{\beta_3}{k} \quad (4.18)$$

Οι τιμές των συντελεστών  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  και  $\beta_3$  παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 για διαφορετικές παραβολικές προσεγγίσεις. Σημειώνεται ότι η Σχέση 4.16 ονομάζεται παραβολική εξίσωση ήπιας κλίσης, και είναι η βασική εξίσωση επίλυσης του κυματικού μοντέλου Mike 21 PMS.

Πίνακας 4.1 Τιμές συντελεστών  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  και  $\beta_3$  της εξίσωσης ήπιας κλίσης (μοντέλο PMS, DHI, 2012)

Aperture	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
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

#### 4.1.2.1 Περιγραφή βασικών παραμέτρων του μοντέλου

Σε αυτό το εδάφιο, περιγράφεται πως λαμβάνονται υπόψη από το κυματικό μοντέλο τα φαινόμενα της θραύσεως (Wave Breaking) και της τριβής στον πυθμένα (Bottom Dissipation).

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 των κυματισμών εξαιτίας της θραύσης είναι:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{\alpha}{8\pi} Q_b \omega H_{max}^2 \quad (4.19)$$

όπου  $E$  η συνολική ενέργεια,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα,  $Q_b$  το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών και  $\alpha$  μια σταθερά από την οποία ελέγχεται ο ρυθμός διάχυσης της ενέργειας.

Στην παραπάνω εξίσωση  $H_{max}$  είναι το μέγιστο επιτρεπτό ύψος των κυματισμών και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$H_{max} = \gamma_1 k^{-1} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kd}{\gamma_1}\right) \quad (4.20)$$

όπου  $k=2\pi/L$  ο κυματαριθμός,  $d$  το βάθος του νερού,  $\gamma_1$  μια παράμετρος της θραύσης η οποία έχει σχέση με τη συνθήκη της καμπυλότητας και  $\gamma_2$  μια άλλη παράμετρος που έχει σχέση με τη συνθήκη του οριακού βάθους. Σημειώνεται ότι η παραπάνω έκφραση της διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών κατά τη θραύση τους χρησιμοποιείται τόσο για μονοχρωματικούς όσο και για τυχαίους κυματισμούς.

Η τριβή στον πυθμένα συνεπάγεται απώλεια ενέργειας του κύματος. Το φαινόμενο είναι αθροιστικό και το ποσό της απολεσθείσας 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 σχέση για μονοχρωματικούς κυματισμούς:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{6\pi} \frac{c_{fw}}{g} \left(\frac{\omega H}{\sinh(kd)}\right)^3 \quad (4.21)$$

όπου  $E=(H_{rms})^2/8$  η συνολική ενέργεια του κύματος και  $c_{fw}=f_w/2$  ο παράγοντας τριβής που προσδιορίζεται από την εξής σχέση (Jonsson, 1966; Swart, 1974):

$$f_w = 0.24 \quad , \quad \frac{a_b}{k_N} < 2 \quad (4.22.a)$$

$$f_w = \exp\left(-5.977 + 5.213 \left(\frac{a_b}{k_N}\right)^{-0.194}\right) \quad , \quad \frac{a_b}{k_N} \geq 2 \quad (4.22.b)$$

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

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{1}{8\sqrt{\pi}} \frac{c_{fw}}{g} \left( \frac{\omega H_{rms}}{\sinh(kd)} \right)^3 \quad (4.23)$$

#### 4.1.2.2 Περιγραφή κυματικών παραμέτρων

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

$$H_{rms} = 2\sqrt{2E_1} \quad (4.24)$$

$$H_{m0} = 4\sqrt{4E_1} \quad (4.25)$$

όπου  $E_1$  η ολική κυματική ενέργεια που δίνεται από την εξής σχέση:

$$E_1 = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f, \theta) df d\theta \quad (4.26)$$

όπου  $\theta_{max}$  και  $\theta_{min}$  τα όρια της διεύθυνσης του κυματισμού και  $f_{max}$  και  $f_{min}$ , το ανώτατο και το 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  $\theta$  ορίζεται ως:

$$\theta = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) \quad (4.27)$$

όπου  $a$ ,  $b$  σταθερές που δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$a = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \cos\theta E(\theta) d\theta \quad (4.28)$$



$$b = \frac{1}{E_1} \int_0^{2\pi} \sin\theta E(\theta) d\theta \quad (4.29)$$

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 σχέσεις:

$$S_{xx} = \rho \frac{g}{2} (F_u + F_p) \quad (4.30.a)$$

$$S_{yy} = \rho \frac{g}{2} (F_v + F_p) \quad (4.30.b)$$

$$S_{xy} = \rho \frac{g}{2} F_{uv} \quad (4.30.c)$$

Οι δυνάμεις F δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$F_u = \int_0^{2\pi} \cos^2(1 + G)E(\theta)d\theta \quad (4.31)$$

$$F_v = \int_0^{2\pi} \sin^2(1 + G)E(\theta)d\theta \quad (4.32)$$

$$F_{uv} = \int_0^{2\pi} \sin\theta\cos\theta(1 + G)E(\theta)d\theta \quad (4.33)$$

$$F_p = \int_0^{2\pi} G E(\theta)d\theta \quad (4.34)$$

Με την παράμετρο G να δίνεται από την εξής σχέση:

$$G = \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \quad (4.35)$$

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:

$$u = H_{m0} \cos \theta \quad (4.36)$$

$$v = H_{m0} \sin \theta \quad (4.37)$$

#### 4.1.3 Εφαρμογή μοντέλου

Εισαγωγικά, το μοντέλο απαιτεί οι αποστάσεις του κανάβου να παρέχουν επαρκή ανάλυση της βαθυμετρίας και του κυματικού πεδίου στο επίπεδο  $x$ - $y$ . Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο κανάβος επιλέγεται να είναι διάστασης  $\Delta x = \Delta y = 5$  m, άρα για τη δεδομένη περιοχή των  $1100 \text{m} \times 2750 \text{m}$  περιλαμβάνονται  $220 \times 550$  κελιά. Το κυματικό μοντέλο PMS απαιτεί το μήκος κύματος  $L$  να περιλαμβάνει 5-7 κελιά, ήτοι  $L \geq (5-7)\Delta x$ . Στη ζώνη θραύσης μάλιστα, η απαίτηση αυτή είναι ακόμη πιο αυστηρή και επιβάλλει τα κελιά να είναι 8-10. Στην παρούσα εργασία, οι περίοδοι αιχμής για τα δύο κυματικά σενάρια είναι 6 και 6.5 s. Επί τω δυσμενέστερω, για περίοδο  $T_p = 6$  s, το μήκος κύματος  $L_0$  στα βαθειά δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi} \quad (4.38)$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει ότι  $L_0 = 56.207 \text{m}$ , ήτοι  $L_0/\Delta x = 56.207/5 = 11.24$ , άρα η προαναφερθείσα απαίτηση καλύπτεται.

- **Βασικές παράμετροι (Basic Parameters)**

Κατ' αρχάς, όσον αφορά την καρτέλα των βασικών παραμέτρων (Basic parameters), εισάγεται η δημιουργηθείσα βαθυμετρία στο μοντέλο. Επιλέγεται προσομοίωση σε δύο διαστάσεις, ήτοι normal simulation, και εν συνεχεία δίνονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη μελέτη, επειδή πρόκειται για φανταστική περιοχή, επιλέγεται γεωγραφικό μήκος και πλάτος ίσο με το μηδέν. Επίσης, εκλέγονται τα 10m ως τιμή ύψους πάνω από το οποίο θεωρείται στεριά. Τέλος, εξετάζεται το φαινόμενο

απαλλαγμένο από την έννοια του χρόνου, θεωρώντας την περίοδο προσομοίωσης στάσιμη (stationary), δηλαδή θεωρώντας μόνο ένα κυματικό γεγονός προερχόμενο από το Δυτικό όριο (Offshore boundary).

- **Συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions)**

Η επόμενη καρτέλα αφορά τις συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions), δηλαδή το Δυτικό-ανοιχτό όριο από το οποίο γεννιέται ο κυματισμός καθώς και τα πλευρικά όρια που βρίσκονται στο Βόρειο και το Νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Σημειώνεται εδώ, ότι η επιλογή των συνοριακών συνθηκών σε μια προσομοίωση, είναι βαρύνουσας σημασίας, θεωρείται μάλιστα ότι είναι η πιο σημαντική διαδικασία μετά από τον καθορισμό της βαθυμετρίας. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι, στο κυματικό μοντέλο PMS, συνίσταται να τοποθετείται η ακτή στα ανατολικά της παράκτιας περιοχής. Στην παρούσα εργασία, θεωρούνται τυχαίοι κυματισμοί, με το μοντέλο να απαιτεί σε αυτό το σημείο την εισαγωγή της μέσης τετραγωνικής ρίζας του ύψους κύματος  $H_{rms}$ , της περιόδου αιχμής  $T_p$  και μέσης κατεύθυνσης των κυματισμών  $\theta$  στα βαθιά. Όσον αφορά τα πλευρικά όρια, υπάρχει η επιλογή να είναι απορροφητικά (absorbing), δηλαδή οι κυματισμοί να απορροφώνται πλήρως από αυτά, ανακλαστικά (reflecting), με τους προσπίπτοντες κυματισμούς να ανακλώνται πλήρως ή συμμετρικά (symmetrical) θεωρώντας ότι η μεταβολή των κυματισμών κατά μήκος αυτών είναι μηδενική. Στην παρούσα εφαρμογή, όπως συνίσταται από το εγχειρίδιο του προγράμματος, εκλέγεται η τρίτη επιλογή.

- **Παράμετροι μοντέλου (Model Parameters)**

Εν συνεχεία, προσδιορίζονται οι παράμετροι που αφορούν το μοντέλο στην αντίστοιχη καρτέλα (Model Parameters). Κατ' αρχάς, επιλέγεται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας σταθερή και ίση με το μηδέν, αφού δεν υπάρχουν δεδομένα προς χρήση. Έπειτα, προσδιορίζεται ο τύπος της παραβολικής προσέγγισης που χρησιμοποιείται για την επίλυση της εξίσωσης της ήπιας κλίσης, ανάλογα με τις τιμές των συντελεστών  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  της Σχέσης 4.16. Παρέχεται η δυνατότητα χρήσης τριών τύπων. Ο πρώτος περιλαμβάνει το λεγόμενο απλό μοντέλο (Simple model), κατάλληλο για περιπτώσεις στις οποίες η γωνία μεταξύ του θετικού οριζώντιου άξονα και της διεύθυνσης διάδοσης του κυματισμού δεν ξεπερνά τις  $10^\circ$ . Για εύρη γωνιών που φτάνουν τις  $45^\circ$  (Kirby, 1986), χρησιμοποιείται το μοντέλο Pade' s, ενώ το μοντέλο Minimax ελαχιστοποιεί τα σφάλματα για δεδομένα εύρη.

Για παράδειγμα, το Minimax 60, ελαχιστοποιεί τα σφάλματα για κυματισμούς που διαδίδονται σε γωνία 60°. Επισημαίνεται όμως, ότι μπορεί να υπάρχουν σφάλματα για μικρότερες γωνίες. Επίσης, το εγχειρίδιο δεν συνιστά τη χρήση για μεγαλύτερα εύρη από 60°, αλλά προτείνει τη στρέψη του μοντέλου, ώστε ο κυματισμός να έρχεται με μικρότερη γωνία στην περιοχή μελέτης. Τέλος, σημειώνεται ότι πρέπει να δίδεται ιδιαίτερη προσοχή στην προσέγγιση αυτή, καθώς σφάλματα που μπορεί να μην είναι ορατά στο PMS μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ μεγαλύτερα, όσον αφορά τη μετέπειτα υδροδυναμική ανάλυση. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, λαμβάνοντας υπόψη τα προαναφερθέντα, τα δεδομένα κυματικά σενάρια και μετά από δοκιμές, αποφασίστηκε η χρήση του μοντέλου Pade' s. Ακόμα, χρησιμοποιείται, όπως συνίσταται, φίλτρο 0.25 (προεπιλεγμένη τιμή) για να εξομαλυνθούν οι αστάθειες λόγω των απότομων μεταβολών του ύψους κύματος κατά τη θραύση. Όσον αφορά την τριβή στον πυθμένα, επιλέχθηκε να ληφθεί υπ' όψιν. Λόγω αμμώδους ακτής, με μέση διάμετρο κόκκου  $D_{50}=1\text{mm}$  υπολογίζεται η σταθερή τραχύτητα Nikuradse από την εξής σχέση:

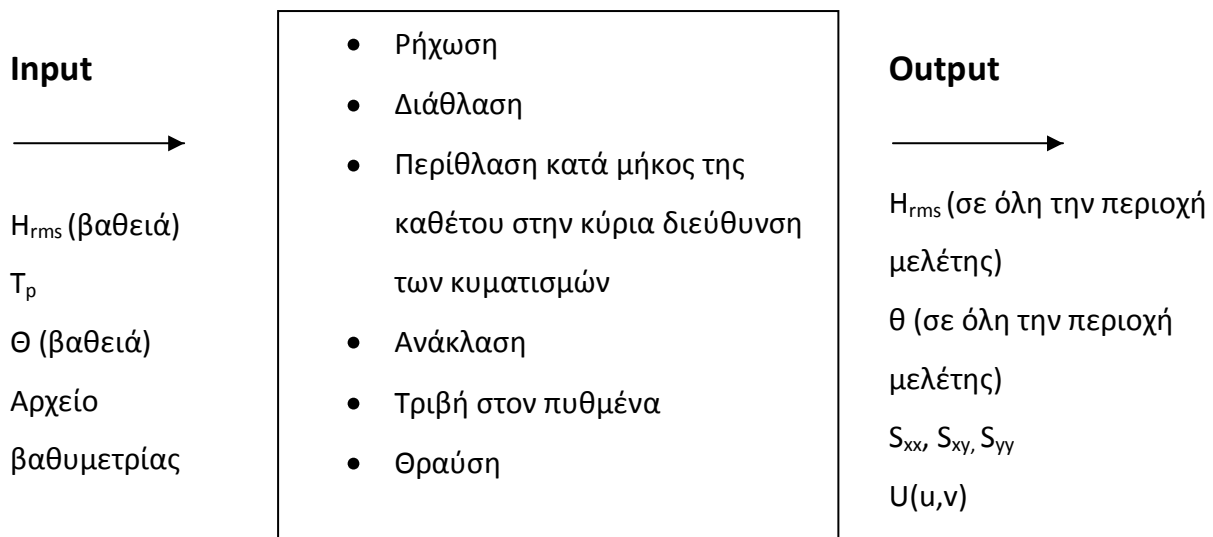
$$k_N = 2.5D_{50} \quad (4.39)$$

Η τραχύτητα προκύπτει  $k_N=0.0025\text{m}$ . Τέλος, όσον αφορά τη θραύση, χρησιμοποιείται το μοντέλο των Battjes and Janssen (1978) που περιγράφηκε πρωτύτερα, με τις προκαθορισμένες τιμές  $\gamma_1=1.0$ ,  $\gamma_2= 0.8$  και  $\alpha=1.0$ .

- **Αποτελέσματα (Output)**

Στην τελευταία καρτέλα αποτελεσμάτων (Output), δηλώνονται τα αρχεία αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από το πρόγραμμα. Στη συγκεκριμένη μελέτη, εξάγεται ένα αρχείο που περιλαμβάνει τη μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους κύματος  $H_{rms}$  (m), τη διεύθυνση διάδοσης  $\theta$  (°) τις ταχύτητες κατά την οριζόντια  $u$  (m/s) και την κατακόρυφη διεύθυνση  $v$  (m/s) και ένα δεύτερο αρχείο που περιλαμβάνει τις τάσεις ακτινοβολίας  $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$  (m). Τα αρχεία αυτά θα εισαχθούν ως αρχικά δεδομένα (input) στο μοντέλο στερεομεταφοράς ST και στο υδροδυναμικό HD αντίστοιχα. Τέλος, στο Σχήμα 4.1 περιγράφεται σχηματικά η λειτουργία του κυματικού μοντέλου Mike 21 PMS.

## Κυματικό Μοντέλο Mike 21 PMS



Σχήμα 4.1 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του κυματικού μοντέλου MIKE 21 PMS προσαρμοσμένη στα δεδομένα της παρούσας μελέτης.

## 4.2 Υδροδυναμικό μοντέλο HD

### 4.2.1 Εισαγωγή

Το MIKE21 Flow Model είναι ένα μοντέλο υπολογισμού διδιάστατων 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)

#### 4.2.2 Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

Το MIKE21 HD είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει διδιάστατες μη μόνιμες ροές (ομογενείς κατά βάθος) σε κάθε σημείο του κανάβου. Οι εξισώσεις συνεχείας 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:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d_t}{\partial t} \quad (4.40)$$

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:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 d^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{xx}) \right] \\ = 0 \end{aligned} \quad (4.41.a)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{d} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{d} \right) + gd \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 d^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (d\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (d\tau_{xy}) \right] \\ - \Omega_p - fV_w V_{wy} + \frac{d}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \end{aligned} \quad (4.41.b)$$

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,  $\rho_w$  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 συνεχείας και διατήρησης της ποσότητας κίνησης στο χώρο και το χρόνο.

#### 4.2.2.1 Περιγραφή βασικών παραμέτρων του μοντέλου

Σε αυτό το εδάφιο περιγράφονται το τυρβώδες ιξώδες (Eddy viscosity), η αντίσταση του πυθμένα (Bed resistance) και οι τάσεις ακτινοβολίας (Radiation stresses) και ο τρόπος με τον οποίο τα μεγέθη αυτά συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς του υδροδυναμικού μοντέλου HD.

Κατ' αρχάς, στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης που περιγράφηκαν παραπάνω, η διατμητική τάση στον πυθμένα εμπεριέχει μεταβολές λόγω τύρβης και διακυμάνσεων μικρής κλίμακας των υδάτων. Το παραπάνω φαινόμενο εισάγεται στο μοντέλο ως διατύπωση τυρβώδους 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 τυρβώδες ιξώδες εισάγεται στην εξίσωση ποσότητα κίνησης κατά  $x$  είτε σε όρους ορμής είτε σε όρους ταχύτητας, όπως περιγράφεται στις δύο ακόλουθες σχέσεις αντίστοιχα:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ E_v \frac{\partial p}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ E_v \frac{\partial p}{\partial y} \right\} \quad (4.42.a)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ dE_v \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ dE_v \frac{\partial u}{\partial y} \right\} \quad (4.42.b)$$

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 τυρβώδες ιζώδες πρέπει να ακολουθεί το ακόλουθο κριτήριο:

$$\frac{E_v \Delta t}{\Delta x^2} \leq 0.5 \quad (4.43)$$

όπου  $\Delta x$  η ισοδιάσταση του κανάβου και  $\Delta t$  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:

$$E_v = C_s^2 \Delta x^2 \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial x}} \quad (4.44)$$

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 σχέση είναι η εξής:

$$R = \frac{g|u|}{C^2} \quad (4.45)$$

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

$$C = M d^{\frac{1}{6}} \quad (4.46)$$

Οι τάσεις ακτινοβολίας  $S$  που περιγράφηκαν παραπάνω συμπεριλαμβάνονται στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα με τους εξής τρόπους:

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \quad (4.47)$$



$$\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} \quad (4.48)$$

### 4.2.3 Εφαρμογή μοντέλου

- **Βασικές Παράμετροι (Basic Parameters)**

Κατ' αρχάς, όσον αφορά την καρτέλα με τις βασικές παραμέτρους του μοντέλου (Basic Parameters), επιλέγεται το είδος της ανάλυσης, η οποία είναι μόνο υδροδυναμική χωρίς να συνδυάζεται με κάποια άλλη. Εν συνεχεία, εισάγεται το αρχείο της βαθυμετρίας και επιλέγεται να μην υπάρχει επιρροή της δυνάμεως Coriolis (επίδραση περιστροφής της Γης). Ακόμη, με την επιλογή Cold Start, δηλώνεται ότι η μελέτη δεν αποτελεί συνέχεια κάποιων προηγούμενων. Το επόμενο βήμα είναι πολύ σημαντικό για τη μελέτη, καθώς εδώ καθορίζεται το χρονικό βήμα και η χρονική περίοδος προσομοίωσης κατά την οποία λαμβάνει χώρα η ανάλυση. Κριτήριο για την επιλογή του πρώτου αποτελεί ο αριθμός Courant, ο οποίος σχετίζεται με τη σταθερότητα του μοντέλου. Ο αριθμός Courant Cr δίδεται από τη σχέση:

$$Cr = C \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (4.49)$$

όπου  $\Delta t$  το χρονικό βήμα,  $\Delta x$  το αντίστοιχο χωρικό 5 m και C η ταχύτητα που δίνεται από τη σχέση  $C=(gd)^{1/2}$ , όπου d το βάθος.

Ο μέγιστος αριθμός Cr προκύπτει για το μέγιστο βάθος, το οποίο για την παρούσα μελέτη είναι 10 m. Γενικά, ο  $Cr_{max}$  δεν πρέπει να ξεπερνά το 5. Η τιμή αυτή μπορεί να φτάσει το 20 αν η βαθυμετρία είναι ομαλή. Στην παρούσα εφαρμογή επιλέχθηκε  $\Delta t=3$  s έτσι ώστε  $Cr_{max}=5.95$ , η οποία κρίθηκε επαρκής μετά και από δοκιμές. Όσον αφορά την περίοδο προσομοίωσης, αυτή πρέπει να επιλέγεται έτσι ώστε να έχουν επιτευχθεί συνθήκες ισορροπίας στο σύστημα. Λαμβάνοντας υπόψη το παραπάνω, δοκιμές, τη φύση του εξεταζόμενου φαινομένου και περιόδους προσομοίωσης συναφών παραδειγμάτων εκλέγεται περίοδος προσομοίωσης 4.5 hr. Εκτός αυτού, ενεργοποιείται η επιλογή warm-up period, κατά την οποία οι μεταβλητές αυξάνονται σταδιακά στη μέγιστη τιμή τους ώστε να

αποφευχθούν απότομες αλλαγές στις τιμές των μεταβλητών που δρουν αποσταθεροποιητικά. Τα όρια του μοντέλου, δηλαδή τα εξωτερικά κελιά που απεικονίζουν θάλασσα και στα οποία το μοντέλο θα κάνει υπολογισμούς, ανιχνεύονται από το πρόγραμμα. Στην παρούσα μελέτη είναι το Βόρειο, το Δυτικό και το Νότιο όριο αφού σε όλη την ανατολική πλευρά έχει θεωρηθεί στεριά. Οι επιλογές που αφορούν πηγές και καταβόθρες και αυτή που αφορά τον καθορισμό του ισοζυγίου μάζας παραμένουν ανενεργές αφού δε σχετίζονται με την παρούσα μελέτη. Τέλος, όπως συνίσταται από το εγχειρίδιο του προγράμματος, παρά τη απουσία παλιρροιακών ρευμάτων, ενεργοποιείται η επιλογή Flood and Dry με την οποία καθορίζεται ελάχιστο επιτρεπόμενο βάθος τα 0.2m και το βάθος στο οποίο αυτό λαμβάνεται ξανά υπόψη στους υπολογισμούς τα 0.3m.

- **Υδροδυναμικές παράμετροι (Hydrodynamic Parameters)**

Η δεύτερη καρτέλα αφορά τις υδροδυναμικές παραμέτρους (Hydrodynamic Parameters). Ορίζεται σε πρώτη φάση η αρχική στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας ως σταθερή και ίση με το μηδέν, τιμή που πρέπει να συνάδει με την αντίστοιχη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας για το κυματικό μοντέλο PMS. Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, αξίζει να τονιστεί για ακόμη μια φορά η σημασία τους στο τελικό αποτέλεσμα. Γενικά, μπορούν να περιγραφούν αναφορικά με τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (Level) ή με την ποσότητα κίνησης (Flux), δηλαδή την ποσότητα του ρευστού που περνάει το όριο. Παρέχονται διάφορες δυνατότητες για τη συνάρτηση που περιγράφει το όριο, όπως μεταξύ άλλων η τιμή να είναι σταθερή, χρονοσειρά από δεδομένες μετρήσεις, αρχείο κατασκευασμένο από το πρόγραμμα.

- Προσδιορισμός των συνοριακών συνθηκών (MIKE 21 toolbox)

Στην παρούσα μελέτη, μετά από δοκιμές και λαμβάνοντας υπόψη συναφή παραδείγματα, επιλέγεται το Δυτικό όριο να έχει μηδενική ποσότητα κίνησης για όλα τα κελιά, ήτοι (0,0-0,549), ενώ για τα πλευρικά όρια, για το Βόρειο (0,549-209,549) κατασκευασμένο με βάση τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας και Νότιο (0,0-209,0) κατασκευασμένο με βάση την ποσότητα κίνησης) κατασκευάζονται αρχεία .dfs2 με χρήση της επιλογής Wave Generated Current and setup της καρτέλας Waves του Mike 21 toolbox. Στο εργαλείο αυτό, εισάγεται το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας που έχει εξαχθεί από το κυματικό μοντέλο, ορίζονται τα κελιά που αποτελούν το αντίστοιχο όριο, η γωνία που σχηματίζει το δημιουργηθέν

κυματογενές ρεύμα με το όριο, η αντίσταση του πυθμένα και το τυρβώδες ιζώδες. Ακόμη, καθορίζεται η περίοδος προσομοίωσης η οποία πρέπει να είναι γενικά μεγαλύτερη ή ίση σε σχέση με την προσομοίωση του υδροδυναμικού μοντέλου, και συγκεκριμένα 5hr (άθροισμα περιόδου προσομοίωσης και warm-up period) για την παρούσα μελέτη. Το βήμα επιλέγεται 900s και τα χρονικά βήματα 21, άρα  $900 \cdot 21 = 18900s = 5.25hr$ . Τέλος, ενεργοποιείται η επιλογή Soft Start, η οποία συνίσταται από το πρόγραμμα ώστε η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε βήμα να παίρνει ομαλά τη μέγιστη τιμή της και να μην δημιουργούνται αστάθειες.

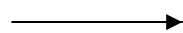
Το τυρβώδες ιζώδες  $E_v$  εκφράζει την επιρροή της διατμητικής τάσης στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης λόγω τύρβης. Στην παρούσα μελέτη, το τυρβώδες ιζώδες λαμβάνεται σταθερό για όλη την περιοχή μελέτης, και παίρνει την τιμή  $E_v = 1.0m^2/s$  σχετιζόμενο με την ταχύτητα λαμβάνοντας υπόψη το κριτήριο  $E_v \leq 0.5(\Delta x^2/\Delta t) \leq 4.167$  (Σχέση 4.43) και μετά από έρευνα σε συναφή παραδείγματα. Επίσης, η αντίσταση του πυθμένα στη ροή C επιλέγεται σταθερή και εκφρασμένη με τον αριθμό Manning M, ο οποίος σε σχέση με τον αριθμό Chezy, είναι πιο ακριβής αν και αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο. Οι προτεινόμενες από το πρόγραμμα τιμές κυμαίνονται μεταξύ 20-40  $m^{1/3}/s$ , ενώ για την παρούσα μελέτη επιλέγεται  $M=32 m^{1/3}/s$ . Έπειτα εισάγεται το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας από το κυματικό μοντέλο.

- **Αποτελέσματα (Results)**

Τέλος, δημιουργείται ένα αρχείο αποτελεσμάτων, που περιλαμβάνει το ύψος του νερού H,

### Υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 HD

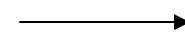
#### Input



Αρχείο S  
Αρχείο  
βαθυμετρίας

- διασπορά της ορμής
- διατμητική τάση στον πυθμένα
- μεταβολές της στάθμης της θάλασσας
- Τάσεις ακτινοβολίας υπολογισμένες από το κυματικό μοντέλο

#### Output



V (σε όλη την περιοχή μελέτης)  
P (σε όλη την περιοχή μελέτης)  
Q (σε όλη την περιοχή μελέτης)

μελέτης)

Σχήμα 4.2 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του υδροδυναμικού μοντέλου Mike 21 HD προσαρμοσμένη στα δεδομένα της παρούσας μελέτης.

καθώς και την ποσότητα κίνησης  $P$ ,  $Q$  στις δύο διευθύνσεις  $x$  και  $y$  αντίστοιχα. Όσον αφορά τα αποτελέσματα, επιλέγεται να εξαχθεί με βάση τα προαναφερθέντα ένα τελικό αρχείο που περιλαμβάνει την ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος  $V$  (m/s), το οποίο είναι και αυτό που παρουσιάζεται ως αρχείο αποτελεσμάτων. Επιλέγεται να παρουσιαστεί όλη η περιοχή μελέτης, όσον αφορά τη χωρική κλίμακα, ενώ ως προς το χρόνο επιλέγεται να παρουσιαστούν δέκα βήματα για να μειωθεί ο υπολογιστικός φόρτος. Το αρχείο αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο στο μοντέλο στερεομεταφοράς ST.

### **4.3 Μοντέλο Στερεομεταφοράς ST**

#### **4.3.1 Εισαγωγή**

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.

#### **4.3.2 Θεωρητικές Εξισώσεις**

##### **4.3.2.1 Θεωρίες στερεομεταφοράς σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος**

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**

Κατ' αρχάς, χρησιμοποιείται η θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund and Hansen. Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου υπολογίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\Phi_t = 0.1 \frac{C^2}{2g} \tau_\theta^{2.5} \quad (4.50)$$

$$\Phi_t = \frac{q_t}{(s-1)gD^3} \quad (4.51)$$

όπου C ο αριθμός Chezy, s η σχετική πυκνότητα  $\rho_s/\rho$ , D η διάμετρος κάκου και  $q_t$  ο ρυθμός μεταφοράς του συνολικού φορτίου και  $\tau_\theta$  η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα που προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_\theta = \frac{U_f^2}{(s-1)gD} \quad (4.52)$$

όπου  $U_f$  η διατμητική ταχύτητα που σχετίζεται με την συνολική τριβή.

- **Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund and Fredsøe**

Επίσης, χρησιμοποιείται η θεωρία του ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) 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 ( $q_s$ ), ήτοι  $q_t = q_b + q_s$ . 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:

$$q_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.07\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gD} \quad , \theta' > \theta_c \quad (4.53)$$

όπου p η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι σε κάποιο στρώμα να βρίσκονται σε κίνηση,  $\theta'$  η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) και  $\theta_c$  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)  $\theta'$  και η πιθανότητα  $p$  δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\theta' = \frac{U_f'^2}{(s-1)gD} \quad (4.54)$$

$$p = [1 + (\frac{\pi\beta_f/6}{\theta' - \theta_c})^4]^{-0.25} \quad (4.55)$$

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

$$q_s = 11.6U_f'^2 c_b a [I_1 \ln(30d/k_N) + I_2] \quad (4.56)$$

όπου  $c_b$  η συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος,  $a=2d$  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  $z^* = W_f/\kappa U_{f,wc}$ , με  $W_f$  να απεικονίζει την ταχύτητα καθίζησης του αιρούμενου 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  $(\alpha,d)$  όπου το  $y$  μετράται πάνω από το σταθερό επίπεδο του πυθμένα. Στο επίπεδο αναφοράς  $a=2d$  η συγκέντρωση  $c_b$ , υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$c_b = \frac{0.65}{(1 + 1/\lambda)^3} \quad (4.57)$$

όπου  $\lambda$  παράμετρος που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \pi p \beta / 6}{0.027 s \theta'}} \quad , \theta' > \theta_c + \frac{\pi p \beta}{6} \quad (4.58)$$

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

- **Διατύπωση ολικού φορτίου μεταφοράς των Zyserman and Fredsøe**

Η διατύπωση ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των 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:

$$c_b = \frac{A(\theta' - \theta_c)^n}{1 + \frac{A}{c_m}(\theta' - \theta_c)^n}, \theta' > \theta_c \quad (4.59)$$

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 φορτίου πυθμένα υπολογίζεται ως:

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \quad (4.60)$$

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gD^3}} \quad (4.61)$$

Πρέπει να αναλογιστεί κανείς ότι 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**

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

$$\Phi_b = C \left( \frac{F_{gr}}{A} - 1 \right)^m \quad (4.62)$$

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

$$D_{gr} = D \left[ \frac{g(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad (4.63)$$

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 ακόλουθη σχέση:

$$F_{gr} = \frac{U_f^n}{\sqrt{gD(s-1)}} \left[ \frac{V}{\sqrt{32 \log(10d/D)}} \right]^{1-n} \quad (4.64)$$

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 χονδρόκοκκα προς τα πιο λεπτόκοκκα υλικά.

#### 4.3.2.2 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**

Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, το ολικό φορτίο μεταφοράς ιζημάτων  $q_t$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_t = q_b + q_s = q_b(1 + 1.83Q) \quad (4.65)$$

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



$$Q = [I_1 \ln \left( \frac{33d}{r} \right) + I_2] \quad (4.66)$$

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:

$$z^* = \frac{W_f}{\kappa U_{f,wc}} \quad (4.67)$$

όπου  $W_f$  η ταχύτητα καθίζησης του αιωρούμενου ιζήματος,  $\kappa$  η σταθερά του Von Karman και  $U_{f,wc}$  η διατμητική ταχύτητα κάτω από συνθήκες συνδυασμένης δράσης κύματος και ρεύματος. Η επίδραση των κυμάτων 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:

$$C = 18 \log \left( \frac{12d}{r} \right) \quad (4.68)$$

Όσον αφορά το μέγεθος  $U_{f,wc}$ , αυτό υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$U_{f,wc} = U_{f,c} \sqrt{1 + 0.5 \frac{\xi u_b}{V}} = \frac{V \sqrt{g}}{C} \sqrt{1 + 0.5 \left( \frac{\xi u_b}{V} \right)^2} \quad (4.69)$$

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

$$\xi = C \sqrt{\frac{f_w}{2g}} \quad (4.70)$$

Ο παράγοντας κυματικής τριβής  $f_w$  υπολογίζεται από την εξής σχέση (Swart):

$$f_w = \exp \left[ -5.977 + 5.213 \left( \frac{a_p}{r} \right)^{-0.194} \right] , 1.47 < \frac{a_p}{r} < 3000 \quad (4.71.a)$$

$$f_w = 0.32 , \quad \frac{a_p}{r} < 1.47 \quad (4.71.b)$$

όπου  $a_p$  το πλάτος της κυματικής κίνησης που δίνεται από την εξής σχέση:

$$a_p = \frac{u_b T}{2\pi} \quad (4.72)$$

Το πυθμενικό φορτίο  $q_b$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$q_b = BD_{50} U_{f,c} \exp \left( -\frac{0.27 \Delta D_{50} g}{\mu U_{f,wc}^2} \right) \quad (4.73)$$

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

$$\mu = \left( \frac{C}{C'} \right)^{1.5} \quad (4.74)$$

όπου  $C'$  είναι ο αριθμός Chezy που σχετίζεται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πυθμενικού υλικού και υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$C' = 18 \log \left( \frac{12d}{D_{90}} \right) \quad (4.75)$$

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

- **Ντετερμινιστικό μοντέλο μεταφοράς STP**

Το ντετερμινιστικό διακυματικό πρόγραμμα μεταφοράς ιζημάτων STP της DHI χρησιμοποιείται για να υπολογίσει 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.

#### **4.3.3 Εφαρμογή μοντέλου**

- **Βασικές παράμετροι (Basic Parameters)**

Σε πρώτη φάση, στην καρτέλα που αφορά τις βασικές παραμέτρους του προγράμματος (Basic Parameters), επιλέγεται αν το είδος της ανάλυσης θα είναι μελέτη αμιγούς ρεύματος ή συνδυασμός κύματος και ρεύματος. Στην παρούσα μελέτη ισχύει προφανώς η δεύτερη περίπτωση. Εν συνεχεία, εισάγεται ως δεδομένο το αρχείο που έχει προκύψει από το υδροδυναμικό μοντέλο και επιλέγεται αν η ανάλυση θα γίνει για όλη την περιοχή μελέτης ή για μια υποπεριοχή και επίσης αν θα γίνει για όλη τη χρονική περίοδο ή μέρος αυτής που χρησιμοποιήθηκε στο υδροδυναμικό μοντέλο. Στην εφαρμογή, επιλέγεται να χρησιμοποιηθούν τα ίδια δεδομένα με το HD δηλαδή χρονική περίοδος 4.5 hr με 10 χρονικά βήματα.

- **Παράμετροι μοντέλου (Model Parameters)**

Στην καρτέλα που αφορά τις παραμέτρους του μοντέλου (Model Parameters), αρχικά επιλέγεται η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την κυκλοφορία των ιζημάτων. Η πρώτη επιλογή, μέθοδος Bijker, υπολογίζει απ' ευθείας τους ρυθμούς στερεομεταφοράς με τη μέθοδο του ολικού φορτίου, ενώ η δεύτερη είναι το ντετερμινιστικό μοντέλο STP, το οποίο κάνει παρεμβολή για τον υπολογισμό των ρυθμών κυκλοφορίας, βασισμένο σε πίνακα κατασκευασμένο από το χρήστη. Στην παρούσα εργασία, επιλέγεται η δεύτερη δυνατότητα.

- Προσδιορισμός πίνακα ιδιοτήτων ιζημάτων (Mike 21 toolbox)

Σημειώνεται εδώ ότι χρησιμοποιείται διδιάστατη προσομοίωση για το μοντέλο STP, επειδή γίνεται χρήση κυματογενών ρευμάτων που σχηματίζουν γωνία  $90^\circ$  με τα κύματα. Ο προαναφεθής πίνακας κατασκευάζεται με χρήση της επιλογής Generation of Sediment Tables της καρτέλας Sediments του Mike 21 toolbox. Αρχικά, επιλέγονται γενικές παράμετροι που αφορούν τη μελέτη, οι οποίες είναι η σχετική πυκνότητα  $s=\rho_s/\rho=2.65$  ( $\rho_s$ ,  $\rho$  η πυκνότητα του ιζήματος και του νερού αντίστοιχα) για άμμο, η θερμοκρασία του νερού  $\theta=16^\circ\text{C}$ , η ακρίβεια των υπολογισμών όσον αφορά την ακρίβεια της τιμής των συγκεντρώσεων ιζημάτων ( $10^{-4}$ ), ο μέγιστος αριθμός περιόδων κύματος (150) και η κρίσιμη τιμή της παραμέτρου Shields  $\theta_c=0.045$ , η οποία είναι μια αδιάστατη έκφραση της διατμητικής τάσης στον πυθμένα που ορίζει την έναρξη κίνησης ενός κόκκου ιζήματος. Επίσης, επιλέγεται να μην ληφθούν υπόψη στη μελέτη πτυχώσεις που δημιουργούνται από τα κύματα (wave generated ripples) και η κλίση του πυθμένα. Τέλος, επιλέγεται το ντετερμινιστικό μοντέλο (Engelund & Fredsøe, 1976) για την περιγραφή της συγκέντρωσης ιζήματος στον πυθμένα. Στη συνέχεια, κατασκευάζεται ο πίνακας με τις παραμέτρους που αφορούν το είδος του ιζήματος αλλά και το επικρατούν κυματικό καθεστώς. Σε τρεις στήλες, εισάγονται οι αρχικές τιμές, το βήμα και το πλήθος των τιμών αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πίνακα όσον αφορά την ταχύτητα του ρεύματος  $V$ , το ύψος κύματος  $H_{rms}$ , την περίοδο αιχμής  $T_p$ , το λόγο ύψος κύματος προς βάθος νερού  $H_{rms}/d$ , το μέγεθος κόκκου  $D_{50}$ , τη διαβάθμιση του εδαφικού υλικού  $\sigma_g$  και εφόσον έχει ληφθεί υπόψη, στοιχεία που αφορούν την κλίση του πυθμένα. Κάθε νέα τιμή  $j_n$  υπολογίζεται σε σχέση με την προηγούμενη  $j_{n-1}$  ως  $j_n = j_{n-1} + \text{βήμα}$  εκτός της περίπτωσης του μεγέθους κόκκου για το οποίο ισχύει κατ' αντιστοιχία  $j_n = j_{n-1} * \text{βήμα}$ . Γενική αρχή είναι ότι πρέπει τα μεγέθη του δημιουργηθέντος πίνακα να είναι σε κάθε βήμα υπολογισμού του

μοντέλου στερεομεταφοράς (στην παρούσα μελέτη είναι 10 τα χρονικά βήματα όπως αναφέρθηκε παραπάνω) μεγαλύτερα από τα δεδομένα της μελέτης. Αν κάτι τέτοιο δεν ισχύει, το Mike 21 ST δε λειτουργεί και ο πίνακας πρέπει να κατασκευαστεί εκ νέου με μεγαλύτερες τιμές ως προς την παράμετρο που υπάρχει πρόβλημα. Τα δεδομένα ενός τέτοιου πίνακα που αφορά τη διάταξη 1 για το πρώτο κυματικό σενάριο παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Τέλος, όσον αφορά τη θραύση, επιλέγονται όπως και πρωτίτερα οι παράμετροι θραύσης  $\gamma_1=1$  και  $\gamma_2=0.8$ .

Στη συνέχεια εισάγονται τα κυματικά δεδομένα στο μοντέλο. Ορίζεται η περίοδος αιχμής, δηλώνεται ότι ο κάρναβος έχει την ίδια διεύθυνση με αυτήν των προηγούμενων μοντέλων επιλέγοντας  $l,k\text{-coord}=0$  στις αντίστοιχες και εισάγεται το αρχείο με τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου PMS που αφορούν το ύψος κύματος. Επιλέγεται να μην γίνει παρεμβολή μεταξύ των κυματικών δεδομένων αφού δεν εισάγονται ως χρονοσειρά αλλά να είναι σταθερά μεταξύ τους και επιλέγονται οι τιμές των παραμέτρων θραύσης.

Πίνακας 4.2 Κατασκευή πίνακα ιδιοτήτων ιζήματος (μοντέλο ST, διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο)

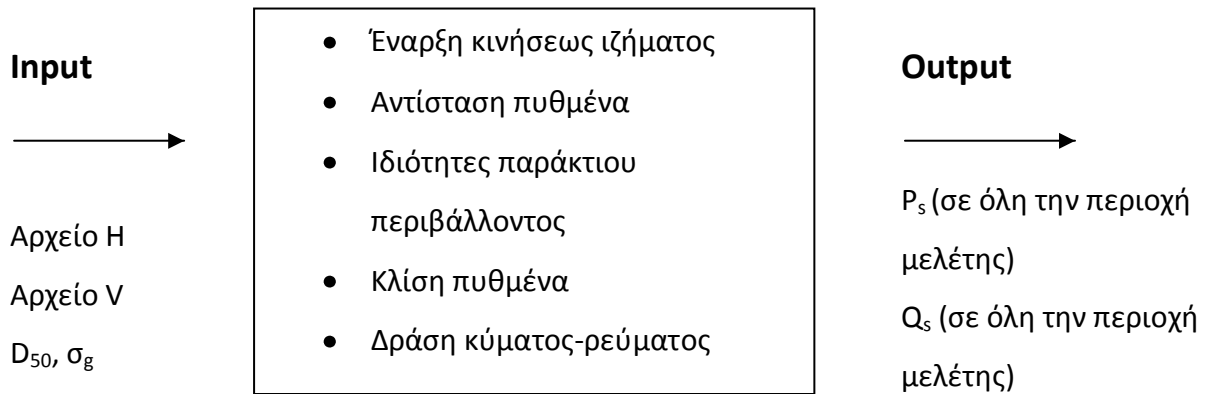
Παράμετρος	Αρχική Τιμή	Βήμα	Πλήθος τιμών
<b>ταχύτητα ρεύματος V</b>	0.1	0.1	16
<b>ύψος κύματος <math>H_{rms}</math></b>	0.1	0.2	10
<b>περίοδο αιχμής <math>T_p</math></b>	6	1.0	1
<b><math>H_{rms}/d</math></b>	0.05	0.1	9
<b>μέγεθος κόκκου <math>D_{50}</math></b>	1.0	2.0	1
<b>διαβάθμιση δείγματος <math>\sigma_g</math></b>	1.25	0.15	1

Όσον αφορά την αντίσταση του πυθμένα, χρησιμοποιείται και εδώ σταθερός αριθμός Manning=32, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα. Τέλος, εισάγονται τα δεδομένα που αφορούν το είδος του ιζήματος, δηλαδή η μέση διάμετρος κόκκου  $D_{50}=1\text{mm}$ , η διαβάθμιση  $\sigma_g=1.25$  και το πορώδες  $n=0.4$  τα οποία είναι σταθερά ως προς το χώρο και θεωρείται ότι δεν υπάρχει κάποια μη διαβρώσιμη επιφάνεια στον πυθμένα (βραχώδες υπόστρωμα).

- **Αποτελέσματα (Output)**

Στα αποτελέσματα συμπεριλαμβάνεται ο ρυθμός στερεομεταφοράς  $P_s$  και  $Q_s$  κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση αντίστοιχα ( $m^3/έτος/m$  πλάτους) και η μεταβολή του πυθμένα  $dz/dt$  (m/d).

### Μοντέλο στερεομεταφοράς Mike 21 ST

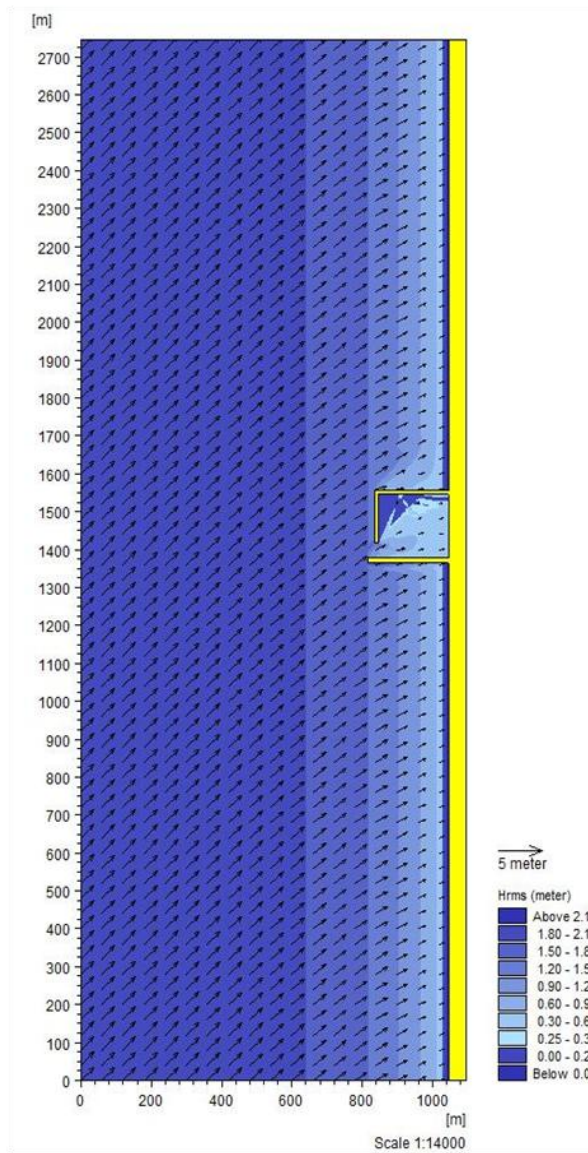


Σχήμα 4.3 Σχεδιάγραμμα λειτουργίας του υδροδυναμικού μοντέλου Mike 21 ST προσαρμοσμένη στα δεδομένα της παρούσας μελέτης.

## 5. Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

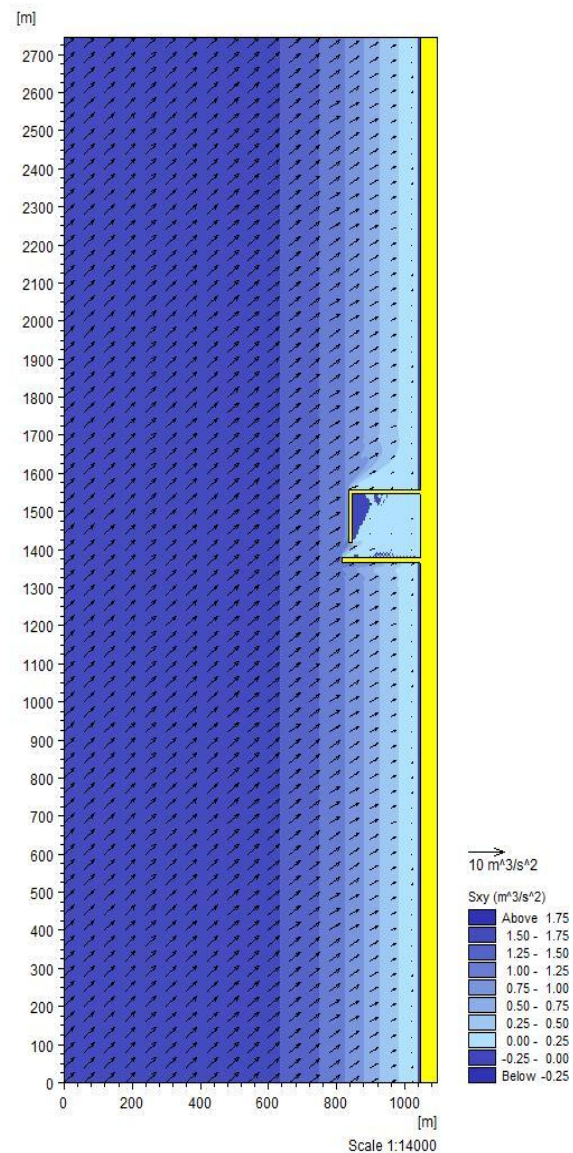
Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση με το υπολογιστικό πακέτο Mike 21 και θα γίνει σύγκριση αυτών όσον αφορά τις πέντε διατάξεις μαρίνων και τις προτάσεις βελτίωσης.

### 5.1 Πορεία αποτελεσμάτων για τη διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο



Σχήμα 5.1 Ύψος κύματος  $H_{rms}$  (m)

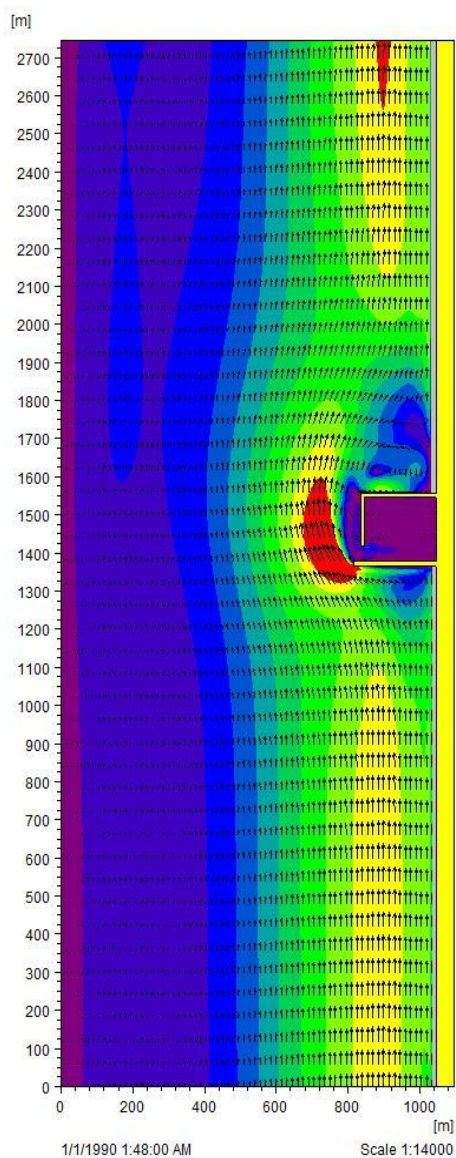
διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο



Σχήμα 5.2 Τάσεις ακτινοβολίας  $S_{xy}$  ( $m^3/s^2$ )

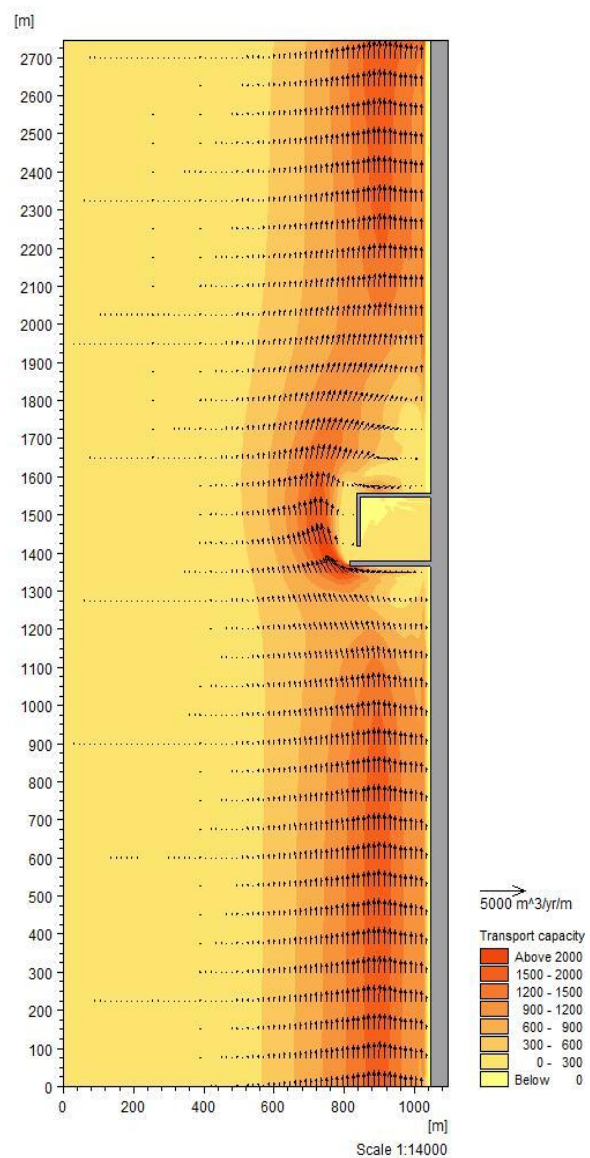
διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο

Κατ' αρχάς, όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, χρησιμοποιείται το κυματικό μοντέλο PMS για τον προσδιορισμό του ύψους κύματος και των τάσεων ακτινοβολίας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, το ύψος κύματος μειώνεται ομαλά από τα 2.0 m, τιμή που επικρατεί στα βαθιά μέχρι να μηδενιστεί στην ακτογραμμή. Η περίοδος αιχμής προφανώς παραμένει σταθερή, ενώ η μέση γωνία διεύθυνσεως μειώνεται από την αρχική τιμή των 45° συνεχώς μέχρι να φτάσει τις 0° (κάθετη πρόσκρουση στην ακτογραμμή), λόγω διάθλασης. Οι τάσεις ακτινοβολίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2 έχουν παρόμοια απεικόνιση και τάση με το ύψος κύματος.



Σχήμα 5.3 Ταχύτητα ρεύματος V (m/s)

διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο



Σχήμα 5.4 Στερεομεταφορά TC (m<sup>3</sup>/yr/m)

διάταξη 1, πρώτο κυματικό σενάριο



Με δεδομένο το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας και με χρήση του υδροδυναμικού μοντέλου Mike 21 HD, προσδιορίζεται η ταχύτητα  $V$  του κυματογενούς ρεύματος. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3. Η ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος φτάνει, όπως είναι αναμενόμενο, τη μέγιστη τιμή της κοντά στη μαρίνα όπου ξεπερνά τοπικά τα 0.9 m/s. Συγκεκριμένα, στον προσήνεμο μώλο, όπου το ρεύμα προσκρούει στη μαρίνα, παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες ταχύτητες. Επίσης, φαίνεται ότι κυριαρχεί η κατά μήκος της ακτογραμμής συνιστώσα του κυματογενούς ρεύματος.

Με δεδομένα τα αρχεία του ύψους κύματος (Σχήμα 5.1) και της ταχύτητας ρεύματος (Σχήμα 5.3) προσδιορίζεται ο ρυθμός στερεομεταφοράς TC με το μοντέλο Mike 21 ST. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.4. Τα Σχήματα 5.3 και 5.4 παρουσιάζουν ομοιότητες, όπως ήταν αναμενόμενο, αφού σε περιοχές με μεγάλες ταχύτητες ρεύματος, μεταφέρεται περισσότερη ποσότητα ιζήματος. Πρέπει να τονιστεί για ακόμη μια φορά ότι Mike 21 ST δεν αποτελεί ένα ολοκληρωμένο μορφολογικό μοντέλο αλλά δύναται να καταδείξει πιθανές περιπτώσεις αποθέσεως και διάβρωσης, γι αυτό τα αποτελέσματα πρέπει να αντιμετωπίζονται με κάποια επιφύλαξη. Παρά ταύτα, για να υπάρξει η δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών διατάξεων και κυματικών σεναρίων, θα παρατεθούν κάποια αριθμητικά αποτελέσματα πέραν της γραφικής απεικόνισης. Στην περιοχή εγγύς της εισόδου της λιμενολεκάνης, ο ρυθμός στερεομεταφοράς είναι  $2000 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$  πλάτους. Θεωρώντας ότι η στερεομεταφορά λαμβάνει χώρα σε μια περιοχή πλάτους περίπου 400 m (πάχος ζώνης θραύσης), ο ρυθμός στερεομεταφοράς είναι  $0.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ .

## **5.2 Αποτελέσματα στερεομεταφοράς για την παράκτια περιοχή χωρίς την παρουσία μαρίνας**

Κατ' αρχάς, τα τρία μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστεί η στερεομεταφορά στην παράκτια περιοχή πριν από την κατασκευή των μαρίνων. Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου όσον αφορά την ταχύτητα ρεύματος και τη στερεομεταφορά στη ζώνη θραύσεως, δηλαδή στην περιοχή όπου εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές τους. Τα αναφερθέντα αποτελέσματα παρουσιάζονται γραφικά στο Παράρτημα Α και συγκεκριμένα στα Σχήματα Α.1-Α.4. Όπως προκύπτει από την ανάλυση, το ρεύμα είναι πιο έντονο όσον αφορά το πρώτο σενάριο, με σχεδόν διπλάσια ταχύτητα, ενώ και η στερεομεταφορά είναι πολύ μεγαλύτερη. Αυτό εξηγείται αν λάβει κανείς υπόψη

τη διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών, η οποία στο πρώτο σενάριο είναι 45° ενώ στο δεύτερο 10° σε σχέση πάντα με τον οριζόντιο άξονα. Όπως έχει αναφερθεί στη θεωρία, η γωνία 45° είναι η δυσμενέστερη όσον αφορά την γέννηση κατά μήκους της ακτής κυματογενών ρευμάτων, στοιχείο που καταδεικνύεται από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης.

Πίνακας 5.1 Αποτελέσματα ταχύτητας ρεύματος  $V_b$  και στερεομεταφοράς  $TC_b$  στη ζώνη θραύσης χωρίς την παρουσία μαρίνας

Κυματικά σενάρια	$V_b$ (m/s)	$TC_b$ ( $m^3/yr/m$ )
Σενάριο 1	0.8	1800
Σενάριο 2	0.5	600

### 5.2.1 Επίδραση κατασκευής μαρίνας στην παράκτια περιοχή

Η κατασκευή των διατάξεων μαρίνων σε μια παράκτια περιοχή αποτελεί μιας μεγάλης κλίμακας παρέμβαση που επηρεάζει τα παράκτια ρεύματα και τη στερεομεταφορά. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το πρώτο κυματικό σενάριο, η ταχύτητα ρεύματος φτάνει το 1 m/s κοντά στην κατασκευή σε όλες τις περιπτώσεις, ενώ η στερεομεταφορά ξεπερνά τα 6000  $m^3/yr/m$  τοπικά. Όσον αφορά της περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας, στην οποία εστιάζεται το ενδιαφέρον, η στερεομεταφορά φτάνει τα 2000  $m^3/yr/m$  (Πίνακας 5.2). Τα αποτελέσματα για το δεύτερο κυματικό σενάριο δείχνουν επίσης μια αύξηση της στερεομεταφοράς, μικρότερης κλίμακας, με το ρεύμα να φτάνει τα 0.7 m/s και τη στερεομεταφορά τα 1500  $m^3/yr/m$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και τα 900  $m^3/yr/m$  στην περιοχή εγγύς της εισόδου αυτής (Πίνακας 5.3).

### 5.3 Αποτελέσματα διερεύνησης στερεομεταφοράς στις διατάξεις μαρίνων

Σε αυτό το εδάφιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τα δύο κυματικά σενάρια, όσον αφορά τη διερεύνηση των πέντε διατάξεων μαρίνων. Γίνεται αριθμητική και γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων με πίνακες και σχήματα σε τομή της παράκτιας περιοχής ώστε να παρουσιαστεί η περιοχή με το μέγιστο ενδιαφέρον. Σημειώνεται, ότι υπάρχει αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων γραφικά, όσον αφορά την ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος και τη στερεομεταφορά στο Παράρτημα Α (Σχήματα Α.5-Α.22).

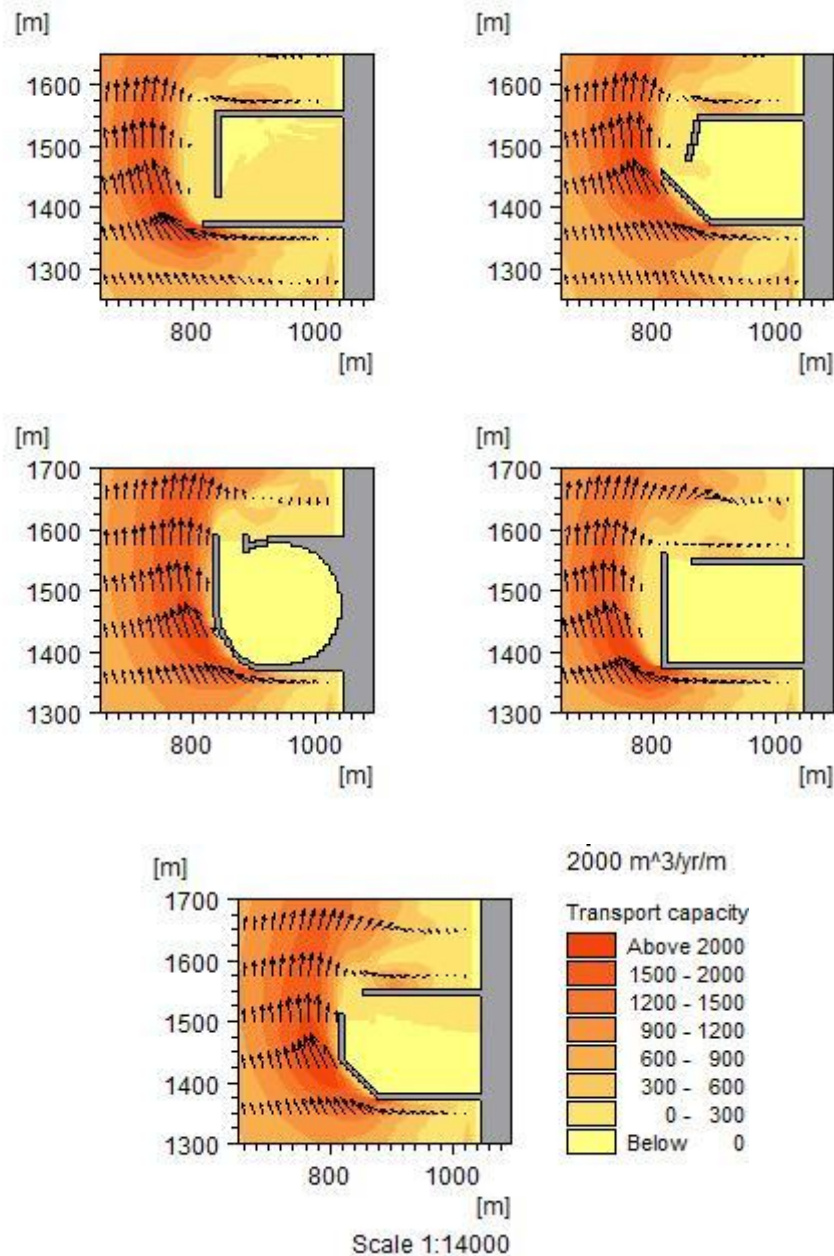
### 5.3.1 Πρώτο κυματικό σενάριο

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2 ο οποίος παρουσιάζει τις μέγιστες παρατηρηθείσες ταχύτητες ρεύματος και ρυθμούς στερεομεταφοράς κοντά στη μαρίνα αλλά και ειδικότερα κοντά στην περιοχή της εισόδου. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2, το πρόβλημα είναι πιο έντονο, όσον αφορά γενικά την περιοχή κοντά στη μαρίνα για τις διατάξεις 1 και 4 με τη στερεομεταφορά να φτάνει κατά μέγιστο τα 6400 m<sup>3</sup>/yr/m. Σημειώνεται ότι οι διατάξεις αυτές είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε το ρεύμα να έρχεται σε επαφή με ευθύγραμμο τμήμα της μαρίνας κάθετα σε σχέση με την διεύθυνση ροής του. Οι υπόλοιπες έχουν σαφώς μειωμένη στερεομεταφορά περίπου μεταξύ 2500-2900 m<sup>3</sup>/yr/m.

Πίνακας 5.2 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος  $V_{max}$  και στερεομεταφοράς  $TC_{max}$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος  $V$  και στερεομεταφοράς  $TC$  στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το πρώτο κυματικό σενάριο

Διατάξεις	$V_{max}$ (m/s)	$V$ (m/s)	$TC_{max}$ (m <sup>3</sup> /yr/m)	$TC$ (m <sup>3</sup> /yr/m)
Διάταξη 1	1.0	1.0	6272.71	2000
Διάταξη 2	1.0	1.0	2839.84	1500
Διάταξη 3	1.0	0.6	2598.38	900
Διάταξη 4	1.0	0.5	6400	900
Διάταξη 5	1.0	0.7	2875	1200

Στην περιοχή κοντά στην είσοδο όμως, ενώ η διάταξη 1 παραμένει η δυσμενέστερη περίπτωση με 2000 m<sup>3</sup>/yr/m, ακολουθεί η 2 με περίπου 1500 m<sup>3</sup>/yr/m και η διάταξη 5 με 1200 m<sup>3</sup>/yr/m, ενώ η διάταξη 3 και η διάταξη 4 παρουσιάζουν τις μικρότερες τιμές με 900 m<sup>3</sup>/yr/m. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι οι διατάξεις 3 και 4 έχουν την είσοδό τους τοποθετημένη κάθετα στην ακτογραμμή και άρα προστατευμένη ως προς τη διεύθυνση ροής του ρεύματος. Η περιοχή κοντά στην μαρίνα για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.5 σε τομές της παράκτιας περιοχής.



Σχήμα 5.5 Αποτελέσματα Mike 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το πρώτο κυματικό σενάριο

### 5.3.2 Δεύτερο κυματικό σενάριο

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.3 ο οποίος παρουσιάζει τις μέγιστες παρατηρηθείσες ταχύτητες ρεύματος και ρυθμούς στερεομεταφοράς στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και κοντά στην είσοδο αυτής. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.3, το πρόβλημα είναι πιο έντονο, όσον αφορά την περιοχή κοντά στη μαρίνα για τις διατάξεις 1 και 4 με τη

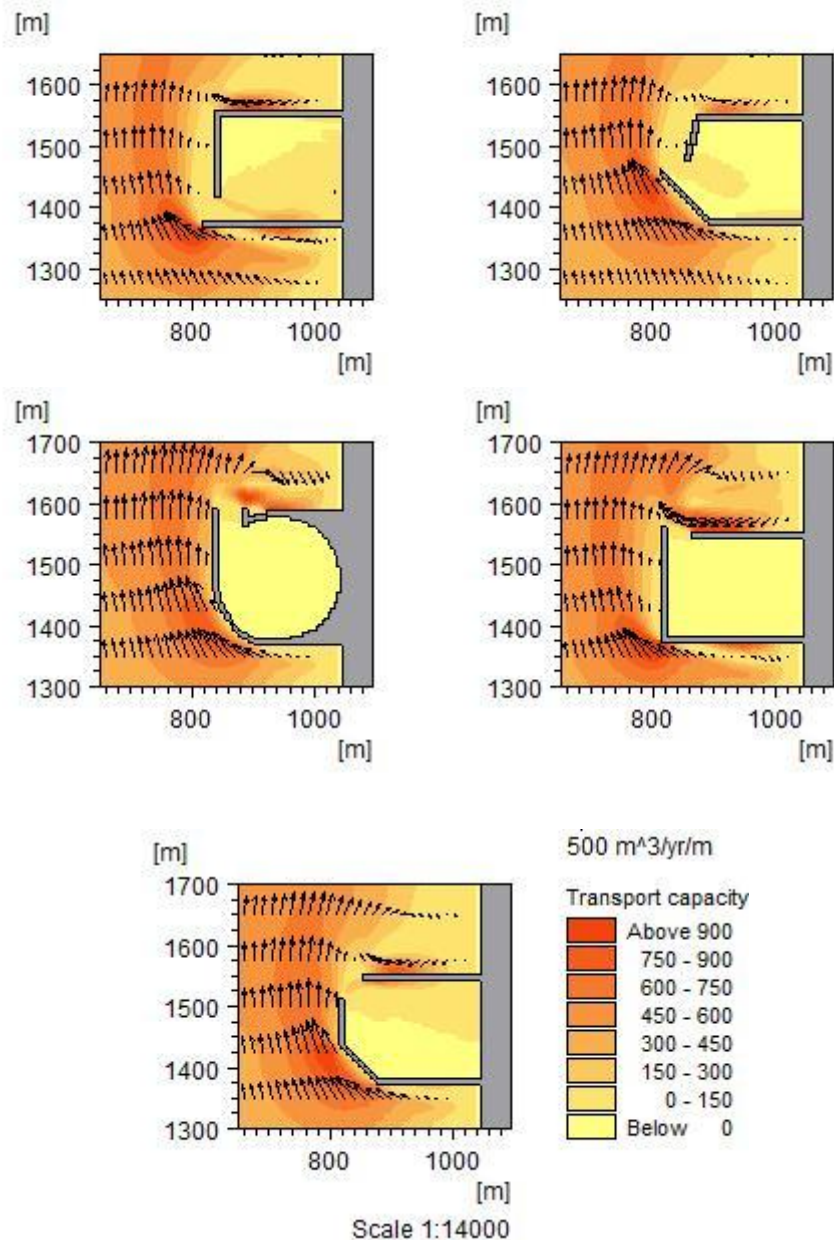
στερεομεταφορά να ξεπερνά  $1500 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ . Σημειώνεται ότι το στοιχείο αυτό έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα για το πρώτο κυματικό σενάριο. Οι υπόλοιπες έχουν σαφώς μειωμένη στερεομεταφορά περίπου  $1100 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ .

Πίνακας 5.3 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος  $V_{\max}$  και στερεομεταφοράς  $TC_{\max}$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος  $V$  και στερεομεταφοράς  $TC$  στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το δεύτερο κυματικό σενάριο

Διατάξεις	$V_{\max}$ (m/s)	$V$ (m/s)	$TC_{\max}$ ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )	$TC$ ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )
Διάταξη 1	0.7	0.7	1490.6	900
Διάταξη 2	0.7	0.5	1054	600
Διάταξη 3	0.6	0.4	1100.9	450
Διάταξη 4	0.7	0.6	1562.42	600
Διάταξη 5	0.7	0.5	1074	450

Όπως και στο πρώτο κυματικό σενάριο, όσον αφορά την περιοχή εγγύς της εισόδου, η διάταξη 1 παραμένει η δυσμενέστερη περίπτωση με  $900 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , ενώ ακολουθούν η 2 και 4 με περίπου  $600 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , ενώ η διάταξη 3 και η διάταξη 5 παρουσιάζουν τους μικρότερους ρυθμούς στερεομεταφοράς με  $450 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ . Οι διαφοροποιήσεις σε σχέση με το πρώτο κυματικό σενάριο, όσον αφορά τη διάταξη 4, σχετίζονται με τις ισχυρές δίνες που παρατηρούνται λόγω του γεγονότος ότι η κάθετη συνιστώσα του κυματογενούς ρεύματος και της στερεομεταφοράς είναι σαφώς πιο ισχυρή. Το κατά μήκος της ακτής ρεύμα μεγιστοποιείται για διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών στα βαθιά ίση με  $45^\circ$ , ενώ για μικρότερες ο ρόλος της κάθετης συνιστώσας γίνεται πιο σημαντικός. Τέλος, φαίνεται και στις δύο περιπτώσεις, η διάταξη 3 να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για κάθε περίπτωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.6 σε τομές της παράκτιας περιοχής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι πρέπει να συμπεριληφθεί στη μελέτη και το γεγονός ότι η διάταξη 3 και 4 έχουν την είσοδο τους πιο κοντά σε ρηχά νερά αφού είναι τοποθετημένες κάθετα στις ισοβαθείς, άρα μπορεί να δημιουργηθεί πιο εύκολα πρόβλημα στη ναυσιπλοΐα λόγω προσαμμώσεων σε σχέση με τις διατάξεις 1, 2 και 5.



Σχήμα 5.6 Αποτελέσματα Mike 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το δεύτερο κυματικό σενάριο

#### 5.4 Αποτελέσματα προτάσεων βελτίωσης

Σε αυτό το εδάφιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις δύο διατάξεις 1 και 4, όσον αφορά το πρώτο και το δεύτερο κυματικό σενάριο, αντίστοιχα. Γίνεται αριθμητική και γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων με Πίνακες και Σχήματα σε τομή της παράκτιας περιοχής ώστε να παρουσιαστεί αναλυτικά η περιοχή κοντά στη μαρίνα. Σημειώνεται ότι,

όπως και για τη διερεύνηση των πέντε διατάξεων μαρίνων, υπάρχει αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων γραφικά, όσον αφορά την ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος και τη στερεομεταφορά στο Παράρτημα Α (Σχήμα Α.23-Α.44).

#### 5.4.1 Προτάσεις βελτίωσης για τη διάταξη 1

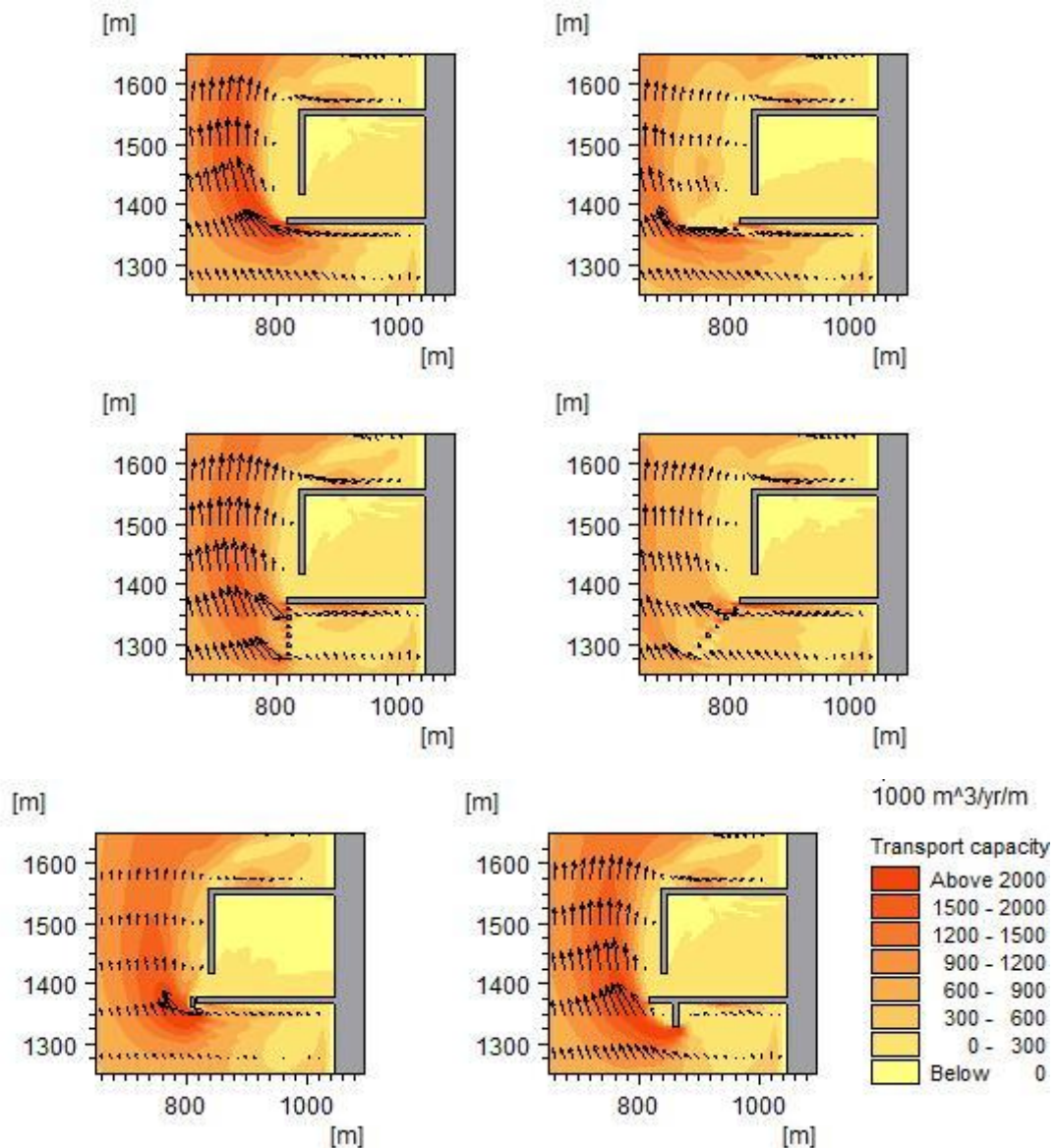
Στη διάταξη 1 και για το πρώτο κυματικό σενάριο εφαρμόστηκαν οι προτάσεις βελτίωσης που αναφέρονται αναλυτικά στα Κεφάλαια 2 και 3. Η επιλογή της διάταξης έγινε λόγω του ότι η περίπτωση αυτή παρουσίασε τα πιο μεγάλα προβλήματα σε σχέση με τη στερεομεταφορά. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.4, η κατάσταση όσον αφορά τη στερεομεταφορά βελτιώνεται σε επίπεδο περιοχής εισόδου της μαρίνας και στο σύνολο της περιοχής. Η μέγιστη τιμή της στερεομεταφοράς μειώνεται, εκτός της περίπτωσης του τοιχώματος εκτροπής ρεύματος, περίπου στο μισό, με την περίπτωση τοποθέτησης συστοιχίας πασσάλων παράλληλα στην είσοδο να παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, η  $TC_{max}$  φτάνει τα  $2600.98 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ .

Πίνακας 5.4 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος  $V_{max}$  και στερεομεταφοράς  $TC_{max}$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος  $V$  και στερεομεταφοράς  $TC$  στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για τις προτάσεις βελτίωσης στη διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο

Πρόταση βελτίωσης	$V_{max}$ (m/s)	$V$ (m/s)	$TC_{max}$ ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )	$TC$ ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )
<b>Διάταξη 1</b>	1.0	1.0	6272.71	2000
<b>Πάσσαλοι κάθετα στην είσοδο</b>	1.0	0.6	3172.57	300
<b>Πάσσαλοι παράλληλα στην είσοδο</b>	1.0	0.7	2600.98	900
<b>Πάσσαλοι σε 45° με την είσοδο</b>	0.9	0.6	3756.39	600
<b>Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος</b>	1.0	0.9	6352.32	1200
<b>Πρόβολος</b>	1.0	0.9	3367.72	1200

Σε επίπεδο περιοχής κοντά στην είσοδο της μαρίνας, όλες οι παρεμβάσεις πέτυχαν το στόχο τους με τη συστοιχία πασσάλων να είναι ξεκάθαρα το πιο επιτυχημένο μέτρο. Η στερεομεταφορά φτάνει τα  $300 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$  για τοποθέτηση κάθετα στην είσοδο, ενώ για γωνία  $45^\circ$  και τοποθέτηση παράλληλα στη διεύθυνση της εισόδου η τιμή είναι  $600 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$  και  $900 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$  αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία

45° έχουν σοβαρή επίδραση και στην ταχύτητα ρεύματος αφού φτάνει τα 0.6 m/s. Η τοποθέτηση τοιχώματος εκτροπής ρεύματος και προβόλου μειώνουν τη στερεοπαροχή στην εν λόγω περιοχή κατά 800 m<sup>3</sup>/γρ/μ σε σχέση με την πρωτέρα κατάσταση.



Σχήμα 5.7 Αποτελέσματα Mike 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο

#### 5.4.2 Προτάσεις βελτίωσης για τη διάταξη 4

Οι προτάσεις βελτιώσεις εφαρμόστηκαν και στην περίπτωση της διάταξης 4 για το δεύτερο κυματικό σενάριο. Η περίπτωση αυτή επιλέχθηκε για δύο λόγους. Κατ' αρχάς, επειδή



παρουσιάζεται σχετικά ισχυρό πρόβλημα προσαμμώσεων στη μαρίνα αυτή, αλλά και γιατί, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, στην περίπτωση αυτή, οι έντονες παρατηρηθείσες περιδινήσεις λόγω ισχυρής κάθετης συνιστώσας σε συνδυασμό με τη θέση της εισόδου είναι ένας συνδυασμός που εντείνει το πρόβλημα της στερεομεταφοράς κοντά στην είσοδο της μαρίνας και αξίζει να διερευνηθεί.

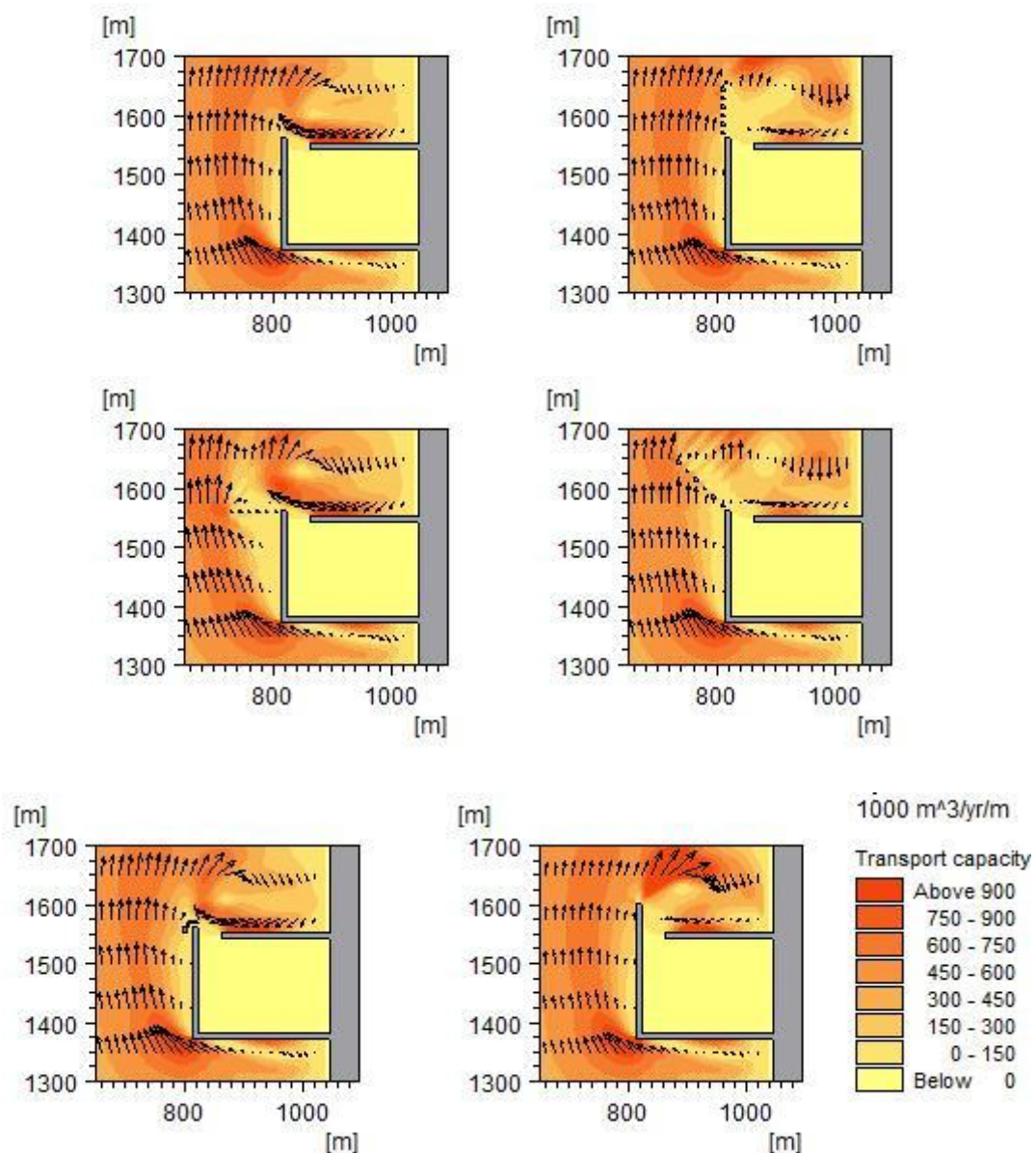
Κατ' αρχάς, σε επίπεδο περιοχής κοντά στη μαρίνα, δεν παρατηρείται μεγάλη βελτίωση ως προς τη στερεομεταφορά, αφού, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.5 παραμένει σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, πλην της τοποθέτησης πασσάλων παράλληλα στην είσοδο που φτάνει τα  $1300 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , πρακτικά σταθερή περί τα  $1600 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ . Αξίζει παραταύτα να σημειωθεί οι πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα και υπό γωνία  $45^\circ$  με την είσοδο της λιμενολεκάνης μειώνουν την ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος σε σημαντικό βαθμό, με την τιμή να μειώνεται από  $0.7 \text{ m/s}$  σε  $0.4 \text{ m/s}$ .

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος  $V_{\max}$  και στερεομεταφοράς  $TC_{\max}$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος  $V$  και στερεομεταφοράς  $TC$  στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για τις προτάσεις βελτίωσης στη διάταξη 4, για το δεύτερο κυματικό σενάριο

Πρόταση βελτίωσης	$V_{\max}$ (m/s)	$V$ (m/s)	$TC_{\max}$ ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )	$TC$ ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ )
<b>Διάταξη 4</b>	0.7	0.6	1562.42	600
<b>Πάσσαλοι κάθετα στην είσοδο</b>	0.7	0.4	1569.93	150
<b>Πάσσαλοι παράλληλα στην είσοδο</b>	0.7	0.6	1301.93	600
<b>Πάσσαλοι σε <math>45^\circ</math> με την είσοδο</b>	0.7	0.4	1501	300
<b>Πάσσαλοι ανάντη εισόδου</b>	0.7	0.5	1489.59	600
<b>Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος</b>	0.7	0.6	1522.35	600
<b>Πρόβολος</b>	0.8	0.7	1600	450

Σε επίπεδο περιοχής κοντά στην είσοδο της μαρίνας, σε πρώτη ανάγνωση, καταγράφονται περιπτώσεις που η κατάσταση παραμένει σταθερή. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση τοποθέτησης πασσάλων παράλληλα στην είσοδο, είτε στην περιοχή εισόδου, είτε σε μια περιοχή ανάντη αυτής και στην περίπτωση του τοιχώματος εκτροπής ρεύματος η στερεοπαροχή παραμένει σταθερή και ίση με  $600 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ . Ειδικότερα, αξίζει να

αναφερθεί ότι στην περίπτωση τοποθέτησης πασσάλων παράλληλα στην είσοδο, ενώ η στερεομεταφορά σε επίπεδο περιοχής μαρίνας μειώνεται, το έντονο ρεύμα που δημιουργείται στην είσοδο της λεκάνης λόγω έντονων δινών, τοπικά δυσχεράνει την κατάσταση. Η τοποθέτηση προβόλου απέδωσε σε κάποιο βαθμό αφού η στερεομεταφορά είναι  $450 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , ενώ τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν κατά την τοποθέτηση συστοιχίας πασσάλων υπό γωνία  $45^\circ$  και κάθετα στην είσοδο με τη στερεομεταφορά να φτάνει τα  $300 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$  και τα  $150 \text{ m}^3/\text{yr}/\text{m}$ , αντίστοιχα.



Σχήμα 5.8 Αποτελέσματα Mike 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη διάταξη 4, για το δεύτερο κυματικό σενάριο

## 6. Συμπεράσματα-προτάσεις

---

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έγινε σε πρώτη φάση διερεύνηση ως προς το σχεδιασμό μιας μαρίνας σε σχέση με τη στερεομεταφορά στην είσοδο. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε κατά πόσο μπορεί να επηρεάσει η γεωμετρία μιας μαρίνας τις διαδικασίες στερεομεταφοράς και τελικά τις προσαμμώσεις στην είσοδο αυτής. Σε δεύτερη φάση, εφαρμόστηκαν προτάσεις βελτιώσεις για να διαπιστωθεί κατά πόσο μπορεί να μειωθεί η ένταση του φαινομένου των προσαμμώσεων στην είσοδο.

Από τη διερεύνηση για το σχεδιασμό της μαρίνας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Οι επιφάνειες που προσπίπτει το παράκτιο ρεύμα πρέπει να σχεδιάζονται κατά το δυνατόν καμπύλες. Όταν το ρεύμα προσκρούει σε ευθύγραμμο στοιχείο κάθετα στη διεύθυνση ροής του (διάταξη 1 και 4), αναπτύσσονται μεγάλες ταχύτητες ρεύματος και κατ' επέκταση μεγάλοι ρυθμοί στερεομεταφοράς κοντά στην περιοχή της μαρίνας, όπου και παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές. Σε περιπτώσεις ευθύγραμμων στοιχείων που σχεδιάζονται υπό γωνία (διάταξη 2 και 5) σε σχέση με τη διεύθυνση ροής του ρεύματος η ένταση των κυματογενών ρευμάτων και του ρυθμού στερεομεταφοράς είναι σαφώς μικρότερη, ενώ στη διάταξη 3, που έχει κυκλική επιφάνεια η ένταση των τιμών είναι η μικρότερη που παρατηρείται.
2. Από τα παραπάνω, αξίζει να σημειωθεί ότι σε σχέση με τη στερεομεταφορά, μικρές μαρίνες, προτείνεται να σχεδιάζονται όπως η διάταξη 3. Μια τέτοια μαρίνα, αν και σε πρώτο επίπεδο φαίνεται μη συμβατική και δυσλειτουργική ως προς τη φιλοξενία σκαφών, αυτό δεν ισχύει για σκάφη μικρού πλάτους που συνήθως πρυμνοδετούν και δεν καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος κρηπιδώματος. Η δεδομένη γεωμετρία και σε σχέση πάντα με την παρούσα εργασία, παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα για όλες τις περιπτώσεις.
3. Από τη μελέτη προκύπτει επίσης ότι η είσοδος της μαρίνας πρέπει να σχεδιάζεται κατά το δυνατόν προστατευμένη. Σε περιπτώσεις μάλιστα που είναι έντονη η κάθετη προς την ακτή συνιστώσα της στερεομεταφοράς, δημιουργούνται ισχυρές περιδινήσεις, οι οποίες μπορεί να αυξήσουν την ένταση των ρευμάτων και κατ' επέκταση τη στερεομεταφορά και τις αποθέσεις τοπικά.

Όσον αφορά τις προτάσεις βελτίωσης (συστοιχία πασσάλων, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος και πρόβολος) εξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Η συστοιχία πασσάλων αξίζει να διερευνηθεί και να δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες καθώς φαίνεται να έχει τα καλύτερα αποτελέσματα. Η τοποθέτηση τους μάλιστα σε γωνία  $45^\circ$  σε σχέση με τη διεύθυνση της εισόδου της μαρίνας μειώνει στο μεγαλύτερο βαθμό την ένταση της στερεομεταφοράς.
2. Το τοίχωμα εκτροπής ρεύματος και ο πρόβολος δε φαίνεται να μειώνουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα ρεύματος και το ρυθμό στερεομεταφοράς αλλά εκτρέπουν το ρεύμα και κατ' επέκταση τα μεταφερόμενα ιζήματα σε μια περιοχή μακριά από την είσοδο της μαρίνας ώστε αυτή να επηρεάζεται κατά το δυνατόν λιγότερο.

## Βιβλιογραφία

---

### Ελληνική βιβλιογραφία

- Αθανασούλης Γ., 2012. Κυματικά Φαινόμενα στο Θαλάσσιο και Παράκτιο Περιβάλλον. Σημειώσεις Μαθήματος. Σχολή Ναυπηγών Μηχανικών, ΕΜΠ.
- Γαδ Φ., 2011. Βελτιστοποίηση Διάταξης Συστήματος προβόλων. Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Καλλαϊτζή Ε., 2008. Περιβαλλοντική Διερεύνηση Υδάτων Μαρίνας μέσω Συσχέτισης Υδροδυναμικών και Ποιοτικών Παραμέτρων. Μεταπτυχιακή Εργασία. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Κονισπολιάτης Ν., 2009. Παράκτιο Περιβάλλον. Σημειώσεις Μαθήματος. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Κουτίτας Χρ., 1998. Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα. Ζήτη, Θεσσαλονίκη.
- Μουτζούρης Κ.Ι., 2005. Εισαγωγή στην Ακτομηχανική. ΕΜΠ, Αθήνα.
- Μέμος Κ.Δ., 2007. Θαλάσσια Υδροδυναμική. Σημειώσεις Μαθήματος. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Μέμος Κ.Δ., 2008. Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα. Συμμετρία, Αθήνα.
- Μέμος Κ.Δ., 2009. Ολοκληρωμένη Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης. Σημειώσεις Μαθήματος. ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων.
- Παναγιωτίδης Π., Χατζημπίρος Κ., 2004. Παράκτια Οικοσυστήματα και Ανθρωπογενείς Πιέσεις στις Ακτές. ΕΛΚΕΘΕ, Αθήνα.

### Διεθνής βιβλιογραφία

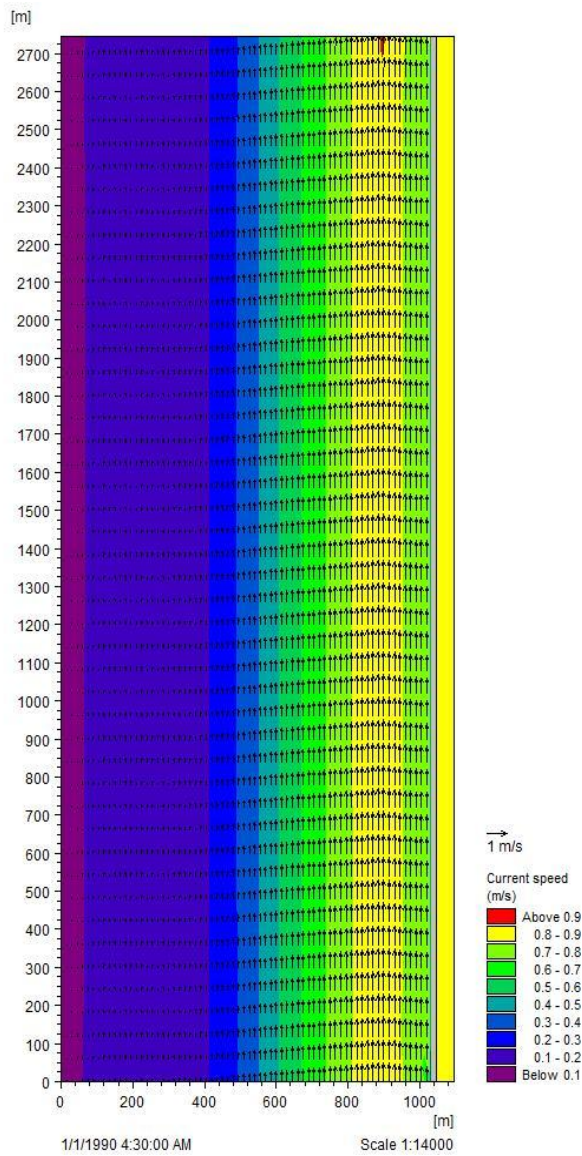
- Aftias M., Georgiadou M., 2010. Management of sediments dredged in ports and harbours in Greece. SedNet.
- Brawn P., 1976. Port Engineering. Gulf Publishing Company, Texas, USA.
- California Department of Boating and Waterways (DBW), 2005. Guidelines for Marina Berthing Facilities, California, USA.

- Dean R.G., Darlymple R.A., 1984. Water Mechanics for Engineers and Scientists. Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- DHI, 2012. User Guide and Reference Manual. Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.
- Johnson H.K., Poulin S., 2000. On the Accuracy of Parabolic Wave Models. 26th International Coastal Engineering Conference, Copenhagen, Denmark.
- L.C. van Rijn, 2012. Principles of Sedimentation and Erosion Engineering in Rivers, Estuaries and Coastal Areas. Aqua Publications, The Netherlands.
- PIANC International Navigation Association, 2008. Protecting water quality in marinas. Report No 98. Belgium.
- PIANC International Navigation Association, 2008. Minimizing Harbour Siltation. Report No 102. Belgium.
- PIANC International Navigation Association, 2004. Dredging of Marinas. Belgium.
- Tinker J., 2008. Measuring and modelling of cross-shore sediment transport and profile evolution on natural beaches. Phd Thesis. University of Plymouth.
- UK Marine Sac's Project, 2001. Environmental impacts of maintenance dredging and disposal. The United Kingdom.
- US Army Corps of Engineers, 2006. Coastal Engineering Management (CEM) Part 3, Chapter 1, Coastal Sediment Properties.
- US Army Corps of Engineers, 2006. Coastal Engineering Management (CEM) Part 3, Chapter 2, Longshore Sediment Transport.
- US Army Corps of Engineers, 2006. Coastal Engineering Management (CEM) Part 3, Chapter 3, Cross-Shore Sediment Transport Processes.

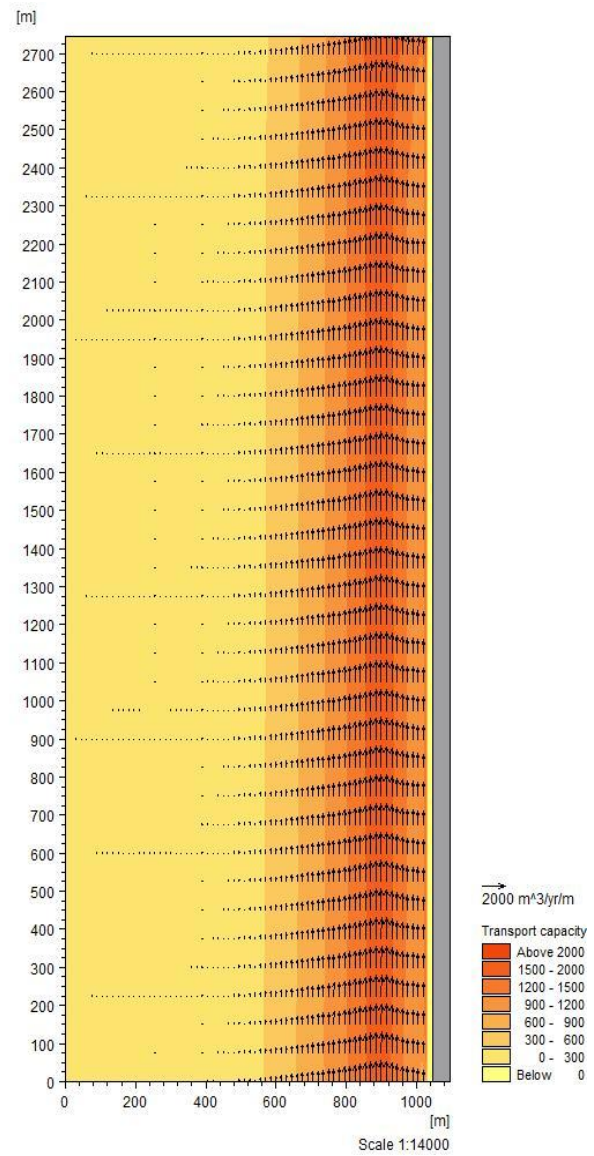
## A. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

### Ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας

Κυματικό Σενάριο πρώτο :  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



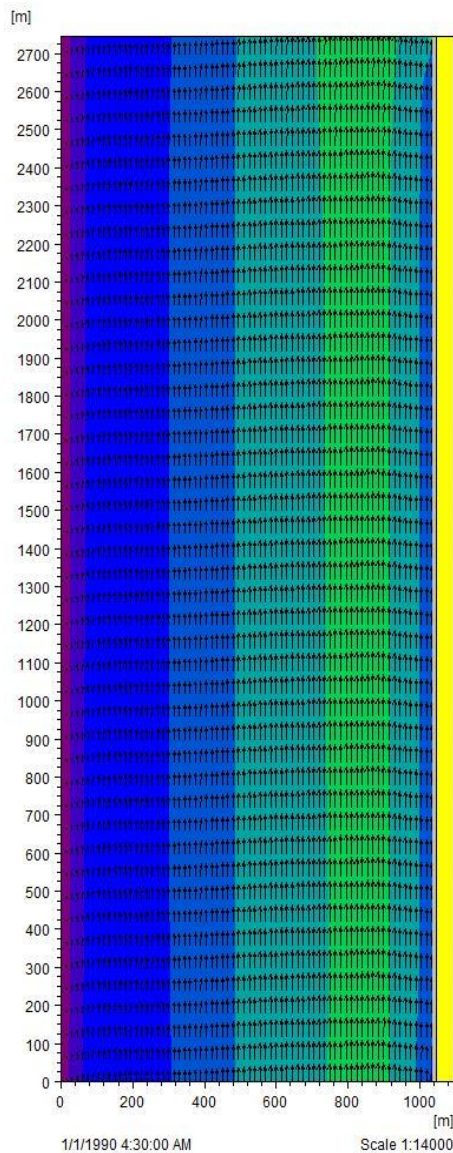
Σχήμα A.1 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, πρώτο κυματικό σενάριο



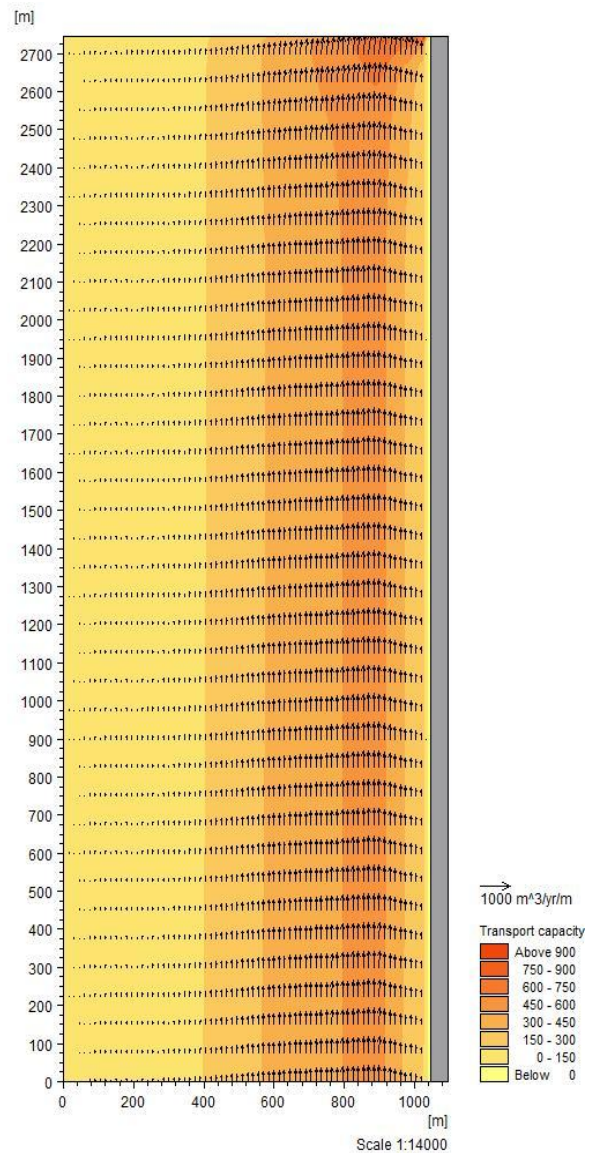
Σχήμα A.2 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, πρώτο κυματικό σενάριο

### Ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας

Κυματικό Σενάριο δεύτερο :  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$



Σχήμα A.3 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, δεύτερο κυματικό σενάριο



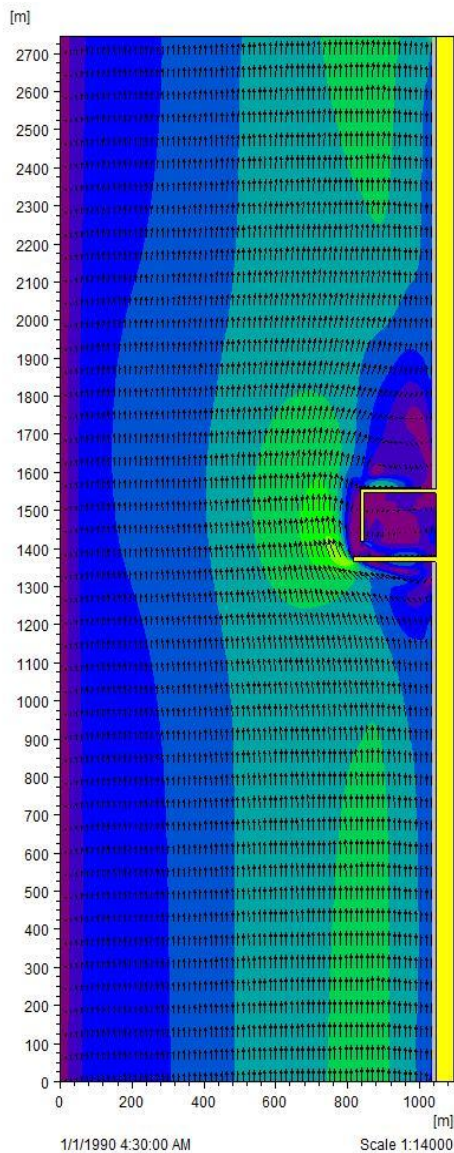
Σχήμα A.4 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), ακτή χωρίς την παρουσία μαρίνας, δεύτερο κυματικό σενάριο



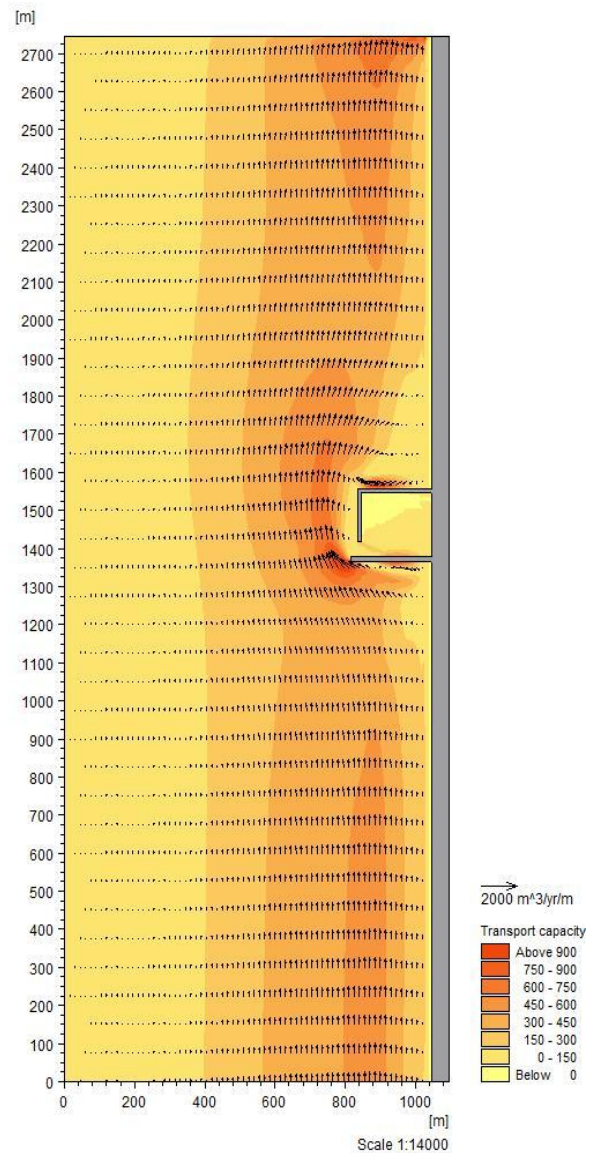
## Διατάξεις μαρίνων 1, 2, 3, 4 και 5

### Διάταξη 1

Κυματικό σενάριο δεύτερο :  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$



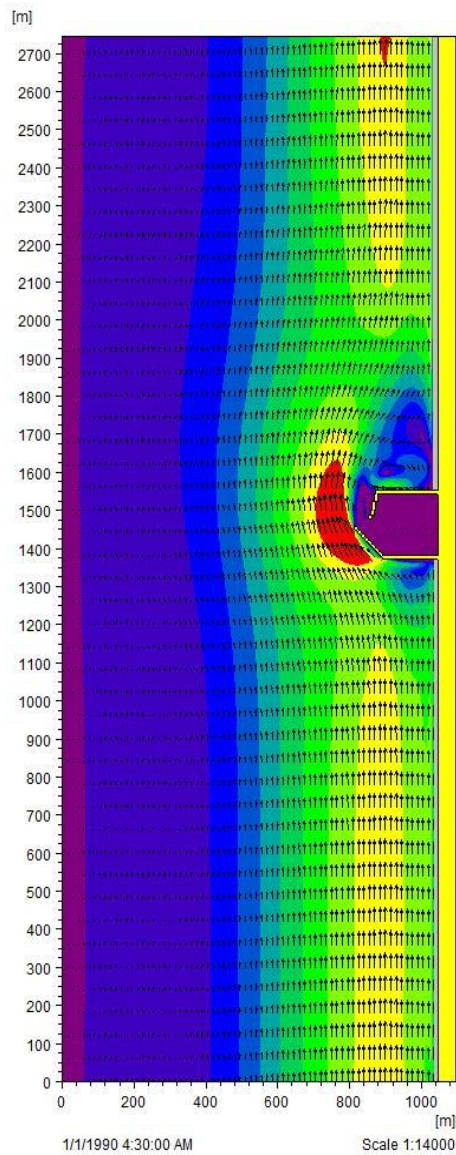
Σχήμα A.5 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, δεύτερο κυματικό σενάριο



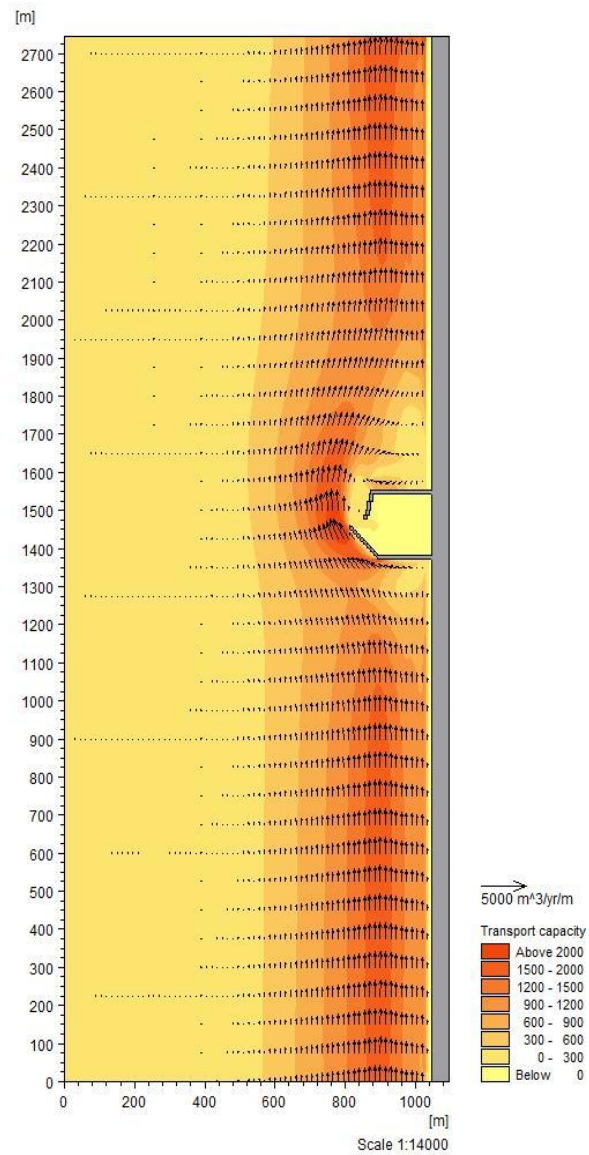
Σχήμα A.6 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 1, δεύτερο κυματικό σενάριο

## Διάταξη 2

Κυματικό Σενάριο πρώτο :  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



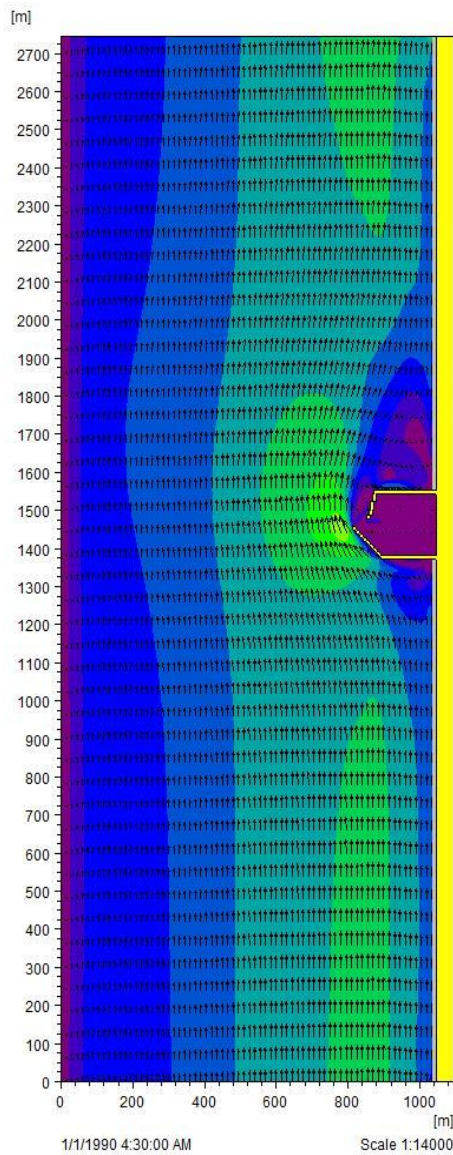
Σχήμα A.7 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 2, πρώτο κυματικό σενάριο



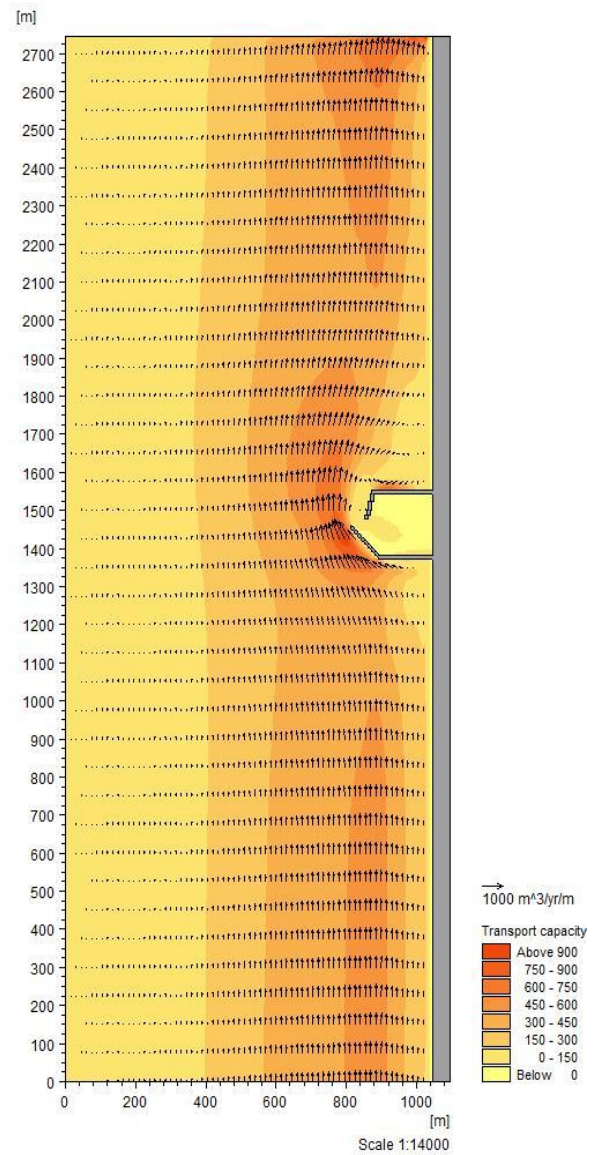
Σχήμα A.8 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 2, πρώτο κυματικό σενάριο

## Διάταξη 2

Κυματικό Σενάριο δεύτερο :  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$



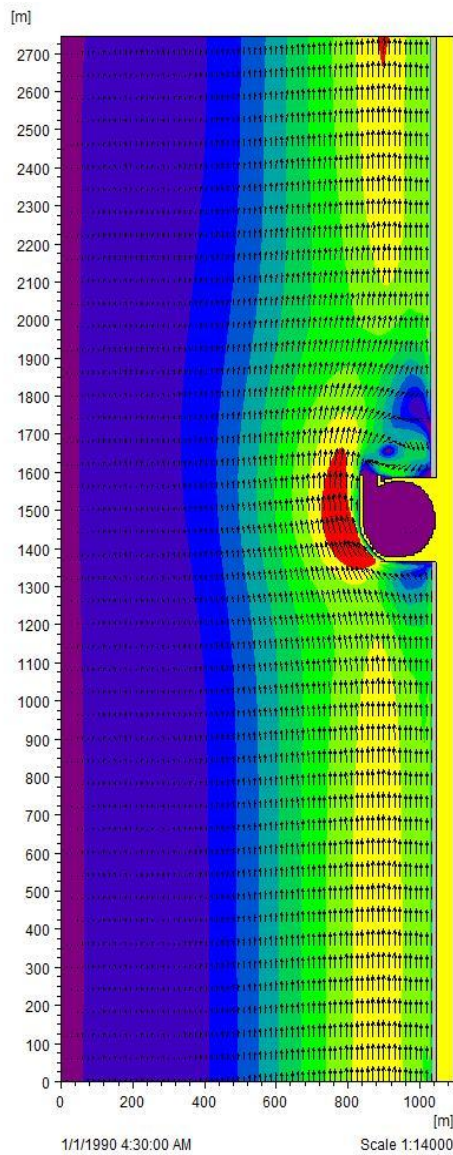
Σχήμα A.9 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 2, δεύτερο κυματικό σενάριο



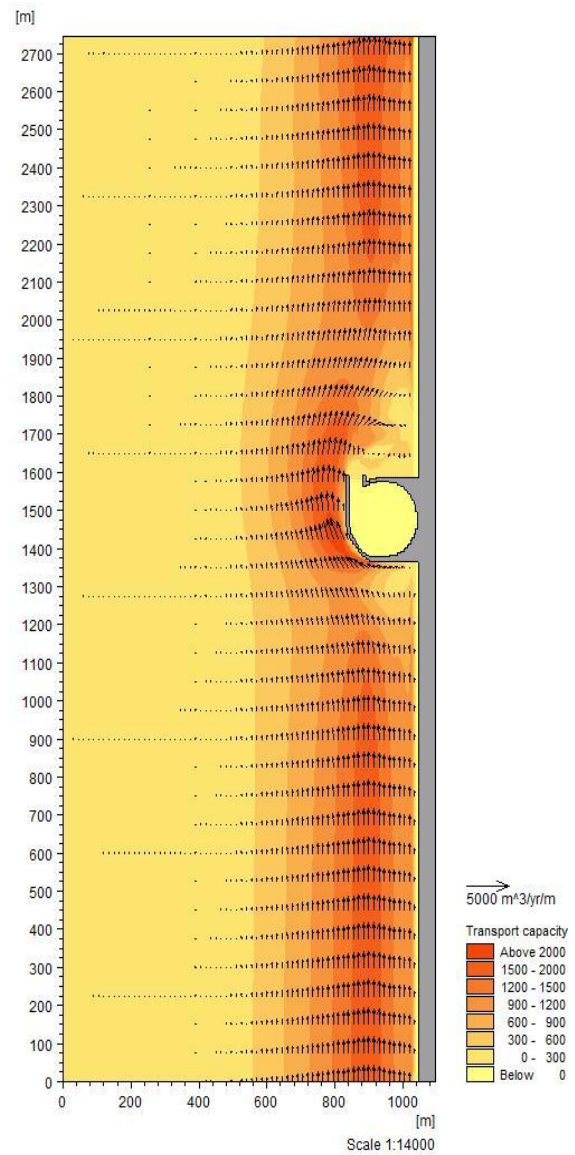
Σχήμα A.10 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 2, δεύτερο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 3

Κυματικό Σενάριο πρώτο :  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



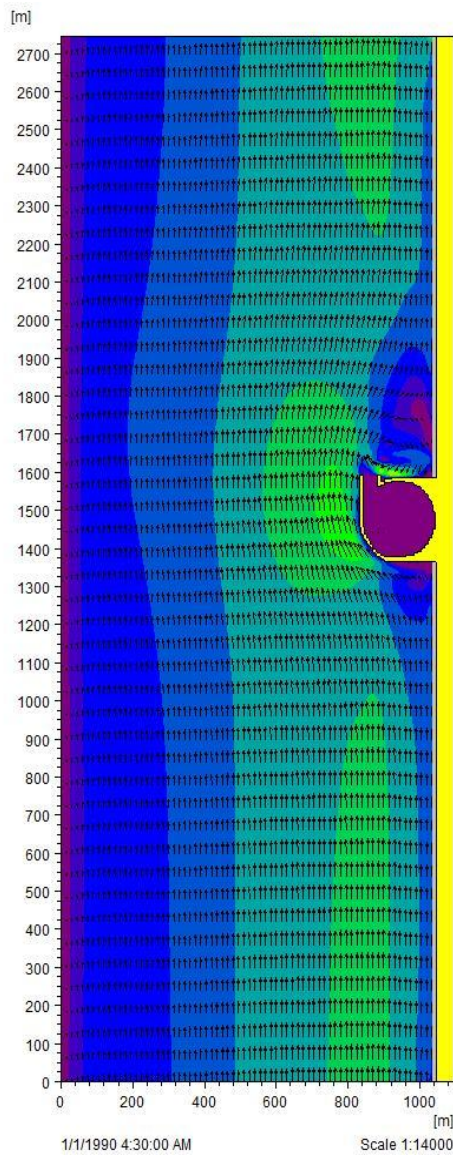
Σχήμα A.11 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 3, πρώτο κυματικό σενάριο



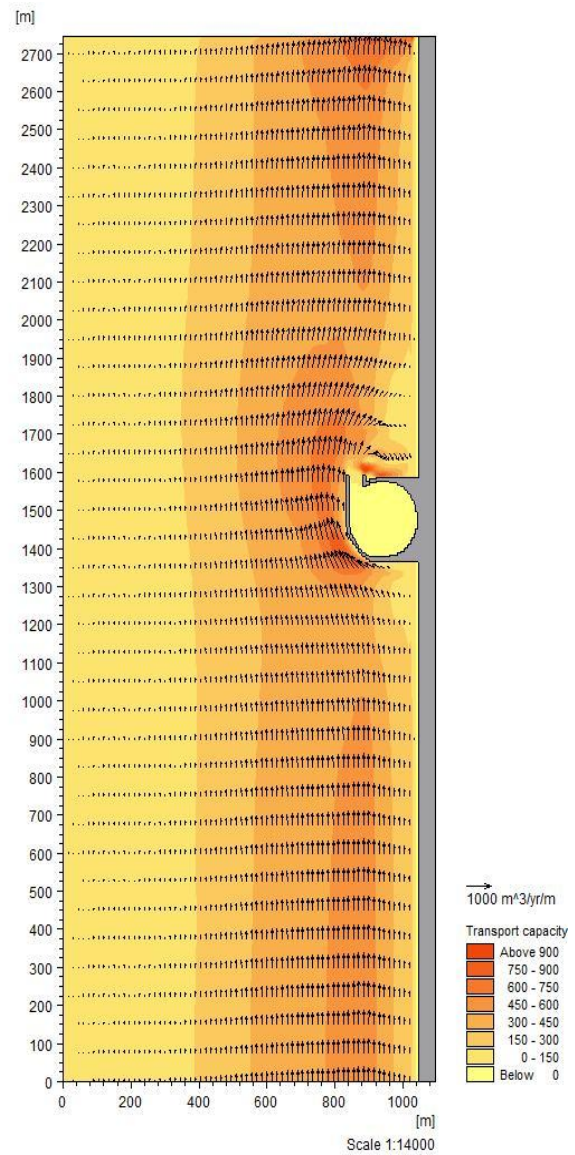
Σχήμα A.12 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 3, πρώτο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 3

Κυματικό Σενάριο δεύτερο :  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$



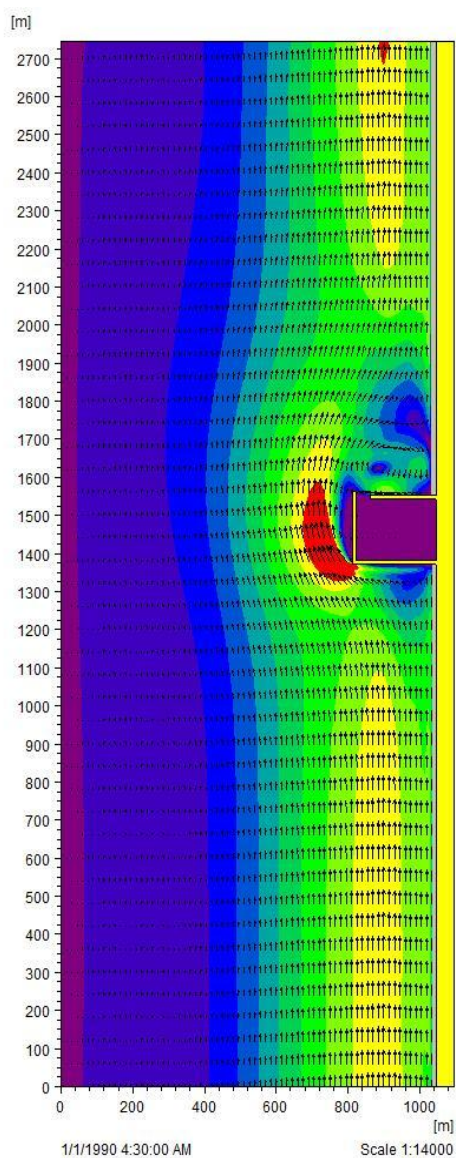
Σχήμα A.13 Ταχύτητα κυματογενούς Ρεύματος (m/s), διάταξη 3, δεύτερο κυματικό σενάριο



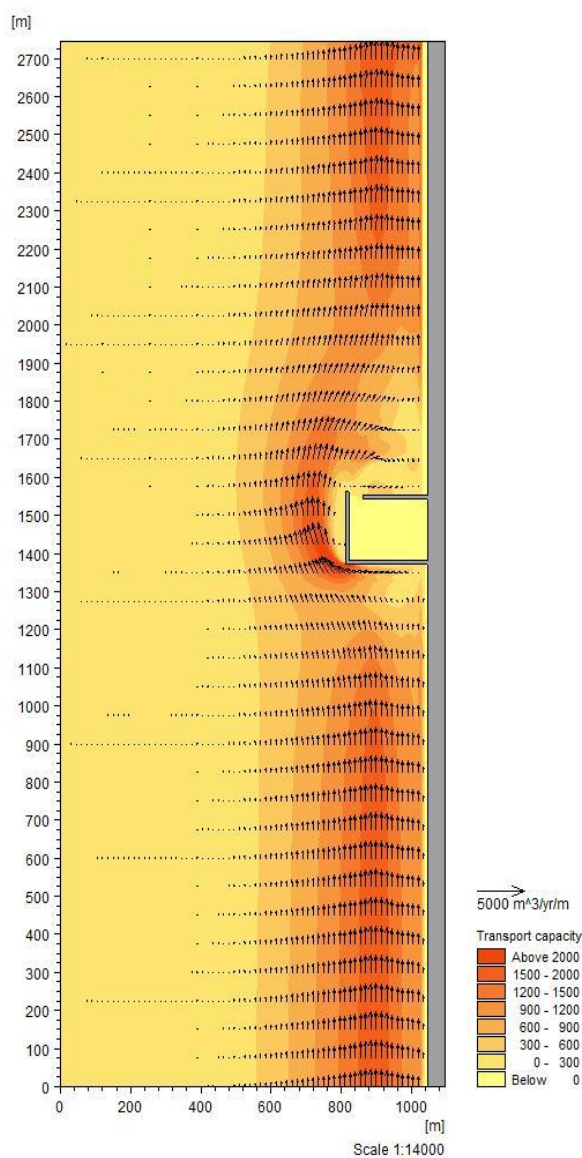
Σχήμα A.14 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 3, δεύτερο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 4

Κυματικό Σενάριο πρώτο :  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



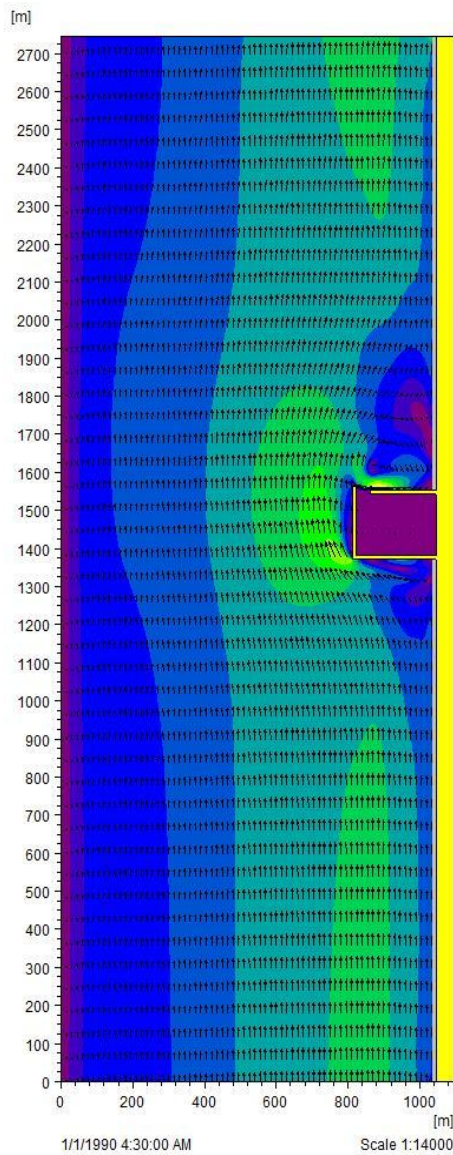
Σχήμα A.15 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πρώτο κυματικό σενάριο



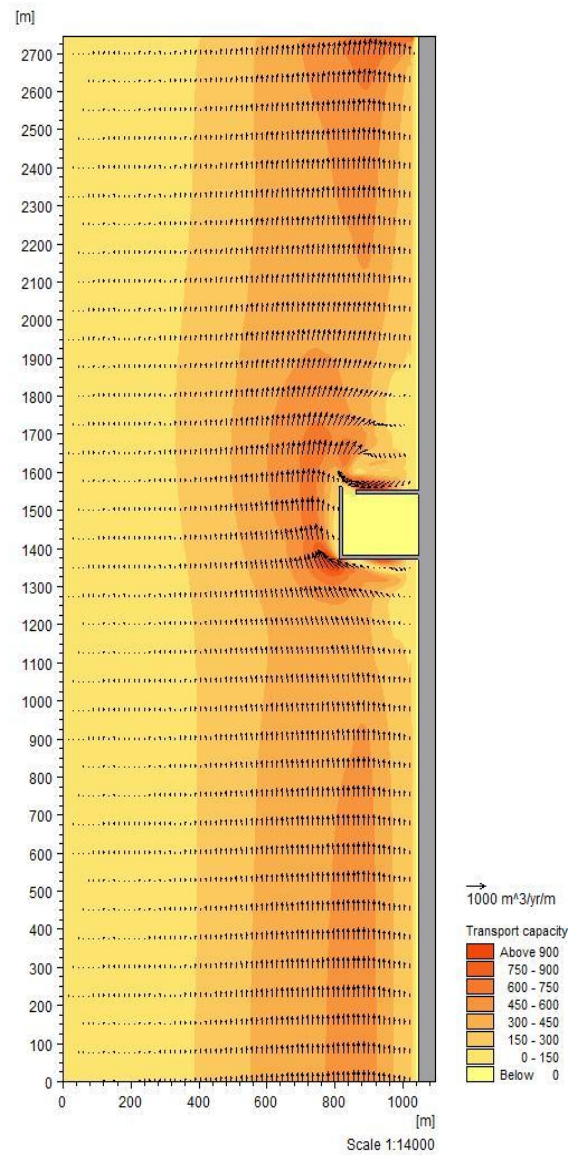
Σχήμα A.16 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 4, πρώτο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 4

Κυματικό Σενάριο δεύτερο :  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$



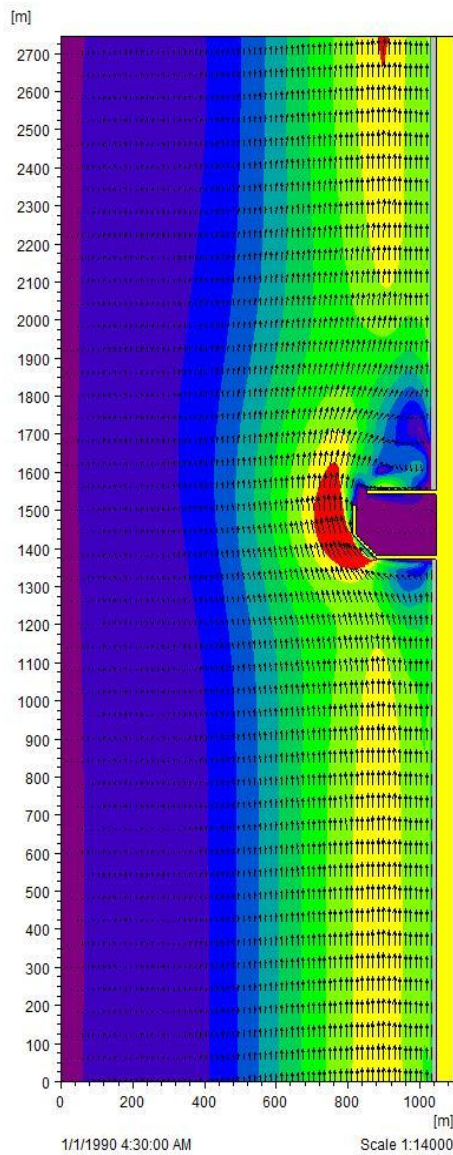
Σχήμα A.17 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, δεύτερο κυματικό σενάριο



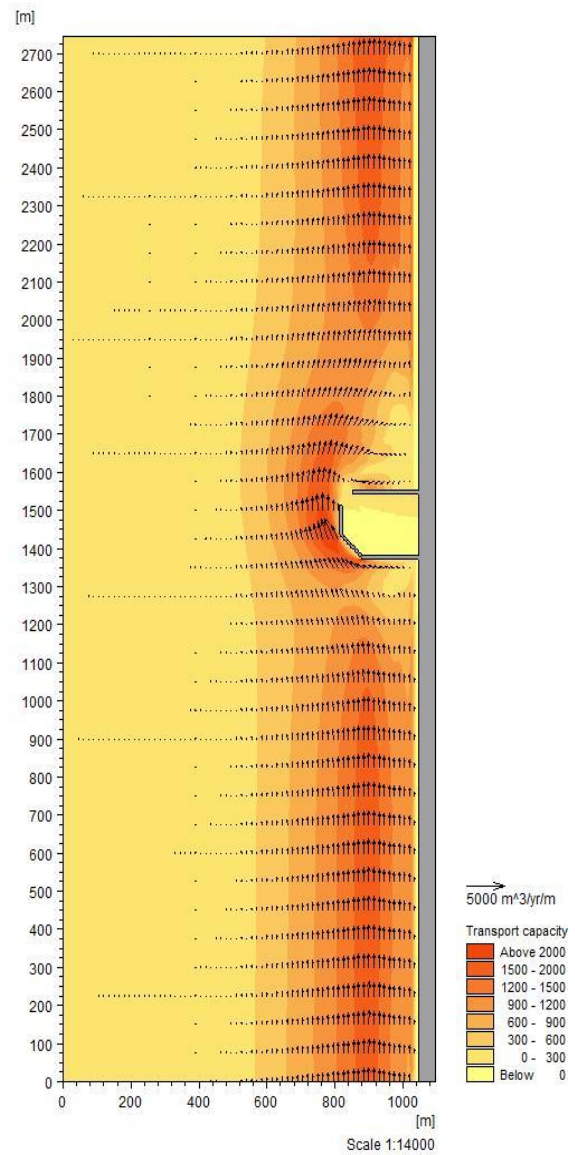
Σχήμα A.18 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 4, δεύτερο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 5

Κυματικό Σενάριο πρώτο :  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



Σχήμα A.19 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 5, πρώτο κυματικό σενάριο

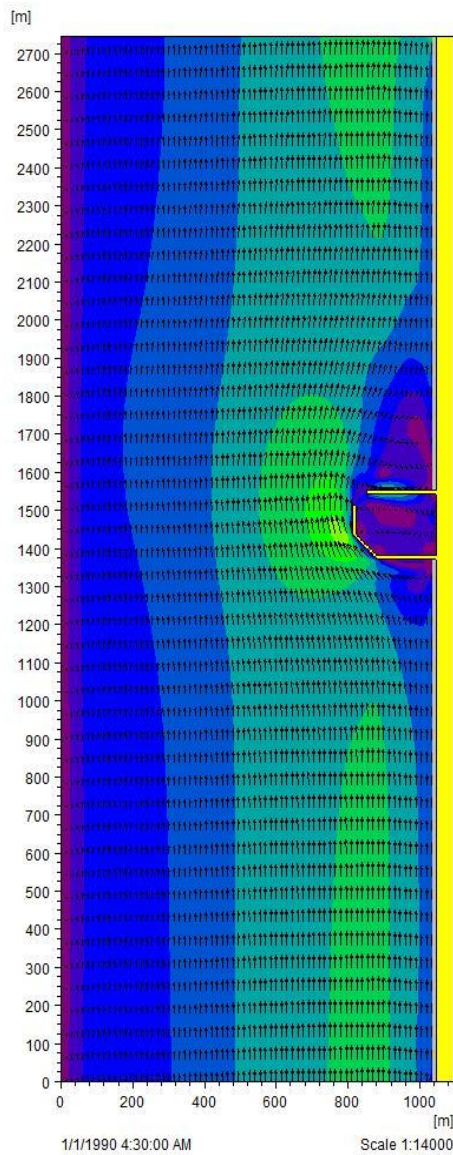


Σχήμα A.20 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 5, πρώτο κυματικό σενάριο

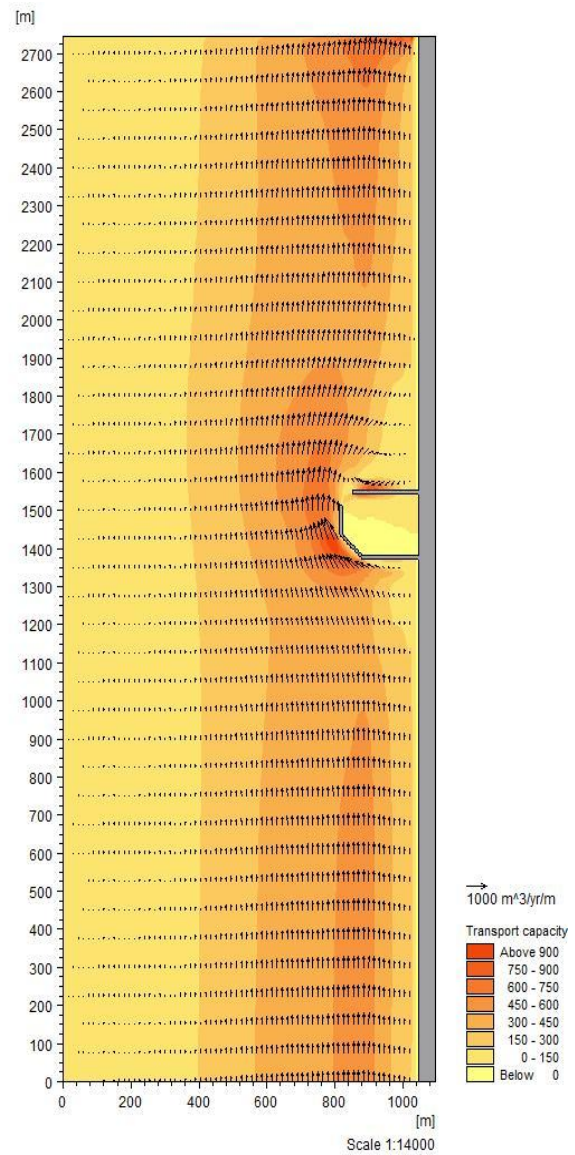


### Διάταξη 5

Κυματικό Σενάριο δεύτερο :  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$



Σχήμα A.21 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 5, δεύτερο κυματικό σενάριο



Σχήμα A.22 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 5, δεύτερο κυματικό σενάριο

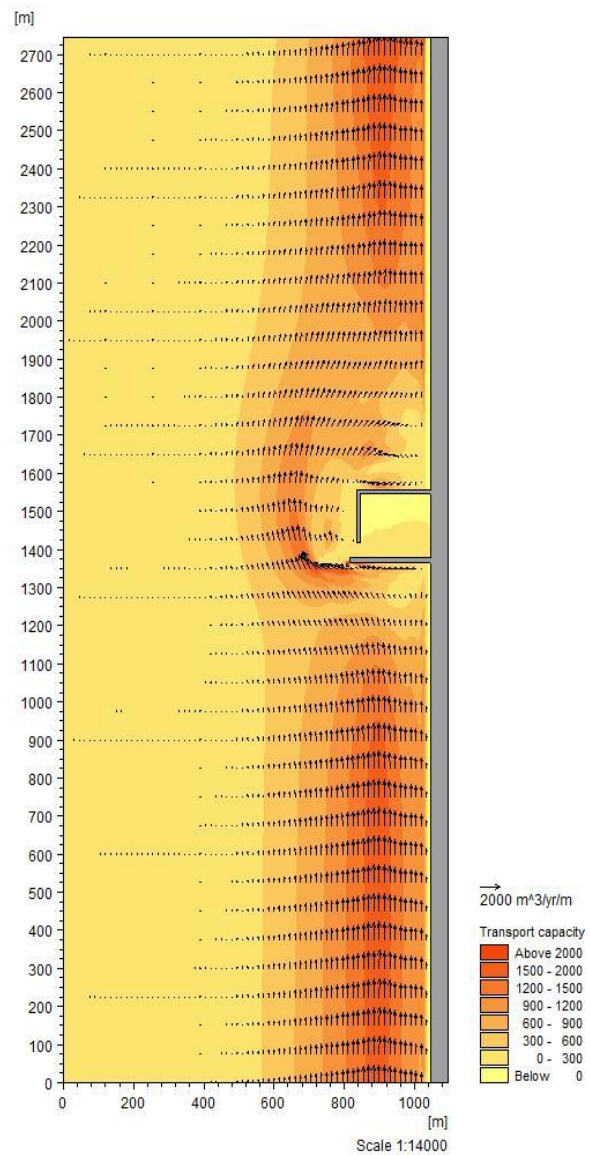
## Προτάσεις βελτίωσης

### Διάταξη μαρίνας 1

Κυματικό σενάριο πρώτο :  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



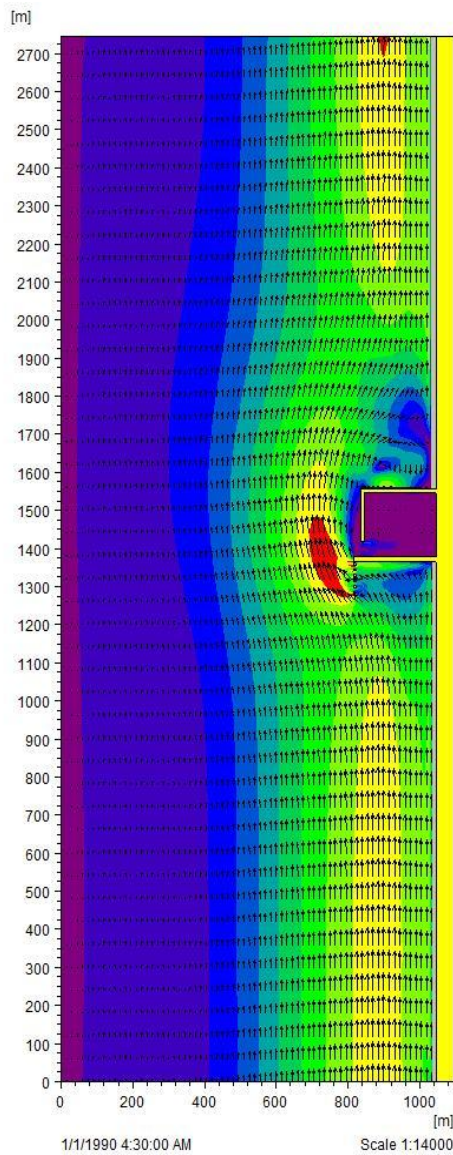
Σχήμα A.23 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθετα στην είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο



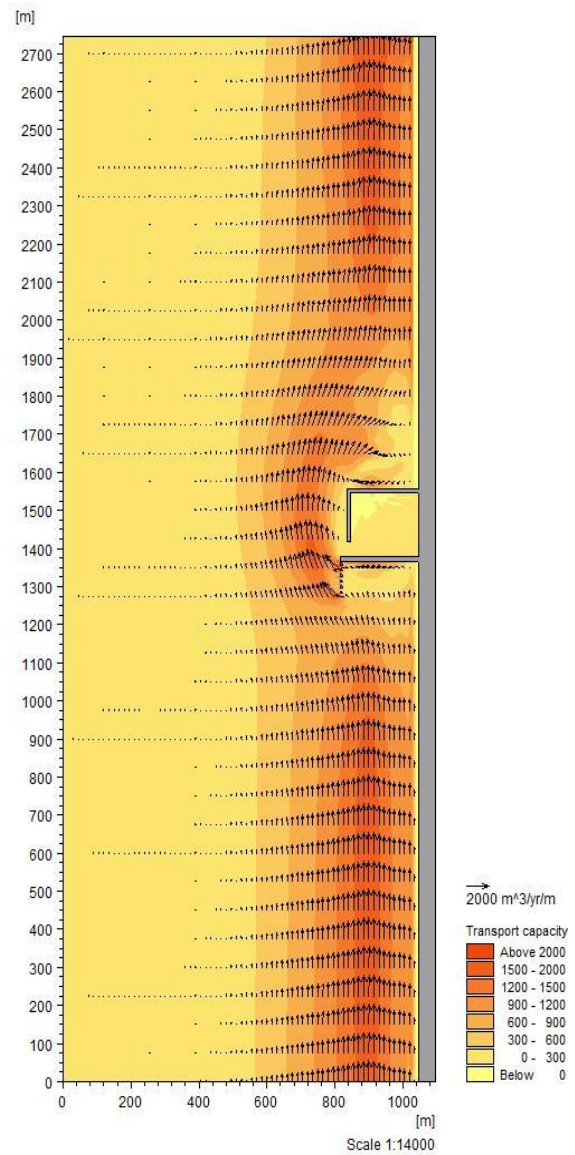
Σχήμα A.24 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθετα στην είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 1

#### Συστοιχία πασσάλων παράλληλα στην είσοδο



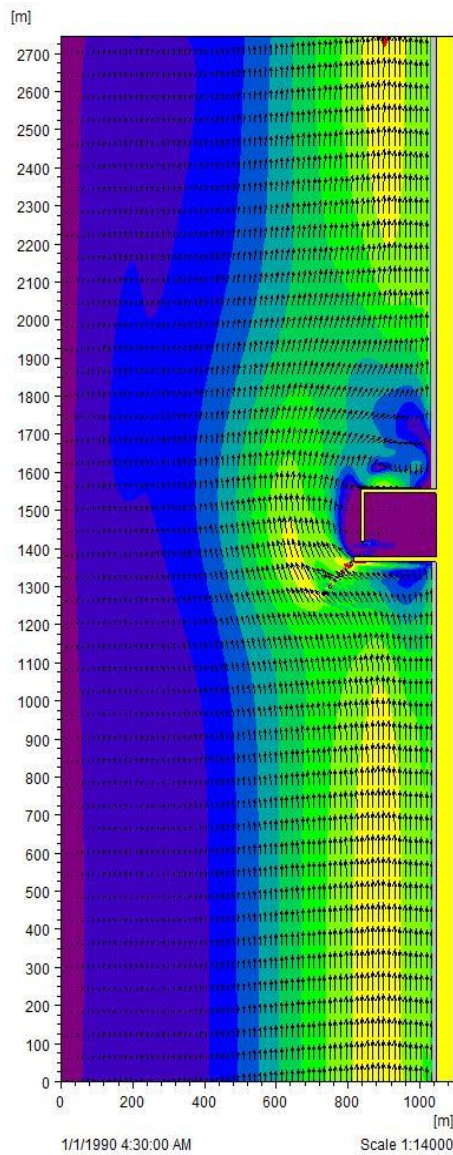
Σχήμα A.25 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο



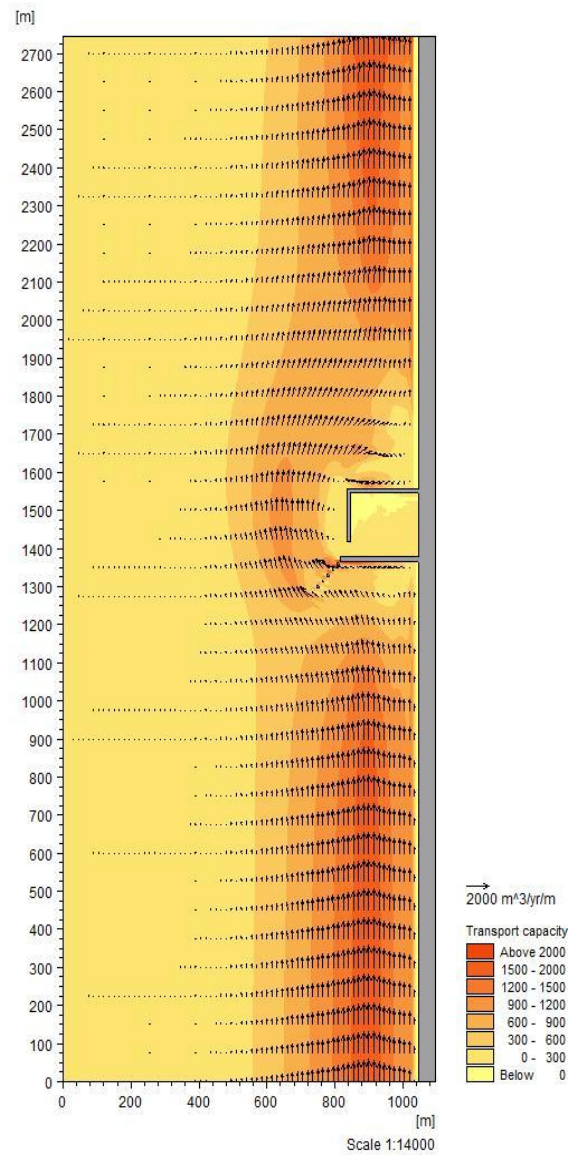
Σχήμα A.26 Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 1

#### Συστοιχία πασσάλων υπό γωνία 45° στην είσοδο



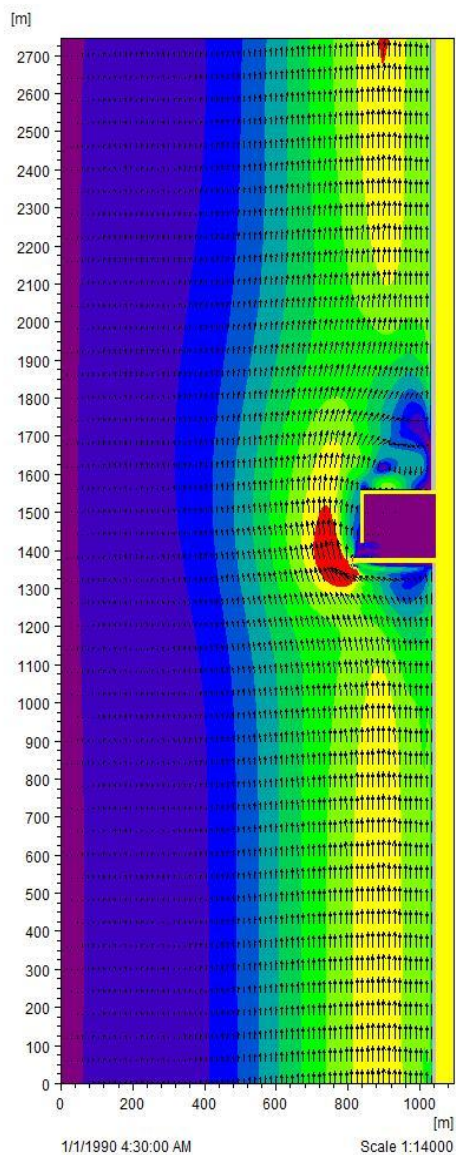
Σχήμα A.27 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο



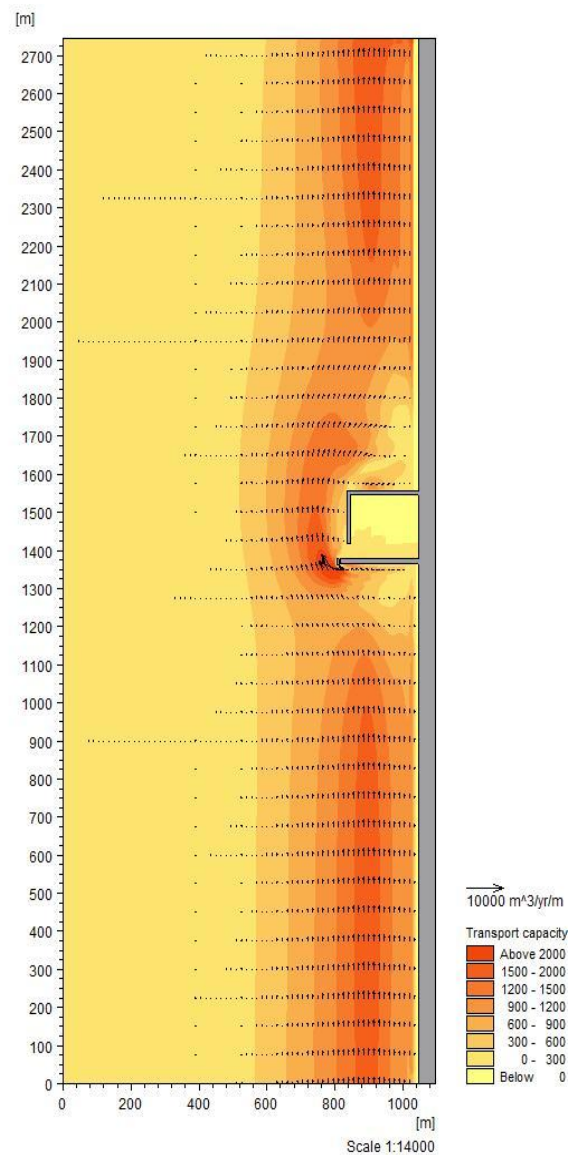
Σχήμα A.28 Ρυθμός στερεομεταφοράς (m³/yr/m), διάταξη 1, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο πρώτο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 1

#### Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος



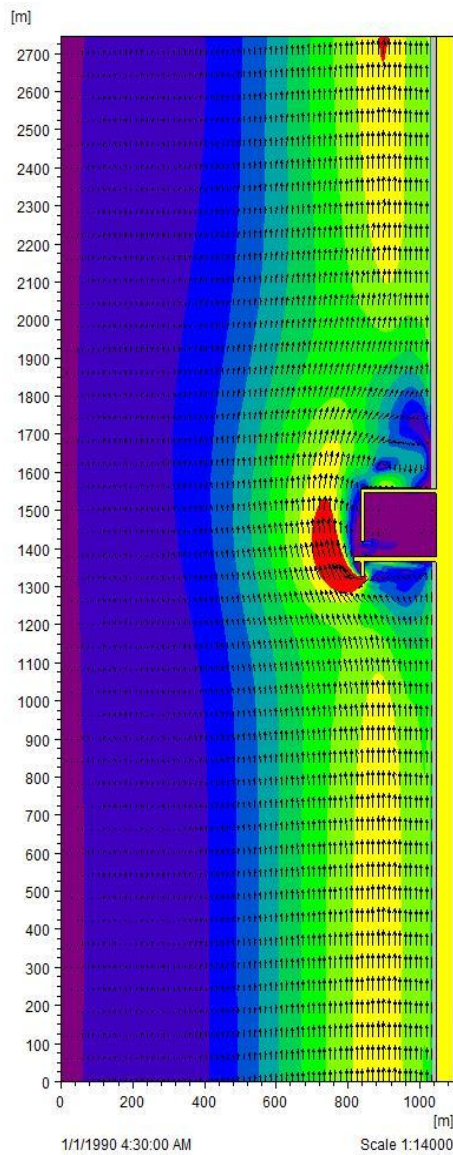
Σχήμα A.29 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s,) διάταξη 1, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος πρώτο κυματικό σενάριο



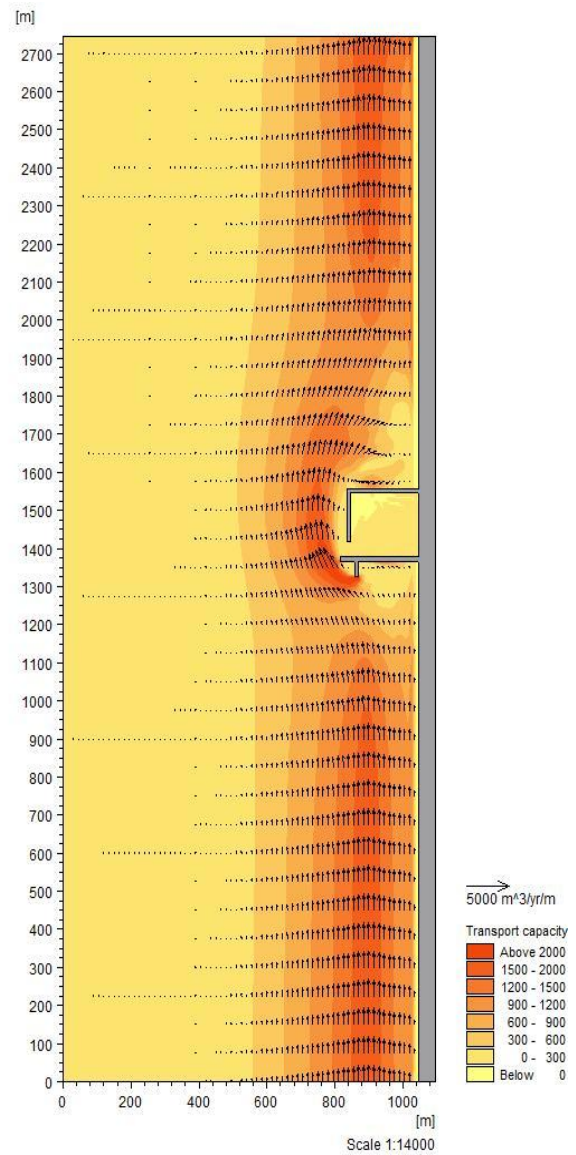
Σχήμα A.30 Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m) διάταξη 1, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος πρώτο κυματικό σενάριο

## Διάταξη 1

### Πρόβολος



Σχήμα A.31 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 1, πρόβολος, πρώτο κυματικό σενάριο



Σχήμα A.32 Ρυθμός στερεομεταφοράς (m³/yr/m), διάταξη 1, πρόβολος, πρώτο κυματικό σενάριο

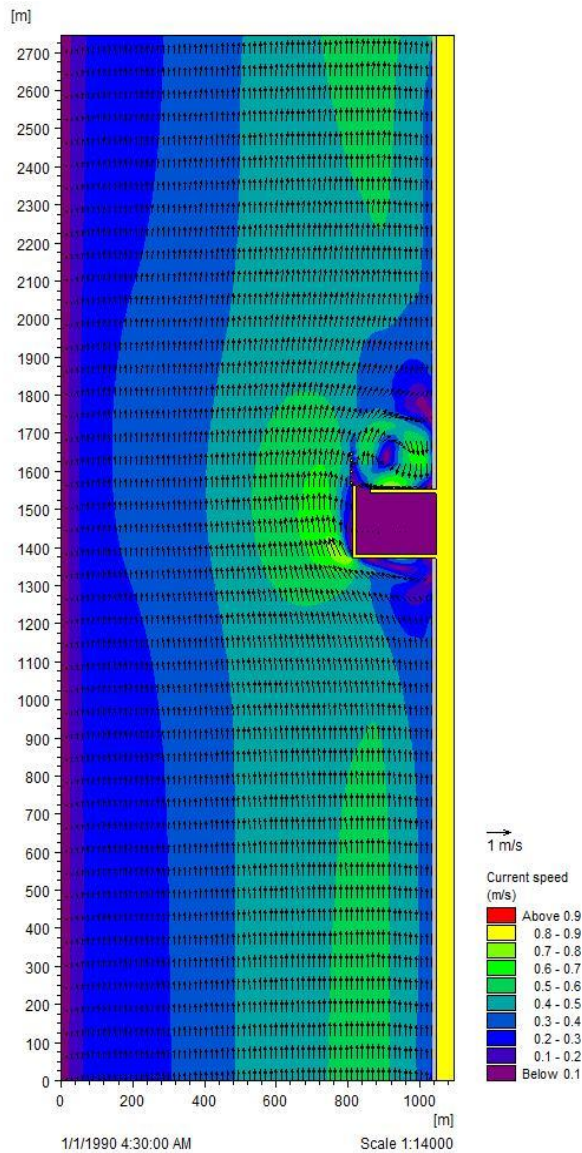
## Προτάσεις βελτίωσης

### Διάταξη μαρίνας 4

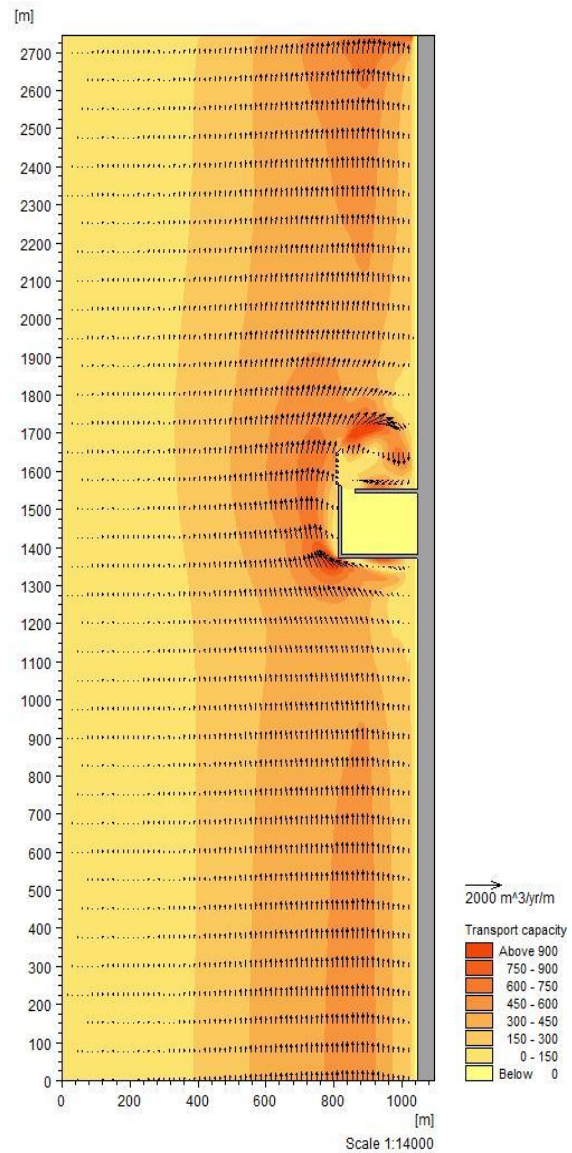
Κυματικό Σενάριο δεύτερο :  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$

#### Διάταξη 4

#### Συστοιχία πασσάλων κάθετα στην είσοδο



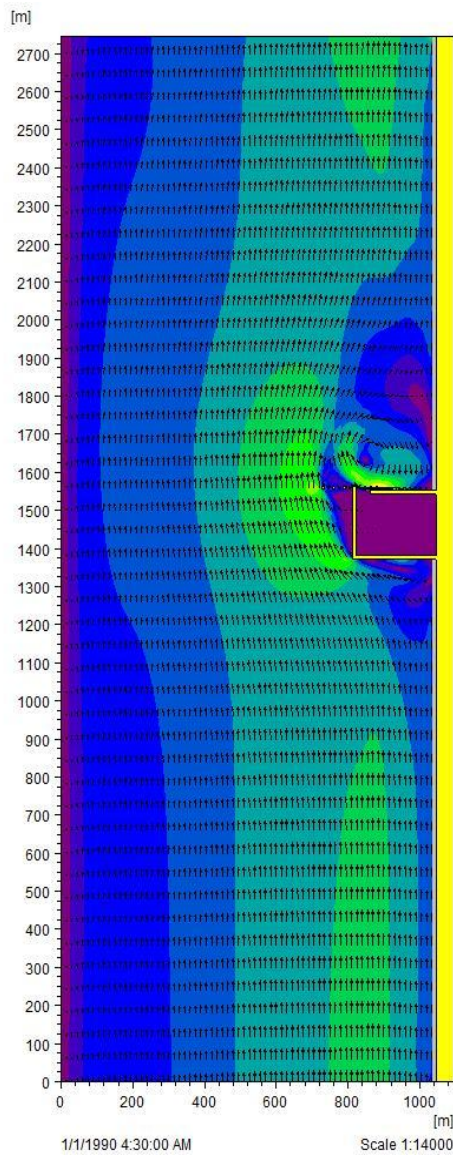
Σχήμα A.33 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθετα στην είσοδο, δεύτερο κυματικό σενάριο



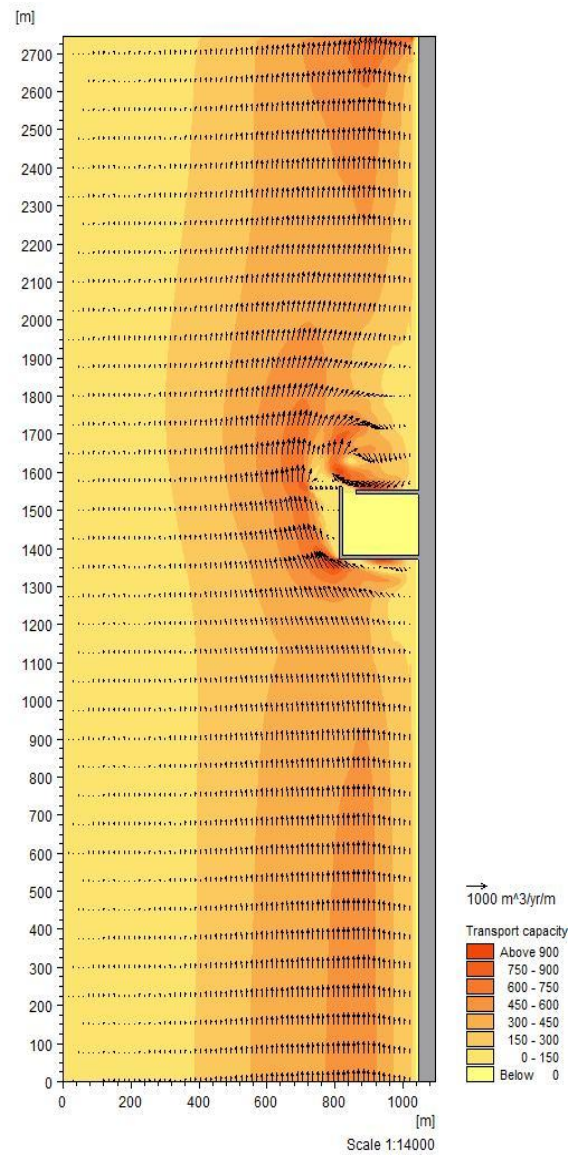
Σχήμα A.34 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $\text{m}^3/\text{yr}/\text{m}$ ), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι κάθετα στην είσοδο δεύτερο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 4

#### Συστοιχία πασσάλων παράλληλα στην είσοδο



Σχήμα A.35 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο δεύτερο κυματικό σενάριο

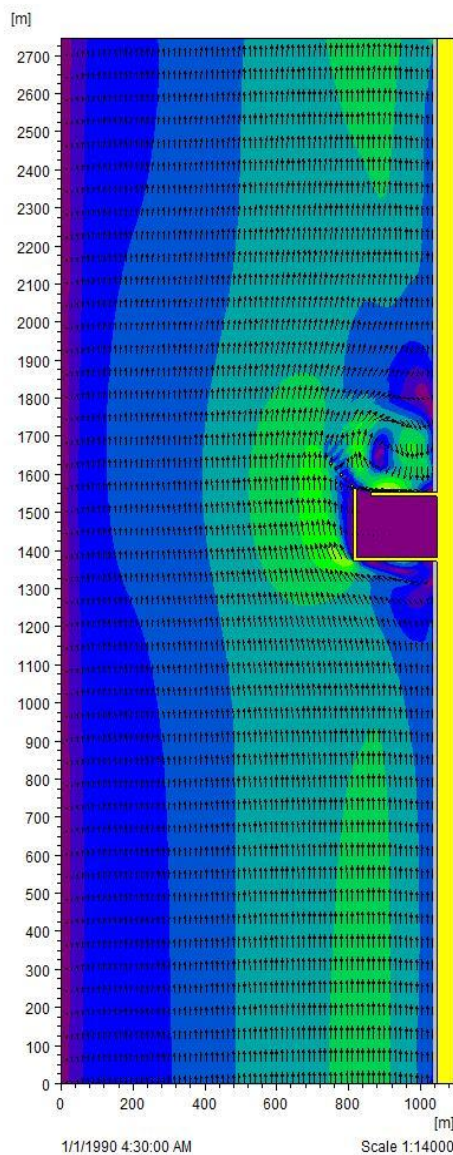


Σχήμα A.36 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ ), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο δεύτερο κυματικό σενάριο

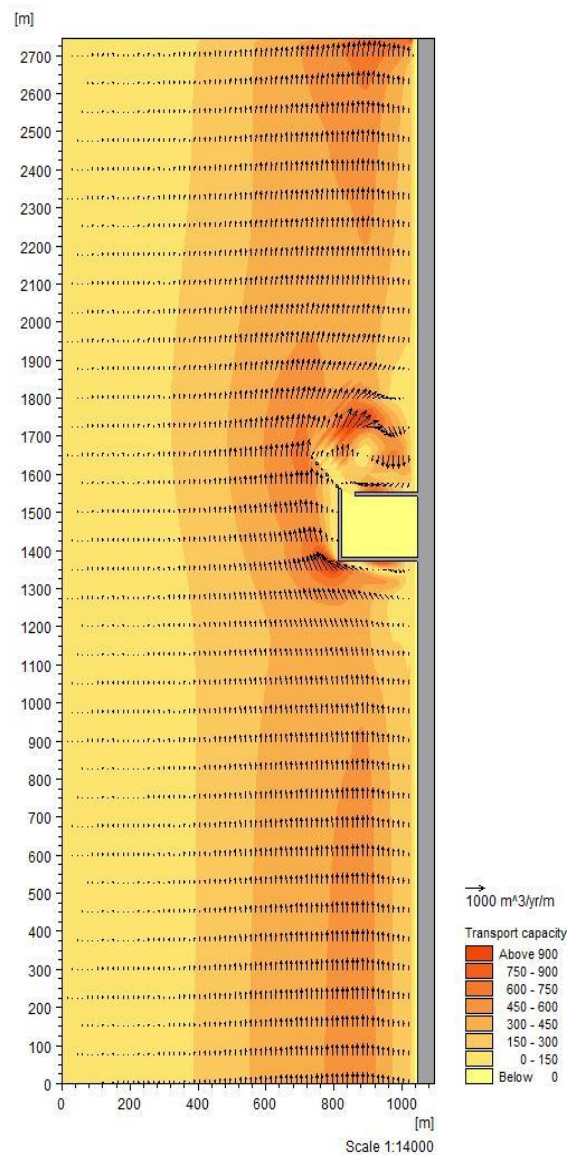


### Διάταξη 4

#### Συστοιχία πασσάλων υπό γωνία στην είσοδο



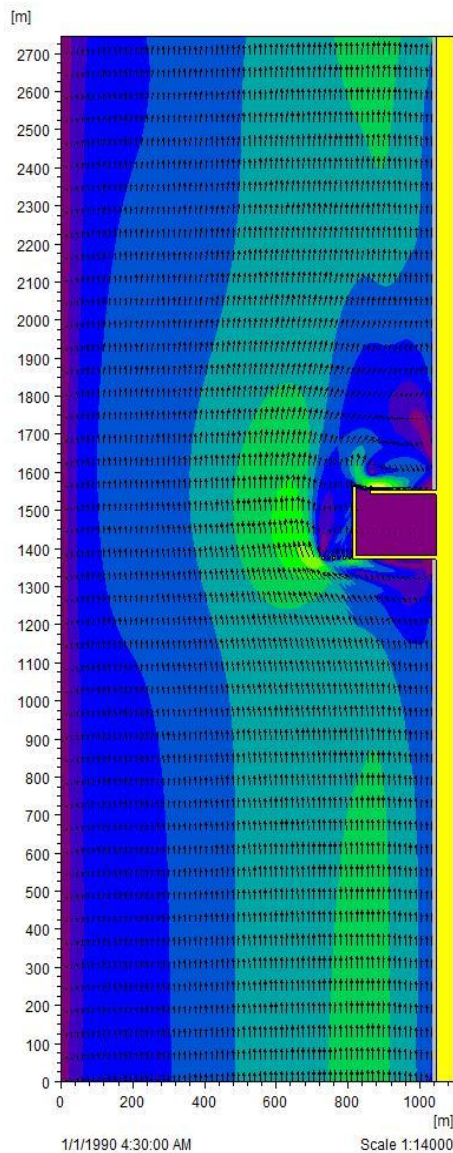
Σχήμα A.37 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο δεύτερο κυματικό σενάριο



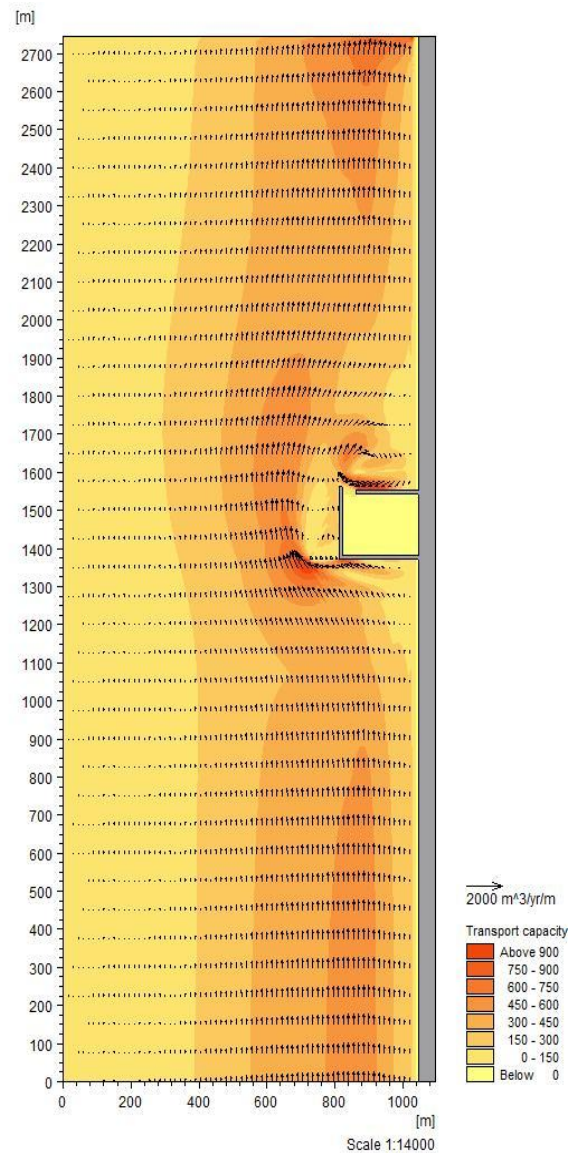
Σχήμα A.38 Ρυθμός στερεομεταφοράς (m³/yr/m), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι σε γωνία 45° με την είσοδο δεύτερο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 4

#### Συστοιχία πασσάλων παράλληλα στην είσοδο στο άνω άκρο της διάταξης



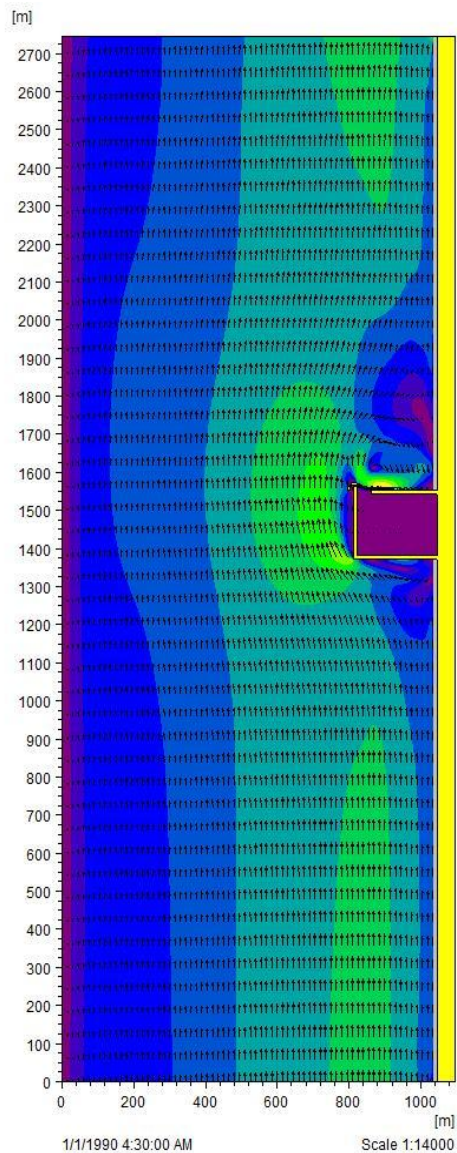
Σχήμα A.39 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο σε ανάντη περιοχή, δεύτερο κυματικό σενάριο



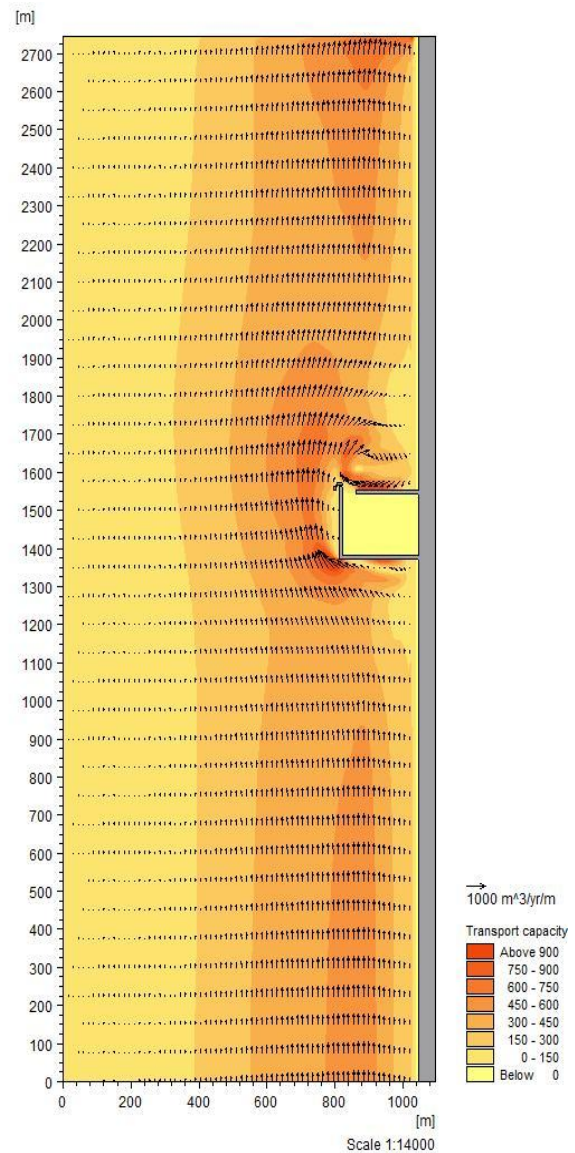
Σχήμα A.40 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ ), διάταξη 4, πάσσαλοι τοποθετημένοι παράλληλα στην είσοδο σε ανάντη περιοχή, δεύτερο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 4

### Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος



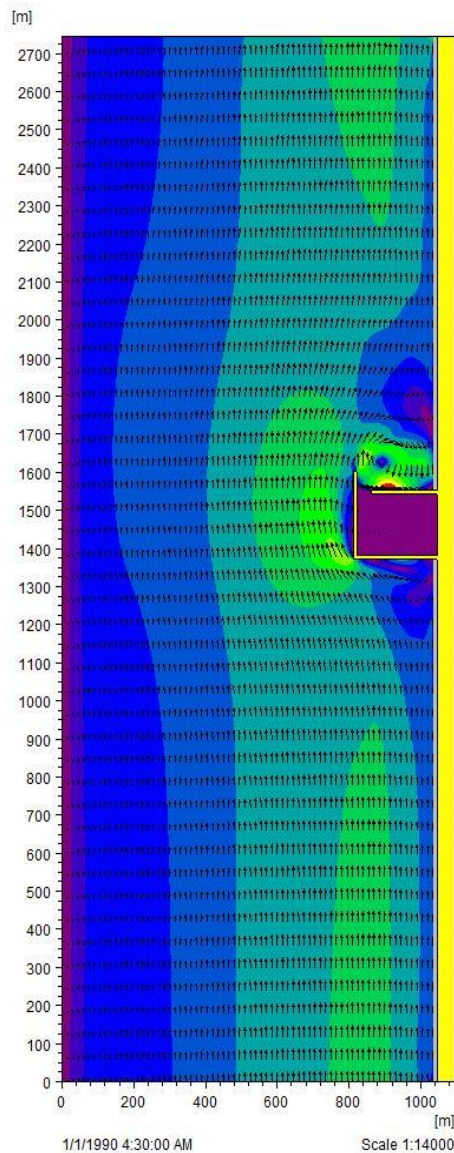
Σχήμα A.41 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος, δεύτερο κυματικό σενάριο



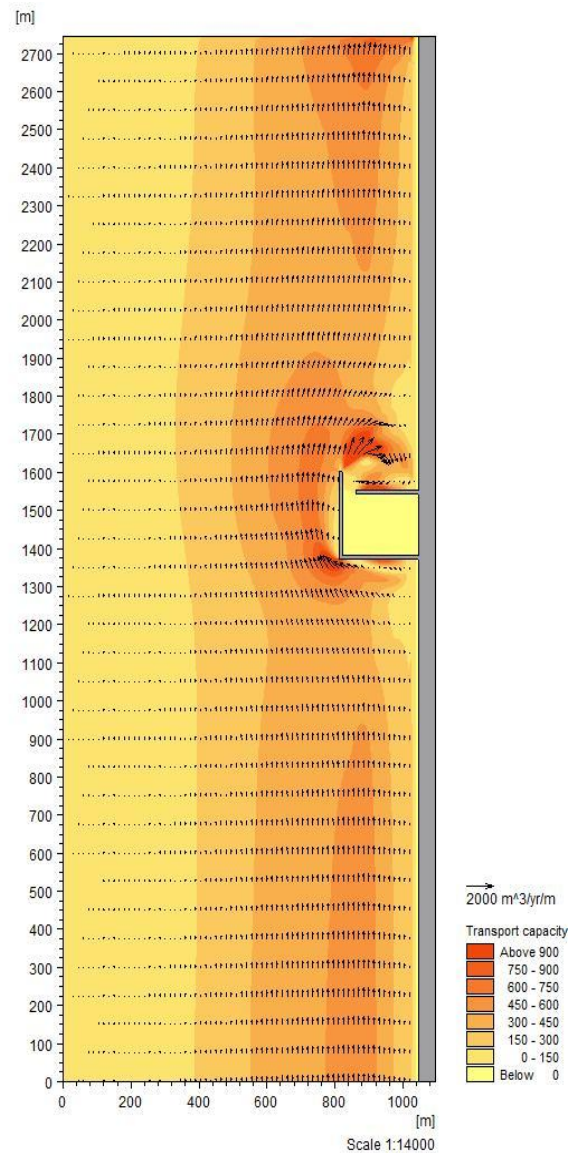
Σχήμα A.42 Ρυθμός στερεομεταφοράς (m<sup>3</sup>/yr/m), διάταξη 4, τοίχωμα εκτροπής ρεύματος, δεύτερο κυματικό σενάριο

### Διάταξη 4

### Πρόβολος



Σχήμα A.43 Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος (m/s), διάταξη 4, πρόβολος, δεύτερο κυματικό σενάριο



Σχήμα A.44 Ρυθμός στερεομεταφοράς ( $m^3/yr/m$ ), διάταξη 4, πρόβολος, δεύτερο κυματικό σενάριο