



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ  
ΜΑΡΙΝΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ  
ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ**

**ΠΕΤΡΟΣ ΜΑΓΚΑΝΑΡΗΣ**

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Αν. Καθηγήτρια  
Συνεπιβλέπων: Μιχάλης Κ. Χονδρός, Διδάσκων (ΠΔ 407/1980)

Αθήνα, Φεβρουάριος 2020

Μαγκανάρης Ν. Π. (2020)

Διερεύνηση απόδοσης διατάξεων μαρίνων σε σχέση με την παράκτια στερεομεταφορά

Διπλωματική εργασία

Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Magkanaris N. P. (2020)

Efficiency of marinas structures in relation with coastal sediment transport

Diploma Thesis

Laboratory of Harbor Works, National Technical University of Athens, Greece



Το περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν της δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.

The content of this diploma thesis is the product of my own intellectual effort. The integration of other material, published or not, without concrete reference that do not allow ambiguities or misunderstandings, is strictly prohibited.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί σταθμό της ολοκλήρωσης της φοίτησής μου στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και αφετηρία για την επόμενη σελίδα της ζωής μου. Κλείνει ένας κύκλος που δοκίμασε τα όρια μου, με οδήγησε σε εσωτερική ανασκόπηση και εν τέλει σφυρηλάτησε την προσωπικότητα μου. Στο σημείο αυτό, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλλαν καθοριστικά στην προσπάθεια μου αυτή.

Πρώτον, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα, Αν. Καθηγήτρια κα. Βίκυ Τσουκαλά για τις πολύτιμες συμβουλές της και την καθοδήγηση της κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερα θα ήθελα να την ευχαριστήσω διότι ως φοιτητής μου έδωσε το έναυσμα να εντρυφήσω βαθύτερα στον κλάδο της θαλάσσιας υδραυλικής και των λιμενικών έργων και ενέπνευσε την προπτυχιακή μου πορεία.

Η εργασία αυτή δεν θα μπορούσε να αποπερατωθεί χωρίς την αμέριστη συμπαράσταση και καθοδήγηση του Διδάκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., Μιχάλη Χονδρού. Του οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για τον χρόνο που μου διέθεσε σε συνεχείς συναντήσεις γύρω από το αντικείμενο της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες προς τον κύριο Ηλία Μουσσούλη για την παραχώρηση άδειας χρήσης του υπολογιστικού μοντέλου MIKE 21 του DHI.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την στήριξή τους καθ'όλη την διάρκεια της φοίτησής μου.

Πέτρος Μαγκανάρης  
Αθήνα, Φεβρουάριος 2020



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται η απόδοση γενικών διατάξεων μαρίνων σε σχέση με την παράκτια στερεομεταφορά. Τα κριτήρια απόδοσης τους είναι οι επιπτώσεις στον ρυθμό στερεομεταφοράς κοντά στις διατάξεις και η παρουσία προσαμμώσεων του πυθμένα στο εσωτερικό τους. Παράμετροι που εξετάζονται είναι η γεωμετρία των μώλων, η τοποθεσία και ο βαθμός προστασίας της εισόδου τους. Το αντικείμενο της έρευνας έχει ιδιαίτερη σημασία για τον ορθό σχεδιασμό λιμενικών έργων μικρής κλίμακας και μαρίνων καθώς διασφαλίζει την εύρυθμη λειτουργία τους, μειώνει δραστικά τα έξοδα συντήρησής τους από βυθοκορήσεις και ελαχιστοποιεί την διάβρωση των παρακείμενων ακτών. Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ιδεατή και απλοποιημένη βαθυμετρία και επιλέχθηκαν προς εξέταση έξι διατάξεις μαρίνων που περιγράφουν κατά το δυνατόν ελληνικές μαρίνες. Οι διατάξεις αυτές παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στον σχεδιασμό των εξωτερικών λιμενικών έργων για την εξέταση των παραμέτρων που τέθηκαν. Οι πέντε διατάξεις λήφθηκαν ίδιες με συναφείς έρευνες ώστε να παραχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα και σε αυτές προστέθηκε μια ακόμη η οποία αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως βέλτιστη σχετικά με τις επιπτώσεις της στην παράκτια στερεομεταφορά. Επιπλέον επιλέχθηκαν τρία κυματικά σενάρια προσαρμοσμένα στα ελληνικά δεδομένα. Το πρώτο και το δεύτερο κυματικό σενάριο επιλέγονται ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη (2013) για την ευθεία αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων. Το τρίτο κυματικό σενάριο λαμβάνεται για να διερευνηθεί η κάθετη πρόσπτωση κυματισμού στην ακτή και οι επιπτώσεις της εγκάρσιας στερεομεταφοράς στις διατάξεις μαρίνων. Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο MIKE 21/3 Coupled Model FM (Flexible Mesh) του Danish Hydraulic Institute (DHI). Για κάθε μία από τις διατάξεις έγιναν τρεις προσομοιώσεις, για τα τρία κυματικά σενάρια. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται ως προς τον ρυθμό στερεομεταφοράς με αυτά του Μαυραντωνάκη (2013) για τα δύο πρώτα κυματικά σενάρια. Προκύπτει ότι τα νέα μοντέλα, που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία και προκρίνει το DHI, αποδίδουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση στερεομεταφοράς ενώ ταυτόχρονα εμφανίζουν εντονότερη κίνηση ιζήματος στο εσωτερικό των λιμενολεκανών. Αναφορικά με την απόδοση των διατάξεων, συμπεραίνεται ότι οι προσήνεμοι μώλοι θα πρέπει να σχεδιάζονται κατά το δυνατόν με καμπυλότητα έτσι ώστε να σχηματίζεται γραμμή παράκαμψης του ιζήματος (bypass). Επίσης, η είσοδος πρέπει να τοποθετείται στην υπήνεμη πλευρά, ιδιαίτερα στον σχεδιασμό μώλων με καμπυλότητα, σε σχέση με την επικρατούσα διεύθυνση κυματισμών ώστε να ελαχιστοποιούνται οι

προσαμμώσεις στη λιμενολεκάνη. Με βάση τα παραπάνω, η αποδοτικότερη διάταξη σε σχέση με τις συνθήκες στερεομεταφοράς και τη μεταβολή του πυθμένα στο εσωτερικό της είναι η Διάταξη 3. Προκαλεί τις ηπιότερες επιπτώσεις στις αμέσως κατάντη ακτές ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει τις μικρότερες προσαμμώσεις οι οποίες είναι συγκεντρωμένες κοντά στην είσοδο.



## **ABSTRACT**

In the present diploma thesis, the efficiency of marinas structures is analyzed in relation with coastal sediment transport. The criteria of efficiency are rates of sediment transport at the area near the structures and presence of siltation inside the port basin. The parameters examined are pier geometry, location and degree of protection of the entrance. The topic of this study is of high significance for the proper design of a small harbor (marina) as it ensures it is well functioning, it decreases its maintenance costs from dredging and minimizes erosion of adjacent coasts. In the first place, bathymetry is simplified and six marina structures, which are similar to greek marinas, are designed. These marinas structures have major differences in their layout in order to examine each parameter that was mentioned. Five of the marinas are selected similar to the ones chosen in relevant studies for comparison. The sixth marina layout is chosen to be examined as it is cited as low impact for coastal procedures. Moreover, three wave scenarios were chosen, adjusted to greek wave data. The first two wave scenarios were chosen similar to the ones used in diploma thesis of Mavrantonakis (2013) for comparison. The third wave scenario was chosen to analyze the impact of vertical wave incidence and transverse sediment transport. For the present diploma thesis MIKE 21 Coupled Model FM (Flexible Mesh) of Danish Hydraulic Institute (DHI) was used. For each marina layout three simulations were executed, one for each wave scenario. Results are compared to the ones reached in Mavrantonakis (2013) thesis. It derives from the comparison that the new model, used in the present thesis, is more accurate in presenting sediment transport conditions and results in higher sediment movement inside the port basin. Concerning the efficiency of marina layouts, it is concluded that piers should be designed curvy so that it is naturally bypassed with sediment. The entrance should be constructed on the lee side of the structure, especially in a curvy marina layout, in order to minimize port basin siltations. From the above, the study indicates that as far as sediment transport and siltation are concerned; it is proposed that marina layouts are designed following layout 3. This layout's impact on coastal procedures is mild and it develops minimum siltation, concentrated outside of the port and near the entrance.

**Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:** ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΜΑΡΙΝΩΝ  
ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΣΤΕΡΕΟΜΕΤΑΦΟΡΑ

**Title of Thesis:** EFFICIENCY OF MARINAS STRUCTURES IN RELATION WITH  
COASTAL SEDIMENT TRANSPORT

**Λέξεις κλειδιά:** Μαρίνες, Παράκτια Ζώνη, Στερεομεταφορά, Προσαμμώσεις

**Key words:** Marinas, Coastal Zone, Sediment transport, Siltation

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	v
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT.....	ix
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Γενική Ανασκόπηση.....	1
1.2 Στόχοι .....	1
1.3 Σημεία καινοτομίας .....	2
1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας.....	2
<b>2 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ.....</b>	<b>4</b>
2.1 Εισαγωγή .....	4
2.2 Παράκτια ζώνη.....	4
2.3 Κυματισμοί στην Παράκτια Ζώνη .....	6
2.4 Παράκτια ρεύματα .....	9
2.5 Έναρξη κίνησης ιζήματος.....	11
2.6 Παράκτια στερεομεταφορά.....	14
2.6.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής .....	16
2.6.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή.....	18
<b>3 ΛΙΜΕΝΕΣ ΣΚΑΦΩΝ ΑΝΑΨΥΧΗΣ .....</b>	<b>21</b>
3.1 Γενικά στοιχεία .....	21
3.2 Αλληλεπίδραση παράκτιων έργων – ακτής.....	26
3.3 Προσαμμώσεις σε μαρίνες.....	29
3.3.1 Εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες στερεομεταφοράς σε μαρίνες .....	30
<b>4 ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.....</b>	<b>34</b>
4.1 Γενικά .....	34
4.2 Διερεύνηση σχεδιασμού διάταξης μαρίνας σε σχέση με τη στερομεταφορά στην είσοδο και προτάσεις βελτίωσης (Μαυραντωνάκης, 2013).....	34
4.3 Διερεύνηση συνθηκών στερεομεταφοράς και κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό διατάξεων μαρίνων (Σοφιαδέλλη, 2014) .....	43
<b>5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ .....</b>	<b>54</b>
5.1 Εισαγωγή .....	54
5.2 Τρόπος εργασίας .....	54
5.3 Κυματικά σενάρια .....	56
5.4 Σχεδιασμός περιοχής μελέτης - βαθυμετρίας .....	56
5.5 Μεταβλητό πλέγμα.....	59
5.6 Διατάξεις μαρίνων.....	64

5.7	Υπολογισμός ιζηματικού ισοζυγίου στο εσωτερικό .....	70
<b>6</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE21 ...</b>	<b>71</b>
6.1	Εισαγωγή .....	71
6.2	Φασματικό Μοντέλο Διάδοσης Κυματισμών - Spectral Wave Module (SW).....	72
6.2.1	Γενική περιγραφή .....	72
6.2.2	Βασικές εξισώσεις υπολογισμού .....	74
6.2.3	Εφαρμογή μοντέλου.....	76
6.2.4	Αποτελέσματα κυματικού μοντέλου SW .....	81
6.3	Υδροδυναμικό Μοντέλο - Hydrodynamic Module (HD).....	83
6.3.1	Γενική περιγραφή .....	83
6.3.2	Βασικές εξισώσεις .....	84
6.3.3	Εφαρμογή μοντέλου.....	85
6.3.4	Αποτελέσματα υδροδυναμικού μοντέλου HD.....	89
6.4	Μοντέλο Στερεομεταφοράς μη-Συνεκτικών Ιζημάτων - Sand Transport Module (ST) 90	
6.4.1	Γενική περιγραφή .....	90
6.4.2	Βασικές εξισώσεις μοντέλου .....	91
6.4.3	Μορφολογία .....	92
6.4.4	Αποτελέσματα μοντέλου μεταφοράς ιζήματος (ST).....	94
<b>7</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE21 .....</b>	<b>96</b>
7.1	Εισαγωγή .....	96
7.2	Παράκτιο Κυματικό Πεδίο .....	96
7.3	Υδροδυναμικές συνθήκες .....	101
7.4	Συνθήκες στερεομεταφοράς .....	104
7.5	Σύγκριση αποτελεσμάτων – Ρυθμός στερεομεταφοράς.....	107
7.5.1	Πρώτο κυματικό σενάριο .....	108
7.5.2	Δεύτερο κυματικό σενάριο.....	109
7.6	Μορφολογία πυθμένα.....	111
7.6.1	Μεταβολή του πυθμένα.....	111
7.6.2	Επαλληλία κυματικών σεναρίων .....	117
<b>8</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>122</b>
8.1	Σύνοψη Αποτελεσμάτων .....	122
8.2	Συνολικά Συμπεράσματα.....	123
8.3	Προτάσεις για περαιτέρω Έρευνα.....	124
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>125</b>
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....</b>	<b>128</b>

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής (Μουτζούρης, 2005) .....	5
Σχήμα 2: Ενεργειακό περιεχόμενο κυματισμών ανά κύκλο συχνότητας (Holthuijsen, 2007)...	7
Σχήμα 3: Τροχιές υγρών μορίων σε ρηχά, ενδιάμεσα και βαθιά νερά (Dean & Dalrymple, 1984).....	9
Σχήμα 4: Παράκτια ρεύματα κατά μήκος της ακτής (Μουτζούρης, 2005) .....	11
Σχήμα 5: Έναρξη κίνησης ιζήματος (Κουτίτας, 1998) .....	12
Σχήμα 6: Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς, 2004) .....	13
Σχήμα 7: Φορτίο σε αιώρηση (Καραμπάς, 2004) .....	13
Σχήμα 8: Μεταφορά ιζημάτων κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή (Μουτζούρης, 2005) .....	16
Σχήμα 9: Θεωρητική κατανομή παροχής κατά μήκος της ακτής $Q_1$ στη ζώνη μετά τη θραύση (Bijker, 1980).....	17
Σχήμα 10: Ζώνες κατά την εγκάρσια στερεομεταφορά (Κουτίτας, 1998).....	19
Σχήμα 11: Εγκάρσια στερεομεταφορά από τον έξαλλο στον ύφαλο αναβαθμό (Κουτίτας, 1998).....	20
Σχήμα 12: Αλληλεπίδραση τεχνικών έργων – παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μουτζούρης, 2005).....	28
Σχήμα 13: Αλληλεπίδραση μαρίνας – παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μέμος, 2004).....	29
Σχήμα 14: Ανταλλαγή υδάτων μεταξύ μαρίνας και περιβάλλοντος διαμέσου της εισόδου (Προέλευση: PIANC, 2008, μετά από προσαρμογή).....	31
Σχήμα 15: Σχεδιασμός ισοβαθών περιοχής μελέτης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013).....	35
Σχήμα 16: Αποτελέσματα MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το πρώτο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013).....	37
Σχήμα 17: Αποτελέσματα MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013).....	38
Σχήμα 18: Αποτελέσματα MIKE 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη Διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013).....	40
Σχήμα 19: Αποτελέσματα MIKE 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη Διάταξη 4, για το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013).....	41
Σχήμα 20: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	44
Σχήμα 21: Διατάξεις μαρίνων (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)...	45
Σχήμα 22: Εναλλακτική Διάταξη 1 – Αποτελέσματα κυματικής διείδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	46
Σχήμα 23: Εναλλακτική Διάταξη 2 – Αποτελέσματα κυματικής διείδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	46
Σχήμα 24: Εναλλακτική Διάταξη 3 – Αποτελέσματα κυματικής διείδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	47
Σχήμα 25: Εναλλακτική Διάταξη 4 – Αποτελέσματα κυματικής διείδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	47

Σχήμα 26: Εναλλακτική Διάταξη 5 – Αποτελέσματα κυματικής διείδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	48
Σχήμα 27: Εναλλακτική Διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	49
Σχήμα 28: Εναλλακτική Διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	49
Σχήμα 29: Εναλλακτική Διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	50
Σχήμα 30: Εναλλακτική Διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	50
Σχήμα 31: Εναλλακτική Διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	51
Σχήμα 32: Εναλλακτική Διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	51
Σχήμα 33: Βήματα παραγωγής των αποτελεσμάτων .....	55
Σχήμα 34: Εξεταζόμενη περιοχή.....	58
Σχήμα 35: Αναδιανομή σημείων ανά 2 m στη Διάταξη 6.....	60
Σχήμα 36: Πύκνωση καννάβου στην περιοχή ενδιαφέροντος.....	61
Σχήμα 37: Δημιουργία καννάβου στην περιοχή μελέτης .....	62
Σχήμα 38: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης.....	63
Σχήμα 39: Διαστάσεις διατάξεων.....	64
Σχήμα 40: Παράκτιες διεργασίες στην περιοχή κοντά στη Διάταξη 6 (Mangor, 2004).....	67
Σχήμα 41: Διατάξεις μαρίνων στο πρόγραμμα MIKE Zero.....	68
Σχήμα 42: Διάταξη 1 στην περιοχή μελέτης.....	69
Σχήμα 43: Επιλογή και κατάτμηση της επιφάνειας εντός της λιμενολεκάνης σε τριγωνικά στοιχεία.....	70
Σχήμα 44: Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων του μοντέλου MIKE 21 SW.....	77
Σχήμα 45: Ύψος κύματος $H_{rms}$ [m], πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=45^\circ$ ), Διάταξη 1.....	98
Σχήμα 46: Ύψος κύματος $H_{rms}$ [m], δεύτερο κυματικό σενάριο ( $H_s=2.5$ m, $T_p=6.5$ s, $\theta=10^\circ$ ), Διάταξη 1.....	99
Σχήμα 47: Ύψος κύματος $H_{rms}$ [m], τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=0^\circ$ ), Διάταξη 1.....	100
Σχήμα 48: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s], πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=45^\circ$ ), Διάταξη 1.....	101
Σχήμα 49: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s], δεύτερο κυματικό σενάριο, ( $H_s=2.5$ m, $T_p=6.5$ s, $\theta=10^\circ$ ), Διάταξη 1.....	102
Σχήμα 50: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s], τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=0^\circ$ ), Διάταξη 1.....	103
Σχήμα 51: Ρυθμός στερεομεταφοράς Total load [ $m^3/s/m$ ], πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=45^\circ$ ), Διάταξη 1.....	104
Σχήμα 52: Ρυθμός στερεομεταφοράς Total load [ $m^3/s/m$ ], δεύτερο κυματικό σενάριο ( $H_s=2.5$ m, $T_p=6.5$ s, $\theta=10^\circ$ ), Διάταξη 1.....	105
Σχήμα 53: Ρυθμός στερεομεταφοράς Total load [ $m^3/s/m$ ], τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=0^\circ$ ), Διάταξη 1.....	106

Σχήμα 54: Σύγκριση αποτελεσμάτων MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα της παρούσας διπλωματική (αριστερά) με του Μαυραντωνάκη (δεξιά) για το πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=45^\circ$ ) .....	109
Σχήμα 55: Σύγκριση αποτελεσμάτων MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα της παρούσας διπλωματική (αριστερά) με του Μαυραντωνάκη (δεξιά) για το δεύτερο κυματικό σενάριο ( $H_s=2.5$ m, $T_p=6.5$ s, $\theta=10^\circ$ ) .....	110
Σχήμα 56: Μεταβολή πυθμένα κοντά στις διατάξεις για το πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=45^\circ$ ) .....	114
Σχήμα 57: Μεταβολή πυθμένα κοντά στις διατάξεις για το δεύτερο κυματικό σενάριο ( $H_s=2.5$ m, $T_p=6.5$ s, $\theta=10^\circ$ ) .....	115
Σχήμα 58: Μεταβολή πυθμένα κοντά στις διατάξεις για το τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$ m, $T_p=6$ s, $\theta=0^\circ$ ) .....	116
Σχήμα 59: Ρυθμός μεταβολής πυθμένα με επαλληλία πρώτου και δεύτερου κυματικού σεναρίου.....	121
Σχήμα 60: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 2 .....	128
Σχήμα 61: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 2 .....	129
Σχήμα 62: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 2.....	129
Σχήμα 63: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 3 .....	129
Σχήμα 64: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 3 .....	129
Σχήμα 65: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 3.....	129
Σχήμα 66: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 4.....	129
Σχήμα 67: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 4 .....	129
Σχήμα 68: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 4.....	129
Σχήμα 69: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 5.....	129
Σχήμα 70: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 5 .....	129
Σχήμα 71: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 5.....	129
Σχήμα 72: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 6.....	129
Σχήμα 73: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 6 .....	129
Σχήμα 74: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος $V$ [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $m^3/s/m$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 6.....	129

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Μαρίνες και τουριστικοί λιμένες εν λειτουργία στον ελλαδικό χώρο – χωρητικότητα (Διαμαντίδης, 2016).....	21
Πίνακας 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά μαρίνων στην Ελλάδα (Διαμαντίδης, 2016) .....	24
Πίνακας 3.3: Μαρίνες στη Μεσόγειο θάλασσα (Πηγή: World Marine Guide).....	25
Πίνακας 4.1: Κυματικά σενάρια (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013).....	35
Πίνακας 4.2: 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 και το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013) .....	39
Πίνακας 4.3: 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 τις προτάσεις βελτίωσης στη Διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο και στη Διάταξη 4 για το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013).....	42
Πίνακας 4.4: Κυματικά σενάρια (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014) .....	44
Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τοπικού $H_{m0}$ στο χρονικό πέρας της προσομοίωσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014).....	48
Πίνακας 4.6: Υπολογισμός $\tau_{bx}$ και $\tau_{by}$ Διάταξης 1 (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014) .....	52
Πίνακας 4.7: Υπολογισμός $\tau_{bx}$ και $\tau_{by}$ Διάταξης 2(μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014) .....	52
Πίνακας 4.8: Υπολογισμός $\tau_{bx}$ και $\tau_{by}$ Διάταξης 5 (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014) .....	53
Πίνακας 5.1: Κυματικά σενάρια .....	56
Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά διατάξεων μαρίνων .....	65
Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα μεταβολής πυθμένα $[m]$ για το πρώτο και δεύτερο κυματικό σενάριο και για την επαλληλία τους, για όλες τις διατάξεις.....	118





## **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **1.1 Γενική Ανασκόπηση**

Η ανάπτυξη των λιμένων σκαφών αναψυχής (μαρίνες) αποτελεί μια συνεχώς αυξανόμενη δραστηριότητα η οποία πηγάζει από την άνοδο του βιοτικού επιπέδου. Ταυτόχρονα η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα δυναμικό και τρωτό περιβαλλοντικό σύστημα με αποσταθεροποιητικούς παράγοντες και μηχανισμούς να βρίσκονται σε στατική και δυναμική ισορροπία μεταξύ τους. Η απόκριση της παράκτιας ζώνης στην κατασκευή ενός λιμενικού έργου όπως είναι η μαρίνα εξετάζεται από το συνεχώς αναπτυσσόμενο πεδίο της Ακτομηχανικής όπως και η νέα δυναμική ισορροπία που δημιουργείται. Από την πλευρά του έργου οι νέες συνθήκες στερεομεταφοράς ενδέχεται να οδηγήσουν σε προσαμμώσεις στο εσωτερικό οι οποίες δημιουργούν πρόβλημα στην είσοδο των σκαφών.

Τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί σημαντική εξέλιξη στην έρευνα της παράκτιας κίνησης του ιζήματος. Ταυτόχρονη ανάπτυξη και βελτίωση παρουσιάζεται στα αριθμητικά μοντέλα που προσομοιώνουν τους μηχανισμούς που διέπουν τις παράκτιες διεργασίες όπως οι κυματισμοί, τα θαλάσσια ρεύματα και η στερεομεταφορά. Το MIKE 21 του DHI είναι ένα σύγχρονο υπολογιστικό μοντέλο προσομοίωσης για την παράκτια ζώνη που περιγράφει με ακρίβεια τις παράκτιες συνθήκες και αξιολογείται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

### **1.2 Στόχοι**

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας, είναι να διερευνηθεί κατά πόσο η γεωμετρία της μαρίνας, η τοποθεσία και ο βαθμός προστασίας της εισόδου της μπορούν να επηρεάσουν την παράκτια στερεομεταφορά κοντά στην κατασκευή και τις προσαμμώσεις στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης. Για τον σκοπό αυτό λαμβάνονται έξι διατάξεις μαρίνων με σημαντικές διαφορές στον σχεδιασμό των εξωτερικών λιμενικών έργων και τρία κυματικά σενάρια. Τέλος γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων παράκτιας στερεομεταφοράς των νέων μοντέλων που προκρίνει το DHI με τα παλαιότερα που κατάργησε προσαρμόζοντας τα

δεδομένα ώστε να είναι κοινά. Τα αριθμητικά μοντέλα που συγκρίνονται βασίζονται σε διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις και είναι τα MIKE 21 PMS, MIKE HD και MIKE ST με το MIKE 21/3 Coupled model και την επιλογή των MIKE 21 SW, MIKE HD και MIKE ST.

### **1.3 Σημεία καινοτομίας**

Τα σημεία καινοτομίας της παρούσας διπλωματική εργασίας είναι τα εξής:

- ✓ Προτείνεται μια πρόσθετη Διάταξη στις πέντε υπάρχουσες η οποία παρουσιάζει δύο καμπύλα στοιχεία και την είσοδο στο μέσο τους. Η διερεύνηση αυτή δίνει μια καλύτερη προσέγγιση στην επιρροή των καμπύλων κυματοθραυστών στις συνθήκες στερεομεταφοράς της περιοχής.
- ✓ Εφαρμόζεται μια εναλλακτική μέθοδος εξακρίβωσης της έντασης των προσαμμώσεων ή της διαφυγής ιζήματος για το εσωτερικό των διατάξεων μέσω του υπολογισμού του ιζηματικού ισοζυγίου του πυθμένα της λιμενολεκάνης.
- ✓ Εισάγεται η επαλληλία κυματικών σεναρίων ως ένα ακριβέστερο μέσο προσέγγισης του κυματικού κλίματος καθώς στην φύση συνυπάρχουν πλήθος κυματικών σεναρίων που δεν μπορούν να περιγραφούν επαρκώς από έναν μόνο επικρατούντα κυματισμό.

### **1.4 Δομή Διπλωματικής Εργασίας**

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει δομηθεί σε οκτώ κεφάλαια. Στο πρώτο Κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας μέσα από τη γενική ανασκόπηση, καθορίζονται οι στόχοι της και η δομή της. Στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται σύντομη παρουσίαση του εννοιολογικού υποβάθρου της παράκτιας ζώνης. Αναφέρονται οι παράκτιες διεργασίες που αφορούν τους κυματισμούς, τα παράκτια ρεύματα και την παράκτια στερεομεταφορά. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται βασικά στοιχεία για τους ελληνικούς και ευρωπαϊκούς λιμένες σκαφών αναψυχής και την αλληλεπίδραση των λιμενικών έργων με την παράκτια ζώνη. Στο τέταρτο Κεφάλαιο, παρουσιάζονται συνοπτικά ο τρόπος εργασίας, τα δεδομένα, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα συναφών ερευνών που εκπονήθηκαν από τους Μαυραντωνάκης (2013) και Σοφιαδέλλη (2014). Στο πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βήματα υπολογισμού, τα δεδομένα του προβλήματος, η περιοχή μελέτης, αναλύονται οι διατάξεις και η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κατά την

εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Στο Κεφάλαιο αυτό εισάγεται μια νέα έκτη Διάταξη στις υφιστάμενες πέντε που έχουν συγκριθεί έως τώρα καθώς αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως η βέλτιστη σχετικά με τις επιπτώσεις που προκαλεί στην παράκτια στερεομεταφορά. Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του λογισμικού MIKE 21/3 Coupled Model. Τα συζευγμένα μοντέλα των οποίων η λειτουργία αναλύεται είναι το φασματικό κυματικό μοντέλο MIKE Spectral Waves (SW), το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE Hydrodynamic Module (HD) και το μοντέλο στερεομεταφοράς MIKE Sediment Transport (ST). Στο Κεφάλαιο 7, το οποίο αποτελεί και το σημαντικότερο Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, γίνεται εφαρμογή των παραπάνω αριθμητικών μοντέλων και η ανάλυση των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας. Έχοντας βάση τα προηγούμενα κεφάλαια, γίνεται επίσης σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης με τα αποτελέσματα των συναφών ερευνών που απεικονίζονται στο Κεφάλαιο 3. Επιπλέον παρουσιάζεται ένα εναλλακτικό κριτήριο σύγκρισης των διατάξεων με βάση τις προσομοιώσεις στο εσωτερικό των διατάξεων με επαλληλία κυματικών σεναρίων. Τέλος στο τελευταίο Κεφάλαιο 8, πραγματοποιείται η σύνθεση των αποτελεσμάτων ως επιστέγασμα ολόκληρης της ερευνητικής προσπάθειας της διπλωματικής εργασίας τα οποία άγουν στα συνολικά συμπεράσματα καθώς και τις προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

## **2 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται εννοιολογικά στοιχεία για την παράκτια ζώνη. Αναλύονται τα φαινόμενα που την επηρεάζουν όπως οι κυματισμοί, τα παράκτια ρεύματα και η παράκτια στερεομεταφορά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις διαδικασίες που συντελούνται στην παράκτια ζώνη και αφορούν τη στερεομεταφορά καθώς αποτελούν παράμετρο για τον βέλτιστο σχεδιασμό μαρίνας όπως αναφέρεται στα επόμενα κεφάλαια.

### **2.2 Παράκτια ζώνη**

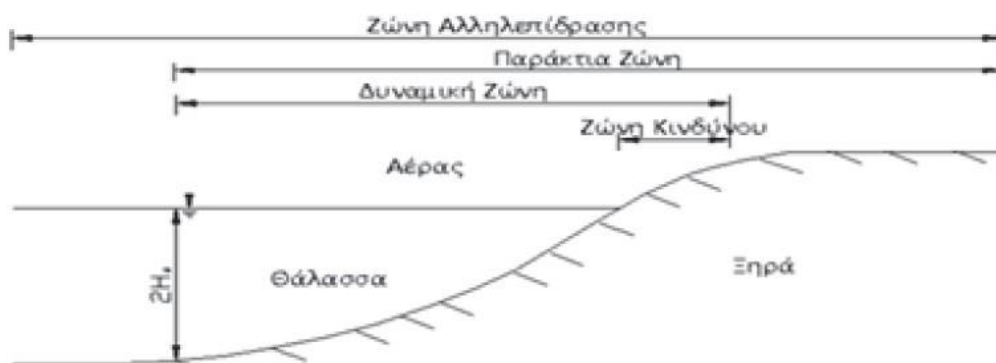
Ως παράκτια ζώνη ορίζεται το τμήμα της θάλασσας και της ξηράς το οποίο αποτελεί πεδίο αλληλεπίδρασης τους και εκτείνεται εκατέρωθεν της ακτογραμμής, δηλαδή του σημείου που συναντάει η θάλασσα την ξηρά, έως το σημείο το οποίο επηρεάζονται η ακτή ή οι παράκτιοι πόροι. Το θαλάσσιο τμήμα εκτείνεται κατ' ελάχιστο μέχρι την ισοβαθή στην οποία διαπιστώνεται η επίδραση του πυθμένα ή μέχρι την ισοβαθή στην οποία διαπιστώνεται η ύπαρξη μεγάλης βιοποικιλότητας. Αξίζει να τονισθεί ότι η θαλάσσια ζώνη περιλαμβάνει όλη την υφαλοκρηπίδα, δηλαδή μέχρι το βάθος περίπου των 200 m. Αναφορικά με το χερσαίο τμήμα, η έκταση του ξεκινά από την ακτή έως το υψόμετρο στο οποίο καταλήγει η επίδραση των θαλάσσιων διεργασιών ενώ περιλαμβάνει ακόμη και ολόκληρη τη λεκάνη απορροής των επιφανειακών υδάτων.

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα δυναμικό φυσικό περιβάλλον με ιδιαίτερη οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική σημασία. Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα αξιοποιούσε εντατικά τις εκτάσεις της για κατοικία, αναψυχή, μεταφορές και για την παραγωγή αγαθών και υπηρεσιών σημαντικά για την ευημερία του. Σήμερα στις παράκτιες περιοχές λαμβάνει χώρα η πλειοψηφία των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων παγκοσμίως. Οι εντάσεις των ανθρωπογενών πιέσεων εκεί είναι ιδιαίτερα μεγάλες. Η γεωγραφική και οικολογική ποικιλομορφία του παράκτιου περιβάλλοντος δέχεται πιέσεις που σχετίζονται με τη ρύπανση, τη διάβρωση ακτών, την καταστροφή ενδιαιτημάτων αλλά και ανταγωνιστικές

χρήσεις. Η διαχείριση και η προστασία του παράκτιου περιβάλλοντος έχει ιδιαίτερη σημασία για την περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική βιωσιμότητα και αποτελεί στόχο φορέων χάραξης πολιτικής σε διεθνές, εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο.

Οι ζώνες που έχουν οριστεί κατά πλάτος μιας παράκτιας ζώνης (Μουτζούρης, 2005) φαίνονται στο Σχήμα 1 και 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 και η προσάμμωση
- ζώνη κινδύνου (hazard zone)



**Σχήμα 1: Καθορισμός ζωνών κατά πλάτος μιας ακτής (Μουτζούρης, 2005)**

Επιπλέον περιλαμβάνει τις ακόλουθες ζώνες με κριτήριο τον τύπο των κυματικών διεργασιών που λειτουργούν στα επιμέρους τμήματα (Komar, 1998):

- τη ζώνη πριν από τη θραύση (before breaker zone) ή τη βαθύτερη ζώνη, όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυματισμών που τελικά οδηγούν στη θραύση

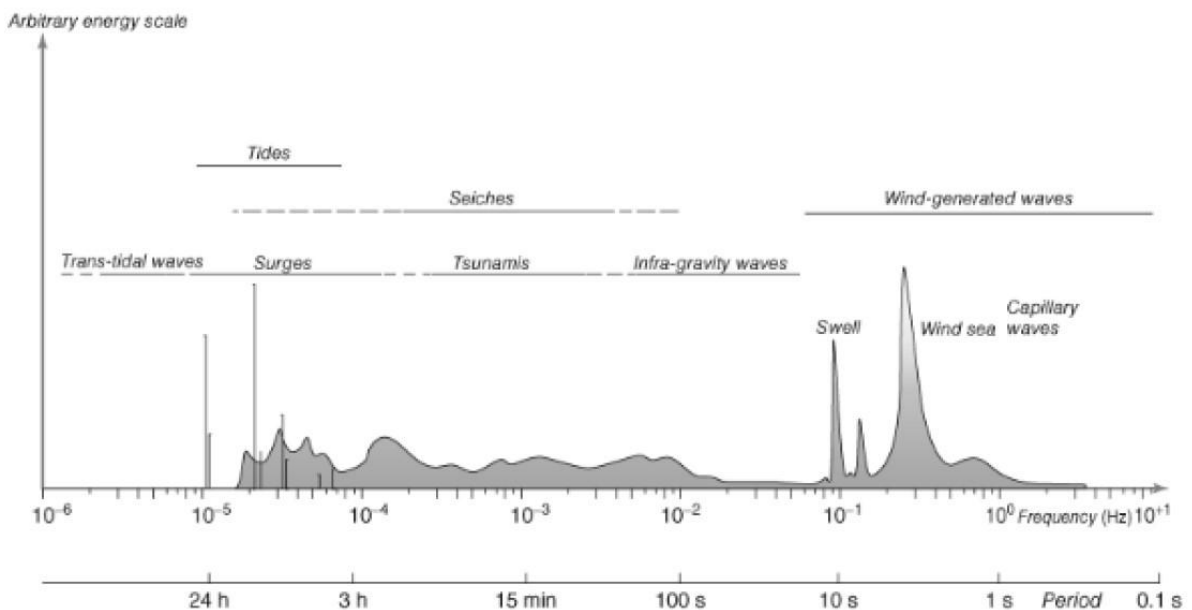
- τη ζώνη θραύσης (breaker zone) η οποία αποτελεί το πιο δυναμικό τμήμα της παράκτιας ζώνη που είναι και ο γενεσιουργός μηχανισμός των περισσότερων διαδικασιών της ακτομηχανικής
- τη ζώνη μετά τη θραύση (after breaker zone). Η τελευταία υποδιαιρείται στη ζώνη απόσβεσης (surf zone), όπου εκτονώνεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του θραυόμενου κύματος (τύρβη, θερμότητα κτλ.) και αναπτύσσονται τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής και στη ζώνη διαβροχής (swash zone) με όρια την κατώτερη και την ανώτερη θέση της ακτογραμμής. Το εύρος τους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, τη φάση της παλίρροιας και την κλίση του πυθμένα.

### 2.3 Κυματισμοί στην Παράκτια Ζώνη

Οι κυματισμοί αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή ενέργειας για τη συντέλεση των παράκτιων διεργασιών. Οι θαλάσσιοι κυματισμοί είναι η περιοδική διακύμανση των μορίων του θαλάσσιου νερού με τις οποίες μεταφέρεται ενέργεια. Μια πρόσφατη κατηγοριοποίηση των θαλάσσιων κυματισμών έγινε από τον Holthuijsen (2007) και αφορά στους επιφανειακούς κυματισμούς οι οποίοι είναι οι σημαντικότεροι για το σχεδιασμό λιμενικών και υπεράκτιων έργων. Η κατάταξη των κυματισμών φαίνεται στο Σχήμα 2 και αναλύεται παρακάτω:

- Τριχοειδείς κυματισμοί (capillary waves), οι οποίοι δημιουργούνται στο οριακό στρώμα της θάλασσας με την ατμόσφαιρα. Η επίδραση της υψηλής επιφανειακής τάσης σε αυτή τη διεπιφάνεια προκαλεί τη δημιουργία τριχοειδών κυματισμών με πολύ μικρή περίοδο (μικρότερη από 0.25 s).
- Ανεμογενείς κυματισμοί (wind waves), οι οποίοι καταλαμβάνουν ένα μεγάλο εύρος του φάσματος και δημιουργούνται από τη δράση του ανέμου που θέτει σε κίνηση τα υγρά σωματίδια και τα μετατοπίζει από τη θέση ισορροπίας τους. Οι περίοδοι των κυμάτων που προκαλούνται είναι μικρότερες των 30 s. Σε περίπτωση διαφυγής της περιοχής δημιουργίας, οι κυματισμοί αυτοί αποκτούν μεγαλύτερη κυρτότητα και κανονικοποιημένη μορφή με περιόδους 12-30 s και ονομάζονται αποθάλασσα (swell).

- Infragravity waves, τα οποία δημιουργούνται από μεταφορά ενέργειας και υπέρθεση των ανεμογενών κυματισμών και αποθάλασσας και εμφανίζονται κυρίως εντός της ζώνης θραύσης (surf beats). Οι περίοδοι των κυμάτων αυτών κυμαίνονται από 30 έως 250 s.
- Κυματισμοί παραγόμενοι από απότομες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης (seiches), οι οποίοι αποτελούν μορφή στάσιμων κυματισμών. Η συχνότητά τους είναι ίση με τη συχνότητα συντονισμού στη λεκάνη στην οποία παρουσιάζονται και οι περίοδοί τους κυμαίνονται από 1-40 min.
- Σεισμογενείς κυματισμοί (tsunamis), τα οποία δημιουργούνται από σεισμογενή δραστηριότητα ή υποθαλάσσιες κατολισθήσεις. Είναι δύσκολο να προβλεφθούν και δεν γίνονται αντιληπτά στην ανοιχτή θάλασσα παρά μόνο όταν πλησιάσουν την ακτή. Εκεί, ως μακροί κυματισμοί, αυξάνουν το ύψος τους και διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους με καταστροφικές συνέπειες για την παράκτια ζώνη.
- Μετεωρολογική παλίρροια (storm surges), που οδηγεί στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας. Δημιουργούνται από τη χαμηλή ατμοσφαιρική πίεση και την υψηλή ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας.



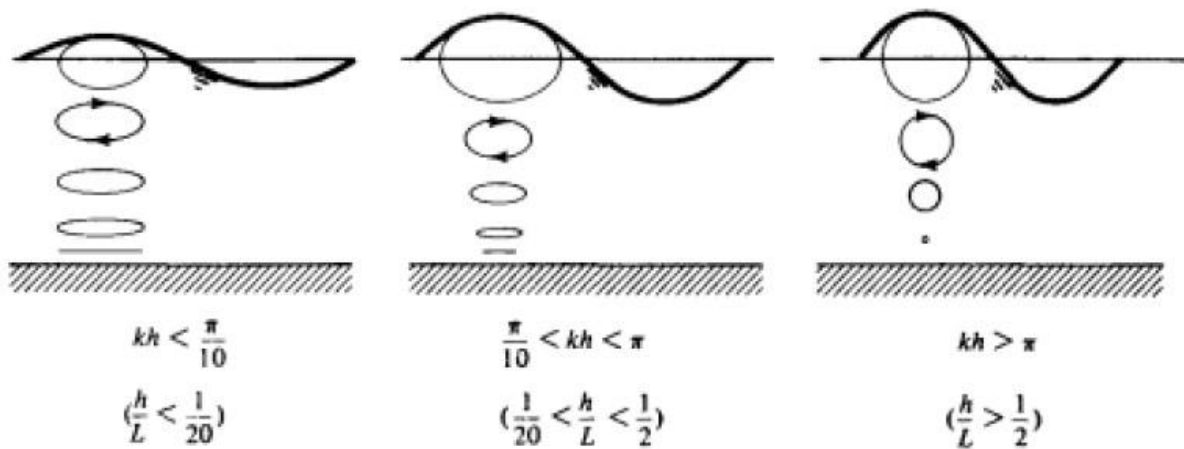
**Σχήμα 2: Ενεργειακό περιεχόμενο κυματισμών ανά κύκλο συχνότητας (Holthuijsen, 2007)**



Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των κυματισμών είναι το ύψος κυματισμού  $H$  [m], η περίοδος κυματισμού  $T$  [s], η μέση διεύθυνση διάδοσης  $\theta$  [ $^\circ$ ], η καμπυλότητα ή κλίση κυματισμού  $\gamma$  και η ταχύτητα κυματισμού (ή ταχύτητα φάσεως)  $c$  [m/s]. Στα παραπάνω χαρακτηριστικά επιδράει ο πυθμένας και για αυτό γίνεται διάκριση μεταξύ βαθιών, ενδιάμεσων και ρηχών νερών. Κρίσιμη παράμετρος είναι ο λόγος του βάθους  $d$  προς το μήκος κυματισμού  $L$  για τη διάκριση. Όταν  $d/L > 0.5$  πρόκειται για βαθιά νερά ενώ όταν  $d/L < 0.05$  πρόκειται για ρηχά. Στην υπόλοιπη περιοχή είναι τα ενδιάμεσα νερά. Στα βαθιά νερά οι τροχιές των σωματιδίων του νερού είναι κυκλικές ενώ στα ενδιάμεσα και τα ρηχά νερά τείνουν να γίνουν ελλειπτικές. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 3. Ειδικότερα για την περιοχή των ενδιάμεσων και των ρηχών νερών η διατομή του κυματισμού μεταβάλλεται σημαντικά. Οι σημαντικότερες μεταβολές σε μια διατομή είναι η μείωση του μήκους κυματισμού, η μείωση και στη συνέχεια η αύξηση του ύψους κυματισμού, η αύξηση της καμπυλότητας του κυματισμού, η εμφάνιση υψηλότερων αρμονικών και η σταδιακή μετατροπή της ημιτονοειδούς διατομής σε τροχοειδή διατομή. Τα κύρια φαινόμενα που παρατηρούνται στην αλλοίωση των χαρακτηριστικών των κυματισμών είναι:

- Η ρήχωση (shoaling) λόγω της επίδρασης του πυθμένα
- Η διάθλαση (refraction) λόγω της λοξής πρόσπτωσης των κυματισμών ως προς τις ισοβαθείς
- Η ανάκλαση (reflection) των κυματισμών λόγω της πρόσπτωσης σε ένα φυσικό (π.χ. βραχώδη ακτή απότομης κλίσης) ή ανθρωπογενές (π.χ. κατακόρυφο μέτωπο) εμπόδιο
- Η περίθλαση (diffraction) λόγω της πρόσπτωσης σε φυσικό (π.χ. νησίδα) ή ανθρωπογενές (π.χ. ακρομώλιο) εμπόδιο
- Θραύση (wave breaking) κυματισμών κοντά στην ακτή
- Θραύση στα ανοιχτά (white-capping)
- Η τριβή στον πυθμένα (bottom friction) και η σταδιακή εξασθένηση (wave dissipation) της ροής της κυματικής ενέργειας

- Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών και μεταφορά ενέργειας μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων (non liner transfers between frequencies)
- Διασπορά των κυματισμών (dispersion)



Σχήμα 3: Τροχιές υγρών μορίων σε ρηχά, ενδιάμεσα και βαθιά νερά (Dean & Dalrymple, 1984)

## 2.4 Παράκτια ρεύματα

Τα παράκτια ρεύματα κατηγοριοποιούνται με βάση την αιτία δημιουργίας τους ως εξής:

- Ωκεάνια ρεύματα, λόγω κυκλοφορίας του νερού σε κλίμακα ωκεανών
- Παλιρροϊκά ρεύματα, λόγω αστρονομικών και πλανητικών παλιρροϊών
- Ανεμογενή ρεύματα, λόγω της δράσης του ανέμου

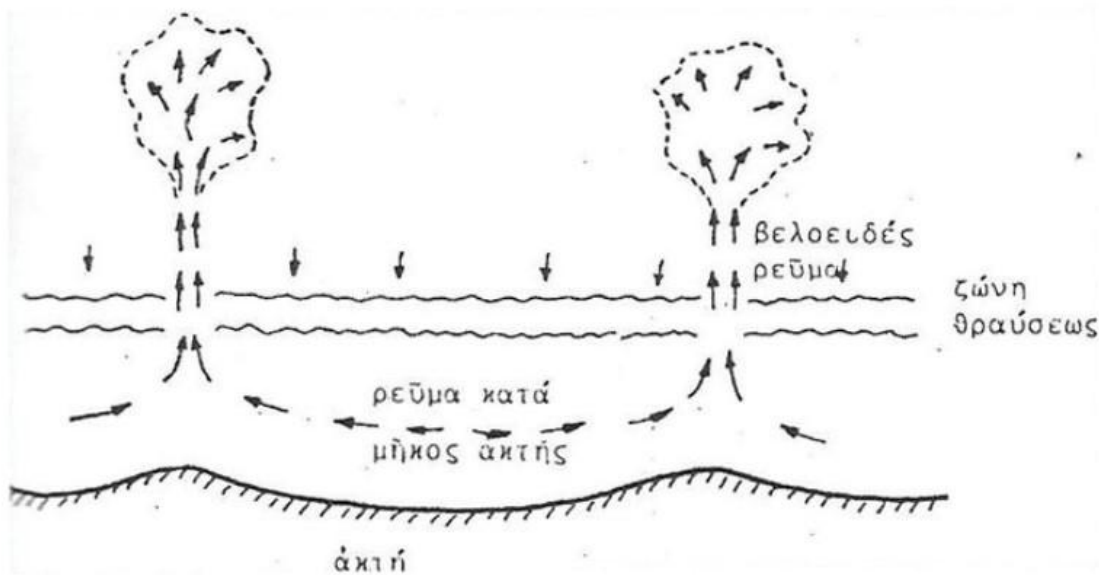
- Ρεύματα πυκνότητας, λόγω στρωμάτωσης αλατότητας ή θερμοκρασίας
- Κυματογενή ρεύματα, λόγω της θραύσης των κυματισμών
- Ρεύματα λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης

Τα ωκεάνια και τα παλιρροϊκά ρεύματα κυριαρχούν σε μεγάλες κλίμακες, τα ανεμογενή ρεύματα και τα ρεύματα λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης εμφανίζονται τοπικά, τα κυματογενή ρεύματα αφορούν κυρίως τα ρηχά νερά στη ζώνη θραύσης και τα ρεύματα πυκνότητας συνήθως σε περιοχές εκβολής ποταμού. Η ένταση των ανεμογενών ρευμάτων στην επιφάνεια ανέρχεται σε 2-3% περίπου της ταχύτητας του ανέμου επάνω από το οριακό στρώμα, ενώ τα αντίστοιχα κυματογενή ρεύματα είναι κάπως ασθενέστερα. Η φορά των καθαρά ανεμογενών ρευμάτων διαφέρει από την φορά του ανέμου και μεταβάλλεται σημαντικά με το βάθος, αλλά τείνει να πλησιάζει προς τη φορά του ανέμου όσο τα νερά γίνονται πιο ρηχά. Αντίθετα, η φορά των κυματογενών ρευμάτων συμπίπτει με την φορά μετάδοσης των κυματισμών και του πρωτογενούς αιτίου του ανέμου (Μέμος, 2008).

Τα κυματογενή ρεύματα μεγιστοποιούνται στη ζώνη θραύσης. Στα ρηχά και τα ενδιάμεσα νερά ο κυματισμός αρχίζει να αντιλαμβάνεται τον πυθμένα και μια σειρά από φαινόμενα οδηγούν στην παραμόρφωση της διατομής του. Ταυτόχρονα οι τροχιές των υγρών σωματιδίων δεν είναι κλειστές με αποτέλεσμα τη μεταφορά μάζας και τη δημιουργία οριζόντιου ρεύματος. Τα παράκτια κυματογενή ρεύματα χωρίζονται στα ρεύματα κατά μήκος της ακτής (longshore), εγκάρσια και βελοειδή ρεύματα (rip currents).

Τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής οφείλονται κυρίως στη θραύση υπό κλίση, τη διατμητική τάση ακτινοβολίας των κυμάτων και την τριβή στον πυθμένα. Η ανάπτυξη τέτοιων ρευμάτων ευνοείται σημαντικά στην περίπτωση μιας ευθύγραμμης ακτής. Η φορά του ρεύματος εξαρτάται από τη μορφή της ακτογραμμής και τη διεύθυνση πρόσπτωσης των κυματισμών. Τυπικές τιμές ταχύτητας παράκτιων ρευμάτων είναι από 0.3m/s έως και 1m/s ενώ το ταχύτερο που έχει παρατηρηθεί είναι της τάξεως των 2m/s. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, η συμβολή δύο ρευμάτων κατά μήκος της ακτής αντίθετης φοράς εκτρέπει τη ροή προς τα βαθιά με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου ρεύματος, του βελοειδούς. Το ρεύμα αυτό διασχίζει τη ζώνη θραύσης και εκφυλίζεται στη ζώνη πριν από τη θραύση με αποτέλεσμα να

μεταφέρει ίζημα από τα ρηγά προς τα ανοιχτά. Το βελοειδές ρεύμα είναι στενό και ισχυρό ρεύμα και ρέει σχεδόν κάθετα στην ακτογραμμή, ιδιαίτερα όταν τα δύο παράλληλα ρεύματα που συμβάλλουν έχουν ίδια ένταση. Η ταχύτητα του βελοειδούς ρεύματος έχει παρατηρηθεί μέχρι τα 2m/s σε μετρήσεις στην Ιαπωνία.

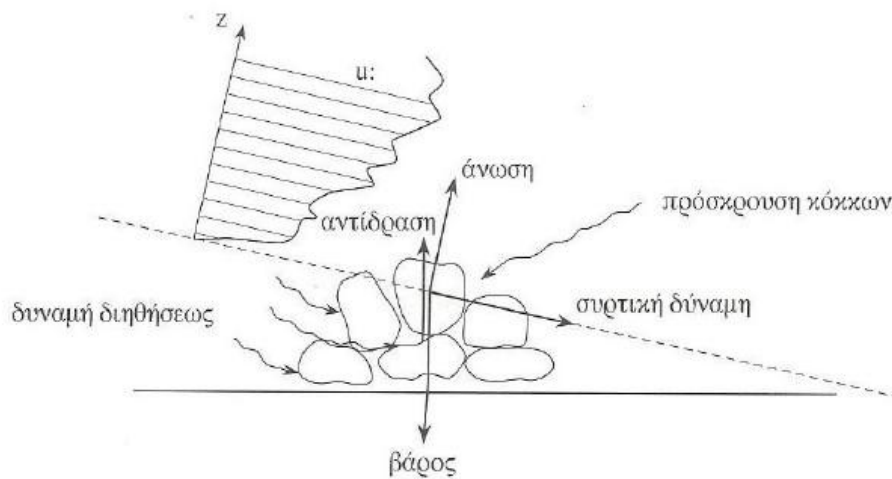


Σχήμα 4: Παράκτια ρεύματα κατά μήκος της ακτής (Μουτζούρης, 2005)

## 2.5 Έναρξη κίνησης ιζημάτων

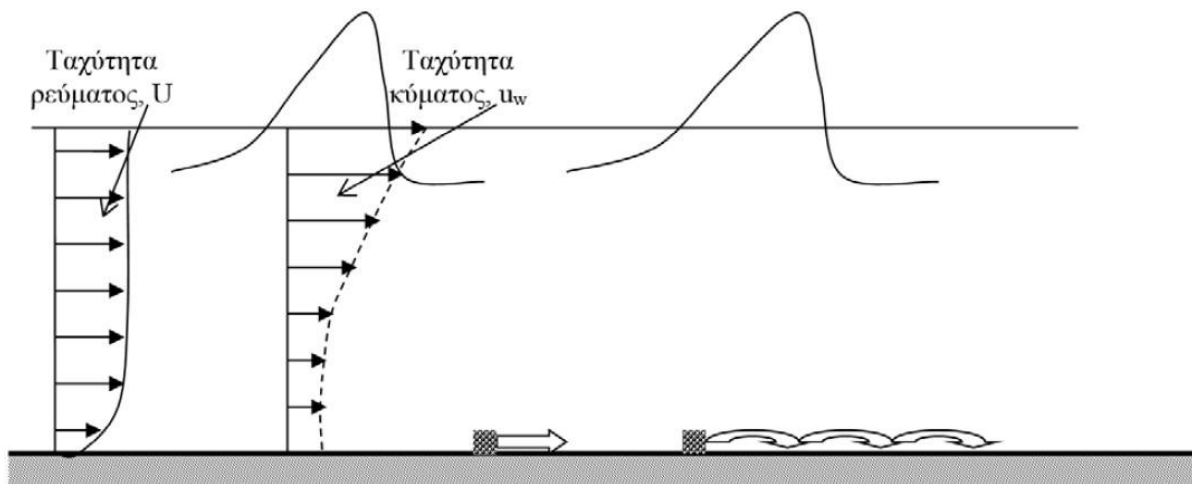
Η υδροδυναμική κατάσταση κοντά στον πυθμένα και η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στον πυθμένα από τις κινήσεις των υγρών σωματιδίων αποτελεί την αιτία της έναρξης κίνησης ιζημάτων. Οι διάφορες συνιστώσες που δρουν πάνω σε έναν κόκκο της επιφάνειας του πυθμένα, η αντίδραση στήριξης σε άλλους κόκκους, οι υδροδυναμικές υποπίεσεις λόγω του φαινομένου της διήθησης και οι δυνάμεις πρόσκρουσης άλλων κόκκων που απεικονίζονται στο Σχήμα 5 δύνανται να οδηγήσουν στην αποκόλληση των επιφανειακών κόκκων. Η κίνηση συνεχίζεται μέχρι να εκλείψουν τα γενεσιουργά αίτια ή να συναντηθούν παράκτια εμπόδια ή και τα δύο. Στη φάση ηρεμίας, τα ιζήματα ισορροπούν σε ορισμένες θέσεις. Η κατανομή των

ιζημάτων στην παράκτια ζώνη και η βυθομετρία της είναι χαρακτηριστικά του βραχυπρόθεσμου και μακροπρόθεσμου κλίματος κυμάτων και ρευμάτων στην περιοχή. Το κλίμα αντιπροσωπεύει μια ολόκληρη σειρά χαρακτηριστικών κυμάτων στα ανοιχτά. Τα κύματα με μεγαλύτερο μήκος κύματος επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα ιζήματα. Σε μια κλίμακα χρόνου μηνών ή ετών, τα ιζήματα και η βυθομετρία είναι σε ισορροπία με τα ρεύματα (Μουτζούρης, 2005).

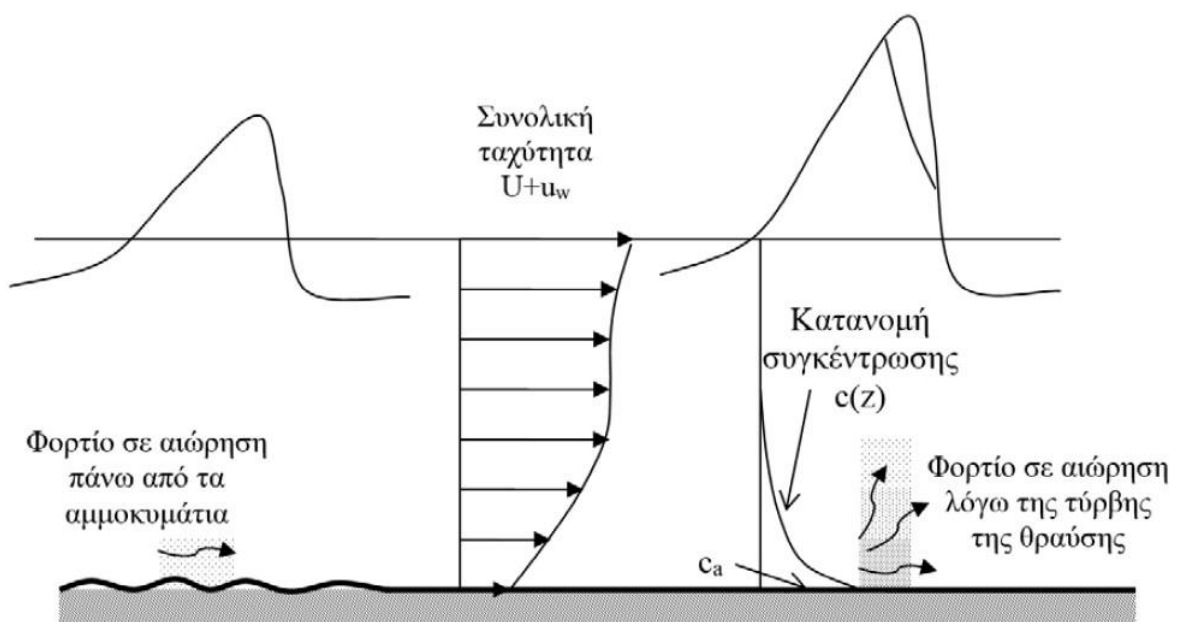


Σχήμα 5: Έναρξη κίνησης ιζήματος (Κουτίτας, 1998)

Οι κυματισμοί είναι ο κύριος παράγοντας αποσταθεροποίησης των κόκκων και σε συνδυασμό με τα θαλάσσια ρεύματα πραγματοποιείται η μεταφορά τους σε μεγάλες αποστάσεις. Η τυρβώδης ροή του ρεύματος και των θραυόμενων και μη κυματισμών δημιουργεί κατάλληλες δυναμικές συνθήκες για την κατακόρυφη διάχυση των φερτών σε αιώρηση (φορτίο σε αιώρηση), σε συνεργασία με τις περιοδικές τροχιές των κυματισμών που συμβάλλουν στην κατακόρυφη διάχυση. Επίσης η κίνηση των κόκκων μπορεί να πραγματοποιηθεί σε επαφή με τον πυθμένα (φορτίο πυθμένα) όπου γίνεται με κύλιση σε αυτόν ή με διαδοχικά άλματα και περιοδική επαφή με τον πυθμένα. Για την εξακρίβωση του είδους στερεομεταφοράς που θα συμβεί, αν είναι δηλαδή σε σύρση (βλ. Σχήμα 6) ή σε αιώρηση (βλ. Σχήμα 7), σημαντική παράμετρος αποτελεί ο λόγος της ταχύτητας καθίζησης προς την ταχύτητα τριβής  $W_f/u^*$  με  $u^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ , όπου  $\tau_0$  η διατρητική τάση στον πυθμένα και  $\rho$  η πυκνότητα του νερού.



Σχήμα 6: Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς, 2004)



Σχήμα 7: Φορτίο σε αιώρηση (Καραμπάς, 2004)

Η έναρξη κίνησης ενός κόκκου εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη διατμητική τάση στον κόκκο και περιγράφεται για το κύμα  $\tau_w$  και για το ρεύμα  $\tau_c$  από τις εξισώσεις (2.1) και (2.2) :

$$\tau_w = \frac{1}{2} f_w \rho u_{max}^2 \quad (2.1)$$

$$\tau_c = \rho k^2 v_y^2 \quad (2.2)$$

Όπου  $f_w$  ο συντελεστής τραχύτητας στον πυθμένα,  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $k = 0.4$  έχει βρεθεί από πειραματικές μετρήσεις η σταθερά του Von Karman,  $u_{max}$  η μέγιστη τιμή της οριζόντιας ταχύτητας στον πυθμένα και  $v_y$  η τιμή της ταχύτητας σε ύψος  $y$  πάνω από τον πυθμένα.

Η εκτίμηση της έναρξης είναι δυνατόν να γίνει σε συνάρτηση με την ταχύτητα ρεύματος απευθείας, παρακάμπτοντας έτσι τον υπολογισμό της διατμητικής τάσης. Οι Migniot και Bonafille συνέδεσαν την ταχύτητα τριβής  $u^*$  με τη μέγιστη οριζόντια τροχιακή ταχύτητα στον πυθμένα λόγω κύματος  $u_{max}$ , τη διάμετρο του κόκκου  $D$  και τον αριθμό Reynolds με τις εξισώσεις (2.3) και (2.4) :

$$u_*^4 = \frac{8\nu u_{max}^2}{\pi T} \quad (2.3)$$

$$u_* = \frac{\nu Re_*}{D} \quad (2.4)$$

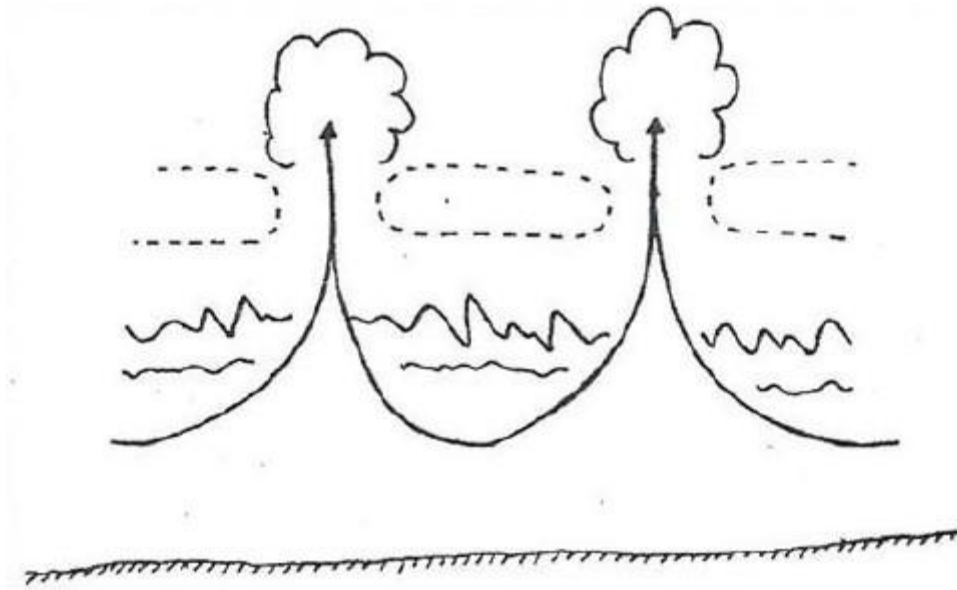
## 2.6 Παράκτια στερεομεταφορά

Η μεταφορά των ιζημάτων ονομάζεται στερεομεταφορά και όπως έχει αναφερθεί εξαρτάται από τη θαλάσσια διαταραχή που την προκαλεί. Τα παράκτια ρεύματα μπορούν να μεταφέρουν σχετικά λεπτόκοκκα ιζήματα. Χονδρόκοκκα ιζήματα μεταφέρονται μόνο από κυματική κίνηση. Κύματα υπό γωνία (oblique waves) ως προς την ακτογραμμή μπορούν να μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες ιζημάτων στην παράκτια ζώνη. Έχει διαπιστωθεί, ότι υπάρχει ένας βέλτιστος συνδυασμός των χαρακτηριστικών ενός κύματος, που μεγιστοποιεί την προκαλούμενη μεταφορά ιζήματος. Επίσης, υπάρχει μια τιμή της γωνίας προσπτώσεως των κυμάτων ( $\sim 45^\circ$ ), με την οποία πάλι μεγιστοποιείται η στερεομεταφορά. (Μουτζούρης, 2005)

Αξίζει να τονισθεί ότι απουσία ρευμάτων παλίρροιας, όπως συμβαίνει στη χώρα μας, οι μηχανισμοί μεταφοράς ιζημάτων 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)

Η κίνηση των ιζημάτων στην παράκτια ζώνη αναλύεται σε δύο κατευθύνσεις: παράλληλα προς την ακτογραμμή (στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής ή παράλληλη μεταφορά) και κάθετα προς την ακτογραμμή (στερεομεταφορά κάθετα προς την ακτή ή κάθετη μεταφορά) όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8. Ο υπολογισμός της διαμήκουσ στερεομεταφορά χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του ισοζυγίου των μεταφερόμενων ιζημάτων ύστερα από σειρά κυματικών γεγονότων σε μακροχρόνια βάση (συνήθως διάρκειας ενός έτους). Η εγκάρσια στερεομεταφορά αξιοποιείται για την έρευνα μεταβολής της ακτογραμμής και του πυθμένα της θάλασσας σε βραχυχρόνια βάση (συνήθως ύστερα από ένα έντονο κυματικό επεισόδιο). Η θέση στην οποία οι δυνάμεις σε ένα κόκκο είναι σε ισορροπία και κατά συνέπεια δεν εμφανίζεται κίνηση του ονομάζεται ουδέτερη γραμμή. Η τοποθεσία της ουδέτερης γραμμής μεταβάλλεται ανάλογα με τη βαθυμετρία της περιοχής, την κοκκομετρία και την ποιότητα των ιζημάτων, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων. Κοινό χαρακτηριστικό για κάθε περιοχή είναι ότι βρίσκεται πάντα προς τα ανοιχτά σε σχέση με τη ζώνη θραύσης. Προς τα ανοιχτά της γραμμής, τα ιζήματα κινούνται προς τα βαθιά ενώ προς τα ρηχά τα ιζήματα κινούνται με κατεύθυνση προς την ακτή.





**Σχήμα 8: Μεταφορά ιζημάτων κάθετα και παράλληλα στην ακτογραμμή (Μουτζούρης, 2005)**

### 2.6.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής

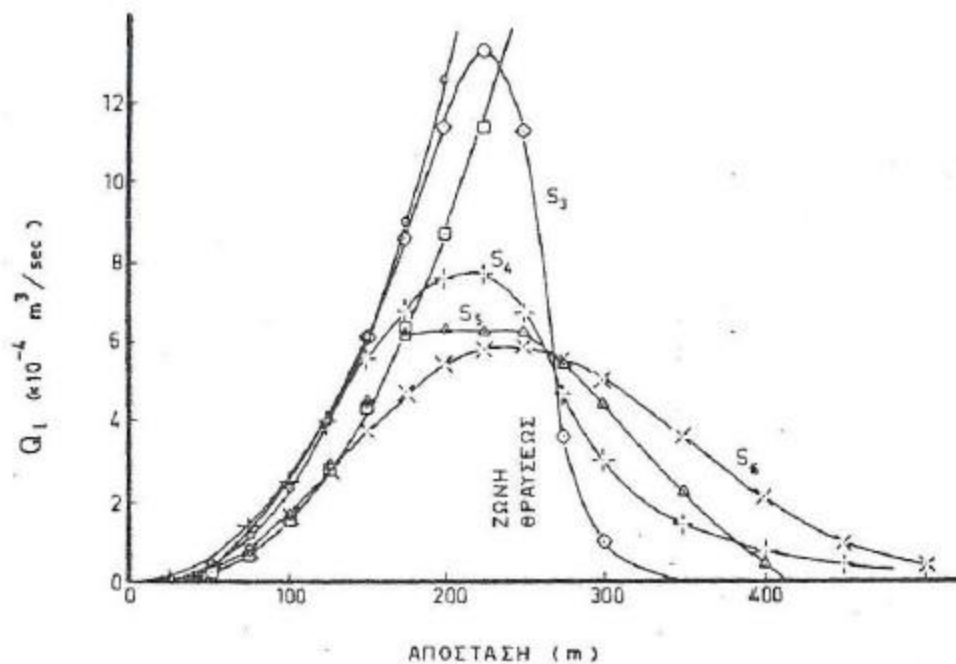
Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για τη διαμόρφωση της μορφολογίας μιας ακτής καθώς έχει καθοριστικό ρόλο στη μεταβολή του πυθμένα. Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής οφείλεται κυρίως στη θραύση των κυμάτων υπό γωνία με την ακτογραμμή και για αυτό έχει μικρή παροχή στη ζώνη πριν από τη θραύση (before breaker zone). Τα ιζήματα διαταράσσονται και τίθενται σε αιώρηση από τα θραυόμενα κύματα σε πρώτο στάδιο. Η κίνησή τους κατά μήκος της ακτής γίνεται από τη συνιστώσα της κίνησης των κυμάτων και τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής που δημιουργούνται από τα θραυόμενα κύματα. Η διεύθυνση της παροχής της στερεομεταφοράς εξαρτάται πλήρως από την κατεύθυνση προώθησης των επικρατούντων κυματισμών. Μεγιστοποιείται για γωνίες πρόσπτωσης των  $45^\circ$  όταν γίνεται μέγιστη και η ταχύτητα του δημιουργούμενου ρεύματος κατά μήκος της ακτής. Η παράλληλη με την ακτή στερεομεταφορά μπορεί χαρακτηρίζεται προς τα δεξιά ( $Q_r$ ) ή προς τα αριστερά ( $Q_l$ ) αν η φορά κινήσεως της ως προς ένα παρατηρητή στην ακτογραμμή με το μέτωπο στραμμένο προς τα βαθειά είναι προς τα δεξιά ή τα αριστερά αντίστοιχα. Η παροχή αθροιστικής

στερεομεταφορά  $Q_{lg}$  (ή συνολική παροχή  $Q_g$ ) είναι το άθροισμα των δύο αυτών συνιστωσών και η καθαρή παροχή στερεομεταφοράς ( $Q_n$ ) η κατ' απόλυτη τιμή διαφορά τους.

Η παροχή στερεομεταφοράς κατά μήκος της ακτής αποτελεί βασική παράμετρο σχεδιασμού για τα περισσότερα παράκτια έργα. Οι μέθοδοι υπολογισμού της είναι (Μουτζούρης, 2005):

- Μετρήσεις στην υπό μελέτη ακτή ή στο εργαστήριο
- Προσαρμογή μιας γνωστής τιμής στερεοπαροχής από μια γειτονική ακτή, αφού ληφθούν υπόψιν οι τοπικές ιδιομορφίες
- Υπολογισμός της παροχής από δεδομένα χρονικών μεταβολών της παράκτιας ζώνης
- Εφαρμογή εμπειρικών ή ημιεμπειρικών καθοριστικών μοντέλων/ μεθόδων.

Βασικό χαρακτηριστικό των μοντέλων υπολογισμού στερεομεταφοράς είναι πως γίνεται η υπόθεση για άπειρη ποσότητα ιζήματος κατά μήκος της ακτής και ακτή άπειρου μήκους. Συνεπώς η παροχή που υπολογίζεται αποτελεί δυνητική στερεοπαροχή. Επιπλέον θεωρούν την υπολογιζόμενη παροχή σαν μέση τιμή σε όλο το εύρος της ζώνης θραύσης. Στην πραγματικότητα όμως το μεγαλύτερο μέρος της μεταφοράς ιζήματος συμβαίνει στη γραμμή θραύσης και αμέσως κατάντη της. Η κατανομή της στερεοπαροχής στις ζώνες θραύσης και μετά τη θραύση φαίνεται στο Σχήμα 9:



**Σχήμα 9: Θεωρητική κατανομή παροχής κατά μήκος της ακτής  $Q_1$  στη ζώνη μετά τη θραύση (Bijker, 1980)**

Τα μοντέλα υπολογισμού της στερεοπαροχής διαχωρίζονται σε μοντέλα ροής ενέργειας των κυμάτων και σε μοντέλα ροής ορμής ή ισορροπίας δυνάμεων. Τα μοντέλα ροής ενέργειας συσχετίζουν την παροχή με τη ροή της ορμής. Τα μοντέλα ροής ορμής υπολογίζουν τη διατμητική τάση στον πυθμένα και στη συνέχεια το φορτίο πυθμένα. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος υπολογισμού της κατά μήκος στερεομεταφοράς είναι η μέθοδος CERC (Corps of Engineers Research Center). Η μέθοδος CERC οφείλεται σε κυματογενή ρεύματα κατά μήκος της ακτής και υπολογίζει το φορτίο πυθμένα και το φορτίο αιωρήσεως συνολικά (ολικό φορτίο). Η διακίνηση του φορτίου λαμβάνει χώρα στη ζώνη θραύσης (breaker zone) και στη ζώνη αποσβέσεως (surf zone). Ο ρυθμός της κατά μήκος της ακτής στερεομεταφοράς προκύπτει από την εξίσωση (2.5):

$$Q_l = \frac{k}{(\rho_s - \rho)(1 - n)} P_l \quad (2.5)$$

Όπου  $Q_l$  η παροχή κατά μήκος της ακτής [ $m^3/\acute{\epsilon}τος$ ],  $k$  εμπειρικό αδιάστατος συντελεστής,  $\rho_s$  η μέση πυκνότητα ιζήματος [ $=2650 \text{ kg}/m^3$ ],  $\rho$  η μέση πυκνότητα του θαλασσινού νερού [ $=1025 \text{ kg}/m^3$ ],  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας [ $9.81 \text{ m}/s^2$ ],  $n$  το πορώδες του ιζήματος [ $\approx 0.40$ ] και  $P_l$  η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής [ $J/m/s$ ] που δίνεται από την εξίσωση (2.6):

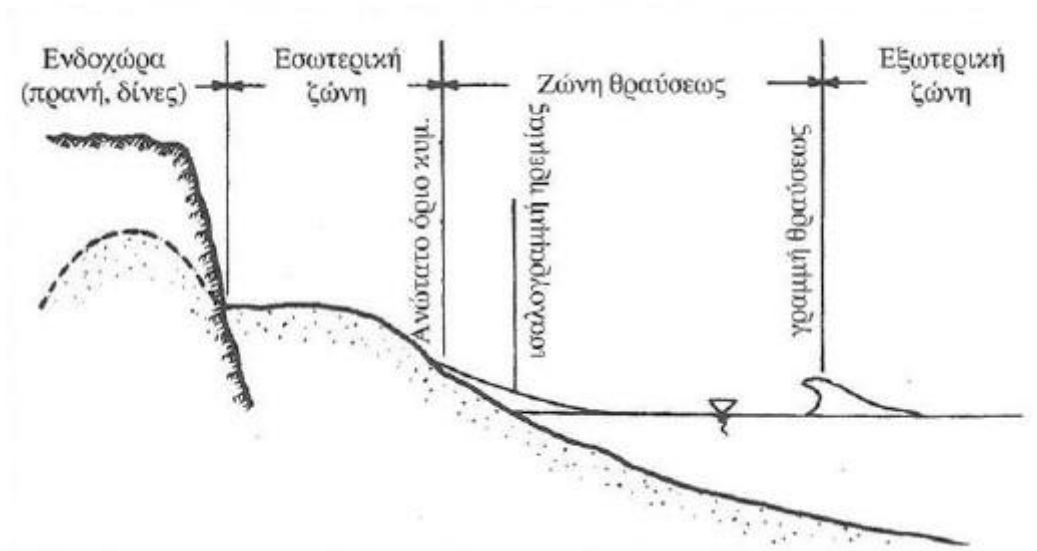
$$P_l = \frac{1}{16} \rho g H_b^2 C_{gb} \sin 2a_b \quad (2.6)$$

Όπου  $H_b$  το ύψος κύματος στη θραύση [ $m$ ],  $C_{gb}$  η ταχύτητα ομάδας των κυματισμών στη θραύση [ $=(g d_b)^{0.5}$ ] και  $a_b$  η γωνία θραύσης.

### 2.6.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή

Η εγκάρσια στερεομεταφορά οφείλεται κυρίως στους κυματισμούς, τα κυματογενή ρεύματα, του ανέμου και τις παλίρροιες. Τα ιζήματα τίθενται σε κίνηση από την κάθετη συνιστώσα της τροχιακής κινήσεως των υγρών σωματιδίων και στη συνέχεια μεταφέρονται από το κυματογενές ρεύμα. Με τη διαδικασία αυτή δημιουργείται μια συνεχής κίνηση φερτών είτε ως φορτίο πυθμένα είτε ως αιωρούμενο φορτίο. Εγκάρσια στην ακτή γίνεται διαχωρισμός ζωνών όπως φαίνεται στο Σχήμα 10. Διακρίνεται το όριο της επίδρασης των κυματισμών

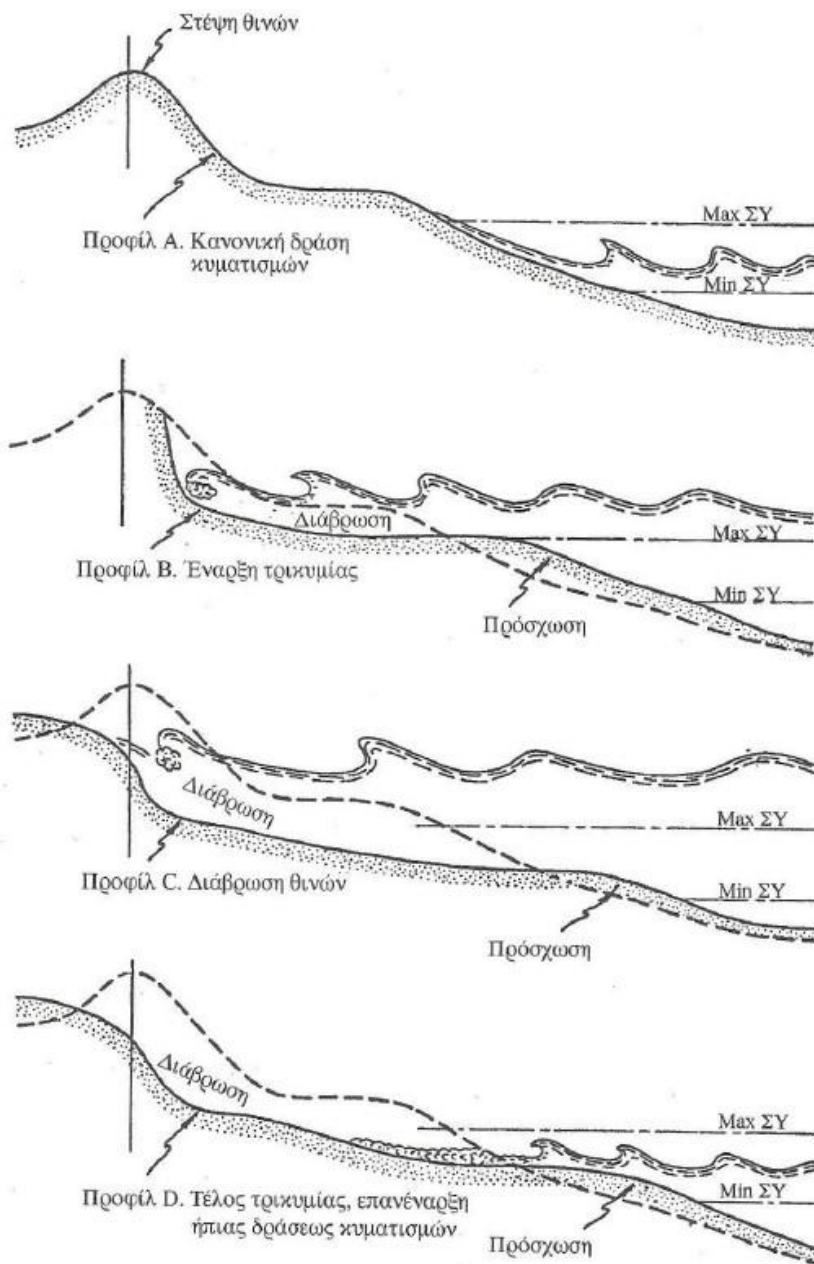
προς την ανοιχτή θάλασσα και ορίζεται μια εξωτερική ζώνη (offshore) μεταξύ αυτού του ορίου και της γραμμής θραύσης. Η ζώνη θραύσης (inshore surf zone) βρίσκεται μεταξύ της γραμμής θραύσης και του ανώτατου ορίου αναρρίχησης των κυματισμών. Το τμήμα μεταξύ της ράχης της ακτής και ανώτατου ορίου αναρρίχησης κυματισμών είναι η εσωτερική ζώνη. Πίσω από τις ζώνες αυτές είναι η ζώνη της ενδοχώρας που αποτελείται είτε από ζώνη θινών είτε από γαιώδη πρανή (Κουτίτας, 1998).



Σχήμα 10: Ζώνες κατά την εγκάρσια στερεομεταφορά (Κουτίτας, 1998)

Στη ζώνη θραύσης και στις ακόλουθες ζώνες η εγκάρσια στερεομεταφορά είναι σημαντική. Η κατεύθυνση της στερεομεταφοράς εξαρτάται από την καμπυλότητα του κύματος ( $H/L$ ). Κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας, που παρατηρούνται σε περιπτώσεις τρικυμίας μεταφέρουν ιζήματα από τον έξαλλο προς τον ύφαλο αναβαθμό όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 11. Η ακτή διαβρώνεται κυρίως λόγω της ενέργειας θραύσεων εκτίναξης. Στο προφίλ Β του Σχήματος 11 κυματισμοί μεγάλης καμπυλότητας προκαλούν διάβρωση της ακτής ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις η διάβρωση φτάνει έως τις θίνες όπως φαίνεται στο προφίλ C. Τα ιζήματα μετακινούνται προς τα ανοιχτά και εναποτίθενται στον πυθμένα και σχηματίζονται υποθαλάσσιες συσσωρεύσεις ιζημάτων παράλληλα προς την ακτογραμμή. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να φτάσει τις τάξεις μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Ο ύφαλος αναβαθμός που σχηματίζεται από τις συσσωρεύσεις αυτές διακόπτεται από τη ροή βελοειδών ρευμάτων. Η

ύπαρξη του αναβαθμού λειτουργεί ως προστατευτικός μηχανισμός καθώς μετατοπίζει τη θραύση των κυματισμών προς τα ανοιχτά και επιτρέπει τη διάδοση κυμάτων με μικρότερη καμπυλότητα. Αντίθετα, κυματισμοί μικρής καμπυλότητας έχουν ήπια δράση και μεταφέρουν ίζημα προς την ακτή. Όταν ένα κύμα πλησιάζει τη ζώνη θραύσης, η ταχύτητα μειώνεται λόγω της επίδρασης του πυθμένα. Το κύμα τείνει επίσης να προσκρούσει κάθετα στην ακτή λόγω του φαινομένου της διάθλασης. Στη ζώνη θραύσης η δομή του κύματος μεταβάλλεται. Το ίζημα τίθεται σε αιώρηση, οπότε η αναρρίχηση των κυμάτων τα μεταφέρει στην ακτή όπου σχηματίζεται έξαλλος αναβαθμός όπως απεικονίζεται στο προφίλ D του Σχήματος 11.



**Σχήμα 11: Εγκάρσια στερεομεταφορά από τον έξαλλο στον ύφαλο αναβαθμό (Κουτίτας, 1998)**

### 3 ΛΙΜΕΝΕΣ ΣΚΑΦΩΝ ΑΝΑΨΥΧΗΣ

#### 3.1 Γενικά στοιχεία

Λιμένας σκαφών αναψυχής ή μαρίνα ορίζεται ως μια σύγχρονη παραθαλάσσια εγκατάσταση που χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση σκαφών αναψυχής. Είναι ο χώρος στον οποίο τα σκάφη ελλιμενίζονται, καθελκούνται, επισκευάζονται και ανεφοδιάζονται. Η χρήση τους γίνεται είτε για βραχυχρόνια χειρσαία εναπόθεση είτε για μακροχρόνια είτε για αγκυροβόλημα. Σε αντίθεση με ένα λιμάνι, η μαρίνα δεν φιλοξενεί μεγάλα επιβατηγά ή εμπορικά πλοία.

Ο τουρισμός και η ναυτιλία αποτελούσαν ανέκαθεν δύο βασικούς παράγοντες που συντελούν στην ανάπτυξη της οικονομίας της Ελλάδας. Από τη δεκαετία του '50 και έπειτα δημιουργήθηκαν εναλλακτικές μορφές τουρισμού. Ανάμεσα σε αυτές και ο «θαλάσσιος τουρισμός». Στην Ελλάδα λόγω της γεωγραφικής θέσης και μορφολογίας οι τουριστικοί λιμένες αναπτύχθηκαν ήδη από τη δεκαετία του '60. Έκτοτε έχουν χωροθετηθεί δεκάδες μαρίνες. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται η δυνατότητα ελλιμενισμού και η περιοχή του εκάστοτε εν λειτουργία τουριστικού λιμένα για τον ελληνικό χώρο. Σύμφωνα με τον πίνακα η χωρητικότητα των μαρίνων κυμαίνεται από μερικές δεκάδες όπως η μαρίνα Βουνάκι στην Αιτωλοακαρνανία έως και περισσότερα από χίλια σκάφη όπως στην περίπτωση της μαρίνας του Αλίμου και της Γουβιάς στην Κέρκυρα.

**Πίνακας 3.1: Μαρίνες και τουριστικοί λιμένες εν λειτουργία στον ελλαδικό χώρο – χωρητικότητα (Διαμαντίδης, 2016)**

Μαρίνα	Περιοχή	Χωρητικότητα (σκάφη)
Athens Marine	Νέο Φάληρο, Πειραιάς	130
Cleopatra	Άκτιο, Αιτωλοακαρνανία	88
Olympic Marine	Ελληνικό, Αττική	685
Αγία Γαλήνη	Ρέθυμνο, Κρήτη	112

<b>Άγιος Κοσμάς</b>	Αττική	337
<b>Άγιος Νικόλαος</b>	Λασιίθι, Κρήτη	255
<b>Άλιμος</b>	Άλιμος, Αττική	1039
<b>Αρέτσου</b>	Καλαμαριά, Θεσσαλονίκη	242
<b>Βουλιαγμένης</b>	Βουλιαγμένη, Αττική	103
<b>Βουνάκι</b>	Βουνάκι, Αιτωλοακαρνανία	70
<b>Γλυφάδα</b>	Γλυφάδα, Αττική	852
<b>Γουβιά</b>	Κέρκυρα, Κέρκυρα	1235
<b>Γουβών</b>	Ηράκλειο, Κρήτη	72
<b>Ζέας</b>	Πειραιάς, Αττική	670
<b>Ιτέα</b>	Ιτέα, Φωκίδα	146
<b>Καλαμάτα</b>	Καλαμάτα, Μεσσηνία	250
<b>Κως</b>	Κως, Δωδεκάνησα	250
<b>Λευκάδας</b>	Λευκάδα	609
<b>Μάλια</b>	Μάλια, Ηράκλειο	300
<b>Μανδράκι</b>	Μανράκι, Ρόδος	600
<b>Μεσολόγγι</b>	Μεσολόγγι	180
<b>Μυτιλήνη</b>	Μυτιλήνη, Λέσβος	222
<b>Ξυλόκαστρο</b>	Άγιος Ιωάννης, Κορινθία	220
<b>Παλαιοχώρα</b>	Παλαιοχώρα, Χανιά	140
<b>Πόρτο Γούβες</b>	Ηράκλειο	72
<b>Πόρτο Καρράς</b>	Χαλκιδική	315
<b>Πρέβεζα</b>	Πρέβεζα	297
<b>Πυθαγόρειο</b>	Πυθαγόρειο, Σάμος	225
<b>Σάνη</b>	Κασσάνδρα, Χαλκιδική	215
<b>Φλοίσβος</b>	Αττική	303

Οι μαρίνες πέραν του ελλιμενισμού των σκαφών συμπεριλαμβάνουν και την παροχή άλλων υπηρεσιών καθώς σχετίζονται άμεσα με τον τουρισμό. Για τον λόγο αυτό και σύμφωνα με

την Υπουργική Απόφαση 11214/2012 (ΦΕΚ 2339/Β/21.08.2012) είναι απαραίτητη η ύπαρξη εγκαταστάσεων για τη διοίκηση του λιμένα συμπεριλαμβανομένων και εγκαταστάσεων άλλων συναφών αρχών, η θέση πρόσδεσης σκάφους λιμενικού σώματος, η εγκατάσταση σταθμού πρώτων βοηθειών, η ύπαρξη δικτύου παροχών (νερού, ηλεκτρικού ρεύματος, επικοινωνιών κλπ.), εγκαταστάσεις συλλογής, προσωρινής αποθήκευσης και ασφαλούς απομάκρυνσης των βιολογικών και πετρελαιοειδών-ελαιωδών καταλοίπων, χώροι στάθμευσης, εγκαταστάσεις εξυπηρέτησεων υγιεινής και ενδιαίτησης, συστήματα ασφαλείας της ζώνης του τουριστικού λιμένα (συστήματα πυρασφάλειας της ζώνης του λιμένα, συστήματα επίβλεψης των εγκαταστάσεων κλπ.), εγκαταστάσεις αποθηκών και καταστήματα διάθεσης ειδών πρώτης ανάγκης.

Οι γενικές αρχές σχεδιασμού και κατασκευής των μαρίνων δεν διαφέρουν από εκείνες των άλλων λιμανιών. Η εσωτερική διάταξη των θέσεων πλευρίσης είναι διαφορετική ώστε να επιτρέπει πληρέστερη και καλύτερη εξυπηρέτηση και διευκόλυνση των σκαφών και των επιβατών. Επιπλέον οι μαρίνες παρά το μικρό τους σχετικά μέγεθος καλούνται να εξυπηρετήσουν πλήθος σκαφών και συνεπώς η εσωτερική διάταξη πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αξιοποιείται όλη η υδάτινη λεκάνη του λιμανιού.

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 βλ. Πίνακα 3.3) που έχουν μεγάλη δραστηριότητα στον τομέα αυτό (Καμαρινάκης, 1997).

Βασικές παράμετροι του λειτουργικού σχεδιασμού των μαρίνων είναι το πλάτος ανοίγματος της εισόδου, το βάθος της λιμενολεκάνης και η επιφάνεια της η οποία επηρεάζει τη χωρητικότητα της. Για τον καθορισμό των βαθών και του πλάτους εισόδου της μαρίνας άμεση επιρροή ασκεί το πλοίο σχεδιασμού. Υπόψιν λαμβάνεται ακόμη η διακύμανση της παλίρροιας, η κατώτατη ρηχία και η φύση του πυθμένα. Επίσης λαμβάνονται πάντα περιθώρια ασφαλείας σε λεκάνες μαρίνων που προσβάλλονται από αξιόλογους κυματισμούς. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2, όπου παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά ενδεικτικά για ορισμένες μαρίνες του ελληνικού χώρου, το μέγιστο βάθος κυμαίνεται από 3 m έως 9 m και το πλάτος ανοίγματος εισόδου 20 m με 80 m. Τα κατασκευαστικά στοιχεία αυτά είναι



σημαντικά για την προσαρμογή των δεδομένων του μοντέλου της παρούσας εργασίας στα ελληνικά δεδομένα.

**Πίνακας 3.2: Βασικά χαρακτηριστικά μαρίνων στην Ελλάδα (Διαμαντίδης, 2016)**

Μαρίνα	Μέγιστο βάθος [m]	Πλάτος ανοίγματος [m]	Χωρητικότητα (σκάφη)
<b>Ιόνιο πέλαγος</b>			
Cleopatra (Πρέβεζα)	8	30	88
Βουνάκι	-	45	70
Γουβιά (Κέρκυρα)	5.5	80	1235
Καλαμάτα	3	25	250
Λευκάδα	4	40	609
Μεσολόγγι	6	-	180
Πρέβεζα	-	60	297
<b>Αιγαίο Πέλαγος</b>			
Olympic Marine	-	65	685
Άλιμος	6.5	40	1039
Αρέτσου (Καλαμαριά)	-	30	242
Βουλιαγμένη	5.5	55	115
Ζέα (Πειραιάς)	9	80	670
Κως	-	40	250
Μανδράκι (Ρόδος)	-	50	600
Μυτιλήνη	6	30	222
Πόρτο Καρράς (Χαλκιδική)	5	35	315
Πυθαγόρειο	4	40	225
Σάνη (Χαλκιδική)	3	24	215
Φλοίσβος	-	70	303
<b>Κρήτη</b>			
Άγιος Νικόλαος	4.5	50	255

<b>Παλαιοχώρας</b>	4	40	140
<b>Πόρτο Γούβες (Ηράκλειο)</b>	3	18	72

Οι μαρίνες είναι παράκτια έργα που σχετίζονται άμεσα με την ανάπτυξη μιας χώρας. Η κατασκευή και η αξιοποίησή τους παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον σε παγκόσμιο επίπεδο. Αναφορικά με τις χώρες της Μεσογείου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3 μαρίνες σε διαφορετικές χώρες ώστε να συγκριθούν η ικανότητα ελλιμενισμού, το μέγιστο βάθος και το πλάτος ανοίγματος με τις αντίστοιχες μαρίνες του ελληνικού χώρου.

**Πίνακας 3.3: Μαρίνες στη Μεσόγειο θάλασσα (Πηγή: World Marine Guide)**

<b>Μαρίνα</b>	<b>Περιοχή</b>	<b>Μέγιστο βάθος [m]</b>	<b>Πλάτος ανοίγματος [m]</b>	<b>Χωρητικότητα (σκάφη)</b>
<b>Finike</b>	Τουρκία	5	90	350
<b>Kas</b>	Τουρκία	15	150	472
<b>Limassol</b>	Κύπρος	22	100	800
<b>Karpaz Gate</b>	Κύπρος	5.5	55	300
<b>Mandalina</b>	Κροατία	-	140	350
<b>Kornati</b>	Κροατία	6.5	40	450
<b>Villa Igiea Palmero</b>	Σικελία	9.5	65	380
<b>Brindisi</b>	Ιταλία	11	35	638
<b>Rimini</b>	Ιταλία	5	35	622
<b>St Elmo</b>	Σαρδηνία	4.8	60	100
<b>Manoel Island</b>	Μάλτα	9	110	245
<b>Estepona</b>	Ισπανία	4	35	447

<b>Atunara</b>	Ισπανία	3	16	323
<b>Villefranche</b>	Γαλλία	4	30	560
<b>Napolean</b>	Γαλλία	4.5	30	360
<b>Yasmine</b>	Τυνησία	6	110	700
<b>Bizerte</b>	Τυνησία	12	110	800
<b>Herzliya</b>	Ισραήλ	6	35	680
<b>Tel Aviv</b>	Ισραήλ	-	20	320
<b>Ocean Village</b>	Γιβραλτάρ	4.5	100	323

Από τον Πίνακα 3.3 φαίνεται ότι στις διάφορες χώρες της Μεσογείου το μέγιστο βάθος μαρίνων κυμαίνεται μεταξύ 3 m και 22 m και το πλάτος ανοίγματος της εισόδου από τα 15 m έως τα 150 m. Τα κατασκευαστικά στοιχεία αυτά εξαρτώνται από το σκάφος σχεδιασμού της κάθε μαρίνας, τη μορφολογία της περιοχής, το ανεμολογικό και το κυματικό κλίμα που επικρατεί.

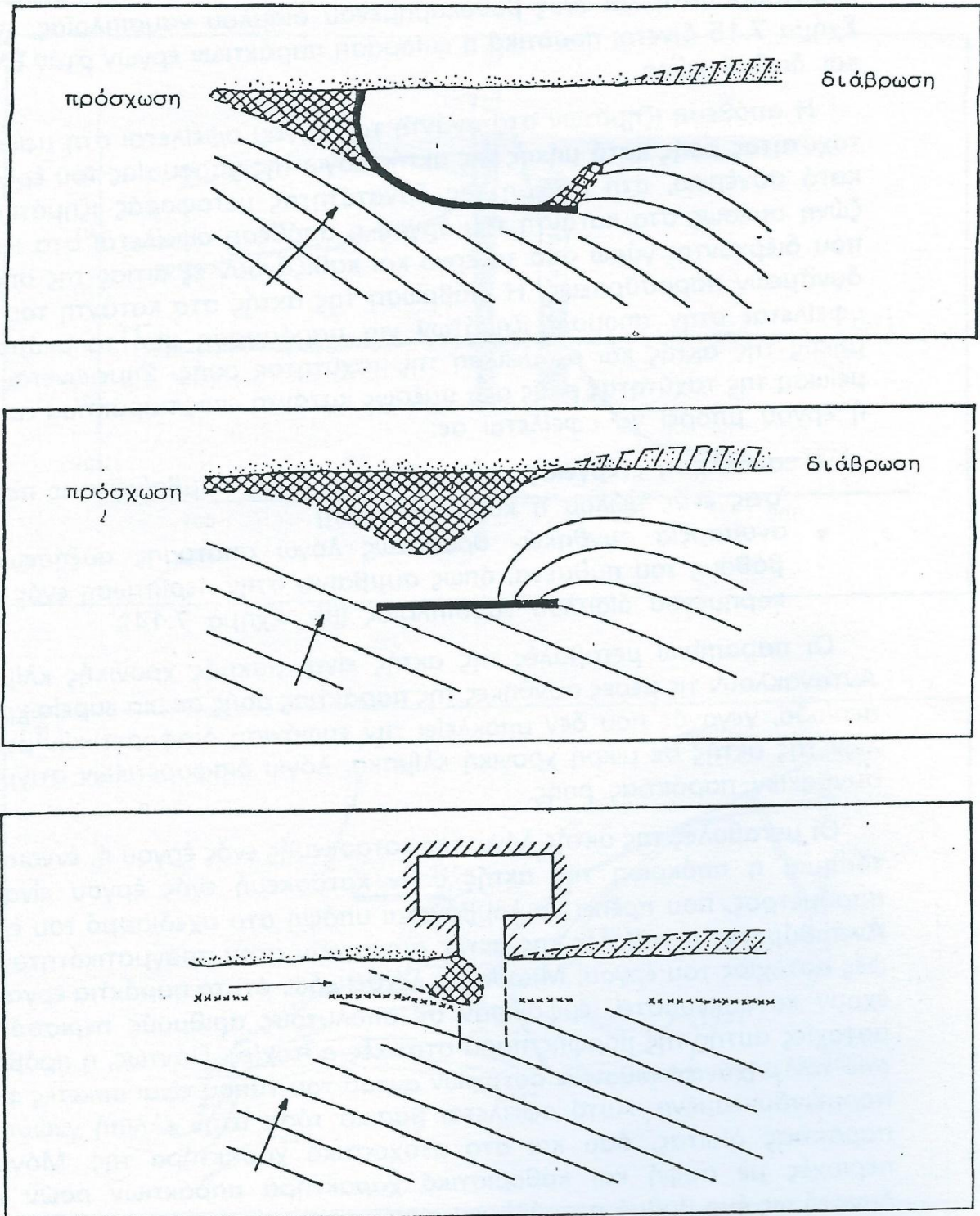
### 3.2 Αλληλεπίδραση παράκτιων έργων – ακτής

Η ακτή είναι ένα παραμορφώσιμο μέσο. Το παράκτιο πεδίο ροής σε μια ομοιόμορφα κεκλιμένη παράκτια ζώνη μεγάλου μήκους είναι απλό εφόσον δεν παρουσιάζονται εμπόδια. Το ισοζύγιο των φερτών υλών παρουσιάζει μια δυναμική ισορροπία όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο. Το πεδίο ροής όμως περιπλέκεται σε περιπτώσεις ύπαρξης παράκτιων εμποδίων. Είναι σημαντικό να εξεταστεί η δυναμική εξέλιξη και η απόκριση της παράκτιας ζώνης για κάθε είδος κατασκευής ξεχωριστά. Η κατασκευή ενός τεχνικού έργου (πρόβολου, μώλου κτλ.) διαταράσσει την προϋπάρχουσα ισορροπία καθώς αναμορφώνει τα κυματικά δεδομένα με την προκαλούμενη ανάκλαση, περίθλαση και θραύση λόγω ρηχότητας σε περιοχές που δεν συνέβαινε και παρεμβαίνει στην ζώνη θραύσης στην παράκτια στερεομεταφορά. Είναι κατανοητό ότι πρόκειται λοιπόν για μια αμφίδρομη σχέση μεταξύ παράκτιων έργων και στερεομεταφοράς.

Κατά κανόνα, η απόθεση ιζήματος εντοπίζεται στα ανάντη του έργου. Αυτό συμβαίνει διότι μειώνεται η ταχύτητα ροής κατά μήκος της ακτής λόγω της παρουσίας του έργου και κατά

συνέπεια μειώνεται η δυνατότητα μεταφοράς ιζήματος. Στη ζώνη αμέσως στα κατάντη του έργου υπάρχει απόθεση η οποία οφείλεται στα ιζήματα που διέρχονται γύρω από το έργο και καθιζάνουν εξ αιτίας της απουσίας δυνάμεων παράσυρσης. Η διάβρωση, που συνήθως επικρατεί, στα κατάντη του έργου οφείλεται στην απουσία ιζημάτων για παράσυρση από το ρεύμα κατά μήκος της ακτής και στη μείωση της ταχύτητας ροής. Αξίζει να επισημανθεί ότι η μείωση της ταχύτητας ροής στα αμέσως κατάντη ενός παράκτιου εμποδίου ή έργου μπορεί να οφείλεται είτε σε ανάκλαση της ενέργειας και περίθλαση (π.χ. ύπαρξη μώλου) είτε σε ανυπαρξία συνθηκών θραύσης λόγω απότομης αύξησης του βάθους του πυθμένα (π.χ. βυθοκορημένος διάυλος ναυσιπλοΐας). Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις είναι μακράς χρονικής κλίμακας και αποτυπώνουν τις μέσες συνθήκες της παράκτιας ροής σε μια ευρεία χρονική περίοδο. Σε μικρή χρονική κλίμακα είναι πιθανό να εμφανιστούν διαφορετικές μεταβολές από τις προαναφερθείσες.

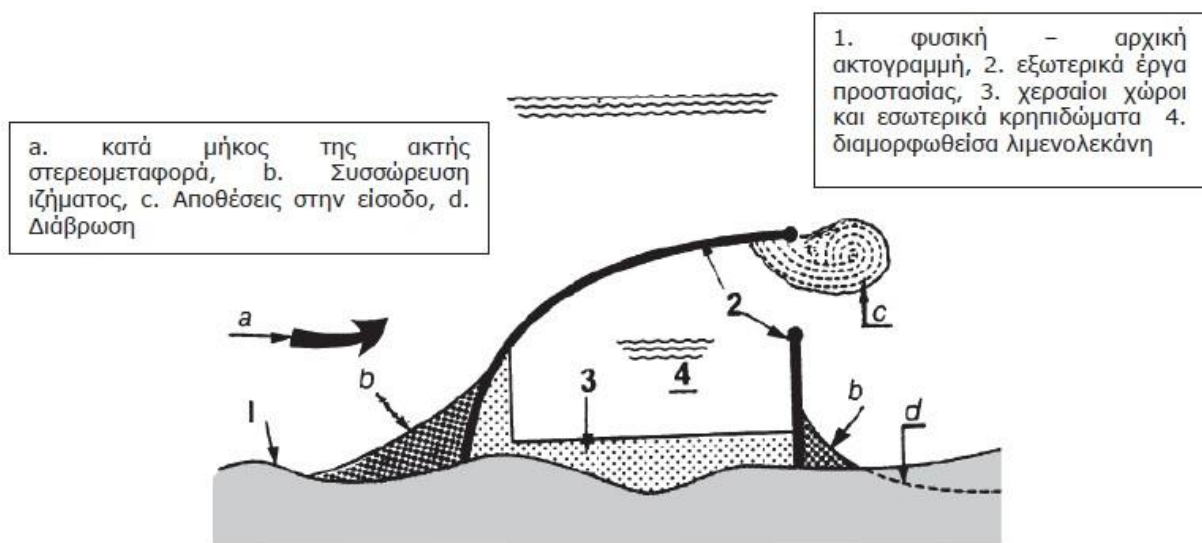
Οι διαδικασίες που περιγράφηκαν παραπάνω αφορούν όλα τα παράκτια τεχνικά έργα. Για τους παράλληλους κυματοθραύστες με την ακτή καταγράφεται αλλαγή της κατεύθυνσης και του ύψους κύματος λόγω περιθλάσεως. Αποτέλεσμα αυτών είναι η παγίδευση ποσοτήτων φερτών στο τμήμα της ζώνης θραύσης πίσω από το έργο, προκαλώντας προσάμμιση και την εμφάνιση “tombolo” που τείνει να ενώσει το έργο με την ακτή. Έργα κάθετα στην ακτογραμμή, όπως είναι οι πρόβολοι ή οι μώλοι, λειτουργούν ως παγίδες φερτών υλών λόγω στροβίλων αδρανειακής αποκόλλησης 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 θεμελίωσή τους δε γίνει σε επαρκές βάθος. Οι παραπάνω κατασκευές και τα φαινόμενα που δημιουργούν φαίνονται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Αλληλεπίδραση τεχνικών έργων – παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μουτζούρης, 2005)

Στην περίπτωση λιμένα ή μαρίνας, που είναι προσανατολισμένοι προς τους κυματισμούς, παγιδεύονται φερτές ύλες, οι οποίες εισέρχονται από το κυματικά διαταραγμένο περιβάλλον

και αποτίθενται στο αδιατάρακτο χώρο της λιμενολεκάνης. 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 διάυλο 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 της λιμενολεκάνης 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. Η απόθεση και διάβρωση της ακτογραμμής από την ύπαρξη μαρίνας φαίνεται στο Σχήμα 13.



**Σχήμα 13: Αλληλεπίδραση μαρίνας – παράκτιου περιβάλλοντος ως προς τη στερεομεταφορά (Μέμος, 2004)**

### 3.3 Προσαμμώσεις σε μαρίνες

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο εδάφιο, το πρόβλημα σε μια μαρίνα ή ένα λιμάνι, παρουσιάζεται στην επιρροή του ίδιου του έργου με τις διαδικασίες στερεομεταφοράς κάτι που μπορεί να το καταστήσει ανενεργό και ακατάλληλο προς χρήση. Επίσης ένα τεχνικό έργο τέτοιου μεγέθους αποτελεί παρέμβαση στο παράκτιο περιβάλλον και σχετίζεται με την παραμόρφωση της ακτής (διάβρωση στα κατάντη του έργου). Αναφορικά με τις μαρίνες, το ζήτημα της προσάμμωσης στο εσωτερικό τους είναι πολυπαραγοντικό. Αρχικώς, σημαντικό

ρόλο διαδραματίζει το είδος του ιζήματος. Κατά κανόνα, όσο λεπτότερο το ίζημα τόσο πιο εύκολα μεταφέρεται. Όσον αφορά το ίζημα, συνεκτικά ιζήματα δημιουργούν ισχυρότερα προβλήματα σε σχέση με τα αμμώδη, καθώς εκτοπίζουν το νερό δημιουργώντας ένα αδιαπέρατο στρώμα. Ένας πολύ σημαντικός παράγοντας είναι το κυματικό και το ανεμολογικό καθεστώς, αφού η ένταση των δημιουργούμενων ρευμάτων είναι αλληλένδετη με την ποσότητα ιζήματος που θα μεταφερθεί. Όσο εντονότερη είναι η θραύση, τόσο περισσότερη ποσότητα θα θέσει σε κίνηση απομακρύνοντας την από τον πυθμένα. Επιπλέον, η ύπαρξη παλίρροιας στην περιοχή ενισχύει τη στερεομεταφορά, καθώς τα παλιρροϊκά ρεύματα δρουν προς την κατεύθυνση αυτή. Επίσης, αν η περιοχή της μαρίνας είναι κοντά σε εκβολή υδατορεύματος, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα για προσάμμωση στο εσωτερικό της. Καθοριστικό ρόλο έχει η γεωμετρία της μαρίνας και κυρίως η τοποθεσία, η προστασία και το πλάτος της εισόδου.

Βασική παράμετρος του προβλήματος είναι και η ποσότητα που θα καθιζάνει στη λιμενολεκάνη. Η ποσότητα του ιζήματος που θα μεταφερθεί στην περιοχή που έχει κατασκευαστεί το έργο είναι επιθυμητό να συνεχίσει στην πορεία της ροής και να αποτεθεί κατάντη του έργου. Σε αυτό 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).

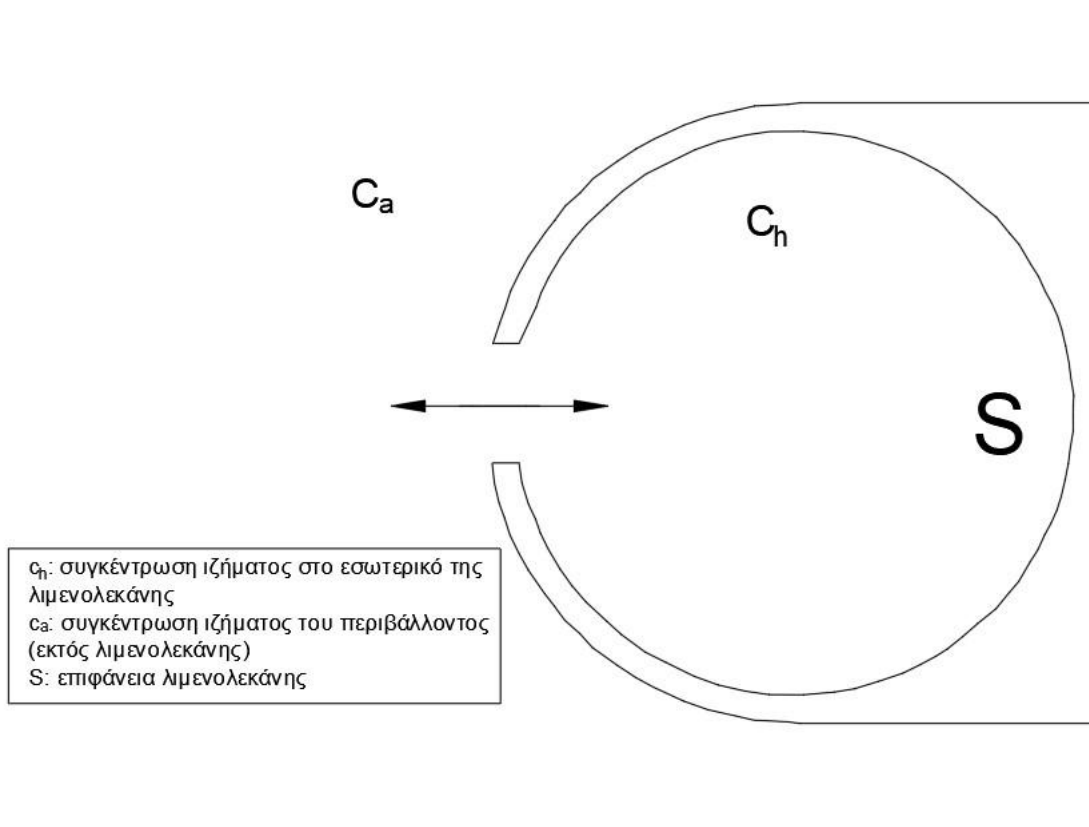
### ***3.3.1 Εξισώσεις που περιγράφουν τις διαδικασίες στερεομεταφοράς σε μαρίνες***

Εξαιτίας του γεγονότος ότι τα νερά στη λιμενολεκάνη μιας μαρίνας είναι σχετικά ήρεμα, το εσωτερικό αυτής είναι επιρρεπές στις 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. Παρακάτω παρουσιάζεται μια μέθοδος για τον υπολογισμό του ρυθμού προσάμμωσης στη λιμενολεκάνη.

Η διαφορική εξίσωση (3.1) που διέπει το προαναφερθέν φαινόμενο και δίνει το ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης ως προς το χρόνο  $t$  είναι η εξής:

$$\frac{dc_h}{dt} = \frac{Q}{V_e} (c_a - c_h) \left( \frac{Q}{V_e} + \frac{aW_f}{d} \right) \quad (3.1)$$

Όπου  $c_h$  η συγκέντρωση ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης,  $Q$  ο ρυθμός ανταλλαγής ροής,  $V_e$  ο όγκος της λιμενολεκάνης,  $c_a$  η συγκέντρωση ιζήματος του περιβάλλοντος (εκτός λιμενολεκάνης),  $W_f$  η ταχύτητα καθίζησης,  $a$  ο συντελεστής που παίρνει τιμές (0.1, 10) και  $d$  το βάθος του λιμένα.



**Σχήμα 14:** Ανταλλαγή υδάτων μεταξύ μαρίνας και περιβάλλοντος διαμέσου της εισόδου (Προέλευση: PIANC, 2008, μετά από προσαρμογή)



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

$$\begin{aligned} c_h &= \frac{Q}{Q + aSW_f} c_a + \left( c_o - \frac{Q}{Q + aSW_f} c_a \right) \exp \left\{ - \left( \frac{Q}{V_e} + \frac{aW_f}{d} \right) t \right\} \\ &= c_e + (c_o - c_e) \exp \left\{ - \left( \frac{Q}{V_e} + \frac{aW_f}{d} \right) t \right\} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Όπου  $S$  η επιφάνεια της λιμενολεκάνης,  $c_e$  η συγκέντρωση ισορροπίας της λεκάνης που δίνεται από την εξίσωση (3.3):

$$c_e = \frac{Q c_a}{Q + aSW_f} \quad (3.3)$$

Ο χρόνος παραμονής των αιωρούμενων ιζημάτων στην οριζόντια και την κατακόρυφη διεύθυνση της λιμενολεκάνης είναι  $T_h = V_e/Q$  και  $T_v = d/aW_f$  αντίστοιχα. Ο ρυθμός προσάμμισης στο εσωτερικό της λεκάνης  $F_s$ , λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω δίνεται από την εξίσωση (3.4):

$$F_s = \left[ \frac{T_v}{T_h + T_v} + \left( \frac{c_o}{c_a} - \frac{T_v}{T_h + T_v} \right) \exp \left\{ - \left( \frac{1}{T_h} + \frac{1}{T_v} \right) t \right\} \right] aSW_f c_a \quad (3.4)$$

Αν θεωρηθεί ότι ο χρόνος κατά την κατακόρυφο είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν κατά την οριζόντια, δηλαδή  $T_v \gg T_h$ , η προαναφερθείσα εξίσωση γίνεται:

$$F_s = \left[ 1 + \left( \frac{c_o}{c_a} - 1 \right) \exp \left\{ - \frac{t}{T_h} \right\} \right] aSW_f c_a = aSW_f c_a \quad (3.5)$$

Η εξίσωση (3.5) δείχνει ότι η συγκέντρωση των 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 τον ρυθμό ανταλλαγής ροής  $Q$ . Σε

άλλες περιπτώσεις, η μείωση του  $Q$  επηρεάζει το  $F_s$  και μπορεί μάλιστα να επιτελέσει καθοριστικό ρόλο στην ελαχιστοποίησή του.

## **4 ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΡΕΥΝΕΣ**

### **4.1 Γενικά**

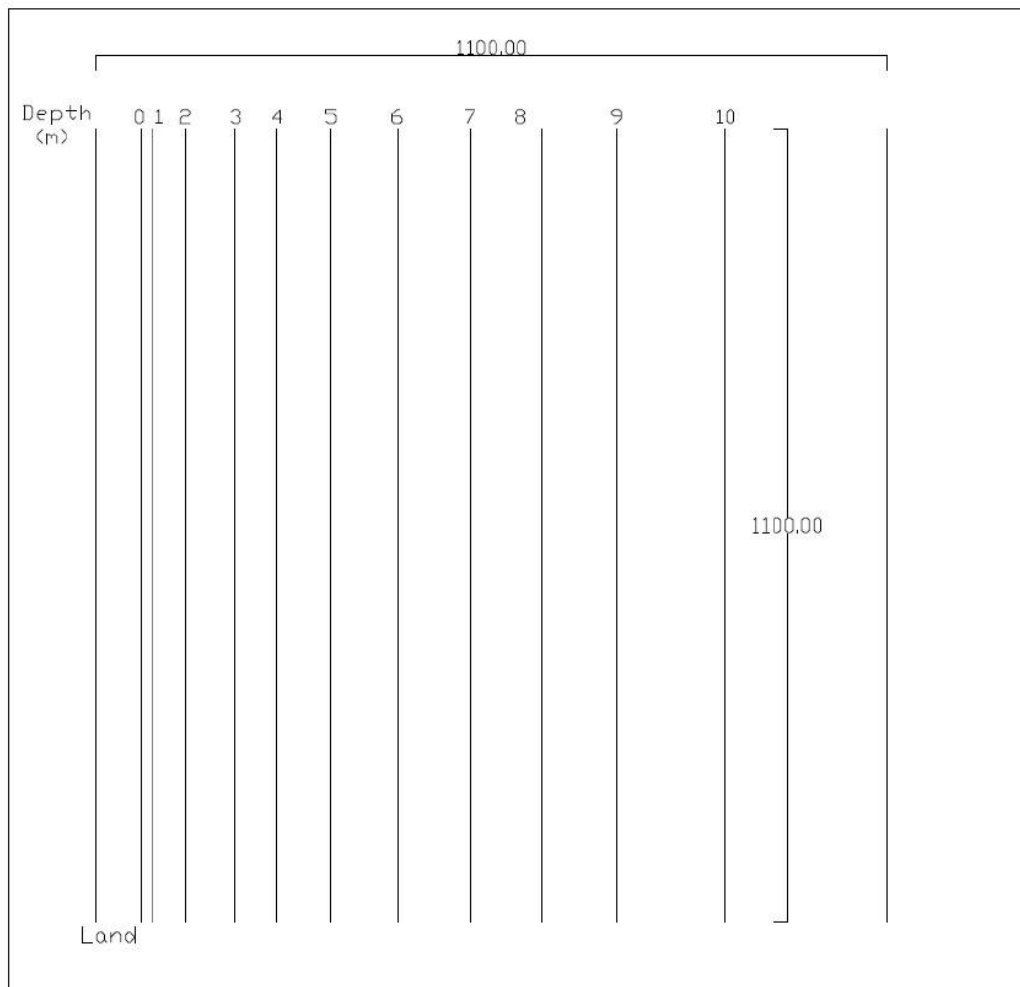
Ο βέλτιστος σχεδιασμός της διάταξης μιας μαρίνας αποτελεί ένα σημαντικό πεδίο μελέτης για την αντιμετώπιση μιας σειράς προβλημάτων που εμφανίζονται στη διάρκεια ζωής του έργου. Τα σπουδαιότερα ζητήματα που αντιμετωπίζει μια μαρίνα σχετίζονται με τη στερεομεταφορά και την κυματική διείσδυση. Έχουν εκπονηθεί διάφορες έρευνες για την ανάλυση των φαινομένων αυτών. Δύο σχετικές και πολύ πρόσφατες έρευνες είναι του Μαυραντωνάκη (2013) και της Σοφιαδέλης (2014). Στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη (2013) διερευνήθηκε ο σχεδιασμός μαρίνων σε σχέση με τον ρυθμό στερεομεταφοράς (Transport Capacity) στην είσοδο και στην περιοχή κοντά της μαρίνας. Διερευνήθηκαν επίσης προτάσεις αντιμετώπισης των φαινομένων προσάμμοσης στην είσοδο της μαρίνας. Στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλης (2014) διερευνήθηκε ο σχεδιασμός μαρίνων σε σχέση με την κυματική διείσδυση και η δυνατότητα κίνησης των ιζημάτων στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης.

### **4.2 Διερεύνηση σχεδιασμού διάταξης μαρίνας σε σχέση με τη στερεομεταφορά στην είσοδο και προτάσεις βελτίωσης (Μαυραντωνάκης, 2013)**

Στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη (2013) επιλέχθηκαν δύο κυματικά σενάρια που φαίνονται στον Πίνακα 4.1. Σημειώνεται ότι η παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετεί τα ίδια δεδομένα για λόγους σύγκρισης, όπως θα παρουσιασθεί στα επόμενα κεφάλαια. Ταυτόχρονα, σχεδιάστηκε η βαθυμετρία σύμφωνα με το Σχήμα 15, η οποία αποτελεί μια ιδεατή περιοχή. Στη συνέχεια καθορίστηκαν πέντε εναλλακτικές διατάξεις μαρίνων με διαφορετική χωροθέτηση, γεωμετρία και διαστάσεις των εξωτερικών λιμενικών έργων. Τέλος στην ίδια μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία έγινε αναφορά σε τρεις προτάσεις βελτίωσης για την αντιμετώπιση του φαινομένου των προσαμμώσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν την τοποθέτηση συστοιχίας πασσάλων σε διάφορες διευθύνσεις, τοίχου εκτροπής ρεύματος και προβόλου.

**Πίνακας 4.1: Κυματικά σενάρια (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)**

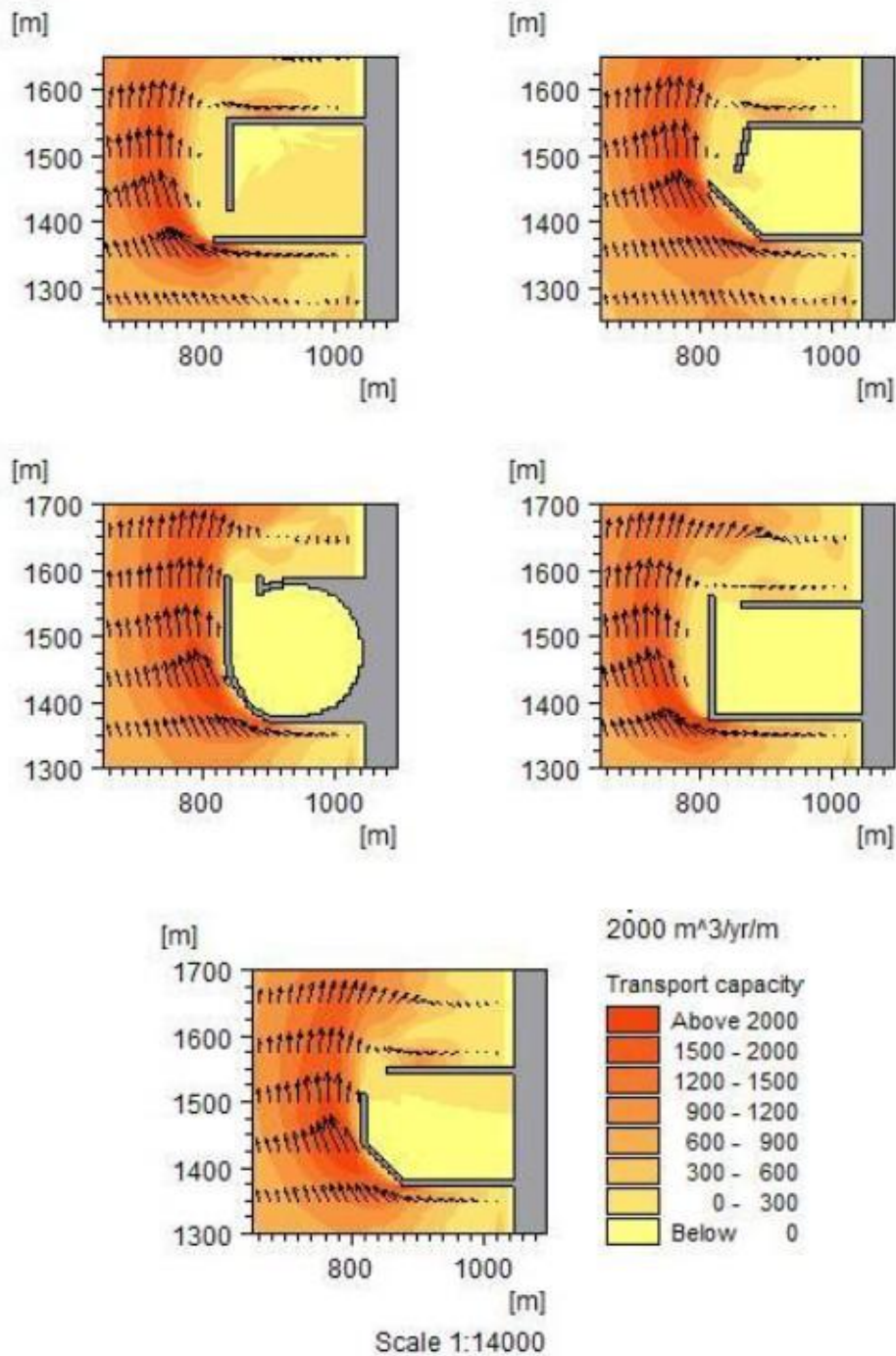
Κυματικό Σενάριο	$H_{rms}$ [m]	$T_p$ [s]	$\theta$ [°]
Πρώτο	2	6	45
Δεύτερο	2.5	6.5	10



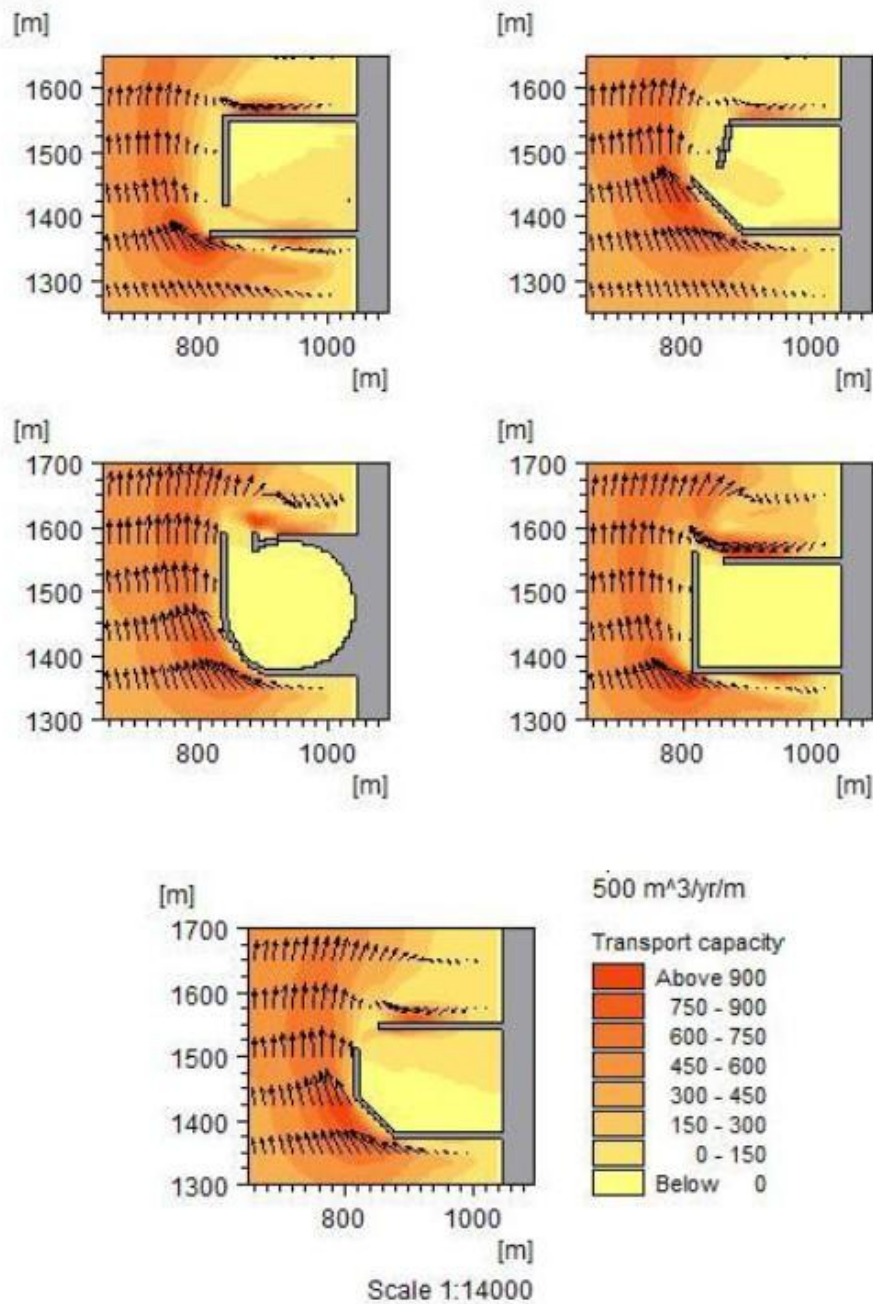
**Σχήμα 15: Σχεδιασμός ισοβαθών περιοχής μελέτης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)**

Για την εκπόνηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο MIKE DHI 2012. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε το κυματικό μοντέλο ήπιας κλίσης MIKE 21 PMS (parabolic mild slope) για τον προσδιορισμό του ύψους κύματος και των τάσεων ακτινοβολίας, το υδροδυναμικό μοντέλο διδιάστατης ανάλυσης MIKE 21 HD (hydrodynamic) για τον υπολογισμό της ταχύτητας και της διεύθυνσης του κυματογενούς ρεύματος και το μοντέλο υπολογισμού ρυθμών στερεομεταφοράς MIKE 21 ST (sediment transport) για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς στην περιοχή.

Τα αποτελέσματα της μελέτης που παρουσιάστηκαν ήταν οι μέγιστες παρατηρηθείσες ταχύτητες ρεύματος  $V_{max}$  και ρυθμοί στερεομεταφοράς  $TC_{max}$  κοντά στη μαρίνα αλλά και ειδικότερα κοντά στην περιοχή της εισόδου για κάθε κυματικό σενάριο. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 4.2. Επιπρόσθετα, παρατέθηκαν τα αποτελέσματα του MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα για τα δύο κυματικά σενάρια στα Σχήματα 16 και 17 και παριστάνονται τα αποτελέσματα. Για τις διατάξεις 1 και 4 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα προτάσεων βελτίωσης όσον αφορά το πρώτο και το δεύτερο κυματικό σενάριο αντίστοιχα. Οι διατάξεις αυτές επιλέχθηκαν ως οι δυσμενέστερες για την κάθε περίπτωση. Γίνεται αριθμητική και γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων στον Πίνακα 4.3 και στα Σχήματα 18 και 19.



**Σχήμα 16:** Αποτελέσματα MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το πρώτο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)

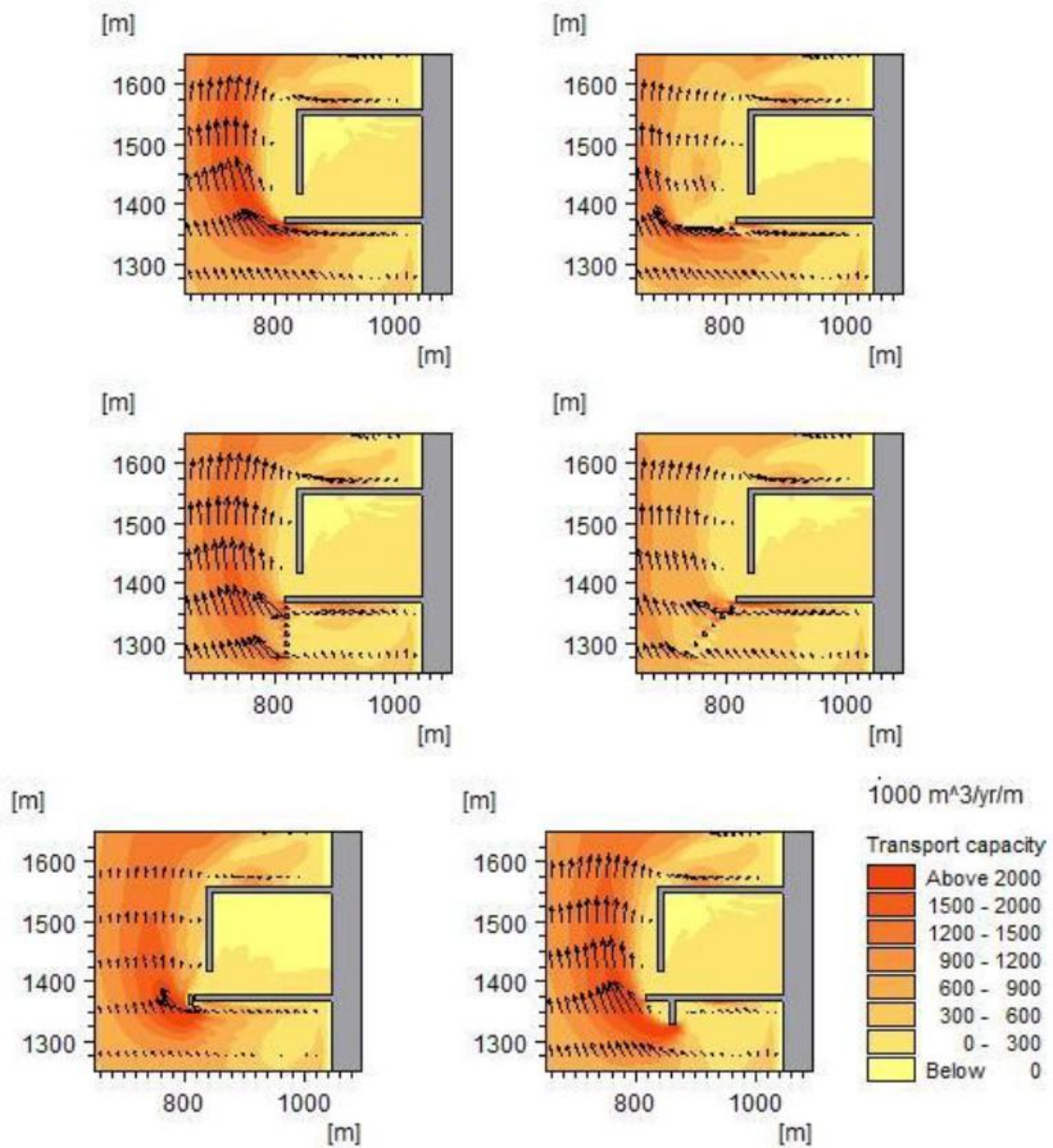


**Σχήμα 17:** Αποτελέσματα MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα, για το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)

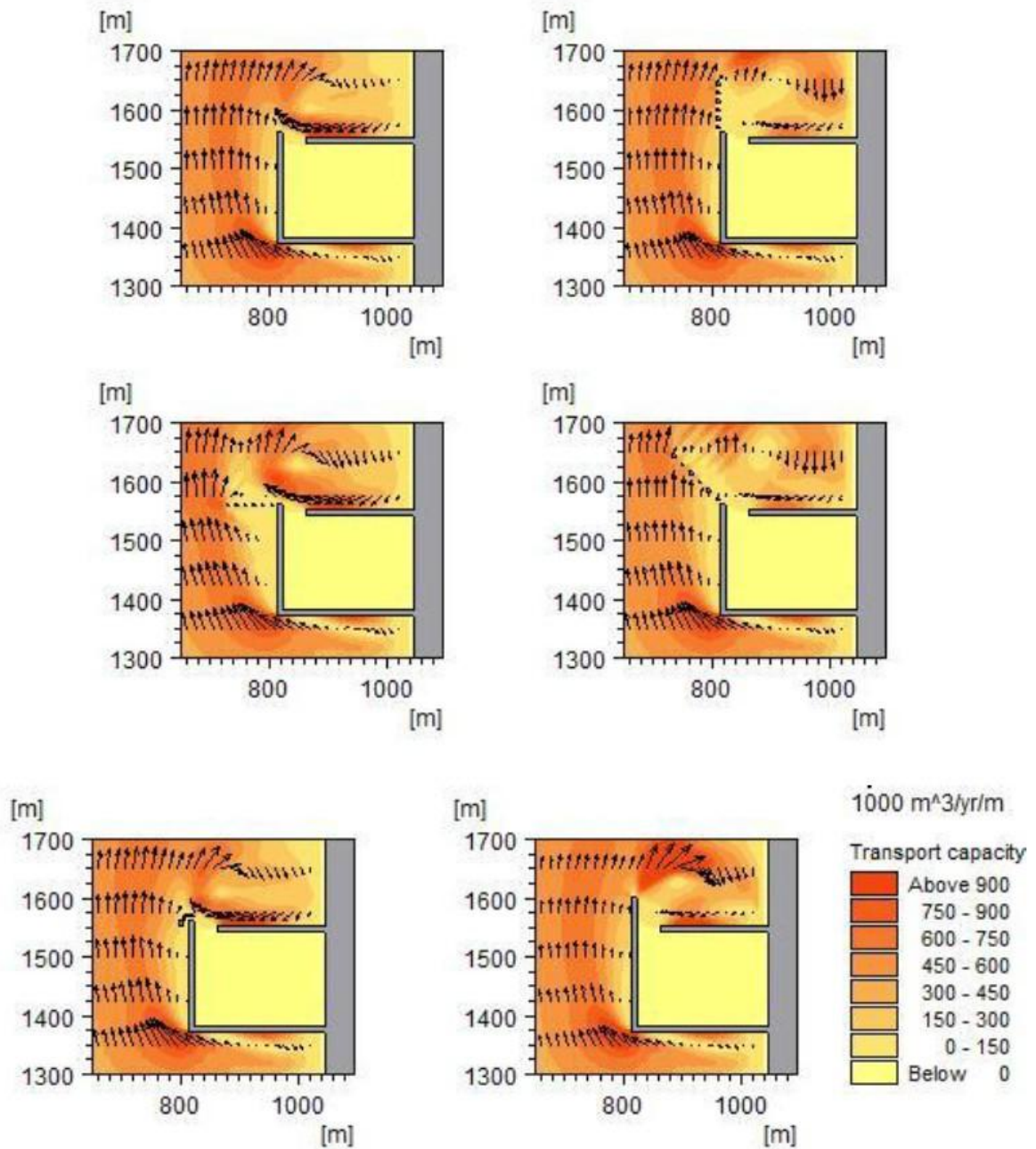
**Πίνακας 4.2:** Αποτελέσματα μέγιστης ταχύτητας ρεύματος  $V_{\max}$  και στερεομεταφοράς  $TC_{\max}$  στην περιοχή κοντά στη μαρίνα και ταχύτητας ρεύματος  $V$  και στερεομεταφοράς  $TC$  στην περιοχή κοντά στην είσοδο αυτής για το πρώτο και το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)

Διατάξεις	$V_{\max}$ [m/s]	$V$ [m/s]	$TC_{\max}$ [m <sup>3</sup> /yr/m]	$TC$ [m <sup>3</sup> /yr/m]
<b>Πρώτο κυματικό σενάριο</b>				
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
<b>Δεύτερο κυματικό σενάριο</b>				
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





Σχήμα 18: Αποτελέσματα MIKE 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη Διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)



Σχήμα 19: Αποτελέσματα MIKE 21 ST στην περιοχή κοντά στην είσοδο της μαρίνας για τις προτάσεις βελτίωσης εφαρμοσμένες στη Διάταξη 4, για το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)

**Πίνακας 4.3:** 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 τις προτάσεις βελτίωσης στη Διάταξη 1, για το πρώτο κυματικό σενάριο και στη Διάταξη 4 για το δεύτερο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη, 2013)

Προτάσεις βελτίωσης	$V_{\max}$ [m/s]	$V$ [m/s]	$TC_{\max}$ [m <sup>3</sup> /yr/m]	$TC$ [m <sup>3</sup> /yr/m]
<b>Πρώτο κυματικό σενάριο</b>				
Διάταξη 1	1.0	1.0	6272.71	2000
Πάσσαλοι κάθετα στην είσοδο	1.0	0.6	3172.57	300
Πάσσαλοι παράλληλα στην είσοδο	1.0	0.7	2600.98	900
Πάσσαλοι σε 45° με την είσοδο	0.9	0.6	3756.39	600
Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος	1.0	0.9	6352.32	1200
Πρόβολος	1.0	0.9	3367.72	1200
<b>Δεύτερο κυματικό σενάριο</b>				
Διάταξη 4	0.7	0.6	1562.42	600
Πάσσαλοι κάθετα στην είσοδο	0.7	0.4	1569.93	150
Πάσσαλοι παράλληλα στην είσοδο	0.7	0.6	1301.93	600
Πάσσαλοι σε 45° με την είσοδο	0.7	0.4	1501	300
Πάσσαλοι ανάντη εισόδου	0.7	0.5	1489.59	600
Τοίχωμα εκτροπής ρεύματος	0.7	0.6	1522.35	600
Πρόβολος	0.8	0.7	1600	450

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας του Μαυραντωνάκη συμπεραίνεται ότι:

- Οι επιφάνειες που προσπίπτει το ρεύμα είναι προτιμότερο να σχεδιάζονται καμπύλες
- Η είσοδος της μαρίνας πρέπει να σχεδιάζεται κατά το δυνατόν προστατευμένη ως προς τους επικρατούντες κυματισμούς.
- Σε σχέση με τη στερεομεταφορά για μικρές μαρίνες, η βέλτιστη από τις ερευνηθείσες διατάξεις είναι η Διάταξη 3.
- Σχετικά με τις προτάσεις βελτίωσης η συστοιχία πασσάλων τοποθετημένη σε γωνία  $45^\circ$  σε σχέση με τη διεύθυνση της εισόδου της μαρίνας παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα μειώνοντας στο μεγαλύτερο βαθμό την ένταση της στερεομεταφοράς. Το τοίχωμα εκτροπής ρεύματος και ο πρόβολος δεν μειώνουν σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα ρεύματος και το ρυθμό στερεομεταφοράς.

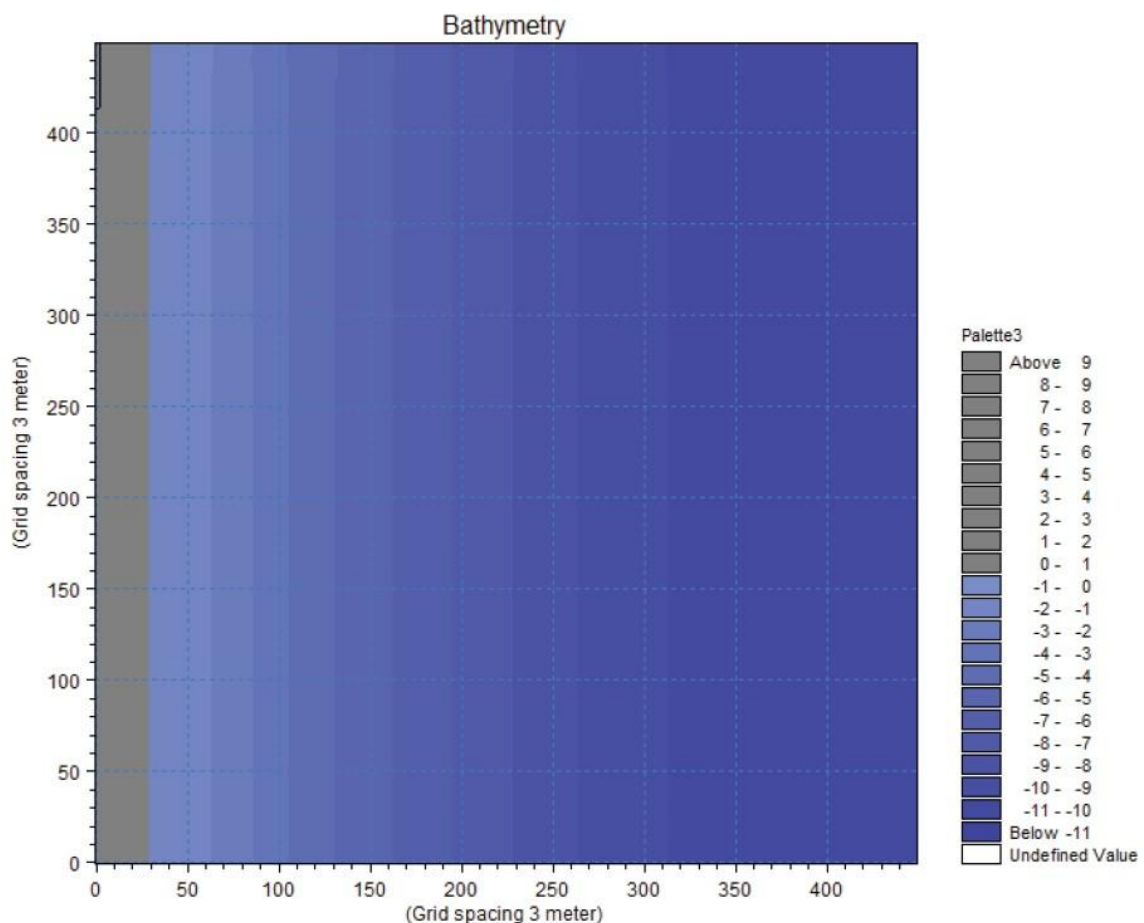
#### **4.3 Διερεύνηση συνθηκών στερεομεταφοράς και κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό διατάξεων μαρίνων (Σοφιαδέλλη, 2014)**

Στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλλης (2014) επιλέχθηκαν δύο κυματικά σενάρια, διαφορετικά από την παρούσα μελέτη και του Μαυραντωνάκη που φαίνονται στον Πίνακα 4.4. Η βαθυμετρία που σχεδιάστηκε είναι ίδια με αυτήν του Μαυραντωνάκη. Η διαφορά εντοπίζεται στον προσανατολισμό της ακτής ο οποίος είναι προς τα ανατολικά ενώ στο μοντέλο του Μαυραντωνάκη και της παρούσας εργασίας είναι προς τα δυτικά. Η περιοχή μελέτης ύστερα από τη δημιουργία της βαθυμετρίας φαίνεται στο Σχήμα 20. Στο μοντέλο εισήχθησαν οι πέντε εναλλακτικές μαρίνες με την ίδια γεωμετρία. Στην εργασία αυτή προβλέφθηκε η χρήση πρανών στην κρίσιμη περιοχή της εισόδου και κατακόρυφων μετώπων στον σχεδιασμό των εσωτερικών λιμενικών έργων. Στο Σχήμα 21 με γκρι χρώμα απεικονίζονται τα τμήματα των εξωτερικών λιμενικών έργων με κατακόρυφο μέτωπο και με πράσινο τα μέρη των έργων που κατασκευάζονται με πρανή (απορροφητικές διατάξεις). Η ανακλαστικότητα των έργων στην προσομοίωση ορίστηκε με συγκεκριμένη τιμή 0.86. Σημειώνεται εδώ επίσης ότι οι διαστάσεις της περιοχής μελέτης μειώθηκαν σε 500x500 m και εισήχθη «τεχνητή» ξηρά σε περιοχές που δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα της μαθηματικής

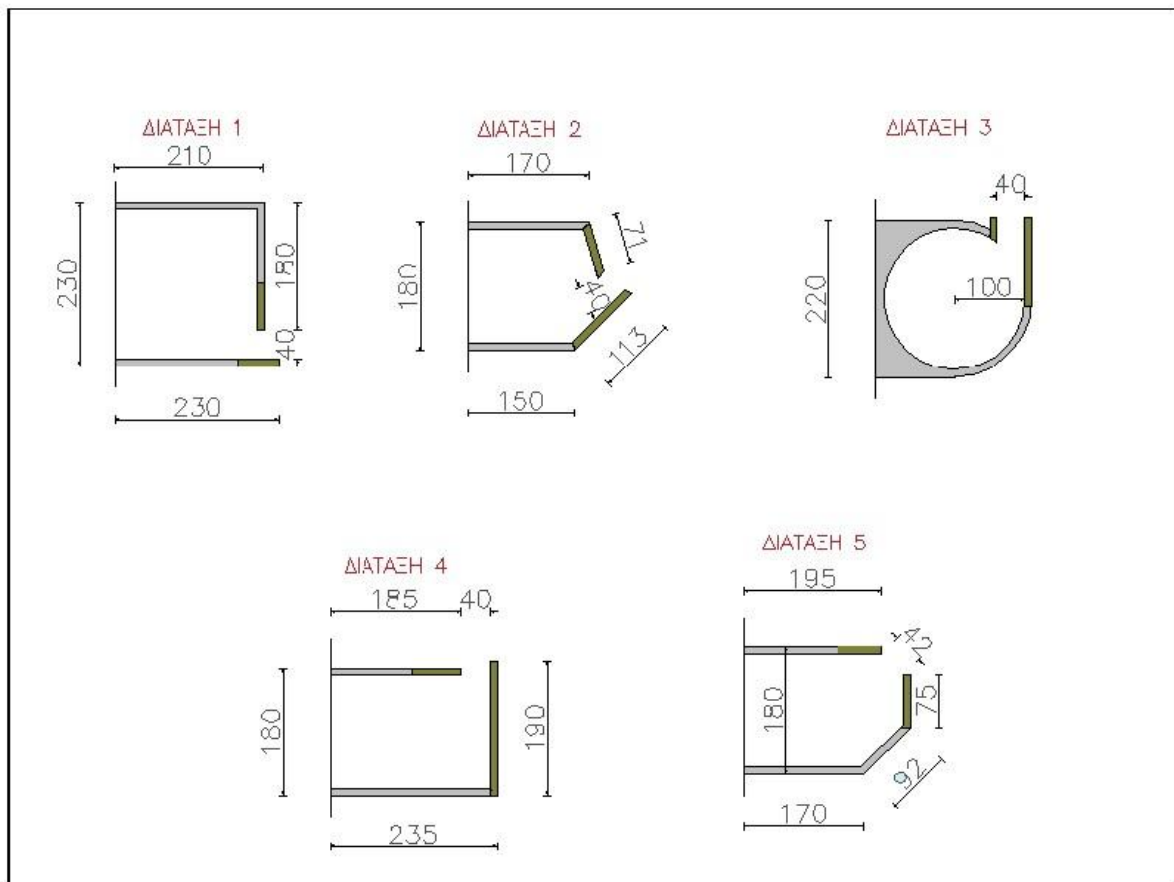
προσομοίωσης για λόγους μείωσης του υπολογιστικού φόρτου. Στις περιοχές αυτές τοποθετήθηκαν απορροφητικές στοιβάδες ώστε τα εξερχόμενα κύματα να μην ανακλώνται πίσω στην περιοχή μελέτης και επηρεάζουν το κυματικό κλίμα.

**Πίνακας 4.4: Κυματικά σενάρια (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)**

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

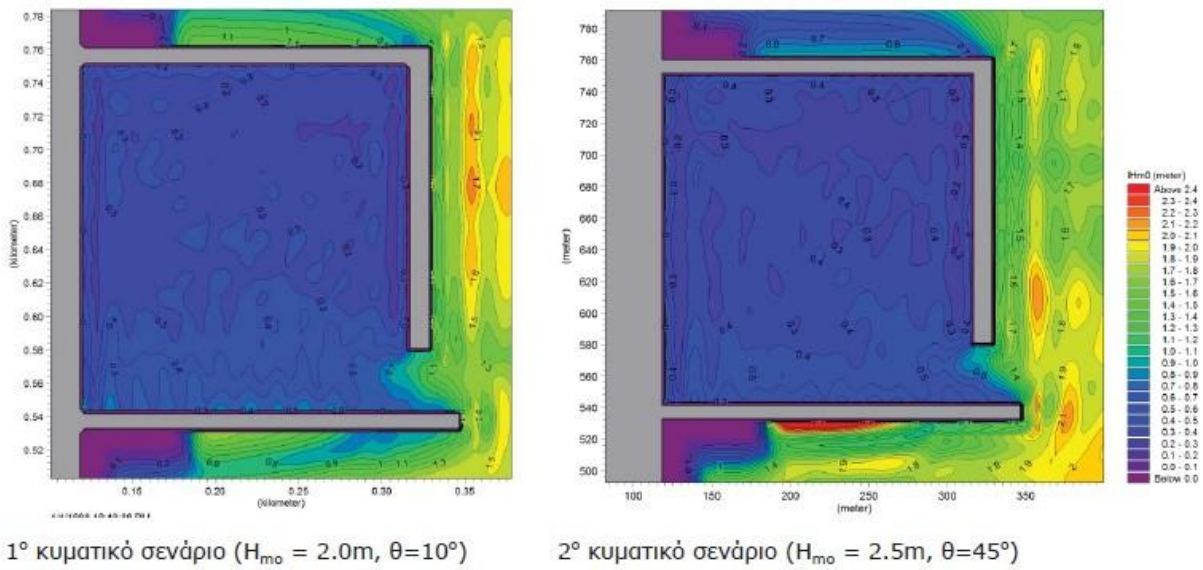


**Σχήμα 20: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)**

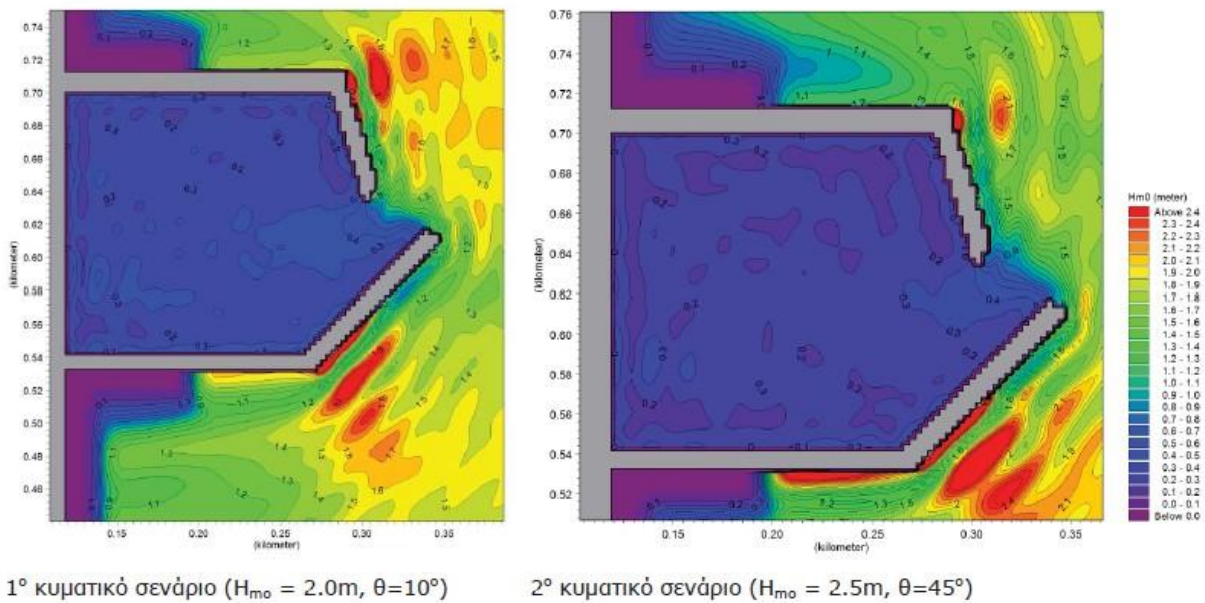


**Σχήμα 21: Διατάξεις μαρίνων (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)**

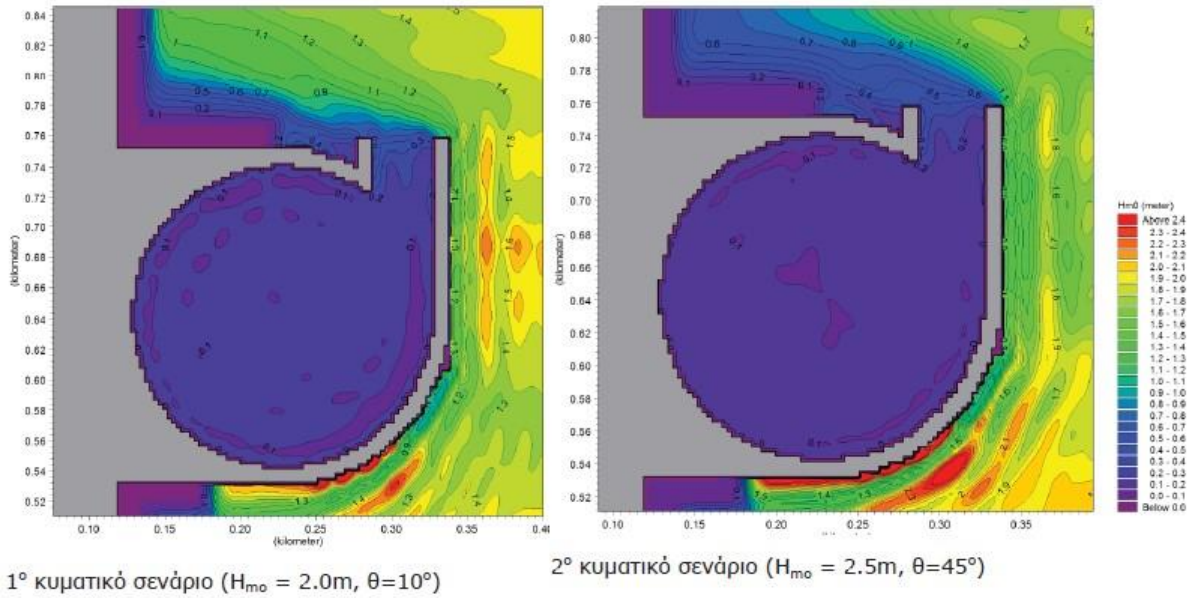
Για την πραγματοποίηση των υπολογισμών χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό μοντέλο MIKE DHI 2011. Πιο συγκεκριμένα έγινε εφαρμογή του προγράμματος MIKE 21 BW (Boussinesq Waves) για τον υπολογισμό της διάδοσης των κυματισμών στην περιοχή μελέτης και στο εσωτερικό της μαρίνας. Η προσομοίωση έγινε σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε για όλες τις εναλλακτικές διατάξεις και για τα δύο κυματικά ενώ η περιοχή μελέτης αναλύθηκε σε κάνναβο με ισοδιάσταση 3 m. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στους διδιάστατους χάρτες με στιγμιότυπα διακύμανσης της ελεύθερης επιφάνειας στα Σχήματα 22 έως και 26. Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται επίσης συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα του μοντέλου στις κρίσιμες περιοχές της κάθε λιμενολεκάνης.



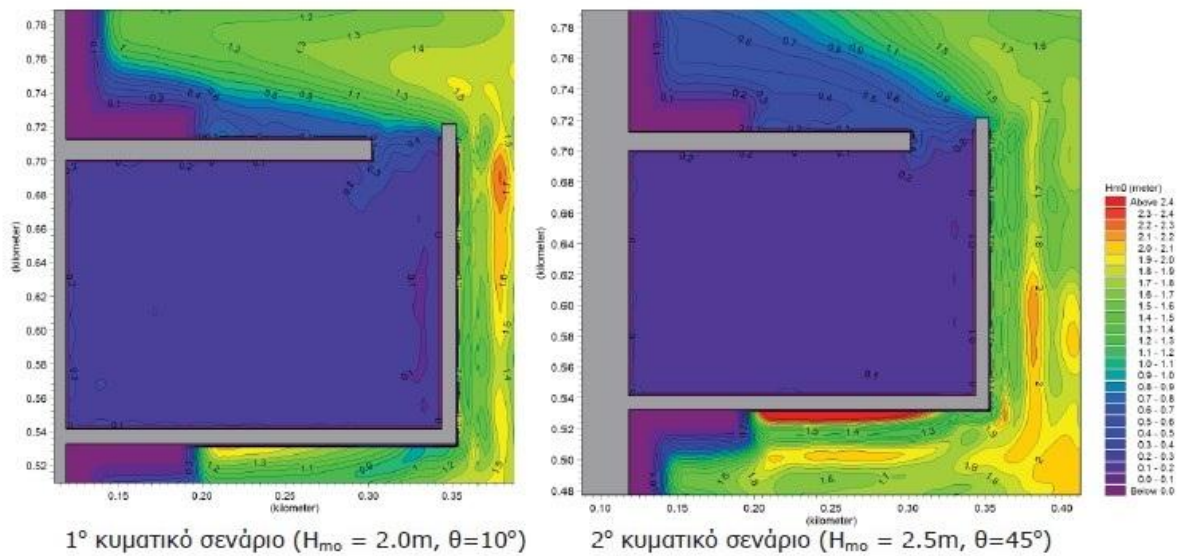
Σχήμα 22: Εναλλακτική Διάταξη 1 – Αποτελέσματα κυματικής διείδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)



Σχήμα 23: Εναλλακτική Διάταξη 2 – Αποτελέσματα κυματικής διείδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)

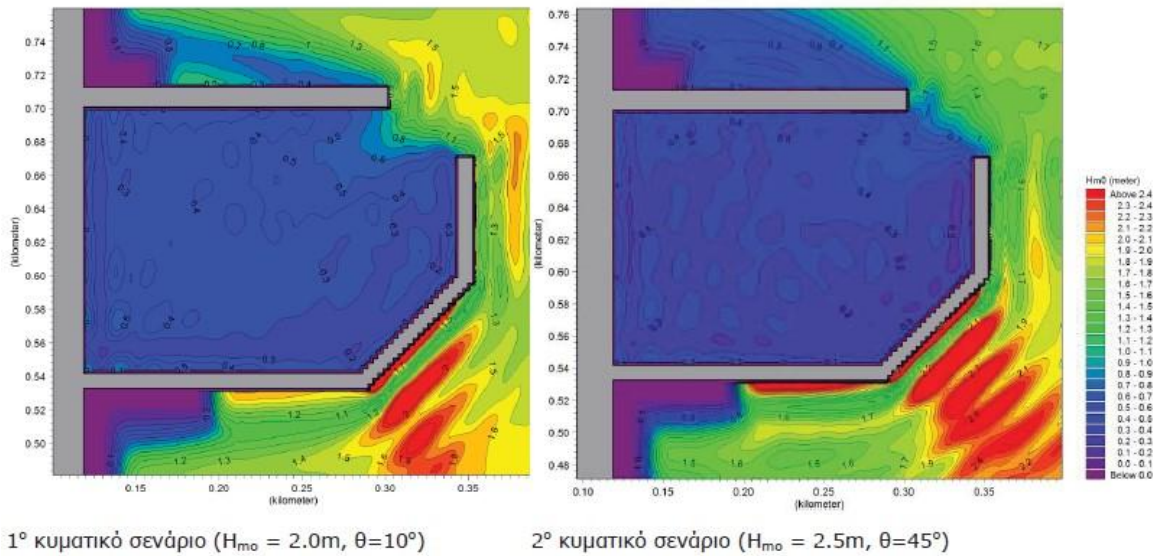


Σχήμα 24: Εναλλακτική Διάταξη 3 – Αποτελέσματα κυματικής διεύθυνσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)



Σχήμα 25: Εναλλακτική Διάταξη 4 – Αποτελέσματα κυματικής διεύθυνσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)



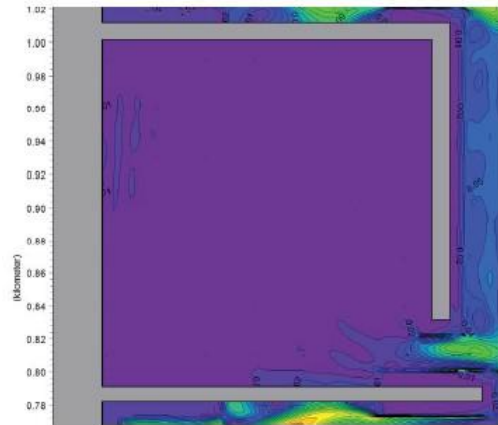


Σχήμα 26: Εναλλακτική Διάταξη 5 – Αποτελέσματα κυματικής διείσδυσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)

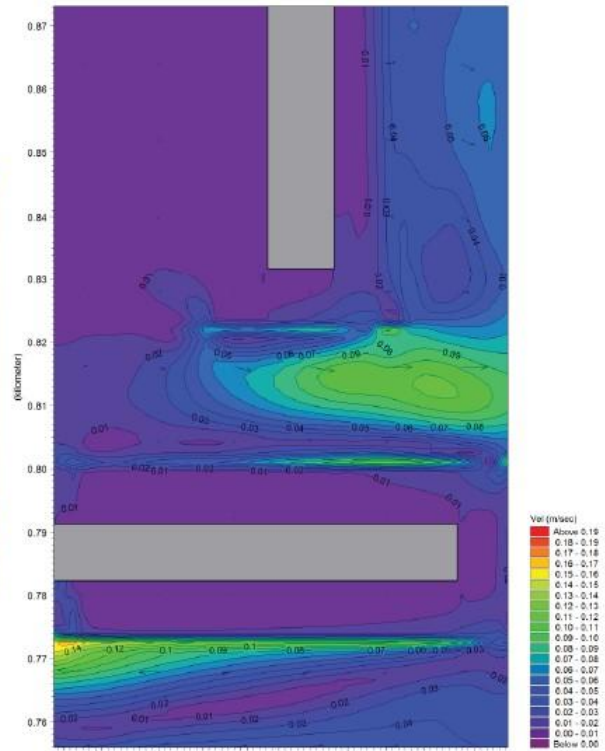
Πίνακας 4.5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τοπικού  $H_{m0}$  στο χρονικό πέρας της προσομοίωσης (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)

	$H_{m0}$ ΑΝΟΙΧΤΑ [m]	Τιμές στο εσωτερικό Περιοχή παραλιακών κρηπιδωμάτων [m]					Μέγιστες τιμές στην είσοδο (μεταξύ των δύο μώλων) [m]				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
<b>Κυματικό σενάριο 1</b>	2.00	0.4- 0.5	0.1- 0.2	<0.1	0.2	0.4- 0.5	0.7- 1.0	0.4- 0.9	0.3	0.4	Έως 1.2
<b>Κυματικό σενάριο 2</b>	2.50	0.3- 0.4	<0.1	<0.1	0.1	0.4	0.8- 1.1	0.3- 0.9	0.3	0.4	Έως 1.1

Στο δεύτερο στάδιο έγινε ο υπολογισμός πεδίου ταχυτήτων στο εσωτερικό των μαρίνων για τις δυσμενέστερες περιπτώσεις και συγκεκριμένα για τις διατάξεις 1,2 και 5 και για τα δύο κυματικά σενάρια. Στο στάδιο αυτό έγινε ανάλυση σε πυκνότερο κάρναβο ισοδιάστασης 1.5 m για να υπάρχει αυξημένη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Να σημειωθεί ότι οι υπολογιζόμενες ταχύτητες που φαίνονται στα Σχήματα 27 έως 32 είναι οι μέσες ως προς το χρονικό βήμα στιγμιαίες ταχύτητες των σωματιδίων ολοκληρωμένες ως προς το βάθος.

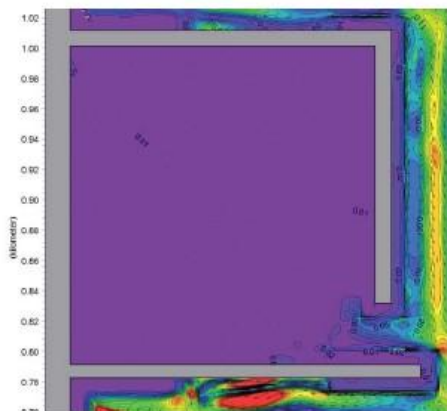


Περιοχή στο εσωτερικό της μαρίνας

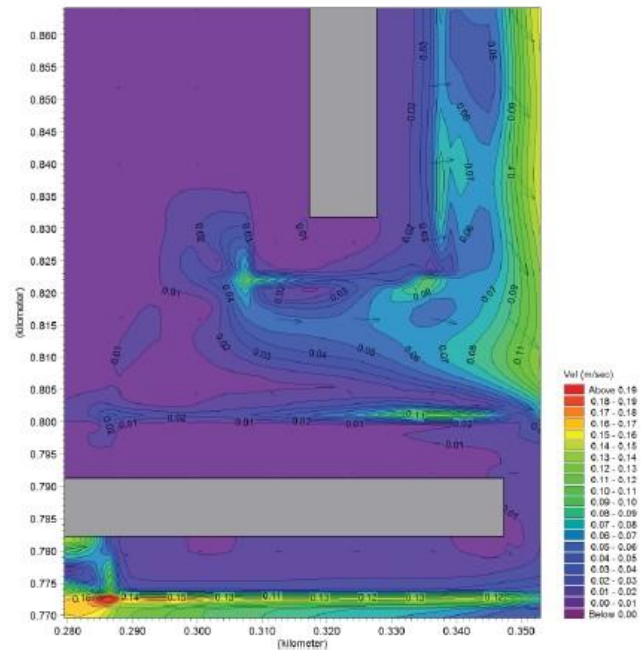


Είσοδος μαρίνας

Σχήμα 27: Εναλλακτική Διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)

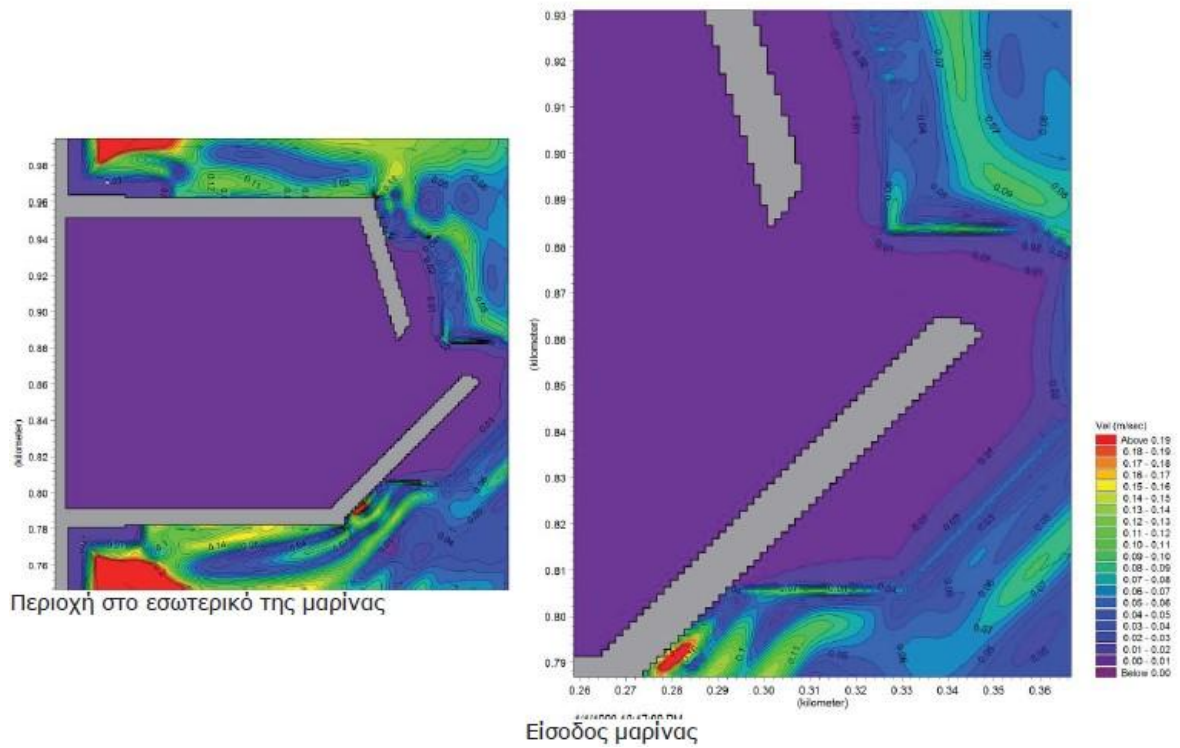


Περιοχή στο εσωτερικό της μαρίνας

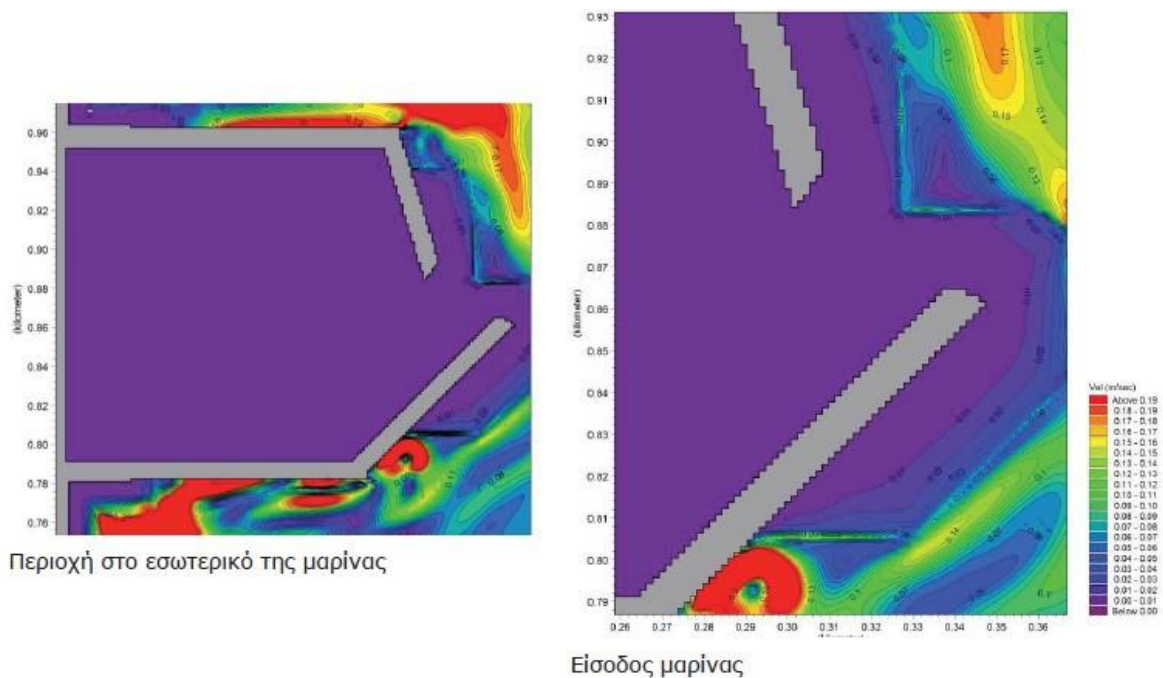


Είσοδος μαρίνας

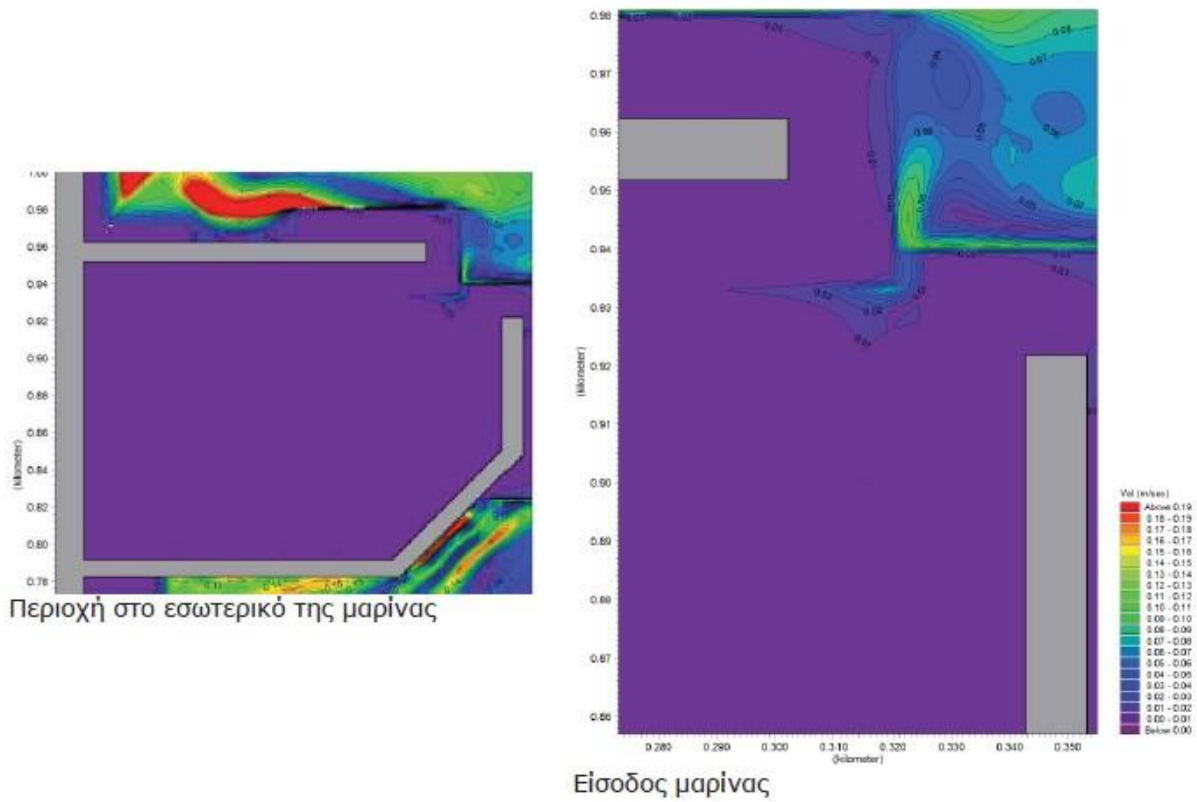
Σχήμα 28: Εναλλακτική Διάταξη 1 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)



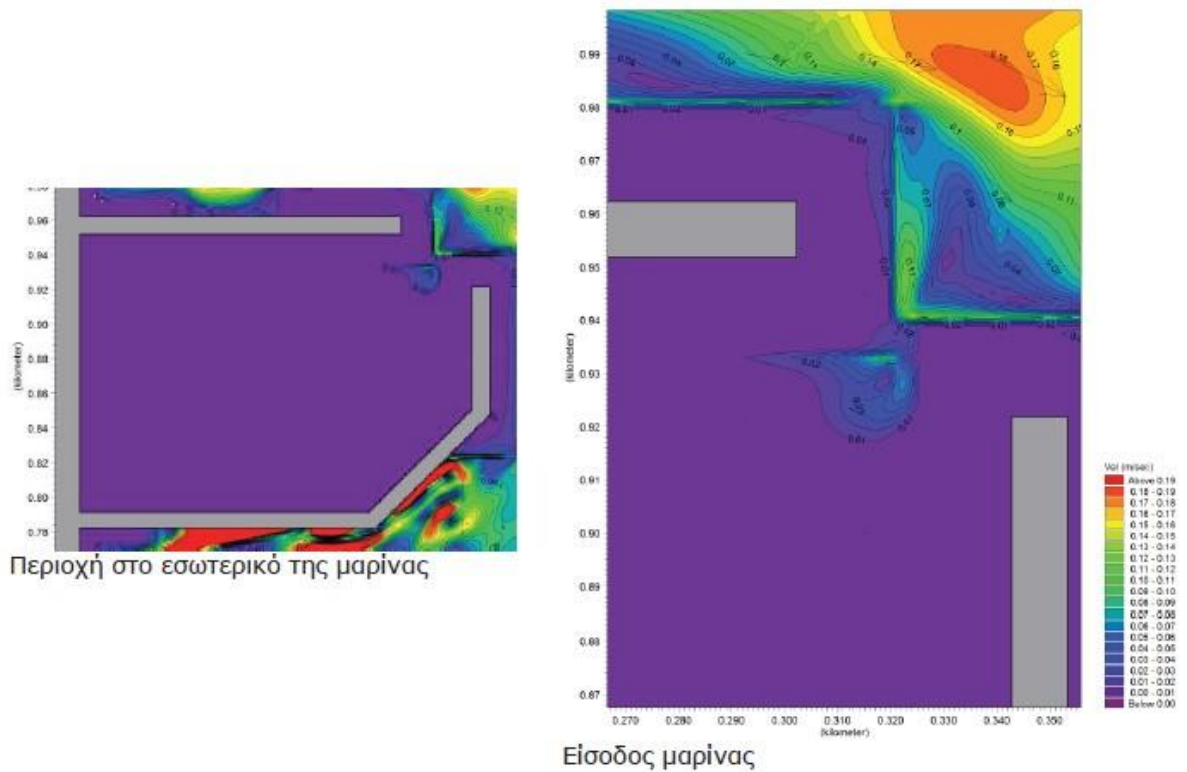
Σχήμα 29: Εναλλακτική Διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)



Σχήμα 30: Εναλλακτική Διάταξη 2 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)



Σχήμα 31: Εναλλακτική Διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 1ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)



Σχήμα 32: Εναλλακτική Διάταξη 5 – Αποτελέσματα πεδίου ταχυτήτων 2ο κυματικό σενάριο (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)

Στη συνέχεια διερευνήθηκε η δυνατότητα κίνησης των ιζημάτων στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης για τις δυσμενέστερες περιπτώσεις, οι οποίες εντοπίστηκαν στις διατάξεις 1,2 και 5. Από τις παραπάνω τιμές ταχυτήτων εντοπίστηκαν οι μέγιστες ταχύτητες με μεγαλύτερες τις  $u$  (κατά τη διεύθυνση  $x$ ) στις θέσεις ελέγχου  $\Theta 1-1$ ,  $\Theta 1-2$ ,  $\Theta 2-1$ ,  $\Theta 2-2$  και  $\Theta 5-1$ ,  $\Theta 5-2$ , για τα δύο κυματικά σενάρια, για τις διατάξεις 1,2 και 5 αντίστοιχα. Πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση της κρίσιμης διατμητικής τάσης του πυθμένα πάνω στην οποία είναι δυνατή η έναρξη της κίνησης των ιζημάτων (Καραμπάς 2004) που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης. Η διατμητική τάση του πυθμένα που φαίνεται στους Πίνακες 4.6, 4.7 και 4.8 συγκρίθηκε με την κρίσιμη διατμητική τάση η οποία υπολογίστηκε  $\tau_{bcf} = 0.496 \text{N/m}^2$  και προέκυψε ότι δεν αναμένεται να υπάρχουν μετατοπίσεις φερτών υλών στην είσοδο σε όλες τις περιπτώσεις.

**Πίνακας 4.6: Υπολογισμός  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  Διάταξης 1 (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)**

Διατομή ελέγχου	$\Theta 1-1$	$\Theta 1-2$
$\tau_{bx} [\text{N/m}^2]$	-0.406845	-0.411580
$\tau_{by} [\text{N/m}^2]$	0.011237	0.006294
$\tau_b [\text{N/m}^2]$	0.407	0.412

**Πίνακας 4.7: Υπολογισμός  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  Διάταξης 2 (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)**

Διατομή ελέγχου	$\Theta 2-1$	$\Theta 2-2$
$\tau_{bx} [\text{N/m}^2]$	0.000112	0.000871
$\tau_{by} [\text{N/m}^2]$	-0.000179	-0.000004
$\tau_b [\text{N/m}^2]$	0.000211	0.000871

**Πίνακας 4.8: Υπολογισμός  $\tau_{bx}$  και  $\tau_{by}$  Διάταξης 5 (μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη, 2014)**

Διατομή ελέγχου	Θ 5-1	Θ 5-2
$\tau_{bx}$ [ $N/m^2$ ]	-0.476217	-0.467897
$\tau_{by}$ [ $N/m^2$ ]	0.006394	0.001951
$\tau_b$ [ $N/m^2$ ]	0.476	0.468

Συμπερασματικά από τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία της Σοφιαδέλη (2014):

- Η διάταξη, ο προσανατολισμός και η προστασία της εισόδου σε σχέση με τους επικρατούντες κυματισμούς είναι οι παράμετροι διατήρησης ήπιου και ασφαλούς κυματικού κλίματος στο εσωτερικό
- Διατάξεις με την είσοδο εκτεθειμένη προς τα «ανοιχτά» και διατάξεις όπου ο προσήνεμος μώλος δεν έχει ικανό μήκος για να προστατεύσει την είσοδο παρουσιάζουν έντονη κυματική διαταραχή στο εσωτερικό τους.
- Σχετικά με τη στερεομεταφορά, διατάξεις με μεγάλη διαφορά πεδίου ταχυτήτων στην είσοδο και στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης, όπως οι 1,2 και 5 έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να εισέλθουν ιζήματα στο εσωτερικό τους και να εγκλωβιστούν εκεί. Για το δεδομένο κυματικό κλίμα προέκυψε από το δεύτερο στάδιο ανάλυσης, όπως σημειώθηκε και παραπάνω, ότι δεν είναι δυνατή η έναρξη κίνησης του εγκλωβισμένου ιζήματος στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης των μαρίνων.
- Τέλος, με πολυκριτηριακή ανάλυση συμπεραίνεται πως μικρές μαρίνες προτείνεται να σχεδιάζονται όπως η Διάταξη 3. Η είσοδος τους θα πρέπει να βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά, θα πρέπει να είναι προστατευμένη από τους επικρατούντες κυματισμούς και ο προσήνεμος μώλος θα πρέπει να σχεδιάζεται με καμπύλα στοιχεία ώστε να υπάρχει μείωση της έντασης των στροβίλων και μείωση της έντασης της στερεομεταφοράς εξωτερικά της μαρίνας.

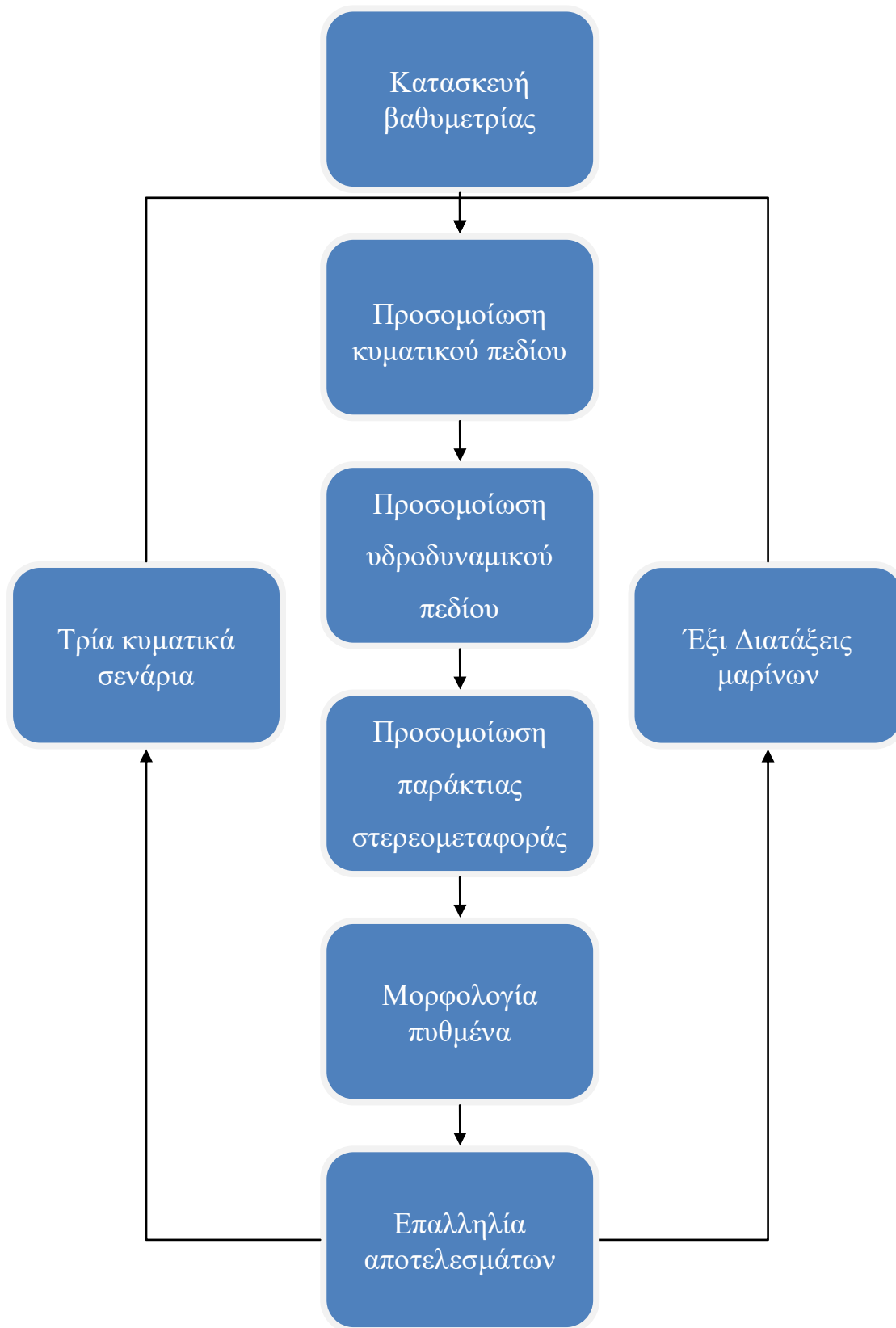
## 5 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### 5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο γενικός στόχος είναι να διερευνηθεί η απόδοση διατάξεων μαρίνων σε σχέση με τις προσαμμώσεις στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης και τις επιπτώσεις στην παράκτια στερεομεταφορά ανάλογα με τη γεωμετρία τους, την τοποθεσία και την προστασία της εισόδου τους. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ο τρόπος εργασίας, αναλύονται τα δεδομένα του προβλήματος και επεξηγείται η επιλογή τους. Τα κρίσιμα δεδομένα εισόδου του μοντέλου που καθορίζουν την επιτυχία της προσομοίωσης είναι τα κυματικά σενάρια, η επιλογή περιοχής μελέτης και βαθυμετρίας και οι διατάξεις μαρίνων. Επίσης παρουσιάζεται η εισαγωγή της βαθυμετρίας στο μοντέλο με χρήση μεταβλητού πλέγματος και η νέα μέθοδος εξακρίβωσης της έντασης των προσαμμώσεων ή της διαφυγής ιζήματος για το εσωτερικό των διατάξεων μέσω του υπολογισμού του ιζηματικού ισοζυγίου του πυθμένα της λιμενολεκάνης.

### 5.2 Τρόπος εργασίας

Η υπολογιστική διαδικασία ακολούθησε μια σειρά από βήματα που απεικονίζονται με την μορφή διαγράμματος ροής στο Σχήμα 33 ώστε να παραχθούν τα αποτελέσματα. Καταρχάς κατασκευάστηκε η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης η οποία είναι κοινή για κάθε εκτέλεση του μοντέλου. Για κάθε μία από τις έξι εναλλακτικές διατάξεις, οι οποίες παρουσιάζονται στην συνέχεια, το μοντέλο εφαρμόζεται τρεις φορές, μία για κάθε κυματικό σενάριο. Αρχικά προσομοιώνεται το κυματικό πεδίο από το οποίο προκύπτει το υδροδυναμικό πεδίο στην περιοχή μελέτης. Έπειτα από τον υπολογισμό του κυματογενούς ρεύματος προκύπτουν οι συνθήκες στερεομεταφοράς και η μορφολογία του πυθμένα. Τέλος γίνεται επαλληλία των αποτελεσμάτων για το 1<sup>ο</sup> και το 2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο για την προσέγγιση κατά το δυνατόν των πραγματικών συνθηκών παράκτιας στερεομεταφοράς.



Σχήμα 33: Βήματα παραγωγής των αποτελεσμάτων



### 5.3 Κυματικά σενάρια

Στο αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται 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  $\theta$ . Το πρώτο και το δεύτερο κυματικό σενάριο επιλέγονται ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του Μαυραντωνάκη (2013) για την ευθεία αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων. Το τρίτο κυματικό σενάριο λαμβάνεται για να διερευνηθεί η κάθετη πρόσπτωση κυματισμού στην ακτή και οι επιπτώσεις της εγκάρσιας στερεομεταφοράς στις διατάξεις. Παρόλο που τα κυματικά σενάρια δεν αποτελούν πραγματικές μετρήσεις κάποιας παράκτιας περιοχής, τα δεδομένα είναι αντιπροσωπευτικά του κυματικού κλίματος στον ελληνικό χώρο. Τα κυματικά σενάρια φαίνονται στον Πίνακα 5.1. Επισημαίνεται ότι οι γωνίες είναι μετρημένες ως προς τον θετικό ημιάξονα  $x$  του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων..

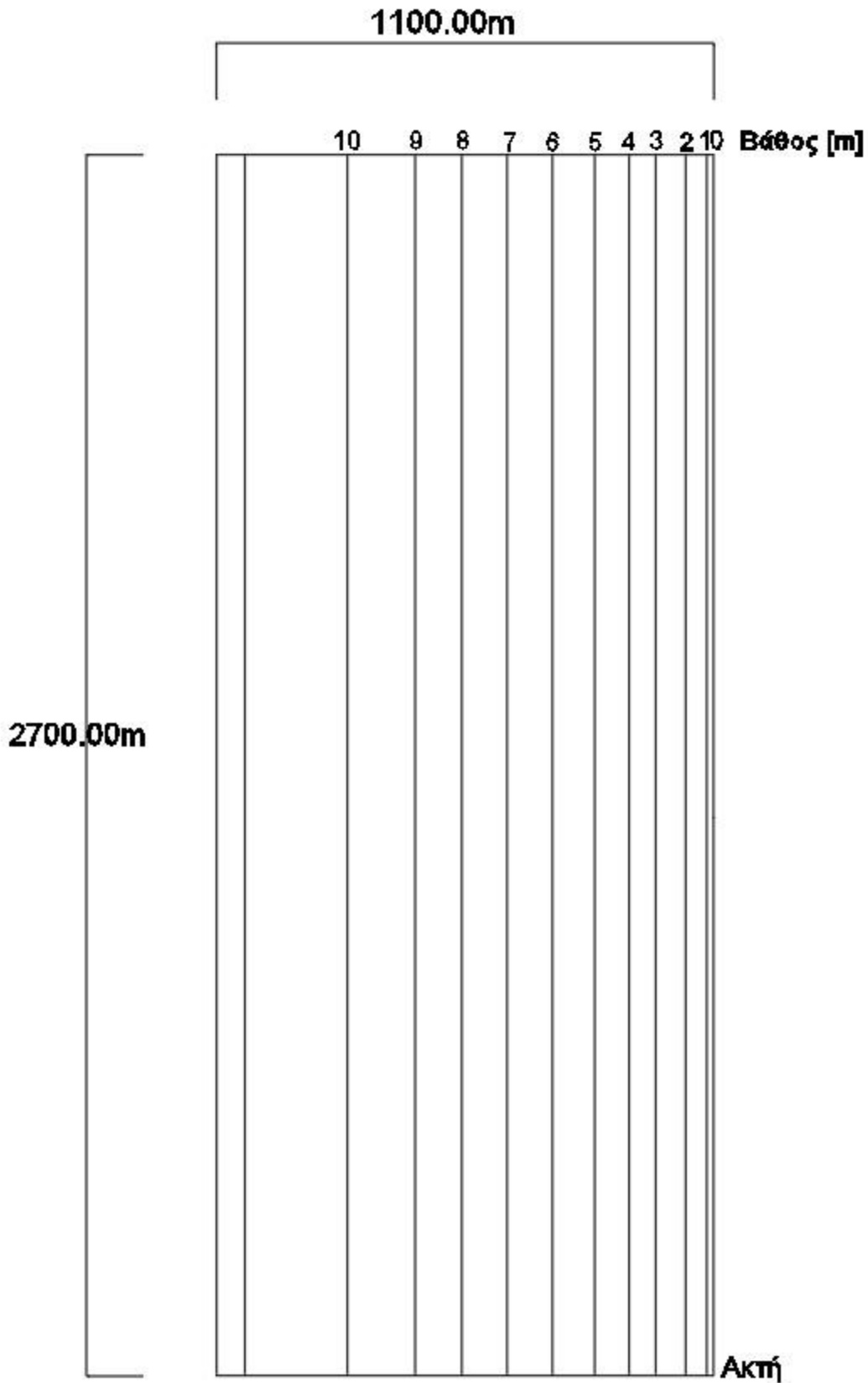
**Πίνακας 5.1: Κυματικά σενάρια**

Κυματικό Σενάριο	$H_{rms}$ [m]	$T_p$ [s]	$\theta$ [°]
Πρώτο	2	6	45
Δεύτερο	2.5	6.5	10
Τρίτο	2	6	0

### 5.4 Σχεδιασμός περιοχής μελέτης - βαθυμετρίας

Η εξεταζόμενη περιοχή αποτελεί μια ιδεατή παράκτια ζώνη διαστάσεων 2700x1100 m. Η επιλογή αρκούντως μεγάλων διαστάσεων για την περιοχής μελέτης είναι σημαντική για την εξασφάλιση μη επιρροής των ορίων και την επαρκή απεικόνιση όλων των φυσικών

διεργασιών. Η παράκτια περιοχή σχεδιάστηκε πανομοιότυπη με αυτή που παρουσιάστηκε στις συναφείς έρευνες στο προηγούμενο κεφάλαιο για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Ο πυθμένας της εξεταζόμενης περιοχής είναι επίπεδος με ομαλή κλίση περίπου 5% και μέγιστο βάθος στα 10 m. Οι ισοβαθείς είναι ευθύγραμμες και παράλληλες μεταξύ τους και με την ακτή. Η ακτή είναι ευθύγραμμη επίσης. Ο σχεδιασμός τους γίνεται σε πρώτο στάδιο με χρήση του λογισμικού AutoCad 2017 ανά 1 m βάθος. Έπειτα, με χρήση εφαρμογής γίνεται εξαγωγή των συντεταγμένων (x,y,z) των σημείων που αποτελούν τις ισοβαθείς και της ακτογραμμής με ακρίβεια 2 m. Στη συνέχεια γίνεται κατάλληλη επεξεργασία και εισάγονται σε αρχεία .xyz. Στη μορφή αυτή είναι αναγνώσιμα από το MIKE Zero. Σημειώνεται ότι για κάθε διάταξη δημιουργείται ξεχωριστό αρχείο .xyz το οποίο γίνεται συμβατό με την υπόλοιπη ακτογραμμή στο περιβάλλον του MIKE Zero. Στο Σχήμα 34 φαίνεται ολόκληρη η εξεταζόμενη περιοχή.

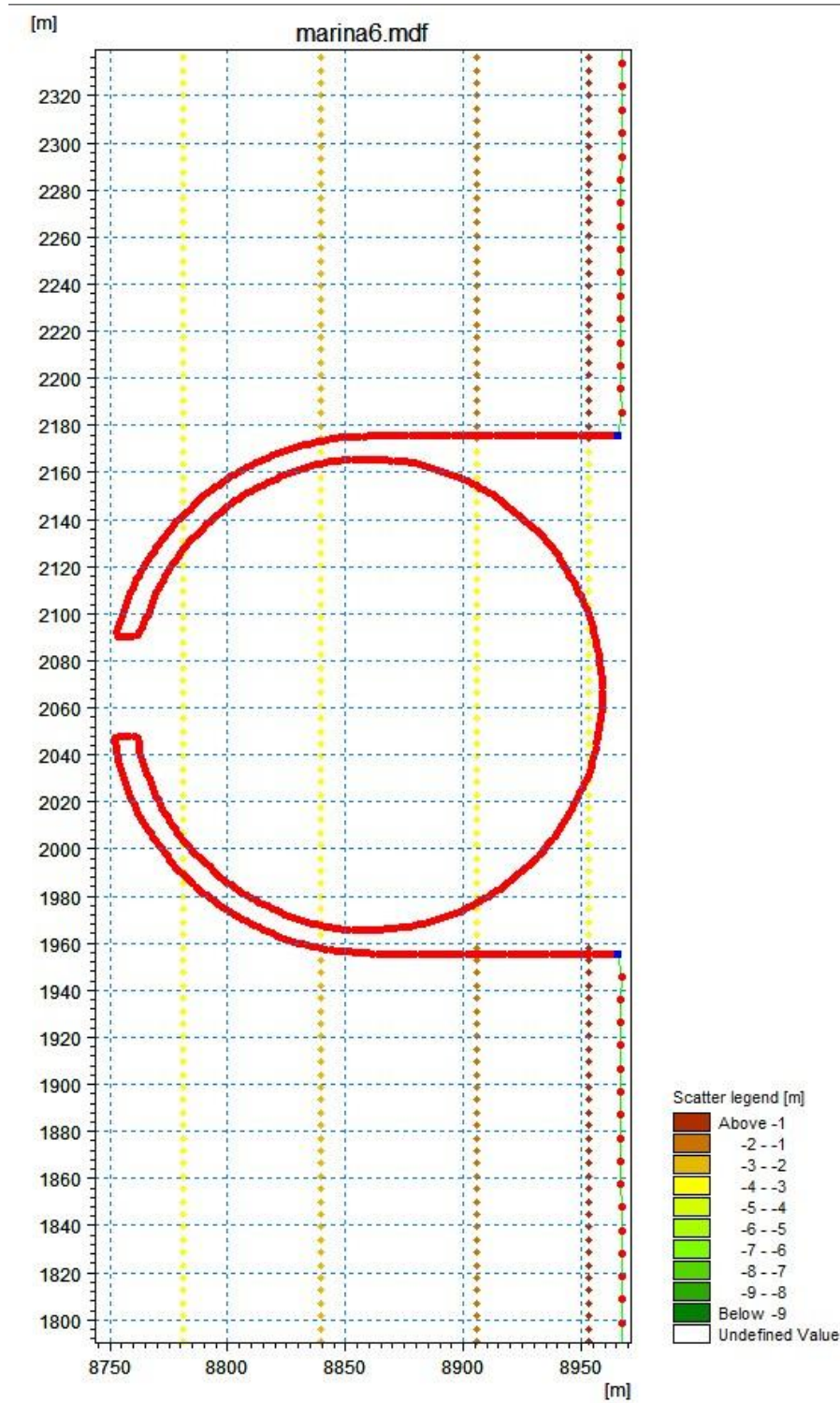


Σχήμα 34: Εξεταζόμενη περιοχή

## **5.5 Μεταβλητό πλέγμα**

Στο μοντέλο MIKE 21/3 Coupled Model FM η βαθυμετρία εισάγεται στο μοντέλο υπό μορφή μεταβλητού πλέγματος τριγωνικών στοιχείων (Flexible Mesh). Το πλέγμα αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιτύχει υψηλή ανάλυση σε περιοχές που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα δημιουργώντας στοιχεία μικρού εμβαδού. Σε περιοχές όπου δεν απαιτείται λεπτομερής ανάλυση διαμορφώνονται στοιχεία μεγαλύτερης επιφάνειας και παράλληλα περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό ο υπολογιστικός χρόνος. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα του μεταβλητού πλέγματος έναντι του ορθογωνικού καννάβου που χρησιμοποιείται σε άλλα μοντέλα (συναφείς έρευνες).

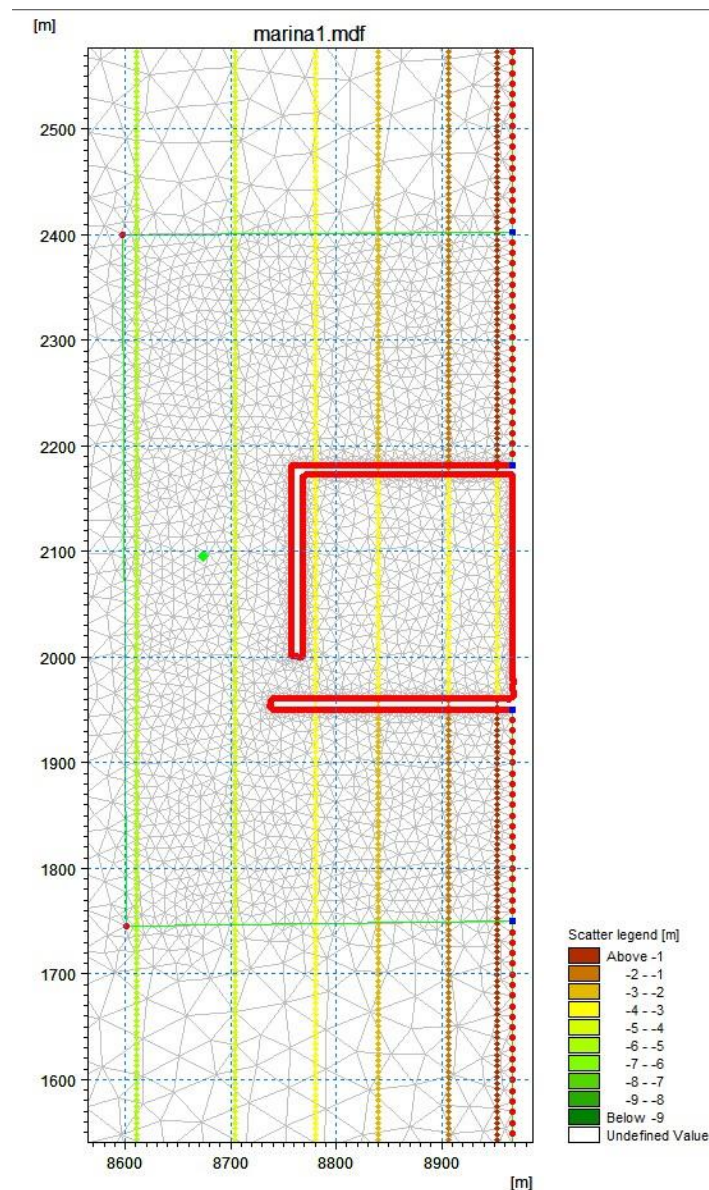
Τα αρχεία ακτής και ισοβαθών εισάγονται στο MIKE Mesh Generator. Το λογισμικό προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο. Το MIKE Mesh Generator είναι το εργαλείο του λογισμικού MIKE Zero το οποίο κατασκευάζει το αρχείο πλέγματος (Mesh file). Γίνεται αναδιανομή σημείων στη μαρίνα ανά 2 m και ανά 10 m στην ακτή ώστε να περιγράφονται με ακρίβεια τα καμπύλα τμήματα των μαρίνων. Στο Σχήμα 35 φαίνεται η πύκνωση των σημείων που περιγράφουν τα στοιχεία της μαρίνας 6.



Σχήμα 35: Αναδιανομή σημείων ανά 2 m στη Διάταξη 6

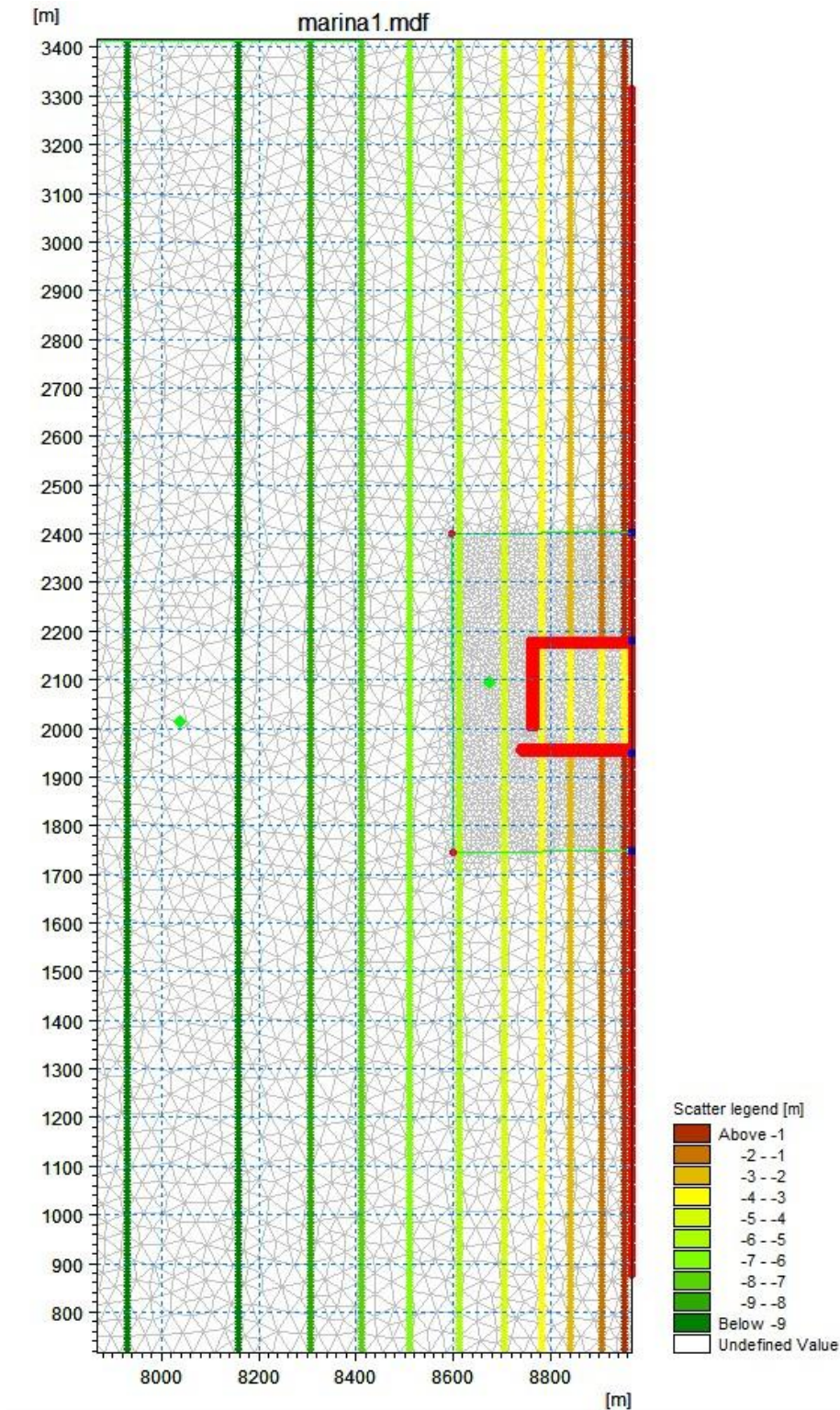
Στη συνέχεια ορίζεται το Βόρειο, Δυτικό, Νότιο και Ανατολικό σύνορο του μοντέλου. Υπάρχουν δύο τύποι συνόρων στο μοντέλο: σύνορο στεριάς (κλειστό) και ανοιχτά σύνορα εκτεθειμένα σε συνθήκες (μεταβολές ροής, κυματισμοί, επίπεδα στάθμη). Το Ανατολικό όριο καθορίζεται ως στεριά ενώ τα υπόλοιπα (Βόρειο, Δυτικό, Νότιο) ως ανοιχτά. Ο κάρναβος που

δημιουργείται είναι τριγωνικός. Στη συνέχεια διαχωρίζονται δύο περιοχές ενδιαφέροντος όπως φαίνεται στο Σχήμα 36. Στην πρώτη περιοχή κοντά στη μαρίνα επιδιώκεται βελτιωμένη ευκρίνεια αποτελέσματος ενώ η δεύτερη, που είναι η υπόλοιπη περιοχή μελέτης, παρουσιάζει μικρότερο ενδιαφέρον. Για τον λόγο αυτό γίνεται πύκνωση του κάρναβου με μέγιστη περιοχή ανά τρίγωνο 100 τετραγωνικά m κοντά στη μαρίνα. Η περιοχή στην οποία παρουσιάζονται τα φαινόμενα που χρήζουν διερεύνησης επιλέγεται 200 m εκατέρωθεν της μαρίνας και 400 m από την ακτογραμμή. Στην εξωτερική περιοχή γίνεται επιλογή κάρναβου με μέγιστη περιοχή ανά τρίγωνο 1000 m<sup>2</sup>.



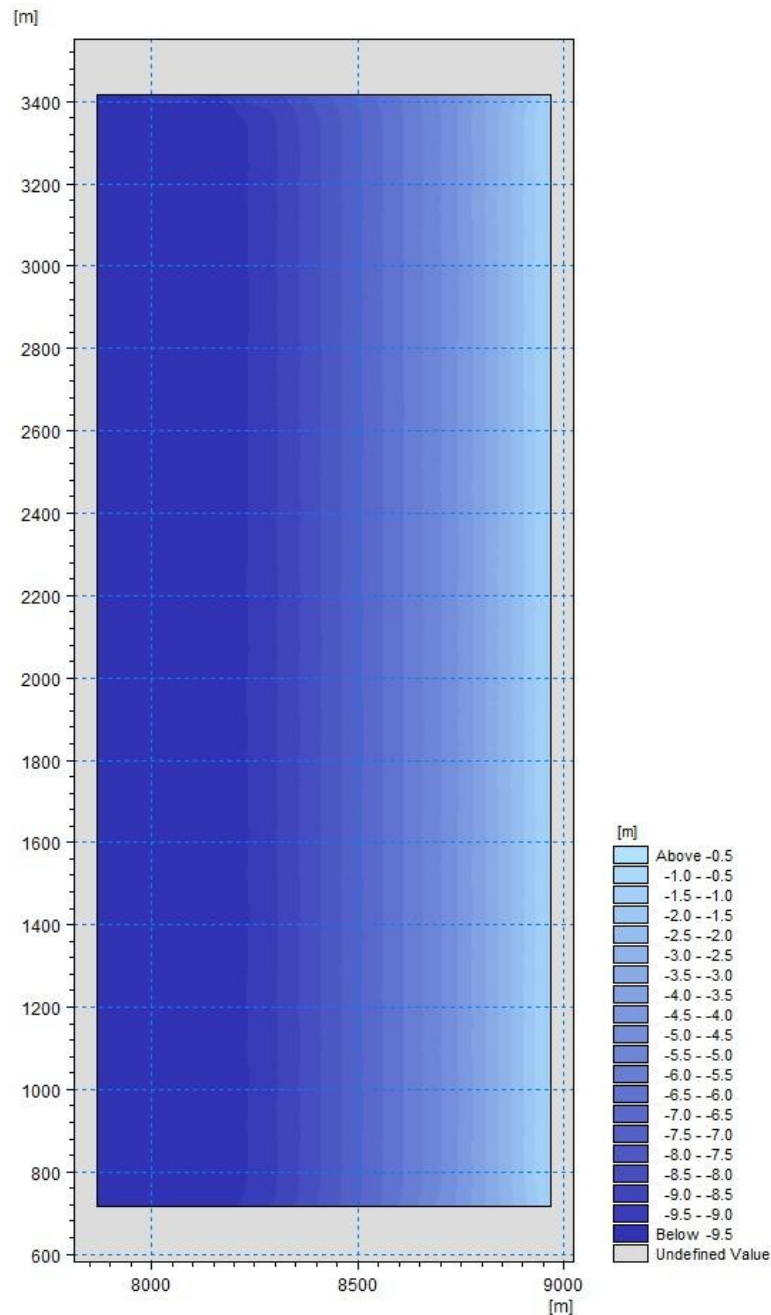
Σχήμα 36: Πύκνωση κάρναβου στην περιοχή ενδιαφέροντος

Αμέσως μετά παράγεται το πλέγμα και εξομαλύνεται ώστε να δημιουργηθούν ομοιόμορφα στοιχεία. Η εξομαλυντική διαδικασία δημιουργεί στοιχεία ούτε πολύ μικρά ούτε πολύ μεγάλα με επιτρεπτές γωνίες μεταξύ των πλευρών τους. Τα δύο πλέγματα που δημιουργήθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 37.



Σχήμα 37: Δημιουργία καννάβου στην περιοχή μελέτης

Η βαθυμετρία στην περιοχή μελέτης γίνεται με γραμμική παρεμβολή των σημείων των ισοβαθών που εισήχθησαν στο πρόγραμμα. Με δεδομένα τα σημεία αυτά παρεμβάλλονται τιμές βάθους για τα υπόλοιπα κελιά του κάναβου. Η τελική βαθυμετρία που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα φαίνεται στο Σχήμα 38. Η ισοδιάσταση των ισοβαθών είναι ανά 1 m. Τέλος εξάγονται δύο αρχεία, το πλέγμα .mesh και η βαθυμετρία .dfsu για να εισαχθούν στο λογισμικό προσομοίωσης MIKE 21.



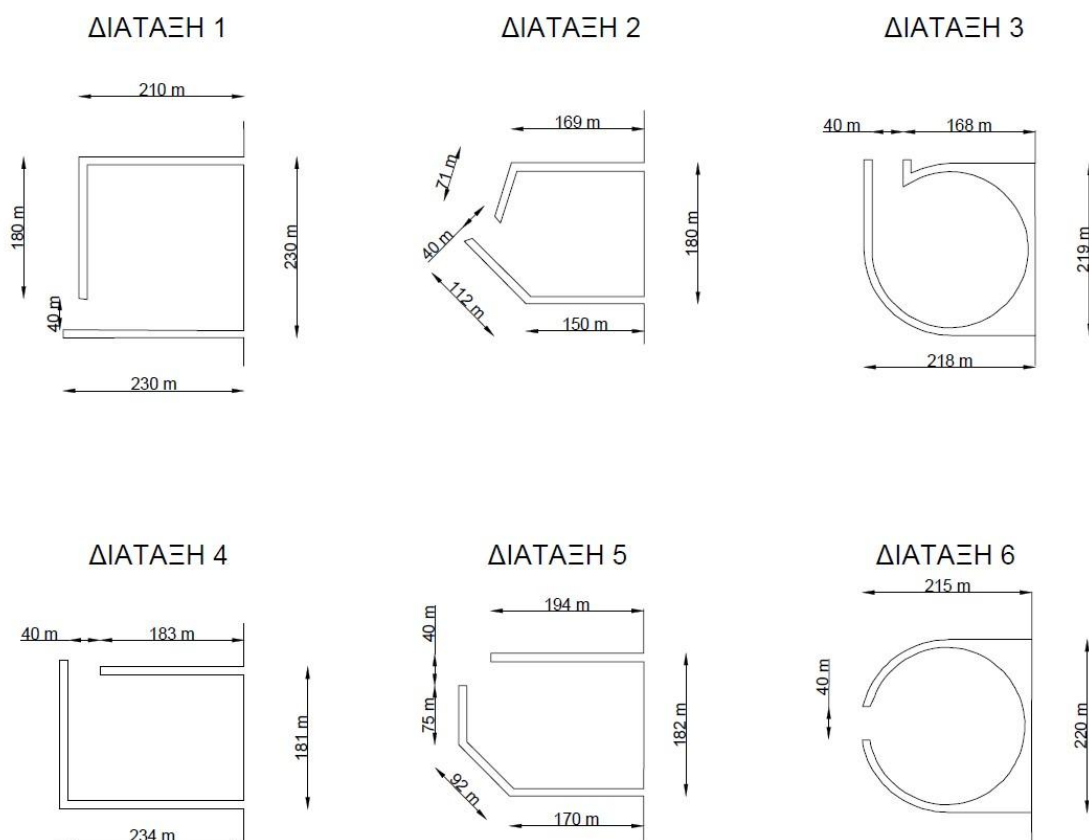
Σχήμα 38: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης



## 5.6 Διατάξεις μαρίνων

Οι πέντε διατάξεις έχουν ληφθεί ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομιώσεις του Μαυραντωνάκη (2013) ώστε να παραχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα. Σε αυτές προστέθηκε μια έκτη διάταξη με καμπύλα στοιχεία και την είσοδο της στο μέσο τους η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια. Αναφορικά με τη διάταξη των μαρίνων σε σχέση με τα κυματικά σενάρια επισημαίνεται ότι η Διάταξη 1 έχει την είσοδο της στην προσήνεμη πλευρά. Αυτό επιλέχθηκε με σκοπό να εξεταστεί η δυσμενέστερη περίπτωση. Παρόμοιες συνθήκες επικρατούν εν μέρει και στις διατάξεις 2, 5 και 6. Οι διατάξεις 3 και 4 έχουν την είσοδο τους προστατευμένη από τους επικρατούντες κυματισμούς. Συγκεκριμένα για τις διατάξεις 3 και 6 υπογραμμίζεται ότι πρόκειται για μη συμβατικό σχεδιασμό μαρίνας με σκοπό να εξεταστεί η επιρροή της καμπυλοειδούς γεωμετρίας του μώλου στο υδροδυναμικό πεδίο και τις συνθήκες στερεομεταφοράς της περιοχής.

Οι έξι εναλλακτικές διατάξεις που διερευνήθηκαν παρουσιάζονται σε κάτοψη στο Σχήμα 39 όπως ακριβώς σχεδιάστηκαν.



Σχήμα 39: Διαστάσεις διατάξεων

Όλες οι μαρίνες σχεδιάστηκαν αρχικώς ώστε να περιγράφουν κατά το δυνατόν ελληνικές μαρίνες με αντίστοιχη ικανότητα ελλιμενισμού, επιφάνεια και πλάτος ανοίγματος εισόδου. Οι έξι αυτές διατάξεις έχουν σημαντικές διαφορές ως προς τη γεωμετρία και την τοποθεσία της εισόδου τους. Αυτό συνέβη με σκοπό να διερευνηθεί πώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν τη στερεομεταφορά κοντά στην περιοχή των μαρίνων και στο εσωτερικό τους. Άλλες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές για όλες τις μαρίνες. Το πλάτος ανοίγματος εισόδου είναι σταθερό περί τα 40 m, το πλάτος σχεδιασμού των μώλων είναι 10 m, το βάθος σταθερό 4 m κατ'ελάχιστον και καθ' όλη την επιφάνεια της λιμενολεκάνης και η ικανότητα ελλιμενισμού παρόμοια. Για το σκάφος σχεδιασμού θεωρήθηκε ότι καταλαμβάνει 5 m κρηπιδώματος, το μέγιστο κατασκευαστικό ύψος του 2 m και η πληρότητα των μαρίνων περίπου 80%. Να σημειωθεί εδώ ότι οι μαρίνες 3 και 6 παρουσιάζουν δυσχέρεια στον ελλιμενισμό των σκαφών λόγω του εσωτερικού σχήματος τους. Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των έξι διατάξεων:

**Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά διατάξεων μαρίνων**

Διατάξεις μαρίνων	Πλάτος εισόδου [m]	Επιφάνεια λιμενολεκάνης [m <sup>2</sup> ]	Περίμετρος [m]	Ικανότητα ελλιμενισμού (Σκάφη)
Διάταξη 1	40.00	42500	811	129
Διάταξη 2	40.00	28750	640	102
Διάταξη 3	40.00	33000	680	108
Διάταξη 4	40.00	35800	747	119
Διάταξη 5	40.00	34200	678	108
Διάταξη 6	40.00	31050	585	94

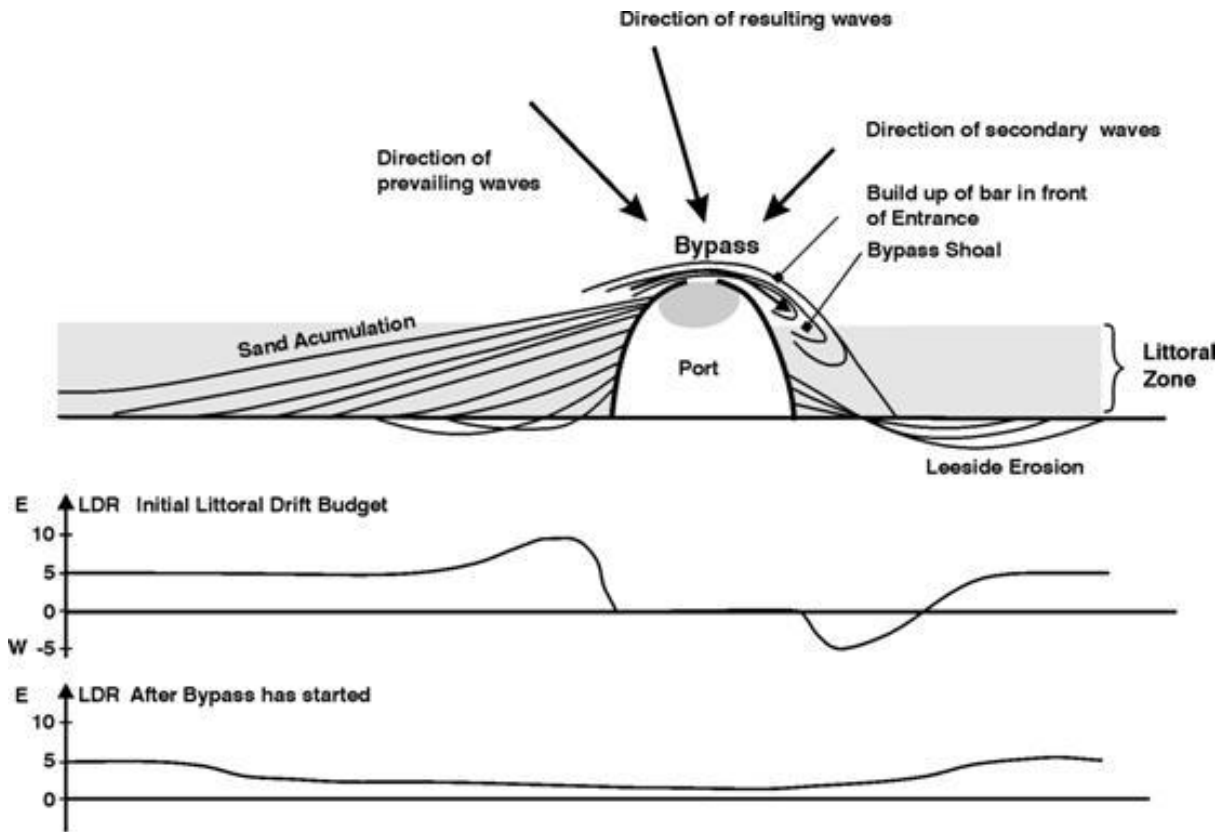
Οι μαρίνες όπως αναφέρθηκε παρουσιάζουν διαφορές ως προς τον σχεδιασμό τους. Αναλυτικότερα, η είσοδος των διατάξεων είναι:

- παράλληλες προς τις ισοβαθείς για τις διατάξεις 1 και 6

- κάθετη προς τις ισοβαθείς για τις διατάξεις 3 και 4
- υπό γωνία σε σχέση με τις ισοβαθείς για τις διατάξεις 2 και 5

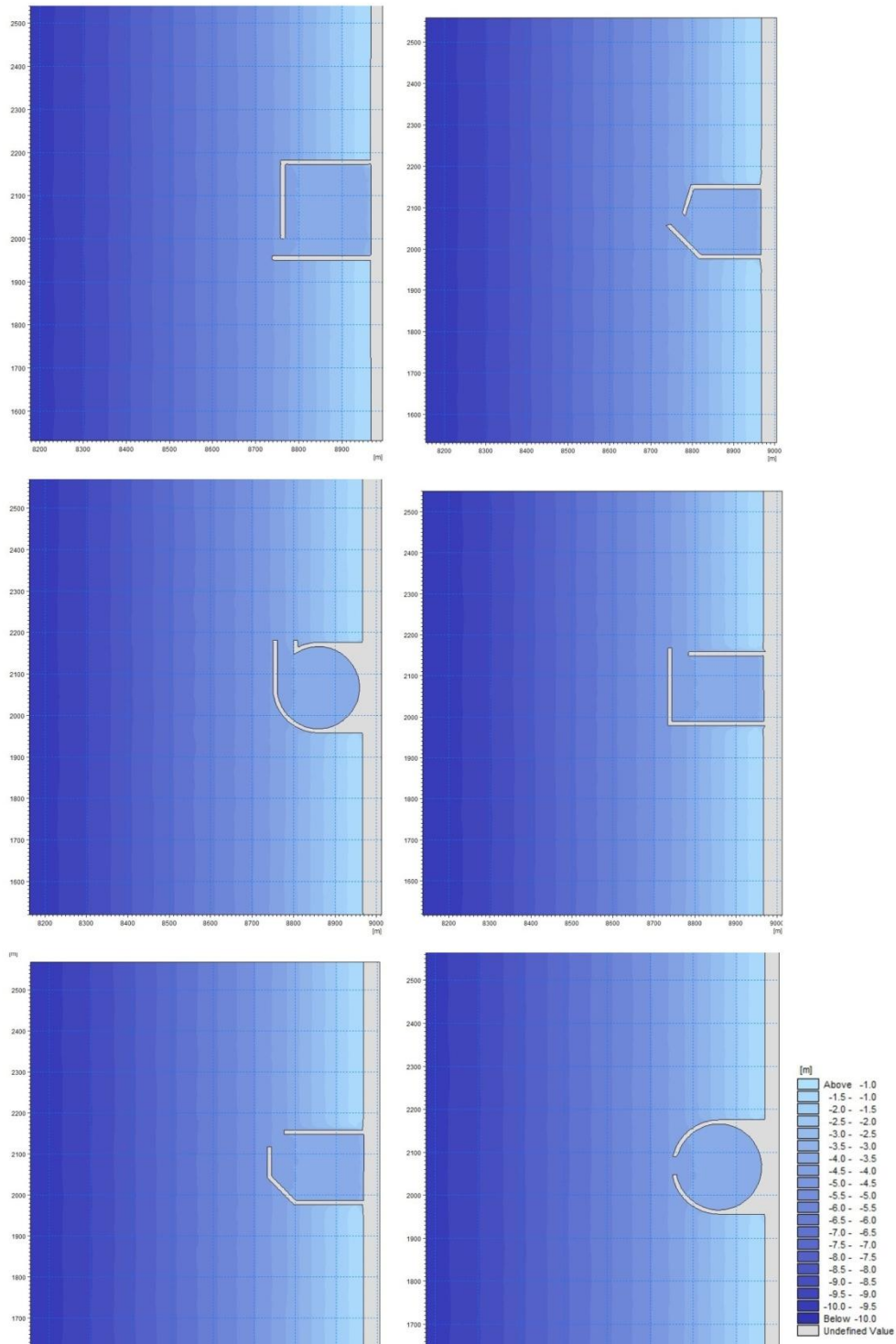
Επιπλέον, για όλες τις διατάξεις η είσοδος ικανοποιεί το κριτήριο του ελαχίστου βάθους των 4 m και συνεπώς δεν απαιτείται να γίνουν επιπλέον εκσκαφές. Το κριτήριο αυτό τίθεται ώστε να εισέρχονται τα σκάφη χωρίς πρόβλημα στη μαρίνα. Σε ορισμένη επιφάνεια, στο βαθύτερο μέρος των μαρίνων, κοντά στον προσήνεμο μώλο τους δεν χρειάζεται βυθοκόρηση καθώς το βάθος είναι ήδη μεγαλύτερο από το ελάχιστο απαιτούμενο.

Η έκτη μαρίνα προστέθηκε για να διερευνηθεί σε σχέση με τις υπόλοιπες καθώς αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως η βέλτιστη σχετικά με τις επιπτώσεις που προκαλεί στις παράκτιες διεργασίες. Συγκεκριμένα υποστηρίζεται πως παρόλο που η συσσώρευση ιζήματος στα ανάντη και η διάβρωση κατάντη των λιμενικών έργων είναι αναπόφευκτη, η διάταξη αυτή συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση και την καθυστέρηση της εξέλιξης των φαινομένων αυτών. Η αναπαράσταση των συνθηκών στερεομεταφοράς για τη Διάταξη 6 φαίνεται στο Σχήμα 40. Το κυματικό σενάριο που παρουσιάζεται είναι για μικρή έως μέτρια γωνία πρόσπτωσης. Στην αρχική κατάσταση εντοπίζονται προσαμμώσεις στο Δυτικό μέρος της περιοχής και απώλεια ιζήματος στο Ανατολικό μέρος της ακτής. Η βελτίωση της κατάστασης πραγματοποιείται με την ανάπτυξη μιας γραμμής παράκαμψης (bypass) μπροστά από την είσοδο της διάταξης η οποία απελευθερώνει το συσσωρευμένο ίζημα στα ανάντη και τροφοδοτεί με αυτό την κατάντη περιοχή.



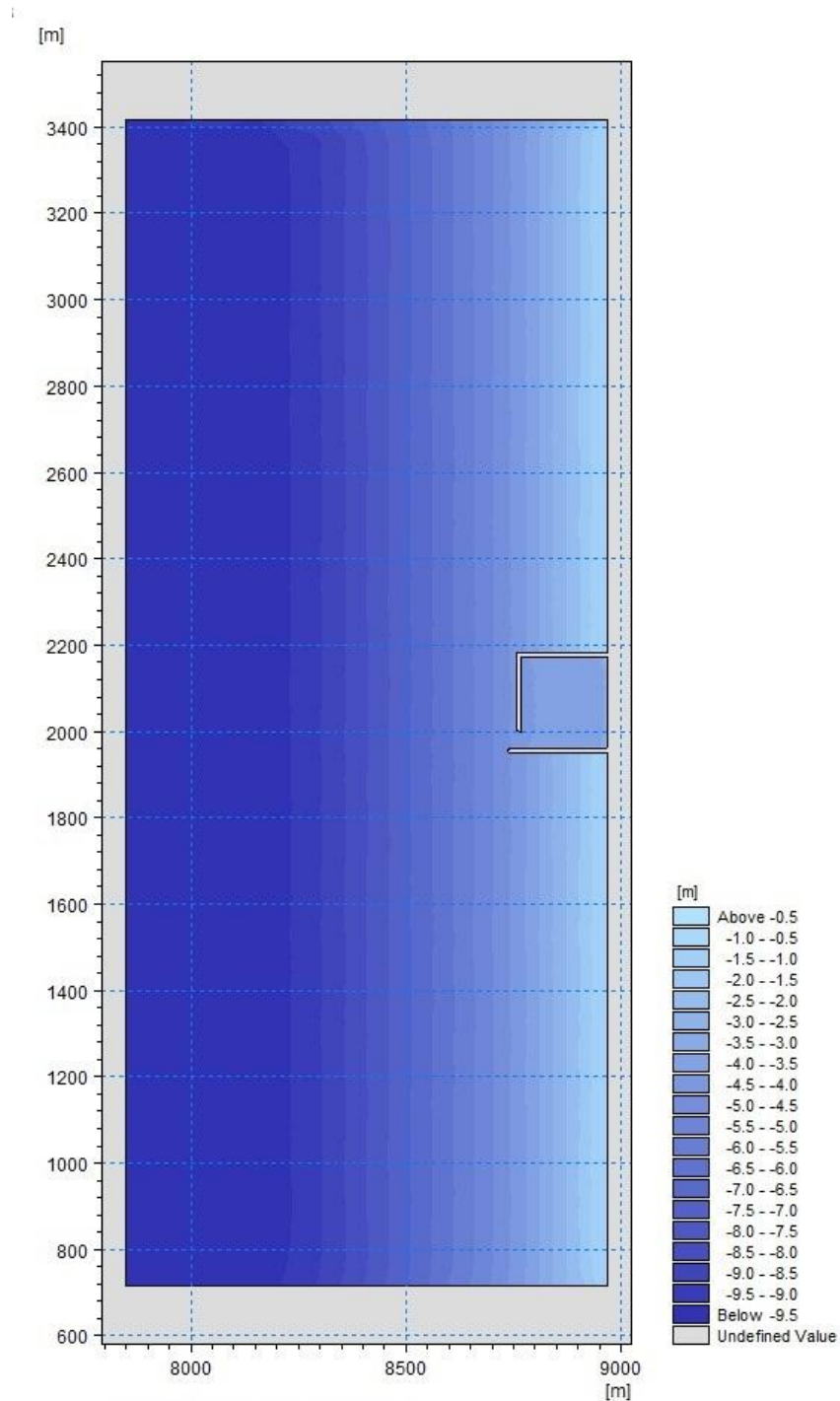
Σχήμα 40: Παράκτιες διεργασίες στην περιοχή κοντά στη Διάταξη 6 (Mangor, 2004)

Σε δεύτερη φάση οι διατάξεις εισάγονται στο περιβάλλον MIKE. Σημειώνεται εδώ ότι τα στοιχεία των διατάξεων είναι ομοιόμορφα και δεν επηρεάζει το υλικό κατασκευής τους τους υπολογισμούς. Οι διατάξεις σχεδιάζονται στο μέσο της περιοχής μελέτης. Αφού εισήχθησαν στο πρόγραμμα, συνδέθηκαν με την υπόλοιπη ακτογραμμή έτσι ώστε να βρίσκονται κατά το δυνατόν στο μέσο της περιοχής. Τονίζεται ότι η επιλογή της βαθυμετρίας, η δημιουργία του κάρναβου και η κατάλληλη τοποθέτηση της μαρίνας στην περιοχή μελέτης είναι μείζονος σημασίας για την επιτυχία της προσομοίωσης. Οι διατάξεις φαίνονται στο Σχήμα 41 στο πρόγραμμα MIKE Zero ύστερα από παρεμβολή και δημιουργία βαθυμετρίας.



Σχήμα 41: Διατάξεις μαρίνων στο πρόγραμμα MIKE Zero

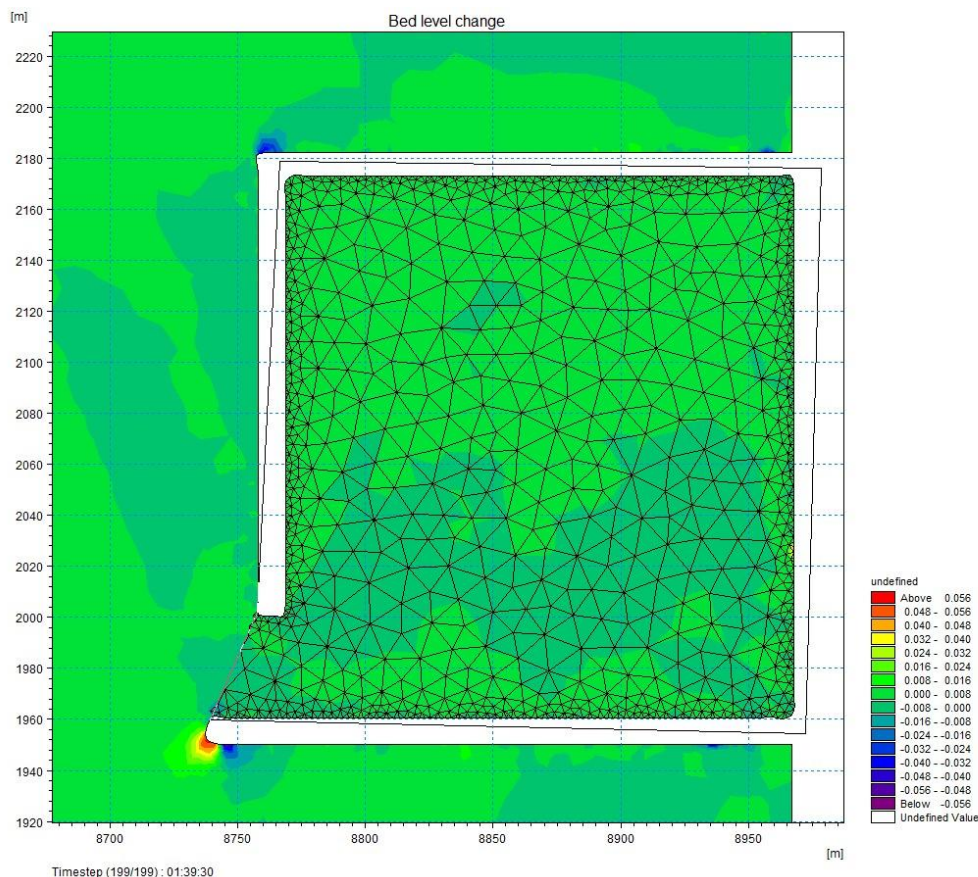
Στο Σχήμα 42 απεικονίζεται η Διάταξη 1 σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης που εισάγεται στο μοντέλο. Η διάταξη είναι τοποθετημένη στο μέσο της ακτής, περί τα 1900 με 2200 m όπως και όλες οι υπόλοιπες διατάξεις.



Σχήμα 42: Διάταξη 1 στην περιοχή μελέτης

## 5.7 Υπολογισμός ιζηματικού ισοζυγίου στο εσωτερικό

Στο εδάφιο αυτό, περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των συνθηκών προσαμμόσεων και διάβρωσης στο εσωτερικό των διατάξεων. Το βήμα αυτό πραγματοποιείται μετά την υλοποίηση των προσομοιώσεων. Για τη διερεύνηση της μεταβολής του πυθμένα της λιμενολεκάνης γίνεται επαλληλία κυματικών σεναρίων. Συγκεκριμένα επιλέγονται το 1<sup>ο</sup> και 2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο. Γίνεται η υπόθεση ότι το 75% του χρόνου επικρατεί το 1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{rms} = 2 \text{ m}$ ,  $T_p = 6 \text{ s}$ ,  $\theta = 45^\circ$ ) και στο υπόλοιπο 25% του χρόνου το 2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{rms} = 2.5 \text{ m}$ ,  $T_p = 6.5 \text{ s}$ ,  $\theta = 10^\circ$ ). Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου MIKE ST για το Bed level change τα οποία προβλήθηκαν μέσω του προγράμματος MIKE Data Manager. Στο περιβάλλον προγράμματος επιλέχθηκε για κάθε μαρίνα το εσωτερικό της έως την εξωτερική παρειά του προσήνεμου και υπήνεμου μώλου. Η περιοχή που εξετάστηκε στις μαρίνες φαίνεται στο Σχήμα 43 για τη Διάταξη 1 και είναι αντιπροσωπευτική για τις υπόλοιπες.



Σχήμα 43: Επιλογή και κατάτμηση της επιφάνειας εντός της λιμενολεκάνης σε τριγωνικά στοιχεία

## 6 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE21

### 6.1 Εισαγωγή

Το MIKE 21 Coupled Model FM (Flexible Mesh) του Danish Hydraulic Institute (DHI) χρησιμοποιήθηκε για τη μορφοδυναμική διερεύνηση στην περιοχή μελέτης. Το αριθμητικό μοντέλο αποτελεί ένα συνολικό δυναμικό σύστημα μοντελοποίησης και παρέχει τη δυνατότητα σύζευξης πολλαπλών λογισμικών μονάδων (modules). Στο πλαίσιο της παρούσας επιλέχθηκε η σύζευξη των παρακάτω: (i) του κυματικού μοντέλου Spectral Wave Module (SW), (ii) του υδροδυναμικού μοντέλου Hydrodynamic Module (HD) και (iii) του μοντέλου στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων Sand Transport Module (ST). Το κυματικό και το υδροδυναμικό μοντέλο αποτελούν τις δύο βασικές υπολογιστικές μονάδες του MIKE 21 Coupled Model FM με τις οποίες γίνεται η προσομοίωση της διάδοσης των κυματισμών και των παράκτιων ρευμάτων. Χρησιμοποιώντας το MIKE 21 Coupled Model FM είναι δυνατή η προσομοίωση της κοινής αλληλεπίδρασης μεταξύ κυμάτων και ρευμάτων με τη χρήση δυναμικού συσχετισμού μεταξύ το υδροδυναμικού και του κυματικού μοντέλου. Με τη χρήση του μοντέλου της στερεομεταφοράς γίνεται εκτίμηση της στερεομεταφοράς στην παράκτια ζώνη καθώς και της μεταβολής της στάθμης του πυθμένα λόγω διάβρωσης ή απόθεσης. Επιπλέον, το μοντέλο της στερεομεταφοράς δίνει τη δυνατότητα να συμπεριληφθούν οι μεταβολές της μορφολογίας του πυθμένα στους υπολογισμούς των υδροδυναμικών και κυματικών συνθηκών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Έτσι παρατηρείται μια πλήρη διαδικασία ανατροφοδότησης από τη μεταβολή του πυθμένα στους κυματισμούς και τους υπολογισμούς των ρευμάτων.



## 6.2 Φασματικό Μοντέλο Διάδοσης Κυματισμών - Spectral Wave Module (SW)

### 6.2.1 Γενική περιγραφή

Ο υπολογισμός του παράκτιου κυματικού πεδίου στην περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε με εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου MIKE 21 SW (Spectral Waves), ενός μέσου ανάλυσης νέας γενιάς ανεμογενών κυματισμών βασισμένο σε μεταβλητό πλέγμα του Danish Hydraulic Institute (DHI).

Το μαθηματικό μοντέλο MIKE 21 SW περιγράφει την πρόβλεψη της γένεσης, της απόσβεσης και του μετασχηματισμού των ανεμογενών κυματισμών (sea state και swell) σε ανοιχτές ή κλειστές θάλασσες, στην ακτή ή μακριά από αυτή, ανεξαρτήτως μεγέθους, βυθομετρίας ή γεωγραφικής κατάτμησης. Εφαρμογές πρόβλεψης των κυματικών συνθηκών και της αντίστροφης διαδικασίας (hindcast) μπορούν να γίνουν τόσο σε μακροχρόνια όσο και σε βραχυχρόνια κλίμακα. Το πεδίο εφαρμογής του εκτείνεται από την ωκεάνια κλίμακα μέχρι και την παράκτια ζώνη.

Το μαθηματικό μοντέλο MIKE 21 SW χρησιμοποιείται επίσης σαν ενδιάμεσο υπολογιστικό μέσο για την πρόβλεψη της στερεομεταφοράς ιζημάτων που βασίζεται στην πρόβλεψη κυματισμών, ρευμάτων και πυθμενικών επιφανειακών τάσεων κοντά σε ακτογραμμές.

Το μαθηματικό μοντέλο περιλαμβάνει δύο εναλλακτικές μαθηματικές διατυπώσεις:

- Μη-συζευγμένη κατευθυντική παραμετρική ανάλυση
- Ανάλυση πλήρους φάσματος

Η μέθοδος της μη συζευγμένης κατευθυντικής παραμετρικής ανάλυσης βασίζεται στην παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής ενέργειας. Η παραμετροποίηση πραγματοποιείται στο πεδίο της συχνότητας, εισάγοντας τα αρχικά βήματα του κυματικού φάσματος ως εξαρτημένες μεταβλητές, κατά Holthuijsen (1989).

Η ανάλυση πλήρους φάσματος βασίζεται στην εξίσωση διατήρησης της κυματικής ενέργειας, όπως περιγράφεται από τους Komen et al. (1994) [1] και Young (1999).

Οι βασικές εξισώσεις διατυπώνονται σε καρτεσιανές συντεταγμένες για μικρής κλίμακας εφαρμογές ή σε σφαιρικές συντεταγμένες για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές.

Το μοντέλο MIKE 21-SW προσομοιώνει τα ακόλουθα φυσικά φαινόμενα:

- Ανάπτυξη κυματισμών και ρεστίας από τη δράση του ανέμου
- Μη-γραμμική αλληλεπίδραση κυμάτων
- Απόσβεση της κυματικής ενέργειας λόγω της επιφανειακής θραύσης κυματισμών (white-capping)
- Απόσβεση της κυματικής ενέργειας λόγω της τριβής στον πυθμένα
- Απόσβεση της κυματικής ενέργειας λόγω θραύσης κυματισμών στα ρηχά
- Διάθλαση και ρήχωση λόγω βαθυμετρίας
- Αλληλεπίδραση κύματος-ρεύματος
- Επίδραση της χρονικής μεταβολής της μέσης στάθμης της θάλασσας (flooding-drying)
- Επίδραση του χρονικά μεταβαλλόμενου βάθους

Η διακριτοποίηση της εξίσωσης διατήρησης της ενέργειας στο χωρικό και φασματικό πεδίο γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων. Στην περιοχή μελέτης, η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται με χρήση μιας τεχνικής ευέλικτου πλέγματος. Η χρονική ολοκλήρωση πραγματοποιείται με μία μέθοδο πολλαπλού βήματος (Booij et al 1999).

Το μοντέλο MIKE 21 SW χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη πρόβλεψη των κυματικών συνθηκών στα «ανοικτά» και κοντά στην ακτή, με χρήση αραιού και πυκνωμένου καννάβου, προσαρμοσμένου στην ακτογραμμή και τη βαθυμετρία. Το μοντέλο βαθμονομείται με διαθέσιμες μετρήσεις ανέμων, κυμάτων και παλιρροιών.

Τα δεδομένα υπολογισμών του μαθηματικού μοντέλου MIKE 21 SW έχουν ως ακολούθως:

#### α) Βαθυμετρία

Εισάγονται τα διαθέσιμα στοιχεία βαθυμετρίας της περιοχής μελέτης ώστε να περιλαμβάνονται όλες οι διαδρομές και διευθύνσεις ανάπτυξης κυματισμών που προσπίπτουν στην περιοχή του έργου. Επίσης εισάγεται η μορφή της ακτογραμμής και των έργων. Με βάση αυτά τα στοιχεία συντίθενται το σύστημα συντεταγμένων και ο υπολογιστικός κάνναβος του υπό μελέτη έργου.

#### β) Ανεμολογικά δεδομένα

Τα διαθέσιμα ανεμολογικά στοιχεία αναλύονται στατιστικά για να προσδιοριστεί με αποδεκτό επίπεδο εμπιστοσύνης, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Επίσης προσεγγίζεται στατιστικά η διάρκεια πνοής ανέμου (προσομοίωσης).

#### γ) Στοιχεία παλιρροιών

Αναλύονται τα στοιχεία από τον εγγύτερο παλιρροιογράφο.

δ) Στοιχεία ρευμάτων

Αναλύονται τα διαθέσιμα στοιχεία ρευμάτων.

Στη συνέχεια καθορίζεται ο τύπος της μαθηματικής διατύπωσης όπως και η τεχνική διακριτοποίησης και επίλυσης στο πεδίο συχνοτήτων και κατεύθυνσης κυματισμού. Καθορίζονται επίσης οι εσωτερικές αριθμητικές παράμετροι και συντελεστές για την προσέγγιση της μη γραμμικής μεταφοράς ενέργειας, της απώλειας κυματικής ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών στα βαθιά και ρηχά νερά και της τριβής στον πυθμένα. Τέλος καθορίζονται οι αρχικές κυματικές συνθήκες, όπως και οι συνθήκες στα κλειστά και ανοιχτά όρια του υπολογιστικού καννάβου.

### 6.2.2 Βασικές εξισώσεις υπολογισμού

Η βασική εξίσωση που περιγράφει τη διάδοση των επιφανειακών κυματισμών στο φασματικό κυματικό μοντέλο είναι η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης. Η χωρική και χρονική μεταβολή του φάσματος είναι συνάρτηση δύο παραμέτρων που σχετίζονται με τη φάση του κύματος και συγκεκριμένα, της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος  $\theta$ , και της σχετικής γωνιακής συχνότητας  $\sigma = 2 \pi f$ .

Η πυκνότητα δράσης σχετίζεται με την ενεργειακή πυκνότητα μέσω της εξίσωσης (6.1):

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (6.1)$$

Το φάσμα των κυματισμών διακριτοποιείται μεταξύ μιας ελάχιστης ( $\sigma_{\min}$ ) και μιας μέγιστης ( $\sigma_{\max}$ ) συχνότητας. Στη συνέχεια γίνεται ο διαχωρισμός σε ένα αιτιοκρατικό τμήμα για συχνότητες μικρότερες από μια καθορισμένη τιμή (cut-off frequency) και σε ένα αναλυτικό τμήμα για συχνότητες μεγαλύτερες αυτής της τιμής. Η cut-off frequency καθορίζεται με δυναμικό τρόπο από τις ανεμολογικές συνθήκες και τη μέση συχνότητα του φάσματος ως εξής:

$$\sigma_{cut-off} = \min [\sigma_{max}, \max(2.5\bar{\sigma}, 4\sigma_{PM})] \quad (6.2)$$

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

Η ενεργειακή πυκνότητα δράσης περιγράφεται τελικώς από την εξίσωση (6.3):

$$E(\sigma, \theta) = E(\sigma_{max}, \theta) \left( \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \right)^{-m} \quad (6.3)$$

Όπου στο παρόν μοντέλο η σταθερά  $m$  λαμβάνει την τιμή 5.

Η εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης επιλύεται σε καρτεσιανές (Komen et. al., 1994) ή σε σφαιρικές συντεταγμένες (Young, 1999). Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστούν οι σχέσεις που αναφέρονται στη διάδοση κυματισμών σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (6.4)$$

Όπου  $N(x,y,t,\theta,\sigma)$  είναι το φάσμα της πυκνότητας δράσης,  $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\theta, c_\sigma)$  η ταχύτητα διάδοσης μιας ομάδας κυματισμών σε χώρο τεσσάρων διαστάσεων  $(x,y,\theta,\sigma)$  και  $S$  οι όροι πηγής που συμμετέχουν στην ισορροπία της κυματικής ενέργειας.

Στην εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης (6.5) συμμετέχουν αθροιστικά οι φυσικές διεργασίες που προσομοιώνονται από το μοντέλο MIKE 21 SW ως εξής:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (6.5)$$

Όπου:

$S_{in}$ : Ο όρος γένεσης κυματισμών από τη δράση του ανέμου

$S_{nl}$ : Μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κυματισμών

$S_{ds}$  : Απόσβεση λόγω white-capping

$S_{bot}$  : Απόσβεση λόγω τριβής πυθμένα

$S_{surf}$  : Απόσβεση ενέργειας μέσω θραύσης λόγω βαθυμετρικής αλλαγής

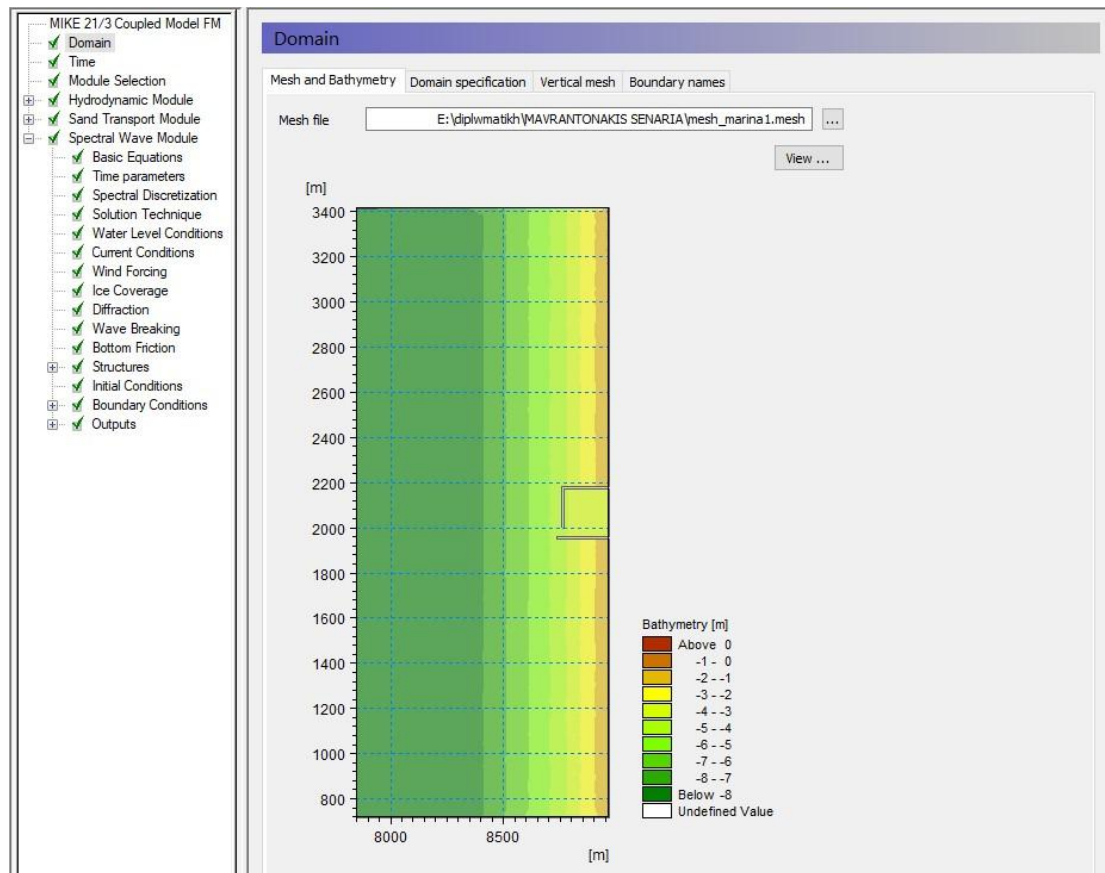
### Διακριτοποίηση υπολογιστικού πεδίου και οριακές συνθήκες

Οι υπολογισμοί του MIKE 21 SW πραγματοποιούνται σε ευέλικτο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (flexible mesh). Για την επίλυση των διακριτοποιημένων εξισώσεων στο χώρο και στο χρόνο χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (cell-centered finite volume method). Τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να είναι πολύγωνα συνήθως όμως χρησιμοποιούνται τριγωνικά στοιχεία τριών κόμβων. Η πυκνότητα της κυματικής δράσης διατηρείται σταθερή τμηματικά και αποθηκεύεται στο κέντρο βάρους του κάθε στοιχείου.

#### 6.2.3 Εφαρμογή μοντέλου

##### Περιοχή μελέτης

Για την εφαρμογή του μοντέλου MIKE 21 SW καθορίζονται όλες οι παράμετροι της προσομοίωσης που απαιτούνται από αυτό. Απαραίτητη είναι η κατασκευή του ευέλικτου πλέγματος μέσω του προγράμματος MIKE ZERO όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο Σχήμα 44 παρουσιάζεται το παράθυρο καθορισμού των παραμέτρων της προσομοίωσης που απαιτούνται από το MIKE 21 SW.



Σχήμα 44: Παράθυρο καθορισμού παραμέτρων του μοντέλου MIKE 21 SW

Εισάγεται η βαθυμετρία στο μοντέλο και στη συνέχεια επιλέγεται η προσομοίωση σε δύο διαστάσεις.

### Μέθοδος επίλυσης

Ως τεχνική επίλυσης επιλέγεται η τροποποιημένη προσεγγιστική μέθοδος Newton-Raphson. Ο χρόνος και η ακρίβεια της προσομοίωσης ελέγχεται επιλέγοντας την τάξη των αριθμητικών συστημάτων που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς. Επιλέγεται το χαμηλότερης τάξης σύστημα (πρώτης τάξης) το οποίο είναι λιγότερο ακριβές αλλά εκτελείται γρηγορότερα.

## Συνθήκες επιφάνειας νερού

Η στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας καθορίζεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Καμία μεταβολή της στάθμης
- Καθορισμένη μεταβολή της στάθμης
- Μεταβολή της στάθμης από την υδροδυναμική (HD) προσομοίωση

Η τελευταία επιλογή, που χρησιμοποιείται και στην προσομοίωση, είναι δυνατή μόνο με τη χρήση του MIKE 21/3 Coupled Model FM εφόσον έχει επιλεγθεί η υδροδυναμική προσομοίωση (HD).

## Συνθήκες ρεύματος

Με την παρουσία πεδίου ρευμάτων η κυματική δράση διατηρείται ενώ η κυματική ενέργεια μεταβάλλεται. Η κύρια επίδραση του ρεύματος στο κύμα είναι ότι η ταχύτητα ρεύματος λαμβάνεται υπόψιν στον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης της κυματικής δράσης. Επιπλέον, προβλέπεται η επίδραση του ρεύματος στις συναρτήσεις πηγής. Οι συνθήκες ρεύματος μπορούν να καθοριστούν με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Καθόλου ρεύμα
- Καθορισμένη μεταβολή ρεύματος
- Μεταβολή ρεύματος από την υδροδυναμική (HD) προσομοίωση

Να τονισθεί πως επιλέγεται η τελευταία εναλλακτική καθώς και εδώ είναι δυνατή μόνο με τη χρήση του MIKE 21/3 Coupled Model FM εφόσον έχει επιλεγθεί η υδροδυναμική προσομοίωση (HD).

## Δυνάμεις ανέμου

Οι δυνάμεις ανέμου μπορούν να καθοριστούν με τρεις τρόπους:

- Καθόλου άνεμος
- Άνεμος, ταχύτητα και κατεύθυνση
- Άνεμος, συνιστώσες ταχύτητας

Εκλέγεται η πρώτη εναλλακτική αφού πρόκειται για ιδεατή περιοχή χωρίς ανέμους.

### Θραύση κυματισμών

Στο εδάφιο αυτό περιγράφεται ο υπολογισμός της θραύσης (Wave breaking). Το φαινόμενο της θραύσης προκαλείται από την υδροδυναμική αστάθεια των κυματισμών. Συγκεκριμένα στην ανοιχτή θάλασσα η αστάθεια αυτή εκφράζεται με μια κρίσιμη τιμή της καμπυλότητας ( $H/L$ ) ενώ στα ρηχά με μια κρίσιμη τιμή του λόγου του ύψους κύματος προς το βάθος του νερού ( $H/d$ ).

Η θραύση κυματισμών στα ρηχά στο φασματικό κυματικό μοντέλο MIKE 21 SW βασίζεται στο μοντέλο των Battjes και Janssen (1978). Οι Eldeberky και Battjes (1995) πρότειναν μια φασματική εκδοχή του μοντέλου θραύσης, όπου το φασματικό σχήμα δεν επηρεαζόταν από τη θραύση.

Η βασική εξίσωση της θραύσης στα ρηχά είναι:

$$S_{surf}(\sigma, \theta) = \frac{\alpha Q_b \bar{\sigma} H_m^2 E(\sigma, \theta)}{8\pi E_{tot}} \quad (6.6)$$

Όπου  $\alpha \approx 1.0$  σταθερά βαθμονόμησης,  $Q_b$  το ποσοστό των θραυόμενων κυματισμών,  $\bar{\sigma}$  η μέση σχετική συχνότητα,  $E_{tot}$  η συνολική κυματική ενέργεια και  $H_m = \gamma d$  το μέγιστο ύψος κύματος. Το  $\gamma$  είναι ο λόγος ύψους κύματος προς το βάθος του νερού.

Η παράμετρος Gamma καθορίζεται με τρεις τρόπους:

- Καθορισμένη τιμή Gamma
- Συναρτησιακή μορφή (Ruessink et. at. 2003)
- Συναρτησιακή μορφή (Nelson (1987, 1994))



Επιλέγεται ο καθορισμός της τιμής της παραμέτρου Gamma και να παραμένει σταθερή σε καθ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης ίση με 0.8.

Η παράμετρος Alpha ελέγχει τον ρυθμό διάχυσης και είναι αναλογικός συντελεστής στη βασική συνάρτηση θραύσης. Επιλέγεται η προεπιλεγμένη τιμή ίση με 1.0.

Η παράμετρος Gamma που αφορά την καμπυλότητα των κυμάτων χρησιμοποιείται μόνο στην επιλεγμένη μη-συζευγμένη κατευθυντική παραμετρική ανάλυση και αφήνεται η προεπιλεγμένη τιμή 1.0.

Η επιλογή της τιμής της παραμέτρου Gamma έγινε με βάση τους Kaminsky και Kraus (1993) οι οποίοι βρήκαν ότι οι τιμές της  $\gamma$  παίρνουν τιμές στο διάστημα μεταξύ 0.6 και 1.59 με μέση τιμή 0.79. Αύξηση των παραμέτρων Gamma και Alpha οδηγεί στη μείωση της διάχυσης της ενέργειας των κυματισμών. Η προεπιλεγμένη τιμή για την παράμετρο Gamma που αφορά την καμπυλότητα των κυμάτων είναι κατάλληλη για το μοντέλο καθώς δεν περιλαμβάνεται άνεμος.

### Τριβή πυθμένα

Η βασική συνάρτηση αλληλεπίδρασης κύματος-πυθμένα γίνεται σημαντική καθώς ο κυματισμός προσεγγίζει τα ρηχά νερά και οι κυκλικές τροχιές των σωματιδίων του νερού διεισδύουν στον πυθμένα. Η βασική εξίσωση διάχυσης της κυματικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στο φασματικό κυματικό μοντέλο βασίζεται στον τετραγωνικό νόμο τριβής και στη γραμμική κυματική κινηματική θεωρία.

Η τριβή του πυθμένα καθορίζεται στο μοντέλο με πέντε τρόπους:

- Καθόλου τριβή του πυθμένα
- Συντελεστής τριβής,  $C_{fw}$
- Παράγοντας τριβής,  $f_w$
- Τραχύτητα Nikuradse,  $k_N$
- Μέγεθος κόκκου άμμου,  $d_{50}$

Επιλέχθηκε η τραχύτητα Nikuradse σταθερή σε όλη την περιοχή μελέτης και ίση με την προεπιλεγμένη τιμή 0.04.

Συμπεριλήφθηκε στην προσομοίωση και η επίδραση της απώλειας ενέργειας λόγω τριβής στον πυθμένα στη μέση κυματική συχνότητα καθώς προτείνεται εμπειρικά στη μη-συζευγμένη κατευθυντική παραμετρική ανάλυση. Η διάχυση κυματικής ενέργειας λόγω πυθμένα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέσης περιόδου το κύματος.

### Συνοριακές συνθήκες

Η επιλογή των συνοριακών συνθηκών είναι ιδιαίτερης σημασίας για την επιτυχία της προσομοίωσης. Το μοντέλο σαρώνει το αρχείο πλέγματος και απεικονίζει τους αναγνωρισμένους κώδικες κάθε συνόρου. Στην παρούσα έρευνα η διαδικασία αυτή αφορά το δυτικό ανοιχτό όριο από το οποίο γεννιέται ο κυματισμός και τα πλευρικά όρια στο βόρειο και νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Στο σημείο εισάγονται στο μοντέλο οι εξής παράμετροι:

- το σημαντικό ύψος κύματος ( $H_{m0}$ )
- η φασματική περίοδος αιχμής ( $T_p$ )
- η μέση κατεύθυνση κύματος (MWD)
- Δείκτης κατευθυντικής διασποράς,  $n$

Αναφορικά με τα πλευρικά όρια υπάρχει η επιλογή να είναι κλειστά (closed boundary) όπου αναγνωρίζονται ως ακτή από το μοντέλο, ανακλαστικά (reflecting) όπου οι κυματισμοί ανακλώνται πλήρως ή συμμετρικά και πλευρικά όπου το κύμα περνάει χωρίς ανάκλαση ή απόσβεση. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η τελευταία εναλλακτική.

#### 6.2.4 Αποτελέσματα κυματικού μοντέλου SW

Από το μοντέλο προσφέρονται δύο τύποι αποτελεσμάτων των κυματικών χαρακτηριστικών:

1. Παράγωγα μεγέθη του φάσματος των κυματισμών σε κάθε κόμβο των πεπερασμένων στοιχείων
2. Παράμετροι του φάσματος (ενέργεια ή/και πυκνότητα δράσης των κυματισμών) στους κόμβους των τριγωνικών πεπερασμένων στοιχείων

Σχετικά με την πρώτη κατηγορία μεγεθών, προσφέρονται τρεις επιλογές εξαγωγής

1. Χρονοσειρά των κυματικών χαρακτηριστικών σε ένα σημείο
2. Χρονοσειρά των κυματικών χαρακτηριστικών κατά μήκος μιας γραμμής
3. Διδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε δυαδικό αρχείο

Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία υπολογίζονται σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού καννάβου και σε κάθε χρονικό βήμα:

- Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος
- Η περίοδος αιχμής του κύματος
- Η μέση περίοδος κύματος
- Η μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης
- Η περίοδος κυματικής ενέργειας
- Η κατεύθυνση κορυφής του κύματος
- Η μέση κατεύθυνση κύματος
- Η τυπική απόκλιση ανά κατεύθυνση
- Το ύψος κύματος ανά κατεύθυνση
- Οι τάσεις ακτινοβολίας
- Οι ταχύτητες των σωματιδίων
- Ο τανυστής μεταφοράς ενέργειας του κυματισμού

Στην τελευταία καρτέλα των αποτελεσμάτων (Output), επιλέγονται τα αρχεία αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από το μοντέλο. Στην παρούσα εργασία, εξάγεται ένα αρχείο που περιλαμβάνει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος  $H_{rms}$  [m], τη μέση κατεύθυνση κύματος [deg] και τις ταχύτητες κατά την οριζόντια  $u$  [m/s] και την κατακόρυφη διεύθυνση  $y$  [m/s].

## 6.3 Υδροδυναμικό Μοντέλο - Hydrodynamic Module (HD)

### 6.3.1 Γενική περιγραφή

Το υδροδυναμικό μοντέλο, HD Module, περιγράφει τις διδιάστατες ροές με ελεύθερη επιφάνεια και προσομοιώνει τις υδροδυναμικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην ανοιχτή θάλασσα, σε λίμνες, σε ποτάμια, εκβολές και στην παράκτια ζώνη. Παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης πολλών φαινομένων, όπως τα ανεμογενή και κυματογενή ρεύματα την παλίρροια κ.α.

Το υδροδυναμικό μοντέλο MIKE 21 HD χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και περιγράφει τη διδιάστατη μη μόνιμη ροή προσομοιώνοντας την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας για κάθε σημείο του καννάβου.

Οι παράμετροι και οι επιδράσεις οι οποίες λαμβάνονται υπόψιν κατά τους υπολογισμούς είναι οι εξής:

- οι μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας (flooding and drying)
- η διασπορά της ορμής (Momentum dispersion)
- η διατμητική τάση στον πυθμένα (Bottom shear stress)
- η δύναμη Coriolis (Coriolis force)
- η διατμητική τάση από τον άνεμο (Wind shear stress)
- οι μεταβολές στη βαρομετρική πίεση (Barometric pressure gradients)
- η κάλυψη πάγου (Ice coverage)
- το παλιρροϊκό δυναμικό (Tidal potential)
- η κατακρήμνιση και η εξάτμιση (Precipitation/evaporation)
- οι τάσεις ακτινοβολίας (Wave radiation stresses)
- οι παροχές εισόδου και εξόδου (Sources and sinks)

Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) παράγει αποτελέσματα που αποτελούν δεδομένα μπορούν για άλλα υπολογιστικά εργαλεία του μοντέλου MIKE 21 COUPLED MODEL FM, όπως το φασματικό κυματικό μοντέλο (MIKE SW) και το μοντέλο στερεομεταφοράς (MIKE ST).

### 6.3.2 Βασικές εξισώσεις

Οι θεωρητικές εξισώσεις του μοντέλου δύο διαστάσεων για τις καρτεσιανές συντεταγμένες είναι οι (6.7), (6.8) και η (6.9):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \quad (6.7)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}\bar{u}}{\partial y} \\ &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} \\ & - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + hu_s S \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial h\bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}\bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial y} \\ &= f\bar{u}h - gh \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} \\ & - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S \end{aligned} \quad (6.9)$$

Όπου  $\eta(x,y,t)$  η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας,  $h = \eta + d$  το συνολικό βάθος νερού,  $d$  το βάθος νερού από τη στάθμη ηρεμότητας θαλάσσης,  $u$  και  $v$  οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά  $x$  και  $y$ ,  $f = 2\Omega \sin\varphi$  η παράμετρος Coriolis ( $\Omega$  είναι ο γωνιακός ρυθμός περιστροφής και  $\varphi$  το γεωγραφικό πλάτος,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho$  η πυκνότητα αναφοράς του νερού,  $s_{xx}$ ,  $s_{xy}$ ,  $s_{yx}$  και  $s_{yy}$  είναι οι συνιστώσες του τανυστή τάσεων ακτινοβολίας,  $S$  το μέγεθος της απορροής εξαιτίας των σημείων πηγής,  $u_s$ ,  $v_s$  είναι η ταχύτητα με την οποία το νερό εκρέει στο περιβάλλον νερό,  $x, y$  οι καρτεσιανές συντεταγμένες,  $t$  ο χρόνος και  $\eta$  άνω παύλα συμβολίζει τη μέση κατά βάθος τιμή. Για παράδειγμα,  $\bar{u}$  και  $\bar{v}$  είναι οι μέσες κατά βάθος συνιστώσες ταχύτητας που ορίζονται από τις εξισώσεις (6.10) και (6.11):

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \quad (6.10)$$

$$h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \quad (6.11)$$

Οι πλευρικές τάσεις  $T_{ij}$  συμπεριλαμβάνουν την τριβή ιζώδους, την τριβή τύρβης και διαφορική μεταγωγή (advection). Η τιμή τους εκτιμάται χρησιμοποιώντας τη σχέση τυρβώδους ιζώδους (Eddy Viscosity) βασισμένη στην κλίση της μέσης κατά βάθος ταχύτητας:

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \quad (6.12)$$

$$T_{xy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right) \quad (6.13)$$

$$T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad (6.14)$$

### 6.3.3 Εφαρμογή μοντέλου

#### Μέθοδος επίλυσης

Ο χρόνος και η ακρίβεια της προσομοίωσης μπορούν να ελεγχθούν καθορίζοντας την τάξη των αριθμητικών συστημάτων υπολογισμού. Μπορούν να επιλεγθούν χαμηλής τάξεως ή υψηλής τάξεως συστήματα. Η χαμηλής τάξεως επίλυση είναι ταχύτερη αλλά λιγότερο ακριβής. Επιλέγεται η υψηλής τάξεως επίλυση. Η διάρκεια επίλυσης γίνεται πολλαπλάσια αλλά τα γενικά αποτελέσματα που παράγονται είναι εξαιρετικά πιο ακριβής.

#### Μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας

Οι μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας γίνονται με τρεις τρόπους:

- Καθόλου μεταβολή της στάθμης
- Κανονική μεταβολή της στάθμης
- Προχωρημένη μεταβολή (πλημμυρική περιοχή)

Στο μοντέλο λαμβάνονται υπόψιν οι μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας με την επιλογή της κανονικής μεταβολής. Χρησιμοποιούνται οι προτεινόμενες τιμές βάθους άμπωτης  $h_{dy} = 0.005\text{m}$ , βάθος πλημμυρίδας  $h_{flood} = 0.05\text{m}$  και το βάθος διαβροχής  $h_{wet} = 0.1\text{m}$ .

Οι τιμές των παραπάνω βαθών πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση:

$$h_{dry} < h_{flood} < h_{wet}$$

### Πυκνότητα

Η πυκνότητα είναι συνάρτηση της αλατότητας και της θερμοκρασίας. Επιλέγεται η λειτουργία όπου η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού είναι σταθερές και η πυκνότητα δεν θα μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

### Τυρβώδες ιξώδες (Eddy Viscosity)

Η διατμητική τάση στον πυθμένα μεταβάλλεται λόγω τύρβης και διακυμάνσεων μικρής κλίμακας των υδάτων. Το παραπάνω φαινόμενο υπολογίζεται στο μοντέλο μέσω της διατύπωσης του τυρβώδους ιξώδους  $E_v$  που εξηγεί 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 ποσότητας της κίνησης κατά  $x$  είτε σε όρους ορμής είτε σε όρους ταχύτητας. Για τον καθορισμό του οριζοντίου τυρβώδους ιξώδους υπάρχουν τρεις επιλογές:

- Καθόλου τυρβώδες ιξώδες
- Σταθερή τιμή τυρβώδους ιξώδους
- Μέθοδος Smagorinsky

Επιλέγεται η μέθοδος Smagorinsky και η σταθερά Smagorinsky σταθερή και ίση με την προεπιλεγμένη τιμή 0.28.

### Αντίσταση πυθμένα (Bed Resistance)

Στην περίπτωση της διδιάστατης προσομοίωσης η αντίσταση του πυθμένα (Bed Resistance) ορίζεται με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους:

- Καθόλου αντίσταση του πυθμένα
- Αριθμός Chezy
- Αριθμός Manning
- Αντίσταση πυθμένα που προκαλείται από τους κυματισμούς

Η αντίσταση  $R$  στον πυθμένα περιγράφεται είτε με τον αριθμό Chezy είτε με τον αριθμό Manning με την εξίσωση (6.15):

$$R = \frac{gu|u|}{C^2} \quad (6.15)$$

Όπου  $u$  η ταχύτητα και  $C$  ο αριθμός Chezy, ο οποίος συνδέεται με τον αριθμό Manning με την εξίσωση (6.16):

$$C = Md^{\frac{1}{6}} \quad (6.16)$$

Επιλέγεται ο αριθμός Manning σταθερός καθ' όλη την έκταση της περιοχής μελέτης. Ο αριθμός Manning είναι πιο ακριβής σε σχέση με τον αριθμό Chezy αν και αυξάνει τον υπολογιστικό φόρτο. Οι τιμές πρέπει να λαμβάνονται στο διάστημα 20-40  $m^{1/3}/s$ . Η προτεινόμενη τιμή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο είναι ίση με  $32m^{1/3}/s$ .

### Δύναμη Coriolis (Coriolis force)

Οι επιλογές για τον συνυπολογισμό της δύναμης Coriolis στο μοντέλο είναι οι εξής τρεις:



- Καθόλου δύναμη Coriolis
- Σταθερή στην περιοχή μελέτης
- Μεταβαλλόμενη στην περιοχή μελέτης

Στο συγκεκριμένο μοντέλο η δύναμη Coriolis δεν λαμβάνεται υπόψιν αφού πρόκειται για μια μικρή περιοχή στην οποία η επίδραση της θα είναι αμελητέα.

### **Ακτινοβολία κυμάτων**

Οι τάσεις δεύτερης τάξεως λόγω της θραύσης των κυμάτων μικρής περιόδου συμπεριλαμβάνονται στην προσομοίωση. Οι τάσεις ακτινοβολίας λειτουργούν ως οδηγητές για την κύρια ροή και χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των κυματογενών ρευμάτων. Γίνεται επιλογή ώστε οι τάσεις ακτινοβολίας λαμβάνονται απευθείας από τη συζευγμένη κυματική προσομοίωση SW.

Οι επιλογές που αφορούν πηγές και καταβόθρες παραμένουν ανενεργές καθώς δεν σχετίζονται με την παρούσα εργασία. Τέλος στο μοντέλο δεν λαμβάνονται υπόψιν επίσης οι δυνάμεις ανέμων, η κάλυψη πάγου, το παλιρροϊκό δυναμικό, οι κατακρημνίσεις και η εξάτμιση και η διήθηση του νερού στο έδαφος καθώς πρόκειται για μια ιδεατή περιοχή όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

### **Συνοριακές συνθήκες**

Υπάρχουν επτά τύποι υδροδυναμικών ορίων:

- Έδαφος (μηδενική επαπτομενική συνιστώσα ταχύτητας)
- Έδαφος (μηδενική ταχύτητα)
- Καθορισμένες ταχύτητες
- Καθορισμένες ροές
- Καθορισμένη στάθμη
- Καθορισμένη εκροή

- Συνθήκες Flather

Τα όρια του μοντέλου δηλαδή τα εξωτερικά κελιά που αναπαριστούν τη θάλασσα και στα οποία το μοντέλο θα κάνει υπολογισμούς, αναγνωρίζονται από το πρόγραμμα. Τα όρια αυτά είναι το Βόρειο, το Νότιο και το Δυτικό ενώ η ανατολική πλευρά του πλέγματος έχει σχεδιαστεί ως στεριά. Το Δυτικό όριο επιλέχθηκε με καθορισμένη στάθμη και τα πλευρικά όρια (Βόρειο και Νότιο) με μηδενική εφαπτομενική συνιστώσα ταχύτητας. Η επιλογή αυτή έγινε σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του μοντέλου ώστε όταν το ρεύμα φτάνει στο όριο να εξέρχεται ιδεατά σαν να συνεχίζει η ακτή επ' άπειρο.

#### 6.3.4 Αποτελέσματα υδροδυναμικού μοντέλου HD

Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία υπολογίζονται σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού καννάβου και σε κάθε χρονικό βήμα:

- Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας
- Απόλυτο βάθος νερού
- Ταχύτητα ρευμάτων
- Συνιστώσα ταχύτητας U
- Συνιστώσα ταχύτητας V
- Διεύθυνση ρευμάτων
- Συντελεστής αντίστασης
- Ποσότητα κίνησης P
- Ποσότητα κίνησης Q

Στην τελευταία καρτέλα των αποτελεσμάτων (Output), επιλέγονται τα αρχεία αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από το μοντέλο. Στην παρούσα εργασία, εξάγεται ένα αρχείο που περιλαμβάνει σε όλη την περιοχή μελέτης την ανύψωση της επιφάνειας (Surface elevation) [m], οι συνιστώσες ταχύτητας U και V [m/s], η ταχύτητα ρεύματος (Current speed) [m/s] και η διεύθυνση ρεύματος [rad].

## **6.4 Μοντέλο Στερεομεταφοράς μη-Συνεκτικών Ιζημάτων - Sand Transport Module (ST)**

### **6.4.1 Γενική περιγραφή**

Το μοντέλο της στερεομεταφοράς μη συνεκτικών-ιζημάτων (Non-cohesive sediment transport module), MIKE ST Module, είναι ένα αριθμητικό μοντέλο το οποίο λαμβάνει υπόψιν τη μεταφορά του υλικού του πυθμένα είτε επαφή με αυτόν (bed load) είτε ως αιωρούμενο φορτίο (suspended load) και υπολογίζει τον ρυθμό μεταφοράς των εν λόγω μη συνεκτικών ιζημάτων λόγω της δράσης αμιγούς ρεύματος, των θαλάσσιων κυματισμών ή συνδυασμού των δύο. Επίσης, υπολογίζει τον ρυθμό μεταβολής του βάρους, εξαιτίας της μεταβολής του βάρους του πυθμένα.

Για τη χρησιμοποίηση του μοντέλου είναι απαραίτητη η συνδυαστική του δράση με τα άλλα υπολογιστικά εργαλεία του μοντέλου, και συγκεκριμένα με το υδροδυναμικό μοντέλο και το κυματικό μοντέλο, τα οποία και παρέχουν τις απαιτούμενες πληροφορίες για την τελική προσομοίωση της στερεομεταφοράς.

Επισημαίνεται ότι το μοντέλο της στερεομεταφοράς μη-συνεκτικών ιζημάτων, ST Module, χρησιμοποιείται για να υποδεικνύει τις πιθανές θέσεις απόθεσης και διάβρωσης και να δίνει μια αρχική προσέγγιση για τον ρυθμό με τον οποίο λαμβάνουν χώρα οι ως άνω διεργασίες. Το MIKE 21 ST παραχωρεί τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψιν στην προσομοίωση η παλίρροια, ο άνεμος, οι κυματισμοί και τα ρεύματα. Το πεδίο εφαρμογής είναι ευρύ και εκτείνεται σε φυσικά περιβάλλοντα όπως εκβολές ποταμών, ακτογραμμές και ανθρώπινες κατασκευές όπως τα λιμάνια και οι γέφυρες.

Τέλος η στερεομεταφορά, όπως καθίσταται σαφές από τα προηγούμενα κεφάλαια, προέρχεται αποκλειστικά από την ανάπτυξη κυματογενών ρευμάτων. Άλλες πηγές στερεομεταφοράς όπως διάβρωση αμμοθινών, ανεμογενή, παλλιρροϊκά ρεύματα καθώς και από διαφορές πυκνότητα δεν λαμβάνονται υπόψιν. Η απλούστευση του προβλήματος έγινε με σκοπό την εστίαση της παρούσας εργασίας σε έναν κυρίαρχο μηχανισμό στερεομεταφοράς ώστε να διεξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα για την απόδοση των διατάξεων.

## Τύπος προσομοίωσης

Το MIKE 21 ST παρέχει δύο τύπους προσομοίωσης:

- Αμιγές ρεύμα
- Συνδυασμός ρεύματος και κυματισμών

Επιλέγεται η δεύτερη εναλλακτική. Ο λόγος της επιλογής αυτής είναι επειδή προσθέτονται οι κυματισμοί στις εξισώσεις υπολογισμού δίνοντας έτσι μια συνδυαστική εικόνα. Στην περίπτωση αυτή στο μοντέλο εισάγονται δύο είδη δεδομένων, τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου (SW) και τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου (HD).

### 6.4.2 Βασικές εξισώσεις μοντέλου

#### Μεταφορά ιζήματος

Η εξίσωση υπολογισμού της στερεομεταφοράς είναι:

$$q_t = q_b + q_s \quad (6.17)$$

Όπου  $q_t$  είναι η ολική στερεομεταφορά,  $q_b$  η παροχή λόγω φορτίου πυθμένα και  $q_s$  η στερεομεταφορά λόγω αιωρούμενου φορτίου.

Στο μοντέλο STPQ3D, χρησιμοποιείται η θεωρία του ολικού φορτίου (πυθμένα και αιωρούμενου) μεταφοράς των Engelund και Fredsøe (1976), όπου για τους υπολογισμούς αξιοποιείται η στιγμιαία παράμετρος Shields.

Στην περίπτωση πυθμένα με κροκάλες οι υπολογισμοί διαφέρουν από αυτούς του αμμώδους αφού μόνο το φορτίο πυθμένα λαμβάνεται υπόψιν.

Η κατακόρυφη διακύμανση της συγκέντρωσης αιωρούμενου ιζήματος υπολογίζεται από την εξίσωση κάθετης διάχυσης για το αιωρούμενο ίζημα σύμφωνα με τον Fredsøe et al. (1985).

Η παράλειψη των όρων ροής στην εξίσωση διάχυσης αντισταθμίζεται με τον συνυπολογισμό της λαγκρανζιανής ταχύτητας ροής επί τη μέση συγκέντρωση του μέσου χρονικά γινομένου της στιγμιαίας ταχύτητας και των συγκεντρώσεων.

Η παροχή εξαιτίας αιωρούμενου φορτίου υπολογίζεται ως το γινόμενο των στιγμιαίων ταχυτήτων ροής και της στιγμιαίας συγκέντρωσης ιζήματος:

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (uc) dz dt \quad (6.18)$$

Η χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης διάχυσης για το αιωρούμενο ίζημα επαναλαμβάνεται μέχρι να επικρατήσει περιοδική λύση.

### Μεταφορά φορτίου πυθμένα

Η διαστατική παροχή λόγω φορτίου του πυθμένα  $\Phi_b$  εκτιμάται με ντετερμινιστική προσέγγιση:

$$\Phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c}) \quad (6.19)$$

Όπου  $p$  η πιθανότητα κίνησης των κόκκων σε κάποιο στρώμα σύμφωνα με τους Engelund και Fredsøe (1976),  $\theta'$  η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος του Shield) σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction)  $\theta_c$  η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης.

### 6.4.3 Μορφολογία

Στο εδάφιο αυτό αναλύεται το μορφολογικό μοντέλο το οποίο αποτελεί συνδυασμό του υδροδυναμικού και του μοντέλου μεταφοράς ιζήματος. Χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι το υδροδυναμικό πεδίο ροής ανανεώνεται συνεχώς σύμφωνα με τις αλλαγές στη βαθυμετρία. Δίνεται επίσης η επιλογή για συνδυαστική προσομοίωση κύματος και ρεύματος όπου γίνεται αυτόματη ανανέωση του κυματικού πεδίου και αντανακλώνται οι μεταβολές στον πυθμένα. Τα μορφολογικά μοντέλα παραδοσιακά διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: τα συζευγμένα μοντέλα και τα μη-συζευγμένα. Στην πρώτη περίπτωση οι βασικές εξισώσεις

ροής και στερεομεταφοράς συγχωνεύονται και επιλύονται ταυτόχρονα. Στη δεύτερη περίπτωση επιλύονται οι υδροδυναμικές εξισώσεις σε κάθε χρονικό βήμα πριν τις εξισώσεις στερεομεταφοράς. Συνεπώς το επίπεδο πυθμένα ανανεώνεται πριν προχωρήσει το υδροδυναμικό μοντέλο στο επόμενο βήμα.

### Εξίσωση συνέχειας ιζήματος

Για τον καθορισμό των αλλαγών του πυθμένα είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του ρυθμού αλλαγής του επιπέδου του πυθμένα  $\frac{\partial z}{\partial t}$  στο κέντρο των στοιχείων. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι υπολογισμού του οι οποίες βασίζονται στην εξίσωση Exner (6.20) (εξίσωση συνέχειας ιζήματος).

$$-(1 - n) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \quad (6.20)$$

Όπου  $n$  το πορώδες του πυθμένα,  $z$  το επίπεδο του πυθμένα,  $t$  ο χρόνος,  $S_x$  το φορτίο πυθμένα ή ολικό φορτίο μεταφοράς κατά τη διεύθυνση  $x$ ,  $S_y$  το φορτίο πυθμένα ή ολικό φορτίο μεταφοράς κατά τη διεύθυνση  $y$ ,  $x, y$  οι οριζόντιες καρτεσιανές συντεταγμένες και  $\Delta S$  οι εκβολές ιζήματος από τα γύρω όρια προς την περιοχή ενδιαφέροντος.

Με την επιλογή του συνδυαστικού κυματικού και υδροδυναμικού μοντέλου οι εκβολές ιζήματος λαμβάνονται μηδενικές εκτός αν συμπεριληφθεί πλευρική παροχή ιζήματος όπως για παράδειγμα από διάβρωση αμμοθινών της ακτής. Στην παρούσα μελέτη δεν έγινε τέτοια θεώρηση καθώς σκοπό ήταν να μελετηθεί η απόδοση των διατάξεων από τη στερεομεταφορά που προκαλείται αμιγώς από τα κυματογενή ρεύματα.

### Μορφολογική ανανέωση του πυθμένα

Ο πυθμένας ενημερώνεται συνεχώς μέσα από τη μορφολογική προσομοίωση βασισμένη στους υπολογισμένους ρυθμούς μεταβολής πυθμένα για κάθε βήμα του υδροδυναμικού μοντέλου. Το νέο επίπεδο πυθμένα λαμβάνεται από την εξίσωση (6.21):

$$z_{new} = z_{old} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial z}{\partial t} \Delta t_{HD} \quad (6.21)$$

Για τον λόγο αυτό, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του φορτίου μεταφοράς πυθμένα την ίδια χρονική στιγμή με τον ρυθμό μεταβολής του  $\frac{\partial z}{\partial t}$ . Η συνεισφορά της μεταφοράς λόγω φορτίου πυθμένα δίνεται από την απόκλιση των ροών ιζήματος στις πλευρές των στοιχείων.

#### 6.4.4 Αποτελέσματα μοντέλου μεταφοράς ιζήματος (ST)

Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιλαμβάνουν τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία υπολογίζονται σε κάθε κόμβο του υπολογιστικού καννάβου και σε κάθε χρονικό βήμα:

- Ρυθμός στερεομεταφοράς
- Ρυθμός στερεομεταφοράς ανά κατεύθυνση
- Διεύθυνση στερεομεταφοράς
- Βάθος από στάθμη ηρεμότητας θαλάσσης
- Συνολικό βάθος
- Επίπεδο πυθμένα
- Μεταβολή επιπέδου πυθμένα
- Ρυθμός μεταβολής του επιπέδου πυθμένα

Στην τελευταία καρτέλα των αποτελεσμάτων (Output), επιλέγονται τα αρχεία αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν από το μοντέλο. Στην παρούσα εργασία, εξάγεται ένα αρχείο που περιλαμβάνει το ρυθμό στερεομεταφοράς [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], το ρυθμό στερεομεταφοράς ανά κατεύθυνση [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], τη διεύθυνση στερεομεταφοράς [deg], το επίπεδο πυθμένα [m], τη

μεταβολή του επιπέδου του πυθμένα [m] και τον ρυθμό μεταβολής του επιπέδου του πυθμένα [m/d].



## 7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ MIKE21

### 7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του συζευγμένου μοντέλου (MIKE 21 Coupled Model FM) και του μοντέλου στερεομεταφοράς (MIKE ST). Για κάθε σενάριο κυματικής πρόσπτωσης που εξετάζεται παρουσιάζονται τα ακόλουθα πεδία:

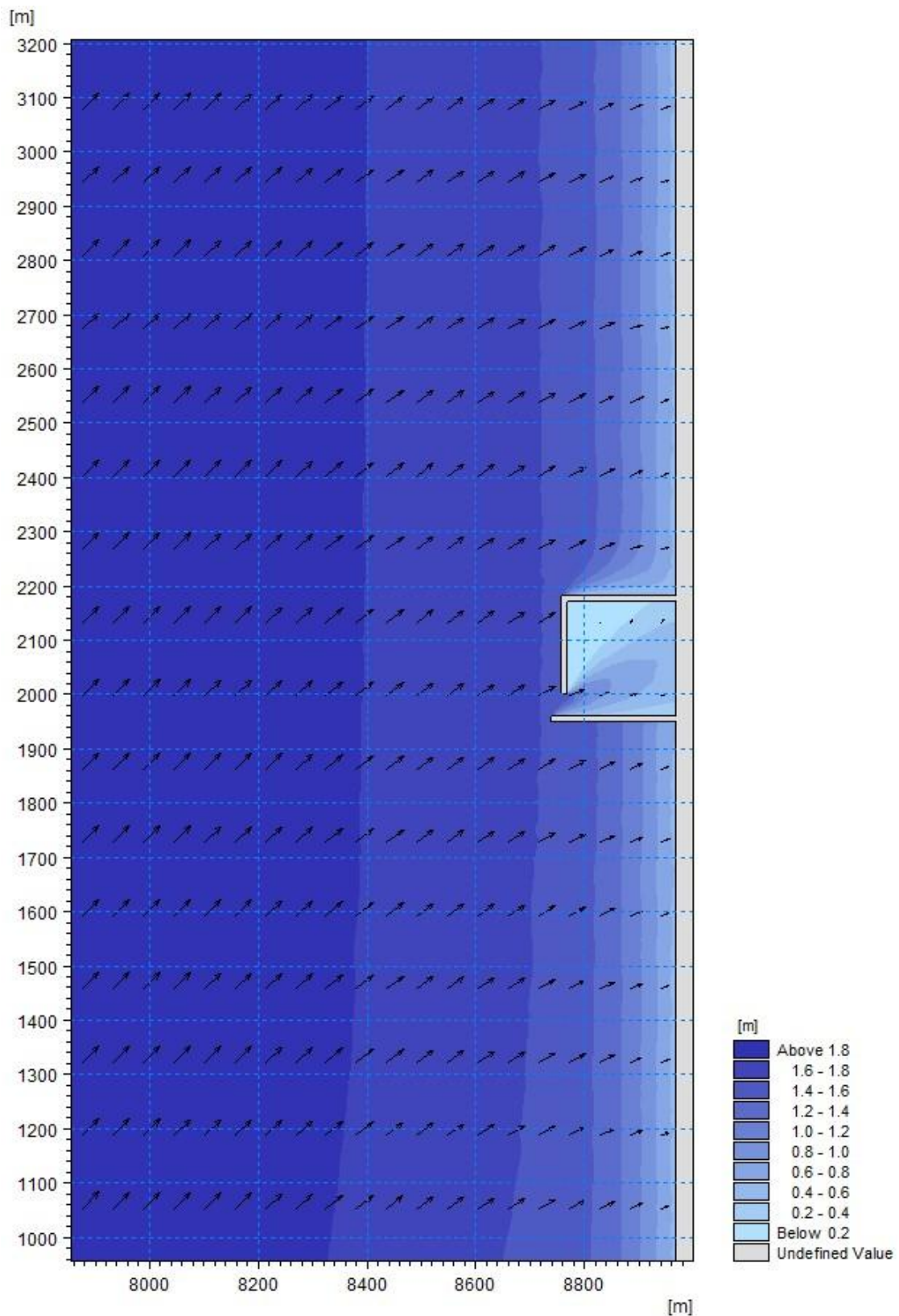
- Κυματικό
- Υδροδυναμικό
- Στερεομεταφοράς

Η προβολή των αποτελεσμάτων γίνεται με διδιάστατους χάρτες για την περιοχής μελέτης. Τα συνολικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Παράρτημα στο τέλος του παρόντος τεύχους. Έπειτα, διερευνάται ο ρυθμός στερεομεταφοράς κοντά στις διατάξεις και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων όσον αφορά τις πέντε διατάξεις με τη μεθοδολογία που ακολούθησε και τα αριθμητικά μοντέλα που εφάρμοσε στη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία του ο Μαυραωνάκης (2013). Στη διερεύνηση ρυθμού στερεομεταφοράς προστέθηκε η Διάταξη 6 που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Τέλος μελετήθηκε η μορφολογία του πυθμένα μέσω της μεταβολής και του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα και δημιουργήθηκε ιζηματικό ισοζύγιο για το εσωτερικό των διατάξεων. Ο υπολογισμός της μορφολογίας του πυθμένα έγινε με χρήση επαλληλίας κυματισμών για το πρώτο και δεύτερο κυματικό σενάριο.

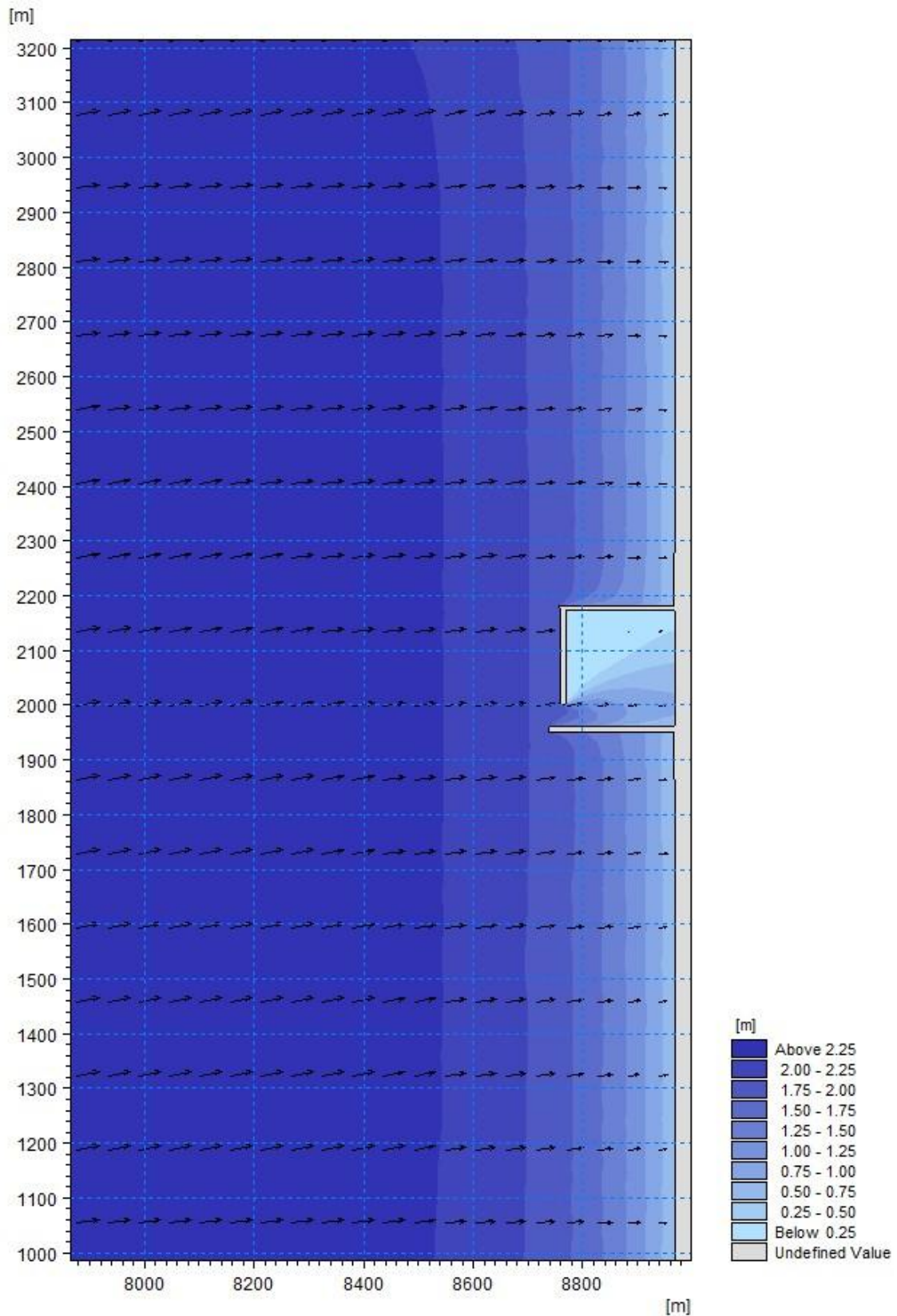
### 7.2 Παράκτιο Κυματικό Πεδίο

Στην κατηγορία του κυματικού πεδίου περιλαμβάνονται τα κυματικά αποτελέσματα της προσομοίωσης με χρήση του φασματικού μοντέλου Spectral Wave Module (SW). Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι το ύψος κύματος, η μέση περίοδος κύματος και η

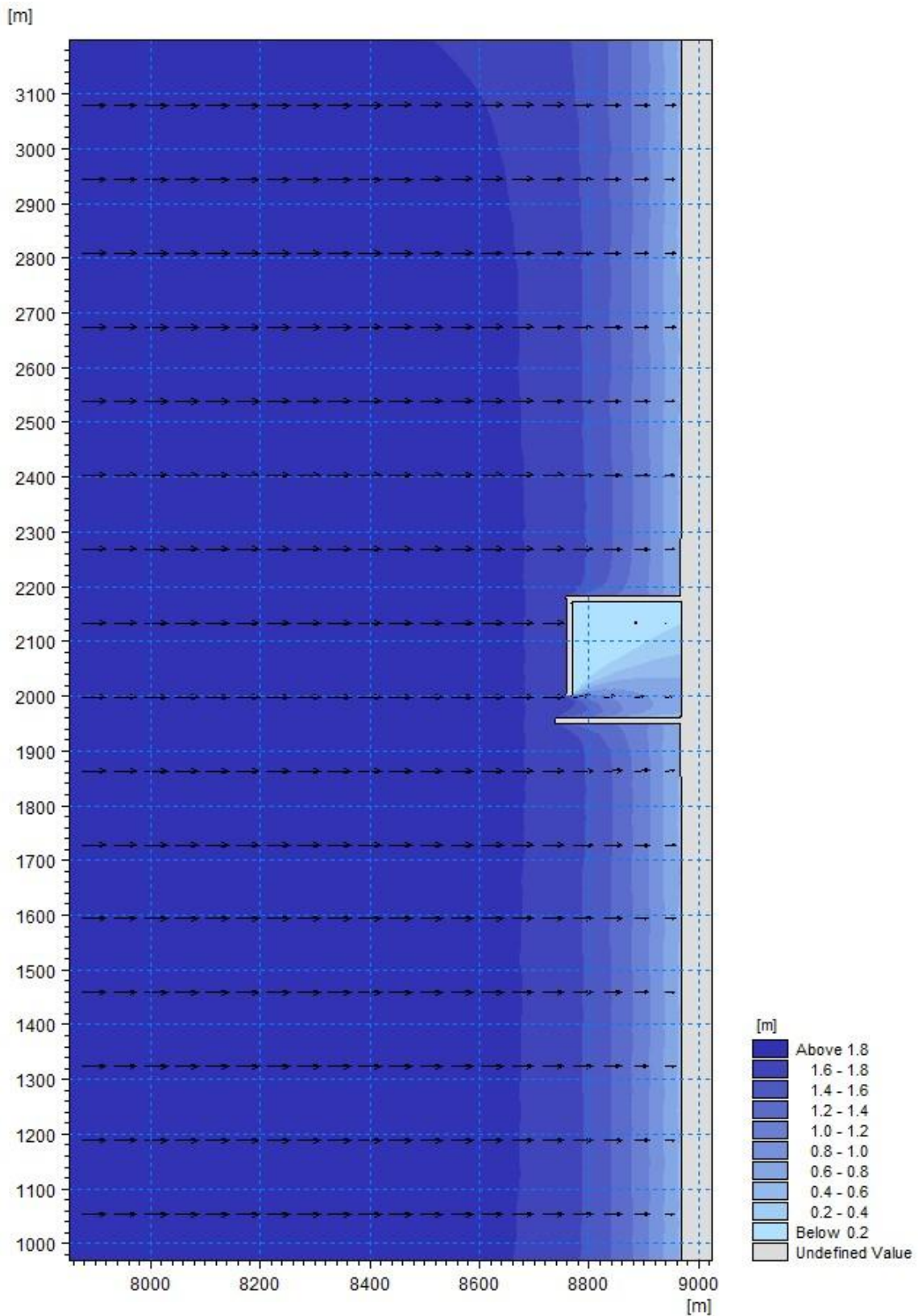
μέση κατεύθυνση κύματος στην παράκτια περιοχή. Παρακάτω στα Σχήματα 45, 46 και 47 απεικονίζονται τα ενδεικτικά αποτελέσματα κυματικού πεδίου, υδροδυναμικών συνθηκών και στερεομεταφοράς της Διάταξης 1 για το πρώτο και δεύτερο κυματικό σενάριο. Το ύψος κύματος μειώνεται ομαλά από τα 2 m στα βαθιά και καθώς προσεγγίζει την ακτή μειώνεται απότομα μόλις περάσει τη γραμμή θραύσης και εισέλθει στη ζώνη θραύσης μέχρι να μηδενιστεί στην ακτογραμμή. Η περίοδος αιχμής παραμένει σταθερή σε όλη την περιοχή. Η μέση γωνία διεύθυνσεως λόγω του φαινομένου της διάθλασης, μειώνεται συνεχώς από την αρχική τιμή  $45^{\circ}$  στα βαθιά έως ότου φτάσει τις  $0^{\circ}$  στην ακτογραμμή. Η κυματική διείδυση στο εσωτερικό των διατάξεων μεταβάλλεται ανάλογα με τη γεωμετρία και την τοποθεσία και τον βαθμό προστασίας της εισόδου τους.



Σχήμα 45: Ύψος κύματος  $H_{rms}$  [m], πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=45^\circ$ ), Διάταξη 1



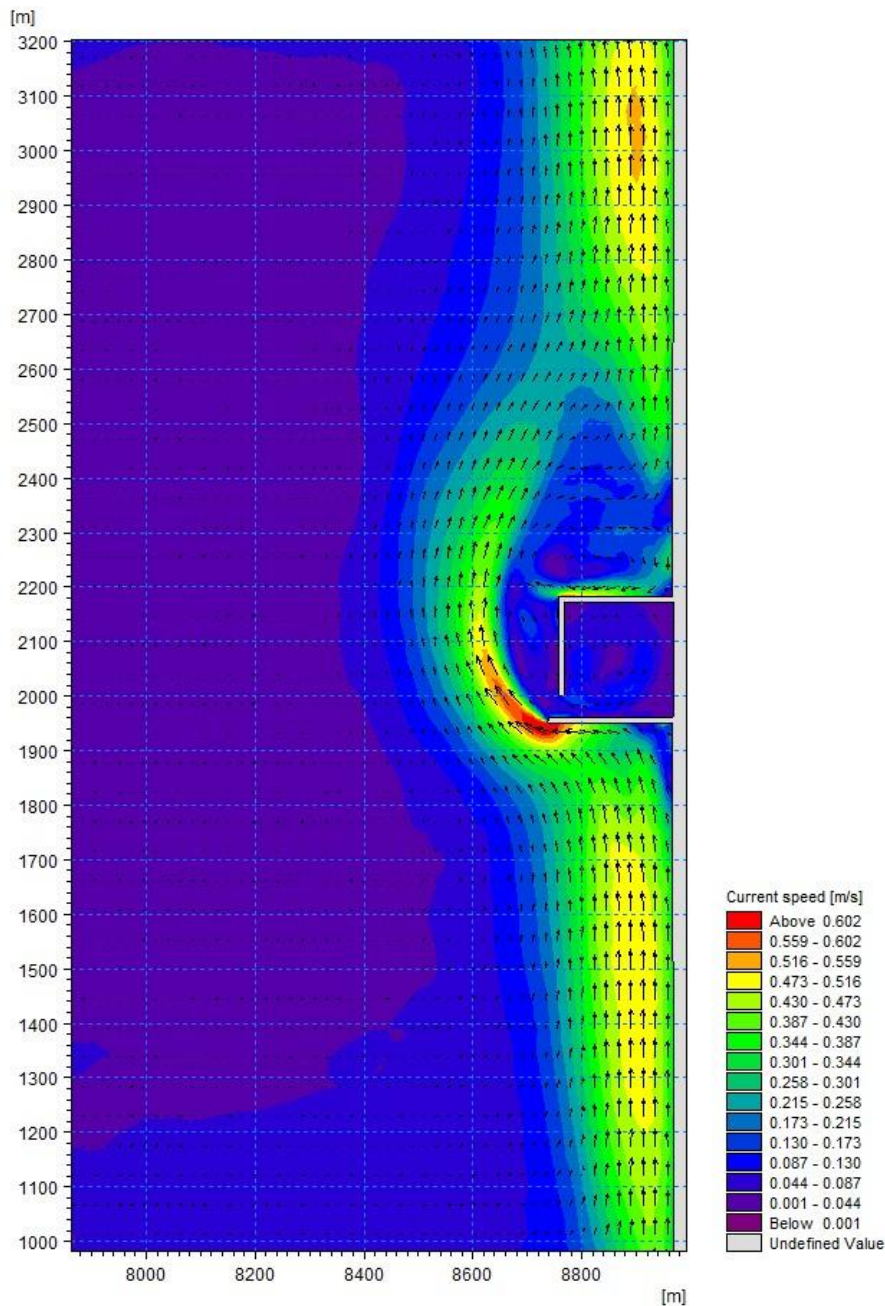
Σχήμα 46: Ύψος κύματος  $H_{rms}$  [m], δεύτερο κυματικό σενάριο ( $H_s=2.5$  m,  $T_p=6.5$  s,  $\theta=10^\circ$ ), Διάταξη 1



Σχήμα 47: Ύψος κύματος  $H_{rms}$  [m], τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=0^\circ$ ), Διάταξη 1

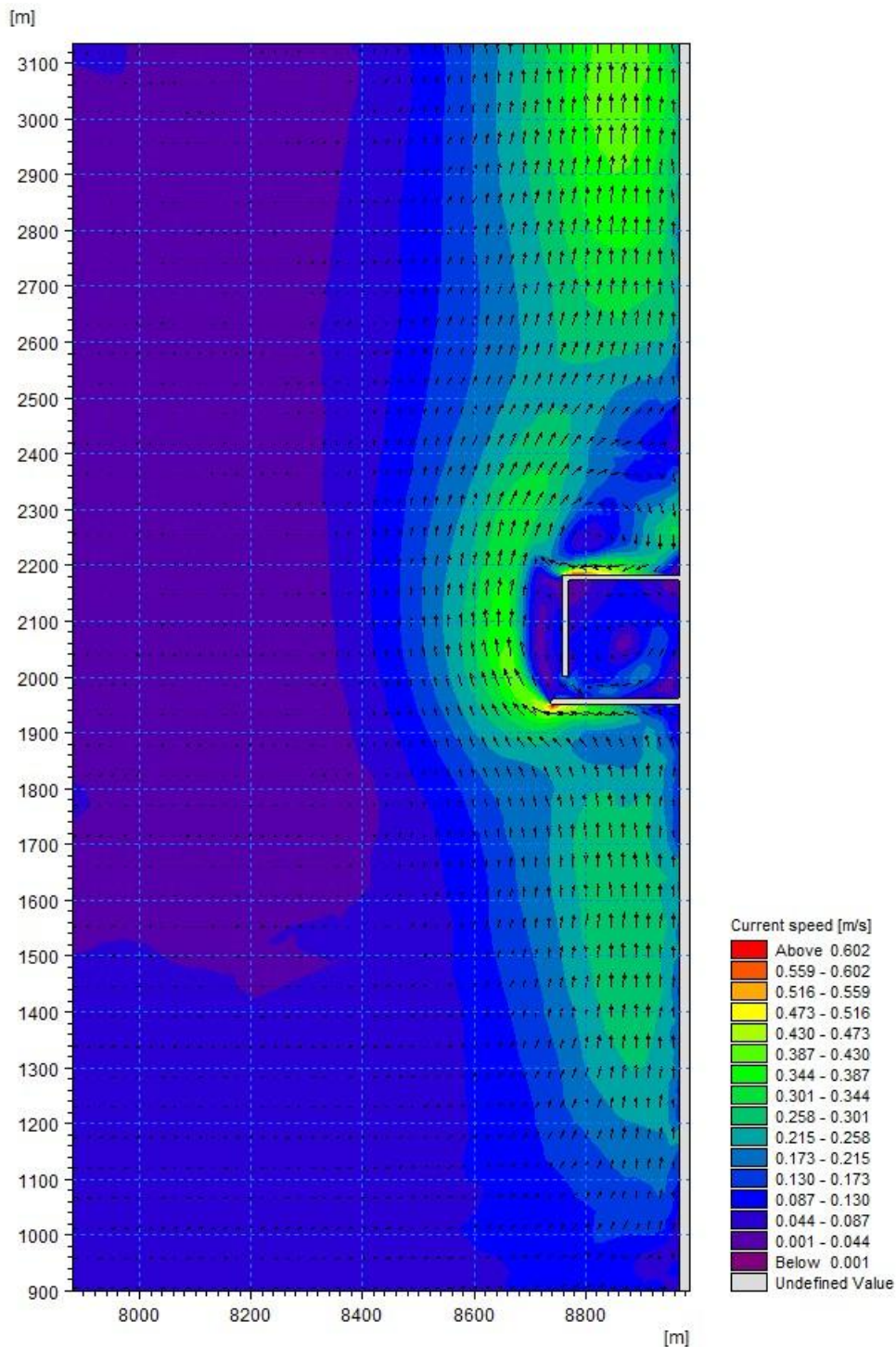
### 7.3 Υδροδυναμικές συνθήκες

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των υδροδυναμικών συνθηκών στην περιοχή μελέτης με το μοντέλο Hydrodynamic Module (HD). Στα αποτελέσματα περιγράφονται η μεταβολή της επιφάνειας της θάλασσας, η ροή κατά τους άξονες x και y του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, η διεύθυνση και η ταχύτητα των κυματογενών ρευμάτων. Στα Σχήματα 48, 49 και 50 φαίνονται οι ταχύτητες ρευμάτων για το πρώτο, δεύτερο και τρίτο κυματικό σενάριο αντίστοιχα.



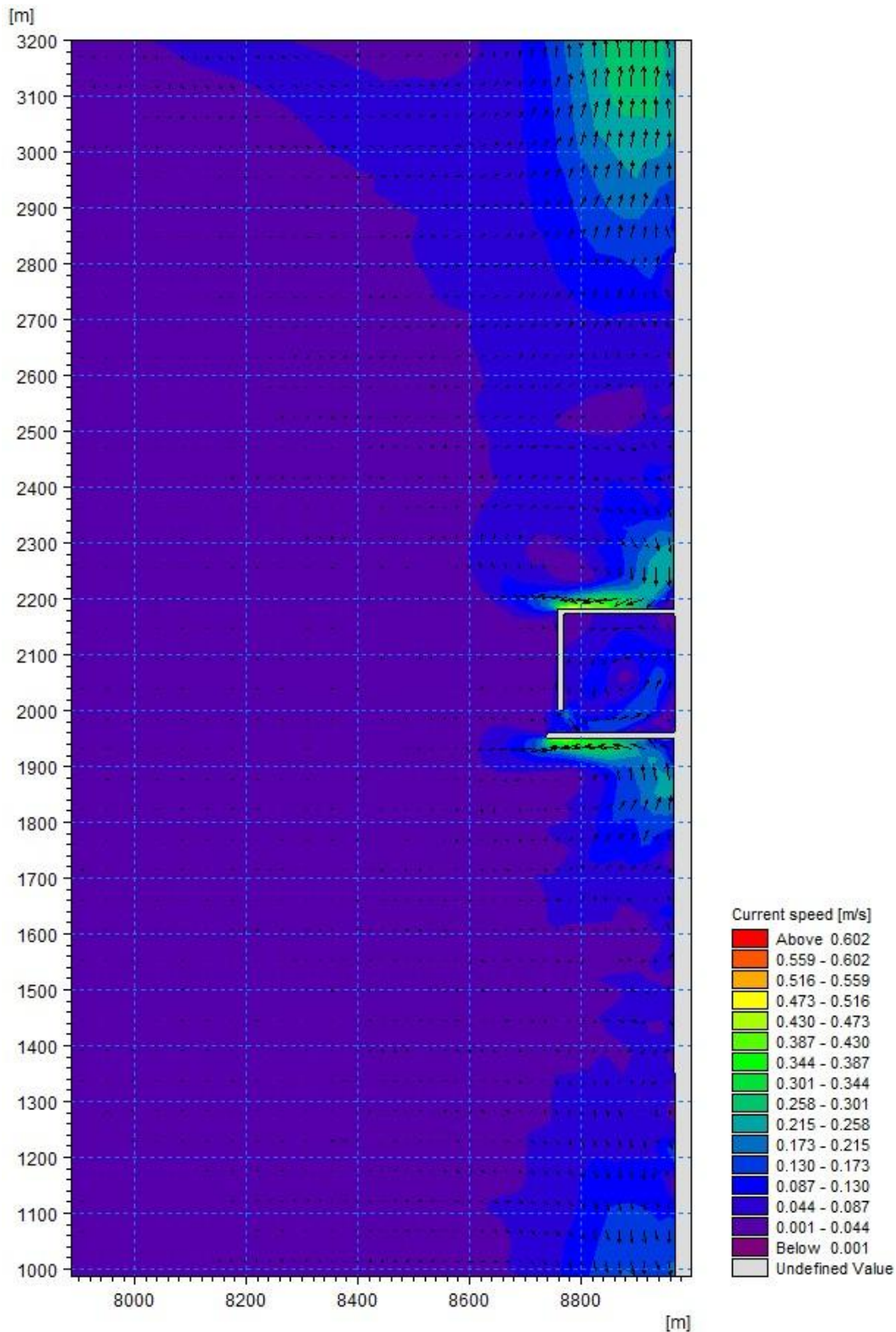
Σχήμα 48: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος V [m/s], πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=45^\circ$ ), Διάταξη 1

Το κυματογενές ρεύμα που δημιουργείται για το πρώτο κυματικό σενάριο παρουσιάζει υψηλότερες ταχύτητες ροής κοντά στα στερεά όρια αλλά και κατά μήκος της ακτής. Στο δεύτερο κυματικό σενάριο το ρεύμα έχει μικρότερες ταχύτητες αλλά η ροή έχει μεγαλύτερο πλάτος προς τα βαθιά.



Σχήμα 49: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος V [m/s], δεύτερο κυματικό σενάριο, ( $H_s=2.5$  m,  $T_p=6.5$  s,  $\theta=10^\circ$ ), Διάταξη 1

Για το κυματικό σενάριο με κάθετη πρόσπτωση προς την ακτή, παρατηρείται πως το παράκτιο ρεύμα κατά μήκος της ακτής είναι σαφώς μικρότερο και τα επικρατέστερα ρεύματα που δημιουργούνται είναι εγκάρσια και πολύ κοντά στα όρια της κατασκευής.

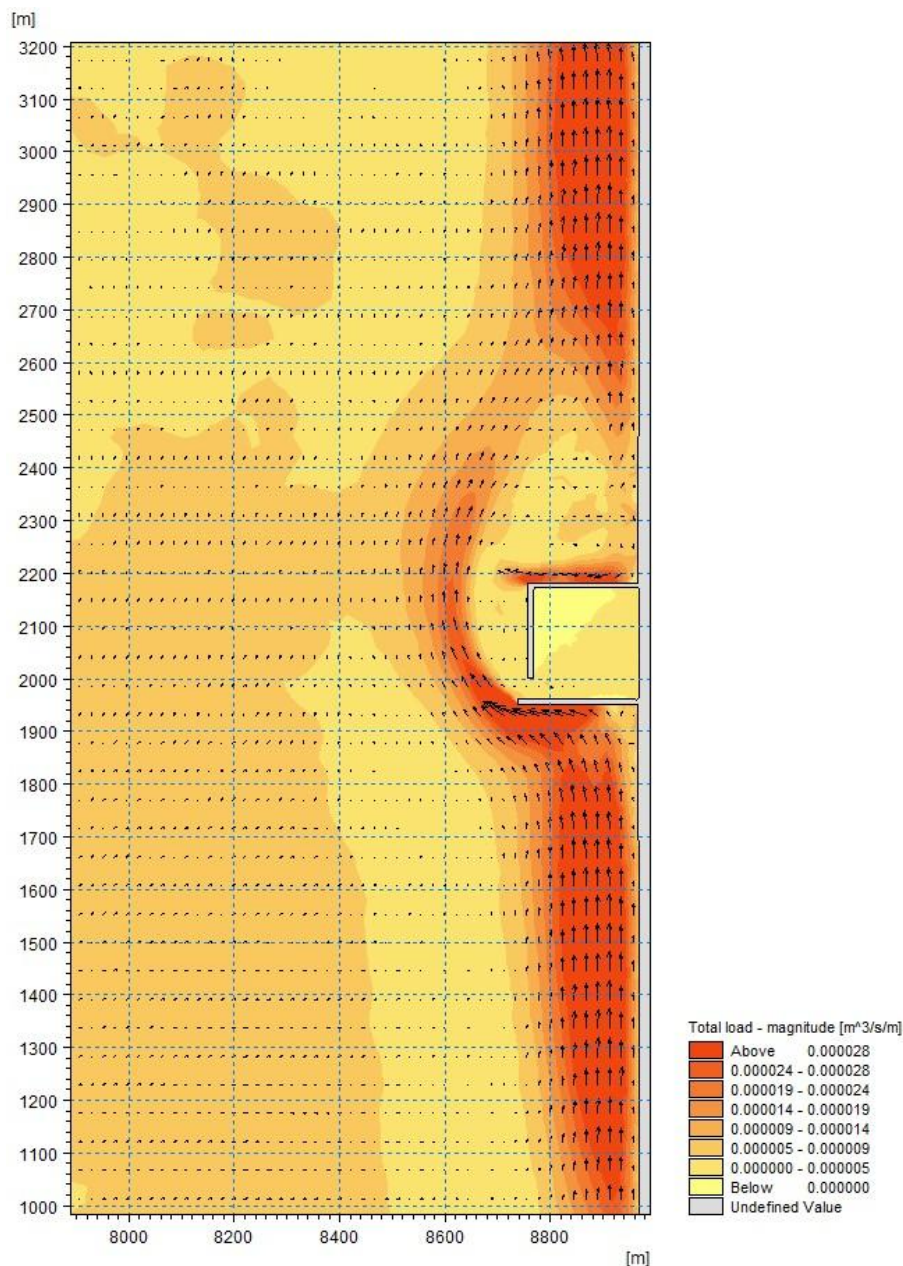


Σχήμα 50: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s], τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=0^\circ$ ), Διάταξη 1

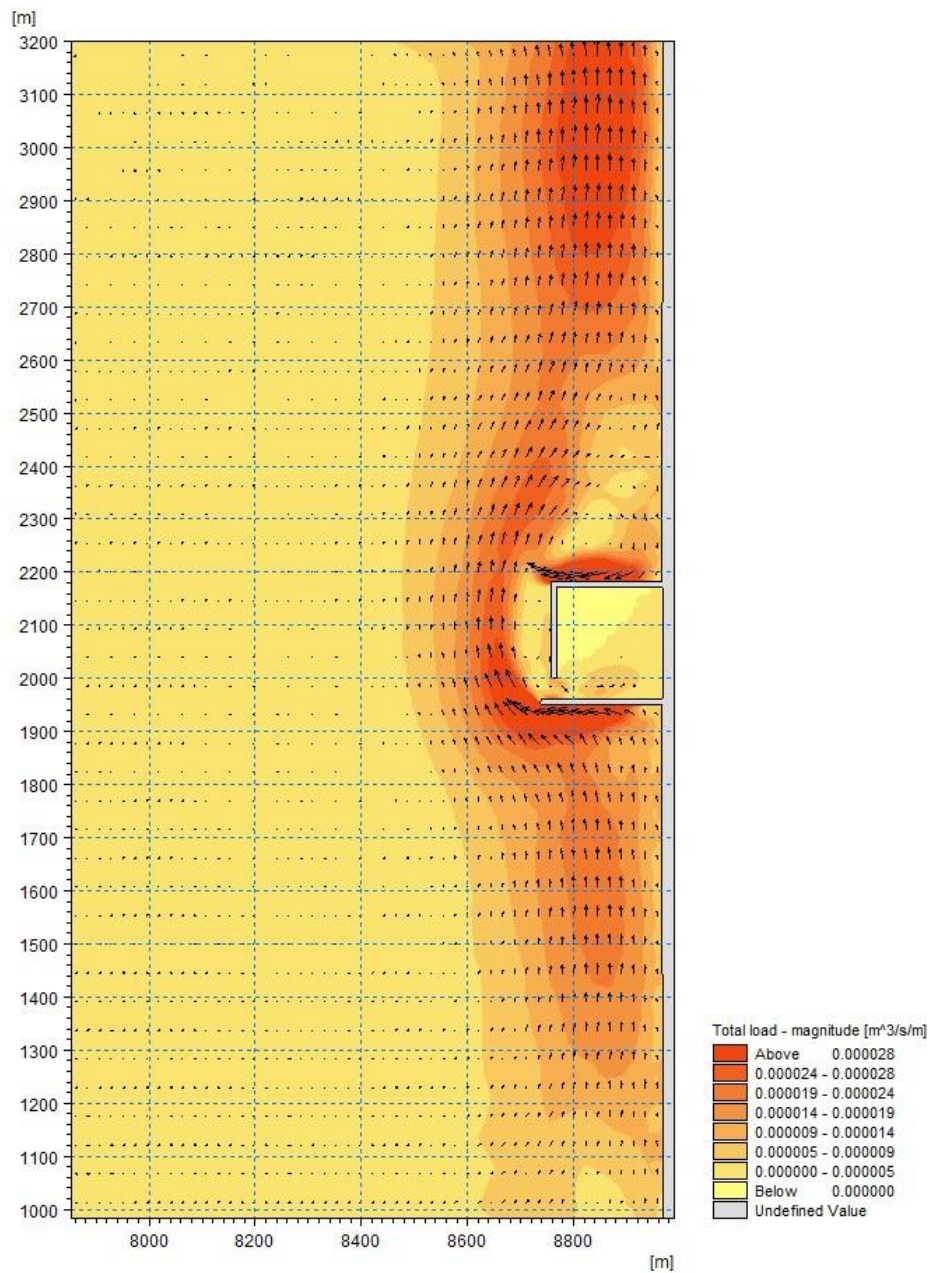


## 7.4 Συνθήκες στερεομεταφοράς

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου στερεομεταφοράς μη-συνεκτικών ιζημάτων Sand Transport Module (ST). Το μοντέλο περιγράφει τη μορφοδυναμική συμπεριφορά της περιοχής μελέτης και παράγει αποτελέσματα για την αλλαγή πυθμένα, τον ρυθμό αλλαγής του, τη διεύθυνση και ρυθμό στερεομεταφοράς. Στα Σχήματα 51, 52 και 53 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ρυθμού στερεομεταφοράς (Total load- magnitude) για το πρώτο, δεύτερο και τρίτο κυματικό σενάριο αντίστοιχα.

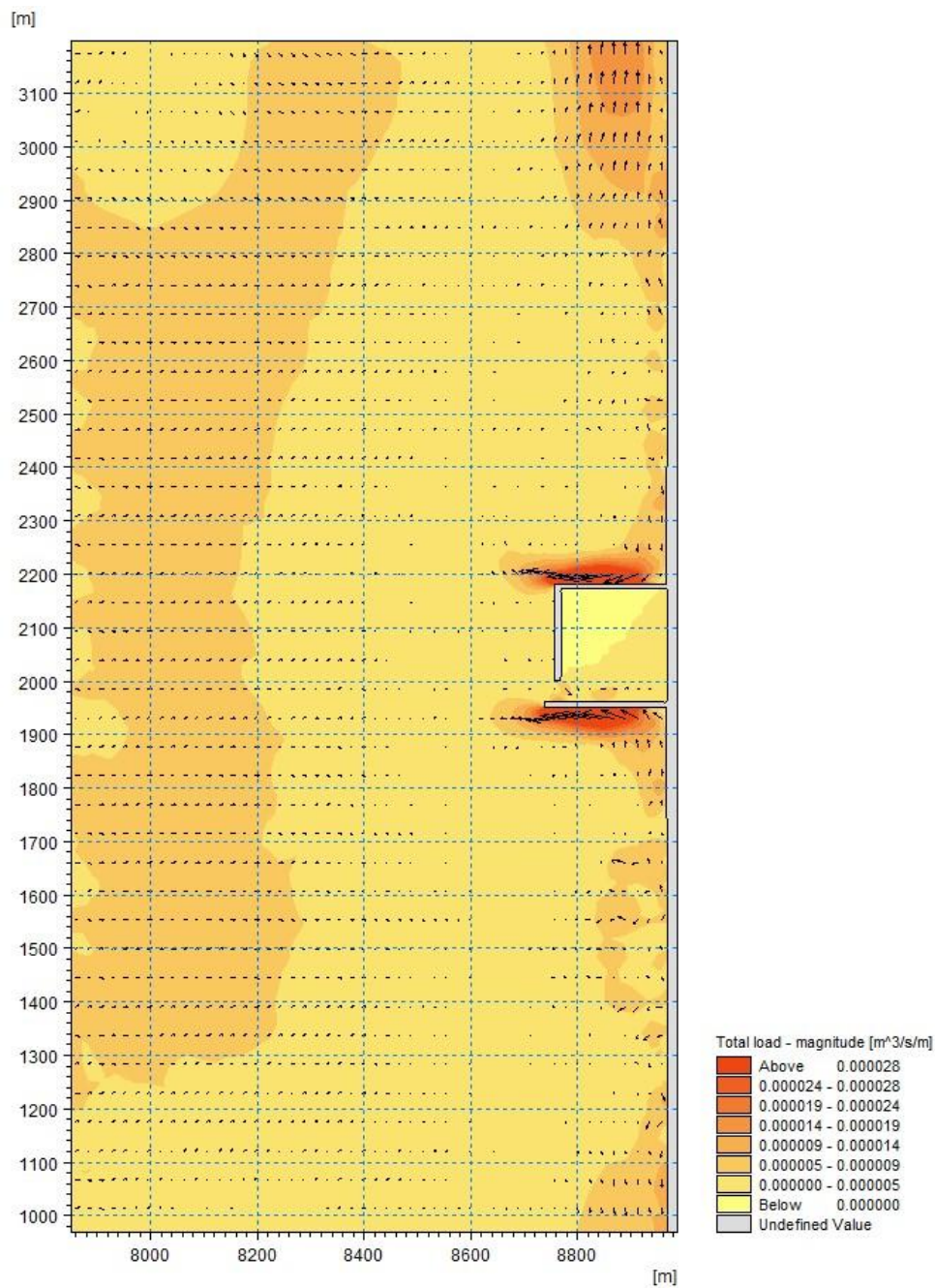


**Σχήμα 51: Ρυθμός στερεομεταφοράς Total load [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2 \text{ m}$ ,  $T_p=6 \text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$ ), Διάταξη 1**



Σχήμα 52: Ρυθμός στερεομεταφοράς Total load [m<sup>3</sup>/s/m], δεύτερο κυματικό σενάριο (H<sub>s</sub>=2.5 m, T<sub>p</sub>=6.5 s, θ=10°), Διάταξη 1

Σε πλήρη αντιστοιχία με την κίνηση του ρεύματος, παρατηρείται εγκάρσια στερεομεταφορά δηλαδή κάθετα στην ακτή, για το τρίτο κυματικό σενάριο.



Σχήμα 53: Ρυθμός στερεομεταφοράς Total load [m<sup>3</sup>/s/m], τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=0^\circ$ ), Διάταξη 1

## 7.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων – Ρυθμός στερεομεταφοράς

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, όπως έχει αναφερθεί, το μοντέλο MIKE ST, με χρήση των αρχείων ύψους κύματος από το μοντέλο MIKE SW και της ταχύτητας ρεύματος από το MIKE HD, υπολογίζει τον ρυθμό στερεομεταφοράς Total load - magnitude. Αντίστοιχα προκύπτουν και ο ρυθμός στερεομεταφοράς (Transport Capacity ή TC) με δεδομένα τα αποτελέσματα του μοντέλου MIKE 21 PMS για το ύψος κύματος και την ταχύτητα ρεύματος από το MIKE 21 HD (Μαυραντωνάκης 2013). Στα Σχήματα 54 και 55 φαίνονται τα αποτελέσματα στη ζώνη θραύσης κοντά στην περιοχή των διατάξεων. Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι τα μεγέθη Total load και Transport Capacity είναι το ίδιο μέγεθος και συγκεκριμένα ο ρυθμός στερεομεταφοράς. Το MIKE 21/3 Coupled Model που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα έρευνα παράγει τα αποτελέσματα του ρυθμού στερεομεταφοράς (Total load) σε μονάδες  $m^3/s/m$  ενώ η παλαιότερη έκδοση του MIKE 21 σε  $m^3/yr/m$ . Για τον λόγο αυτό προσαρμόστηκαν οι παλέτες έτσι ώστε να αναπαριστούν με τον ίδιο τρόπο τα αποτελέσματα. Στη συνέχεια με ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Παρατηρείται έντονο κυματογενές ρεύμα με ταχύτητες ικανές να μεταφέρουν το ιζήμα και η τάση στερεομεταφοράς ακολουθεί την τάση του υδροδυναμικού πεδίου.
- Η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά μόλις συναντήσει τα εξωτερικά έργα της κάθε μαρίνας αλλάζει διεύθυνση και συγκεκριμένα μόλις συναντήσει τη ρίζα του προσήνεμου μώλου η ροή εκτρέπεται προς τα βαθιά, κάθετα με την ακτή. Στο πέρας του κάθετου τμήματος του προσήνεμου μώλου η ροή γίνεται ξανά παράλληλη με την ακτή.
- Το κυματογενές ρεύμα είναι παράλληλο και παραμένει κοντά με τα εξωτερικά λιμενικά έργα των κεκαμμένων (μαρίνα 2 και 5) και ιδιαίτερα των καμπυλοειδών (μαρίνα 3 και 6) προσήνεμων μώλων δημιουργώντας γραμμή παράκαμψης του ιζήματος (bypass). Στους τελείως κάθετους κυματοθραύστες η ροή ιζήματος εκτρέπεται προς τα βαθιά οδηγώντας σε διάβρωση των κατάντη περιοχών.
- Σε όλες τις περιπτώσεις η ανάπτυξη των κυματογενών ρευμάτων καθορίζεται από τη γεωμετρία της κάθε κατασκευής.

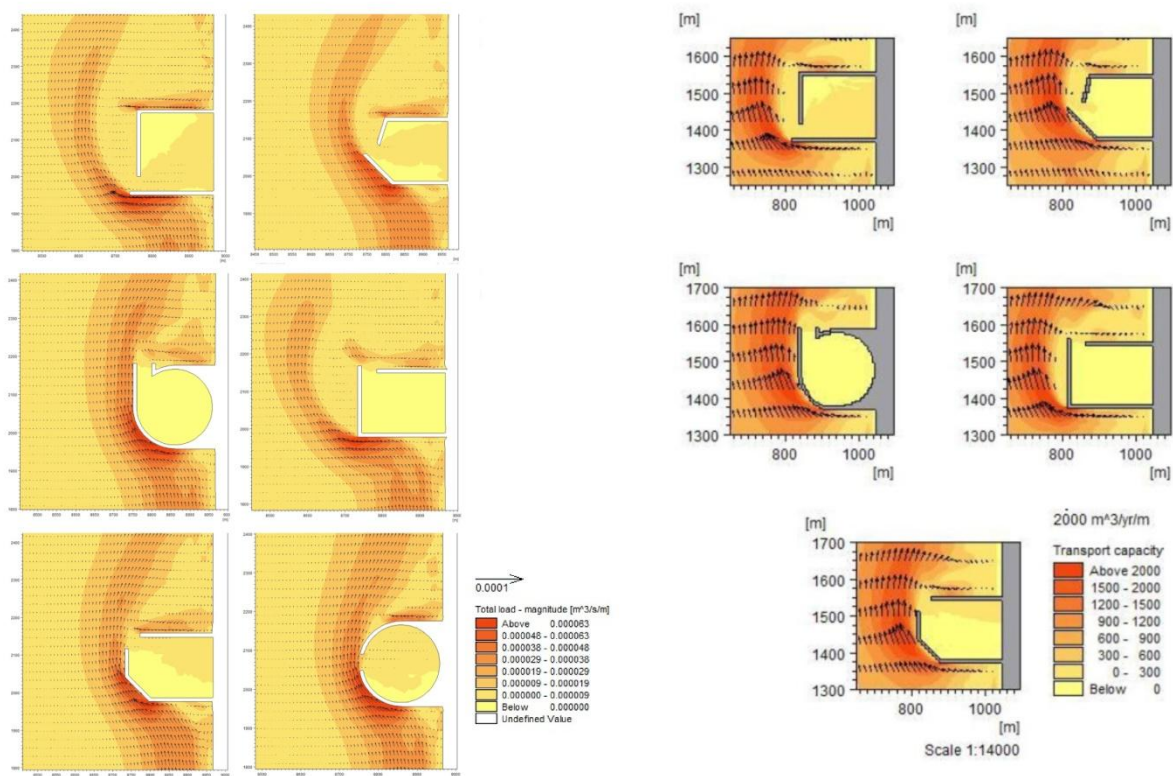
- Παρατηρείται γενικότερα αυξημένη ροή ιζήματος σε σχέση με τα αποτελέσματα του Μαυραντωνάκη (2013) εντός των λιμενολεκανών με χρήση μοντέλου MIKE 21/3 Coupled Model FM.
- Τα αποτελέσματα με πύκνωση τοπικά του κάρναβου του μοντέλου αποδίδουν με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση στερεομεταφοράς και μεταβολής πυθμένα εντός των λιμενολεκανών.
- Το μεταβλητό πλέγμα αναπαριστά πιο πιστά το πραγματικό σχήμα των καμπυλωτών κυματοθραυστών σε σχέση με τον ορθογωνικό κάρναβο.

### 7.5.1 Πρώτο κυματικό σενάριο

Τα αποτελέσματα του MIKE ST για την περιοχή κοντά στις μαρίνες παρουσιάζονται στο Σχήμα 54 με βάση τα οποία προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Η ροή στερεομεταφοράς εκτρέπεται σε μεγαλύτερη απόσταση προς τα βαθειά. Ενισχυμένη στερεομεταφορά κοντά στον υπήνεμο μώλο ενώ η ροή ιζήματος είναι ασθενέστερη και πραγματοποιείται σε μικρότερο πλάτος μπροστά από την είσοδο της Διάταξης 1. Όσον αφορά το εσωτερικό της λιμενολεκάνης παρατηρείται περίπου το ίδιο μοτίβο κίνησης ιζήματος.
- Ροή ιζηματομεταφοράς εφάπτεται του προσήνεμου μώλου και παρατηρείται κίνηση ιζήματος σε μεγάλο μέρος της επιφάνειας της λιμενολεκάνης στη Διάταξη 2 σε αντιδιαστολή με την περιορισμένη κίνηση ιζήματος στο παλαιότερο μοντέλο.
- Στη Διάταξη 3 δεν έχουμε κίνηση ιζήματος στο εσωτερικό και στις δύο περιπτώσεις. Παρατηρούνται διαφορές στην εντονότερη κυκλική ροή ιζήματος εγγύς του υπήνεμου μώλου και στην εφαπτομενική τροχιά της κύριας ροής στερεομεταφοράς με τον κυκλικό λιμενοβραχίονα. Παρατηρείται και στις δύο περιπτώσεις η δημιουργία γραμμής παράκαμψης του ιζήματος (bypass) η οποία τροφοδοτεί την κατάντη περιοχή.
- Στη Διάταξη 4 έχουμε σαφώς μεγαλύτερη εκτόπιση της ροής στερεοπαροχής από τον προσήνεμο μώλο και διαφυγή ιζήματος προς τα βαθειά. Παρατηρείται επίσης αυξημένη στερεομεταφορά κοντά στην είσοδο με την ανάπτυξη στροβιλώδους ροής στην υπήνεμη περιοχή.

- Στη Διάταξη 5 υπάρχει ομοιότητα στην κίνηση του ιζήματος στο εσωτερικό. Η παροχή παρουσιάζεται αυξημένη κοντά στον υπήνεμο πρόβολο και μειωμένη στον προσήνεμο.
- Στη Διάταξη 6 η στερεομεταφορά ακολουθεί το μοτίβο κίνησης ιζήματος της Διάταξης 3 με ελαφρώς ηπιότερες συνθήκες κατάντη αλλά εντονότερη κίνηση ιζήματος στο εσωτερικό. Παρατηρείται η δημιουργία γραμμής παράκαμψης (bypass) του ιζήματος από το Νότιο μέρος προς το Βόρειο κατά την φορά του ρεύματος.

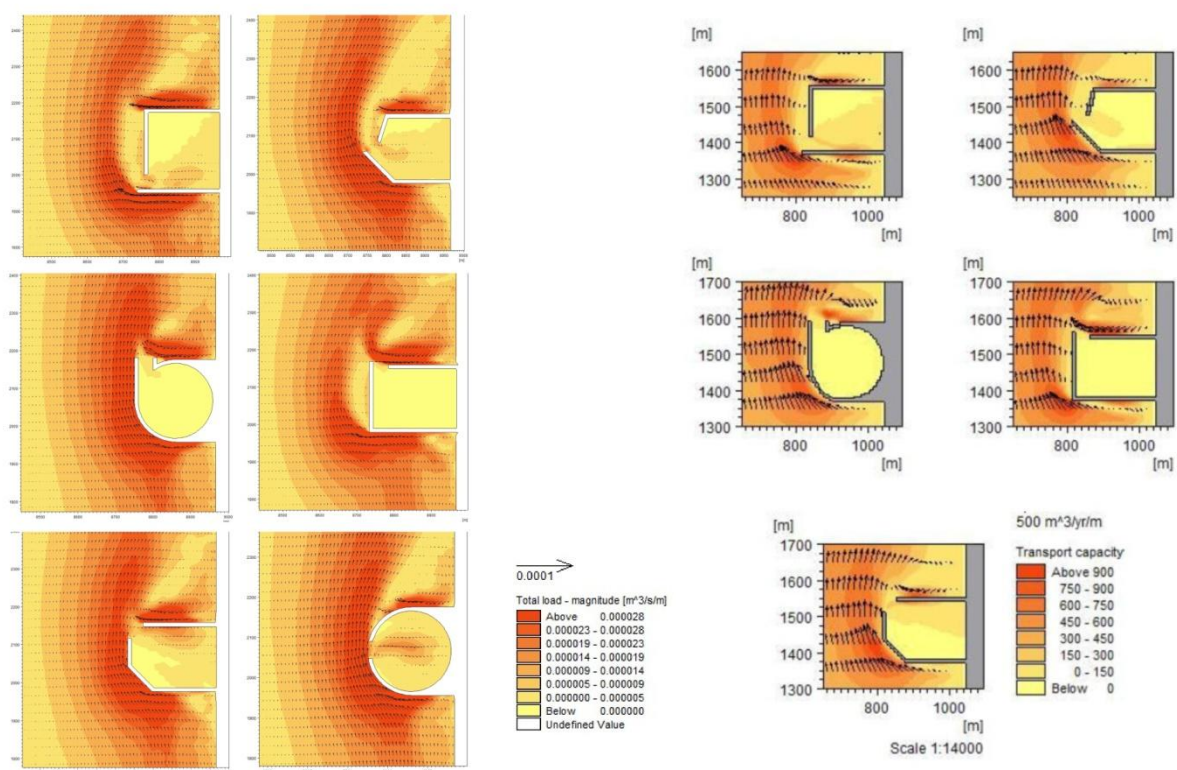


**Σχήμα 54: Σύγκριση αποτελεσμάτων MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα της παρούσας διπλωματική (αριστερά) με του Μαυραντωνάκη (δεξιά) για το πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=45^\circ$ )**

### 7.5.2 Δεύτερο κυματικό σενάριο

Τα αποτελέσματα του MIKE 21 ST για το δεύτερο κυματικό σενάριο παρουσιάζονται στο Σχήμα 55 και όπως φαίνεται δίνουν μεγαλύτερες παροχές στερεομεταφοράς σε όλες τις διατάξεις. Συγκεκριμένα:

- Η ροή ιζήματος εφάπτεται του υπήνεμου μώλου στη Διάταξη 1, ενώ η κίνηση ιζήματος ενισχύεται έντονα από και προς το εσωτερικό της.
- Παρατηρείται υψηλότερη παροχή κοντά στα κάθετα στοιχεία των μώλων για τη Διάταξη 2 και σαφώς εντονότερη κίνηση ιζήματος στο εσωτερικό.
- Στη Διάταξη 3 παρατηρείται ελάχιστη και καθόλου είσοδος ιζήματος στο εσωτερικό αλλά στην πρώτη περίπτωση δημιουργείται έντονη στροβιλική ροή μπροστά στην είσοδο.
- Στη Διάταξη 4 ομοίως έχουμε παρόμοιες αλλά εντονότερες συνθήκες στερεομεταφοράς
- Στη Διάταξη 5 η είσοδος του ιζήματος παρουσιάζεται αυξημένη καθώς τμήμα της κύριας ροής αποκολλάται και εισέρχεται στη λιμενολεκάνη.
- Στη Διάταξη 6 η στερεομεταφορά πραγματοποιείται κοντά στα στοιχεία της μαρίνας ενώ όπως στη Διάταξη 5, μέρος της κύριας ροής αποκολλάται και εισέρχεται στο εσωτερικό



**Σχήμα 55: Σύγκριση αποτελεσμάτων MIKE 21 ST των πέντε διατάξεων για την περιοχή κοντά στη μαρίνα της παρούσας διπλωματική (αριστερά) με του Μαυραντωνάκη (δεξιά) για το δεύτερο κυματικό σενάριο ( $H_s=2.5$  m,  $T_p=6.5$  s,  $\theta=10^\circ$ )**

## **7.6 Μορφολογία πυθμένα**

Για την ολοκληρωμένη κατανόηση των συνθηκών στερεομεταφοράς στην περιοχή εντός των διατάξεων χρειάζεται να μελετηθεί η μεταβολή και ο ρυθμός μεταβολής του πυθμένα πέραν του ρυθμού στερεομεταφοράς με χρήση του μορφολογικού μοντέλου MIKE ST. Εστίαση έχει γίνει στο εσωτερικό και την είσοδο των μαρίνων αλλά και γύρω από τα λιμενικά έργα στις άμεσα παρακείμενες ακτές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση διδιάστατων μορφολογικών μοντέλων παρέχει πληροφορίες για τις αρχικές τάσεις μεταβολής του πυθμένα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αποτελούν μια πρώτη απεικόνιση της δημιουργίας εστιών προσάμμισης και διάβρωσης. Στην παρούσα έρευνα, όπως έχει αναφερθεί, γίνεται επίσης προσέγγιση του προβλήματος της προσάμμισης εντός των μαρίνων με επαλληλία κυματικών σεναρίων.

### **7.6.1 Μεταβολή του πυθμένα**

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζεται η μεταβολή πυθμένα για κάθε κυματικό σενάριο. Στα Σχήματα 56, 57 και 58 γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για το πρώτο, το δεύτερο και τρίτο κυματικό σενάριο αντίστοιχα. Οι αποθέσεις ιζήματος απεικονίζονται στους διδιάστατους χάρτες με χρώμα κόκκινο ενώ η διάβρωση με χρώμα πράσινο. Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρούμε τα εξής για κάθε κυματικό σενάριο:

#### **Πρώτο κυματικό σενάριο:**

- Έντονη απόθεση ιζήματος σε μεγάλη περιοχή μπροστά στην είσοδο της Διάταξης 1. Η απόθεση αυτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 56 είναι εκτεταμένη και αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα στην είσοδο των σκαφών σε βάθος χρόνου. Στο εσωτερικό υπάρχει διάβρωση στην άκρη των μώλων και περιορισμένες προσαμμώσεις κυρίως κοντά στον δευτερεύοντα μώλο.
- Αναφορικά με τη Διάταξη 2, φαίνονται έντονες αποθέσεις κοντά στον προσήνεμο μώλο που εκτείνονται και μπροστά στην είσοδό της. Ενδιάμεσα των στοιχείων της παρατηρούνται τοπικά διάβρωση και προσάμμιση με την πρώτη να επικρατεί.



- Αποθέσεις ιζήματος εντοπίζονται στο καμπύλο μέρος της Διάταξης 3 αλλά και κοντά στον υπήνεμο μώλο. Μπροστά στην είσοδο συνυπάρχουν περιορισμένες προσαμμώσεις με διάβρωση. Στο εσωτερικό δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή.
- Στη Διάταξη 4 επικρατούν παρόμοιες συνθήκες με την 3. Μοναδική διαφορά ότι μπροστά στην είσοδο υπάρχει εντονότερη διάβρωση.
- Στη Διάταξη 5 παρατηρείται είσοδος ιζήματος στο εσωτερικό και απόθεσή του κοντά στον υπήνεμο μώλο. Όσον αφορά το εξωτερικό έχουμε απόθεση ιζήματος κοντά στον προσήνεμο μώλο στα κεκαμμένα τμήματά του.
- Τέλος στη Διάταξη 6 παρατηρείται έντονη προσάμμωση ιδιαίτερα στο εσωτερικό του βορείου στοιχείου της. Η απόθεση ιζήματος πραγματοποιείται έμπροσθεν του μώλου που συναντάει πρώτα το ρεύμα και εκτείνεται μέχρι ένα μέρος της εισόδου της διάταξης.

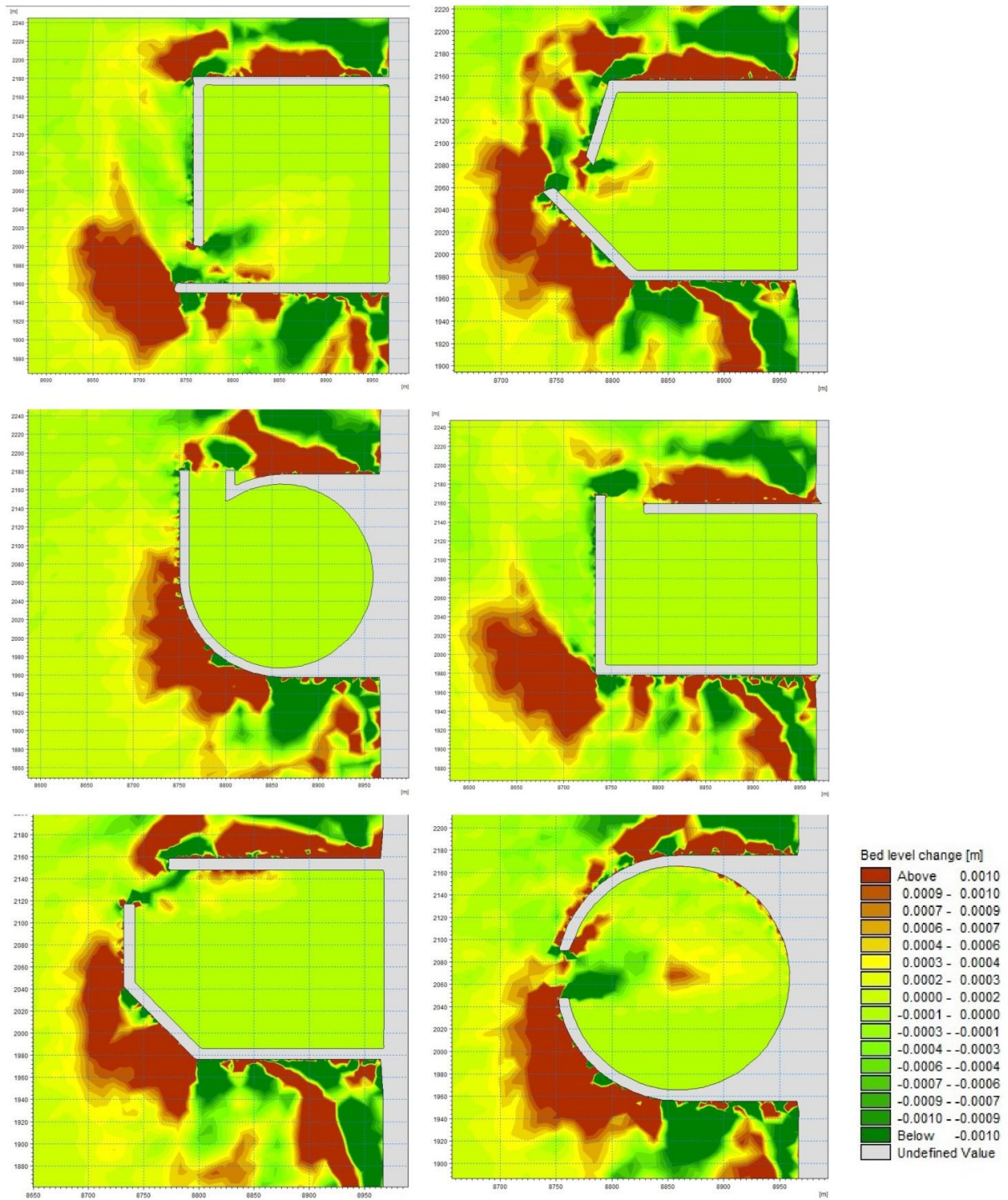
#### **Δεύτερο κυματικό σενάριο:**

- Εκ νέου έντονη απόθεση μπροστά στην είσοδο της Διάταξης 1 και σε εκτεταμένη περιοχή. Το εσωτερικό του πυθμένα της λιμενολεκάνης δείχνει να επηρεάζεται εντονότερα και οι προσαμμώσεις φτάνουν μέχρι το εσωτερικό κρηπίδωμα. Εντός της μαρίνας η διάβρωση επικρατεί.
- Μικρότερης έκτασης αποθέσεις παρουσιάζει η Διάταξη 2 στο εξωτερικό της. Η προσάμμωση μπροστά στην είσοδο παραμένει και για το δεύτερο κυματικό σενάριο ενώ η μεταβολή του πυθμένα στο εσωτερικό της είναι έντονη και ευρεία.
- Απόθεση εμφανίζει στο εξωτερικό του καμπύλου μέρους του προσήνεμου μώλου η Διάταξη 3 και στο δεύτερο κυματικό σενάριο. Έντονη προσάμμωση παρουσιάζεται έμπροσθεν της εισόδου της ενώ στο εσωτερικό δεν υπάρχει κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή.
- Παρόμοιες συνθήκες επικρατούν και στη Διάταξη 4 με τις αποθέσεις κοντά στην είσοδο να συνυπάρχουν με μια τοπική διάβρωση.
- Οι συνθήκες μεταβολής του πυθμένα στο εσωτερικό της Διάταξης 5 είναι σαφώς εντονότερες για το δεύτερο κυματικό σενάριο. Απεικονίζονται έντονες προσαμμώσεις μέχρι το εσωτερικό κρηπίδωμα και διάβρωση τοπικά αμέσως μετά την είσοδο του σκάφους.

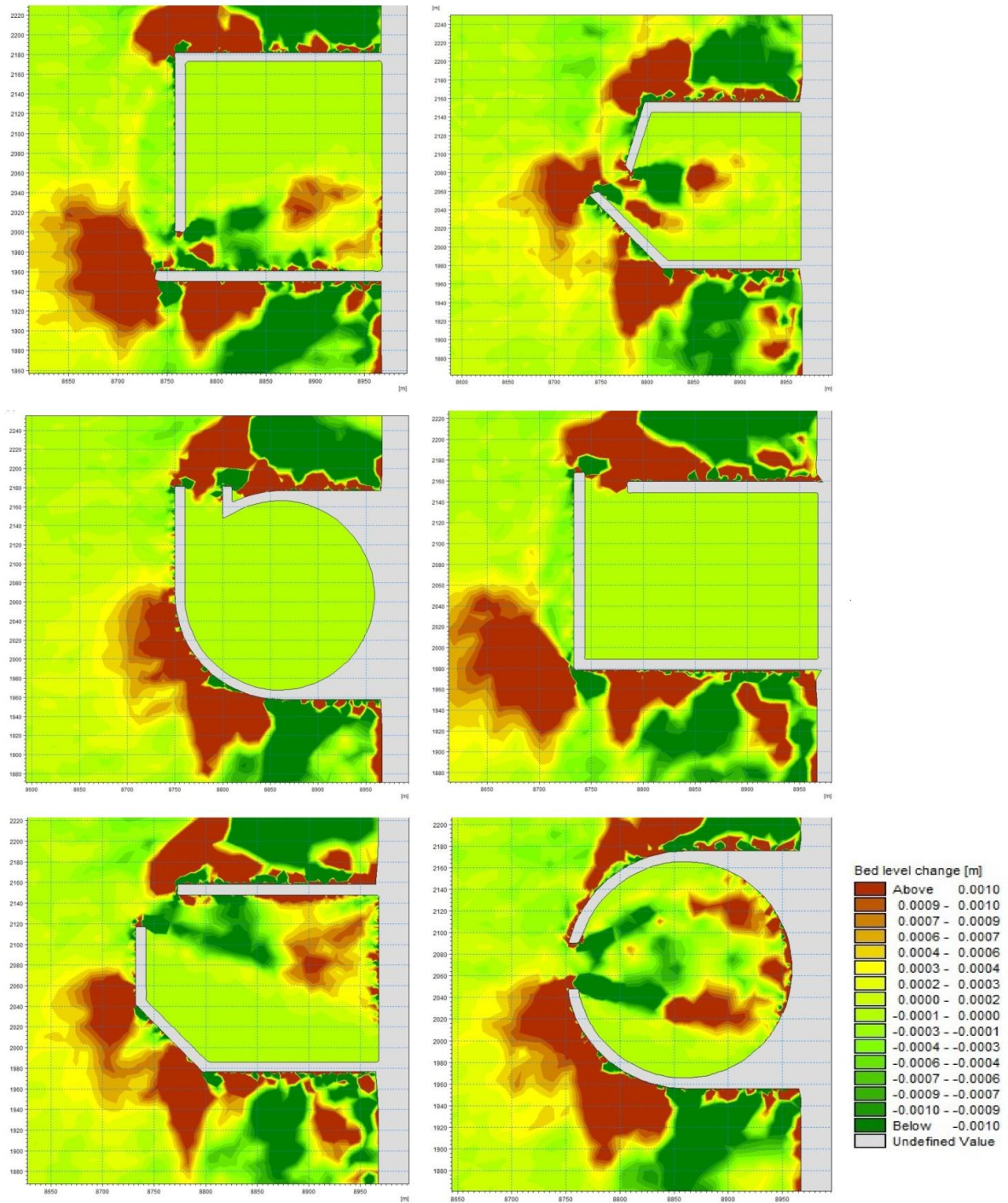
- Τέλος, στη Διάταξη 6 έχουμε εντονότερη και ευρύτερη προσάμμωση σε μεγάλες περιοχές του εσωτερικού της. Παρά τις τοπικές διαβρώσεις η προσάμμωση φαίνεται να υπερισχύει.

### **Τρίτο κυματικό σενάριο:**

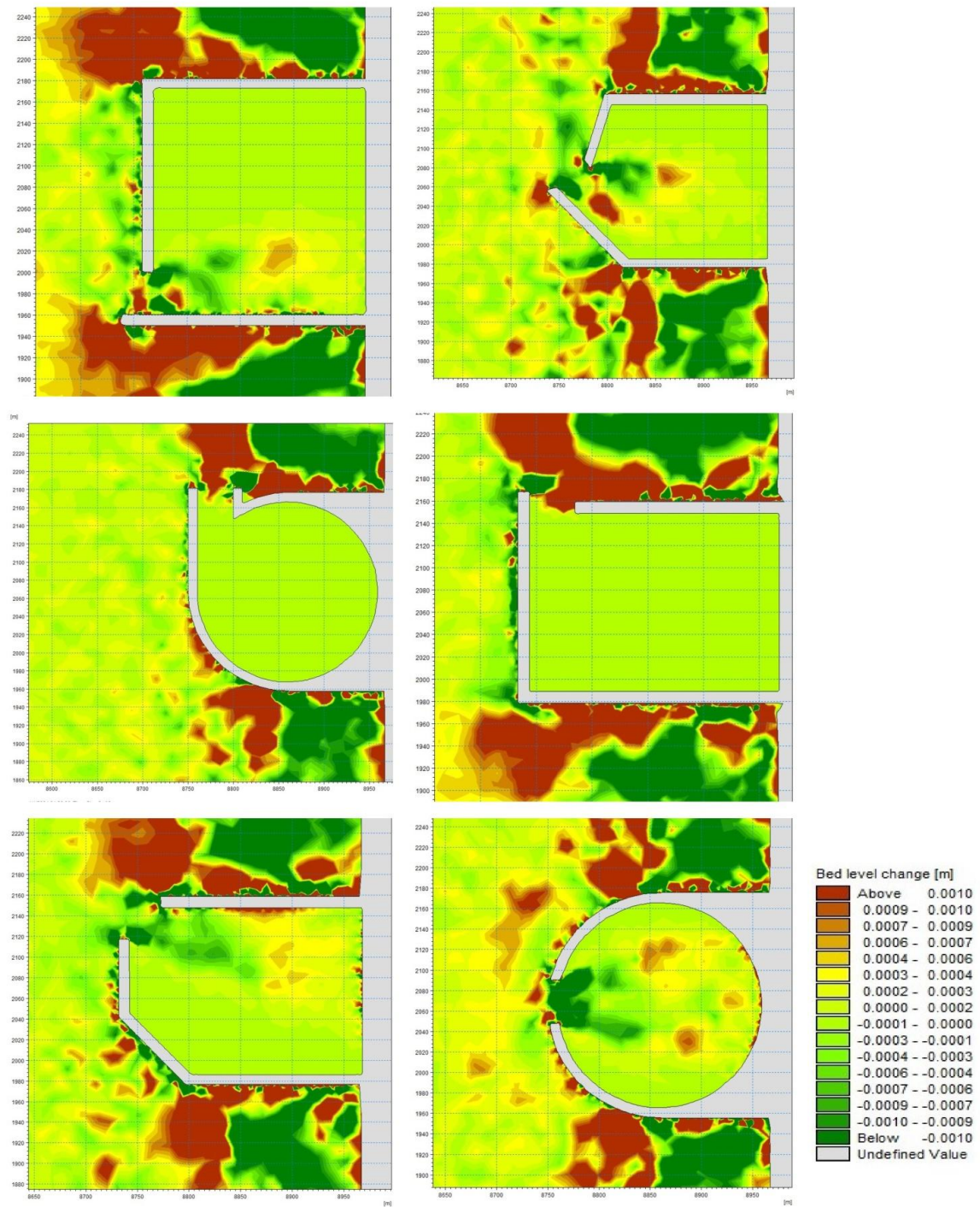
- Οι αποθέσεις στη Διάταξη 1 εντοπίζονται στα βαθειά ενώ η διάβρωση κοντά στην ακτογραμμή. Είναι αναμενόμενο καθώς πρόκειται για εκδήλωση της εγκάρσιας στερεομεταφοράς. Περιορισμένες προσαμμώσεις και διάβρωση εμφανίζονται κοντά στην είσοδο και στο εσωτερικό της.
- Περιορισμένη μεταβολή του πυθμένα παρουσιάζεται στη Διάταξη 2 με τοπική διάβρωση κοντά στην είσοδο και στο εσωτερικό. Εντός της διάταξης απεικονίζονται και δύο περιοχές προσαμμώσεων με μικρή έκταση.
- Η εγκάρσια στερεομεταφορά μεταφέρει το ίζημα μπροστά στην είσοδο της Διάταξης 3. Αναφορικά με το εσωτερικό της δεν παρατηρείται είσοδος και έξοδος ιζήματος.
- Στη Διάταξη 4 οι φερτές ύλες εναποτίθενται σε μεγάλη έκταση μπροστά στην είσοδό της. Ο πυθμένας στη λιμενολεκάνη δεν παρουσιάζει μεταβολή.
- Στη Διάταξη 5 παρατηρείται μια ενδιάμεση κατάσταση για το τρίτο κυματικό σενάριο όσον αφορά τη μεταβολή του πυθμένα στο εσωτερικό της σε σύγκριση με τα δύο πρώτα σενάρια. Οι προσαμμώσεις και η διάβρωση εντοπίζονται στις ίδιες περιοχές περίπου με το δεύτερο κυματικό σενάριο με χαμηλότερη ένταση.
- Προσαμμώσεις στο εσωτερικό της Διάταξης 6 εμφανίζονται και στο τρίτο κυματικό σενάριο ενώ η διάβρωση κυριαρχεί στην περιοχή της εισόδου



Σχήμα 56: Μεταβολή πυθμένα κοντά στις διατάξεις για το πρώτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=45^\circ$ )



Σχήμα 57: Μεταβολή πυθμένα κοντά στις διατάξεις για το δεύτερο κυματικό σενάριο ( $H_s=2.5$  m,  $T_p=6.5$  s,  $\theta=10^\circ$ )



Σχήμα 58: Μεταβολή πυθμένα κοντά στις διατάξεις για το τρίτο κυματικό σενάριο ( $H_s=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=0^\circ$ )

### 7.6.2 Επαλληλία κυματικών σεναρίων

Στο εδάφιο αυτό γίνεται επαλληλία των αποτελεσμάτων του πρώτου και του δεύτερου κυματικού σεναρίου. Με τη μέθοδο αυτή γίνεται καλύτερη προσέγγιση του προσπίπτοντος κυματικού κλίματος καθώς στην φύση συνυπάρχουν πλήθος κυματικών σεναρίων που δεν μπορούν να περιγραφούν επαρκώς από έναν μόνο επικρατούντα κυματισμό. Με χρήση της επαλληλίας γίνεται ο υπολογισμός του ιζηματικού ισοζυγίου του πυθμένα στο εσωτερικό των διατάξεων και ο υπολογισμός του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα. Ο υπολογισμός του ιζηματικού ισοζυγίου αποδίδει την ένταση προσαμμώσεων ή της διαφυγής ιζήματος από το εσωτερικό της λιμενολεκάνης ενώ ο ρυθμός μεταβολής του πυθμένα περιγράφει χωρικά τις αρχικές εστίες προσάμμωσης και διάβρωσης κοντά και εντός των διατάξεων.

Τα αποτελέσματα μεταβολής του πυθμένα συνοψίζονται στον Πίνακα 7.1. Γίνεται κατάτμηση της επιφάνειας εντός της λιμενολεκάνης στα αποτελέσματα του μοντέλου MIKE ST για τη μεταβολή του πυθμένα σε τριγωνικά στοιχεία και δημιουργείται πλέγμα. Τα στοιχεία του πλέγματος εμπεριέχουν τις τιμές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ισοζυγίου με την χρήση υπολογιστικού φύλλου. Πραγματοποιείται σύγκριση των διατάξεων με επαλληλία κυματισμών. Υποθέτουμε ότι το 75% του χρόνου επικρατεί το 1<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{rms} = 2$  m,  $T_p = 6$  s,  $\theta = 45^\circ$ ) και το υπόλοιπο 25% του χρόνου το 2<sup>ο</sup> κυματικό σενάριο ( $H_{rms} = 2.5$  m,  $T_p = 6.5$  s,  $\theta = 10^\circ$ ). Ανάλογα με τον χρόνο επικράτησης του κάθε κυματικού σεναρίου καθορίζονται οι συντελεστές βαρύτητας για τα αποτελέσματα του ισοζυγίου που παρουσιάζει το καθένα. Η κατάσταση αυτή είναι υποθετική, παρόλα αυτά προσομοιάζει τη μέθοδο που χρησιμοποιείται στον σχεδιασμό διατάξεων με κριτήριο τις συνθήκες στερεομεταφοράς. Για τον υπολογισμό της επαλληλίας των κυματικών σεναρίων έγινε η στάθμισή τους κατ' απόλυτη τιμή ώστε να συγκριθεί κατά πόσον το προσπίπτον κυματικό κλίμα επηρεάζει τον πυθμένα.

**Πίνακας 7.1: Αποτελέσματα μεταβολής πυθμένα [m] για το πρώτο και δεύτερο κυματικό σενάριο και για την επαλληλία τους, για όλες τις διατάξεις**

<b>Διατάξεις</b>	<b>Μεταβολή πυθμένα για κυματικό σενάριο 1 [m]</b>	<b>Μεταβολή πυθμένα για κυματικό σενάριο 2 [m]</b>	<b>Μεταβολή πυθμένα για επαλληλία σεναρίων [m]</b>
<b>Διάταξη 1</b>	-0,132	-0,172	0,142
<b>Διάταξη 2</b>	-0,104	-0,242	0,138
<b>Διάταξη 3</b>	0,001	0,004	0,002
<b>Διάταξη 4</b>	0,004	0,147	0,04
<b>Διάταξη 5</b>	0,012	0,126	0,04
<b>Διάταξη 6</b>	0,166	0,289	0,197

Είναι εμφανές ότι η κίνηση ιζήματος παρουσιάζεται εντονότερη για το δεύτερο κυματικό σενάριο για όλες τις διατάξεις. Διαπιστώνεται ακόμη ότι το άθροισμα των τιμών των στοιχείων του πλέγματος στο εσωτερικό των Διατάξεων 1 και 2 προκύπτει αρνητικό και για τα δύο κυματικά σενάρια. Στις υπόλοιπες διατάξεις έχουμε θετική μεταβολή πυθμένα δηλαδή προσαμμώσεις με είσοδο του ιζήματος. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Για τη Διάταξη 1 συντελείται διάβρωση του πυθμένα της λιμενολεκάνης με έξοδο ιζήματος από αυτή. Η διάταξη παρουσιάζει απώλεια ιζήματος με πτώση της στάθμης του πυθμένα κατά 0.14 m μεσοσταθμικά.
- Στη Διάταξη 2 παρουσιάζονται όμοια αποτελέσματα με τη Διάταξη 1 και ίδια πτώση του πυθμένα περίπου από την επαλληλία σεναρίων, με σαφώς εντονότερη διάβρωση στο δεύτερο κυματικό σενάριο από ότι στο πρώτο
- Είναι εμφανές ότι η Διάταξη 6 αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση καθώς εμφανίζει την υψηλότερη αύξηση του επιπέδου του πυθμένα προσεγγίζοντας τα 0.20 m. Αυτό συμβαίνει διότι η καμπυλοειδής μορφή των στοιχείων της διάταξης δεν εκτρέπει το ρεύμα και τη ροή στερεομεταφοράς στα βαθιά και ένα σημαντικό μέρος της ροής εισέρχεται από την απροστάτευτη είσοδο.

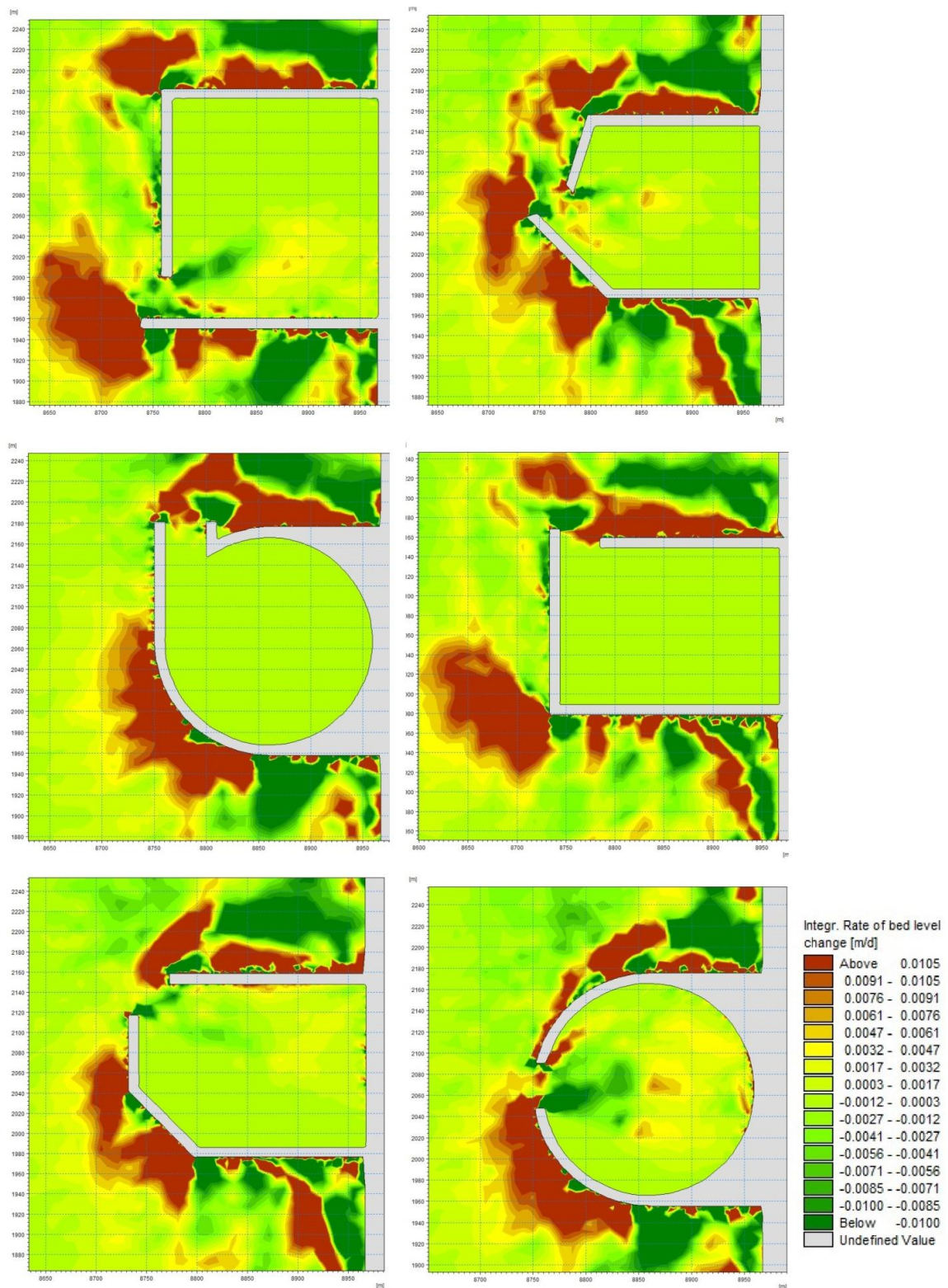
- Στη Διάταξη 3 έχουμε την ελάχιστη είσοδο ιζήματος στο εσωτερικό τόσο στο πρώτο όσο και στο δεύτερο κυματικό σενάριο
- Στη Διάταξη 4 υπάρχει εντονότερη είσοδος ιζήματος στο δεύτερο κυματικό σενάριο ενώ παρατηρείται ελάχιστη στο πρώτο. Στην επαλληλία κυματικών σεναρίων εμφανίζει χαμηλή τιμή με περίπου 0.04 m.
- Στη Διάταξη 5 έχουμε αλληλοαναίρεση των προσαμώσεων και της διάβρωσης και το ισοζύγιο λαμβάνει χαμηλή τιμή. Στην επαλληλία η μεταβολή πυθμένα υπολογίστηκε στα 0.04 m.

Με χρήση του MIKE 21 toolbox είναι δυνατή η ενσωμάτωση και στάθμιση των αποτελεσμάτων δύο κυματικών σεναρίων για συγκεκριμένα αρχεία αποτελεσμάτων του MIKE ST. Λαμβάνονται εκ νέου οι ίδιες τιμές συντελεστών βαρύτητας με την υπόθεση που έχει γίνει. Στο Σχήμα 59 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της ενοποίησης των αποτελεσμάτων του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα για το πρώτο και δεύτερο κυματικό σενάριο βάση της οποίας προκύπτουν τα εξής:

- Οι αποθέσεις έμπροσθεν της εισόδου της Διάταξης 1 παραμένουν καθώς είναι έντονες και στα δύο κυματικά σενάρια. Η κατάσταση στο εσωτερικό παραμένει με διάβρωση στην περιοχή αμέσως μετά την είσοδο και τοπικές προσαμώσεις μικρής έντασης.
- Στα συνολικά αποτελέσματα απεικονίζεται προσάμωση μπροστά στην είσοδο για τη Διάταξη 2. Στο εσωτερικό της εμφανίζονται περιορισμένες αποθέσεις και διάβρωση κοντά στον υπήνεμο μώλο.
- Για τη Διάταξη 3 ο ρυθμός αλλαγής του επιπέδου του πυθμένα της λιμενολεκάνης παραμένει μηδενικός. Η περιοχή εμπρός της εισόδου παρουσιάζει προσαμώσεις μέτριας έντασης και έκτασης.
- Η επαλληλία κυματισμών δεν επιφέρει αλλαγές στον ρυθμό μεταβολής του πυθμένα της Διάταξης 4. Στην περιοχή της εισόδου συνυπάρχει διάβρωση με προσάμωση κοντά στον υπήνεμο μώλο, στοιχείο κοινό και στα δύο κυματικά σενάρια.
- Βελτιωμένη παρουσιάζεται η κατάσταση στο εσωτερικό της Διάταξης 5 καθώς τα σημεία εμφάνισης προσαμώσεων είναι ηπιότερα. Η απόθεση ιζήματος παραμένει κοντά στην άκρη του υπήνεμου μώλου.



- Η έντονη απόθεση στο εσωτερικό του βόρειου μώλου κοντά στην είσοδο της Διάταξης 6 παραμένει και στα συνολικά αποτελέσματα ενώ παρουσιάζεται και τοπική διάβρωση εντός της εισόδου.



Σχήμα 59: Ρυθμός μεταβολής πυθμένα με επαλληλία πρώτου και δεύτερου κυματικού σεναρίου

## 8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 8.1 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκε η απόδοση έξι γενικών διατάξεων μαρίνων σε σχέση με την παράκτια στερεομεταφορά. Οι πέντε διατάξεις λήφθηκαν ίδιες με συναφείς έρευνες ώστε να παραχθούν συγκρίσιμα αποτελέσματα και σε αυτές προστέθηκε μια ακόμη η οποία αναφέρεται στην βιβλιογραφία ως βέλτιστη σχετικά με τις επιπτώσεις της στην παράκτια στερεομεταφορά. Ειδικότερα διερευνήθηκαν οι συνθήκες στερεομεταφοράς για τρία κυματικά σενάρια, που αντιπροσωπεύουν το κυματικό κλίμα στον ελληνικό χώρο, κοντά και εντός των λιμενολεκανών των διατάξεων και το κατά πόσο επηρεάζονται αναφορικά με τη γεωμετρία των διατάξεων, τη θέση της εισόδου καθώς και τον βαθμό προστασίας της. Το μοντέλο εφαρμόστηκε για κάθε διάταξη τρεις φορές, μία για κάθε κυματικό σενάριο. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται ως προς τον ρυθμό στερεομεταφοράς με αυτά του Μαυραντωνάκη (2013) για τα δύο πρώτα κυματικά σενάρια. Από την σύγκριση προκύπτει ότι το νέο μοντέλο που προκρίνεται από το DHI καταργώντας το παλαιότερο και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αποδίδει με μεγαλύτερη ακρίβεια την κατάσταση στερεομεταφοράς ενώ ταυτόχρονα η ροή ιζήματος παρουσιάζεται αυξημένη στο εσωτερικό των λιμενολεκανών. Αναφορικά με την απόδοση των διατάξεων, παρατηρείται η ανάπτυξη γραμμής παράκαμψης του ιζήματος (bypass) για τις Διατάξεις 3 και 6 δηλαδή η τροφοδοσία των αμέσως κατάντη ακτών με ιζήμα. Στις Διατάξεις 2 και 5 παρατηρείται επίσης γραμμή παράκαμψης ιζήματος (bypass) αλλά η ροή επανέρχεται σε μεγαλύτερη απόσταση κατάντη της κατασκευής. Οι Διατάξεις 1 και 4 εκτρέπουν το ιζήμα προς τα ανοιχτά και οδηγούν στην διάβρωση των κατάντη ακτών. Σε δεύτερο στάδιο αξιολογείται το μορφολογικό μοντέλο για την περιγραφή των προσαμμώσεων και της διάβρωσης στο εσωτερικό των διατάξεων. Τέλος έγινε ο υπολογισμός του ιζηματικού ισοζυγίου και του ρυθμού μεταβολής του πυθμένα με επαλληλία του πρώτου και δεύτερου κυματικού σεναρίου. Με βάση τη μορφοδυναμική διερεύνηση οι Διατάξεις 1, 2, 5 και 6 παρουσιάζουν εστίες προσάμμωσης στο εσωτερικό του με την έκτη να είναι η δυσμενέστερη, ενώ στις Διατάξεις 3 και 4 οι προσαμμώσεις περιορίζονται μπροστά στην είσοδό τους.

## 8.2 Συνολικά Συμπεράσματα

Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα από την σύνθεση των αποτελεσμάτων τα οποία συμφωνούν με τα αποτελέσματα συναφών ερευνών για τον βέλτιστο σχεδιασμό της διάταξης μιας μαρίνας:

- Οι προσήνεμοι μώλοι θα πρέπει να σχεδιάζονται με καμπυλότητα (Διατάξεις 3, 6) έτσι ώστε να σχηματίζεται γραμμή παράκαμψης του ιζήματος (bypass).
- Η είσοδος πρέπει να τοποθετείται στην υπήνεμη πλευρά (Διατάξεις 3,4) σε σχέση με την επικρατούσα διεύθυνση κυματισμών ώστε να ελαχιστοποιείται η είσοδος ιζήματος στη λιμενολεκάνη.
- Μώλοι των οποίων η γεωμετρία χαρακτηρίζεται από κάθετα στοιχεία εκτρέπουν το ρεύμα και συνεπώς τη ροή ιζήματος προς τα ανοιχτά προκαλώντας διάβρωση στις κατάντη ακτές.
- Ειδικότερα στον σχεδιασμό μώλων με καμπυλότητα, η είσοδος πρέπει να είναι επαρκώς προστατευμένη καθώς το ρεύμα και η ροή στερεομεταφοράς βρίσκονται κοντά στα εξωτερικά λιμενικά έργα της διάταξης και διευκολύνεται η είσοδος του ιζήματος στο εσωτερικό.
- Διατάξεις με την είσοδο τους προσανατολισμένη προς την ανοιχτή θάλασσα (Διάταξη 1 και 6) αντιμετωπίζουν προβλήματα προσάμμωσης στο εσωτερικό τους.
- Ο προσήνεμος μώλος πρέπει να σχεδιάζεται με επαρκές μήκος ώστε η είσοδος να είναι πλήρως προστατευμένη. Σε περίπτωση που ο μώλος δεν παρέχει πλήρη κάλυψη στην είσοδο (Διάταξη 5) τότε έχουμε προσαμμώσεις στο εσωτερικό.
- Με βάση τα παραπάνω, η αποδοτικότερη διάταξη σε σχέση με τις συνθήκες στερεομεταφοράς και τη μεταβολή του πυθμένα στο εσωτερικό της είναι η Διάταξη 3. Προκαλεί τις ηπιότερες επιπτώσεις στις αμέσως κατάντη ακτές ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει τις μικρότερες προσαμμώσεις οι οποίες είναι συγκεντρωμένες κοντά στην είσοδο. Η απόθεση στην είσοδο είναι προτιμότερη από την προσάμμωση σε διάφορες εστίες στο εσωτερικό καθώς για την αντιμετώπιση της μπορεί να γίνεται τακτική βυθοκόρηση μόνο στην περιοχή της εισόδου.
- Το νέο υπολογιστικό μοντέλο MIKE 21 Coupled Model FM (Flexible Mesh) αποδίδει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις συνθήκες στερεομεταφοράς κοντά και εντός των λιμενικών έργων ενώ η κίνηση ιζήματος στο εσωτερικό είναι αυξημένη.

- Αναφορικά με τα κυματικά σενάρια τις υψηλότερες προσαμμώσεις τις προκαλεί το δεύτερο κυματικό σενάριο. Αυτό συμβαίνει καθώς στο δεύτερο κυματικό σενάριο το ύψος κύματος είναι μεγαλύτερο. Συνεπώς, η ζώνη θραύσης έχει μεγαλύτερο πλάτος και η είσοδος των διατάξεων βρίσκεται εντός αυτής.

### 8.3 Προτάσεις για περαιτέρω Έρευνα

Περαιτέρω έρευνα περιλαμβάνει:

- Να εφαρμοστούν τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας αλλά και συναφών ερευνών στον σχεδιασμό πραγματικών μαρίνων και να διερευνηθεί εάν δύναται να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός τους με πραγματικά δεδομένα (βαθυμετρία, κυματικά σενάρια κτλ.)
- Για την ολοκληρωμένη διερεύνηση των διατάξεων που αξιολογήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία σε σχέση με τις παράκτιες διεργασίες προτείνεται η έρευνα της ποιότητας και επανακυκλοφορίας του νερού των λιμενολεκανών.
- Ευρύτερη διερεύνηση άλλων παραμέτρων σε σχέση με την παράκτια στερεομεταφορά που δεν εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία όπως γεωμετρικά στοιχεία και διαστάσεις της μαρίνας και το πλάτος της εισόδου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

### • Ελληνική βιβλιογραφία

Διαμαντίδης Κ., 2016, Βάση Δεδομένων Μαρίνων Ελλάδος, Διπλωματική Εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Καραμπάς Θ., 2004, Υπολογιστική Κυματομηχανική και Ακτομηχανική Θεώρητική Προσέγγιση Εκπαιδευτικό και Επιχειρησιακό Λογισμικό, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Μυτιλήνη

Καραμπάς Θ., Κρεστενίτης Ι., Κουτίτας Χ., 2015, Ακτομηχανική – Έργα Προστασίας Ακτών, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ) ([www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)), Αθήνα

Κουτίτας Χρ., 1998, Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα. Ζήτη, Θεσσαλονίκη

Μέμος Κ., 2013, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, Συμμετρία, Αθήνα

Μέμος Κ., 2008, Λιμενικά Συστήματα, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα

Μουτζούρης Κ.Ι., 2005, Εισαγωγή στην Ακτομηχανική, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα

Μουτζούρης Κ.Ι., 2009, Θαλάσσια Υδραυλική, ΕΜΠ, Αθήνα

Μαυραντωνάκης Αντ., 2013, Διερεύνηση Σχεδιασμού Διάταξης Μαρίνας σε Σχέση με τη Στερεομεταφορά στην Είσοδο και Προτάσεις Βελτίωσης Μεταπτυχιακή Εργασία, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων

Σοφιαδέλλη Δαν., 2014, Διερεύνηση συνθηκών στερεομεταφοράς και κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό διατάξεων μαρίνων, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων

- **Διεθνής βιβλιογραφία**

DHI, 2017, MIKE 21/3 Coupled Model FM, User Guide, Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.

DHI, 2018, MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.

DHI, 2017, MIKE 21 SW, Spectral Waves FM Module, Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.

DHI, 2017, MIKE 21 and MIKE 3 Flow Model FM, Sand Transport Module, Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.

Holthuijsen, L.H., Booij, N. and Herbers, T.H.C. (1989), A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, Coastal Engr., 13, 23-54

Komar, P. D. Beach Processes and Sedimentation, 2<sup>nd</sup> ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998

Komen, G.J. Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann K., Hasselmann S. and Janssen P.A.E.M., (1994), Dynamics and Modelling of ocean waves, Cambridge University Press, UK, 560 pp.

Memos, C.. (2004). Port Planning.

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

Young, I.R., (1999), Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier

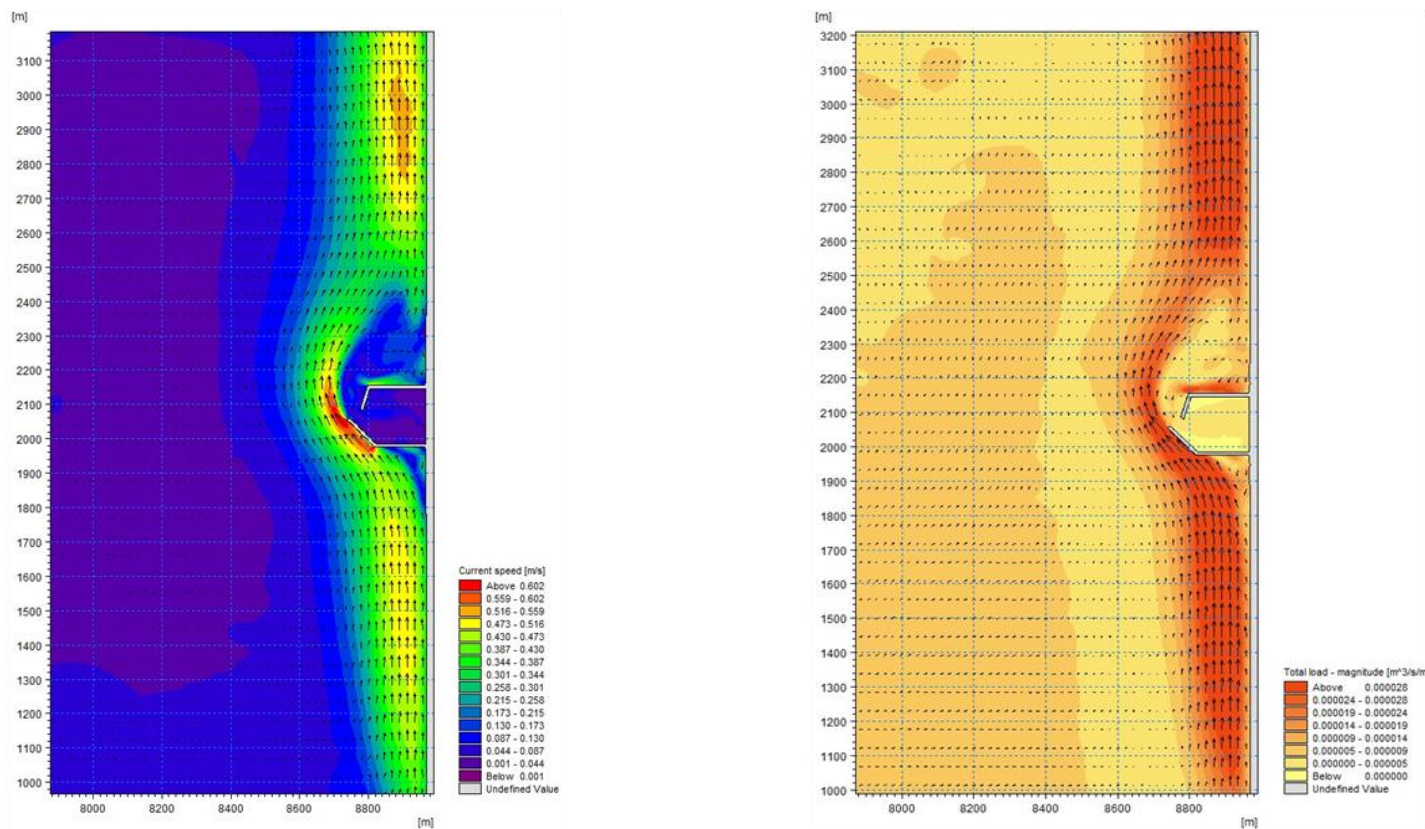




## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Διάταξη 2

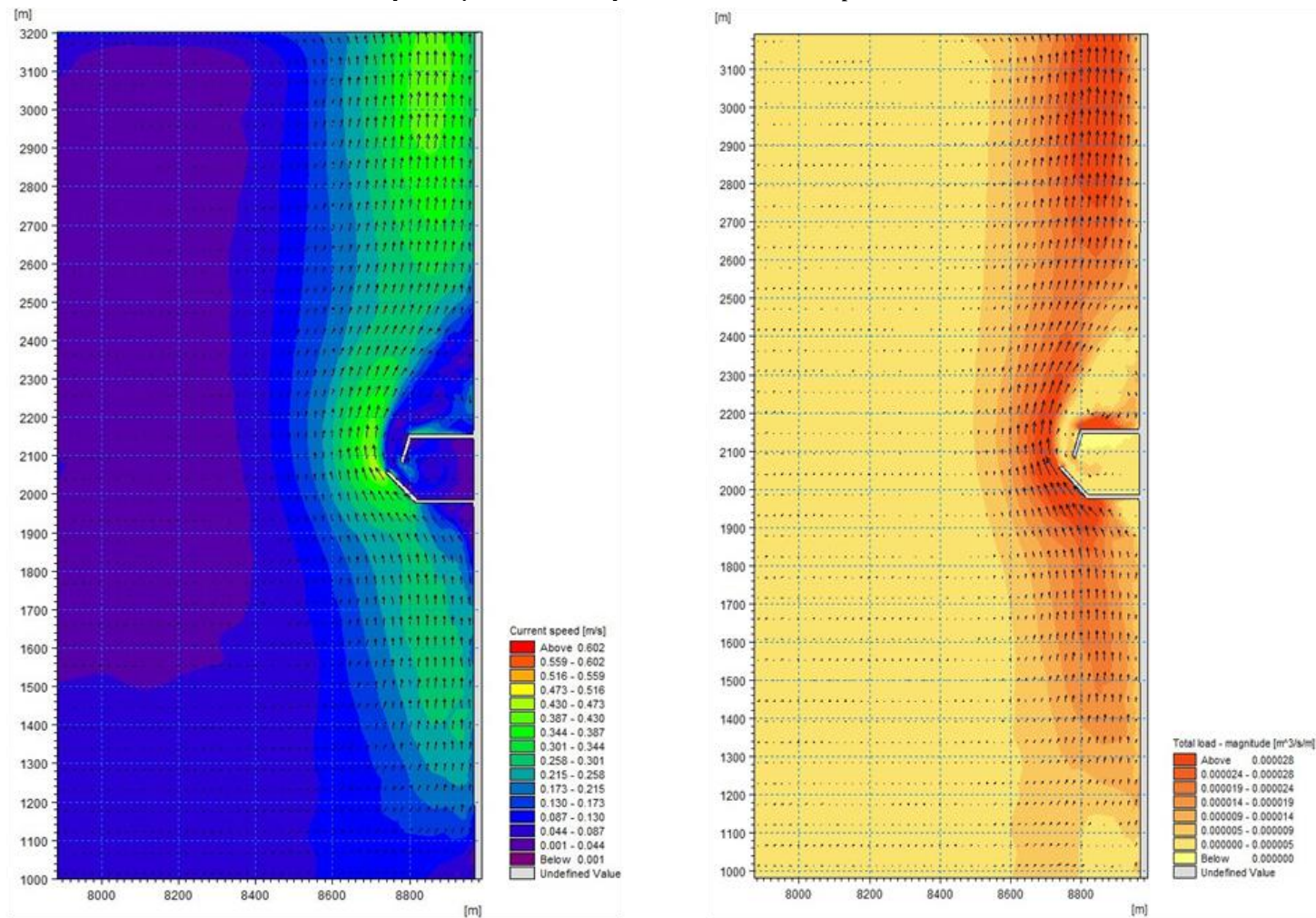
Πρώτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



Σχήμα 60: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 2

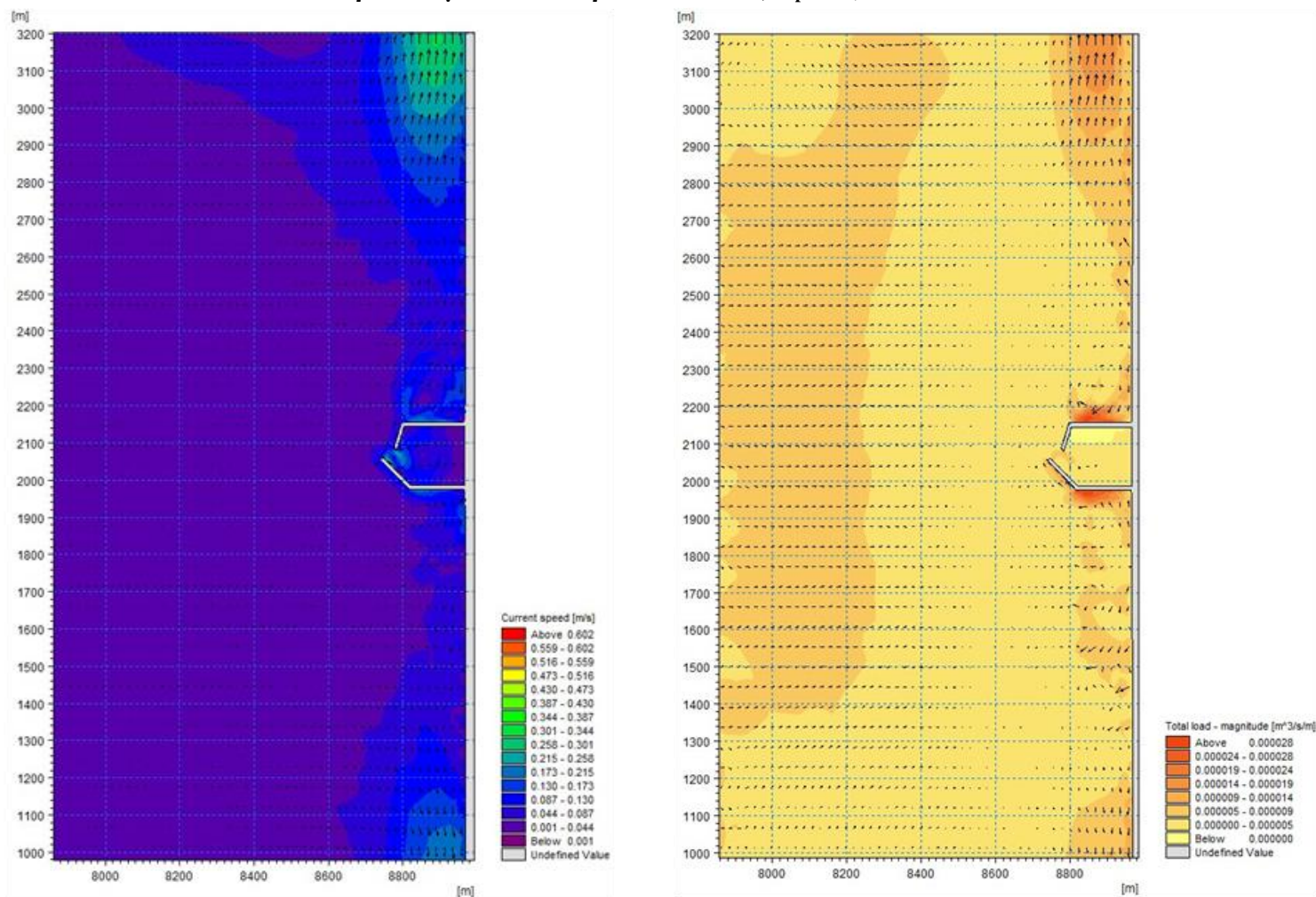
Διάταξη 2

Δεύτερο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2.5$  m,  $T_p=6.5$  s,  $\theta=10^\circ$



Σχήμα 61: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m<sup>3</sup>/s/m], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 2

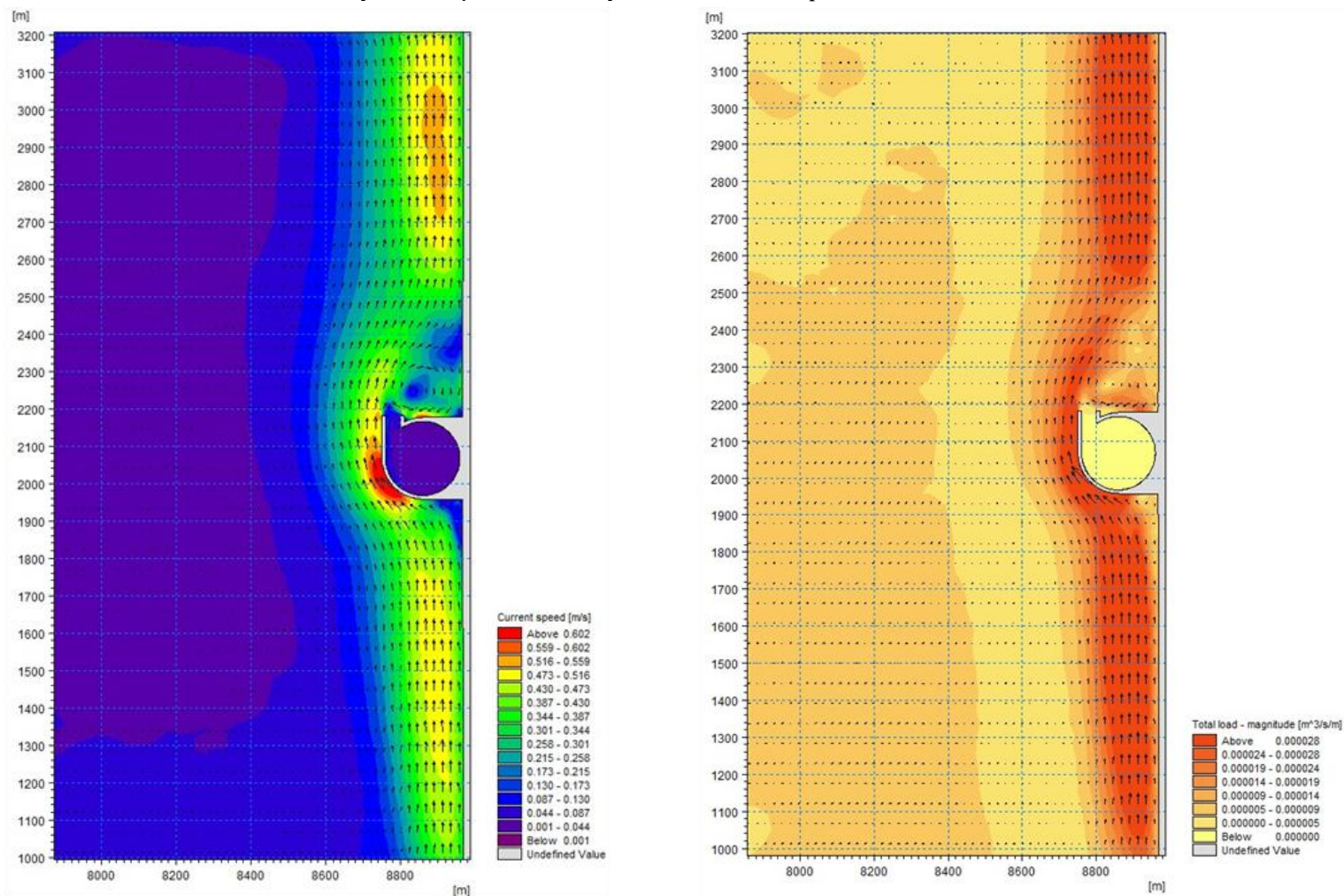
Διάταξη 2  
 Τρίτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=0^\circ$



Σχήμα 62: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [ $\text{m/s}$ ] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 2

Διάταξη 3

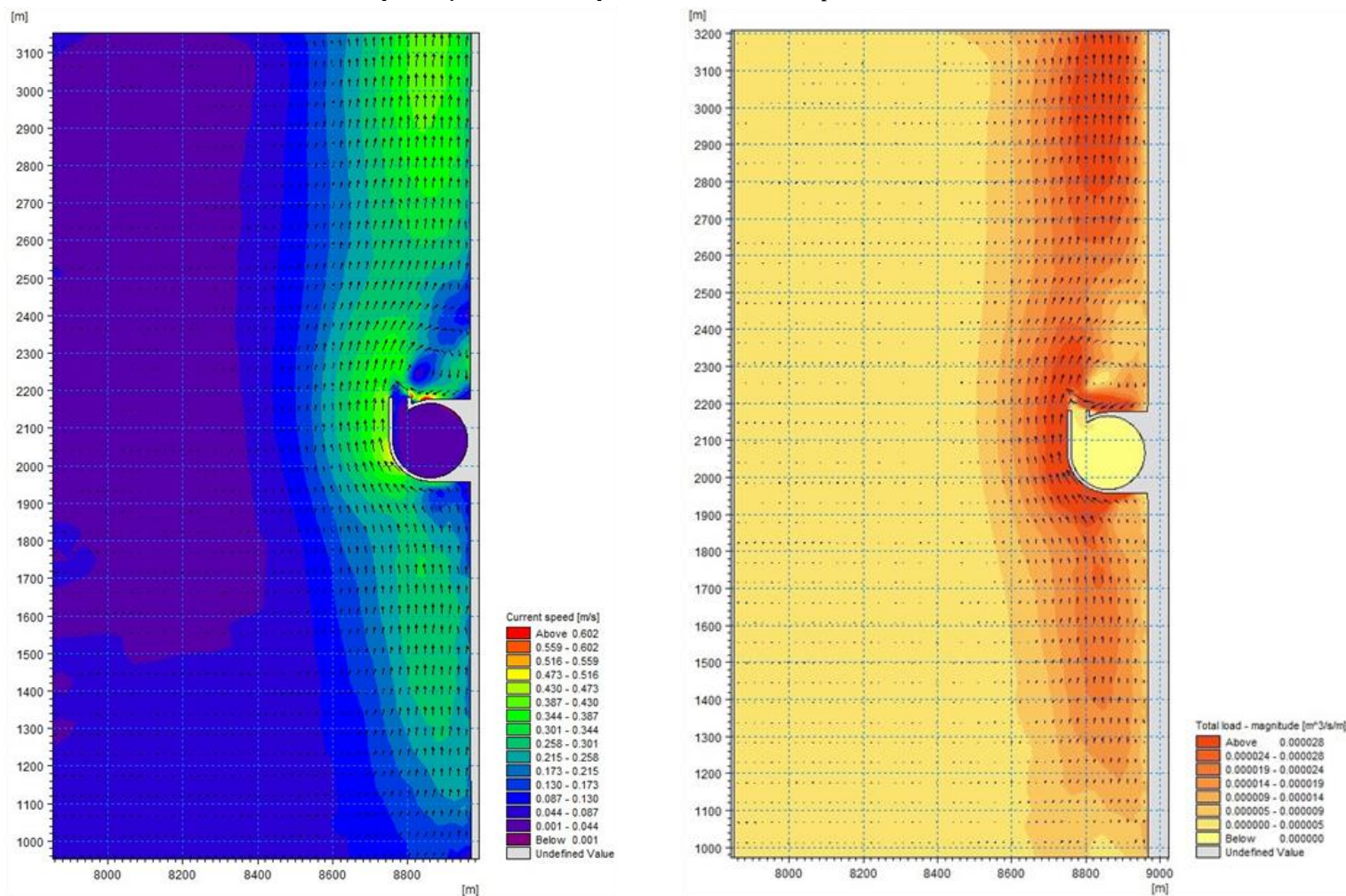
Πρώτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2$  m,  $T_p=6$  s,  $\theta=45^\circ$



Σχήμα 63: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m<sup>3</sup>/s/m], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 3

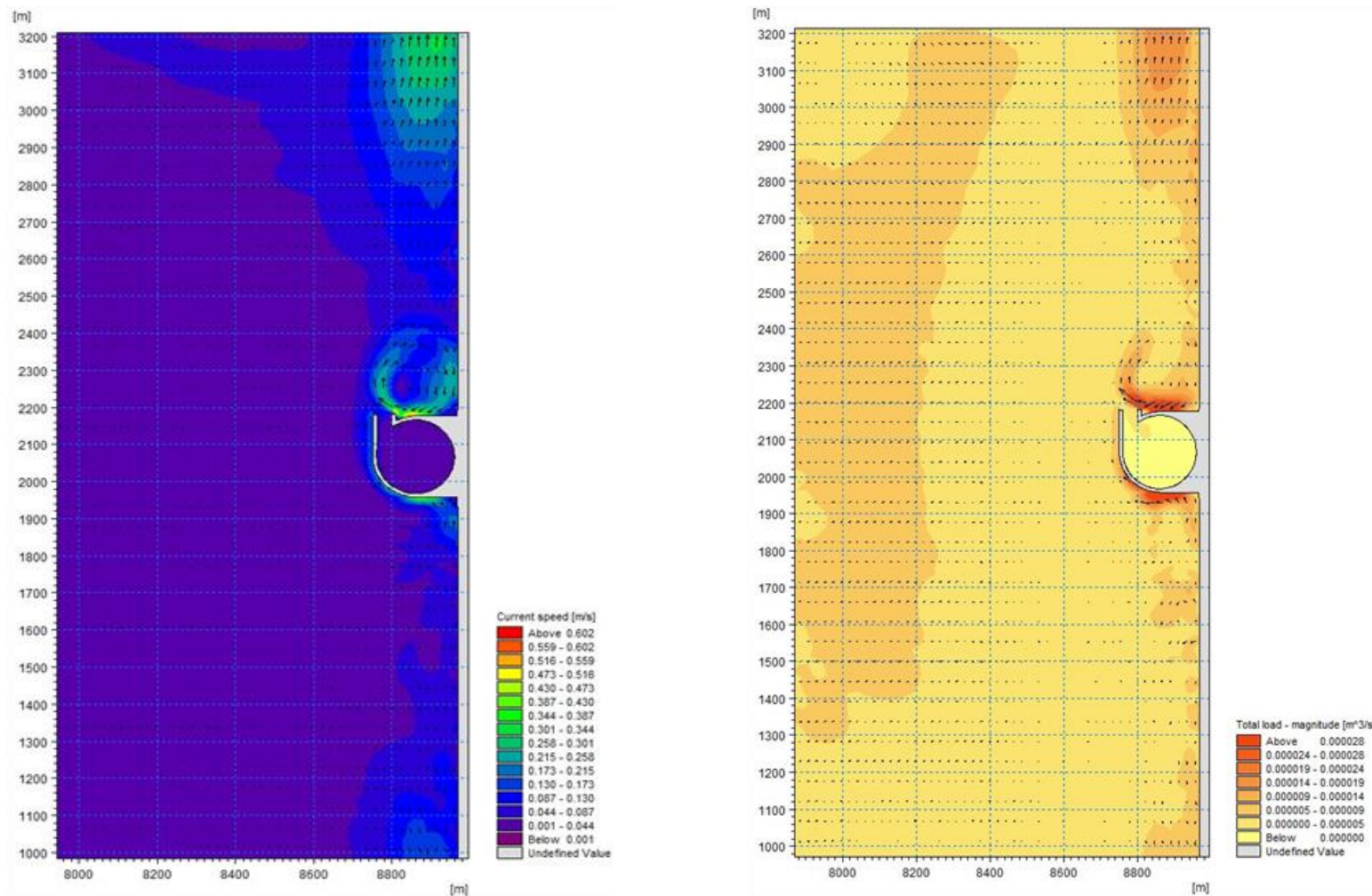
Διάταξη 3

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



Σχήμα 64: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m<sup>3</sup>/s/m], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 3

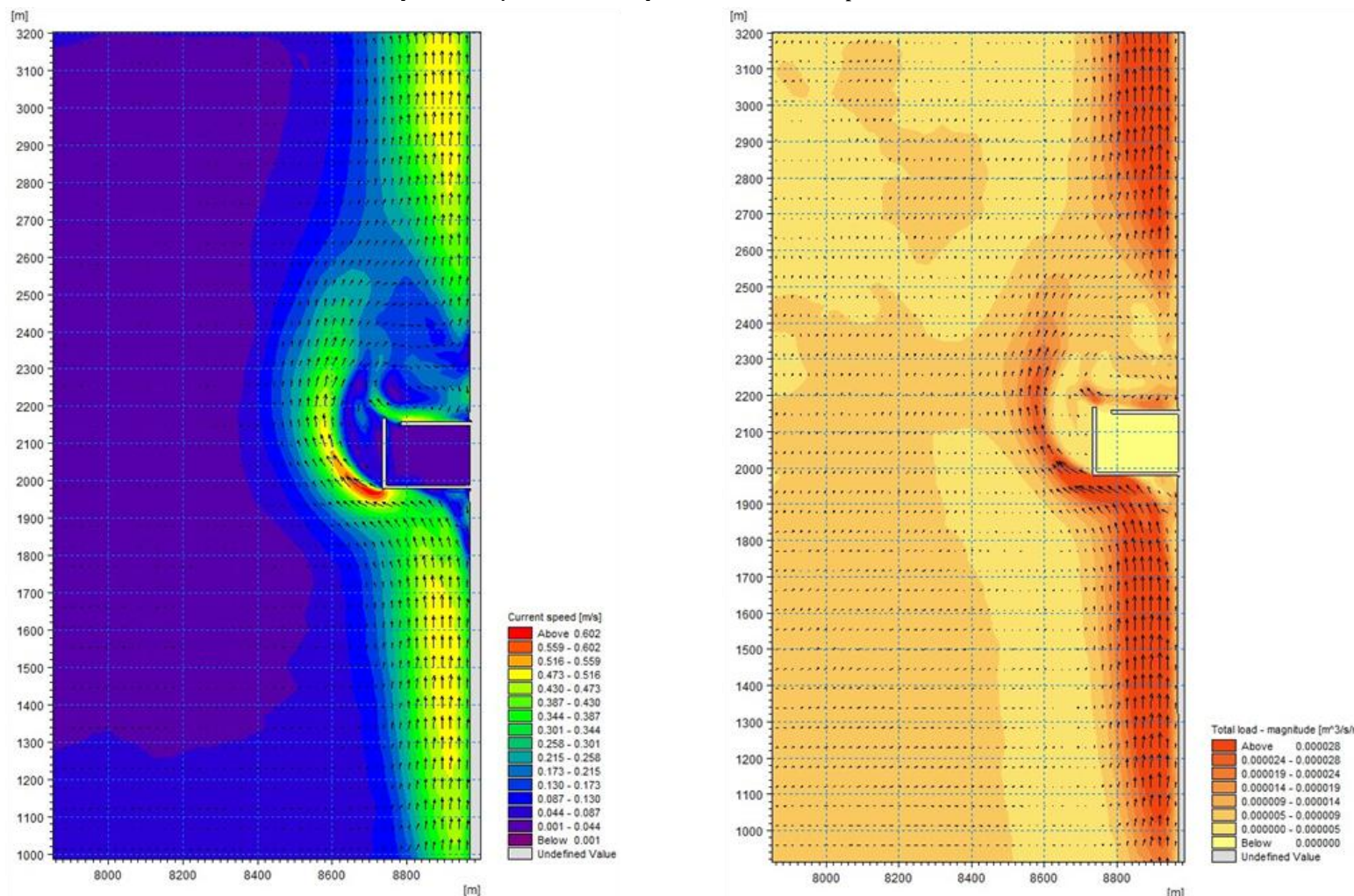
Διάταξη 3  
 Τρίτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=0^\circ$



Σχήμα 65: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m³/s/m], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 3

Διάταξη 4

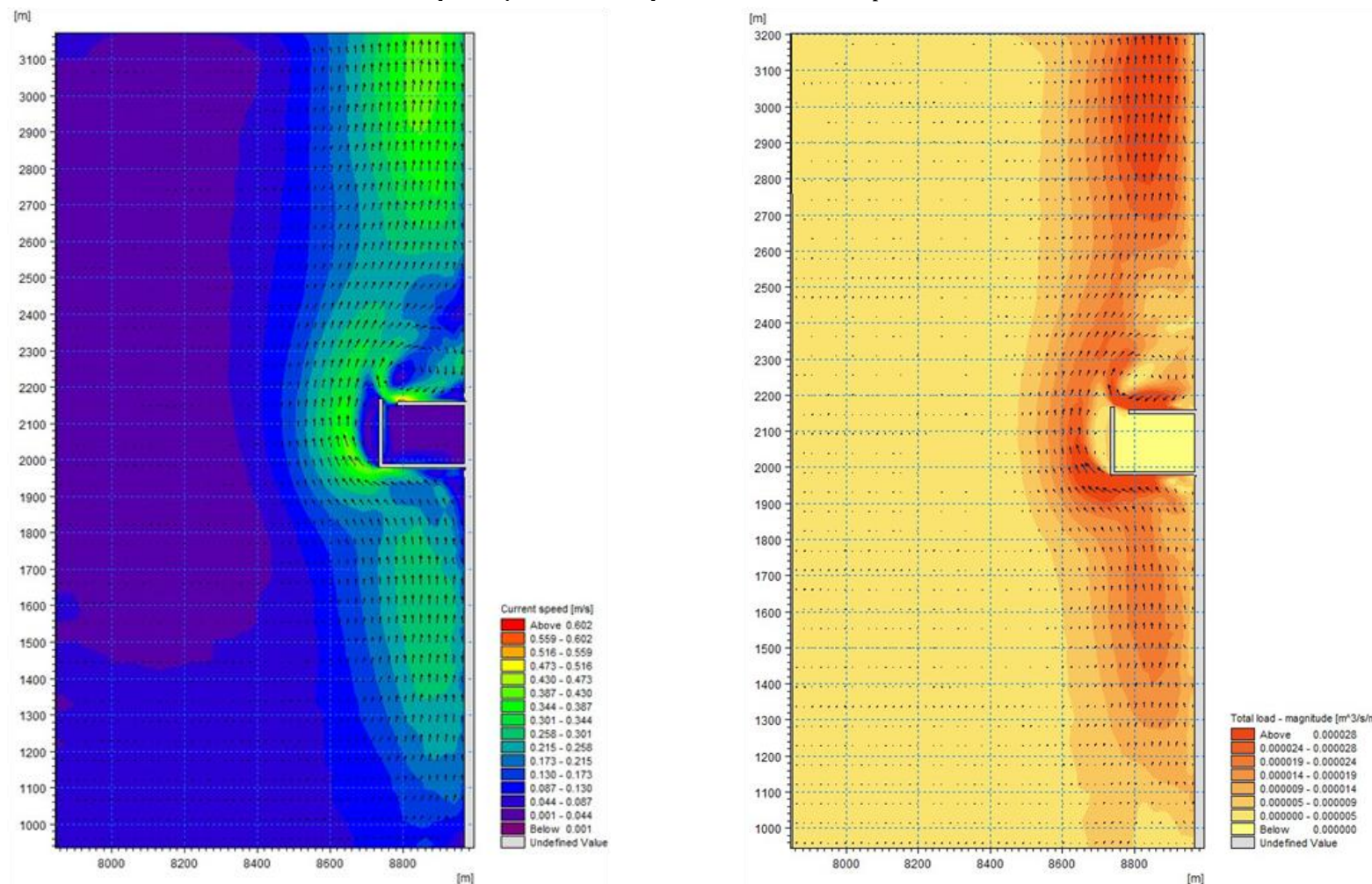
Πρώτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



Σχήμα 66: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 4

Διάταξη 4

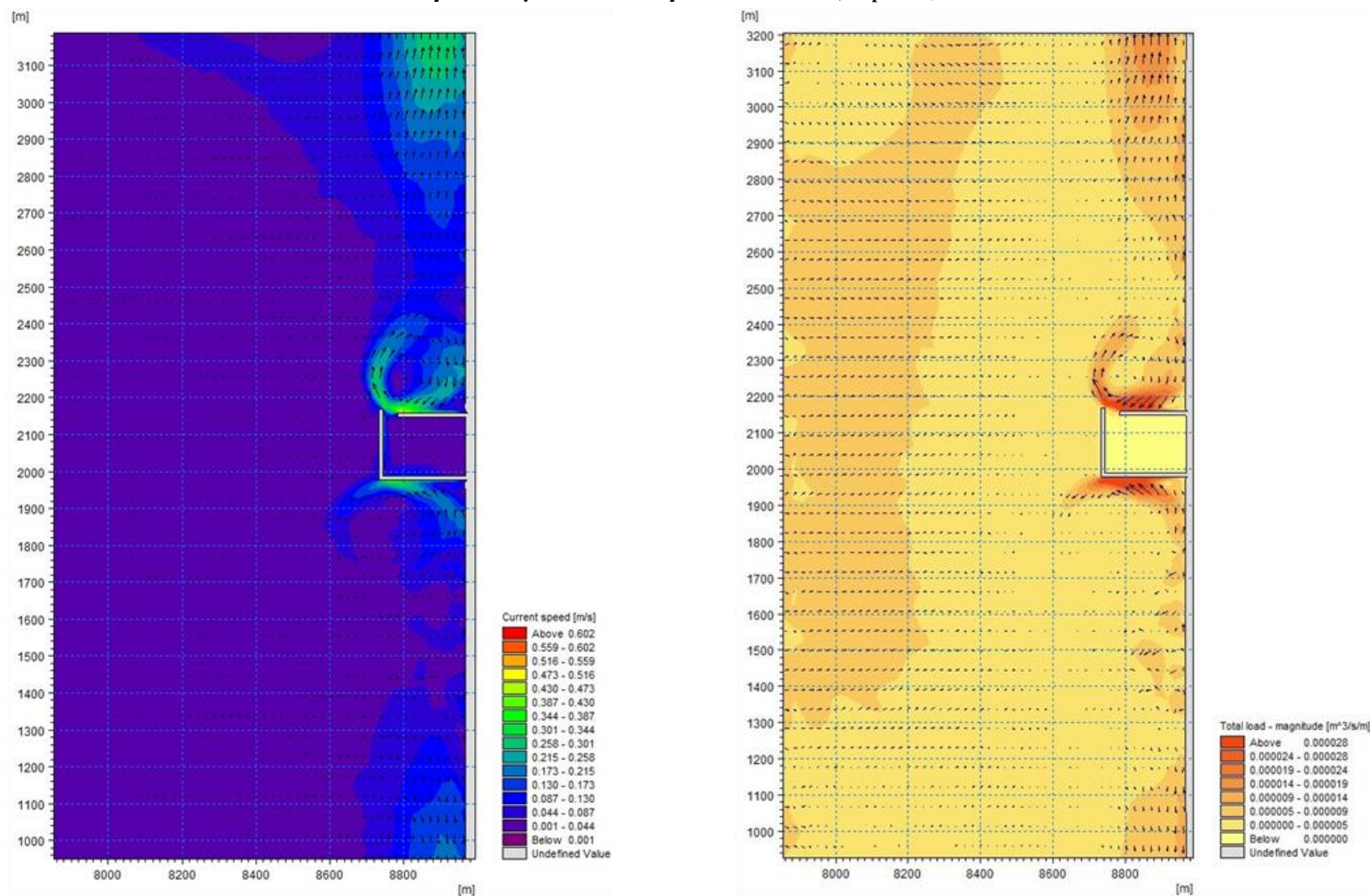
Δεύτερο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2.5\text{ m}$ ,  $T_p=6.5\text{ s}$ ,  $\theta=10^\circ$



Σχήμα 67: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m<sup>3</sup>/s/m], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 4

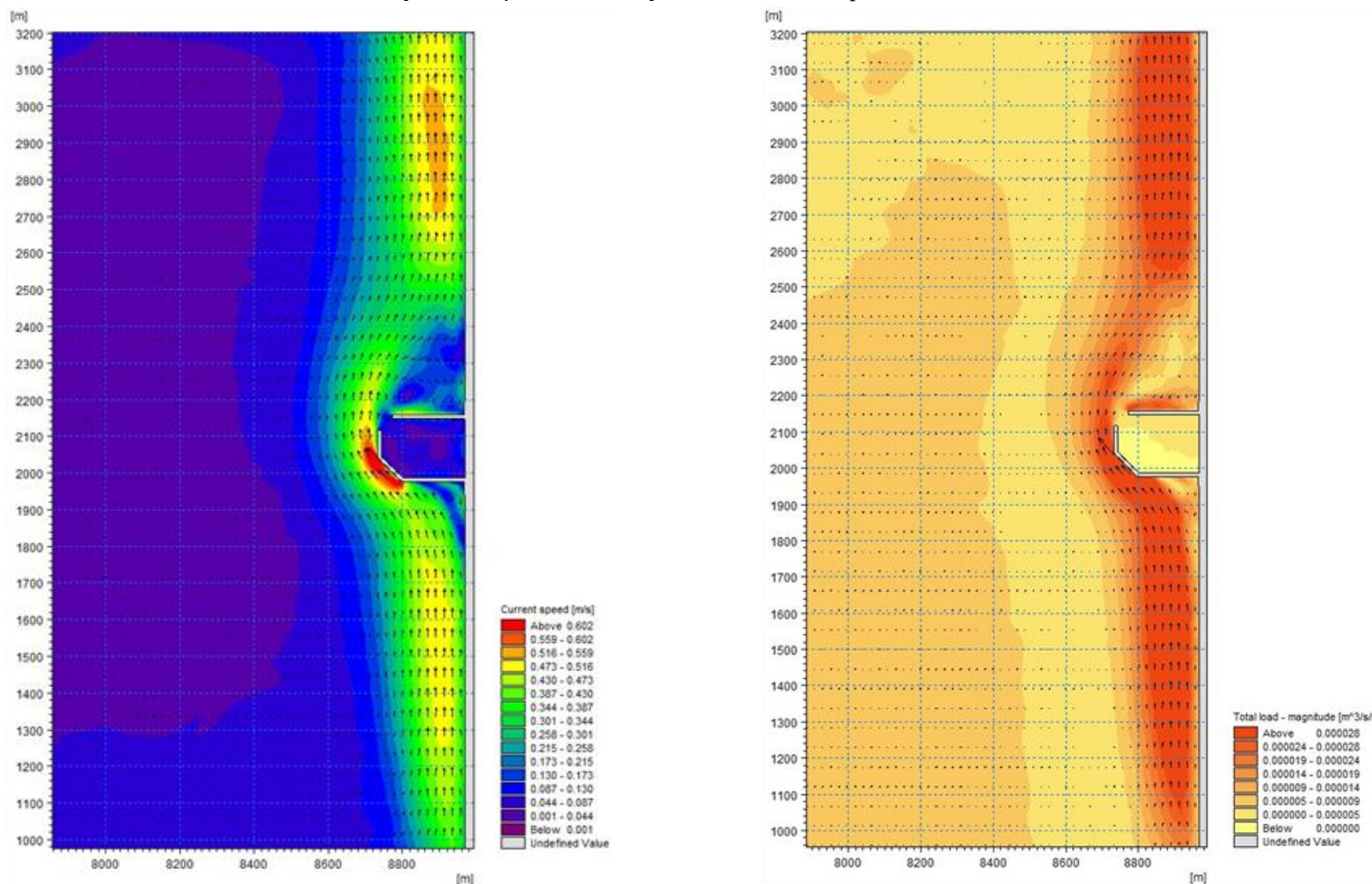


**Διάταξη 4**  
**Τρίτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=0^\circ$**



Σχήμα 68: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m<sup>3</sup>/s/m], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 4

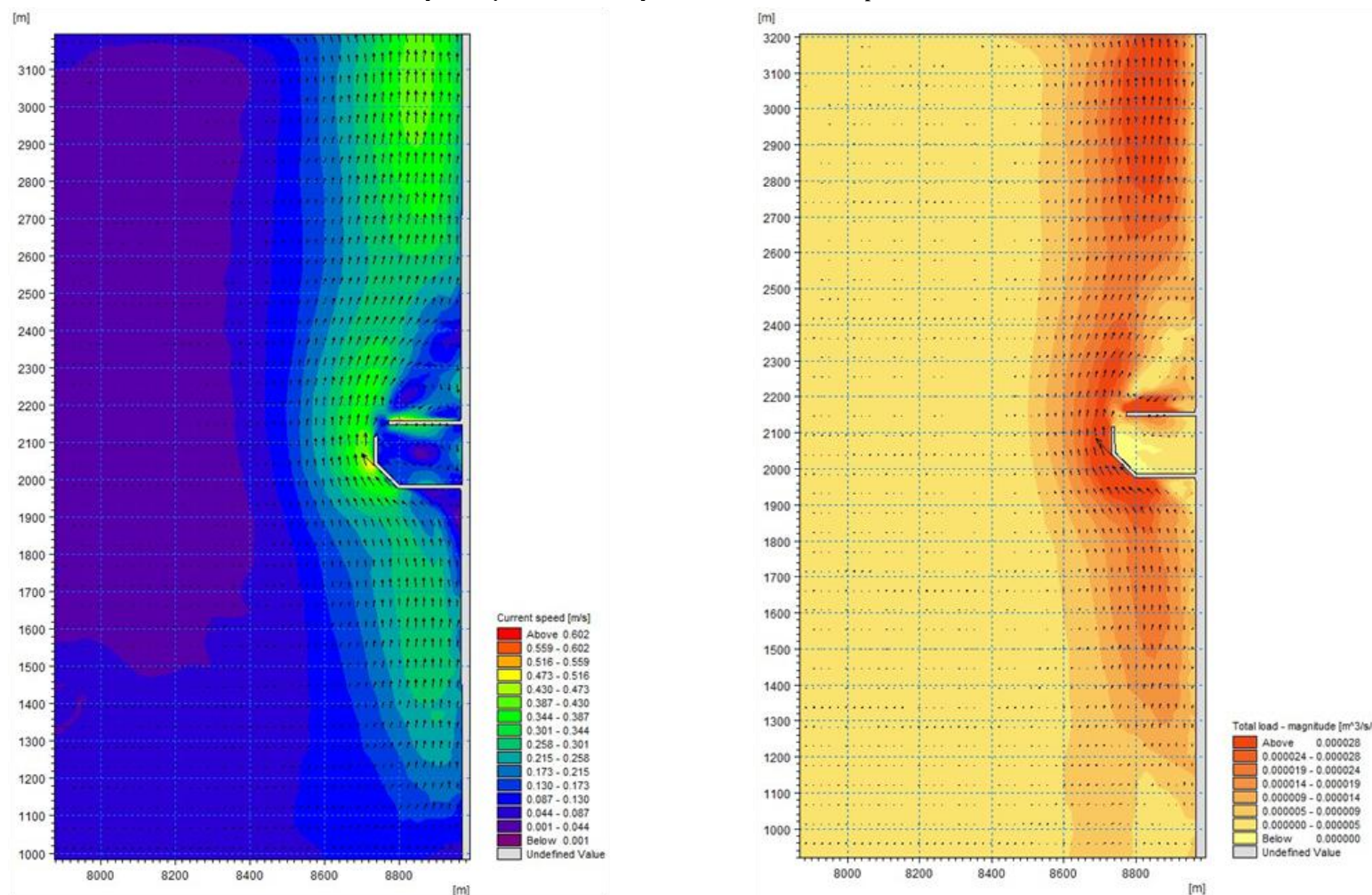
Διάταξη 5  
 Πρώτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



Σχήμα 69: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m³/s/m], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 5

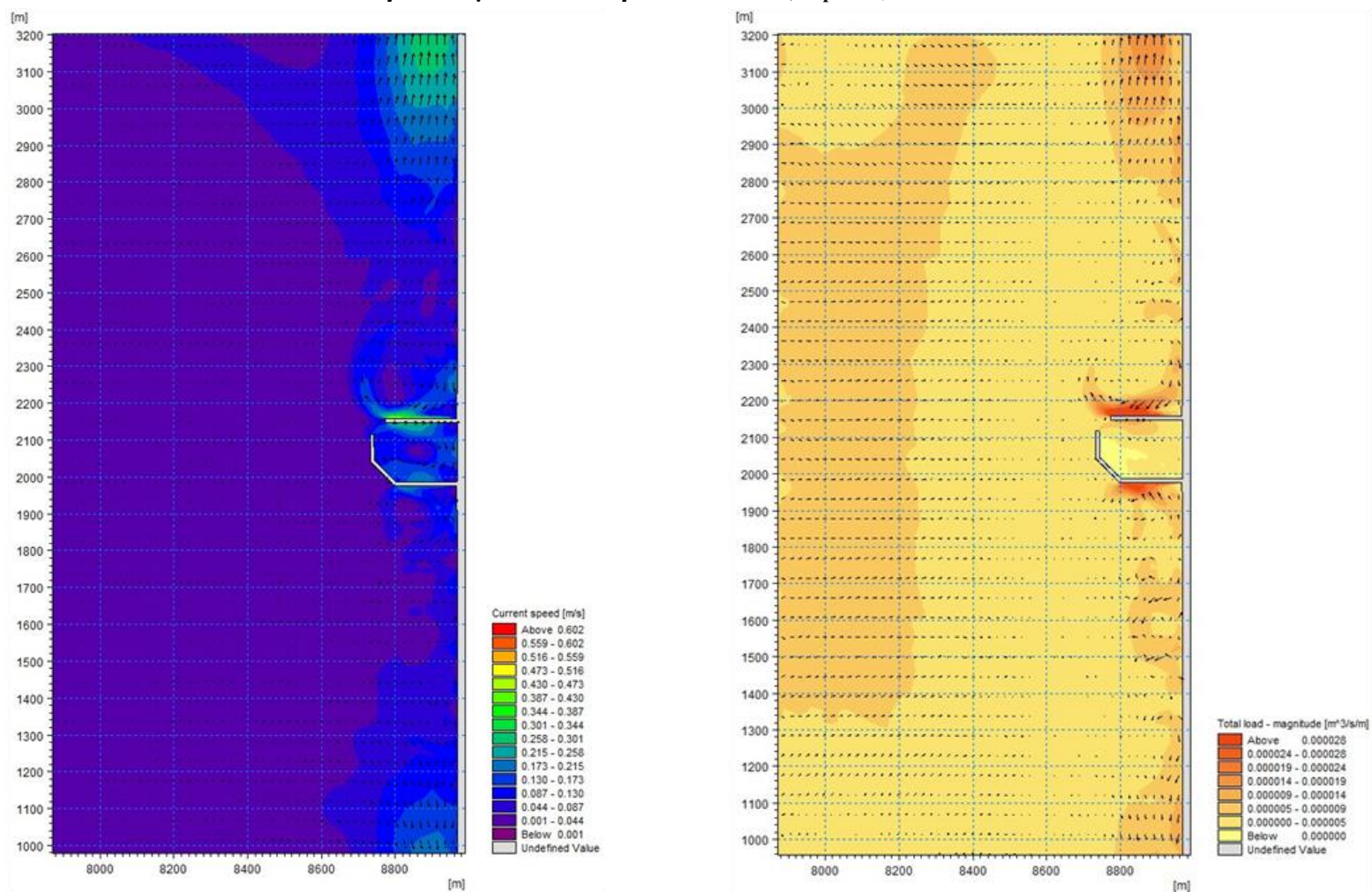
Διάταξη 5

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



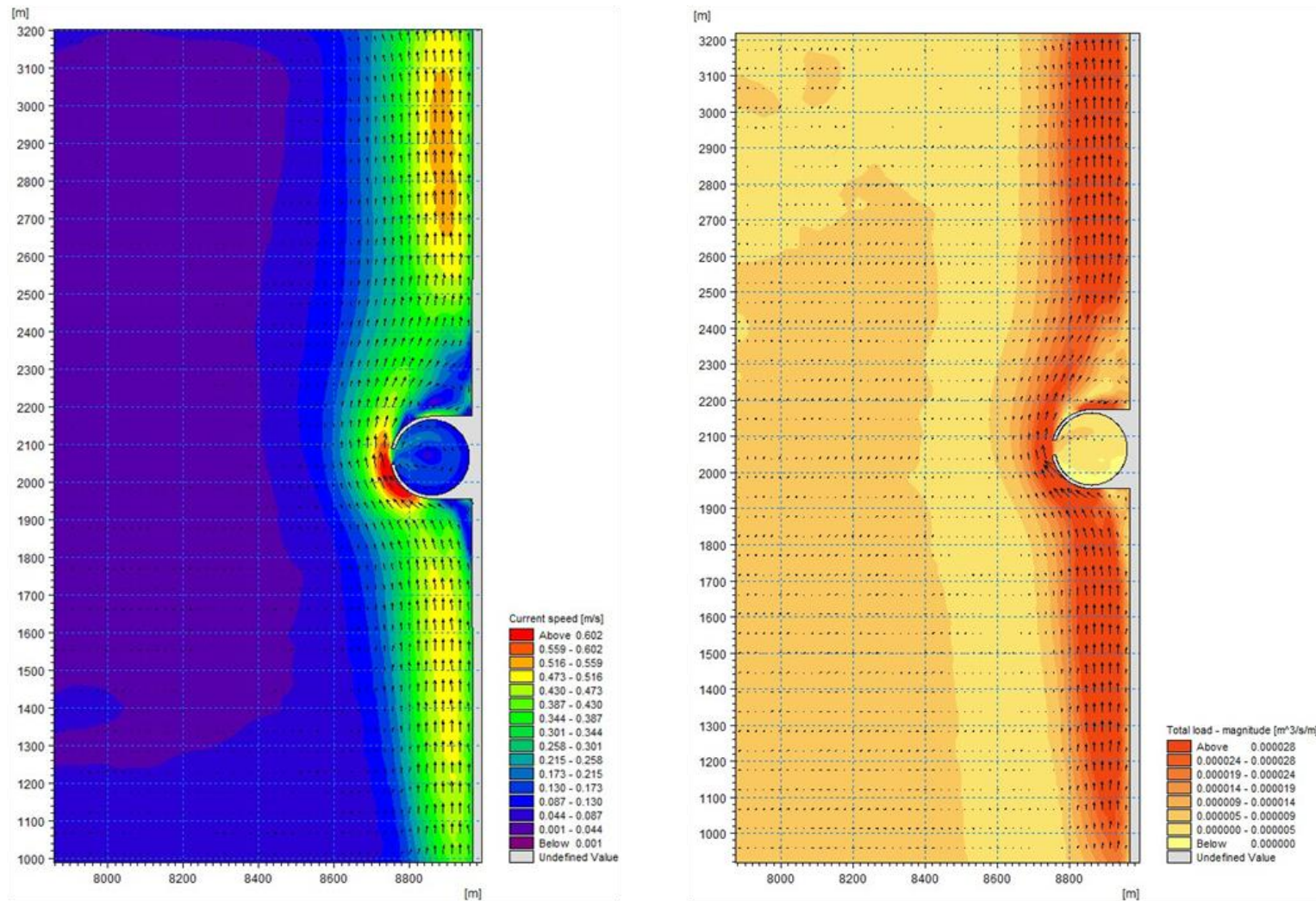
Σχήμα 70: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m<sup>3</sup>/s/m], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 5

Διάταξη 5  
 Τρίτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=0^\circ$



Σχήμα 71: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [ $\text{m/s}$ ] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 5

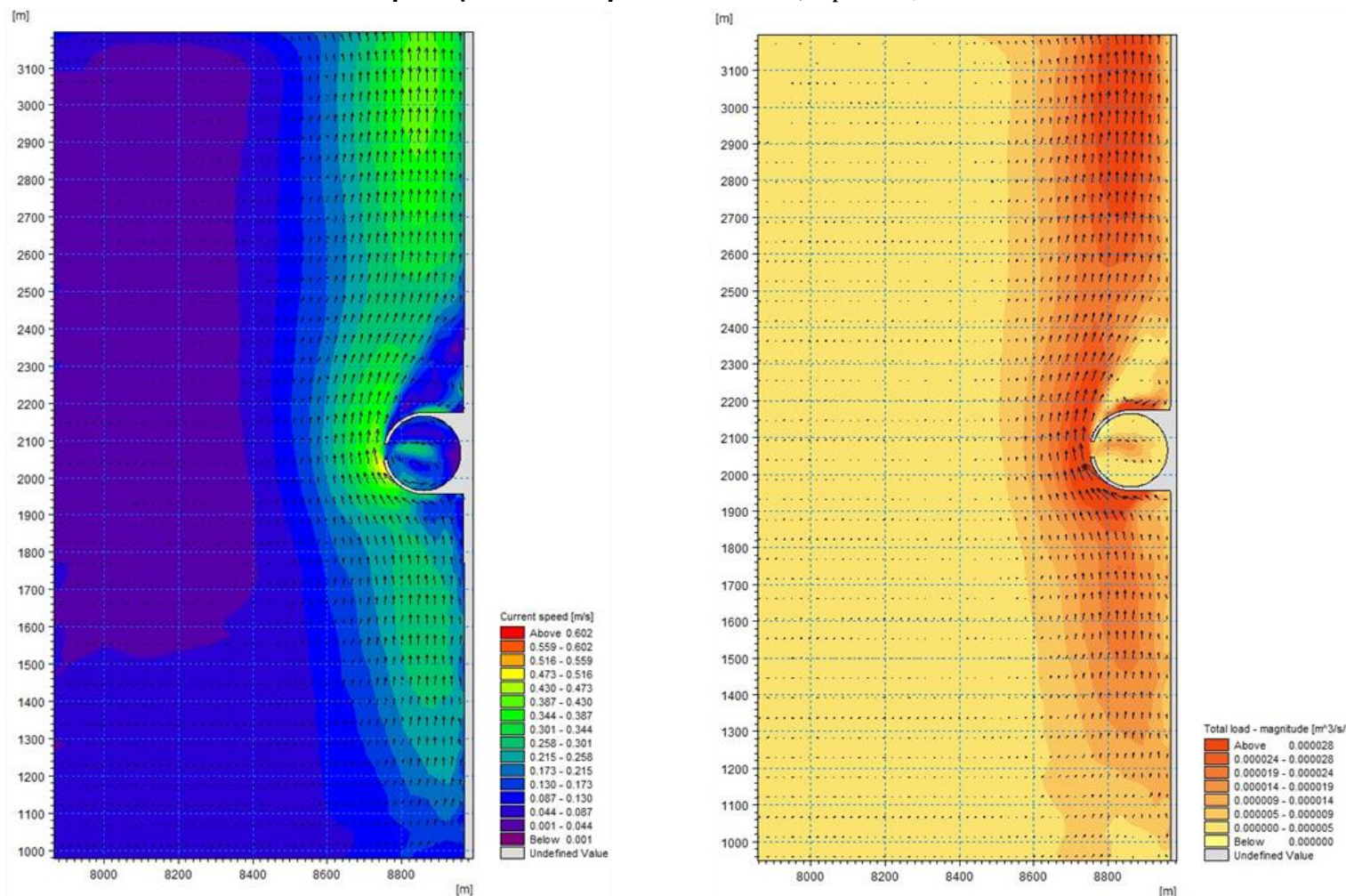
Διάταξη 6  
 Πρώτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=45^\circ$



Σχήμα 72: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m³/s/m], πρώτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 6

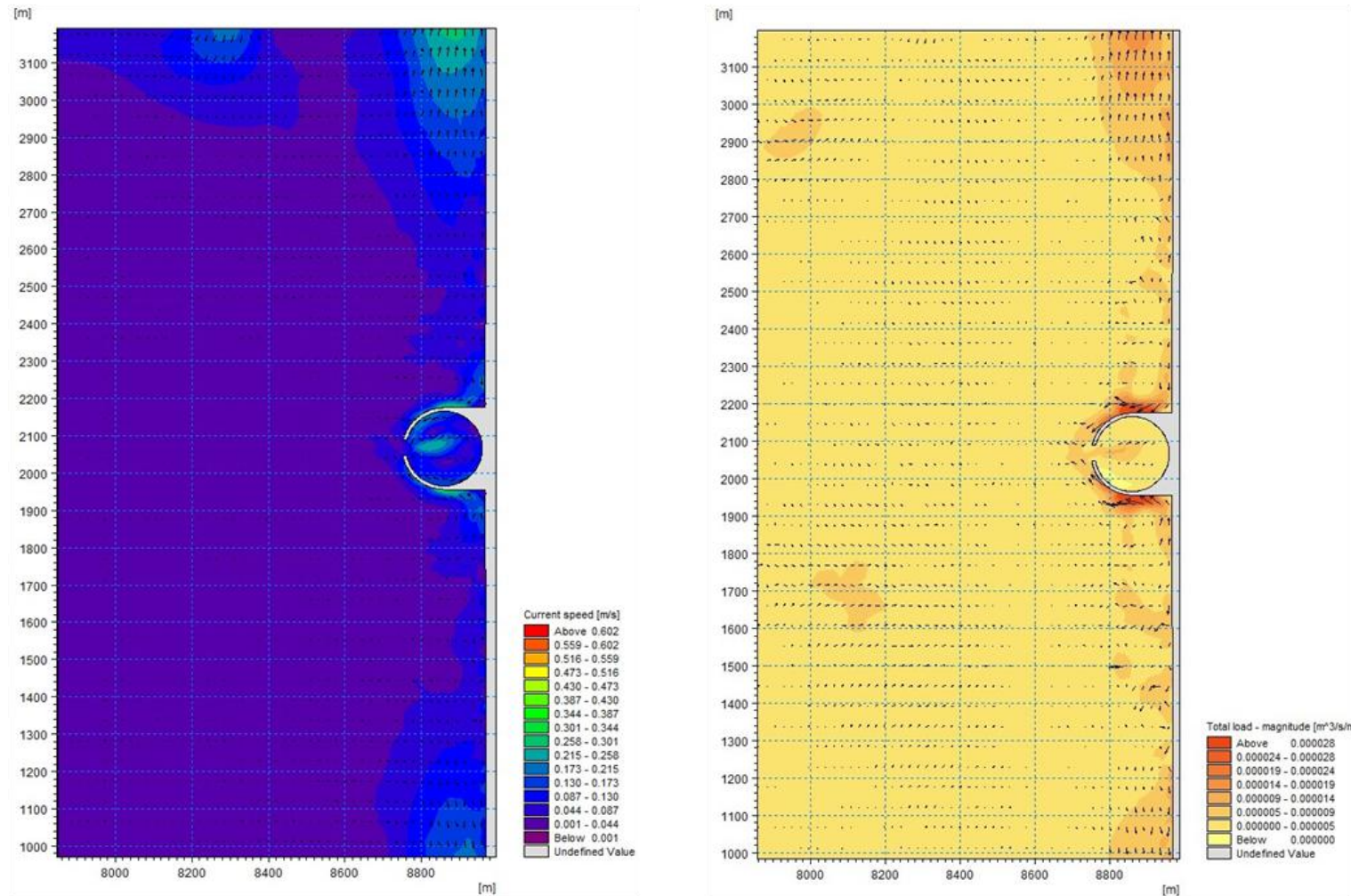
Διάταξη 6

Δεύτερο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2.5$  m,  $T_p=6.5$  s,  $\theta=10^\circ$



Σχήμα 73: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [m<sup>3</sup>/s/m], δεύτερο κυματικό σενάριο, Διάταξη 6

Διάταξη 6  
 Τρίτο κυματικό σενάριο:  $H_{rms}=2\text{ m}$ ,  $T_p=6\text{ s}$ ,  $\theta=0^\circ$



Σχήμα 74: Ταχύτητα κυματογενούς ρεύματος  $V$  [m/s] και ρυθμός στερεομεταφοράς, Total load [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ], τρίτο κυματικό σενάριο, Διάταξη 6