



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

**Ακτομηχανική διερεύνηση φυσικών διεργασιών και  
σχεδιασμού έργων προστασίας στην παράκτια ζώνη.**

**Εφαρμογή στην περιοχή της Αυλίδας.**



**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Δήμητρα Α. Κατσάμπη**

**Επιβλέπουσα: Β. Κ. Τσουκαλά,**

**Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.**

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2018**



**Ακτομηχανική διερεύνηση φυσικών διεργασιών και  
σχεδιασμού έργων προστασίας στην παράκτια ζώνη.  
Εφαρμογή στην περιοχή της Αυλίδας.**

**Λέξεις-Κλειδιά:** παράκτια ζώνη, κυματικό κλίμα, κυματογενής κυκλοφορία, στερεομεταφορά, εξέλιξη πυθμένα, έργα παράκτιας προστασίας, MIKE 21, Αυλίδα

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Δήμητρα Α. Κατσάμπη**

**Επιβλέπουσα:** Β. Κ. Τσουκαλά, Αναπλ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

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.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην κα. Τσουκαλά Βίκυ, Αναπλ. Καθηγήτρια της σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, για τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγησή της σε όλα τα επίπεδα καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Αφεντούλη για την πολύτιμη βοήθεια και συμβολή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φίλους και στην οικογένειά μου για τη συμπαράσταση και την υποστήριξη όλα αυτά τα χρόνια.

Φεβρουάριος, 2018

Κατσάμπη Δήμητρα



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	7
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	8
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	12
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	14
EXTENDED ABSTRACT .....	15
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	26
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας.....	26
1.2 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας.....	27
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ .....	28
2.1 Παράκτια ζώνη.....	28
2.2 Θαλάσσια κύματα.....	29
2.3 Παράκτια ρεύματα.....	31
2.4 Παράκτια στερεομεταφορά.....	33
2.4.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής .....	35
2.4.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτογραμμή .....	36
2.5 Έργα παράκτιας προστασίας .....	36
2.5.1 Κυματοθραύστες .....	37
2.5.2 Ύφαλοι κυματοθραύστες .....	39
2.5.3 Πρόβολοι.....	39
2.5.4 Θωράκιση μετώπου ακτής.....	40
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	41
3.1 Αριθμητική Προσομοίωση με το Πρόγραμμα MIKE 21 DHI.....	41
3.1.1 Πρόγραμμα MIKE 21 SW (Spectral Waves) .....	41
3.1.2 Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Hydrodynamic Module.....	45
3.1.3 Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Sand Transport Module .....	50
4. ΑΚΤΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	58
4.1 Περιοχή 1 .....	61
4.2 Περιοχή 2 .....	65
4.2.1 Υποπεριοχή I .....	65

4.2.2	Υποπεριοχή II .....	65
4.2.3	Υποπεριοχή III .....	74
5.	ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ .....	76
5.1	Περιοχή 1 .....	76
5.2	Περιοχή 2 .....	78
5.2.1	Υποπεριοχή I .....	78
5.2.2	Υποπεριοχή II .....	80
5.2.3	Υποπεριοχή III .....	82
6.	ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ.....	84
6.1	Ανεμολογικά στοιχεία.....	84
6.2	Κυματικά δεδομένα .....	86
6.3	Στοιχεία παλίρροιας.....	92
7.	ΑΚΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ .....	96
7.1	Προσομοίωση κυματισμών .....	96
7.2	Υπολογιστικό Πλέγμα .....	98
7.3	Ακτομηχανική διερεύνηση υφιστάμενης κατάστασης .....	100
7.3.1	Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	100
7.3.2	Συμπεράσματα.....	111
7.4	Ακτομηχανική διερεύνηση έργων προστασίας- Εναλλακτικές λύσεις .....	112
7.4.1	Εναλλακτική λύση I .....	113
7.4.2	Εναλλακτική λύση II .....	126
7.4.3	Εναλλακτική λύση III .....	139
7.4.4	Εναλλακτική λύση IV.....	152
8.	ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ 4 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	165
9.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	170
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	171

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 6.1: Μέσες ετήσιες συχνότητες ανέμων .....	85
Πίνακας 6.2: Μέση Ταχύτητα Ανέμου Έτους 2016 (km/hr) – Μετεωρολογικός Σταθμός Αυλίδας (Πηγή: <a href="http://penteli.meteo.gr/stations/avlida">penteli.meteo.gr/stations/avlida</a> ) .....	86
Πίνακας 6.3: Μήκος ενεργών αναπτυγμάτων πελάγους ανά διεύθυνση ανέμων.....	86
Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου.....	88
Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου.....	88
Πίνακας 6.6: Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου.....	89
Πίνακας 6.7: Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου.....	89
Πίνακας 6.8: Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου.....	90
Πίνακας 6.9: Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου.....	90
Πίνακας 6.10: Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου.....	91
Πίνακας 6.11. Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου Γεγονότα καταιγίδας για την περίοδο 2000-2100 και ΒΔ κατεύθυνση ανέμου .....	91
Πίνακας 6.12: Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου.....	92
Πίνακας 6.13: Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου.....	92
Πίνακας 6.14: Στατιστικά Στοιχεία Παλίρροιας Σταθμών λιμένα Χαλκίδας Πηγή: Υδρογραφική Υπηρεσία.....	94
Πίνακας 7.1: Χαρακτηριστικά ισοδύναμων κυματισμών ανά διεύθυνση πνοής ανέμου .....	96
Πίνακας 7.2: Στοιχεία για τον υπολογισμό του ισοδύναμου κυματισμού- Βορειοανατολικός άνεμος.....	97
Πίνακας 7.3: Στοιχεία για τον υπολογισμό του ισοδύναμου κυματισμού- Ανατολικός άνεμος.....	97
Πίνακας 7.4: Στοιχεία για τον υπολογισμό του ισοδύναμου κυματισμού- Νοτιοανατολικός άνεμος.....	97

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Ταξινόμηση των θαλάσσιων κυμάτων .....	30
Σχήμα 2.2. Φορτίο πυθμένα .....	33
Σχήμα 2.3. Φορτίο σε αιώρηση .....	34
Σχήμα 4.1. Προσδιορισμός ακτής μελέτης.....	58
Σχήμα 4.2. Ακτή μελέτης.....	60
Σχήμα 5.1. Περιοχή 1 .....	76
Σχήμα 5.2. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της περιοχής 1: α)Ιούνιος 2004 β)Μάιος 2010 γ)Ιούλιος 2015.....	77
Σχήμα 5.3. Περιοχή 2- Υποπεριοχή Ι.....	78
Σχήμα 5.4. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της υποπεριοχής Ι: α)Ιούνιος 2004 β)Μάιος 2010 γ)Ιούλιος 2015.....	79
Σχήμα 5.5. Περιοχή2- Υποπεριοχή ΙΙ.....	80
Σχήμα 5.6. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της υποπεριοχής ΙΙ: α)Ιούνιος 2004 β)Μάιος 2010 γ)Ιούλιος 2015.....	81
Σχήμα 5.7. Περιοχή2- Υποπεριοχή ΙΙΙ.....	82
Σχήμα 5.8. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της υποπεριοχής ΙΙΙ: α)Ιούνιος 2004 β)Μάιος 2010 γ)Ιούλιος 2015.....	83
Σχήμα 6.1. Ανεμόγραμμα Χαλκίδας .....	84
Σχήμα 6.2. Θέση παλιρροιογράφου στο νότιο τμήμα του Λιμένα Χαλκίδας- Προβλήτας προ εμπορευματικού λιμένα .....	93
Σχήμα 6.3. Αποτύπωση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας με τη χρήση του λογισμικού MATLAB (MATLAB 2012) .....	95
Σχήμα 7.1. Απεικόνιση του πυκνωμένου κανάβου flexible mesh την κωδικοποίηση της περιοχής μελέτης.....	99
Σχήμα 7.2. Βαθυμετρία περιοχής μελέτης .....	101
Σχήμα 7.3. Σημαντικό ύψος κύματος- Περιοχή 1.....	103
Σχήμα 7.4. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή Ι.....	103
Σχήμα 7.5. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή ΙΙ.....	104
Σχήμα 7.6. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή ΙΙΙ.....	104
Σχήμα 7.7. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1 .....	105
Σχήμα 7.8. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή Ι .....	106

Σχήμα 7.9. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II .....	106
Σχήμα 7.10. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III .....	107
Σχήμα 7.11. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1 .....	109
Σχήμα 7.12. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή I .....	109
Σχήμα 7.13. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II .....	110
Σχήμα 7.14 Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III .....	110
Σχήμα 7.15. Εναλλακτική λύση έργων παράκτια προστασίας I .....	113
Σχήμα 7.16. Σημαντικό ύψος κύματος- Περιοχή 1 .....	115
Σχήμα 7.17. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή I .....	115
Σχήμα 7.18. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II .....	116
Σχήμα 7.19. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή III .....	116
Σχήμα 7.20. Σημαντικό ύψος κύματος πέριξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	117
Σχήμα 7.21. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1 .....	119
Σχήμα 7.22. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή I .....	119
Σχήμα 7.23. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II .....	120
Σχήμα 7.24. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III .....	120
Σχήμα 7.25. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων πέριξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	121
Σχήμα 7.26. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1 .....	123
Σχήμα 7.27. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή I .....	123
Σχήμα 7.28. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II .....	124
Σχήμα 7.29. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III .....	124
Σχήμα 7.30. Διανύσματα στερεομεταφοράς πέριξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	125
Σχήμα 7.31. Εναλλακτική λύση έργων παράκτια προστασίας II .....	126
Σχήμα 7.32. Σημαντικό ύψος κύματος- Περιοχή 1.....	128
Σχήμα 7.33. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή I.....	128
Σχήμα 7.34. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II.....	129
Σχήμα 7.35. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή III.....	129
Σχήμα 7.36. Σημαντικό ύψος κύματος πέριξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	130

Σχήμα 7.37. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1 .....	132
Σχήμα 7.38. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή I .....	132
Σχήμα 7.39. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II .....	133
Σχήμα 7.40. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III .....	133
Σχήμα 7.41. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	134
Σχήμα 7.42. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1 .....	136
Σχήμα 7.43. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή I .....	136
Σχήμα 7.44. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II .....	137
Σχήμα 7.45. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III .....	137
Σχήμα 7.46. Διανύσματα στερεομεταφοράς περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	138
Σχήμα 7.47. Εναλλακτική λύση έργων παράκτια προστασίας III .....	139
Σχήμα 7.48. Σημαντικό ύψος κύματος- Περιοχή 1.....	141
Σχήμα 7.49. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή I.....	141
Εικόνα 7.50. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II.....	142
Εικόνα 7.51. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή III .....	142
Σχήμα 7.52. Σημαντικό ύψος κύματος περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	143
Σχήμα 7.53. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1 .....	145
Σχήμα 7.54. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή I .....	145
Σχήμα 7.55. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II .....	146
Σχήμα 7.56. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III .....	146
Σχήμα 7.57. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	147
Σχήμα 7.58. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1 .....	149
Σχήμα 7.59. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή I .....	149
Σχήμα 7.60. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II .....	150
Σχήμα 7.61. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III .....	150
Σχήμα 7.62. Διανύσματα στερεομεταφοράς περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	151
Σχήμα 7.63. Εναλλακτική λύση έργων παράκτια προστασίας IV.....	152

Σχήμα 7.64. Σημαντικό ύψος κύματος- Περιοχή 1.....	154
Σχήμα 7.65. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή I.....	154
Σχήμα 7.66. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II.....	155
Σχήμα 7.67. Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή III.....	155
Σχήμα 7.68. Σημαντικό ύψος κύματος πέριξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	156
Σχήμα 7.69. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1.....	158
Σχήμα 7.70. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή I.....	158
Σχήμα 7.71. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II.....	159
Σχήμα 7.72. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III.....	159
Σχήμα 7.73. Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων πέριξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	160
Σχήμα 7.74. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1.....	162
Σχήμα 7.75. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή I.....	162
Σχήμα 7.76. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II.....	163
Σχήμα 7.77. Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III.....	163
Σχήμα 7.78. Διανύσματα στερεομεταφοράς πέριξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή.....	164
Σχήμα 8.1. Συγκριτική αξιολόγηση έργων προστασίας ως προς το ύψος κύματος.....	166
Σχήμα 8.2. Συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών διατάξεων ως προς τα κυματογενή ρεύματα.....	168
Σχήμα 8.3. Συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών διατάξεων ως προς τη στερεομεταφορά.....	169

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1. Υποδιαίρεση της παράκτιας ζώνης σε επιμέρους τμήματα (Καρύμπαλης Θ.,2010).....	29
Εικόνα 2.2. Σχηματισμοί salient και tombolo (Miller et al.,2011).....	38
Εικόνα 2.3. Ύφαλος κυματοθραύστης (Anouil, 2008, Διαδίκτυο).....	39
Εικόνα 2.4. Η λειτουργία ενός προβόλου ( <a href="http://oceanica.cofc.edu">http://oceanica.cofc.edu</a> ).....	40
Εικόνα 4.1. Όψη του προσήνεμου μόλου του λιμενίσκου και εμφανής η επίδραση της κυματικής δράσης στη διάβρωση του παραλιακού μετώπου .....	61
Εικόνα 4.2. Σύσταση ιζήματος, αποθέσεις από φύκη και ενδείξεις ρίψης απορριμμάτων ...	62
Εικόνα 4.3. Φθορά του οδοστρώματος εξαιτίας της διάβρωσης .....	62
Εικόνα 4.4. Όψη οχετού όμβριων υδάτων ορθογωνικής διατομής.....	63
Εικόνα 4.5. Σχηματισμός αλυκών .....	63
Εικόνα 4.6. Λιβάδια από φύκη. ....	64
Εικόνα 4.7. Όψη του κάθετου προβόλου πέριξ του Φάρου. Εμφανής η αστοχία της κατασκευής.....	64
Εικόνα 4.8. Όψη του παραλιακού μετώπου.....	65
Εικόνα 4.9. Κατασκευή προστατευτικού ανακλαστικού τοιχίου .....	66
Εικόνα 4.10. Όψη παράκτιας κλίμακας .....	66
Εικόνα 4.11. Κατάρρευση προστατευτικού τοιχίου .....	67
Εικόνα 4.12. Κατάρρευση προστατευτικού τοιχίου .....	68
Εικόνα 4.13.Αστοχία κάθετου προβόλου .....	68
Εικόνα 4.14. Αστοχία κάθετου προβόλου .....	69
Εικόνα 4.15. Αστοχία κάθετου προβόλου .....	69
Εικόνα 4.16.Απόθεση ιζήματος στις παρειές κάθετου προβόλου .....	70
Εικόνα 4.17. Υποσκαφές στην έδραση του τοιχίου.....	70
Εικόνα 4.18. Αξιοποίηση κρηπιδωμάτων με σκοπό την αναψυχή .....	71
Εικόνα 4.19. Καθίζηση κρηπιδωμάτων και όψη του λιμενοβραχίονα Αυλίδας .....	72
Εικόνα 4.20. Όψη του λιμενοβραχίονα της Αυλίδας .....	72
Εικόνα 4.21. Υπερπήδηση κατακόρυφου τοιχίου, κατάκλυση θαλασσινού νερού.....	73
Εικόνα 4.22.. ίζημα σε αιώρηση .....	73
Εικόνα 4.23. Όψη του παραλιακού μετώπου. Εμφανής η αιώρηση ιζήματος και η θραύση των κυματισμών.....	74

Εικόνα 4.24. Προστατευτικό κατακόρυφο τοιχίο.....	74
Εικόνα 4.25. Όψη παραλιακού μετώπου. Σημεία διάβρωσης στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου.....	75
Εικόνα 4.26. Ήπιες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.....	75

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έγινε προσπάθεια να διερευνηθούν οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη μέσω της προσομοίωσής τους με το αριθμητικό μοντέλο του λογισμικού MIKE 21 FM με εφαρμογή στην παράκτια περιοχή της Αυλίδας στο Νότιο Ευβοϊκό. Παράλληλα στόχος της εργασίας ήταν η διερεύνηση σχεδιασμού έργων προστασίας της ακτής διαφορετικών διατάξεων με σκοπό την ανάπλαση της περιοχής μελέτης, την προστασία των υποδομών και τη σταθεροποίηση του ιζήματος στην ακτή ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο της διάβρωσης.

Η επιτόπια αυτοψία και η καταγραφή των προβλημάτων στην περιοχή μελέτης κατέδειξαν τις έντονες επιδράσεις του φαινομένου της διάβρωσης στην παράκτια ζώνη. Ο εντοπισμός των σημείων διάβρωσης πραγματοποιήθηκε και μέσω συγκριτικής αξιολόγησης αεροφωτογραφιών της περιοχής μελέτης για διαφορετικές χρονικές στιγμές. Κατά τη διεξαγωγή της αυτοψίας παρατηρήθηκαν αστοχίες σε έργα υποδομής όπως κατάρρευση τμημάτων προστατευτικού τοιχίου, καθιζήσεις κρηπιδωμάτων, υπερπήδηση των έργων προστασίας και κατάκλυση θαλασσινού νερού, υποσκαφές κ.α. Η ανάδειξη των αστοχιών που αναφέρθηκαν κατέστησε αναγκαία την αναζήτηση λύσεων για βελτίωση της υφιστάμενης κατάστασης.

Η ανάγκη προσομοίωσης των φυσικών διεργασιών της παράκτιας ζώνης ώστε να γίνει κατανοητή η αλληλουχία και η δράση τους στο παράκτιο μέτωπο και να προταθούν τα κατάλληλα έργα προστασίας έχει ως προϋπόθεση τη συλλογή και επεξεργασία ανεμολογικών και κυματικών δεδομένων για την περιοχή μελέτης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως εξαιτίας της ιδιαιτερότητας της περιοχής με την αυξημένη παλιρροιακή δραστηριότητα συλλέχθηκαν και δεδομένα μεταβολής της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας της παλίρροιας.

Για την επεξεργασία όλων όσων αναφέρθηκαν και την εκτίμηση των κυματικών και υδροδυναμικών συνθηκών της περιοχής, καθώς και των συνθηκών στερεομεταφοράς για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα της περιοχής μελέτης στην υφιστάμενη κατάσταση του μετώπου χρησιμοποιήθηκε αρχικά το μοντέλο προσομοίωσης του MIKE 21. Στη συνέχεια προτάθηκαν τέσσερις διατάξεις έργων παράκτιας προστασίας για τις οποίες πραγματοποιήθηκε εκ νέου μοντέλο προσομοίωσης κυματικών, υδροδυναμικών συνθηκών και συνθηκών στερεομεταφοράς. Πραγματοποιήθηκε τέλος συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων εναλλακτικών διατάξεων ώστε να καταγραφούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε περίπτωσης.

## EXTENDED ABSTRACT

### 1. Introduction

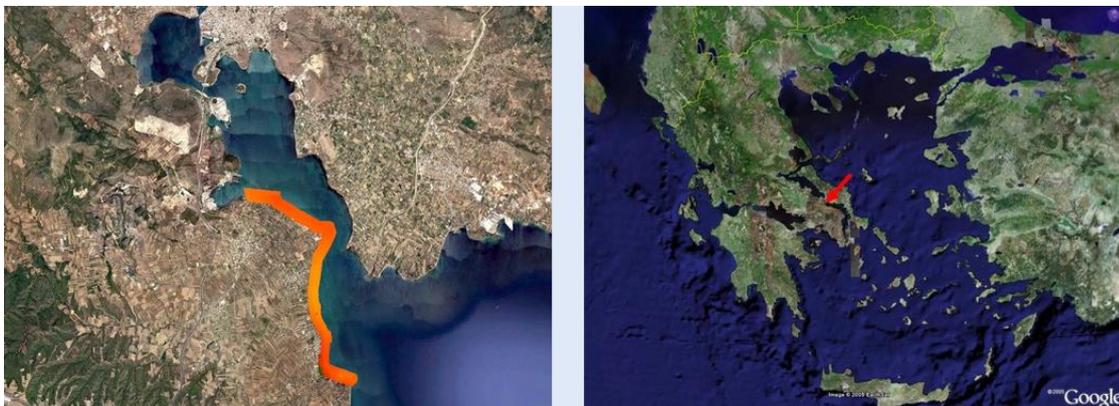
Waves significantly affect the coastal zone and cause erosion. The necessity of simulating the natural processes of the coastal zone is enormous especially in countries with a long coastline like Greece, in order to understand their sequence and their effect on the coastal front and to propose appropriate protection projects.

The purpose of this thesis is to examine wave propagation processes, currently occurring in the area around Avlida's beach and the impact that alternative critical interventions may have. Specifically, the study includes the development of a mathematical simulating model applied to the wider area of Southern Evia and focuses on the critical areas of Avlida so that important wave parameters can be examined like the significant wave height, the velocity of currents and sediment transport. Coastal armoring and interventional methods aim to prevent coastal erosion.

MIKE 21, a numerical wave model developed by DHI, has been applied to predict wave characteristics and hydrodynamic parameters in the nearshore and coastal regions. Four alternative coastal protection methods are proposed and simulated. Furthermore, a comparative assessment of the four alternatives takes place so as to evaluate the advantages and disadvantages of each method.

### 2. Case study

Avlida is sited in the Region of Evia, Greece and numbers 9306 inhabitants (Census of 2011). The total area is estimated at 16.8 km<sup>2</sup> and the length of the coastline, which is the case study, is estimated to approximately 6.5 km. The investigated area includes the Port of Avlida and the adjacent coastal area from north to south. During the on-site autopsy in the area a fishing shelter, a beach formation, man-made interventions as groins, coastal stairways and a protective vertical wall were recorded. At some spots the wall and the groins were ineffective.



**Figure 2.1:** The location of the investigated study

Subsequently a comparative evaluation of aerial photographs for the years 2004, 2010 and 2015 takes place. The locations of erosion and deposition have been recorded and are shown in Figure 2.2:



**Figure 2.2:** The comparison of the coastline between 2004 and 2015

Simulation of the natural processes at the coastal zone requires the collection and processing of wind and wave data for the study area. It must be noted that because of the increased tidal activity of this particular area, data on sea level change is also collected. The frequency of each wave direction is shown in Figure 2.3a where N wind is proved the most frequent and S the least.

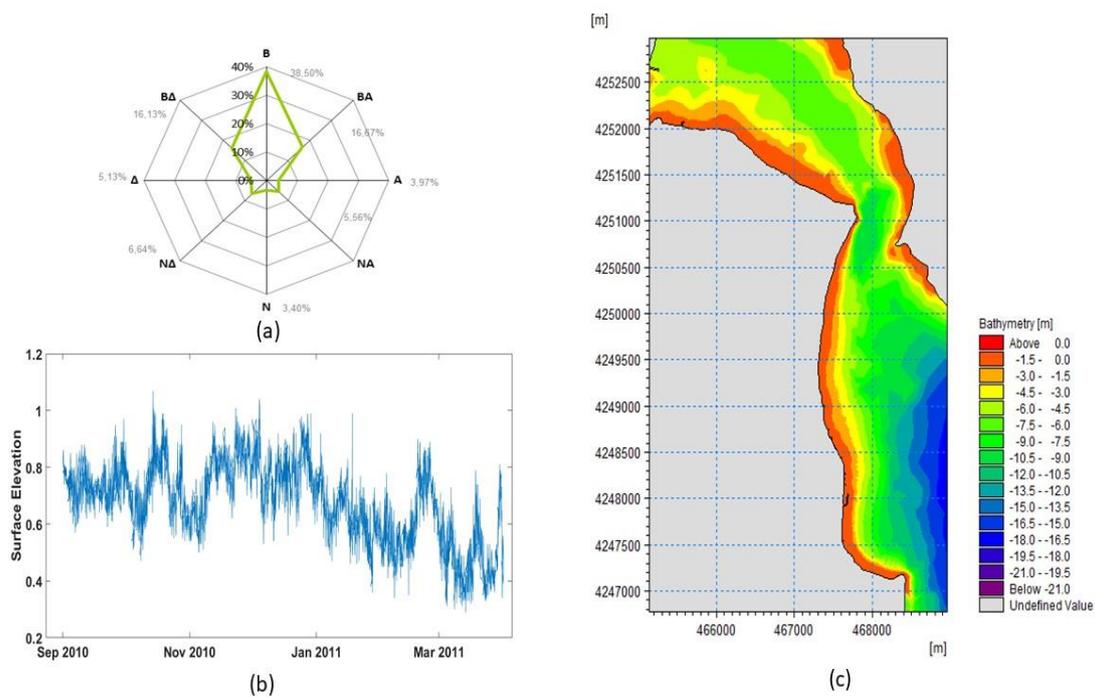
The data, which define the wave characteristics at the entrance of the study area (deep water offshore), is the wind speed  $U$ , the fetch  $F$  and the duration of wind  $D$ . The wave characteristics which are the wave height ( $H_s$ ), the period ( $T_s$ ) and the length ( $L$ ) of the significant wave in deep water area, are calculated for each relevant wind direction according to the SMB model (Etemad Shahidi et al, 2009). Wave climate conditions are simulated for 48 h using the average annual equivalent waves per wind direction for the most critical directions (Karabas et al.,2010), which in this case refer to the Northeast, East and Southeast winds. The characteristics of the equivalent annual waves are shown in Table 2.1.

Furthermore, the oceanographic sector of the Navy Hydrographic Service provided daily sea level values for the period between September 2010 and March 2011, which are taken into account during the simulation. The elevation of the free surface is plotted as a result of time

series analysis as shown in figure 2.3b. Finally, the bathymetric curves of the study area are the result of the digitization of the sonar map which is included at Navionics electronic application and it is shown in figure 2.3c.

**Table 2.1:** Characteristics of equivalent annual waves

Direction	$H_e$ (m)	$T_e$ (s)	Frequency $f$ (%)
Northeast	0,42	2,33	2,35
East	0,64	3,11	0,28
Southeast	0,73	3,04	0,46



**Figure 2.3:** a) Mean annual wind direction b) The elevation of the free surface c) Bathymetry as shown on MIKE 21

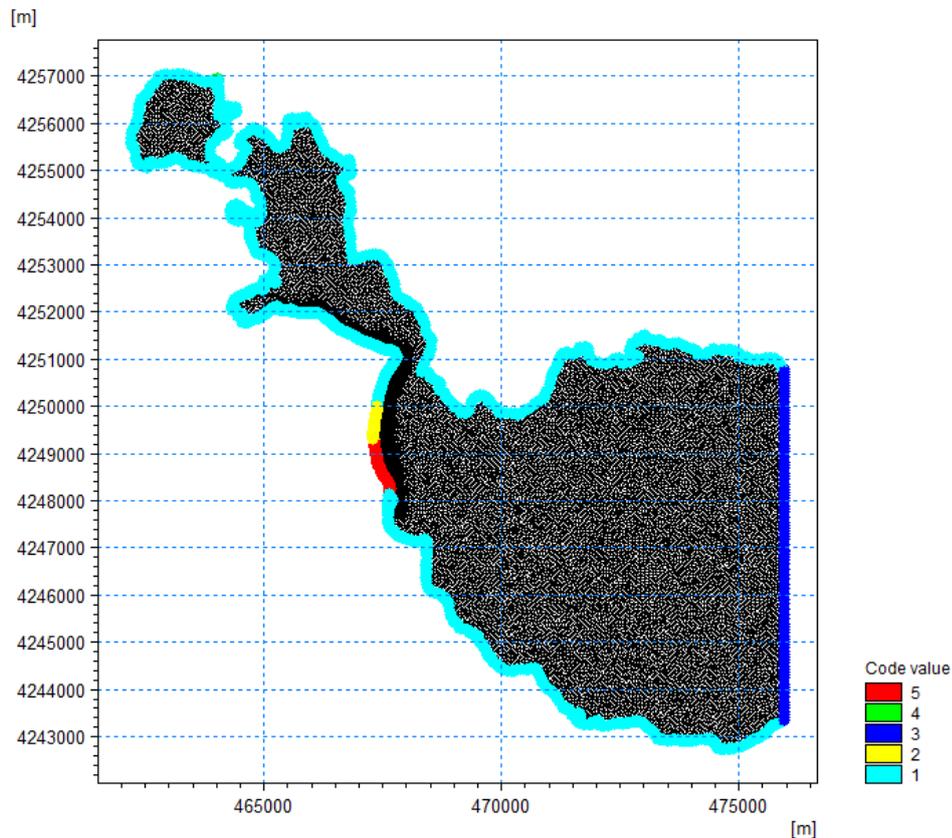
### 3. Model application

In this thesis, the MIKE 21/3 Coupled Model FM program is used in order to simulate the wave and hydrodynamic field as well as the sediment transport at the area of Avlida. Specifically, the Spectral Waves Module is used to calculate the wave characteristics in the study area, the Hydrodynamic Module for the calculation of wave current and the Sand Transport Module for the estimation of the sediment transport and the bottom erosion.

Bathymetry is applied into the program in the form of a triangular flexible mesh. This type of mesh is chosen because it allows densification depending on the need for precision. Additionally, the flexible mesh makes it possible to plot various port and coastal structures

without requiring any change as it easily adapts to bathymetric data.

The densification chosen is at  $100 \times 100 \text{m}^2$  for the grid in the open sea and at  $10 \times 10 \text{m}^2$  for the grid close to the coastline. The boundaries of the area are also chosen and determined whether they are close or reflective boundary or open boundary with wave parameters as shown in figure 3.1:



**Figure 3.1:** Flexible mesh with boundaries

#### 4. Results and discussion

The results of the evaluation for the evolution of the significant wave height in the current situation shows that there is an increase in the wave characteristics as the wave approaches the coast at some critical points of the shoreline. It is clear that the phenomenon concerns all the points where a vertical wall has been constructed. The existence of a vertical wall implies a very low permeability coefficient for construction and a very high reflection coefficient (Goda et al, 1967). The incident waves are reflected and their contribution to the upcoming causes a stationary wave and therefore intensifies the wave energy while increasing the elevation of the free surface. The hydrodynamic circulation is characterized by coastal current that is intensified at the part of the coastline where the vertical wall is constructed. The confluence of two currents with opposite orientation across the coastline diverts the flow towards the open sea by means of a rip current. The vectors of sediment transport generally follow the hydrodynamic circulation. Particularly they follow the currents across the coastline as the creation of the rip current. The results of the most critical area are shown in figure 4.1

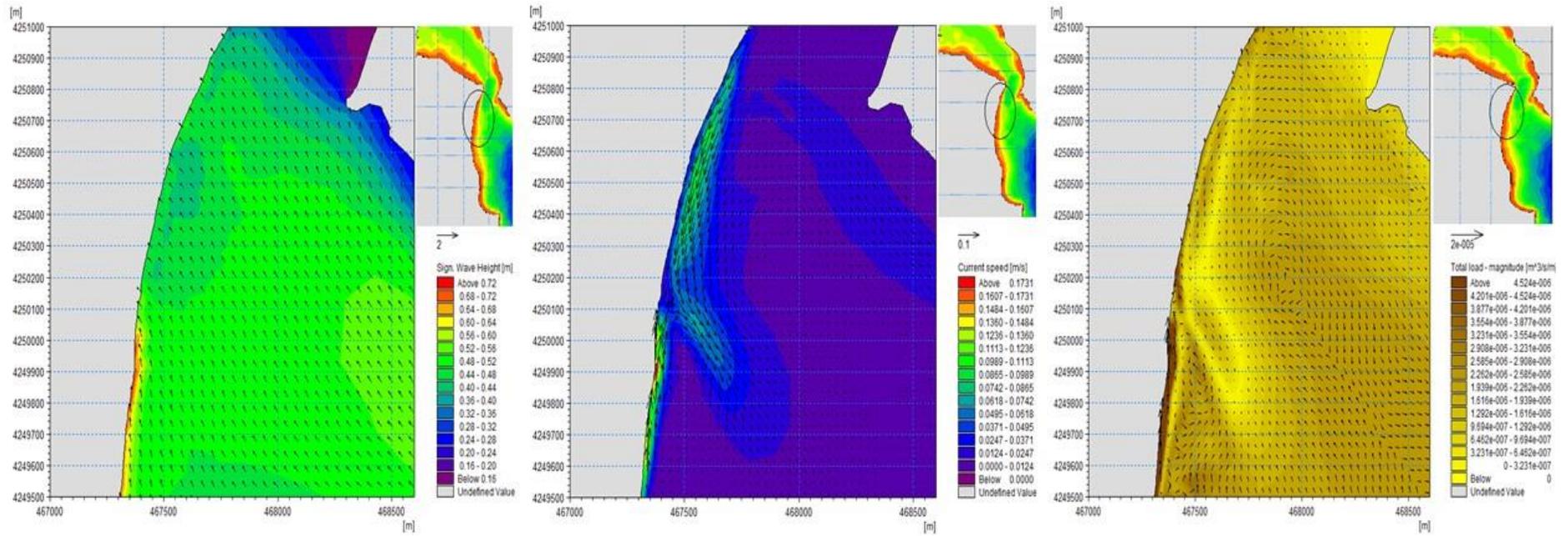


Figure 4.1: Results of the current situation

Four alternative structures are proposed in order to protect the area that receives the heaviest loads. The coastal protection structures aim at the armoring of the coastal front in order to avoid further erosion to the front of the coastal road. Additionally they also aim to eliminate the underground excavations identified in the seating of the coastal wall, which are responsible for the damage in construction, and protect the coast from erosion. The alternatives considered for the protection of the coastal system are shown in table 4.1:

**Table 4.1:** Characteristics of alternative coastal protection structures

Alternative Solutions	Type	Length (m)	Distance between structures (m)	Height (m)
1	Armoring & Groins	30	60	1,50
2	Armoring & Groins	60	120	1,50
3	Armoring & Breakwaters	90	28	0,40
4	Armoring & Waterline Breakwaters	90	28	0,00

According to the results a comparative evaluation of the four alternatives takes place in order to select the one with the most advantages and higher efficiency in terms of the wave and hydrodynamic characteristics of the study area as well as on the basis of the sediment transport. Initially the comparison holds in terms of wave characteristics based on the type of structure about the selection of structures parallel to the coastline or vertical. Regarding the wave characteristics, and more specifically the wave height, as shown in Figure 4.2, both structures combined with the coast armoring appear to be efficient. In the case of groins in combination with armoring, they have helped to eliminate the reflection process created in the current situation, which provoke an increase of the wave heights near the coast. In the shade of the groins, the waves have a lower height due to diffraction. In the case of breakwaters they act as a barrier to the propagation of the waves, the wave heights downstream of the structures show a significant reduction. Consequently, in both cases the structures contribute to the reduction of high values in the significant wave height close to the coastline.

The comparisons between structures belonging to the same category reveal that long groins are considered to be more efficient as they are initially placed over longer distance and as a result they provide protection over a longer shoreline while adequately covering the entire breaking zone creating calm conditions to a greater extent than groins with shorter length. For structures parallel to the coastline, higher breakwaters are more efficient as they absorb a higher percentage of wave energy.

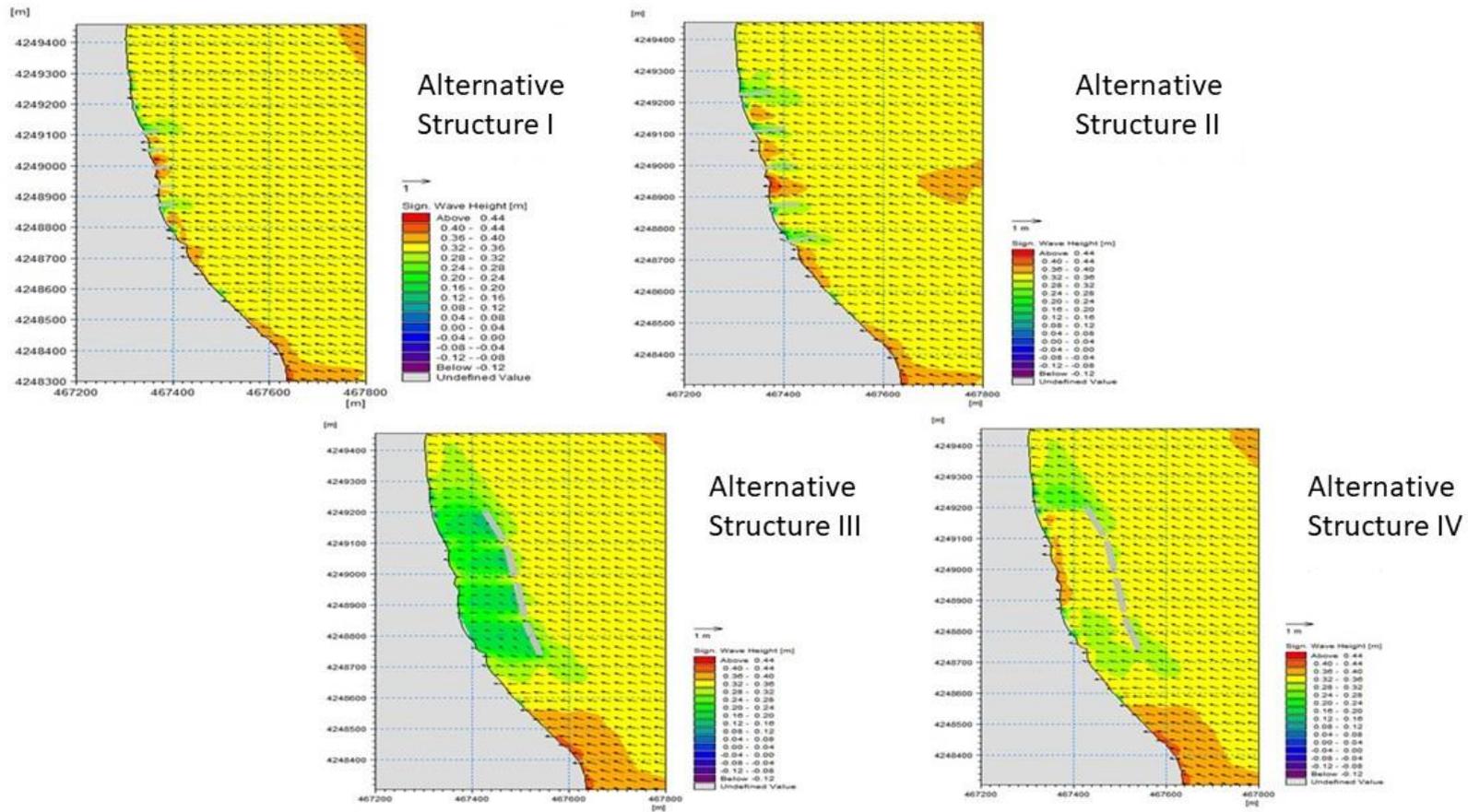


Figure 4.2: Results of alternative solutions- Significant wave height

Regarding the wave currents as shown in Figure 4.3, the choice between the two types of structures, the vertical and the parallel structures to the shoreline, is in conjunction with the analysis of the current situation. Consequently, the characteristics of the existing situation determine the choice of the most efficient structure as currents along the coast are mainly recorded in the current situation. The presence of the groins reduces the vertical velocity of the currents, diverts them from the coast and directs them to the open sea. Turbines are created in the shade of the groins, which are characterized by relatively slow velocity. The type of parallel structure on the coastline is more efficient in the case of vertical currents, which are not represented in the results of this investigation. About the comparison between the structures of different dimensions, the long groins are considered more efficient. Apart from their advantage of protecting a longer coastline, it is observed after the evaluation of Figure 4.3 that the longer groins do not contribute to the creation of a rip current, which diverts the currents towards the open sea with the risk of erosion.

The interaction of structures with the currents also determines the phenomenon of sediment transport, which is the most critical and is shown in figure 4.4. Hence, in the case of vertical groins, coastal sediment transport parallel to the coast is interrupted and the sediments are deposited upstream of the groins. There is a risk of corrosion in the downstream. In the case of breakwaters along the coastline, the currents created by the break of waves increase sediment transport and the sediment is deposited where there is relative calmness. It causes a change in the morphology of the coast by initially forming a salient, which can result in tombolo formation if the breakwater is near the coast. We also see the formation of rip currents that divert the sediment.

About the comparison between the groins of different dimensions, the longer groins are more efficient as the short groins while preventing the corrosion downstream do not provide adequate protection as they marginally cover the width of the breaker zone.

In conjunction with the above, constructions along the shoreline have a higher cost. Additionally, the fact that the design of the structures is near the port of Avlida can cause problems in maritime transport as the restructuring of the study area aims to attract boats. In this case, the parallel breakwaters as they are designed in deeper water can create an obstacle to navigation.

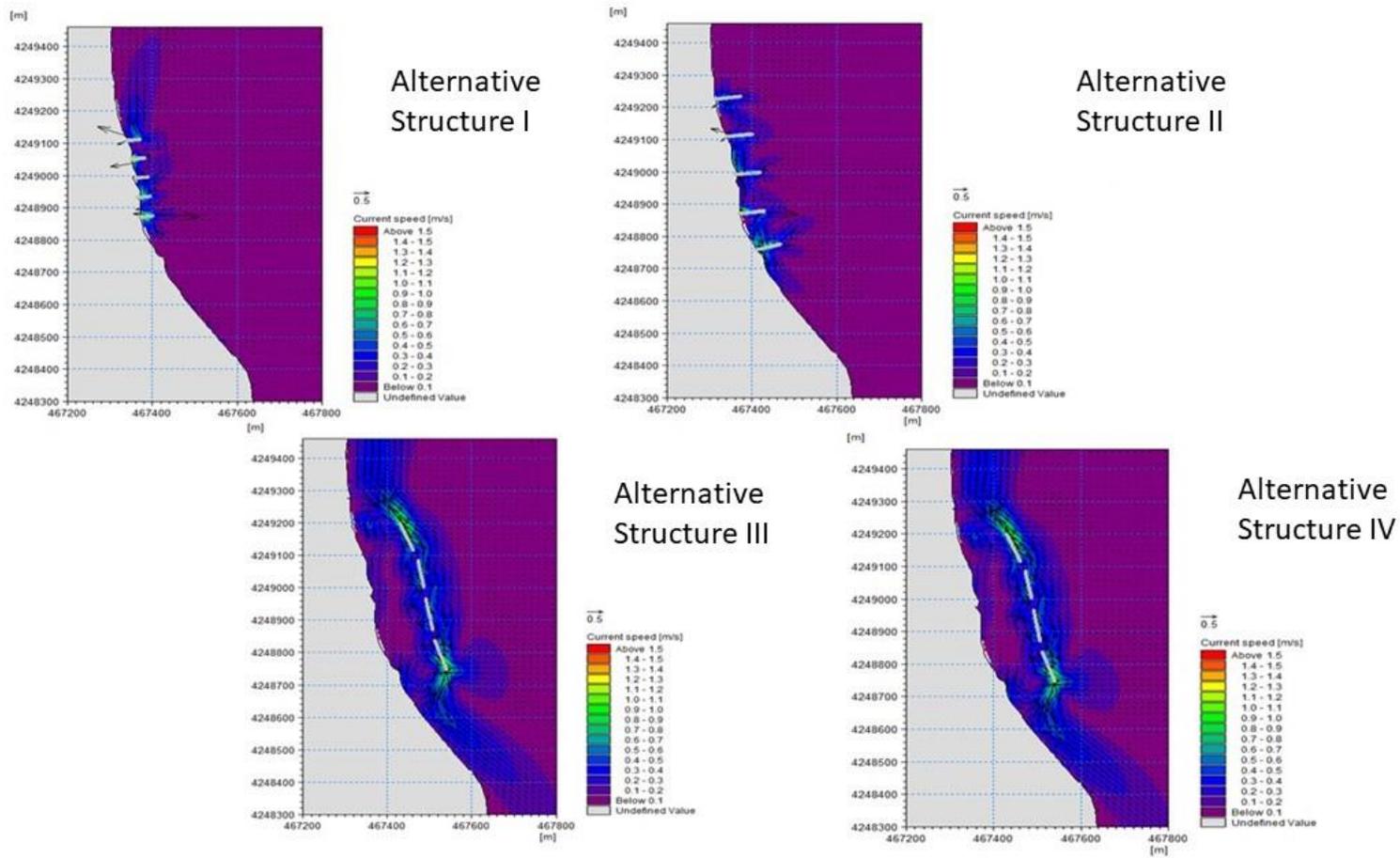


Figure 4.3: Results of alternative solutions- Current vectors

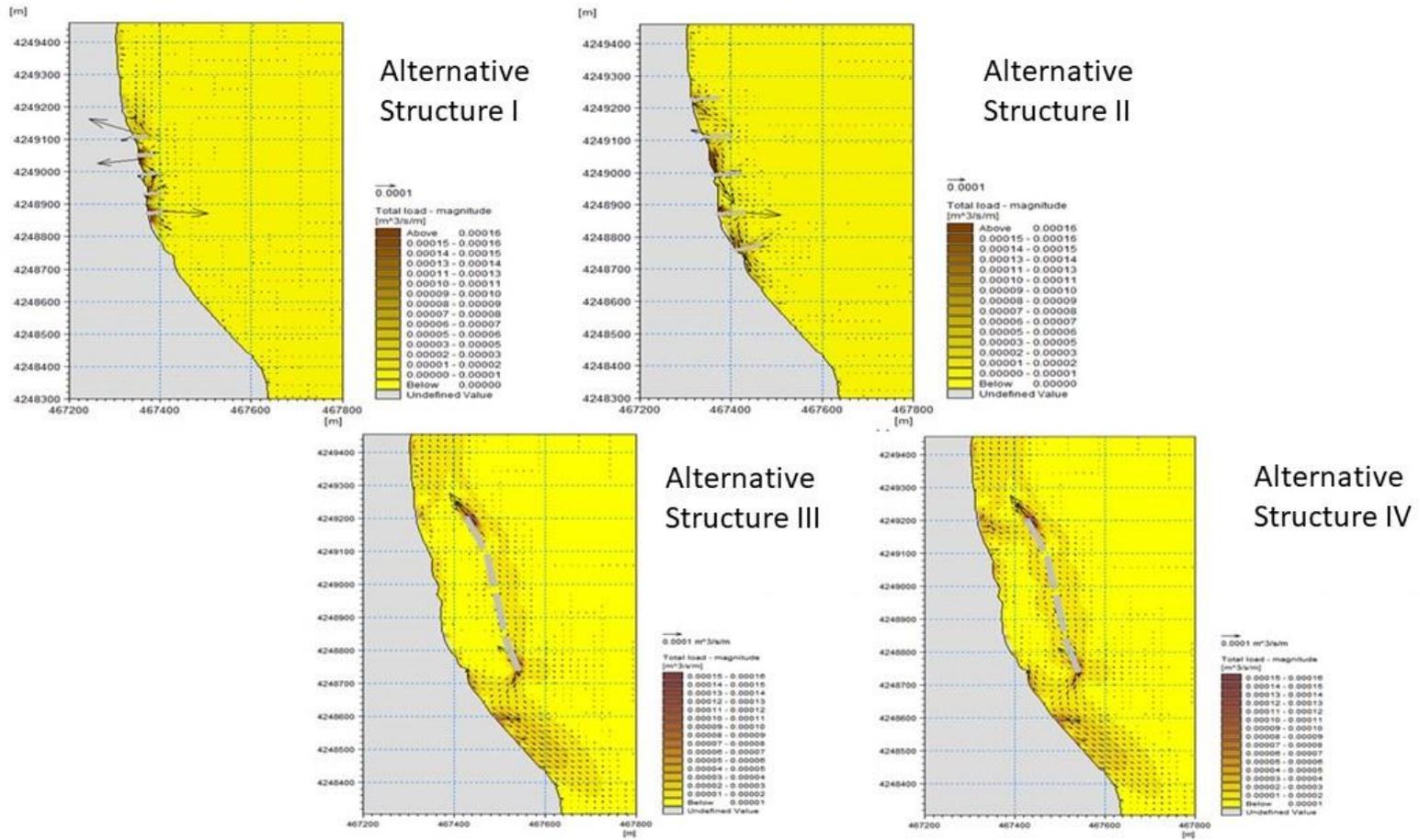


Figure 4.4: Results of alternative solutions- Sediment transport

## **5. Conclusions**

The coastal zone of Avlida come up against serious damages because of the erosion process, which is provoked by the effect of the waves. The singularity of this area is that there is increased tidal activity. The simulation of the study area, which is based on climate and wave conditions, gives results about the evolution of significant wave height, currents and sediment transport. Because of the necessity of coastal protection structures four different alternative scenarios are recommended. The simulation of these structures led to the conclusion that longer groins are more efficient than the other proposals. These groins protect a larger wide of coastal zone, they are not so expensive and finally they are more appropriate according to the hydrodynamic conditions which are characterized by currents across the coastline. The aim of these intentions is also to give access to the sea and to enhance the value of the overall region.

## 1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Αντικείμενο και σκοπός της μεταπτυχιακής εργασίας

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί ασκούν σημαντικές επιδράσεις στην παράκτια ζώνη, άλλοτε προκαλώντας διάβρωση και άλλοτε προσχώνοντας τη. Η ανάπτυξη εγκαταστάσεων στη θάλασσα μεταβάλλει τα τοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των νερών με συνέπειες στην ευρύτερη περιοχή του ίδιου του έργου. Τα τελευταία χρόνια η ανθρώπινη παρέμβαση στον παράκτιο χώρο έχει ενταθεί λόγω οικονομικών και κοινωνικών πιέσεων, παράλληλα όμως και εξαιτίας της ανάγκης προστασίας παράκτιων υποδομών ή ακόμα και των ίδιων των ακτών.

Ιδιαίτερα στη χώρα μας με την τεράστια έκταση ακτογραμμής και με το συντριπτικό ποσοστό της οικονομικής και κοινωνικής δραστηριότητας της χώρας να συνδέεται άμεσα με την παράκτια ζώνη, οι πιέσεις για παρεμβάσεις στην ακτογραμμή είναι αναγκαίες. Προσβάσεις στη θάλασσα, παράκτιες αστικές δομές και οδικές οδεύσεις, εγκαταστάσεις ψυχαγωγίας, και τουρισμού, κτηριακές και λιμενικές εγκαταστάσεις, θαλάσσιες εκμεταλλεύσεις αποτελούν μια πρώτη καταγραφή της πολυ-ποικιλότητας της σχέσης ανθρώπου και παράκτιας ζώνης.

Οι επεμβάσεις στο παράκτιο μέτωπο θα πρέπει να επιφέρουν την ελάχιστη αλλοίωση του μετώπου, να λαμβάνουν υπόψη αλλά να μην τροποποιούν την κυκλοφορία των νερών, να δίδουν την αναγκαία λύση στο τοπικό ζήτημα, αλλά να μην επιτρέπουν την αλλοίωση και την επιβάρυνση παραπλήσιων περιοχών, όπως είναι η συνήθης εικόνα από επεμβάσεις στην παράκτια ζώνη όλων των περιοχών της χώρας.

Η παρούσα μελέτη εξετάζει τα φαινόμενα διάδοσης των κυματισμών στην ευρύτερη περιοχή της παραλίας Αυλίδας με βάση την υπάρχουσα κατάσταση και τις επιπτώσεις που μπορούν να έχουν εναλλακτικές σχεδιάσεις κρίσιμων επεμβάσεων.

Η μελέτη συνίσταται στην ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης των κυματισμών στην ευρύτερη περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού και στην επικέντρωση στις κρίσιμες περιοχές της παραλίας Αυλίδας εξετάζοντας σημαντικές παραμέτρους όπως το ύψος των κυματισμών, η ταχύτητα των ρευμάτων και διερευνώνται επίσης φαινόμενα μεταφοράς ιζημάτων από την οποία διερεύνηση προκύπτουν τυχόν προβλήματα διάβρωσης ακτών ή συσσώρευσης ιζημάτων σε ορισμένες περιοχές και σχεδιάζονται οι παρεμβάσεις ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητα φαινόμενα.

## 1.2 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας

Η μεταπτυχιακή εργασία εκτός από την παρούσα εισαγωγή περιλαμβάνει άλλα οκτώ κεφάλαια τα οποία ακολουθούν την παρακάτω διάρθρωση:

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο γύρω από τους κυματισμούς, τα ρεύματα, την παράκτια στερεομεταφορά καθώς και συνοπτικά θεωρητικά στοιχεία για τα έργα παράκτιας προστασίας.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών της ακτής μελέτης. Συνοπτικά πρόκειται για τα αριθμητικά μοντέλα που περιέχονται στο πακέτο λογισμικού MIKE 21. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν το φασματικό Spectral Waves FM, το υδροδυναμικό Flow model FM Hydrodynamic Module και το μοντέλο στερεομεταφοράς Flow Module FM Sand Transport Module. Παρουσιάζονται οι βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιεί το κάθε μοντέλο και η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η ακτή μελέτης μέσω φωτογραφικής αποτύπωσης των προβλημάτων και των αστοχιών που εντοπίζονται σε αυτή ύστερα από επιτόπια αυτοψία.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται προσπάθεια καταγραφής της μεταβλητότητας της ακτής μελέτης μέσω συγκριτικής αξιολόγησης αεροφωτογραφιών σε διάφορες χρονικές στιγμές.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής, τα χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος και στοιχεία ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας εξαιτίας του φαινομένου της παλίρροιας που εντοπίζεται στην περιοχή μελέτης.

Στο κεφάλαιο 7 που αποτελεί και το πιο σημαντικό κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το κυματικό κλίμα τόσο για την υφιστάμενη κατάσταση όσο για τέσσερα σενάρια εναλλακτικών διατάξεων έργων παράκτιας προστασίας που προτείνονται για την ακτή μελέτη.

Στο κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας και η αξιολόγηση των τεσσάρων διατάξεων συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση της περιοχής μελέτης.

## 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΕΝΝΟΙΩΝ

### 2.1 Παράκτια ζώνη

Ως παράκτια ζώνη ονομάζεται η ζώνη εκείνη της ακτής που περιλαμβάνει ένα θαλάσσιο κι ένα χερσαίο τμήμα καθώς και τη γραμμή που ορίζεται από την τομή της θαλάσσιας επιφάνειας με την ξηρά: την ακτογραμμή. Το θαλάσσιο τμήμα εκτείνεται από την ακτογραμμή μέχρι την ισοβαθή στην οποία γίνεται αισθητή η επίδραση του πυθμένα, ενώ το χερσαίο τμήμα εκτείνεται από την ακτογραμμή έως ένα υψόμετρο που ορίζεται κατά περίπτωση και αντιστοιχεί στο σημείο που σταματά να επικρατεί η δράση των θαλάσσιων διεργασιών.

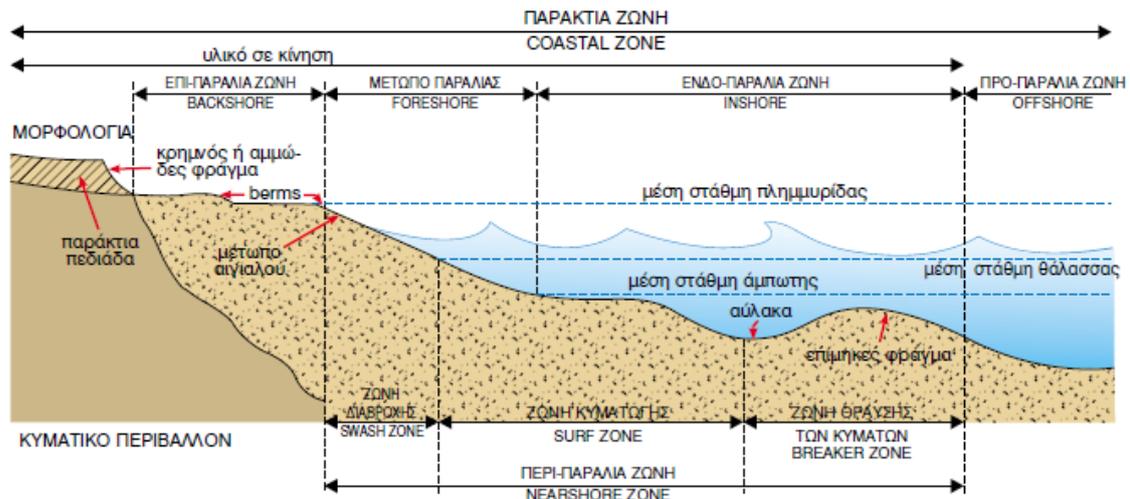
Η παράκτια ζώνη με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά διακρίνεται:

- στην επι-παράλια ζώνη (backshore),
- στο μέτωπο της παραλίας (foreshore zone) και
- στην ενδο-παράλια ζώνη ή επάκτια (inshore zone).

Το όριο μεταξύ της επάκτιας και της προάκτιας ζώνης τοποθετείται στη γραμμή της κατώτατης ρηχίας.

Με κριτήριο τον τύπο των κυματικών διεργασιών που λειτουργούν στα επιμέρους τμήματα η παράκτια ζώνη περιλαμβάνει (Komar, 1998):

- Τη βαθύτερη ζώνη ή ζώνη πριν από τη θραύση όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυμάτων που τελικά οδηγούν στη θραύση.
- Τη ζώνη θραύσης (breaker zone) όπου εμφανίζεται και ολοκληρώνεται ο φυσικός μηχανισμός της θραύσης των κυματισμών ο οποίος αποτελεί το γενεσιουργό μηχανισμό των περισσότερων διαδικασιών της ακτομηχανικής.
- Τη ζώνη μετά τη θραύση (after breaker zone) η οποία υποδιαιρείται στην ζώνη απόσβεσης (surf zone) όπου εκτονώνεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας το θραυσμένου κύματος (τύρβη, θερμότητα κτλ.) και στη ζώνη διαβροχής (swash zone) η οποία ορίζεται από 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.



Εικόνα 2.1: Υποδιαίρεση της παράκτιας ζώνης σε επιμέρους τμήματα (Καρύμπαλης Θ., 2010)

## 2.2 Θαλάσσια κύματα

Ο κυματισμός αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους γεωμορφολογικούς παράγοντες που δρουν στην παράκτια ζώνη. Τα θαλάσσια κύματα είναι περιοδικές ταλαντώσεις των μορίων του θαλάσσιου νερού με τις οποίες μεταφέρεται ενέργεια η οποία σε μεγάλο βαθμό καταναλώνεται με τη θραύση τους κατά μήκος της ακτής. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες ταξινόμησης των διαφορετικών ειδών των θαλάσσιων κυματισμών με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά τους. Σύμφωνα με τους Phillips 1977, LeBlond και Mysak 1978 οι κυματισμοί διακρίνονται στις εξής κατηγορίες:

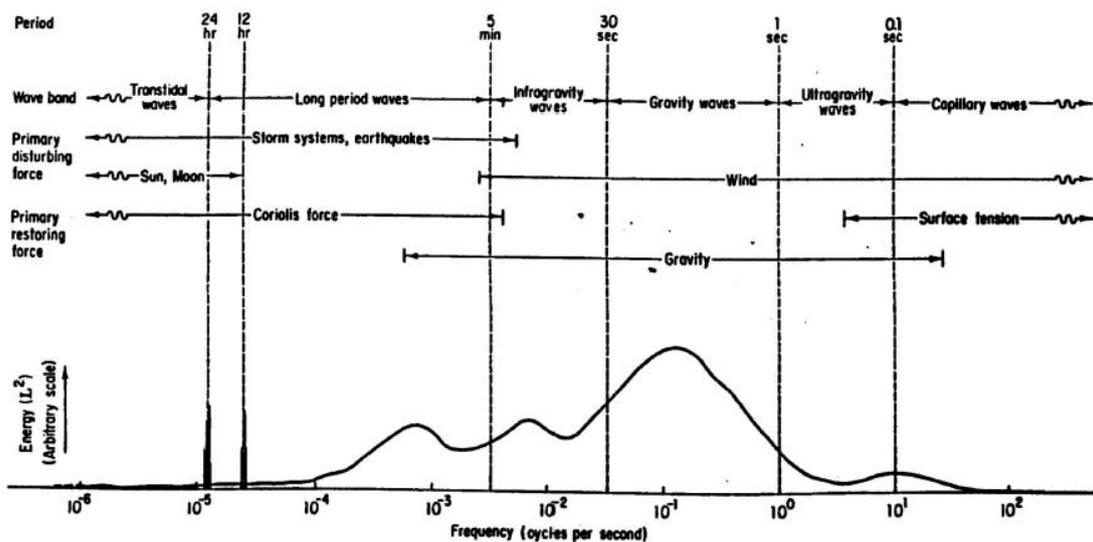
- Επιφανειακά κύματα (surface waves) τα οποία διαδίδονται στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού και περιλαμβάνουν κυρίως τα ανεμογενή (wind waves), που δημιουργούνται δηλαδή λόγω του ανέμου και τις αποθαλασσιές (swell).
- Εσωτερικά κύματα (internal waves) τα οποία δημιουργούνται στη διεπιφάνεια δυο στρωμάτων θαλάσσιου νερού διαφορετικής πυκνότητας.
- Γυροσκοπικά κύματα (gyroscopic or inertial waves) τα οποία οφείλονται στην περιστροφική κίνηση των υγρών σωματιδίων και μεταδίδονται στο εσωτερικό του υγρού.
- Πλανητικά κύματα (planetary or Rossby waves) τα οποία οφείλονται στη σχετική κίνηση των πλανητών και της Γης
- Παλίρροιες (tides) που οφείλονται στη βαρυτική έλξη της Σελήνης πάνω στη Γη.
- Ακουστικά κύματα (hydroacoustic waves) στο εσωτερικό της υδάτινης μάζας.

Εξετάζοντας αναλυτικότερα τους επιφανειακούς θαλάσσιους κυματισμούς, διακρίνονται οι εξής κύριες κατηγορίες ανάλογα με το αίτιο δημιουργίας τους:

- Ανεμογενείς κυματισμοί (wind waves) και αποθαλασσιές (swell), οι οποίοι

καταλαμβάνουν ένα μεγάλο τμήμα του φάσματος που αντιστοιχεί σε περιόδους από  $T=1 \text{ sec}$  έως  $T=20 \text{ sec}$  έως  $25 \text{ sec}$ .

- Κύματα παραγόμενα από κινήσεις επιπλεόντων η βυθισμένων αντικειμένων (body generated waves) τα οποία αντιστοιχούν στις ίδιες περιόδους με τους ανεμογενείς κυματισμούς.
- Κύματα παραγόμενα από γρήγορες μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης (seiches) με περιόδους από  $T=1 \text{ min}$  έως  $T=40 \text{ min}$ .
- Σεισμογενείς κυματισμούς (tsunamis) που καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος του φάσματος με περιόδους από  $T=4 \text{ min}$  έως  $T=2.5 \text{ h}$  περίπου.



**Σχήμα 2.1:** Ταξινόμηση των θαλάσσιων κυμάτων (Μέμος Κ., 2016)

Τα κύματα που δημιουργούνται και διαδίδονται στο θαλάσσιο νερό αποτελούν μια αλληλουχία κορυφών και κοιλιών και προσδιορίζονται από κάποια βασικά χαρακτηριστικά όπως το ύψος κύματος  $H$ , η περίοδος  $T$  και το μήκος κύματος  $L$ . Τα μεγέθη αυτά για περιοχές βαθιών νερών ( $d > 0.5L$ ) παραμένουν σταθερά καθώς εκεί οι τροχιές των υγρών σωματιδίων είναι κυκλικές. Αντίθετα, στα ενδιάμεσα και ρηγά νερά ( $d < 0.5L$ ) οι τροχιές τείνουν να γίνουν περίπου ελλειπτικές και σχετικά πεπλατυσμένες και η επίδραση του πυθμένα καθίσταται ολοένα και σημαντικότερη με συνέπεια τα φαινόμενα να αποκλίνουν από τη γραμμικότητα τους παρουσιάζοντας σημαντική διασπορά.

Στην περιοχή των ενδιάμεσων και ρηχών νερών συναντώνται όλα τα σημαντικά και χαρακτηριστικά κυματικά φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα:

- ανάκλαση (reflection) και διάθλαση (refraction) των κυματισμών, καθώς και τροποποίηση του πλάτους των κυματισμών λόγω ρήχωσης (shoaling)
- αλληλεπίδραση με την τρισδιάστατη βαθυμετρία και φαινόμενα περίθλασης ή σκέδασης των κυματισμών (diffraction)
- διασπορά των κυματισμών (dispersion)

- τριβή πυθμένα και εξασθένηση της ροής της κυματικής ενέργειας (bottom friction and wave energy dissipation)
- μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυματικών συνιστωσών, και μεταφορά ενέργειας από μια αρχική ζώνη συχνοτήτων του φάσματος των κυματισμών προς μικρότερες και μεγαλύτερες συχνότητες (non-linear interactions)
- δημιουργία κυματογενών ρευμάτων (wave induced currents) και μεταφορά μάζας
- θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτή (wave breaking).

Στη ζώνη θραύσεως και στη ζώνη μετά τη θραύση η ένταση της κυματικής και κατ' επέκταση της υδροδυναμικής κυκλοφορίας και των φαινομένων που προκαλούνται από αυτές, είναι σημαντικά μεγαλύτερη, καθώς εκλύονται τεράστιες ποσότητες ενέργειας οι οποίες διοχετεύονται στην ακτή και συμβάλλουν στην κίνηση του υλικού του πυθμένα.

### 2.3 Παράκτια ρεύματα

Σε αντίθεση με τα κύματα τα θαλάσσια ρεύματα σε παράκτιες περιοχές είναι δύσκολο να προβλεφθούν με κάποια αξιοπιστία. Και τούτο λόγω των πολλών επί μέρους συνιστωσών των ρευμάτων οι κύριες από τις οποίες είναι:

- Τα ωκεάνια ρεύματα
- Τα ρεύματα λόγω παλίρροιας
- Τα ανεμογενή ρεύματα
- Τα ρεύματα λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης
- Τα κυματογενή ρεύματα

Τα ωκεάνια ρεύματα και τα ρεύματα λόγω παλίρροιας αφορούν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, τα ανεμογενή και τα ρεύματα λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης αναφέρονται σε τοπικά φαινόμενα ενώ τα κυματογενή ρεύματα εμφανίζονται με αυξημένη σπουδαιότητα στα ρηχά νερά. 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 τη 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 τη φορά μετάδοσης των κυματισμών και του πρωτογενούς αιτίου του ανέμου.

Μια άλλη αιτία που μπορεί να προκαλέσει σημαντικά ρεύματα είναι η ύπαρξη εκβολής ποταμού στην περιοχή μελέτης και η εισροή γλυκού νερού στη θάλασσα δημιουργώντας ρεύματα πυκνότητας.

Τα κυματογενή ρεύματα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες εξαιτίας της μορφής και της διεύθυνσης που δρουν: τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής (longshore currents) και τα βελοειδή ρεύματα (rip currents). Η τριβή στον πυθμένα, η διατμητική τάση ακτινοβολίας και η θραύση κυματισμών υπό κλίση σε σχέση με την ακτή είναι οι γενεσιουργίες αιτίες των

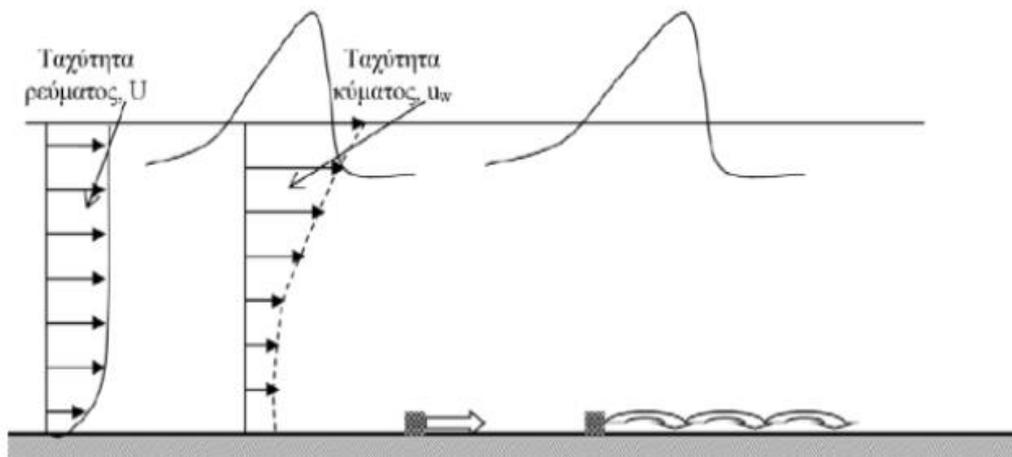
ρευμάτων κατά μήκος της ακτής (κμα). Η συμβολή δύο ρευμάτων κμα αντίθετης φοράς εκτρέπει τη ροή προς τα βαθιά, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός νέου ρεύματος, το οποίο καλείται βελοειδές ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι στενό και έντονο, διασχίζει τη ζώνη θραύσης και εκφυλίζεται στη ζώνη πριν από τη θραύση, με συνέπεια να επιστρέφει ισχυρή ποσότητα μάζας από τα ρηχά στα βαθιά νερά. Το ρεύμα αυτό μπορεί να δημιουργηθεί επίσης λόγω τοπογραφικής ανωμαλίας του πυθμένα. Το βελοειδές ρεύμα έχει κάθετη σχεδόν διεύθυνση ως προς την ακτογραμμή, μόνο όταν τα δύο παράλληλα ρεύματα που συμβάλλουν είναι παρόμοιας έντασης. Σε αντίθετη περίπτωση το βελοειδές ρεύμα εκτρέπεται με κλίση μικρότερη της καθέτου και παράλληλα μειώνεται και η ταχύτητά του.

Η δημιουργία των ρευμάτων κμα οφείλεται στις υδραυλικές βαθμίδες που προκαλούνται από την ανομοιόμορφη κατανομή του ύψους κύματος στη ζώνη θραύσεως, αλλά και στην κλίση της γραμμής θραύσεως (Μουτζούρης, 2005). Επιμήκη ρεύματα αναπτύσσονται περισσότερο κατά μήκος ευθύγραμμων ακτών. Η φορά αυτών των ρευμάτων καθορίζεται από τη μορφή της ακτογραμμής και τη διεύθυνση των προσπιπτόντων κυματισμών. Η ταχύτητα των ρευμάτων αυξάνεται με την αύξηση του βάρους θραύσεως  $d_b$  των κυματισμών, τη μείωση της περιόδου  $T$ , την αύξηση της γωνίας μεταξύ της γραμμής θραύσεως και της ακτής, και τέλος, με την αύξηση της κλίσης των πρηνών της ακτής. Τυπικές τιμές παράκτιων ρευμάτων είναι από 0,3 έως και 1 m/s ενώ το ταχύτερο που έχει παρατηρηθεί είναι της τάξης των 2 m/s

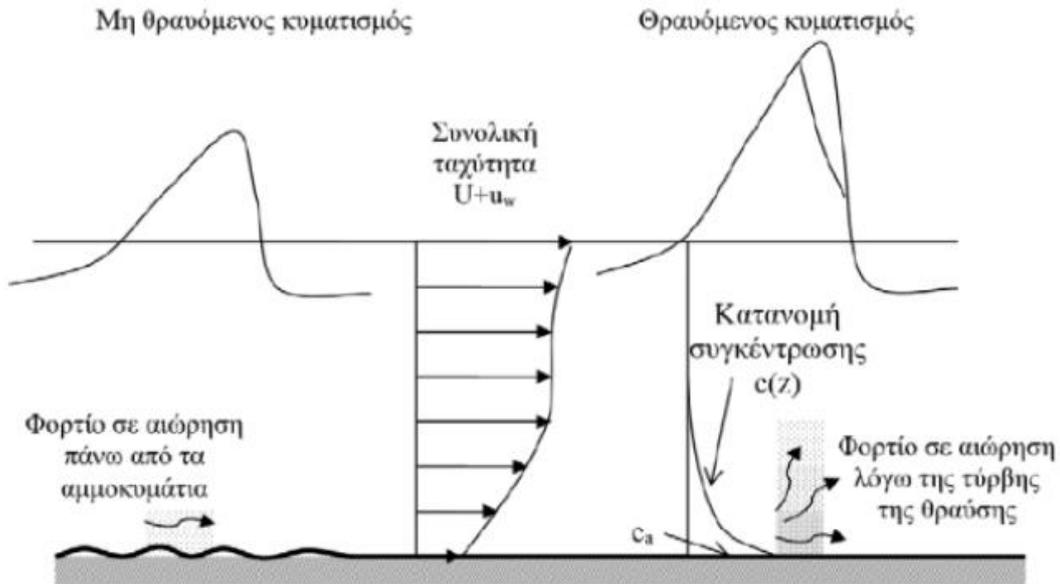
## 2.4 Παράκτια στερεομεταφορά

Σε περιβάλλον ανυπαρξίας κυματισμών και ρευμάτων δε λαμβάνει χώρα μεταφορά κοκκώδους υλικού του πυθμένα. Η υδροδυναμική κατάσταση κοντά στον πυθμένα, όταν υπάρχουν κυματισμοί ή ρεύματα ή και τα δύο, αποτελεί τον ουσιαστικό παράγοντα αποσταθεροποίησης των κόκκων των ιζημάτων. Τα επιφανειακά ιζήματα βρίσκονται είτε σε δυναμική ισορροπία με τις φορτίσεις του περιβάλλοντος είτε σε κίνηση που μπορεί να γίνεται στον πυθμένα ή στα ανώτερα στρώματα του υδάτινου σώματος. Οι διάφορες συνιστώσες που δρουν πάνω σε ένα κόκκο της επιφάνειας του πυθμένα, δηλαδή οι ορθές και διατμητικές τάσεις από το κινούμενο νερό, η αντίδραση στήριξης σε άλλους κόκκους, οι υδροδυναμικές υποπιέσεις λόγω διήθησης και οι δυνάμεις πρόσκρουσης άλλων κόκκων, είναι δυνατόν να δημιουργήσουν τις κατάλληλες δυναμικές συνθήκες αποκόλλησης των επιφανειακών κόκκων. Η διαδικασία της μεταφοράς ιζημάτων ορίζεται κυρίως από το μέγεθος των κόκκων του εδαφικού υλικού και τη διατμητική τάση που ασκεί η ροή σ' αυτό. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι η θεώρηση της αλληλεπίδραση μεταξύ κυμάτων και ρευμάτων έχει πολλές φορές αποτέλεσμα έως και το διπλασιασμό της μέγιστης διατμητικής τάσης πυθμένα, γεγονός που αποδεικνύει τη σημασία της (Rosales et al., 2007).

Μετά την αποσταθεροποίηση των κόκκων η κίνησή τους γίνεται με δύο τρόπους: (α) η κίνηση των κόκκων γίνεται με κύλιση στον πυθμένα ή διαδοχικά άλματα που συνεπάγονται περιοδική επαφή με τον πυθμένα, τότε η μεταφορά φερτών χαρακτηρίζεται σαν φορτίο πυθμένα (Σχήμα 2.2) β) οι κόκκοι των ιζημάτων βρίσκονται σχεδόν συνέχεια σε αιώρηση στη στήλη του νερού λόγω της τύρβης, του οριακού στρώματος και των θραυόμενων κυματισμών, τότε η μεταφορά φερτών χαρακτηρίζεται σαν φορτίο σε αιώρηση. (Σχήμα 2.3)



Σχήμα 2.2: Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς Θ., κ.α., 2015)



**Σχήμα 2.3:** Φορτίο σε αιώρηση (Καραμπάς Θ., κ.α., 2015)

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των κόκκων, των κυματισμών και των κυματογενών ρευμάτων, κυριαρχεί το ένα από τα δύο φορτία. Προφανώς, όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος των κόκκων τόσο πιο σημαντικό είναι το φορτίο πυθμένα. Η συνολική παροχή  $q_t$  του φορτίου φερτών υλών είναι το άθροισμα της παροχής δύο επιμέρους φορτίων, του φορτίου πυθμένα  $q_b$  και του φορτίου σε αιώρηση  $q_s$ :  $q_t = q_b + q_s$  (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015).

Επιπλέον η κίνηση των ιζημάτων στη παράκτια ζώνη αναλύεται σε δύο συνιστώσες: 1) κάθετα προς την ακτογραμμή (στερεομεταφορά κάθετα προς την ακτογραμμή ή απλά κάθετη μεταφορά) και 2) παράλληλα προς την ακτογραμμή (στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής ή απλά παράλληλη μεταφορά). Η θέση όπου οι δυνάμεις που ασκούνται στον κόκκο (βαρύτητα λόγω του κεκλιμένου πυθμένα και κυματική δύναμη) βρίσκονται σε ισορροπία, ονομάζεται ουδέτερη γραμμή. Η θέση της ουδέτερης γραμμής είναι συνάρτηση της τοπογραφίας του πυθμένα και των χαρακτηριστικών των κυμάτων, ωστόσο πάντα βρίσκεται προς τα ανοιχτά της ζώνης θραύσης. Τα ιζήματα που βρίσκονται στα πιο βαθιά σε σχέση με την ουδέτερη γραμμή κινούνται προς τα ανοιχτά, ενώ τα ιζήματα που βρίσκονται πιο ρηχά κινούνται με κατεύθυνση την ακτή.

#### 2.4.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής

Η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής οφείλεται κυρίως στη θραύση κυμάτων υπό γωνία με την ακτογραμμή. Η στερεομεταφορά στη ζώνη πριν από τη θραύση είναι ασήμαντη λόγω της μικρής συνιστώσας κινήσεως κατά μήκος της ακτής. Τα ιζήματα διαταράσσονται και τίθενται σε αιώρηση από τα θραυόμενα κύματα. Η μετατόπισή 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 παροχή στερεομεταφοράς εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων και την ενέργεια τους. Μεγιστοποιείται για γωνίες πρόσπτωσης της τάξης των 45°, οπότε και μεγιστοποιείται η ταχύτητα του δημιουργούμενου ρεύματος κατά μήκος της ακτής.

Η παροχή στερεομεταφοράς κατά μήκος μιας ακτής είναι ένα στοιχείο απαραίτητο για το σχεδιασμό σχεδόν όλων των παράκτιων έργων. Οι μέθοδοι υπολογισμού της είναι οι εξής:

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

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά κόρον παγκοσμίως διακρίνονται σε ροής ενέργειας και σε ροής ορμής. Η μέθοδος που εφαρμόζεται ως επί τω πλείστων στο σχεδιασμό και αφορά τον υπολογισμό της στερεοπαροχής είναι η μέθοδος CERC (Corps of Engineers Research Center), η οποία οφείλεται αποκλειστικά σε κυματογενή ρεύματα κατά μήκος της ακτής και υπολογίζει το σύνολο φορτίου πυθμένα και φορτίου αιωρήσεως που διακινείται στις ζώνες θραύσεως και αποσβέσεως. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ο ρυθμός στερεομεταφοράς παράλληλα στην ακτή υπολογίζεται ως:

$$Q_l = \frac{K}{(\rho_s - \rho)g(1-n)} P_l \quad (2.1)$$

Όπου  $P_l$  η ροή ενέργειας ως:

$$P_l = \frac{1}{16} \rho g H_b^2 C_{gb} \sin 2a_b \quad (2.2)$$

Στις παραπάνω σχέσεις:

$Q_l$  η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής σε  $m^3$  /έτος

$P_l$  η ροή ενέργειας κατά μήκος της ακτής σε  $J/m/s$

$K$  εμπειρικός αδιάστατος συντελεστής

$\rho_s$  ( $=2650 \text{ kg/m}^3$ ) η μέση πυκνότητα ιζήματος

$\rho$  ( $= 1025 \text{ kg/m}^3$ ) η μέση πυκνότητα θαλασσινού νερού

$g$  ( $= 9,81 \text{ m/s}^2$ ) η επιτάχυνση της βαρύτητας

$n$  ( $\approx 0,40$ ) το πορώδες του ιζήματος

$H_b$  το ύψος κύματος στη θραύση (σε m)

$\alpha_b$  η γωνία θραύσης

$C_{gb}$  ( $= (gd_b)^{0.5}$ ) η ταχύτητα ομάδας κυματισμών στη θραύση σε m/s

#### 2.4.2 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτογραμμή

Η μεταφορά ιζημάτων κάθετα στην ακτογραμμή οφείλεται κατά κύριο λόγο στους κυματισμούς, τα εγκάρσια κυματογενή ρεύματα, τους ανέμους και τις παλίρροιες. Η εγκάρσια συνιστώσα της στερεομεταφοράς καθορίζει το προφίλ της ακτής καθώς μεταβάλλει τη βαθυμετρία της και το ύψος των έξαλων τμημάτων αυτής.

Η στερεομεταφορά κάθετα στην ακτή, σε αντίθεση με την παράλληλη συνιστώσα, μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βραχυπρόθεσμες μεταβολές στη μορφή της ακτογραμμής. Οι μεταβολές αυτές εκδηλώνονται κατά τους χειμερινούς και τους θερινούς μήνες ως μεταβολές στα εγκάρσια προφίλ της ακτής (Μουτζούρης, 2005). Αυτή η διαφορά οφείλεται στο διαφορετικό κυματικό κλίμα που επικρατεί στην θαλάσσια περιοχή στις δύο περιόδους ενός έτους. Στη συνέχεια περιγράφονται τα δυο εποχιακά προφίλ (χειμερινό και θερινό).

- Χειμερινό προφίλ: Οι ισχυροί κυματισμοί προκαλούν διάβρωση στο μέτωπο της ακτής και σε τμήμα του πυθμένα κοντά στη ζώνη θραύσεως προκαλώντας μετακίνηση ιζήματος, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός επιμήκους ύφαλου αναβαθμού παράλληλου στην ακτή (όταν η πρόσπτωση γίνεται σχεδόν κάθετα). Η θέση και η διατομή τους καθορίζονται από τη ζώνη θραύσεως. Το μήκος αυτού του αναβαθμού μπορεί να φτάσει τις τάξεις μερικών δεκάδων χιλιομέτρων. Συνήθως, η συνέχεια του αναβαθμού διακόπτεται από τη ροή βελοειδών ρευμάτων και αναφέρεται ορθώς ως σύστημα διαδοχικών αναβαθμών. Χαρακτηριστικό είναι ότι μπορεί να υπάρξει ο σχηματισμός περισσότερων παράλληλων αναβαθμών. Γενικώς, ο αριθμός τους αυξάνει όσο μειώνεται η κλίση του πυθμένα και αυξάνεται η καμπυλότητα των κυματισμών. Η ύπαρξη του αναβαθμού έχει ευεργετικές επιδράσεις στην προστασία της ακτής καθώς δρα ως ανασταλτικός παράγοντας στη δράση των κυματισμών, και επιτρέπει την διάδοση κυμάτων μικρότερης καμπυλότητας. Επιπλέον, μετατοπίζει τη θραύση των κυματισμών προς τα ανοικτά εφόσον αλλάζει η βαθυμετρία της ακτής.
- Θερινό προφίλ: Σε περιόδους με ηπιότερα κύματα μικρότερης καμπυλότητας, μεγάλο μέρος των ιζημάτων του ύφαλου αναβαθμού μετατοπίζεται προς την ακτή, αυξάνει την κλίση του πυθμένα και εξομαλύνει το ανάγλυφο. Κατά συνέπεια δημιουργείται, ένας έξαλος αναβαθμός στην ακτή εμπλουτίζοντάς τη με υλικό και η ζώνη θραύσης μετατοπίζεται και πάλι στα πιο ρηχά.

#### 2.5 Έργα παράκτιας προστασίας

Η διάβρωση των ακτών, η μη αναστρέψιμη δηλαδή οπισθοχώρηση της ακτογραμμής, είναι μια φυσική διεργασία που μπορεί να αποτελέσει απειλή με πολλές αρνητικές κοινωνικό-

οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις για αρκετές παράκτιες περιοχές. Τα προβλήματα που προκύπτουν από τη διάβρωση των παράκτιων περιοχών δημιουργούν την ανάγκη αναζήτησης τρόπων προστασίας. Για την ανάγκη περιορισμού και ρύθμισης της παράκτιας διάβρωσης έχουν υιοθετηθεί από τους εκάστοτε μελετητές διάφοροι τύποι έργων που περιορίζουν το φαινόμενο, καθένας με διαφορετικό μηχανισμό, ανάλογα τις ανάγκες της μελέτης και τις αντίστοιχες συνέπειες του έργου στην παράκτια ζώνη. Τα παράκτια τεχνικά έργα για την προστασία έναντι διάβρωσης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, (α) τα συμβατικά και (β) τα ήπια, ανάλογα με το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που αφήνουν στον παράκτιο χώρο. Επιπροσθέτως, διακρίνονται ανάλογα με τον προσανατολισμό του διαμήκους άξονά τους και την απόστασή τους από την ακτογραμμή στα εξής:

- Θωράκιση του μετώπου της ακτής ή έργα στην ακτή
- Έργα (σχεδόν) παράλληλα και σε απόσταση από την ακτογραμμή, οι κυματοθραύστες
- Έργα (σχεδόν) κάθετα ή υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή, σε επαφή με αυτή, οι πρόβολοι
- Αναπλήρωση παράκτιας ζώνης με εναλλακτικές μεθόδους

Τα έργα θωράκισης της ακτής, οι έξαλοι κυματοθραύστες και οι πρόβολοι αποτελούν τις συμβατικές κατασκευές. Τα έργα αναπλήρωσης της ακτής με εναλλακτικές μεθόδους, όπως και κάθε είδους ύφαλη κατασκευή (ύφαλοι κυματοθραύστες, αναβαθμοί, κλπ.), χαρακτηρίζονται ως ήπιες μορφές έργων προστασίας, αφού έχουν εμφανώς λιγότερες επιπτώσεις στο φυσικό περιβάλλον.

### 2.5.1 Κυματοθραύστες

Οι κυματοθραύστες είναι επιμήκη έργα που συνήθως τοποθετούνται παράλληλα ή με μικρή κλίση ως προς την ακτογραμμή και σε κάποια απόσταση από αυτή. Σκοπός τους είναι η προστασία της ακτογραμμής από τη διάβρωση και, γενικότερα, τη δράση των κυματισμών. Συνήθως, χρησιμοποιούνται σε ακτές λεπτόκοκκου ιζήματος με ανοιχτό μέτωπο στο πέλαγος, για να αποφευχθεί η διάβρωση και να εξασφαλιστεί το πλάτος της ακτής. Συνήθως κατασκευάζονται από

- φυσικούς ογκόλιθους και λίθους,
- τεχνητούς ογκόλιθους από σκυρόδεμα και φυσικούς λίθους
- συνδυασμό των παραπάνω

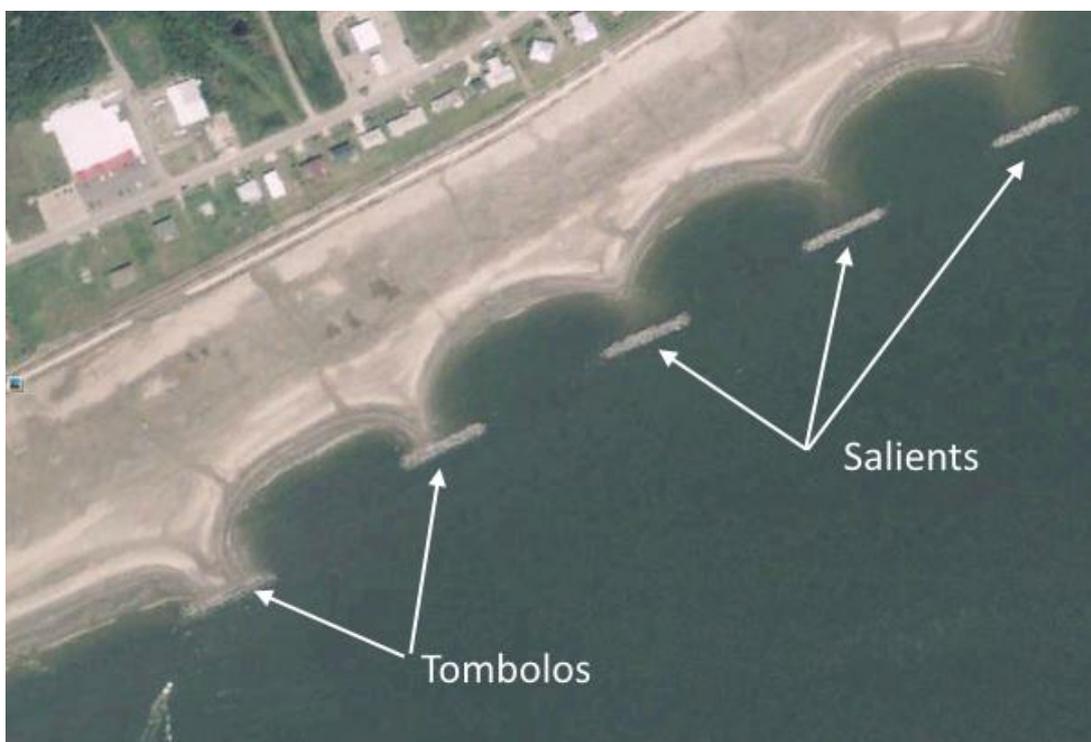
Η δράση των κυματισμών μειώνεται μέσω συνδυασμού των φαινομένων της θραύσης τους στο πρηνές του έργου, της ανάκλασης και της διάχυσης της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, όταν ένας κυματισμός προσπίπτει στο προσήνεμο μέτωπο ενός κυματοθραύστη, ένα μέρος της ενέργειας του κύματος ανακλάται δημιουργώντας ένα επιστρέφον κύμα στα ανοιχτά. Επίσης, ποσοστά ενέργειας θα καταστραφούν σε συγκρούσεις μεταξύ των μορίων, καθώς ακολουθούν διαφορετικές τροχιές γύρω από τα υλικά κατασκευής του κυματοθραύστη και στη συνέχεια συναντιούνται, και σε τριβές

μορίων πάνω στην επιφάνεια του πρηνούς του κυματοθραύστη. Ένα άλλο μέρος της ενέργειας αποθηκεύεται στη μάζα του νερού που μπαίνει μέσα στα κενά του σώματος του κυματοθραύστη και διαβιβάζεται στην υπήνεμη πλευρά. Τέλος, το υπόλοιπο ποσοστό θα αποθηκευτεί στη μάζα του κύματος που θα υπερπηδήσει τον κυματοθραύστη.

Όλη η διαδικασία που περιεγράφηκε παραπάνω έχει σαν αποτέλεσμα στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη να δημιουργείται ηπιότερο κυματικό κλίμα, που, με τη σειρά του, μειώνει την ικανότητα κίνησης του ιζήματος πίσω από τον κυματοθραύστη. Προφανώς, η μετάδοση της κυματικής ενέργειας, η μεταφορά μάζας νερού και η μείωση της στερεομεταφοράς συνδέονται με μεγέθη όπως το ύψος στέψης του κυματοθραύστη, το πλάτος του, το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού, τον τύπο κατασκευής του έργου, την κλίση του πρηνούς του μετώπου και το υλικό κατασκευής των διαφόρων στρώσεων.

Στην περίπτωση αποσπασμένων κυματοθραυστών που κατασκευάζονται για την προστασία της ακτής από τη διάβρωση, στη σκιά του έργου παρουσιάζεται συσσώρευση ιζήματος καθώς μειώνεται η ταχύτητα ροής και καθιζάνει το υλικό, λόγω της ηπιότερης κυματικής δράσης που προκαλεί ο κυματοθραύστης. Έτσι, παρουσιάζονται εν γένει δύο τυπικοί σχηματισμοί ιζήματος:

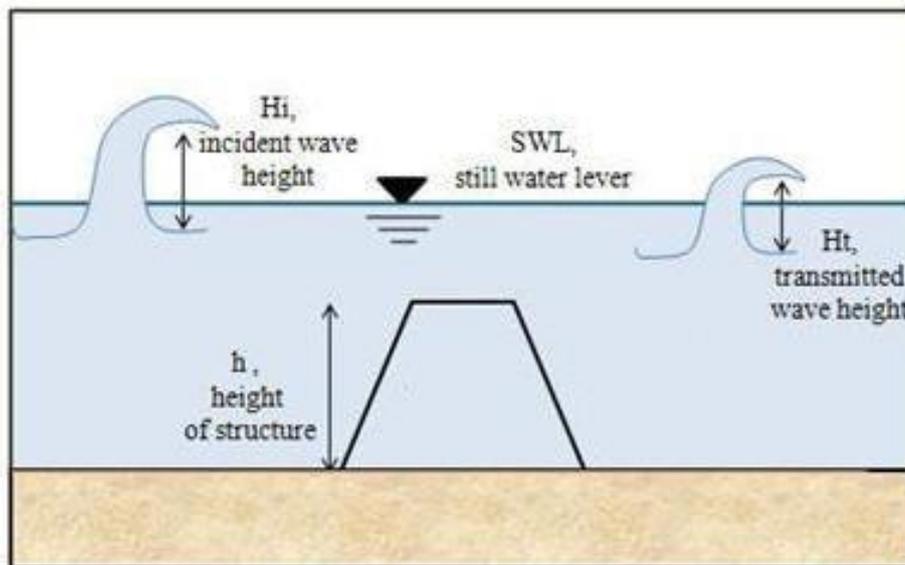
- Salient, όπου σχηματίζονται προεξοχές κωνοειδούς μορφής στη σκιά των έργων στην ακτή
- Tombolo, όπου το συσσωρευμένο ίζημα δημιουργεί ένα τμήμα ξηράς αμμώδους σύστασης στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, η οποία τον συνδέει ουσιαστικά με την ακτή και διακόπτει τη ροή νερού πίσω από το έργο



**Εικόνα 2.2:** Σχηματισμοί salient και tombolo (Miller et al., 2016)

### 2.5.2 Ύφαλοι κυματοθραύστες

Τα έργα βυθισμένης στέψης, όπως οι ύφαλοι κυματοθραύστες και οι τεχνητοί αναβαθμοί είναι αρκετά εφαρμόσιμα ως μέτρα παράκτιας προστασίας (χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή και σε συνδυασμό με τεχνητή αναπλήρωση ακτής) για παράκτιες περιοχές με χρήσεις κατοικίας και αναψυχής εξαιτίας της μειωμένης περιβαλλοντικής και οπτικής όχλησης (Ahmadian., 2016). Ο σκοπός τους είναι η μείωση του υδροδυναμικού φορτίου σε ένα επιθυμητό επίπεδο, ώστε να διατηρείται το ισοζύγιο φερτών της ακτογραμμής. Για να επιτευχθεί ο στόχος αυτός, οι ύφαλοι κυματοθραύστες σχεδιάζονται ώστε να επιτρέπουν μετάδοση συγκεκριμένου ποσού κυματικής ενέργειας. Για τους έξαλλους αυτό επιτυγχάνεται με την υπερπήδηση πάνω από την κατασκευή και με μερική μετάδοση μέσω των πόρων της κατασκευής. Αντίστοιχα για τους ύφαλους πραγματοποιείται με τη θραύση κυματισμών και την καταστροφή ενός μέρους της ενέργειας λόγω της ρήξης της στέψης. Οι ύφαλοι κυματοθραύστες χρησιμοποιούνται με μεγαλύτερη επιτυχία σε περιοχές όπου η διακύμανση της παλίρροιας είναι μικρή.



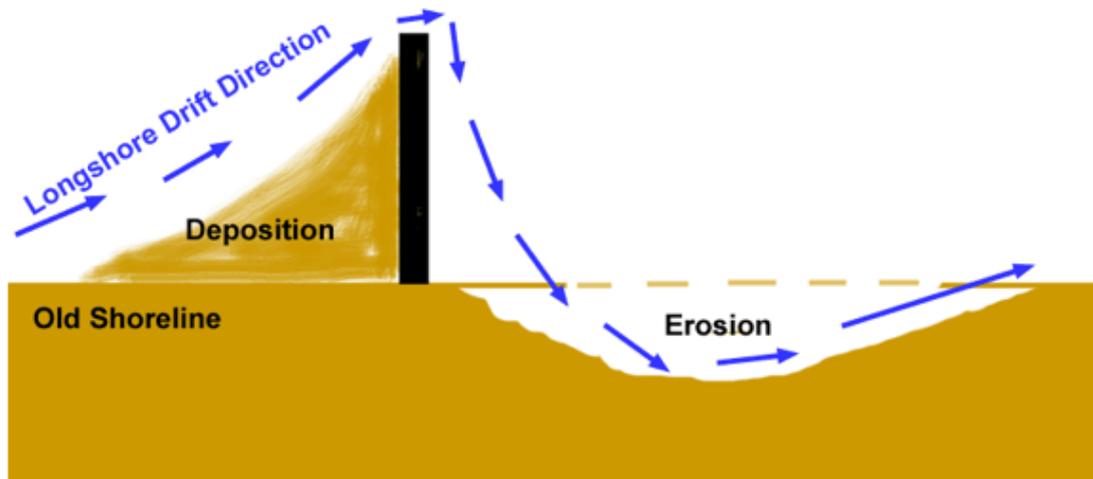
Εικόνα 2.3: Ύφαλος κυματοθραύστης (Arnouil, 2008)

### 2.5.3 Πρόβολοι

Οι βραχίονες ή πρόβολοι είναι γραμμικές κατασκευές κάθετες στην ακτή. Συνήθως κατασκευάζονται πολλοί μαζί διαδοχικά κατά μήκος της ακτογραμμής, και σκοπό έχουν τη συγκράτηση του ιζήματος και την ενίσχυση των αμμωδών ακτών. Το μήκος των προβόλων μπορεί να εκτείνεται σε όλο το πλάτος της ζώνης θραύσης των κυματισμών προκαλώντας μερική ή ολική διακοπή της παράκτιας στερεομεταφοράς. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών προβόλων πρέπει να είναι το πολύ τριπλάσια του μήκους τους και η στέψη τους βρίσκεται στο 0,5- 1 μέτρο πάνω από τη στάθμη της θάλασσας (Κουτίτας, 1998). Κατασκευάζεται κάθετα στην ακτή ή με μικρή κλίση προς τα κατάντη.

Η κατασκευή των προβόλων και η αλληλεπίδραση τους με το παράκτιο ρεύμα δημιουργεί αρκετά συχνά προβλήματα σε παρακείμενες περιοχές. Ενώ το ιζήμα παγιδεύεται και

αποτίθεται στη μία πλευρά του προβόλου, από την άλλη του πλευρά λαμβάνει χώρα διάβρωση. Ως εκ τούτου μια σειρά από βραχίονες μπορούν να προστατεύσουν από την διάβρωση την άμεση περιοχή στην οποία κατασκευάζονται με τη δημιουργία ενός αιγιαλού μεγαλύτερου πλάτους, προκαλεί όμως διάβρωση της παρακείμενης ακτογραμμής.



**Εικόνα 2.4:** Η λειτουργία ενός προβόλου (<http://oceanica.cofc.edu>)

#### 2.5.4 Θωράκιση μετώπου ακτής

Τα έργα θωράκισης της ακτής είναι έργα που κατασκευάζονται στο μέτωπο της ακτής, σε επαφή με αυτή και σκοπός τους είναι η προστασία της ακτογραμμής έναντι διαβρώσεως. Τις περισσότερες φορές κατασκευάζονται με επένδυση της προσβαλλόμενης ακτής με ογκόλιθους, πλάκες, ή στοιχεία ειδικής μορφής. Η επένδυση ανθίσταται στη θαλάσσια δράση κυρίως με το ίδιο βάρος των στοιχείων θωρακίσεως, σε συνδυασμό βέβαια με την πλοκή μεταξύ τους. Ένα στοιχείο που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής στο σχεδιασμό είναι πως η θωράκιση του μετώπου είναι ευαίσθητη σε υποσκαφή στον πόδα του έργου και σε διάβρωση στα αμέσως κατάντη, προβλήματα τα οποία οφείλονται στη μεγάλη διαβρωτική ικανότητα στα σημεία αυτά.

Η θωράκιση του μετώπου μίας ακτής γίνεται με:

- έργα με κλίση (επένδυση με ογκόλιθους που ευνοούν τη θραύση),
- έργα με κατακόρυφο μέτωπο (επένδυση με πλάκες),
- ειδικούς τύπους θωρακίσεως.

### 3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

#### 3.1 Αριθμητική Προσομοίωση με το Πρόγραμμα MIKE 21 DHI

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MIKE 21/3 Coupled Model FM με το οποίο προσομοιώθηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή το κυματικό και υδροδυναμικό πεδίο καθώς και η παράκτια στερεομεταφορά, που αναπτύσσεται στην περιοχή της Αυλίδας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν το μοντέλο Spectral Waves Module για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών στην περιοχή μελέτης, το υδροδυναμικό μοντέλο Hydrodynamic Module για τον υπολογισμό του κυματογενούς ρεύματος καθώς και το μοντέλο στερεομεταφοράς Sand Transport Module για την εκτίμηση του φορτίου στερεομεταφοράς και της διάβρωσης του πυθμένα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα με την κατάληξη FM (flexible mesh) επιτρέπει την εισαγωγή της βαθυμετρίας σε τριγωνικό κάναβο Flexible Mesh. Η προσομοίωση των κυματικών και υδροδυναμικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε για τις αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου ισοδύναμου κυματικού κλίματος που αναπτύσσονται στο Κεφάλαιο 5.

##### 3.1.1 Πρόγραμμα MIKE 21 SW (Spectral Waves)

#### Γενικά στοιχεία του μοντέλου

Το MIKE 21 SW είναι ένα τρίτης γενιάς φασματικό μοντέλο κυμάτων και ανέμων, το οποίο προσομοιώνει την ανάπτυξη, την απόσβεση και τον μετασχηματισμό των ανεμογενών κυμάτων και των Swell στη ζώνη των βαθέν νερών και τις παράκτιες περιοχές. Το μοντέλο περιλαμβάνει δυο διαφορετικά είδη σύνθεσης:

- Πλήρως φασματική ανάπτυξη
- Κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων

Η πλήρως φασματική ανάπτυξη βασίζεται στην εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης όπως περιγράφεται από τον Komen (1994). Η κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων βασίζεται στην παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης. Η παραμετροποίηση αυτή πραγματοποιείται στον χώρο των συχνοτήτων εισάγοντας τη μηδενική και την αρχική στιγμή του φάσματος της κυματικής ενέργειας σαν εξαρτημένη μεταβλητή.

Τα φαινόμενα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του MIKE 21 SW είναι:

- Η ανάπτυξη των κυματισμών από τη δράση των ανέμων
- Η μη γραμμική αλληλεπίδραση των κυμάτων
- Η διασπορά λόγω της θραύσης στην ανοιχτή θάλασσα
- Η διασπορά λόγω της τριβής στον πυθμένα
- Η διασπορά λόγω της θραύσης των κυματισμών
- Η διάθλαση και ρήχωση
- Η αλληλεπίδραση κύματος και ρεύματος
- Η επίδραση του χρονικά μεταβαλλόμενου βάθους του νερού
- Η επίδραση του πάγου στη περιοχή των κυμάτων

Το MIKE 21 SW χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κυματικού κλίματος στη περιοχή των βαθέων υδάτων και στις παράκτιες περιοχές σε hindcast και forecast προσομοιώσεις. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως στον σχεδιασμό έργων ανοικτής θαλάσσης καθώς και παράκτιων και λιμενικών έργων όπου η ακριβής εκτίμηση των κυματικών φορτίων αποτελεί υψίστης σημασίας για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό αυτών των κατασκευών. Επιπλέον τα αποτελέσματα του χρησιμοποιούνται από άλλα μοντέλα του MIKE 21 για τον υπολογισμό της παράκτιας στερεομεταφοράς, η οποία καθορίζεται κυρίως από τις κυματικές συνθήκες και τα κυματογενή ρεύματα.

Τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν από το μοντέλο είναι ολοκληρωμένες κυματικές παράμετροι, όπως το σημαντικό ύψος κύματος ( $H_{m0}$ ), η περίοδος αιχμής ( $T_p$ ), η μέση περίοδος ( $T_{01}$ ), η μέγιστη και μέση κατεύθυνση των κυματισμών ( $\vartheta_p$  και  $\vartheta_m$  αντίστοιχα), η κατευθυντική τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ) καθώς επίσης και οι τάσεις ακτινοβολίας ( $S_{xx}$ ,  $S_{xy}$ ,  $S_{yy}$ ) οι οποίες συμβάλλουν στη δημιουργία των κυματογενών ρευμάτων.

### Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

Στο μοντέλο MIKE 21 SW, τα ανεμογενή κύματα αναπαρίστανται από τη φασματική πυκνότητα της κυματικής δράσης  $N(\sigma, \vartheta)$ . Ως ανεξάρτητες παράμετροι έχουν επιλεγθεί η σχετική γωνιακή συχνότητα ( $\sigma = 2\pi f$ ) και η διεύθυνση του προσπίπτοντος κυματισμού  $\vartheta$ . Η σχέση μεταξύ της σχετικής γωνιακής συχνότητας και της απόλυτης γωνιακής συχνότητας  $\omega$  δίνεται από τη γραμμική σχέση διασποράς:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \bar{k} \cdot \bar{U} \quad (3.1)$$

Όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $d$  το βάθος του νερού,  $\bar{U}$  το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος και  $\bar{k}$  το διάνυσμα του κύματος με μέτρο  $k$  και διεύθυνση  $\vartheta$ . Η πυκνότητα δράσης  $N(\sigma, \vartheta)$  σχετίζεται με την πυκνότητα της ενέργειας  $E(\sigma, \vartheta)$  μέσω της σχέσης:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (3.2)$$

#### ➤ Πλήρως Φασματική ανάπτυξη

Η εξίσωση που διέπει το MIKE 21 SW είναι η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης σε καρτεσιανές ή σφαιρικές συντεταγμένες. Στις οριζόντιες καρτεσιανές συντεταγμένες, η εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης είναι η εξής:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (3.3)$$

όπου  $N = (\bar{x}, \sigma, \theta, t)$  είναι η πυκνότητα δράσης,  $t$  ο χρόνος,  $\bar{x} = (x, y)$  είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες,  $\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  είναι η ταχύτητα διάδοσης ομάδας κυμάτων σε τεσσάρων διαστάσεων χώρο,  $S$  η πηγή για την εξίσωση ισορροπίας της κυματικής ενέργειας,  $\nabla$  ο τεσσάρων διαστάσεων διαφορικός τελεστής στο χώρο  $\bar{x}$ ,  $\sigma$ ,  $\vartheta$ . Οι συνιστώσες των ταχυτήτων διάδοσης δίνονται από τις γραμμικές κινηματικές σχέσεις:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\bar{x}}{dt} = \bar{c}_g + \bar{U} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} + \bar{U} \quad (3.4\alpha)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla_{\bar{x}} d \right] - c_g \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial s} \quad (3.4\beta)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial\sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \bar{k} \cdot \frac{\partial \bar{U}}{\partial m} \right] \quad (3.4\gamma)$$

όπου  $s$  είναι η χωρική συντεταγμένη της διεύθυνσης  $\theta$  του κυματισμού,  $m$  είναι η συντεταγμένη κάθετη στο  $s$ ,  $\nabla_{\bar{x}}$  είναι ο δισδιάστατος διαφορικός τελεστής στο χώρο  $\bar{x}$ .

#### ➤ Εξίσωση πηγής

Ο όρος της πηγής στο β' μέλος της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης δίνεται από τη σχέση:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (3.5)$$

όπου το  $S_{in}$  αναπαριστά της στιγμιαία μετάδοση της ενέργειας του ανέμου για τη γένεση των κυμάτων,  $S_{nl}$  η μεταφορά ενέργειας λόγω της μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των κυμάτων,  $S_{ds}$  η διασπορά της κυματικής ενέργειας λόγω της θραύσης της κορυφής των κυμάτων στα βαθιά,  $S_{bot}$  η διασπορά λόγω της τριβής στο πυθμένα και  $S_{surf}$  η διασπορά της κυματικής ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών.

#### ➤ Κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων

Η παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης οδηγεί στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{\partial(m_0)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_0)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_0)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_0)}{\partial \theta} = T_0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial(m_1)}{\partial t} + \frac{\partial(c_x m_1)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y m_1)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\theta m_1)}{\partial \theta} = T_1 \quad (3.7)$$

Όπου  $m_0(x,y,\theta)$  και  $m_1(x,y,\theta)$  είναι η μηδενική και η αρχική στιγμή του φάσματος δράσης  $N(x,y,\sigma,\theta)$ ,  $T_0(x,y,\theta)$  και  $T_1(x,y,\theta)$  είναι οι συναρτήσεις πηγής στο φάσμα δράσης. Τα στιγμιότυπα  $m_n(x,y,\theta)$  ορίζονται με τη σχέση:

$$m_n(x,y,\theta) = \int_0^\infty \omega^n N(x,y,\omega,\theta) d\omega \quad (3.8)$$

Οι συναρτήσεις πηγής  $T_0$  και  $T_1$  λαμβάνουν υπόψιν την επίδραση της δημιουργίας των τοπικών ανέμων (για την λειτουργία stationary=στάσιμων κυμάτων) και της διασποράς της ενέργειας λόγω της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης των κυματισμών. Επιπρόσθετα περιλαμβάνεται το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των κυμάτων-ρευμάτων. Οι συναρτήσεις πηγής για την τοπική δημιουργία ανέμων προέρχονται από την εμπειρικές σχέσεις εξέλιξης Johnson (1998).

#### **Βασικές παράμετροι εισόδου**

Για την καλύτερη δυνατή προσομοίωση και την ορθότητα των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες είναι απαραίτητο να δοθεί ιδιαίτερη σημασία στις εξής παραμέτρους του προγράμματος που αποτελούν και τα βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής ομάδες:

- Πεδίο Μελέτης και χρονικές παράμετροι

- Κάναβος περιοχής μελέτης
- Τύπος συντεταγμένων (καρτεσιανές ή σφαιρικές)
- Χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα
- Εξισώσεις, διακριτοποίηση και μέθοδος επίλυσης
- Μέθοδος σύνθεσης
- Συχνότητα και κατευθυντική διακριτοποίηση
- Αριθμός ομάδων χρονικών βημάτων
- Κινητήριες Παράμετροι
- Δεδομένα στάθμης θαλάσσιας επιφάνειας
- Δεδομένα ρευμάτων
- Δεδομένα ανέμων
- Δεδομένα κάλυψης πάγου
- Παράμετροι Συναρτήσεων Πηγής
- Μη γραμμική μετάδοση ενέργειας
- Θραύση κυματισμών (ρηχά νερά)
- Τριβή πυθμένα
- Αρχικές συνθήκες
- Οριακές συνθήκες
- Κλειστά όρια
- Ανοιχτά όρια (περιγραφή συνθηκών και δεδομένα κυματικών χαρακτηριστικών στο ανοιχτό όριο)

## **Εφαρμογή Μοντέλου**

Η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται σε τρία βήματα.

### 1. Τομέας μελέτης (Domain)

Στο πρώτο βήμα εισάγεται η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης σε αρχείο mesh με γεωαναφορά το οποίο κατασκευάστηκε μέσω του εργαλείου MIKE Zero Mesh Generator. Στο αρχείο αυτό αναπαρίσταται η βαθυμετρία σε τριγωνικό κάναβο με μεγαλύτερη πύκνωση κοντά στην ακτογραμμή καθώς επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, στο στάδιο αυτό μπορούν να οριστούν κάποια στοιχεία του mesh όπως ο επανυπολογισμός των στοιχείων και των κόμβων του κανάβου, η αλλαγή σημείου γεωαναφοράς και το ελάχιστο βάθος στο οποίο περιορίζεται ο κάναβός μας. Στην προσομοίωση μας λήφθηκε υπόψιν ο επανυπολογισμός και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του προγράμματος για τα υπόλοιπα καθώς εισήχθησαν τα απαραίτητα στοιχεία για την περιοχή μελέτης κατά την δημιουργία του mesh.

### 2. Χρόνος (Time)

Το δεύτερο βήμα αφορά τον χρόνο προσομοίωσης στον οποίο εισάγεται ο αριθμός των χρονικών βημάτων των αντιπροσωπευτικών κυματισμών του ισοδύναμου κυματικού κλίματος, το βήμα τους και την έναρξη τους. Στο σημείο αυτό αναφέρεται και το τέλος της όπου μπορεί κανείς να ελέγξει την ορθότητα των δεδομένων που έχουν χρησιμοποιηθεί.

### 3. Ενότητα φασματικού κύματος (Spectral wave module)

Το τρίτο βήμα αποτελείται από 16 ενότητες όπου εισάγονται οι βασικές παράμετροι, καθώς και η μέθοδος ανάλυσης της προσομοίωσης που επεξηγήθηκαν προηγουμένως

Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ο τύπος της κατευθυντικής ανάλυσης μεμονωμένων παραμέτρων και επειδή το κυματικό κλίμα θεωρήθηκε ως αλληλουχία κυματικών γεγονότων επιλέχθηκε ο τύπος των σχεδόν στατικών κυματισμών (quasi-stationary formulation). Για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα εισήχθει ο αριθμός των διαφορετικών γωνιών πρόσπτωσης των κυματισμών. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έγινε με την επιλογή low order, fast algorithm όπου ελέγξαμε τον αριθμό των επαναλήψεων και του συντελεστή relaxation factor σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια του οδηγού του μοντέλου.

Αναφορικά με τις ενότητες για τη στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας και των ρευμάτων δόθηκε η εντολή να ληφθούν από το υδροδυναμικό μοντέλο ενώ για τους ανέμους εισήχθη η επαλληλία των ανεμολογικών χαρακτηριστικών που προσομοιάζουν τα ετήσια χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Για την κάλυψη πάγου δεν προστέθηκαν αρχεία. Σε ό,τι αφορά τις κατασκευές στη περιοχή μελέτης προστέθηκαν κάθε φορά τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε λύσεις που προτάθηκε. Για τις ενότητες της περίθλασης, της μετάδοσης της ενέργειας, της θραύσης των κυματισμών, της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης της κορυφής των κυμάτων στα βαθιά χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος.

Καθοριστικό σημείο στη προσομοίωση αποτελεί ο ορισμός των αρχικών και οριακών συνθηκών της προσομοίωσης καθώς και των αποτελεσμάτων που επιθυμούμε ως δεδομένα εξόδου. Ως αποτελέσματα επιλέχθηκαν το σημαντικό ύψος κύματος ( $H_{m0}$ ), το μέγιστο ύψος κύματος  $H_{max}$ , η περίοδος αιχμής  $T_p$ , η μέση διεύθυνση των κυματισμών  $\theta_m$  και οι τάσεις ακτινοβολίας  $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ,  $S_{xy}$ .

#### *3.1.2 Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Hydrodynamic Module*

##### **Γενικά στοιχεία του μοντέλου**

Το MIKE 21 Flow Model FM είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υπολογισμού δισδιάστατων ροών με ελεύθερη επιφάνεια το οποίο βασίζεται στο χωρικό πλέγμα Flexible Mesh. Το μοντέλο βρίσκει εφαρμογή στην προσομοίωση υδραυλικών και περιβαλλοντικών φαινομένων, σε λίμνες, εκβολές ποταμών, παράκτιες περιοχές και στην ανοιχτή θάλασσα. Η δυνατότητα που δίνει στο χρήστη για την επιλογή αυτού του είδους τριγωνικού κανάβου καλύπτει την αυξημένη ζήτηση για ρεαλιστικές απεικονίσεις της περιοχής μελέτης και για προσομοίωση αλληλένδετων διαδικασιών.

Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) αποτελεί τη βάση του μοντέλου MIKE 21 Flow Model FM καθώς προσομοιώνει τη μεταβολή της στάθμης του νερού και τη ροή, παράγοντας στοιχεία που αποτελούν δεδομένα για άλλα αυτόνομα μοντέλα. Μεταξύ άλλων, μπορεί να εφαρμοσθεί για τον υπολογισμό των ανεμογενών και κυματογενών ρευμάτων σε μια

παράκτια περιοχή, των κυματικών καταιγίδων και τη μοντελοποίηση των παλιρροιών.

Στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη:

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

Τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν από το μοντέλο Flow Model FM Hydrodynamic module για κάθε στοιχείο του Mesh και για κάθε χρονικό βήμα είναι το βάθος νερού, η στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας, οι πυκνότητες ροής κατά χ και γ (P flux και Q flux αντίστοιχα) καθώς και οι ταχύτητες κατά χ και γ (U και V αντίστοιχα).

### Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

Το MIKE 21 Flow Model FM βασίζεται στην αριθμητική λύση της δισδιάστατης/τριδιάστατης κατά Reynolds ολοκληρωμένης εξίσωσης Navier-Stokes ασυμπίεστης ροής που υπακούουν στις παραδοχές του Boussinesq και της υδροστατικής πίεσης. Συνεπώς, το μοντέλο αποτελείται από εξισώσεις συνέχειας, ορμής, θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας και προσεγγίζεται από μοντέλα τύρβης (τάσεις ακτινοβολίας) που επιλύουν το “κλείσιμο” της εξίσωσης Navier Stokes (turbulent closure scheme). Η πυκνότητα δεν εξαρτάται από την πίεση, αλλά μόνο από την θερμοκρασία και την αλατότητα. Η εξίσωση συνέχειας περιγράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S \quad (3.9)$$

και οι δυο οριζόντιες εξισώσεις ορμής κατά χ και γ αντίστοιχα.

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_\alpha}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left( \nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S \quad (3.11)$$

όπου

t: ο χρόνος (σε s)

x, y, z: οι καρτεσιανές συντεταγμένες

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

d: το χρονικά μεταβαλλόμενο βάθος του νερού (σε m)

h: (=  $\eta+d$ ) το συνολικό βάθος νερού (σε m)

u, v, w: οι συνιστώσες της ταχύτητας κατά x, y, z

f: (=  $2\Omega\sin\varphi$ ) η παράμετρος Coriolis

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

$\rho_w$ : η πυκνότητα του νερού (σε  $kg/m^3$ )

$S_{xx}, S_{xy}, S_{yx}, S_{yy}$ : οι συνιστώσες του τανυστή των τάσεων ακτινοβολίας

$v_t$ : κινηματικό ιξώδες ( $m^2/s$ )

$p_a$ : η ατμοσφαιρική πίεση (σε  $kg/m/s^2$ )

$\rho_o$ : η πυκνότητα του νερού

S: το μέγεθος φόρτισης λόγω των σημειακών πηγών

$u_s, v_s$ : η ταχύτητα με την οποία το νερό εκχέεται στο περιβάλλον νερό

Οι όροι των οριζόντιων τάσεων περιγράφονται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$F_u = \frac{\partial}{\partial x} \left( 2A \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \quad (3.12)$$

$$F_v = \frac{\partial}{\partial x} \left( A \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2A \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.13)$$

όπου A είναι η οριζόντια τυρβώδης συνεκτικότητα.

Οι συνθήκες για την ελεύθερη επιφάνεια και τον πυθμένα για τις u, v, w είναι

➤ Στο  $z=\eta$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy}) \quad (3.14)$$

➤ Στο  $z=-d$

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_o v_t} (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (3.15)$$

όπου ( $\tau_{sx}, \tau_{sy}$ ) και ( $\tau_{bx}, \tau_{by}$ ) είναι οι συνιστώσες κατά x και y των τάσεων του ανέμου στην ελεύθερη επιφάνεια και των τάσεων στον πυθμένα αντίστοιχα.

Στο υδροδυναμικό μοντέλο οι υπολογισμοί για την μεταφορά της θερμότητας  $T$  και της αλατότητας  $s$  ακολουθούν την γενική εξίσωση μεταφοράς και διάχυσης που περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S \quad (3.17)$$

όπου

$D_v$ : ο συντελεστής κάθετης τυρβώδους διάχυσης

$\hat{H}$ : όρος πηγής λόγω μετάδοσης θερμότητας στην ατμόσφαιρα

$T_s$  και  $s_s$ : η θερμοκρασία και η αλατότητα της πηγής

Ο όρος  $F$  αναφέρεται στην οριζόντια διάχυση και ορίζεται από τη σχέση:

$$(F_T, F_s) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s) \quad (3.18)$$

όπου  $D_h$  είναι ο συντελεστής οριζόντιας διάχυσης.

### Βασικές παράμετροι εισόδου

Για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών και για την ορθότητα των αποτελεσμάτων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις παραμέτρους του προγράμματος που αποτελούν και τα βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής ομάδες:

- Πεδίο μελέτης και χρονικές παράμετροι
  - Υπολογιστικό πλέγμα και βαθυμετρία
  - Διάρκεια προσομοίωσης και χρονικό βήμα
- Συντελεστές βαθμονόμησης
  - Αντίσταση πυθμένα
  - Συντελεστής διασποράς ορμής
  - Συντελεστής τριβής ανέμου
- Αρχικές Συνθήκες
  - Επίπεδο θαλάσσιας στάθμης
  - Συνιστώσες ταχύτητας
- Οριακές Συνθήκες
  - Κλειστές/Ανοιχτές
  - Στάθμη ύδατος
- Άλλες κινητήριες δυνάμεις
  - Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου
  - Παλίρροια
  - Πηγές
  - Τάσεις ακτινοβολίας κυμάτων

## **Εφαρμογή Μοντέλου**

Η εισαγωγή των παραμέτρων που απαιτούνται για την προσομοίωση στο μοντέλο γίνεται σε τέσσερα βασικά βήματα.

### **1. Πεδίο Μελέτης (Domain)**

Στο πρώτο βήμα εισάγεται η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής που εξετάζεται, εμφανίζονται τα δεδομένα για τον τριγωνικό κানাβο που χρησιμοποιήσαμε, η προβολή των σημείων στο χάρτη, και επιλέγεται η αναδιάταξη των κόμβων και των στοιχείων του κανάβου το οποίο χρησιμοποιήσαμε καθώς αυξάνει την ταχύτητα των υπολογισμών.

### **2. Χρόνος (Time)**

Το δεύτερο βήμα αφορά τον χρόνο προσομοίωσης στον οποίο εισάγεται ο αριθμός των χρονικών βημάτων για την προσομοίωση των υδροδυναμικών συνθηκών, το βήμα ως μέγεθος σε δευτερόλεπτα και η έναρξη της προσομοίωσης. Στο σημείο αυτό αναφέρεται και το τέλος της προσομοίωσης όπου ο χρήστης μπορεί να ελέγξει την ορθότητα των δεδομένων που έχουν χρησιμοποιηθεί. Για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα επιλέγεται η εξαγωγή των αποτελεσμάτων ανά μια ώρα.

### **3. Επιλογή Μοντέλου (Module Selection)**

Στόχος τη παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκτίμηση των υδροδυναμικών συνθηκών για την περιοχή μελέτης.

### **4. Υδροδυναμικό μοντέλο**

Το τρίτο βήμα αποτελείται από 20 υποενότητες όπου εισάγονται οι βασικές παράμετροι:

Στη πρώτη υποενότητα που αναφέρεται στη μέθοδο επίλυσης επιλέγουμε low order ως προς τον χρόνο και το χώρο. Η ολοκλήρωση του χρόνου για τις εξισώσεις στα ρηχά νερά επιτυγχάνεται μέσω ενός ρητού συστήματος. Ωστόσο λόγω των περιορισμών σταθερότητας ο αδιάστατος παράγοντας CFL πρέπει να είναι κάτω από 1. Ο αριθμός Courant-Friedrich-Levy (CFL) για τις εξισώσεις στα ρηχά νερά με καρτεσιανές συντεταγμένες ορίζεται ως:

$$CFL_{HD} = (\sqrt{gh} + |u|) \frac{\Delta t}{\Delta x} + (\sqrt{gh} + |v|) \frac{\Delta t}{\Delta y} \quad (3.19)$$

Όπου το  $h$  είναι το συνολικό βάθος νερού,  $u$  και  $v$  οι συνιστώσες ταχύτητας κατά  $x$  και  $y$ ,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\Delta x$  και  $\Delta y$  είναι ένα χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας κατά  $x$  και  $y$  αντίστοιχα για ένα στοιχείο και  $\Delta t$  το χρονικό βήμα. Το χαρακτηριστικό μήκος κλίμακας υπολογίζεται από τη μικρότερη αιχμή κλίμακας για κάθε στοιχείο και από το βάθος νερού ενώ οι συνιστώσες ταχύτητες εκτιμώνται στο κέντρο του στοιχείου.

Στη παρούσα προσομοίωση δε λήφθηκαν υπόψη τα στοιχεία από τις υποενότητες για το βάθος, την επίδραση του ανέμου, την παγοκάλυψη, τις κατακρημνίσεις-εξάτμιση, τις πηγές, τις κατασκευές και το διαχωρισμό μεταξύ βασικών στοιχείων ροής και πρόσθετων. Βασικός λόγος για τον οποίο δεν χρησιμοποιήθηκαν αυτά τα στοιχεία είναι ότι για τη πλειονότητα αυτών δεν υπάρχουν δεδομένα, τα οποία ωστόσο δεν αποτελούν καθοριστικοί παράγοντες για τη προσομοίωση. Επιπρόσθετα κάποια από αυτά όπως π.χ. οι κατασκευές και η παγοκάλυψη δεν υφίστανται στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Στην υποενότητα που λαμβάνει υπόψιν την παλίρροια έχει εισαχθεί αρχείο με ωριαίες καταγραφές στοιχείων ανύψωσης και καταβύθισης της ελεύθερης επιφάνειας. Για την βαρύτητα στην επόμενη υποενότητα θεωρήσαμε βαροτροπικές συνθήκες. Στην συνέχεια για την τυρβώδη συνεκτικότητα ορίσαμε τη μέθοδο Smagorinsky με τις σταθερές τιμές που έχει ως δεδομένες το πρόγραμμα. Στην υποενότητα για την αντίσταση του πυθμένα θεωρήσαμε ως τύπο περιγραφής το συντελεστή Manning διατηρώντας σταθερή τη τιμή του ( $M=32 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ ). Ενώ δεν έχει ληφθεί υπόψη η δύναμη Coriolis.

Στην υποενότητα αναφορικά με την ακτινοβολία των κυματισμών εισάγεται το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας που υπολογίστηκαν μέσω του προηγούμενου μοντέλου Spectral Waves FM για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα. Στις αρχικές συνθήκες που βρίσκονται σε ακόλουθη υποενότητα επιλέγεται να είναι σταθερές με τα αρχικά δεδομένα περί ταχυτήτων να είναι μηδενικά και θαλάσσιας επιφάνειας στο 1 μέτρο. Τέλος στα στοιχεία αναφορικά με τα όρια της περιοχής μελέτης θεωρούνται συνθήκες Land (zero normal velocity) καθώς οι συνιστώσες ταχύτητας είναι μηδενικές.

Ως προς την υποενότητα των αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν τα δεδομένα εξόδου να καλύπτουν όλη την περιοχή μελέτης που είναι καλυμμένη με νερό, με το χρονικό βήμα που ορίστηκε στην ενότητα του χρόνου προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που επιθυμούνται να μελετηθούν για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας, οι συνιστώσες της ταχύτητας και η ροή κατά  $x$  και  $y$  αντίστοιχα και η ταχύτητα και η διεύθυνση του ρεύματος.

### 3.1.3 Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Sand Transport Module

#### Γενικά στοιχεία του μοντέλου

Το MIKE 21 FM Sand Transport Module (ST) είναι ένα αριθμητικό μοντέλο του λογισμικού MIKE 21 FM που υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων (άμμος) και των σχετικών αρχικών ρυθμών μεταβολής της στάθμης του πυθμένα σε περιπτώσεις αμιγούς ρεύματος ή σε συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος. Το MIKE 21 FM ST υπολογίζει τους ρυθμούς στερεομεταφοράς στο χωρικό πλέγμα flexible mesh, βασιζόμενα σε υδροδυναμικά δεδομένα τα οποία προκύπτουν από την προσομοίωση του μοντέλου MIKE 21 FM HD και σε συνδυασμό με τα στοιχεία που αφορούν το ίζημα της περιοχής μελέτης. Επιπλέον είναι εφικτό να συμπεριληφθεί η ανάδραση μεταξύ βαθυμετρίας και του ρυθμού μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα.

Το μοντέλο ST προσομοιώνει αρκετές διαφορετικές περιοχές εφαρμογής. Οι πιο συνηθισμένες είναι οι εξής:

- Διαχείριση παράκτιας ζώνης
- Βελτιστοποίηση διατάξεων λιμένα
- Έργα προστασίας της ακτογραμμής
- Ευστάθεια λόγω παλιρροιακών φαινομένων
- Απόθεση ιζήματος σε βυθοκορήσεις και εισόδους λιμένων

- Διάβρωση υποθαλάσσιων αγωγών
- Μορφολογία ποταμών

Τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο είδη, το ρυθμό στερεομεταφοράς και τις μορφολογικές εξελίξεις του πυθμένα. Συγκεκριμένα, τα βασικά στοιχεία που προκύπτουν για κάθε χρονικό βήμα σε κάθε στοιχείο του χωρικού πλέγματος flexible mesh είναι το φορτίο πυθμένα, το φορτίο του αιωρούμενου ιζήματος και το συνολικό κατά  $x$  και  $y$  καθώς και η συγκέντρωση του αιωρούμενου ιζήματος (SSC), ο ρυθμός μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, η αλλαγή της στάθμης του και η στιγμιαία στάθμη πυθμένα.

### Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

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

#### ➤ Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Hansen

Το μοντέλο των Engelund και Hansen (1967) είναι ένα μοντέλο που υπολογίζει το ολικό φορτίο στερεομεταφοράς και χρειάζεται πληροφορίες από το χρήστη για να διαχωρίσει το φορτίο στερεομεταφοράς σε πυθμένα και αιωρήσεως. Οι ρυθμοί στερεομεταφοράς προέρχονται από τις σχέσεις:

$$S_{bl} = k_b \cdot S_{tl} \quad (3.20)$$

$$S_{sl} = k_s \cdot S_{tl} \quad (3.21)$$

όπου το ολικό φορτίο στερεομεταφοράς προκύπτει από τη σχέση:

$$S_{tl} = 00.5 \frac{C^2}{g} \theta^{\frac{5}{2}} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (3.22)$$

Η συγκέντρωση ισορροπίας ορίζεται ως το φορτίο αιώρησης διαιρούμενο από τη ροή νερού και μετατρέπεται από ογκομετρική συγκέντρωση σε συγκέντρωση μάζας από τον τύπο:

$$c_e = \frac{S_{sl}}{v \cdot h} \cdot s \cdot 10^6 \quad (3.23)$$

#### ➤ Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Fredsøe

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

$$q_b = 5\rho(\sqrt{\theta'} - 0.07\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gD} \quad (3.24)$$

όπου  $\rho$  η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι σε κάποιο στρώμα να βρίσκονται σε κίνηση,  $\theta'$  η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα (παράμετρος Shields) σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) και  $\theta_c$  η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης. Η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού ( $\theta'$ ) και η πιθανότητα  $\rho$  δίνονται από τις

ακόλουθες σχέσεις:

$$\theta' = \frac{U_f'^2}{(s-1)gD} \quad (3.25)$$

$$p = \left[ 1 + \left( \frac{\pi\beta_f}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-0.25} \quad (3.26)$$

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

$$q_s = 11,6U_f'^2 c_b a \left[ I_1 \ln \left( \frac{30d}{k_N} \right) + I_2 \right] \quad (3.27)$$

όπου  $c_b$  η συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος,  $\alpha=2d$  το επίπεδο αναφοράς για το  $c_b$ ,  $I_1$  και  $I_2$  τα ολοκληρώματα του Einstein,  $d$  το βάθος του νερού και  $k_N=2,5D$  η ισοδύναμη τραχύτητα του Nikuradse. Τα ολοκληρώματα  $I_1$  και  $I_2$  αποτελούν μια συνάρτηση του αδιάστατου επιπέδου αναφοράς  $A=r/d$  και του αριθμού Rouse  $z^*=W_f/\kappa U_{f,wc}$ , με  $W_f$  να απεικονίζει την ταχύτητα καθίζησης του αιρούμενου ιζήματος,  $\kappa=0,4$  η σταθερά του Von Karman και  $U_{f,wc}$  η διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος και έχουν όρια το διάστημα  $(\alpha,d)$ , όπου το  $\gamma$  μετράται πάνω από το σταθερό επίπεδο του πυθμένα. Στο επίπεδο αναφοράς  $\alpha=2d$  η συγκέντρωση  $c_b$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$c_b = \frac{0,65}{(1+1/\lambda)^3} \quad (3.28)$$

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

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \pi p \beta_f / 6}{0,027 s \theta'}}, \text{ για } \theta' > \theta_c + \pi p \beta_f / 6 \quad (3.29)$$

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

#### ➤ Θεώρημα ολικού φορτίου μεταφοράς του Van-Rijn

Ο Van-Rijn (1984) πρότεινε μια νέα θεωρία για τον υπολογισμό του φορτίου πυθμένα και αιωρήσεως ξεχωριστά. Συγκεκριμένα, για το φορτίο πυθμένα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (3.30)$$

όπου  $T$  είναι η αδιάστατη παράμετρος του βαθμού στερεομεταφοράς που υπολογίζεται από τον τύπο

$$T = \left( \frac{u_{f'}}{u_{f,c}} \right)^2 - 1 \quad (3.31)$$

όπου το  $U_f'$  είναι η διατμητική ταχύτητα πυθμένα που σχετίζεται με την κοκκομετρία του υλικού του, και  $U_{f,c}$  είναι η κρίσιμη διατμητική ταχύτητα πυθμένα.

Επιπλέον ο όρος  $D^*$  στην εξίσωση του φορτίου πυθμένα του Van-Rijn ορίζεται ως:

$$D_* = d_{50} \left( \frac{(s-1)g}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3.32)$$

όπου  $\nu$  είναι η κινηματική συνεκτικότητα

Η στερεομεταφορά με αιώρηση πραγματοποιείται μόνο όταν πληρείται ένα από τα επόμενα κριτήρια:

$$u_f > \frac{4w_s}{D_*}, \quad \text{για } D_* < 10 \quad (3.33\alpha)$$

$$u_f > 0.4w_s, \quad \text{για } D_* > 10 \quad (3.34\beta)$$

Το επίπεδο αναφοράς στο οποίο πραγματοποιείται η συγκέντρωση ιζήματος στο πυθμένα ορίζεται από τη σχέση:

$$a = \max \left( \frac{0.01h}{2d_{50}} \right) \quad (3.35)$$

Η ογκομετρική συγκέντρωση πυθμένα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c_a = 0.015 \cdot \frac{d_{50} T^{1.5}}{a D_*^{0.3}} \quad (3.36)$$

Ένας διορθωτικός συντελεστής εφαρμόζεται στον υδροδυναμικό συντελεστή διάχυσης έτσι ώστε να τον μετατρέψει σε συντελεστή διάχυσης για το αιωρούμενο ίζημα:

$$\beta = 1 + 2 \left( \frac{w_s}{u_f} \right)^2 \quad (3.37)$$

Ο Van Rijn ορίζει επίσης έναν διορθωτικό παράγοντα για το προφίλ συγκέντρωσης του ιζήματος που ορίζεται από τη σχέση:

$$\varphi = \frac{5}{2} \left( \frac{w_s}{u_f} \right)^{0.8} \left( \frac{c_a}{c_o} \right)^{0.4} \quad (3.38)$$

Το  $c_o$  είναι η μέγιστη συγκέντρωση ιζήματος, η οποία είναι ίση με 0.65.

Εφαρμόζοντας τους διορθωτικούς συντελεστές που αναφέρθηκαν ανωτέρω, προκύπτει η παράμετρος  $Z$  για το εναιώρημα:

$$Z = \frac{w_s}{\beta \kappa u_f} + \varphi \quad (3.39)$$

Τελικώς το φορτίο αιωρούμενου ιζήματος που είναι εξαρτώμενο από το βάθος υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$S_{sl} = f \cdot c_a \cdot V \cdot h \quad (3.40)$$

όπου ο διορθωτικός συντελεστής για το αιωρούμενο ίζημα προκύπτει από τη σχέση:

$$f = \frac{\left(\frac{a}{h}\right)^Z - \left(\frac{a}{h}\right)^{1.2}}{\left(1 - \frac{a}{h}\right)^Z (1.2 - Z)} \quad (3.41)$$

➤ Θεωρία μεταφοράς φορτίου πυθμένα των Meyer-Peter & Müller

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

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \quad (3.42)$$

$$\Phi_b = \frac{q_b}{\sqrt{(s-1)gD^3}} \quad (3.43)$$

Πρέπει να αναλογισθεί κανείς ότι σε περιπτώσεις όπου το ίζημα είναι πολύ λεπτόκοκκο και/ή η ταχύτητα του ρεύματος μεγάλη, με τη φόρμουλα αυτή υπολογίζονται μικρότεροι ρυθμοί στερεομεταφοράς από τους πραγματικούς, καθώς λαμβάνεται υπόψιν μόνο η συνεισφορά του φορτίου πυθμένα.

Αναφορικά με τη στερεομεταφορά από συνδυασμένη δράση κυμάτων και ρευμάτων, αυτή υπολογίζεται ως το άθροισμα του φορτίου πυθμένα και του φορτίου αιωρήσεως. Στο μοντέλο STPQ3D χρησιμοποιείται το φορτίο πυθμένα των Engelund και Fredsøe, όπου υπολογίζεται από τη στιγμιαία παράμετρο του Shields. Στην περίπτωση που το φορτίο πυθμένα είναι χονδρόκοκκο με τη μορφή κροκάλων υφίσταται μόνο φορτίο πυθμένα και ο υπολογισμός του είναι διαφορετικός από αυτόν της άμμου.

Η κατακόρυφη μεταβολή της συγκέντρωσης του αιωρούμενου ιζήματος υπολογίζεται από την εξίσωση κατακόρυφης διάχυσης για αιωρούμενο ίζημα σύμφωνα με το Fredsøe et al (1985). Η στερεομεταφορά του αιωρούμενου ιζήματος είναι η απότοκος της στιγμιαίας ταχύτητας ροής και της στιγμιαίας συγκέντρωσης ιζήματος.

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (uc) dz dt \quad (3.44)$$

Η χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης διάχυσης για το αιωρούμενο ίζημα επαναλαμβάνεται έως ότου προκύψει μια περιοδική λύση.

Ως προς τη μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα, ο καθοριστικός παράγοντας είναι ο ρυθμός αλλαγής του  $\frac{\partial z}{\partial t}$  σε όλα τα στοιχεία του κανάβου. Αυτή η παράμετρος μπορεί να υπολογιστεί με πολλούς τρόπους, αλλά γενικώς όλες οι μέθοδοι βασίζονται στην εξίσωση Exner που αποτελεί την εξίσωση συνέχειας του ιζήματος και εκφράζεται με τον τύπο:

$$-(1 - n) \frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \quad (3.45)$$

όπου

n: το πορώδες του πυθμένα

z: η στάθμη του πυθμένα

t: ο χρόνος

$S_x$ : το φορτίο πυθμένα ή το ολικό φορτίο στερεομεταφοράς κατά τη διεύθυνση  $x$

$S_y$ : το φορτίο πυθμένα ή το ολικό φορτίο στερεομεταφοράς κατά τη διεύθυνση  $y$

$\Delta S$ : το φορτίο πηγής ιζήματος

Ο πυθμένας ανανεώνεται συνεχώς κατά την προσομοίωση της μορφολογικής εξέλιξης (στο βήμα προσομοίωσης του HD) βασιζόμενο στους εκτιμημένους ρυθμούς μεταβολής της στάθμης του πυθμένα. Οι νέες αυτές τιμές εκτιμώνται σε κάθε ντιστό χρονικό βήμα του HD, όπου  $N$  είναι ο χρονικός παράγοντας που εισάγεται από τον χρήστη. Οι νέες στάθμες του πυθμένα προκύπτουν με μια μελλοντική διαφορά φάσης που περιγράφεται από τη σχέση:

$$z_{new} = z_{old} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial z}{\partial t} \Delta t_{HD} \quad (3.46)$$

### Βασικές παράμετροι εισόδου

Για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών και για την ορθότητα των αποτελεσμάτων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις παραμέτρους του προγράμματος που αποτελούν και τα βασικά δεδομένα εισόδου του μοντέλου. Αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στις εξής ομάδες:

- Πεδίο μελέτης
  - Βαθυμετρικά δεδομένα (flexible mesh)
  - Έκταση περιοχής μελέτης
- Υδροδυναμικά δεδομένα
  - Βάθος νερού και πεδία ροής (που παρέχονται από το HD)
  - Κυματικά Δεδομένα (εφόσον απαιτούνται)
    - Ύψος κύματος, περίοδος και διεύθυνση (που παρέχονται από το SW)
  - Ιδιότητες Ιζήματος
    - Μέγεθος και διαβάθμιση του υλικού του πυθμένα
- Παράμετροι μορφολογίας
  - Συχνότητα συγχρονισμού

Στην περίπτωση που υπάρχει στερεομεταφορά λόγω συνδυασμένης δράσης κύματος ρεύματος είναι απαραίτητο ως δεδομένο εισόδου ένας πίνακας στερεομεταφοράς, ο οποίος περιλαμβάνει έναν αντιπροσωπευτικό αριθμό ρυθμών στερεομεταφοράς για την παρεμβολή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο πίνακας στερεομεταφοράς μπορεί να παραχθεί με την χρήση του εργαλείου MIKE 21 Toolbox 'Generation of Q3D Sediment Tables'. Η παραγωγή των ρυθμών στερεομεταφοράς στο πίνακα βασίζεται σε μια σχεδόν τρισδιάστατη προσέγγιση, όπου λαμβάνονται υπόψιν οι τοπικές κυματικές συνθήκες, τα προφίλ των κυματογενών ρευμάτων και οι ιδιότητες του κόκκου του ιζήματος. Επιπλέον μπορούν να συμπεριληφθούν στο πίνακα και κατ' επέκτασιν οι επιδράσεις των εξής παραμέτρων:

- Της γωνίας διάδοσης των κυματισμών σε σχέση με την διεύθυνση ροής
- Η απώλεια ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών

- Οι ιδιότητες του ιζήματος
- Η δημιουργία αμμοκυμάτων στο θαλάσσιο πυθμένα
- Η κλίση του πυθμένα
- Τα υπόγεια ρεύματα
- Η κυματική ασυμμετρία
- Τα ρεύματα

## Εφαρμογή Μοντέλου

Η εισαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου ST γίνεται στο αρχείο που εισάγονται και οι παράμετροι του υδροδυναμικού μοντέλου HD στο βήμα Module Selection, όπου επιλέγεται εκτός από την υδροδυναμική λειτουργία και η στερεομεταφορά (Sand Transport). Στη συνέχεια εμφανίζεται αυτόματα ένας αριθμός ενοτήτων, οι οποίες είναι με τη σειρά:

### ➤ Ορισμός του μοντέλου (Model Definition)

Σε πρώτη φάση, στην ενότητα αυτή του προγράμματος επιλέγεται αν το είδος της ανάλυσης θα είναι μελέτη αμιγούς ρεύματος ή συνδυασμός κύματος και ρεύματος. Στην παρούσα μελέτη ισχύει προφανώς η δεύτερη περίπτωση. Επιπλέον, εισάγεται ο πίνακας στερεομεταφοράς που παράχθηκε με το εργαλείο MIKE 21 Toolbox.

Ο προαναφερθής πίνακας κατασκευάζεται με χρήση της επιλογής Generation of Q3D Sediment Tables της ενότητας Sediments του MIKE 21 Toolbox. Αρχικά, επιλέγονται γενικές παράμετροι που αφορούν τη μελέτη, οι οποίες είναι η σχετική πυκνότητα  $s = \rho_s / \rho = 2,65$  ( $\rho_s$ ,  $\rho$  η πυκνότητα του ιζήματος και του νερού αντίστοιχα) για άμμο, η θερμοκρασία του νερού  $\theta = 16^\circ\text{C}$ , η ακρίβεια των υπολογισμών όσον αφορά την ακρίβεια της τιμής των συγκεντρώσεων ιζημάτων ( $10^{-4}$ ), ο μέγιστος αριθμός περιόδων κύματος (130) και η κρίσιμη τιμή της παραμέτρου Shields  $\theta_c = 0,045$ , η οποία είναι μια αδιάστατη έκφραση της διατμητικής τάσης στον πυθμένα που ορίζει την έναρξη κίνησης ενός κόκκου ιζήματος. Επίσης, επιλέγεται να ληφθούν υπόψιν στην εργασία πτυχώσεις που δημιουργούνται από τα κύματα (wave generated ripples), η κλίση του πυθμένα, φαινόμενα ρευμάτων καθώς και το ντετερμινιστικό μοντέλο (Engelund & Fredsøe, 1976) για την περιγραφή της συγκέντρωσης ιζήματος στον πυθμένα. Στη συνέχεια επιλέγεται η κυματική θεωρία του Stokes 5<sup>ης</sup> τάξης και όσον αφορά τη θραύση, επιλέγονται οι παράμετροι θραύσεως  $\gamma_1 = 1$  και  $\gamma_2 = 0,8$ . Τέλος, κατασκευάζεται ο πίνακας στερεομεταφοράς εισάγοντας τις αρχικές τιμές, το βήμα και το πλήθος των τιμών αντίστοιχα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του πίνακα για την ταχύτητα του ρεύματος  $V$ , το ύψος κύματος  $H$ , την περίοδο  $T$ , το λόγο του ύψους κύματος προς το βάθος νερού  $H_{rms}/d$ , το μέγεθος κόκκου  $D_{50}$ , τη διαβάθμιση του εδαφικού υλικού  $\sigma_g$ . Κάθε νέα τιμή  $j_n$  υπολογίζεται σε σχέση με την προηγούμενη  $j_{n-1}$  ως  $j_n = j_{n-1} + \text{βήμα}$ , με εξαίρεση το μέγεθος κόκκου για το οποίο ισχύει κατά αντιστοιχία  $j_n = j_{n-1} * \text{βήμα}$ . Γενική αρχή είναι ότι πρέπει τα μεγέθη του δημιουργηθέντος πίνακα να είναι σε κάθε βήμα υπολογισμού του μοντέλου στερεομεταφοράς μεγαλύτερα από τα δεδομένα της μελέτης.

➤ Χρονικές Παράμετροι (Time parameters)

Στην ενότητα αυτή επιλέχθηκαν ως χρόνος αρχής της προσομοίωσης το ένα και ως χρονικό βήμα το ένα.

➤ Ιδιότητες ιζήματος (Sediment Properties)

Στο σημείο αυτό εισάγονται τα δεδομένα για το ίζημα της περιοχής μελέτης, όπως το πορώδες με την τιμή 0,4, η διάμετρος ιζήματος που είναι 0,22mm και ο συντελεστής διαβάθμισης ο οποίος είναι ίσος με 1,25.

➤ Δράσεις (Forcings)

Στην ενότητα αυτή εισάγονται τα κυματικά δεδομένα στο μοντέλο. Ορίζονται ως παράμετροι το σημαντικό ύψος κύματος και η περίοδος αιχμής και εισάγεται το αρχείο αποτελεσμάτων από το SW FM.

➤ Μορφολογία (Morphology)

Στον ορισμό του μοντέλου επιλέγεται ως μέγιστη μεταβολή πυθμένα τα 1 m/day και ως παράγοντας επιτάχυνσης το 1. Καθοριστικό σημείο είναι η επιλογή της ανάδρασης μεταξύ του υδροδυναμικού, του κυματικού καθώς και του μοντέλου στερεομεταφοράς. Ως χρόνος έναρξης επιλέγεται και πάλι το ένα για την μελέτη της μορφολογικής εξέλιξης. Επειδή η ακτή της Αυλίδας χαρακτηρίζεται ως ήπιας κλίσης δεν επιλέχθηκε το στοιχείο της κατακρήμνισης λόγω απότομης κλίσης. Επιπρόσθετα, στις οριακές συνθήκες της περιοχής μελέτης ορίστηκε ως επιλογή η zero sediment flux gradient δηλαδή μηδενική μεταφορά ιζήματος.

➤ Δεδομένα εξόδου (Outputs)

Επιλέχθηκε να εξαχθούν τα αποτελέσματα σε δισδιάστατη απεικόνιση για όλα τα σημεία της περιοχής μελέτης και για ολόκληρο το βήμα του κυματικού γεγονότος, το οποίο επιλέγεται ίδιο με αυτό του HD. Τέλος ως δεδομένα εξόδου επιλέγονται το συνολικό φορτίο στερεομεταφοράς κατά  $x$  και  $y$ , ο ρυθμός μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, η αλλαγή της στάθμης του πυθμένα καθώς και η στιγμιαία στάθμη πυθμένα.

#### 4 ΑΚΤΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού και απέχει περίπου 10 χιλιόμετρα νότια από τη Χαλκίδα. Σημειώνεται γεωγραφικά στο απόσπασμα του χάρτη, που έχει ληφθεί από την εφαρμογή Google Earth, του Σχήματος 4.1.

Η περιοχή μελέτης διοικητικά αποτελεί τμήμα του Δήμου Χαλκιδαιών της Περιφερειακής Ενότητας Εύβοιας η οποία είναι μια από τις πέντε Περιφερειακές Ενότητες της Στέρας Ελλάδας. Στο βόρειο τμήμα της συνορεύει με το Δήμο Ορχομενού, στο νοτιοδυτικό με το Δήμο Θηβαίων και στο νότιο με το Δήμο Τανάγρας. Η Δημοτική ενότητα Αυλίδας αποτελείται από δύο Δημοτικές Κοινότητες (Δ.Κ.) και δύο Τοπικές Κοινότητες (Τ.Κ.): Δ.Κ. Βαθέος, Δ.Κ. Παραλίας Αυλίδας, Τ.Κ. Καλοχωρίου-Παντειχίου και Τ.Κ. Φάρου με συνολικό μόνιμο πληθυσμό 9.306 κατοίκους, σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Ο χαρακτήρας της περιοχής μέχρι το 1960 ήταν καθαρά αγροτικός. Σήμερα όμως στην περιοχή συγκεντρώνεται τουριστική ανάπτυξη με τη μορφή της τουριστικής κατοικίας.

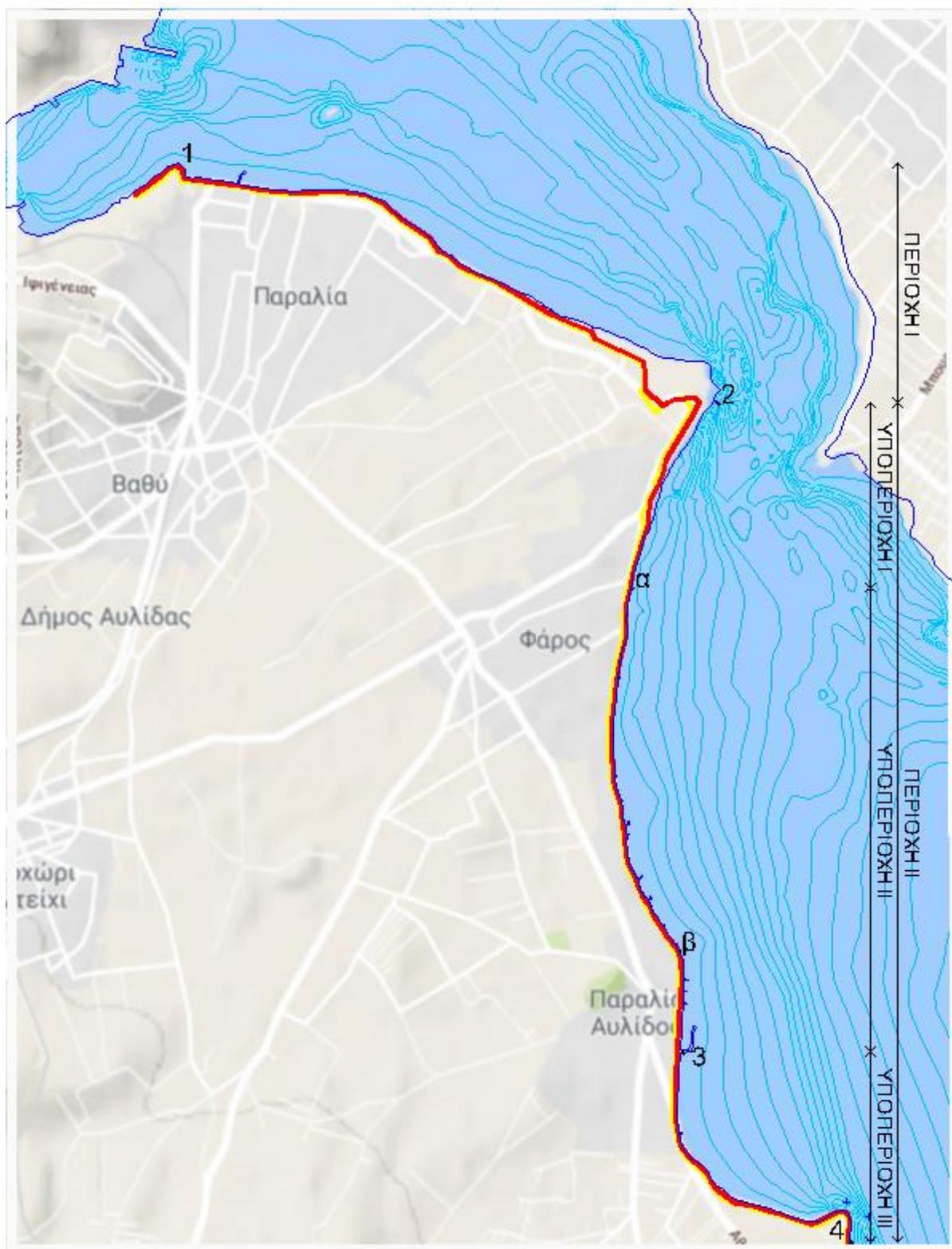
Η συνολική έκταση της περιοχής υπολογίζεται στα 16,8 τετραγωνικά χιλιόμετρα με την ακτή μελέτης να εκτείνεται περίπου στα 6,5 χιλιόμετρα.



Σχήμα 4.1: Προσδιορισμός ακτής μελέτης

Η περιγραφή της ακτής πραγματοποιείται ύστερα από υποδιαίρεσή της σε επιμέρους διαδοχικά τμήματα με κριτήριο τον ορισμό παράκτιων φυσιογραφικών μονάδων στις οποίες η στερεομεταφορά εξελίσσεται ανεξάρτητα από την υπόλοιπη περιοχή (Κουτίτας, Χ.,1998). Στα τμήματα αυτά είναι δυνατόν να περιέχονται πηγές και παγίδες φερτών υλικών. Προκύπτουν έτσι δύο ακτομηχανικές περιοχές. Η πρώτη εκτείνεται από το βορειότερο άκρο έως το ακρωτήριο του Φάρου ως φυσικό στερεό όριο και η δεύτερη έως το ακρωτήριο της Πούντας ομοίως ως φυσικό στερεό όριο. Η δεύτερη περιοχή επιλέγεται να χωριστεί για διευκόλυνση της παρουσίασης των δεδομένων και των αποτελεσμάτων σε τρεις επιμέρους περιοχές με βάση τα κοινά χαρακτηριστικά που εμφανίζονται σε κάθε μία από αυτές. Η υποδιαίρεση της ακτής που μελετάται σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.

- Η περιοχή 1 εκτείνεται από την περιοχή Βαθύ έως την περιοχή Φάρος. Στη συγκεκριμένη περιοχή δεν παρατηρούνται ανθρωπογενείς παρεμβάσεις εκτός από την κατασκευή αλιευτικού καταφυγίου.
- Η περιοχή 2 εκτείνεται από την περιοχή Φάρος έως και την περιοχή Πούντα όπου είναι το πέρας της περιοχής μελέτης και χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2. Η υποπεριοχή I χαρακτηρίζεται από ήπιες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις με κύριο γνώρισμα το σχηματισμό παραλίας. Η υποπεριοχή II χαρακτηρίζεται από την κατασκευή προστατευτικού κατακόρυφου τοιχίου, παραθαλάσσιων κλιμάκων και κάθετων προβόλων παράκτιας προστασίας καθώς και κρηπιδωμάτων με οικονομική δραστηριότητα. Στην υποπεριοχή II συναντάται και ο λιμενίσκος Αυλίδας. Η υποπεριοχή III εκτείνεται από το πέρας του λιμένα στη παραλία Αυλίδας έως την περιοχή Πούντα με μικρές ανθρωπινες παρεμβάσεις όπως ράμπες για προσέλκυση σκαφών και παραθαλάσσιες κλίμακες καθώς και παράκτιο τοίχιο στα σημεία όπου ο παραθαλάσσιος δρόμος γειτνιάζει με την ακτογραμμή.



Σχήμα 4.2: Ακτή Μελέτης

#### 4.1 Περιοχή 1

Πρόκειται για το βορειότερο τμήμα της ακτογραμμής. Το δυτικό τμήμα της εν λόγω περιοχής αποτελεί είσοδο στον όρμο Μεγάλο Βαθύ. Στο ίδιο σημείο όπως αναφέρθηκε έχει κατασκευαστεί αλιευτικό καταφύγιο το οποίο διαθέτει προσήνεμο και υπήνεμο μόλο καθώς και κρηπιδώματα (Εικόνα 4.1). Στη διαδρομή προς τα ανατολικά της ακτογραμμής υπάρχει παραλία με μια γενική εικόνα μόλυνσης από απορρίμματα (Εικόνα 4.2). Η κλίση του θαλάσσιου πυθμένα είναι μικρή με παρουσία λιβαδιών από φύκη (Εικόνα 4.6) ενώ στο χερσαίο τμήμα παρατηρείται σχηματισμός αλυκών (Εικόνα 4.5). Στην περιοχή εντοπίζονται κατασκευές οχετών για τη διόδευση των όμβριων υδάτων (Εικόνα 4.4).



**Εικόνα 4.1:** Όψη του προσήνεμο μόλου του λιμενίσκου και εμφανής η επίδραση της κυματικής δράσης στη διάβρωση του παραλιακού μετώπου.



**Εικόνα 4.2:** Σύσταση ιζήματος, αποθέσεις από φύκη και ενδείξεις ρίψης απορριμμάτων  
Κατά μήκος του παράκτιου μετώπου κυρίως στο δυτικό τμήμα της περιοχής παρατηρούνται σημεία τα οποία έχουν υποστεί διάβρωση τόσο στην ακτή όσο και στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου (Εικόνα 4.3).



**Εικόνα 4.3:** Φθορά του οδοστρώματος εξαιτίας της διάβρωσης



**Εικόνα 4.4:** Όψη σχετού όμβριων υδάτων ορθογωνικής διατομής



**Εικόνα 4.5:** Σχηματισμός αλυκών



**Εικόνα 4.6:** Λιβάδια από φύκη

Στο χερσαίο τμήμα της περιοχής πέριξ του φάρου του Πολεμικού Ναυτικού εντοπίζεται πλάτωμα με εύρος ικανό για εκμετάλλευση με σκοπό την αναψυχή. Σημείο ενδιαφέροντος αποτελεί κάθετος πρόβολος κατασκευασμένος προ 40ετίας ο οποίος έχει αστοχήσει (Εικόνα 4.7). Στη νότια παρειά του προβόλου παρατηρείται απόθεση ιζήματος.



**Εικόνα 4.7:** Όψη του κάθετου προβόλου πέριξ του Φάρου. Εμφανής η αστοχία της κατασκευής

## 4.2 Περιοχή 2

Η περιοχή 2 χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της καθεμίας.

### 4.2.1 Υποπεριοχή I

Η υποπεριοχή I αποτελεί πόλο έλξης δραστηριοτήτων κυρίως κατά τους θερινούς μήνες καθώς περιλαμβάνει παραλία αναψυχής (Εικόνα 4.8). Στην περιοχή παρατηρούνται ήπιες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.



**Εικόνα 4.8:** Όψη του παραλιακού μετώπου

### 4.2.2 Υποπεριοχή II

Οι υποπεριοχές II και III αποτελούν την πιο κρίσιμη έκταση της περιοχής μελέτης καθώς αφορούν το μεγαλύτερο τμήμα του παράκτιου μετώπου του Δημοτικού Διαμερίσματος της Αυλίδας όπου συγκεντρώνονται πλήθος οικονομικών, οικιστικών, και πολιτιστικών δραστηριοτήτων. Στην υποπεριοχή II οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν περιλαμβάνουν την κατασκευή προστατευτικού, ανακλαστικού τοιχίου κατά μήκος του παράκτιου μετώπου με σκοπό την προστασία του παραλιακού δρόμου και την αντιμετώπιση της διάβρωσης (Εικόνα 4.9) Για τον ίδιο λόγο έχει επίσης κατασκευαστεί ακανόνιστο σύστημα κάθετων προβόλων. Η πρόσβαση στη θάλασσα πραγματοποιείται με σύστημα παράκτιων κλιμάκων (Εικόνα 4.10).



**Εικόνα 4.9:** Κατασκευή προστατευτικού ανακλαστικού τοιχίου



**Εικόνα 4.10:** Όψη παράκτιας κλίμακας

Ύστερα από επιτόπια αυτοψία στην περιοχή μελέτης για την καταγραφή των αστοχιών που έχουν προκληθεί στην παράκτια ζώνη παρατηρείται πως εξαιτίας των υδροδυναμικών συνθηκών που επικρατούν σε συνδυασμό με τις επεμβάσεις, έχει προκληθεί κατάρρευση τμημάτων του προστατευτικού τοιχίου (Εικόνα 4.11, Εικόνα 4.12) και αστοχία τμημάτων των προβόλων (Εικόνα 4.13- Εικόνα 4.15). Παρατηρείται επίσης απόθεση ιζημάτων στις παρειές τους (Εικόνα 4.16) καθώς και υποσκαφές στην έδραση του τοιχίου (Εικόνα 4.17).



**Εικόνα 4.11:** Κατάρρευση προστατευτικού τοιχίου



**Εικόνα 4.12:** Κατάρρευση παράκτιου τοιχίου



**Εικόνα 4.13:** Αστοχία κάθετου προβόλου



**Εικόνα 4.14:** Αστοχία κάθετου προβόλου



**Εικόνα 4.15:** Αστοχία κάθετου προβόλου



**Εικόνα 4.16:** Απόθεση ιζήματος στις παρειές κάθετου προβόλου



**Εικόνα 4.17:** Υποσκαφές στην έδραση του τοιχίου

Στην υποπεριοχή II υπάρχει επίσης μικρός λιμένας που διαθέτει προσήνεμο μόλο και κρηπιδώματα (Εικόνα 4.20). Τα κρηπιδώματα γειτονικά του λιμενίσκου αξιοποιούνται με σκοπό την αναψυχή από τους κατοίκους της περιοχής (Εικόνα 4.18). Από επιτόπια αυτοψία για καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης παρατηρούνται καθιζήσεις στα κρηπιδώματα και τμηματική κατάρρευση τους (Εικόνα 4.19).



**Εικόνα 4.18:** Αξιοποίηση κρηπιδωμάτων με σκοπό την αναψυχή



**Εικόνα 4.19:** Καθίζηση κρηπιδωμάτων και όψη του λιμενοβραχίονα Αυλίδας



**Εικόνα 4.20:** Όψη του λιμενοβραχίονα της Αυλίδας

Είναι εμφανής επίσης κατά τη διάρκεια έντονων ανεμολογικών και κυματικών συνθηκών, κυρίως εξαιτίας των ρευμάτων, κυματική υπερπήδηση του κάθετου μετώπου και κατάκλυση θαλασσινού νερού στο χερσαίο παράκτιο τμήμα της οδού (Εικόνα 4.21). Χαρακτηριστικό των

υδροδυναμικών και μορφολογικών συνθηκών όλης της περιοχής μελέτης είναι τέλος η παρατήρηση ιζήματος σε αιώρηση στη ζώνη πριν και μετά τη θραύση των κυματισμών (Εικόνα 4.22).



**Εικόνα 4.21:** Υπερπήδηση κατακόρυφου τοιχίου, κατάκλυση θαλασσινού νερού



**Εικόνα 4.22:** Ίζημα σε αιώρηση

### 4.2.3 Υποπεριοχή III

Η εν λόγω περιοχή εκτείνεται κατάντι του λιμένα Αυλίδας και χαρακτηρίζεται από τμήμα ακτής (Εικόνα 4.23, Εικόνα 4.25, Εικόνα 4.26) και σε ορισμένα τμήματα ανθρωπογενείς παρεμβάσεις όπως προστατευτικό τοίχιο, ράμπες προσέλκυσης σκαφών και κλίμακες. Σημεία διάβρωσης εντοπίζονται κυρίως προς το πέρας της περιοχής μελέτης στην ακτή όσο και στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου (Εικόνα 4.25). Σε έντονες καιρικές και κυματικές συνθήκες είναι εμφανής η αιώρηση ιζήματος (Εικόνα 4.23).



**Εικόνα 4.23:** Όψη του παραλιακού μετώπου. Εμφανής η αιώρηση ιζήματος και η θραύση των κυματισμών



**Εικόνα 4.24:** Προστατευτικό κατακόρυφο τοίχιο



**Εικόνα 4.25:** Όψη παραλιακού μετώπου. Σημεία διάβρωσης στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου



**Εικόνα 4.26:** Ήπιες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις

## 5 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

### 5.1 Περιοχή 1

Η ιστορική εξέλιξη της ακτογραμμής εκτιμήθηκε από τις διατιθέμενες από την εφαρμογή Google Earth αεροφωτογραφίες, η επεξεργασία των οποίων επιτρέπει εποπτικά τη συγκριτική αξιολόγηση της ακτής σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές. Είναι εμφανής η μεταβλητότητα της ακτής και οι τάσεις διάβρωσης-προσαύξησης της ακτογραμμής. Για την επίτευξη μεγαλύτερης ευκρίνειας η περιοχή έχει χωριστεί σε 2 περιοχές, από τις οποίες η δεύτερη έχει χωριστεί 3 υποπεριοχές.

Στα δυτικά της περιοχής 1 (Σχήμα 5.1), ανάντη του αλιευτικού καταφυγίου, καθώς και ανατολικά του αλιευτικού καταφυγίου στο κεντρικό τμήμα της περιοχής παρουσιάζονται σημεία με εμφανή την επίδραση της διάβρωσης.



**Σχήμα 5.1:** Περιοχή 1

Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της περιοχής 1 παρουσιάζονται στη συνέχεια σε σειρά (από πάνω προς τα κάτω) με βάση την ημερομηνία λήψεως: Ιούνιο του έτους 2004, Μάιο 2010 και Ιούλιο 2015 όπου γίνεται σήμανση των περιοχών οι οποίες έχουν υποστεί διάβρωση.



(α)



(β)



(γ)

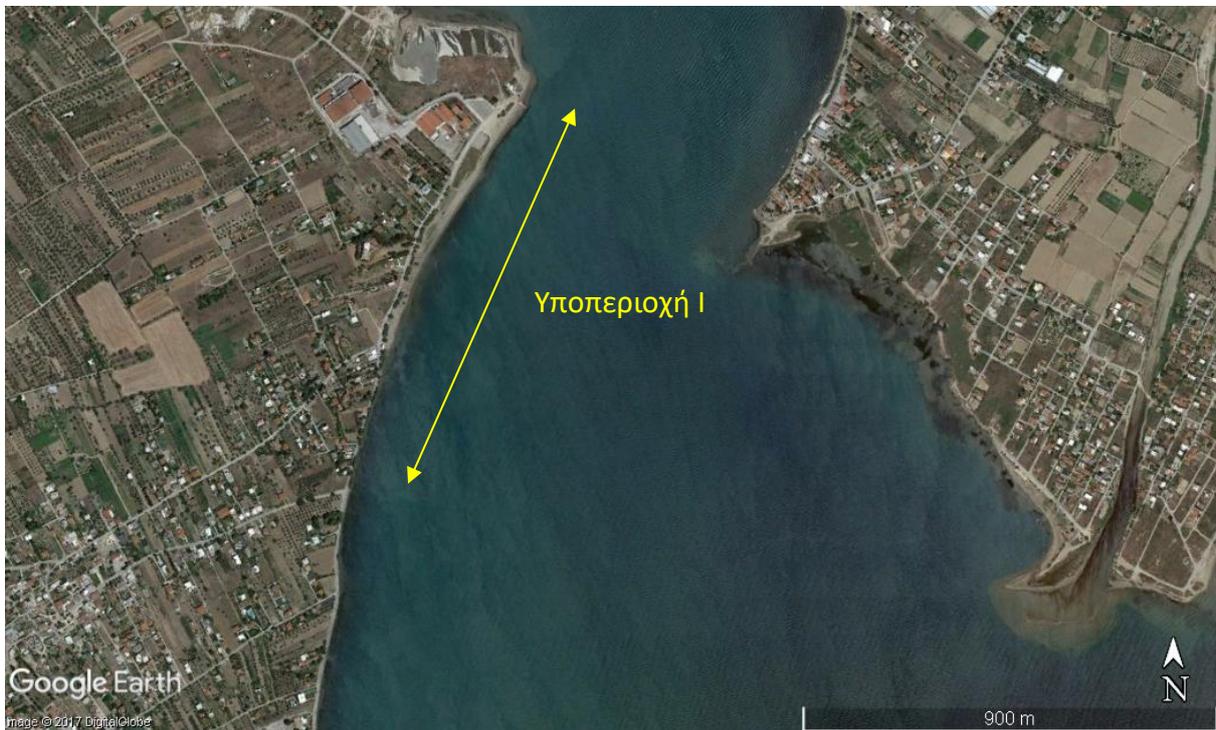
**Σχήμα 5.2:** Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της περιοχής 1: α) Ιούνιος 2004  
β) Μάιος 2010 γ) Ιούλιος 2015

## 5.2 Περιοχή 2

Η περιοχή 2 χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές οι οποίες θα μελετηθούν ξεχωριστά:

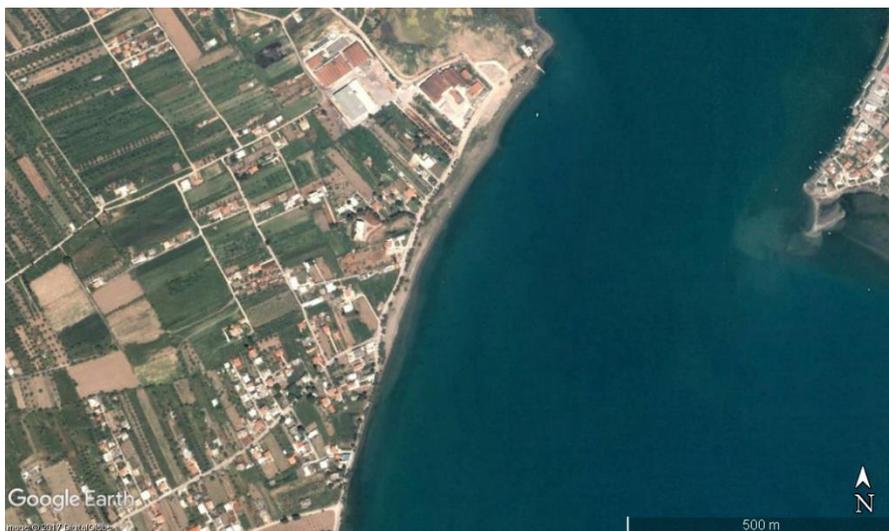
### 5.2.1 Υποπεριοχή I

Στην υποπεριοχή I (Σχήμα 5.3) παρατηρείται απόθεση ιζήματος στο βόρειο τμήμα, στις παρειές του κάθετου προβόλου. Στο νότιο τμήμα όπου εντοπίζεται σχηματισμός παραλίας παρατηρείται η επίδραση της διάβρωσης.

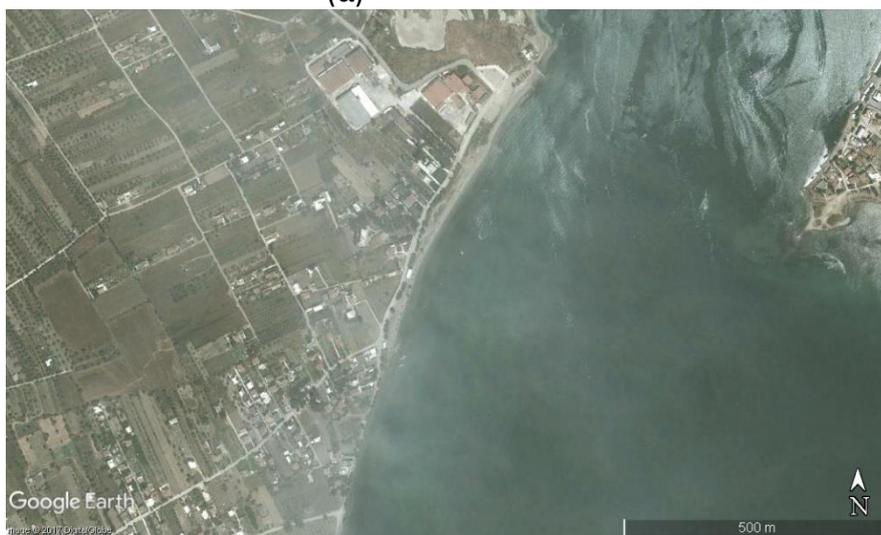


**Σχήμα 5.3:** Περιοχή 2- Υποπεριοχή I

Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της υποπεριοχής I παρουσιάζονται στη συνέχεια σε σειρά (από πάνω προς τα κάτω) με βάση την ημερομηνία λήψεως: Ιούνιο του έτους 2004, Μάιο 2010 και Ιούλιο 2015 όπου γίνεται σήμανση των περιοχών οι οποίες έχουν υποστεί διάβρωση και απόθεση ιζήματος.



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 5.4:** Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της Υποπεριοχής Ι: α) Ιούλιος 2004 β) Μάιος 2010 γ) Ιούλιος 2015

### 5.2.2 Υποπεριοχή II

Στην υποπεριοχή II (Σχήμα 5.5) παρατηρείται γενική εικόνα διάβρωσης. Η ανέγερση κατακόρυφου τοιχίου προκαλεί αύξηση του ύψους του κυματισμού πάνω στο τοιχίο, ανάκλαση και επιστροφή στο κυματικό πεδίο συμβάλλοντας με τους επερχόμενους κυματισμούς και δημιουργώντας στάσιμα κύματα. Η ακτή που προηγούμενα, πριν την παρέμβαση, είχε μια αποσβεστική ικανότητα απορροφώντας σημαντικές ποσότητες ενέργειας την χάνει πλέον με αποτέλεσμα να ενισχύονται τα φαινόμενα επιδρώντας καταστροφικά στα σημεία πρόσπτωσης αλλά και σε παραπλήσια σημεία που παραμένουν απροστάτευτα.

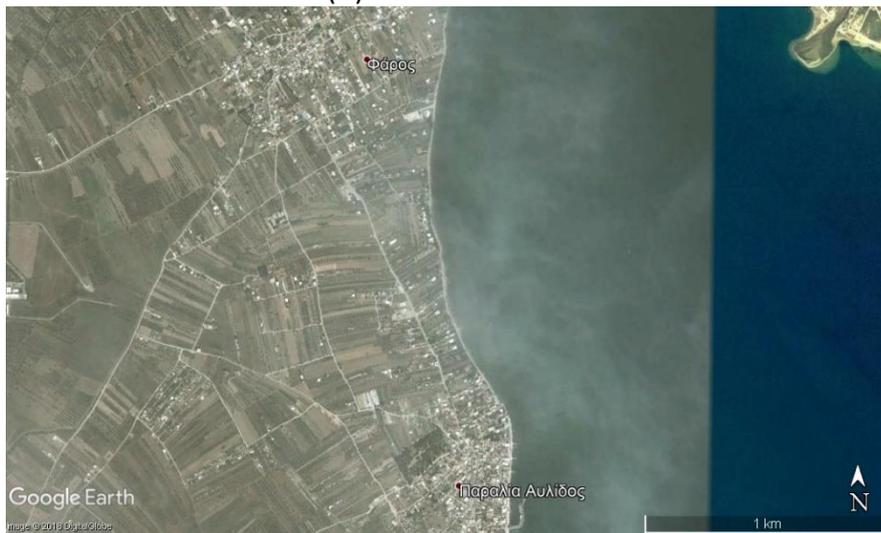


**Σχήμα 5.5:** Περιοχή 2- Υποπεριοχή II

Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της υποπεριοχής II παρουσιάζονται στη συνέχεια σε σειρά (από πάνω προς τα κάτω) με βάση την ημερομηνία λήψεως: Ιούνιο του έτους 2004, Μάιο 2010 και Ιούλιο 2015 όπου γίνεται σήμανση των περιοχών οι οποίες έχουν υποστεί διάβρωση.



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 5.6:** Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της Υποπεριοχής II: α) Ιούνιος 2004 β) Μάιος 2010 γ) Ιούλιος 2015

### 5.2.3 Υποπεριοχή III

Στην υποπεριοχή III (Σχήμα 5.7) η συνέχεια του κατακόρυφου μετώπου εντείνει τα κυματικά χαρακτηριστικά των προσπιπτόντων κυματισμών δημιουργώντας προβλήματα σε παρακείμενες περιοχές. Νότια του λιμενίσκου παρατηρείται η επίδραση της διάβρωσης.

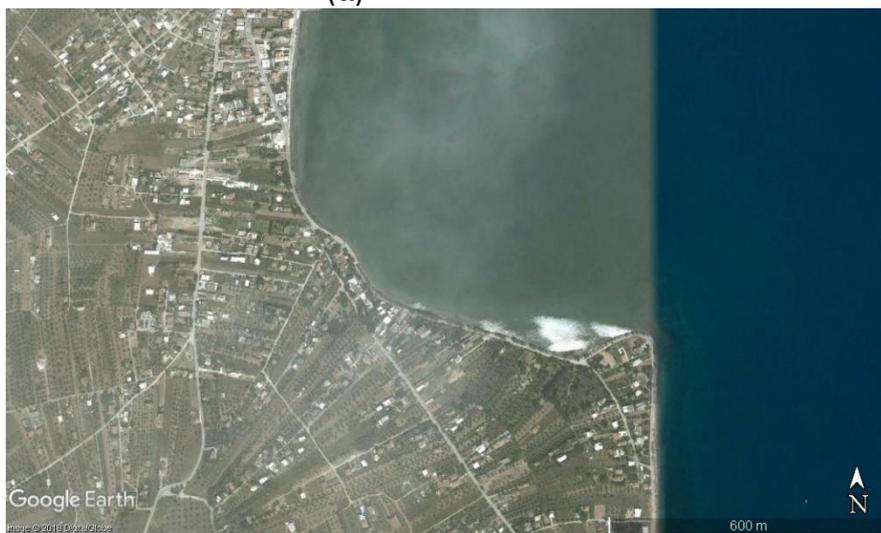


**Σχήμα 5.7: Περιοχή 2- Υποπεριοχή III**

Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της υποπεριοχής III παρουσιάζονται στη συνέχεια σε σειρά (από πάνω προς τα κάτω) με βάση την ημερομηνία λήψεως: Ιούνιο του έτους 2004, Μάιο 2010 και Ιούλιο 2015 όπου γίνεται σήμανση των περιοχών οι οποίες έχουν υποστεί διάβρωση. Το φαινόμενο είναι εντονότερο στο νότιο τμήμα της υποπεριοχής III όπου σχηματίζεται παραλία, το εύρος της οποίας μειώνεται ως αποτέλεσμα της κυματικής δράσης.



(α)



(β)



(γ)

**Σχήμα 5.8:** Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της Υποπεριοχής III: α) Ιούνιος 2004 β)Μάιος 2010 γ)Ιούλιος 2015

## 6 ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ- ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ

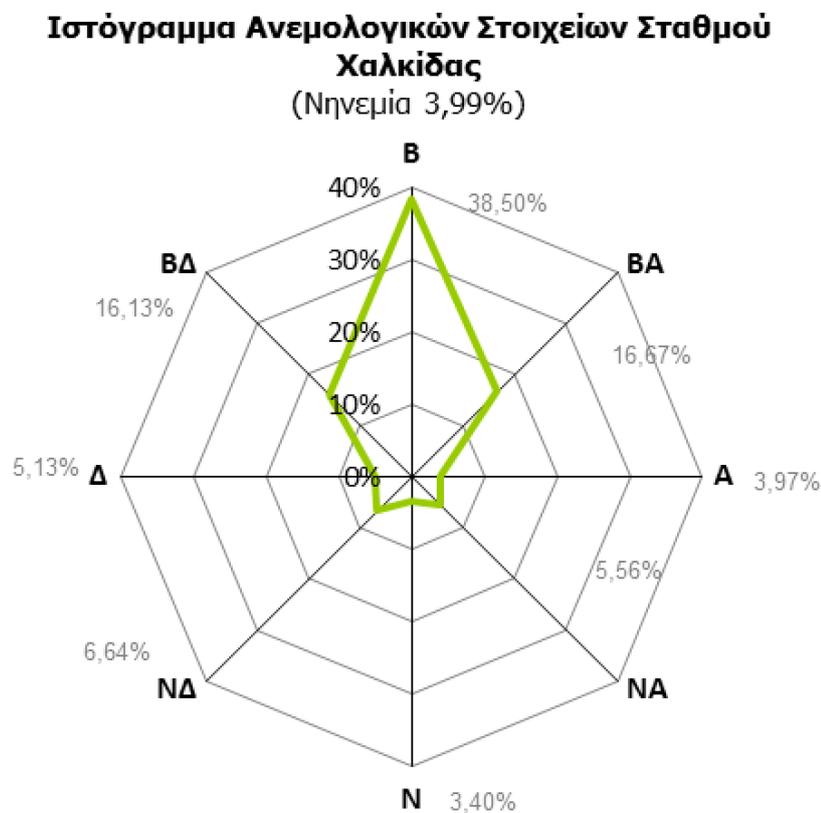
### 6.1 Ανεμολογικά στοιχεία

Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό της Ε.Μ.Υ. στην Χαλκίδα, ο οποίος είναι ο κοντινότερος στην περιοχή μελέτης με διαθέσιμες μετρήσεις για την περίοδο 1974- 1997.

Τα στοιχεία της Ε.Μ.Υ. δίνουν ανά μήνα καθώς και ετήσια το ποσοστό % της πνοής κάθε ανέμου ανά κατεύθυνση και ένταση. Στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι μέσες ετήσιες συχνότητες πνοής ανέμου.

Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά οι επικρατέστεροι άνεμοι στην περιοχή είναι οι βόρειοι με ετήσια συχνότητα εμφάνισης 38,5%. Νηνεμία εμφανίζεται ετησίως με ποσοστό 3,99%. Ενώ καταγράφονται εντάσεις ανέμων μεγαλύτερες των 9Bf για τη Β, ΒΑ, ΝΑ, ΝΔ και ΒΔ διεύθυνση προώθησης με συχνότητα από 0,01% έως και 0,06% (Β).

Σε ετήσια βάση η συχνότητα εμφάνισης των ανέμων εμφανίζεται στο ανεμόγραμμα του Σχήματος 6.1:



Σχήμα 6.1: Ανεμόγραμμα Χαλκίδας

**Πίνακας 6.1** Μέσες ετήσιες συχνότητες ανέμων

Όνομα Σταθμού **Χαλκίδα**

Κωδικός Σταθμού 16697

Γεωγ. Μήκος Σταθμού 24°

Γεωγ. Πλάτος Σταθμού 38°

Περίοδος 1/1/1974 ΕΩΣ 31/12/1997

Ένταση Ανέμου Beaufort	Διεύθυνση Ανέμου									ΑΘΡΟΙΣΜΑ
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CLM	
<b>0</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,99	3,99
<b>1</b>	18,82	5,06	1,93	1,79	0,96	2,57	2,34	4,66	0,00	38,11
<b>2</b>	10,78	5,61	1,18	2,23	1,49	2,57	1,63	5,35	0,00	30,85
<b>3</b>	5,53	3,65	0,59	1,09	0,80	0,95	0,75	3,85	0,00	17,22
<b>4</b>	2,66	1,71	0,23	0,33	0,14	0,47	0,26	1,74	0,00	7,53
<b>5</b>	0,53	0,45	0,04	0,10	0,00	0,07	0,12	0,41	0,00	1,72
<b>6</b>	0,09	0,14	0,01	0,01	0,00	0,01	0,04	0,10	0,00	0,39
<b>7</b>	0,03	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,06
<b>8</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01
<b>&gt;= 9</b>	0,06	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,13
<b>ΑΘΡΟΙΣΜΑ</b>	<b>38,50</b>	<b>16,67</b>	<b>3,97</b>	<b>5,56</b>	<b>3,40</b>	<b>7,16</b>	<b>5,13</b>	<b>16,13</b>	<b>3,99</b>	<b>100,00</b>

Στον Πίνακα 6.2 δίνεται επίσης και η μέση ταχύτητα ανέμου για τον μετεωρολογικό σταθμό Αυλίδας του Ε.Α.Α. το έτος 2016 (Πηγή: [penteli.meteo.gr/stations/avlida](http://penteli.meteo.gr/stations/avlida)).

**Πίνακας 6.2** Μέση Ταχύτητα Ανέμου Έτους 2016 (km/hr) – Μετεωρολογικός Σταθμός Αυλίδας (Πηγή: [penteli.meteo.gr/stations/avlida](http://penteli.meteo.gr/stations/avlida))

ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Μ.Ο
6,5	6,2	6,5	7,3	8,1	7,9	8,9	9,9	7,9	7,1	6,9	8,4	7,7

## 6.2 Κυματικά δεδομένα

Τα έντονα ανεμογενή κύματα που αντιπροσωπεύονται από μεγάλα ύψη  $H_s$  και μικρές περιόδους  $T_s$ , έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταφορά μεγάλου ποσοστού ενέργειας εντός των ορίων της παράκτιας ζώνης, αλλά και τη δημιουργία παράλληλων και κυρίως κάθετων προς την ακτή ρευμάτων (undertow currents). Τα συγκεκριμένα υδροδυναμικά μοτίβα (hydrodynamic flow patterns) αποτελούν την κύρια γενεσιουργό αιτία της μετακίνησης του θαλάσσιου ιζήματος προς τα βαθιά ύδατα μετασχηματίζοντας τη γεωμετρία του πυθμένα (Afentoulis et al., 2016; Afentoulis et al., 2017, Maliouri et al, 2017)).

Τα στοιχεία που καθορίζουν τα κυματικά χαρακτηριστικά στην είσοδο της περιοχής μελέτης (βαθύ νερό σε ανοιχτή θάλασσα) είναι η ταχύτητα  $U$  του ανέμου, το ανάπτυγμα πελάγους (fetch)  $F$  και η διάρκεια πνοής του ανέμου  $D$ . Τα κυματικά χαρακτηριστικά που είναι το ύψος κύματος ( $H_s$ ), η περίοδος ( $T_s$ ) και το μήκος ( $L$ ) των χαρακτηριστικών κυμάτων στην περιοχή βαθιών νερών υπολογίζονται για κάθε κρίσιμη διεύθυνση πνοής ανέμου σύμφωνα με το μοντέλο SMB (Etemad Shahidi et al., 2009).

Τα ανεμολογικά στοιχεία είναι γνωστά από την Ε.Μ.Υ., όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 6.1, ενώ η ενεργός διαδρομή κυματισμών (effective fetch) για κάθε διεύθυνση ανέμου για την οποία είναι δυνατή η ανάπτυξη κυματισμού (κρίσιμες διευθύνσεις) υπολογίζεται με βάση τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3:

**Πίνακας 6.3:** Μήκος ενεργών αναπτυγμάτων πελάγους ανά διεύθυνση ανέμων

Διεύθυνση ανέμου	Ανάπτυγμα πελάγους (km)
Βόρειος	1,688
Βορειοανατολικός	3,424
Ανατολικός	14,588
Νοτιοανατολικός	11,854
Νότιος	3,872

Οι σχέσεις που ακολουθεί το μοντέλο SMB είναι οι εξής:

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0,283 \tanh(0,0125\Phi^{0,42}) \quad (6.1)$$

$$\frac{gT_s}{U} = 7,540 \tanh(0,077\Phi^{0,25}) \quad (6.2)$$

$$\frac{gD}{U} = 6,588 \exp((0,016(\ln \Phi)^2 - 0,0369(\ln \Phi) + 2,2024)^{0,5} + 0,8798(\ln \Phi)) \quad (6.3)$$

όπου  $\Phi$  είναι ο συντελεστής αναπτύγματος πελάγους και ισούται με

$$\Phi = \frac{gF}{U^2} \quad (6.4)$$

Οι υπολογισμοί έγιναν για δύο ανεμολογικά σενάρια:

- για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου, σύμφωνα με τα ανεμολογικά στοιχεία
- για πλήρη ανάπτυξη κυμάτων - διάρκεια πνοής ανέμων επαρκώς μεγάλη

Τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.4÷6.13.

Όπως αναμενόταν οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι σχετικά μικρές καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των αναπτυγμάτων πελάγους της περιοχής μελέτης είναι περιορισμένο (fetch limited sea).

Για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου:

**Πίνακας 6.4:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου:

*Βόρεια διεύθυνση ανέμου Fetch = 1.688 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,03	0,7	0,78
2,0	0,08	1,1	2,01
3,0	0,15	1,5	3,47
4,0	0,52	1,8	5,22
5,0	0,33	2,1	7,19
6,0	0,45	2,4	9,37
7,0	0,57	2,7	11,69
9,0	0,87	3,3	16,83

**Πίνακας 6.5:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου:

*Βορειοανατολική διεύθυνση ανέμου Fetch = 3.424 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,04	0,8	0,99
2,0	0,11	1,3	2,70
3,0	0,20	1,7	4,76
4,0	0,31	2,2	7,25
5,0	0,45	2,5	10,04
6,0	0,60	2,9	13,14
7,0	0,77	3,2	16,45
9,0	1,17	3,9	23,76

**Πίνακας 6.6:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου:

*Ανατολική διεύθυνση ανέμου Fetch =14.588 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,06	1,0	1,47
2,0	0,18	1,7	4,61
3,0	0,35	2,4	8,68
4,0	0,56	3,0	13,69
5,0	0,81	3,5	19,38
6,0	1,09	4,1	25,73

**Πίνακας 6.7:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου:

*Νοτιοανατολική διεύθυνση ανέμου Fetch = 11.854 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,05	0,9	1,40
2,0	0,17	1,7	4,30
3,0	0,32	2,3	8,01
4,0	0,52	2,8	12,55
5,0	0,74	3,4	17,69
6,0	0,76	3,3	64,20
7,0	1,03	3,8	47,64
9,0	1,74	4,9	31,49

**Πίνακας 6.8:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου:

*Νότια διεύθυνση ανέμου Fetch = 3.872 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,04	0,8	1,03
2,0	0,12	1,3	2,84
3,0	0,21	1,8	5,03
4,0	0,33	2,2	7,67
7,0	0,81	3,3	17,44

Για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου:

**Πίνακας 6.9:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου:

*Βόρεια διεύθυνση ανέμου Fetch = 1.688 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,03	0,7	0,78
2,0	0,08	1,1	2,01
3,0	0,15	1,5	3,47
4,0	0,23	1,8	5,22
5,0	0,33	2,1	7,19
6,0	0,45	2,4	9,37
7,0	0,57	2,7	11,69
9,0	0,87	3,3	16,83

**Πίνακας 6.10:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου:

*Βορειοανατολική διεύθυνση ανέμου Fetch = 3.424 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,04	0,8	0,99
2,0	0,11	1,3	2,70
3,0	0,20	1,7	4,76
4,0	0,31	2,2	7,25
5,0	0,45	2,5	10,04
6,0	0,60	2,9	13,14
7,0	0,77	3,2	16,45
9,0	1,17	3,9	23,76

**Πίνακας 6.11:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου:

*Ανατολική διεύθυνση ανέμου Fetch =14.588 km*

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,06	1,0	1,47
2,0	0,18	1,7	4,61
3,0	0,35	2,4	8,68
4,0	0,56	3,0	13,69
5,0	0,81	3,5	19,38
6,0	1,09	4,1	25,73

**Πίνακας 6.12:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου:

Νοτιοανατολική διεύθυνση ανέμου *Fetch* = 11.854 km

Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,05	0,9	1,40
2,0	0,17	1,7	4,30
3,0	0,32	2,3	8,01
4,0	0,52	2,8	12,55
5,0	0,74	3,4	17,69
6,0	1,00	3,9	23,43
7,0	1,29	4,3	29,55
9,0	1,96	5,23	31,49

**Πίνακας 6.13:** Χαρακτηριστικά κυμάτων για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου:

Νότια διεύθυνση ανέμου *Fetch* =3.872 km

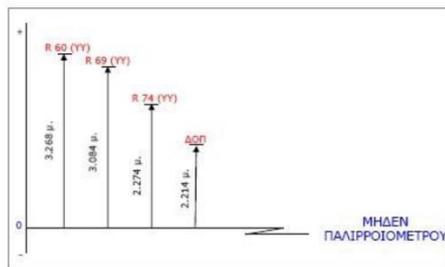
Beaufort	Hs (m)	Ts (s)	L (m)
1,0	0,04	0,8	1,03
2,0	0,12	1,3	2,84
3,0	0,21	1,8	5,03
4,0	0,33	2,2	7,67
7,0	0,81	3,3	17,44

### 6.3 Στοιχεία παλίρροιας

Στοιχεία που αφορούν στις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας έχουν ληφθεί από τους σταθμούς μέτρησης παλίρροιας του λιμένα Χαλκίδας, περίοδος στατιστικής επεξεργασίας 1990-2012. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της ύπαρξης του Πορθμού του Ευρίπου και του ιδιαίτερου για την Ελλάδα φαινομένου, υπάρχουν δύο σταθμοί μετρήσεων, ένας νότια της Παλαιάς Γέφυρας στον μόλο προ της εισόδου του λιμένα και ένας βόρεια στην Ιχθυόσκαλα. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις στους παλιρροιογράφους πραγματοποιούνται από το 1977, και ότι για την περιοχή μελέτης μας αφορούν οι μετρήσεις νότια της Παλαιάς Γέφυρας (βλ. Σχήμα 6.2).

## ΚΛΙΜΑΚΑ 1:500

### ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΧΩΡΟΣΤΑΘΜΗΣΗΣ (Νοέμβριος 2002)

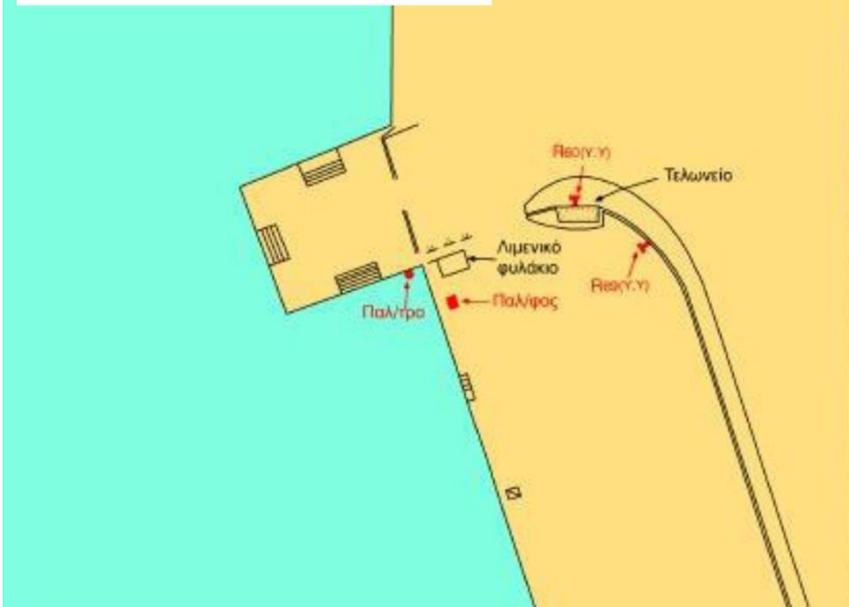


**R60 (Υ,Υ):** ευρίσκεται στην Βόρεια πλευρά του κτηρίου του Τελωνείου.

**R69 (Υ,Υ):** ευρίσκεται στην εσωτερική πλευρά του τοίχου του λιμένος, Νοτιοανατολικά του Τελωνείου.

**R74 (Υ,Υ):** ευρίσκεται στην Δυτική γωνία του πέτρινου τοίχου, Νότια του Σιδηροδρομικού σταθμού (εκτός σχεδίου).

**ΔΟΠ:** Ήλος στο δάπεδο του οικίσκου του Σταθμηγράφου.



**Σχήμα 6.2:** Θέση παλιρροιογράφου στο νότιο τμήμα του Λιμένα Χαλκίδας - Προβλήτας προ εμπορευματικού λιμένα

Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά οι παλιρροιακές μεταβολές της περιοχής ενδιαφέροντος συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

**Πίνακας 6.14:** Στατιστικά Στοιχεία Παλίρροιας Σταθμών λιμένα Χαλκίδας Πηγή:  
Υδρογραφική Υπηρεσία

<b>ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΛΙΡΡΟΙΑΣ (σε m.)</b>	<b>ΣΤΑΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (νότια)</b>
Μέγιστη πλήμμη	1,21
Μέση πλήμμη	0,68
Μέση στάθμη (ΜΣΘ)	0,59
Μέση ρηχία	0,51
Κατωτάτη ρηχία (ΚΡ)	0,00
Μέγιστο εύρος	0,68
Μέσο εύρος	0,18
Ελάχιστο εύρος	0,01
Επάλλαξη	1,21

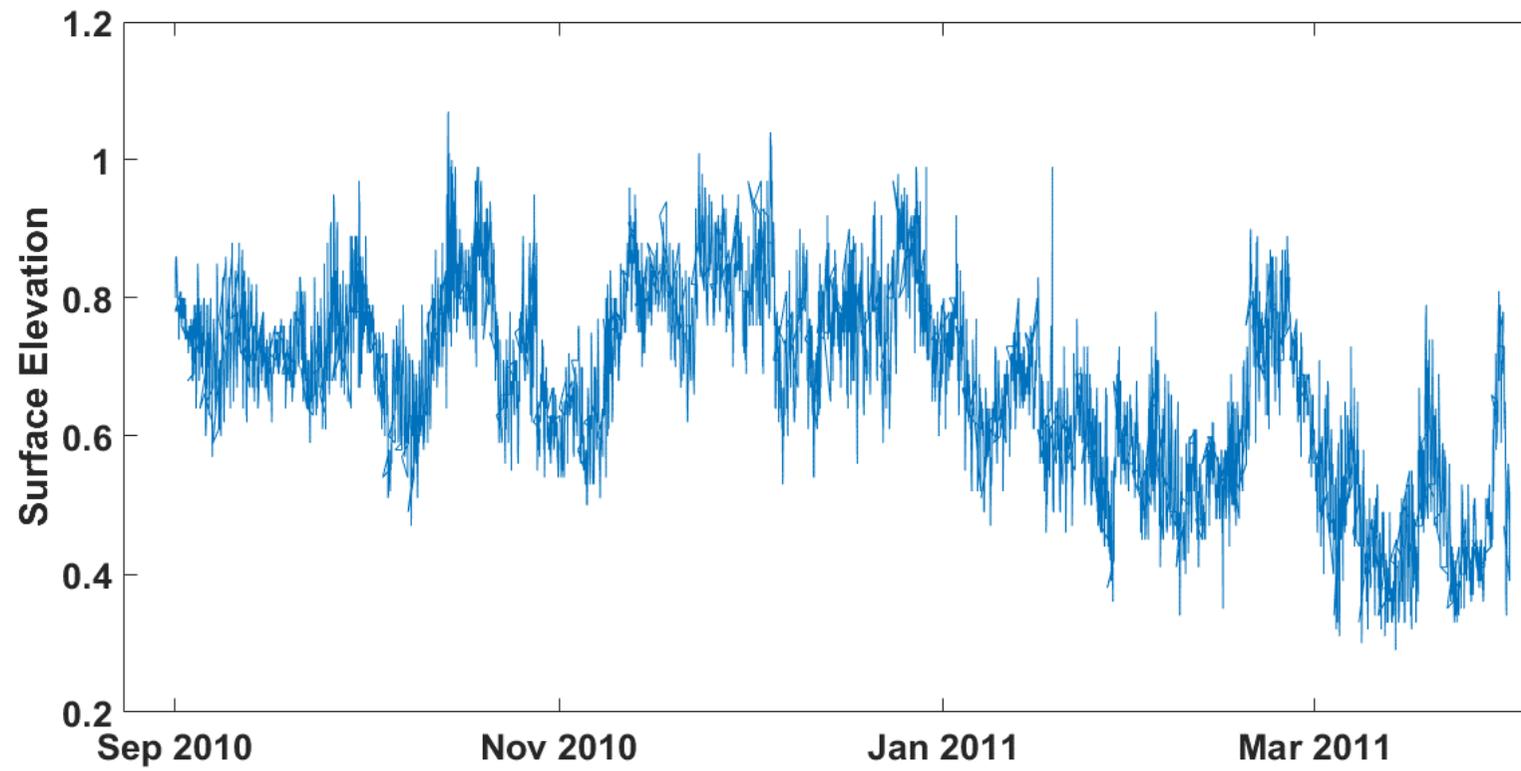
Επίσης από το τμήμα ωκεανογραφίας της Υδρογραφικής Υπηρεσίας Πολεμικού Ναυτικού χορηγήθηκαν οι ημερήσιες τιμές στάθμης της θάλασσας για την περίοδο Σεπτεμβρίου 2010 – Μαρτίου 2011, όπως αυτές έχουν αποτυπωθεί από το σταθμηγράφο της υπηρεσίας που βρίσκεται εγκατεστημένος στην περιοχή του λιμένα Χαλκίδας.

Οι τιμές της στάθμης αναφέρονται σε μέτρα, ενώ το μηδέν του παλιρροιομέτρου συμπίπτει με το μηδενικό επίπεδο αναφοράς (Κατωτάτη Ρηχία) και είναι συνδεδεμένο με τοπικό δίκτυο χωροστάθμησης.

Στο Σχήμα 6.3 αποτυπώνεται η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας όπως προκύπτει από την ανάλυση των χρονοσειρών των μετρήσεων του σταθμηγράφου.

Φυσικές διεργασίες όπως αυτές της αλληλεπίδρασης μεταξύ της παλίρροιας, των παλιρροιακών ρευμάτων και των ανεμογενών κυματισμών αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την ισορροπία του παράκτιου συστήματος (Arns et al., 2017).

Στις μέχρι τώρα έρευνες αυτά τα μη γραμμικά φαινόμενα θεωρούνταν αμελητέα. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα συνεκτιμηθεί η επίδραση αυτών των μεγεθών στις υδροδυναμικές και μορφοδυναμικές συνθήκες της περιοχής και στην τελική γεωμετρία του θαλάσσιου πυθμένα.



**Σχήμα 6.3:** Αποτύπωση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας με χρήση του λογισμικού MATLAB (MATLAB 2012)

## 7. ΑΚΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 7.1 Προσομοίωση κυματισμών

Η προσομοίωση των κυματισμών για την παράκτια περιοχή της Αυλίδας πραγματοποιήθηκε με αναγωγή σε χρονική διάρκεια 48 ωρών χρησιμοποιώντας το μέσο ετήσιο ισοδύναμο κυματισμό ανά διεύθυνση πνοής ανέμου για τις πιο κρίσιμες διευθύνσεις, οι οποίες στη συγκεκριμένη περίπτωση αφορούν Βορειοανατολικό, Ανατολικό και Νοτιοανατολικό άνεμο. Ο ισοδύναμος αυτός κυματισμός αντιπροσωπεύει την κυματική κατάσταση σε ετήσια βάση. Η μεθοδολογία υπολογισμού των χαρακτηριστικών του γίνεται ως εξής: Αρχικά υπολογίζεται η αντιπροσωπευτική περίοδος  $T_e$  του ισοδύναμου κυματισμού για κάθε διεύθυνση πνοής μέσω της εξίσωσης:

$$T_e = \frac{\sum T_i f_i}{\sum f_i} \quad (7.1)$$

και στη συνέχεια υπολογίζεται το ύψος του ισοδύναμου κυματισμού  $H_e$  από τη μέση τετραγωνική τιμή του ύψους κύματος  $H_i$  των Borah και Balloffet (1985) μέσω της εξίσωσης:

$$H_e^2 T_e = \frac{\sum H_i^2 T_i f_i}{\sum f_i} \quad (7.2)$$

Όπου  $H_i$ ,  $T_i$ ,  $f_i$  τα ύψη, οι περίοδοι και οι συχνότητες εμφάνισης των κυμάτων που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα έντασης του ανέμου από τη σχετική διεύθυνση. Ο ισοδύναμος κυματισμός είναι ο κυματισμός που εμφανίζεται με συχνότητα  $f = \sum f_i$  και έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με το σύνολο των κυματισμών των διάφορων εντάσεων του σχετικού τομέα (διεύθυνσης πνοής ανέμου). Εφαρμόζοντας τα παραπάνω υπολογίστηκαν το σημαντικό ύψος κύματος  $H_e$ , η περίοδος  $T_e$  και η συχνότητα εμφάνισης  $f$  των ισοδύναμων κυματισμών ανοιχτού πελάγους για επίπεδα έντασης ανέμου μεγαλύτερα από τα 4 Beaufort καθώς σε μικρότερες εντάσεις η τροχιακή ταχύτητα για έναρξη κίνησης ιζήματος όπως υπολογίστηκε είναι πολύ μικρή. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 7.1:

**Πίνακας 7.1:** Χαρακτηριστικά ισοδύναμων κυματισμών ανά διεύθυνση πνοής ανέμου

Διεύθυνση Κυματισμού	$H_e$ (m)	$T_e$ (s)	Συχνότητα Εμφάνισης $f$ (%)
Βορειοανατολικός	0,42	2,33	2,35
Ανατολικός	0,64	3,11	0,28
Νοτιοανατολικός	0,73	3,04	0,46

Στους ακόλουθους πίνακες 7.2 έως 7.4 παρουσιάζονται τα στοιχεία για τον υπολογισμό των ισοδύναμων κυματισμών που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 7.1 ανά διεύθυνση πνοής ανέμου:

**Πίνακας 7.2:** Στοιχεία για τον υπολογισμό του ισοδύναμου κυματισμού-Βορειοανατολικός άνεμος

Βορειοανατολική διεύθυνση					
Beaufort	Συχνότητα εμφάνισης f (%)	Hs (m)	Tp (s)	He (m)	Te (s)
4	0.0171	0,31	2,2		
5	0.0045	0,45	2,5		
6	0.0014	0,6	2,9	0,42	2,33
7	0.0001	0,77	3,2		
>=9	0.0004	1,17	3,9		
Σύνολο	0.0235				

**Πίνακας 7.3:** Στοιχεία για τον υπολογισμό του ισοδύναμου κυματισμού-Ανατολικός άνεμος

Ανατολική διεύθυνση					
Beaufort	Συχνότητα εμφάνισης f	Hs (m)	Tp (s)	He (m)	Te (s)
4	0,0023	0,56	3		
5	0,0004	0,81	3,5	0,64	3,11
6	0,0001	1,09	4,1		
Σύνολο	0,0028				

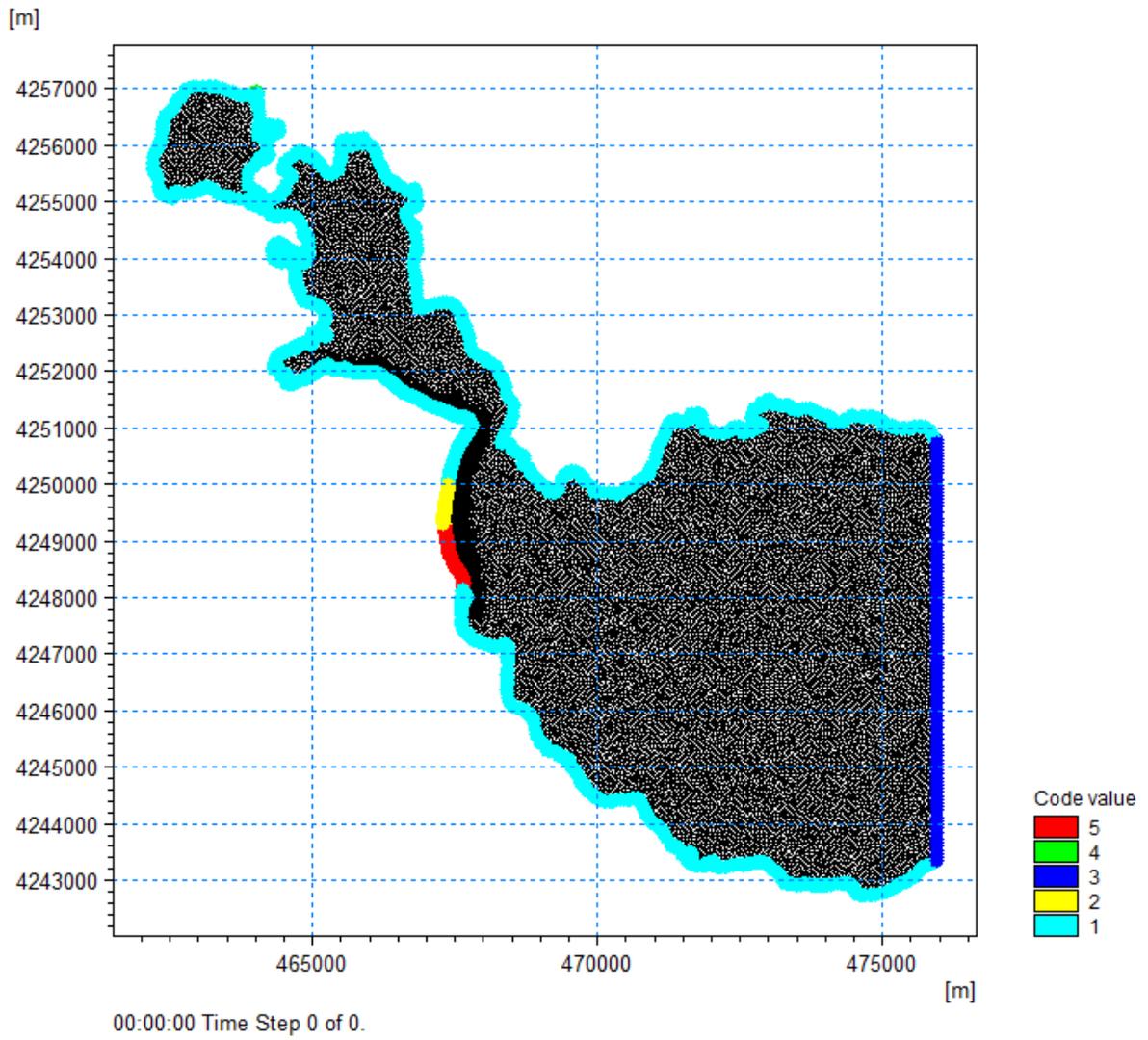
**Πίνακας 7.4:** Στοιχεία για τον υπολογισμό των ισοδύναμου κυματισμού-Νοτιοανατολικός άνεμος

Νοτιοανατολική διεύθυνση					
Beaufort	Συχνότητα εμφάνισης f	Hs (m)	Tp (s)	He (m)	Te (s)
4	0,0033	0,52	2,8		
5	0,001	0,74	3,4		
6	0,0001	1	3,9	0,73	3,04
7	0,0001	1,29	4,3		
>=9	0,0001	1,96	5,23		
Σύνολο	0,0046				

## 7.2 Υπολογιστικό Πλέγμα

Όπως ήδη αναφέρθηκε για το κυματικό και υδροδυναμικό μοντέλο καθώς και το μοντέλο στερεομεταφοράς του MIKE 21 επιλέχθηκε η βαθυμετρία να ενσωματωθεί στο πρόγραμμα με τη μορφή τριγωνικού κανάβου flexible mesh. Ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε αυτός ο τύπος πλέγματος είναι το γεγονός ότι επιτρέπει την πύκνωσή του ανάλογα με τις ανάγκες ακρίβειας που επιδιώκεται σε μια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Επιπρόσθετα, ο κανάβος flexible mesh καθιστά δυνατή την αποτύπωση διαφόρων λιμενικών και παράκτιων έργων χωρίς να απαιτείται καμία αλλαγή στον πυθμένα, όπως συμβαίνει με τον τετραγωνικό κανάβο με σταθερό χωρικό βήμα, διότι προσαρμόζεται εύκολα στα βαθυμετρικά δεδομένα. Ως εκ τούτου, το flexible mesh κρίθηκε αναγκαίο για την παρούσα μελέτη ώστε να υπάρχει ακρίβεια κοντά στην ακτή της Αυλίδας.

Για τη δημιουργία του τριγωνικού flexible mesh που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1 εισήχθη στο εργαλείο Mesh Generator του MIKE Zero, το X,Y,Z αρχείο που αποτυπώνει τις βαθυμετρικές καμπύλες και την ακτογραμμή από τον ψηφιοποιημένο σε Autocad χάρτη της περιοχής. Σχεδιάστηκαν στη συνέχεια τα όρια της περιοχής μελέτης και ορίστηκαν αν θα είναι ανοιχτά (code 3,4) ή κλειστά (code 1,2,5), δηλαδή αν από τα όρια αυτά είναι δυνατό να εισέλθει κυματισμός. Στην περίπτωση του ανοιχτού ορίου, δηλαδή για code 3,4 δίνονται σαν οριακή συνθήκη τα χαρακτηριστικά των ισοδύναμων κυματισμών του πίνακα 7.1 σε επαλληλία. Για την κωδικοποίηση των στερεών ορίων, δηλαδή για code 1,2,5 επιλέγεται κατάλληλη τιμή για το συντελεστή ανάκλασης. Για παράδειγμα για το τμήμα της περιοχής με κωδικοποίηση 2, το οποίο αντιστοιχεί στην προτεινόμενη θωράκιση επιλέγεται χαμηλός συντελεστής ανάκλασης. Ομοίως για το τμήμα με κωδικοποίηση 5 που αντιστοιχεί στην περιοχή όπου προτείνονται έργα στην ακτογραμμή. Ορίζοντας τα όρια της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε ο κανάβος που είναι ανεξάρτητος της βαθυμετρίας. Ακολούθως, σχεδιάστηκε ένα πολύγωνο και ορίστηκε ένα σημείο του στο κέντρο περίπου του κανάβου που βάσει των ιδιοτήτων του επιτυγχάνεται το είδος της πύκνωσης και η λεπτομέρεια που είναι επιθυμητή. Η πύκνωση που επιλέχθηκε είναι στα  $100 \times 100 \text{m}^2$  για τον κανάβο στα ανοιχτά και στα  $10 \times 10 \text{m}^2$  για τον κανάβο κοντά στην ακτογραμμή. Επιλέχθηκε η συγκεκριμένη πύκνωση κοντά στην ακτογραμμή για να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος.



**Σχήμα 7.1:** Απεικόνιση του πυκνωμένου κανάβου flexible mesh με την κωδικοποίηση της περιοχής μελέτης

### 7.3 Ακτομηχανική διερεύνηση υφιστάμενης κατάστασης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την περιοχή μελέτης, προσομοιάζοντας τη συνολική επίδραση των κυματισμών στην ακτογραμμή με επαλληλία των τριών κυματικών καταστάσεων (Βορειοανατολικής, Ανατολικής και Νοτιοανατολικής) σύμφωνα με την ετήσια συχνότητα εμφάνισής τους, με αναγωγή σε 48 ώρες κατά αύξουσα σειρά εμφάνισης και με τα κυματικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται στον πίνακα 7.1.

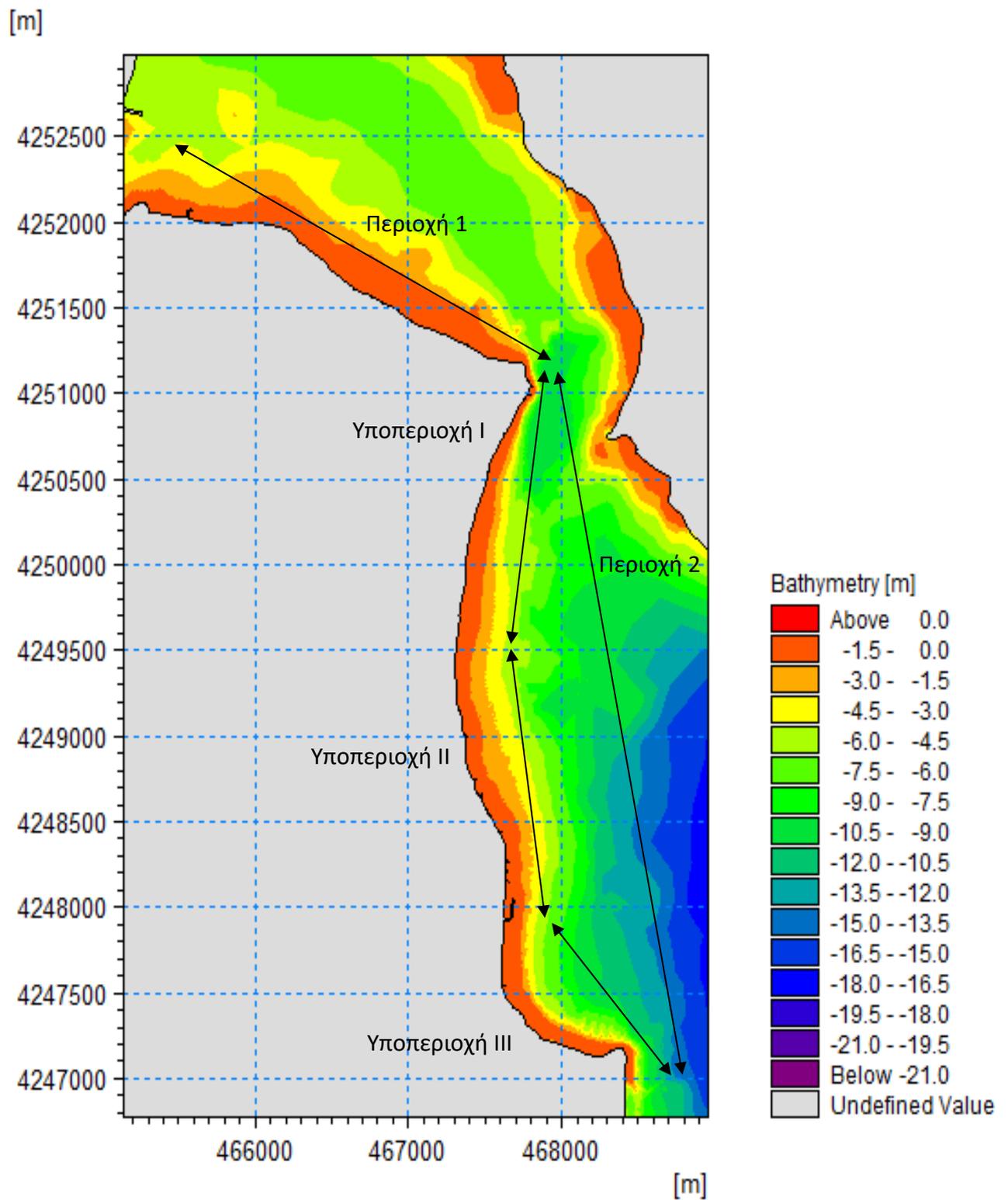
Πιο συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο χρησιμοποιείται το φασματικό μοντέλο Spectral Waves FM για τον προσδιορισμό του σημαντικού ύψους κύματος  $H_s$  που αναπτύσσεται στην περιοχή μελέτης για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα της περιοχής.

Στη συνέχεια, με δεδομένο το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας από το μοντέλο Spectral Waves FM, χρησιμοποιήθηκε το υδροδυναμικό μοντέλο HD του MIKE 21 Flow Model FM, με το οποίο προσδιορίστηκε το διάνυσμα της ταχύτητας του κυματογενούς ρεύματος για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα. Παράλληλα με την προσομοίωση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών, υπολογίστηκαν οι συνθήκες στερεομεταφοράς στην περιοχή μελέτης με τη βοήθεια του μοντέλου ST του MIKE 21 Flow Model FM. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν τα διανύσματα της στερεομεταφοράς

Ακολούθως παρουσιάζονται χωρικές απεικονίσεις των κυματικών και υδροδυναμικών χαρακτηριστικών καθώς και των διανυσμάτων στερεομεταφοράς για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα. Να διευκρινιστεί πως το κάθε υποπρόγραμμα του MIKE παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού κι άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών, ωστόσο για την καλύτερη εποπτεία και κατανόηση επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν τα ανωτέρω για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

#### 7.3.1 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Ο διαχωρισμός της περιοχής μελέτης σε επιμέρους τμήματα ακολουθεί τη λογική που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4, τη δημιουργία δηλαδή φυσιογραφικών μονάδων ανεξάρτητων μεταξύ τους ως προς τη στερεομεταφορά. Οι περιοχές αυτές καθώς και τα βάθη της περιοχής μελέτης φαίνονται στο Σχήμα 7.2. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων γίνεται ανά περιοχή με λεπτομερέστερη απεικόνιση όπου κρίνεται αναγκαίο. Για το σκοπό αυτό η περιοχή 2 χωρίζεται σε τρεις υποπεριοχές. Οι βαθυμετρικές καμπύλες της περιοχής μελέτης προήλθαν έπειτα από ψηφιοποίηση στο AutoCAD του βυθομετρικού χάρτη της ηλεκτρονικής εφαρμογής Navionics που καταγράφει τα βάθη από ειδικά επανδρωμένα σκάφη με όργανα τύπου sonar.



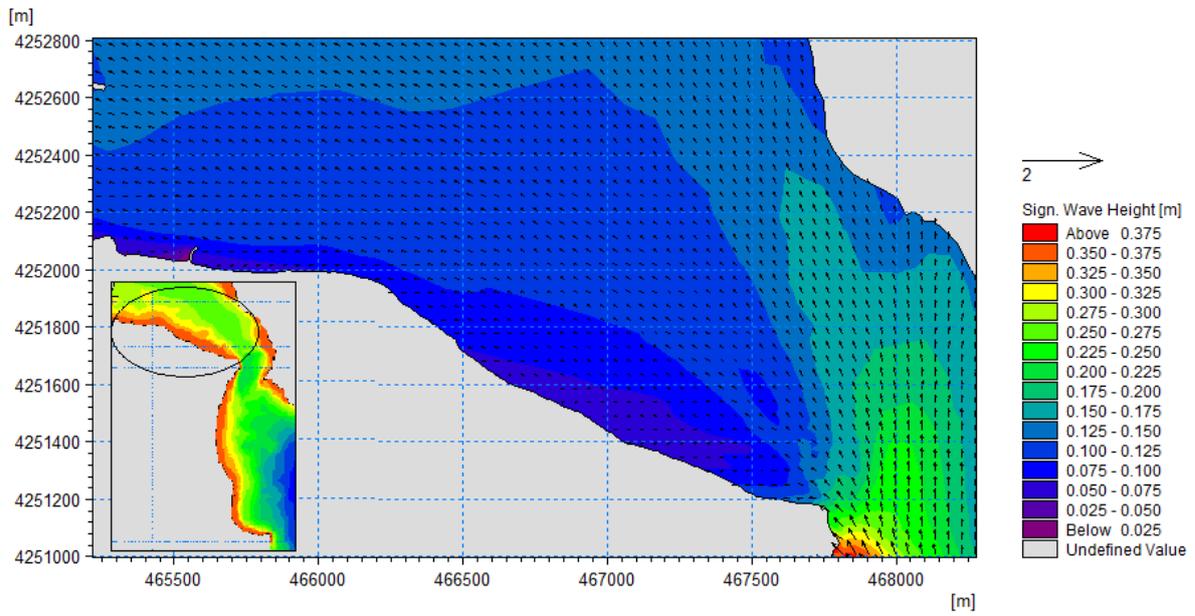
Σχήμα 7.2: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης

### **Κυματικό μοντέλο**

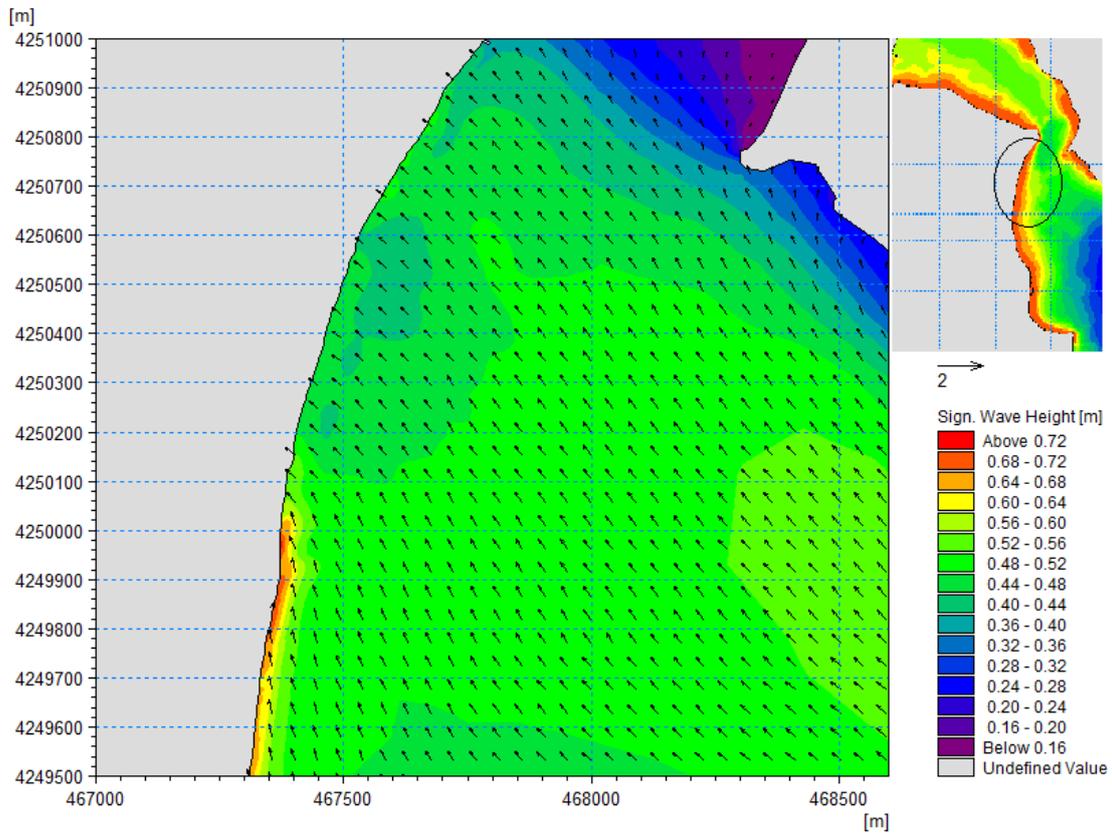
Μελετώντας τα αποτελέσματα για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται εντατικοποίηση των κυματικών χαρακτηριστικών όσο το κύμα προσεγγίζει την ακτή σε κάποια κρίσιμα σημεία της ακτογραμμής. Πιο συγκεκριμένα το ύψος κύματος κατά τόπους αυξάνεται αντί να μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως στις υποπεριοχές I, II της περιοχή 2 και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή του Φάρου και στην περιοχή Παραλία Αυλίδας βόρεια του λιμενίσκου όπως φαίνεται στα Σχήματα 7.4 και 7.5. Είναι σαφές πως το φαινόμενο αφορά σε όλα τα σημεία όπου έχει κατασκευαστεί κατακόρυφο τοίχιο. Η ύπαρξη κατακόρυφου τοιχίου συνεπάγεται πολύ χαμηλό συντελεστή διαπερατότητας για την κατασκευή και αντίστοιχα πολύ υψηλό συντελεστή ανάκλασης (Goda et al, 1967). Οι προσπίπτοντες κυματισμοί ανακλώνται και η συμβολή τους με τους επερχόμενους προκαλεί τη δημιουργία στάσιμου κύματος και επομένως την εντατικοποίηση της κυματικής ενέργειας με παράλληλη αύξηση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (set up).

Στο νοτιότερο τμήμα της περιοχής, στην Πούντα και στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης στην περιοχή Βαθύ τα ύψη κύματος μειώνονται ομαλά καθώς στο τμήμα αυτό δεν έχει κατασκευαστεί κατακόρυφο τοίχιο και η ακτογραμμή παρουσιάζει ήπια κλίση.

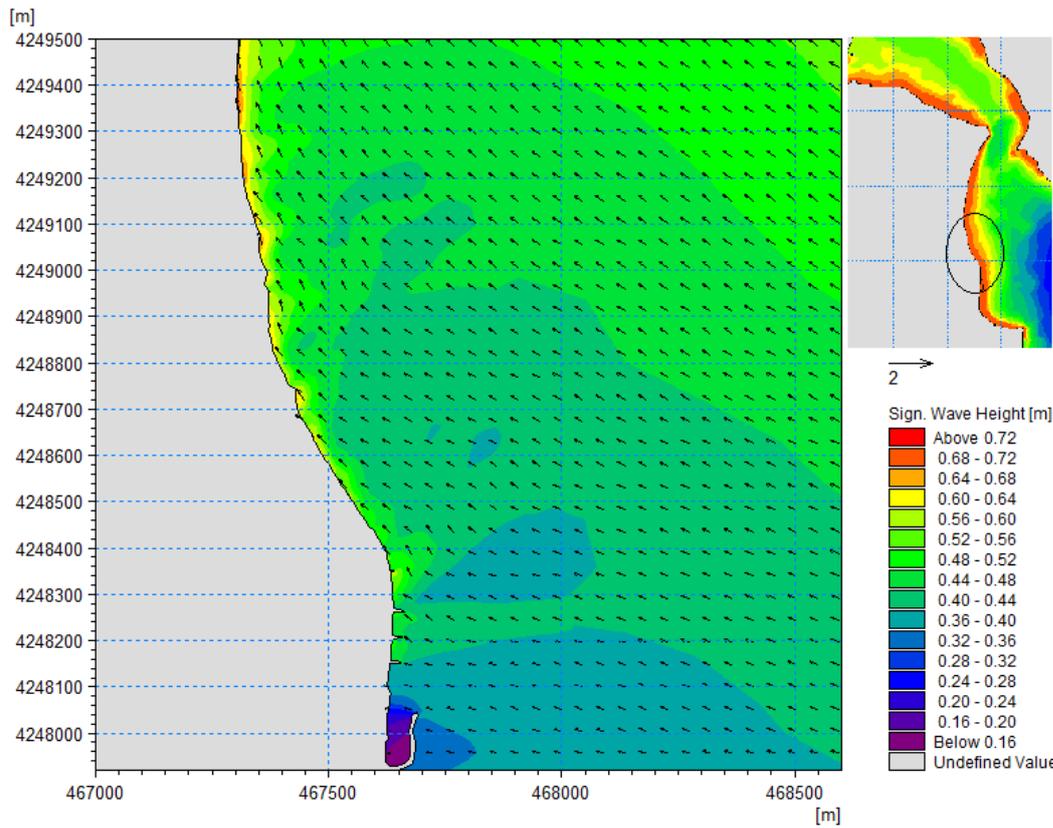
Οι τιμές που λαμβάνει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, όπως αναφέρθηκε, ποικίλουν ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης το σημαντικό ύψος κύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,12 μέτρα. Στην περιοχή 2 όπου εμφανίζονται τα πιο έντονα κυματικά χαρακτηριστικά οι τιμές του ύψους κύματος είναι της τάξης των 0,48- 0,72 μέτρα. Οι πιο ψηλές τιμές εμφανίζονται στο τμήμα της περιοχής 2 που αντιστοιχεί στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρου. Είναι εμφανής η επίδραση του κατακόρυφου τοιχίου στην αύξηση των τιμών. Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές του ύψους κύματος είναι μικρότερες των 0,40 μέτρων και εντός της λιμενολεκάνης δεν ξεπερνούν τα 0,2 μέτρα. Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης, οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,36 μέτρα.



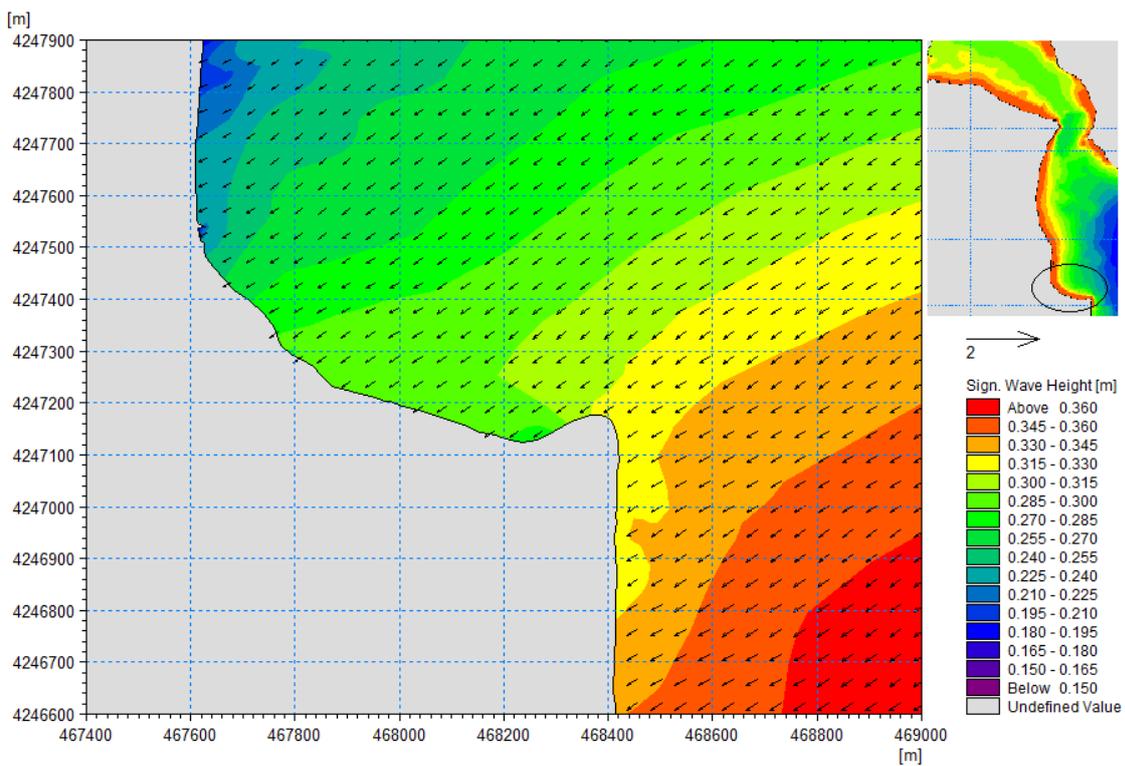
Σχήμα 7.3: Σημαντικό ύψος κύματος – Περιοχή 1



Σχήμα 7.4: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.5: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II

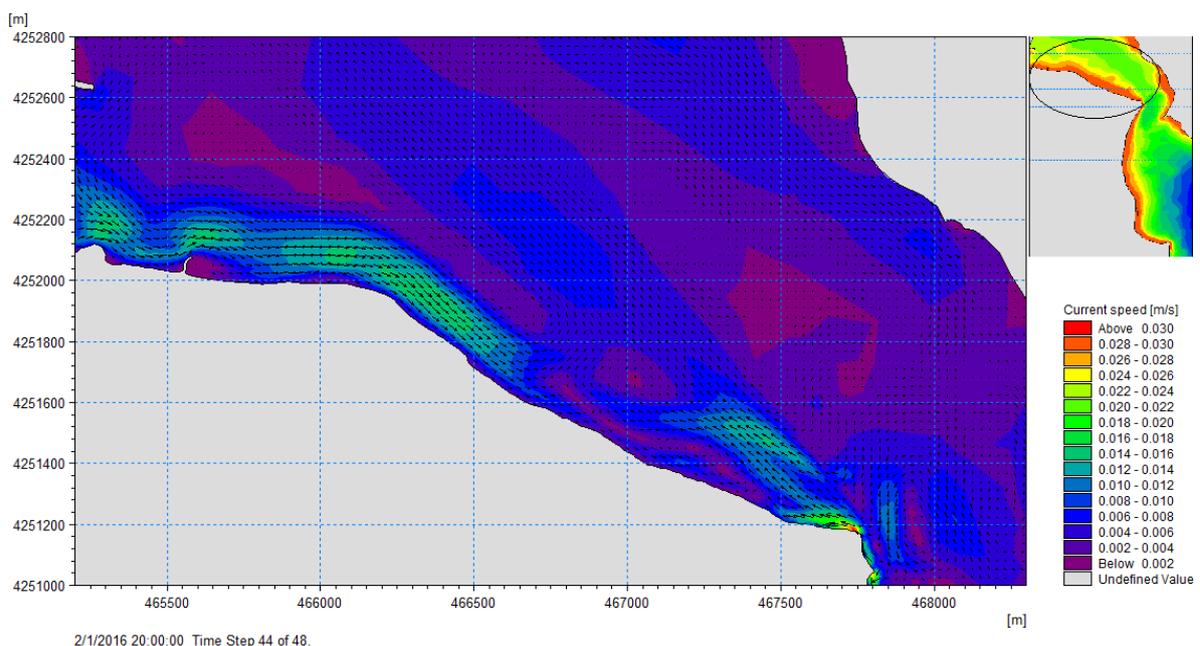


Σχήμα 7.6: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή III

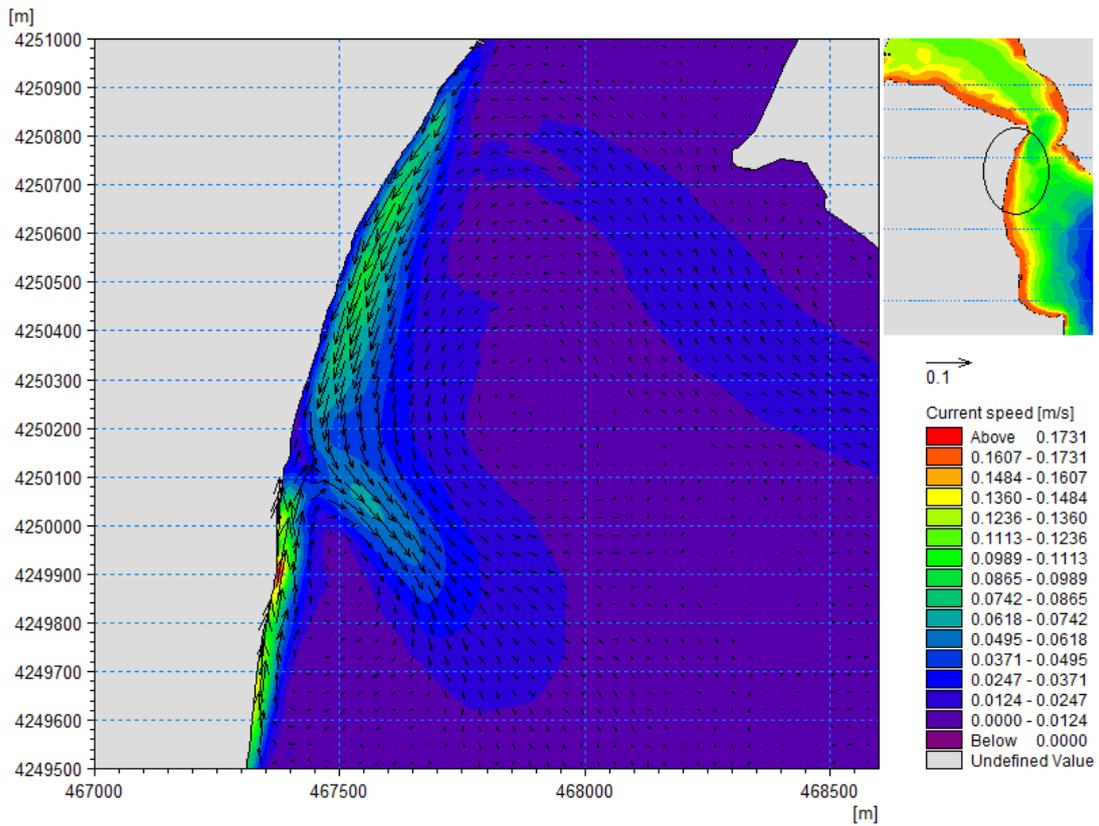
## Υδροδυναμικό μοντέλο

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πως η υδροδυναμική κυκλοφορία χαρακτηρίζεται από παράκτιο ρεύμα που εντείνεται στο τμήμα της ακτογραμμής όπου έχει κατασκευαστεί το κατακόρυφο τοίχιο. Πιο συγκεκριμένα στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος στις υποπεριοχές I, II η συμβολή δύο ρευμάτων κατά μήκος της ακτής αντίθετης φοράς, το πρώτο με νότιο και το δεύτερο με βόρειο προσανατολισμό, (Σχήμα 7.8) εκτρέπει τη ροή προς τα ανοιχτά μέσω της δημιουργίας βελοειδούς ρεύματος. Παρατηρείται επίσης η δημιουργία στροβίλων στο Σχήμα 7.9. Στην περιοχή πέριξ του λιμενίσκου η οποία παρουσιάζεται στα Σχήμα 7.9, 7.10 η κύρια κατεύθυνση των ρευμάτων τόσο ανάντη του λιμενίσκου όσο και κατάντη είναι προς τα Νότια. Στο βορειότερο παράκτιο τμήμα, στον οικισμό Βαθύ καθώς και στο νοτιότερο άκρο της ακτής μελέτης η κυματική ενέργεια είναι μειωμένη με αποτέλεσμα το πεδίο κυματογενούς κυκλοφορίας να μειώνεται.

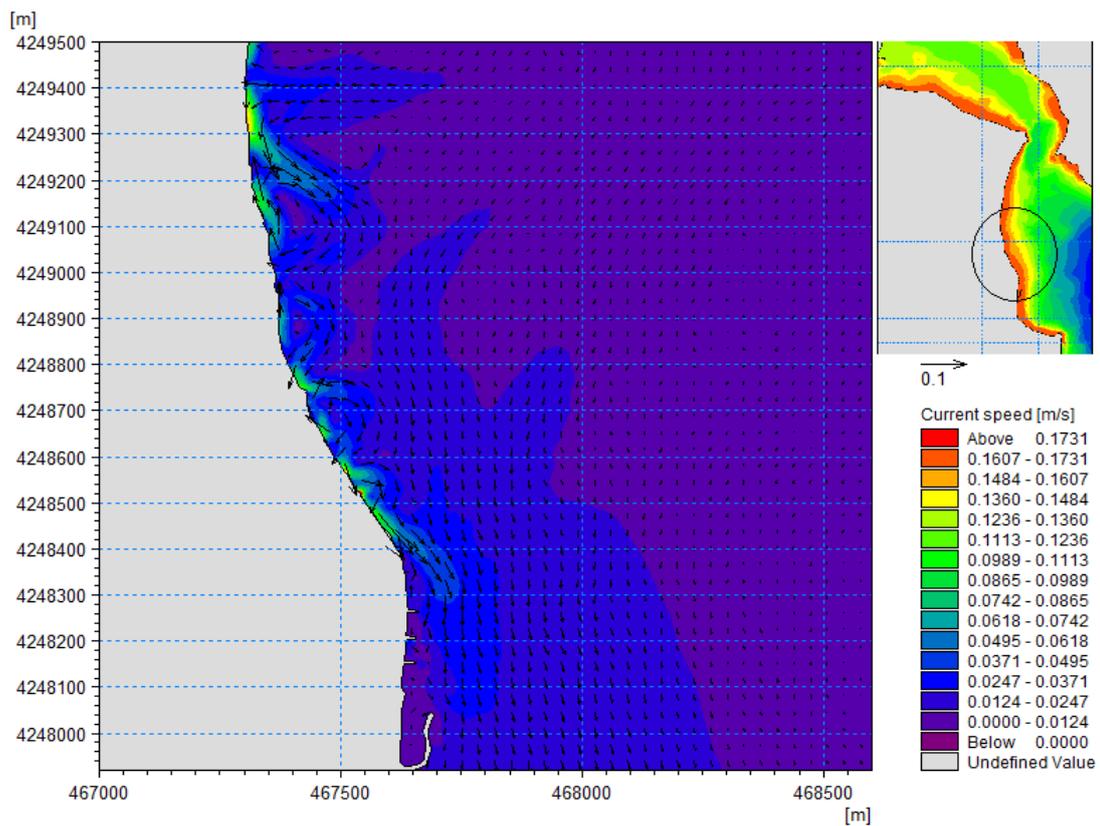
Οι τιμές που λαμβάνει το εύρος της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η ταχύτητα του παράκτιου ρεύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,018 m/s. Στην περιοχή 2 όπου εμφανίζονται τα πιο έντονα κυματικά χαρακτηριστικά εξαιτίας της ανάκλασης οι τιμές της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος είναι της τάξης των 0,062- 0,13 m/s. Οι πιο ψηλές τιμές εμφανίζονται στο τμήμα της υποπεριοχής I, II που αντιστοιχεί στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος. Είναι και εδώ εμφανής η επίδραση του κατακόρυφου τοιχίου στην αύξηση των τιμών. Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος είναι μικρότερες από 0,040 m/s. Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,020 m/s.



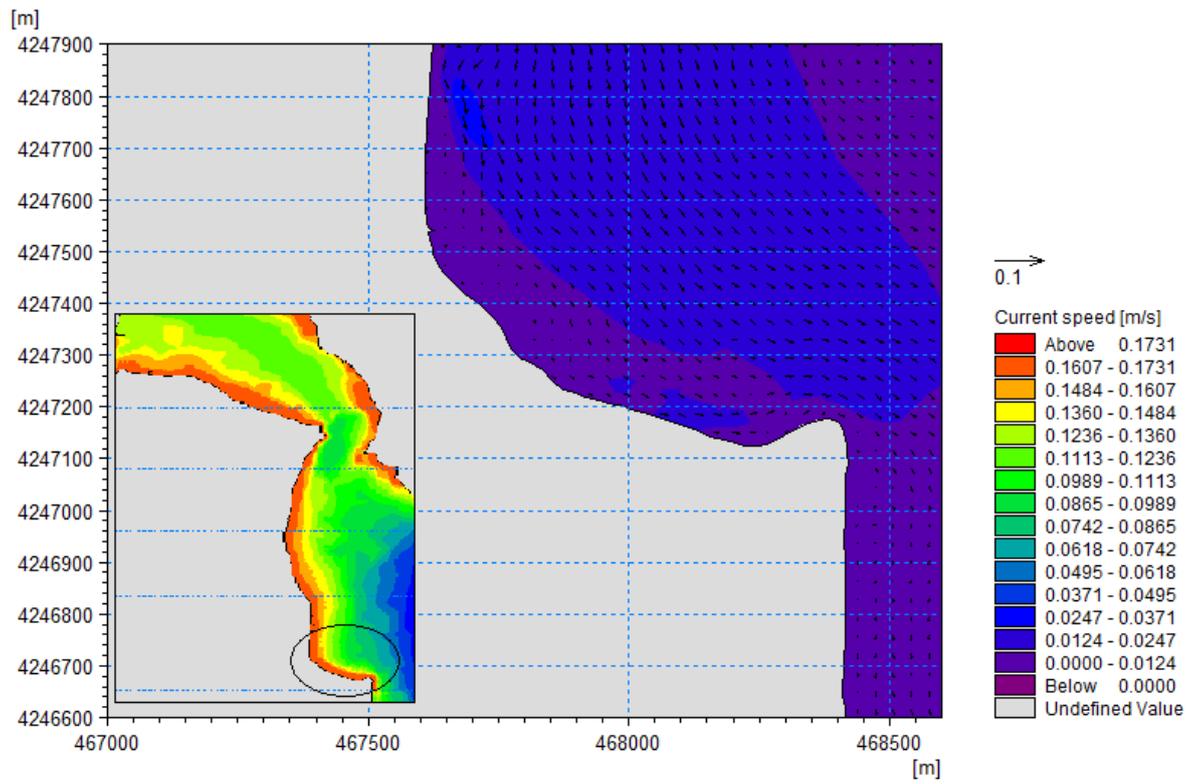
Σχήμα 7.7: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων. Περιοχή 1



Σχήμα 7.8: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων. Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.9: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων. Υποπεριοχή ΙΙ

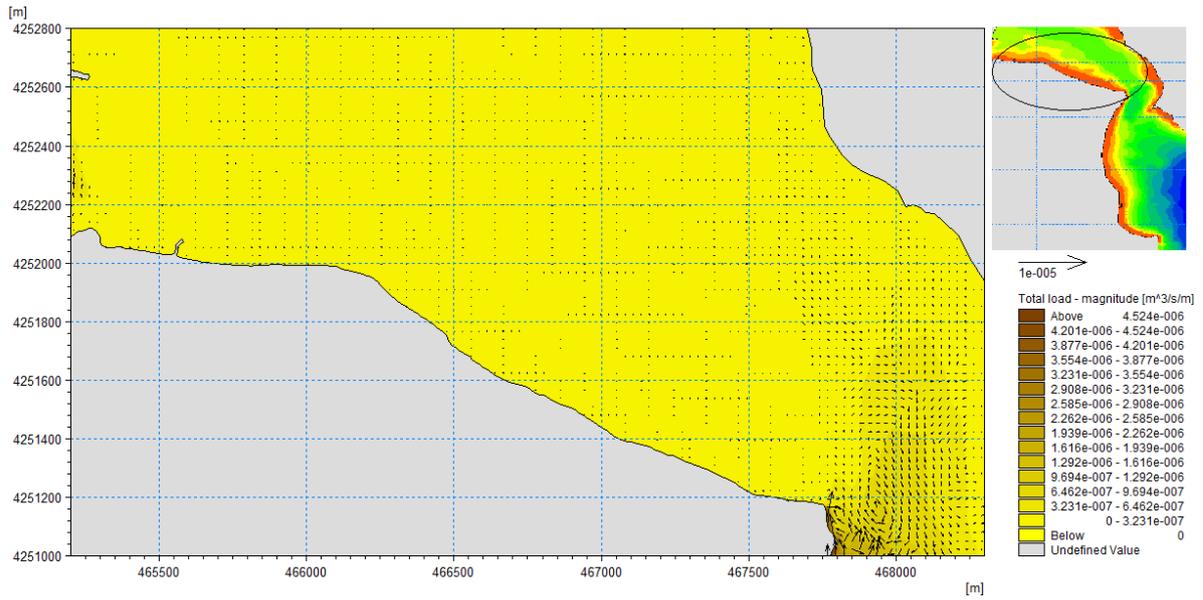


Σχήμα 7.10: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων. Υποπεριοχή III

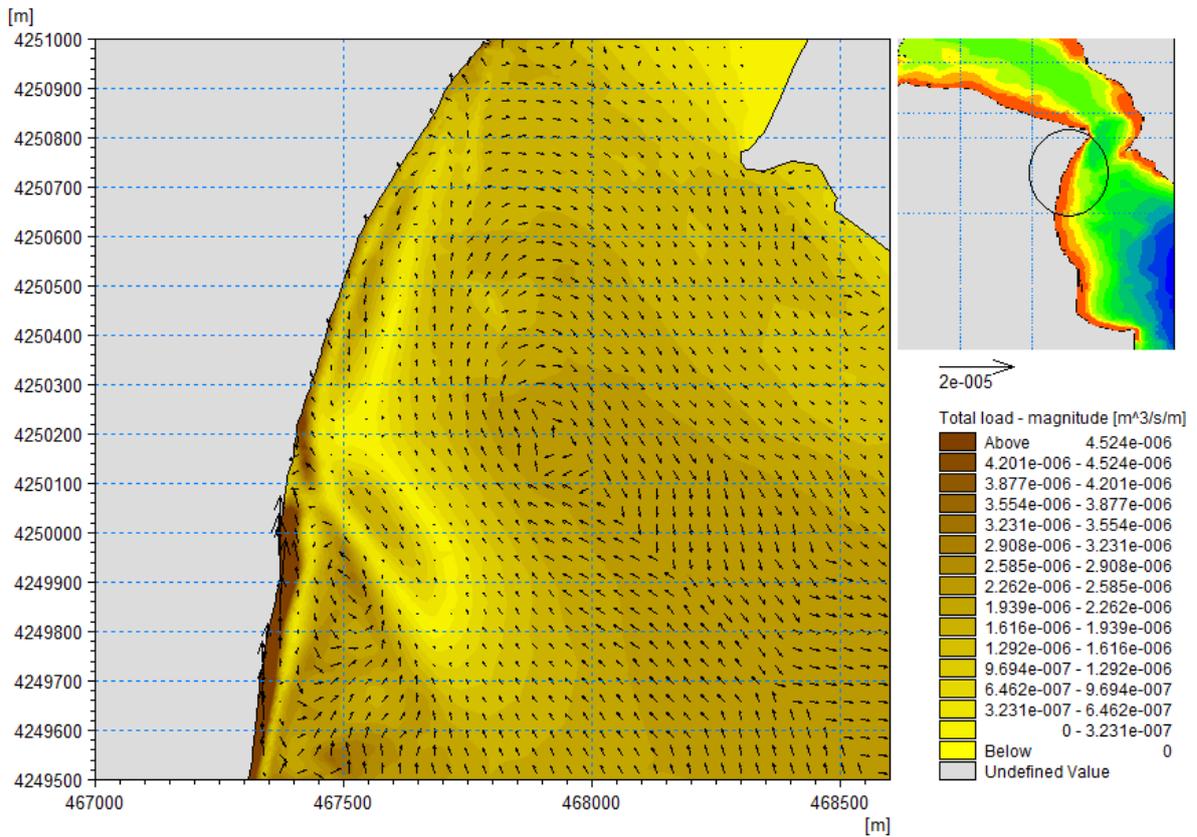
## Μοντέλο στερεομεταφοράς

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το πεδίο της στερεομεταφοράς και για την εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα παρατηρείται πως τα παράκτια ρεύματα όπως καταγράφηκαν από το πεδίο των ταχυτήτων είναι η γενεσιουργός αιτία μετακίνησης του ιζήματος. Τα διανύσματα της στερεομεταφοράς επομένως ακολουθούν εν γένει την πορεία της υδροδυναμικής κυκλοφορίας. Πιο συγκεκριμένα στο παράκτιο τμήμα του οικισμού του Φάρου ακολουθεί τα ρεύματα αντίθετης φοράς καθώς και το βελοειδές ρεύμα που δημιουργείται (Σχήμα 7.12). Ακολουθεί επίσης τους στροβίλους της κυματογενούς κυκλοφορίας που παρατηρούνται στην υποπεριοχή II (Σχήμα 7.13). Επίσης στην περιοχή βόρεια του λιμενίσκου που ονομάζεται Παραλία Αυλίδας η κατεύθυνση της στερεομεταφοράς εκτρέπεται εξαιτίας των ανθρωπογενών παρεμβάσεων και έχει φορά προς τα Βόρεια (Σχήμα 7.13). στο Βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Βαθύ και στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα. Η εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα δίνει μια γενική εικόνα διάβρωσης σε μεγάλο μήκος της ακτής στα σημεία όπου παρατηρήθηκαν μεγάλα κύματα και μεγάλες ταχύτητες. Τα διανύσματα των ταχυτήτων στα κρίσιμα σημεία της ακτογραμμής, εξαιτίας των στροβίλων και του βελοειδούς ρεύματος έχουν ως αποτέλεσμα να ωθούν το ίζημα προς τα βαθιά. Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως η διάβρωση συμπίπτει με το μήκος της ακτογραμμής στο οποίο έχει κατασκευαστεί το κατακόρυφο τοιχίο. Στα υπόλοιπα σημεία όπου δεν υπάρχει τοιχίο (για παράδειγμα στο βόρειο τμήμα της ακτής μελέτης) υπάρχει απόθεση.

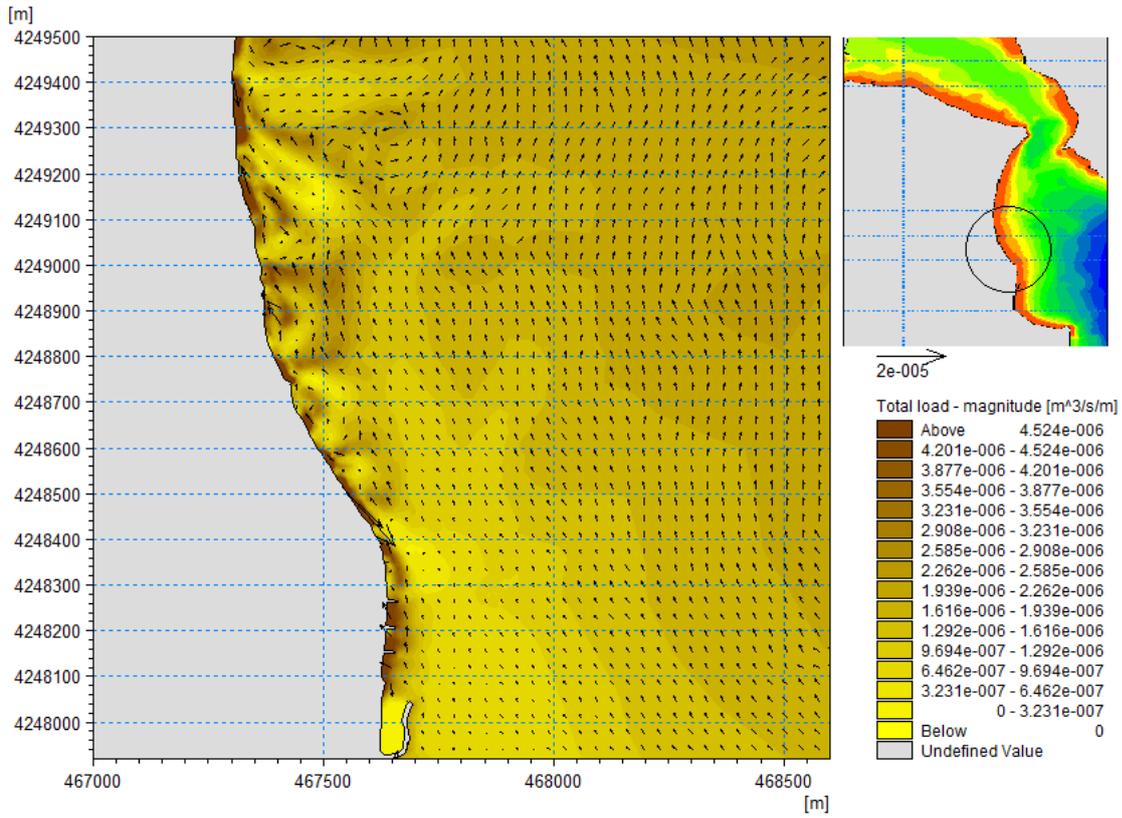
Οι τιμές που λαμβάνει η στερεομεταφορά και η μορφολογία του πυθμένα κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα (Σχήμα 7.11). Στην υποπεριοχή I η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή και ακολουθεί τη δημιουργία του βελοειδούς ρεύματος με τιμές που προσεγγίζουν τα  $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  και η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα έχει διαβρωτικό χαρακτήρα. Παρατηρούνται αποθέσεις στη νότια παρειά προβόλου που εντοπίζεται στο σημείο. Στην υποπεριοχή II που αφορά το παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρου, όπου εμφανίζονται εξίσου έντονα κυματικά χαρακτηριστικά εξαιτίας της ανάκλασης, η στερεομεταφορά ακολουθεί τους στροβίλους της κυματογενούς κυκλοφορίας και προσεγγίζει την τιμή των  $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή της τάξης των  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  και στη μορφολογία του πυθμένα παρατηρούνται αποθέσεις νότια του λιμενίσκου. Βόρεια του λιμενίσκου και εξαιτίας των τριών προβόλων που υπάρχουν στο σημείο παρατηρούνται αποθέσεις ανάντη αυτών. Στο τμήμα της υποπεριοχής III (Σχήμα 7.14), το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης παρατηρείται στερεομεταφορά μικρής έντασης παράλληλα στην ακτογραμμή και η μεταβολή τη μορφολογίας του πυθμένα είναι αμελητέα.



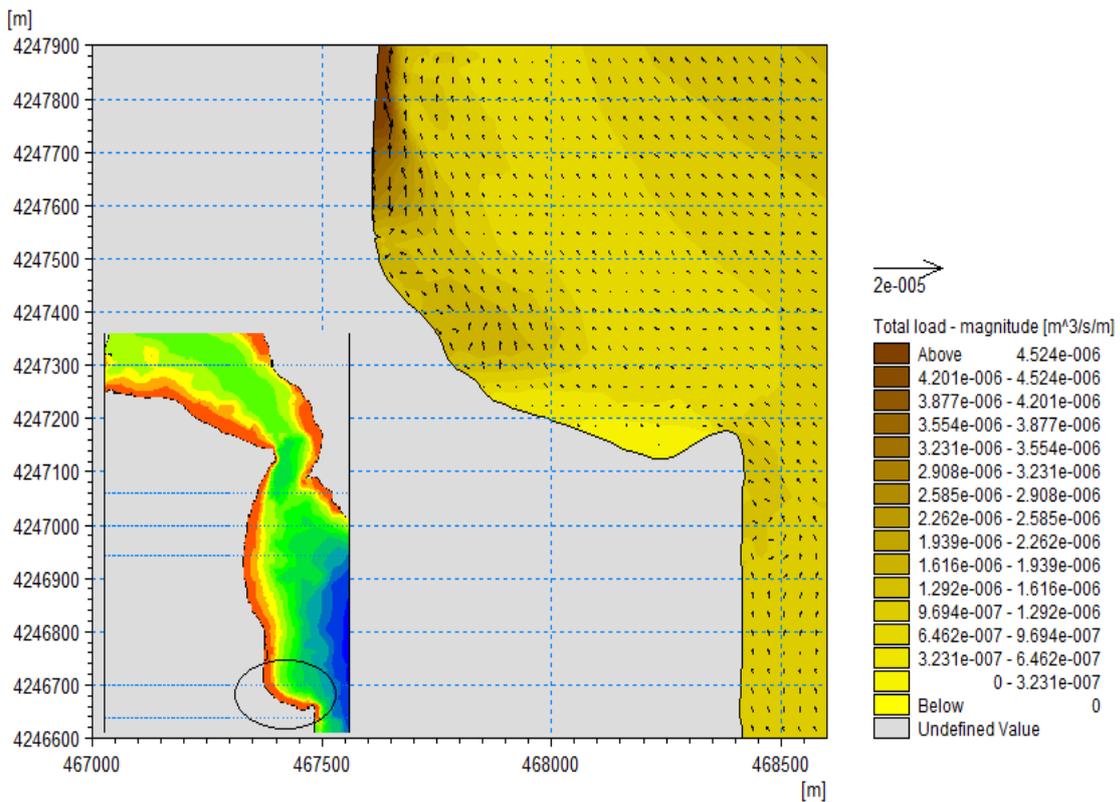
Σχήμα 7.11: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1



Σχήμα 7.12: Διανύσματα πεδίου στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή I



Σχήμα 7.13: Διανύσματα πεδίου στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.14: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III

### 7.3.2 Συμπεράσματα

Το αντικείμενο της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας είναι η αναγνώριση και η αντιμετώπιση των συνεπειών του φαινομένου της διάβρωσης στην περιοχή μήκους περίπου 6 χλμ. στο παράκτιο τμήμα της περιοχής της Αυλίδας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αντιμετώπιση του προβλήματος διάβρωσης στο τμήμα βόρεια του λιμενίσκου και έμπροσθεν του οικιστικού μετώπου. Η διερεύνηση έγινε με χρήση μαθηματικών μοντέλων.

Τα αποτελέσματα των εφαρμογών έδειξαν ότι η επαλληλία των τριών κυματικών καταστάσεων (B, BA, NA) καθώς και τα παραγόμενα από αυτούς κυματογενή ρεύματα προκαλούν στερεομεταφορά ως εξής: Μεταφέρουν το ίζημα ανάλογα με τη γεωμορφολογία και τις ανθρώπινες παρεμβάσεις κατά κύριο λόγο προς τα ανοιχτά εξαιτίας της δημιουργίας βελοειδούς ρεύματος κατά τη συμβολή των δύο αντίθετης κατεύθυνσης ρευμάτων καθώς και εξαιτίας της δημιουργίας στροβίλων έμπροσθεν του ανακλαστικού μετώπου. Η στερεομεταφορά ακολουθεί εν γένει την κυματογενή κυκλοφορία. Το αποτέλεσμα είναι η πρόκληση γενικής εικόνας διάβρωσης στο παράκτιο μέτωπο της ακτής στα τμήματα όπου ταυτόχρονα συνυπάρχει το κατακόρυφο ανακλαστικό τοιχίο προστασίας. Στην υπόλοιπη έκταση της ακτής δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στην ακτογραμμή καθώς η ακτογραμμή εμφανίζει ήπια κλίση.

Πιο συγκεκριμένα στη περιοχή 1 παρατηρείται ήπιος κυματισμός και κατά συνέπεια περιορισμένη κυματογενής κυκλοφορία. Η στερεομεταφορά στην περιοχή είναι αμελητέα. Στην υποπεριοχή I της περιοχής 2 όπου δεν καταγράφονται ανθρωπογενείς παρεμβάσεις παρατηρούνται ισχυρά ρεύματα αντίθετης κατεύθυνσης που καταλήγουν στη δημιουργία βελοειδούς ρεύματος. Η στερεομεταφορά ακολουθεί το ρεύμα και εκτρέπεται στα ανοιχτά. Στην υποπεριοχή II η ύπαρξη του ανακλαστικού μετώπου προκαλεί τη δημιουργία στάσιμων κυματισμών και κατά συνέπεια αυξημένες τιμές του ύψους κύματος. Η κυματογενής κυκλοφορία παρουσιάζει στροβίλους στην περιοχή, τους οποίους ακολουθεί και η στερεομεταφορά. Στην υποπεριοχή III επικρατούν πιο ήπιες συνθήκες με χαμηλές τιμές στη μετακίνηση του ιζήματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα τμήματα της ακτογραμμής που δέχονται έντονες φορτίσεις σύμφωνα με την προσομοίωση στο υπολογιστικό μοντέλο συμπίπτουν με τα σημεία όπου παρατηρήθηκαν αστοχίες στις υφιστάμενες υποδομές της ακτής μελέτης όπως καταγράφηκαν κατά την επίσκεψη και αυτοψία.

#### 7.4 Ακτομηχανική διερεύνηση έργων προστασίας- Εναλλακτικές λύσεις

Ύστερα από τη μελέτη και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των παράκτιων διεργασιών στην παραλία της Αυλίδας σε συνδυασμό με την επιτόπια αυτοψία όπως αυτή παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 προκύπτει ως συμπέρασμα η ανάγκη σχεδιασμού έργων παράκτιας προστασίας. Τα σημεία της ακτογραμμής που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τρωτότητα και είναι ουσιαστικά πιο ευάλωτα σε διάβρωση εντοπίζονται κυρίως στις υποπεριοχές I και II της περιοχής 2. Τα συγκεκριμένα σημεία συμπίπτουν με το τμήμα της ακτογραμμής όπου έχει κατασκευαστεί κατακόρυφο τοιχίο, η κατασκευή του οποίου προκαλεί πλήρη ανάκλαση στους επερχόμενους κυματισμούς, δημιουργία στάσιμου κύματος, εντατικοποίηση των κυματικών χαρακτηριστικών και εκτροπή των παράκτιων ρευμάτων προς τα ανοιχτά. Η αλλαγή του μέτρου και της κατεύθυνσης των διανυσμάτων των ταχυτήτων σε κατεύθυνση κάθετη προς την ακτή (undertow currents) έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση προς τα ανοιχτά των συγκεντρωμένων ιζημάτων.

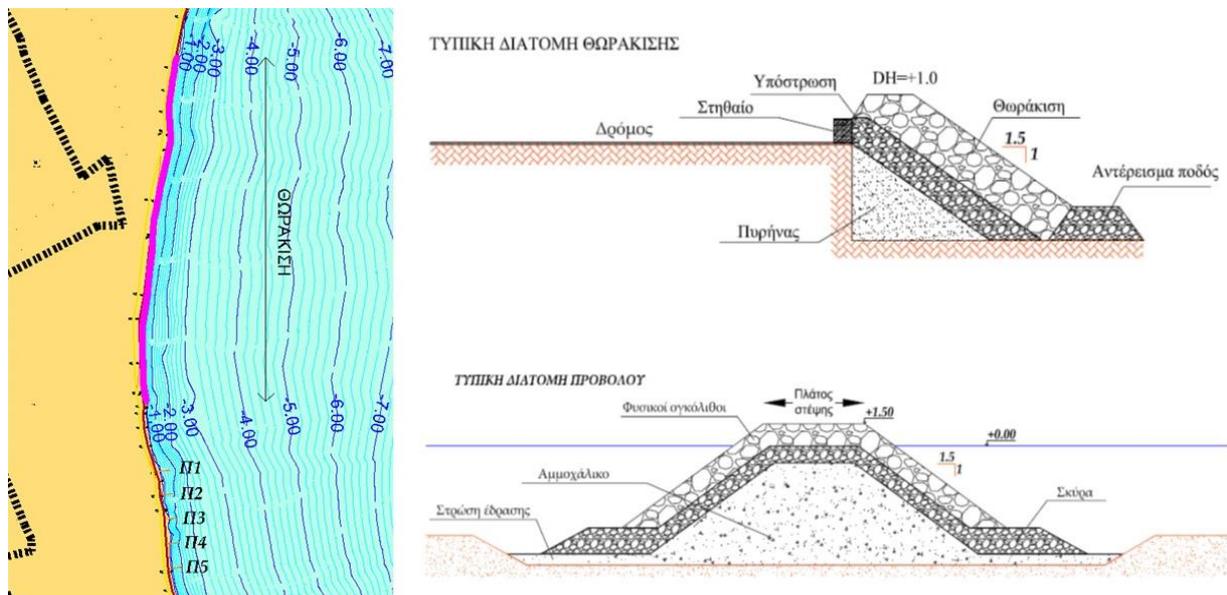
Επιπροσθέτως και σύμφωνα με τη γεωτεχνική μελέτη που έχει διεξαχθεί για την περιοχή στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Καταγραφή – Αξιολόγηση και ιεράρχηση προβλημάτων διάβρωσης της ακτής Παραλία Αυλίδας έως Βαθύ του δήμου Χαλκίδας και οργάνωση του σχεδιασμού προστασίας» (Τσιαμπάος Γ., Σαρόγλου Χ., 2017) προκύπτει πως η γεωλογική σύσταση για το μεγαλύτερο τμήμα της ακτής χαρακτηρίζεται από ιλύες, οπότε αναμένεται στερεομεταφορά υψηλής τάξης. Η ιλύς παρόλο που αποτελεί συνεκτικό ίζημα λόγω της ιδιαίτερα μικρής διαμέτρου ( $D_{50} \sim 0,001 \text{ mm}$ ) και της μικρής σχετικής πυκνότητας ( $\rho \sim 1700 \text{ kg/m}^3$ ) είναι εύκολο να υποστεί μετακινήσεις. Επιπλέον η υποπεριοχή I και η υποπεριοχή II της περιοχής 2 είναι εκτεθειμένες σε μεγάλο ανάπτυγμα πελάγους (FETCH) και άρα το παράκτιο μέτωπο αυτών υπόκεινται σε κυματικά φορτία αρκετά μεγαλύτερα σε σχέση με τις υπόλοιπες περιοχές που είναι σχετικώς προστατευμένες.

Τα έργα παράκτιας προστασίας που προτείνονται για τα τμήματα της περιοχής 2 με τις μεγαλύτερες φορτίσεις, δηλαδή τις υποπεριοχές I και II, έχουν ως στόχο τη θωράκιση του παραλιακού μετώπου ώστε να αποφευχθούν νέες διαβρώσεις στο μέτωπο του οδοστρώματος του παραλιακού δρόμου, την εξάλειψη των υποσκαφών που εντοπίστηκαν στην έδραση του παράκτιου τοιχίου και είναι υπεύθυνες για καθιζήσεις και αστοχίες στις κατασκευές και τη συγκράτηση του ιζήματος για την προστασία της ακτής. Στις περιοχές της ακτής μελέτης που γειτνιάζουν με τις υποπεριοχές I και II προτείνονται έργα ήπιας κλίμακας με στόχο την ανακατασκευή υφιστάμενων έργων υποδομής, την αναβάθμιση του οικιστικού τοπίου και τη διευκόλυνση της πρόσβασης στο θαλάσσιο χώρο.

Μελετήθηκαν 4 εναλλακτικές λύσεις για την προστασία του παράκτιου συστήματος, οι οποίες είναι οι ακόλουθες :

### 7.4.1 Εναλλακτική λύση I

Η πρώτη εναλλακτική λύση περιλαμβάνει ήπιες παρεμβάσεις στην περιοχή 1 και στην υποπεριοχή III της περιοχής 2, ενώ στην υποπεριοχή I και II της περιοχής 2 εξετάζεται περιμετρική θωράκιση του παράκτιου μετώπου, στο οποίο εμφανίζεται έντονη διάβρωση, λόγω του φαινομένου της ανάκλασης των προσπιπτόντων κυματισμών και ρευμάτων. Η θωράκιση θα γίνει με φυσικούς λίθους και ογκόλιθους καλής ποιότητας και ορθής διαβάθμισης και σκοπός είναι να αποφευχθεί η διάβρωση της ακτής αλλά και να προστατευτούν οι υποδομές (δρόμοι, δίκτυα κ.λπ.) καθώς και οι παράκτιοι οικισμοί από τις πλημμύρες, κάτω από συνθήκες ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων συνδυασμένης αναρρίχησης κυματισμών και ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Καραμπάς, 2012). Στην υποπεριοχή II μελετάται επίσης η αφαίρεση των υφιστάμενων προβόλων του Νότιου τμήματος και η αντικατάστασή τους με ένα σύστημα πέντε προβόλων μήκους 30 μέτρων και σε απόσταση μήκους 60 μέτρων- μικρότερη από την τιμή  $D=3*L$ , όπως απαιτείται- και καλύπτοντας όλο το πλάτος της ζώνης θραύσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 7.15:



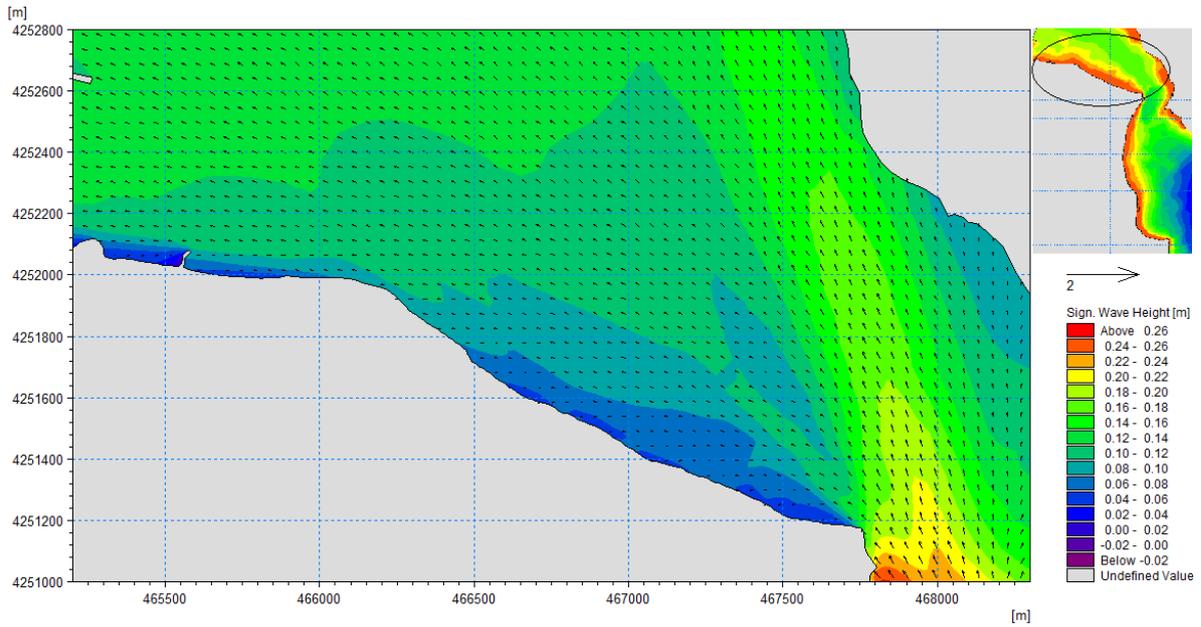
Σχήμα 7.15: Εναλλακτική λύση έργων παράκτιας προστασίας I

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης έχουν ως εξής:

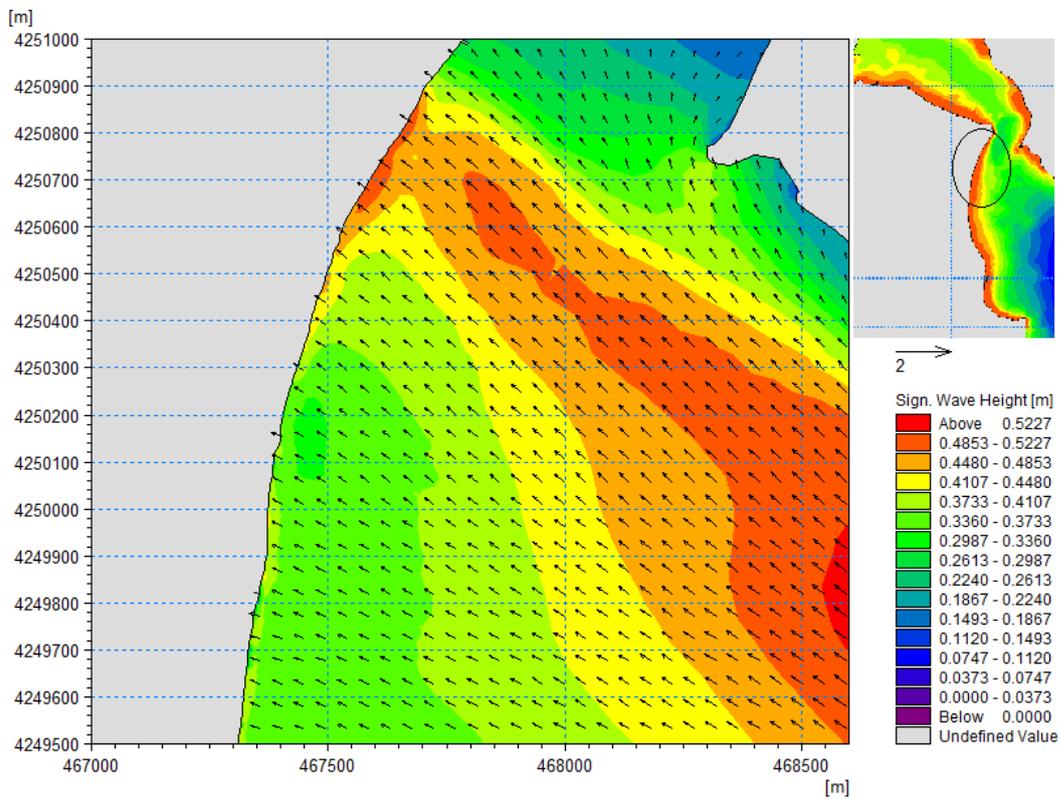
### **Κυματικό μοντέλο**

Μελετώντας τα αποτελέσματα για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρούνται μειωμένα κυματικά χαρακτηριστικά συγκριτικά με εκείνα τη υφιστάμενης κατάστασης ακόμα και στα σημεία της ακτογραμμής που θεωρούνταν κρίσιμα όπως το τμήμα της υποπεριοχής II που δέχεται μεγάλες φορτίσεις εξαιτίας του αναπτύγματος πελάγους. Πιο συγκεκριμένα η θωράκιση της ακτής με λιθορριπή καταργεί τον υψηλό συντελεστή ανάκλασης που παρουσίαζε το κατακόρυφο τοίχιο με αποτέλεσμα οι υδροδυναμικές συνθήκες στην περιοχή να ομαλοποιούνται. Ομοίως η ύπαρξη προβόλων μειώνει την επίδραση του ανακλαστικού μετώπου και απορροφά μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος κυματισμού.

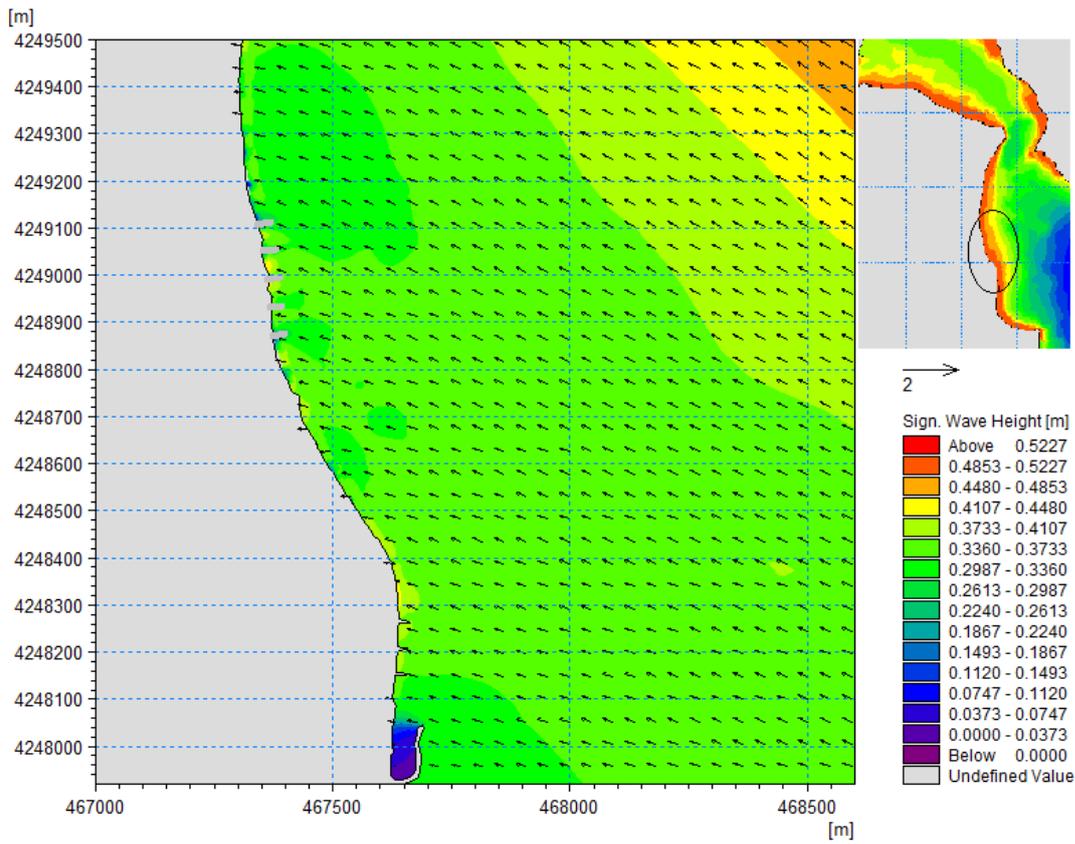
Οι τιμές που λαμβάνει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, όπως αναφέρθηκε, ποικίλουν ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης το ύψος κύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,12 μέτρα χωρίς καμία διαφοροποίηση συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 7.16). Στις υποπεριοχές I, II της περιοχή 2 όπου εμφανίζονται τα πιο έντονα κυματικά χαρακτηριστικά οι τιμές του ύψους κύματος έχουν μειωθεί και δεν ξεπερνούν τα 0,52 μέτρα (Σχήμα 7.17, Σχήμα 7.18). Παρατηρείται πως οι υψηλότερες αυτές τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος καταγράφονται πλέον στην περιοχή του Φάρου η οποία αντιστοιχεί στην υποπεριοχή I, όπου εντοπίζεται ο σχηματισμός της παραλίας και δεν κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός έργων προστασίας εκτός από ήπιες παρεμβάσεις συγκράτησης του ιζήματος. Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές του ύψους κύματος είναι μικρότερες της τάξης των 0,32-0,36 μέτρων και εντός της λιμενολεκάνης δεν ξεπερνούν τα 0,2 μέτρα (Σχήμα 7.18). Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης, οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,36 μέτρα (Σχήμα 7.19).



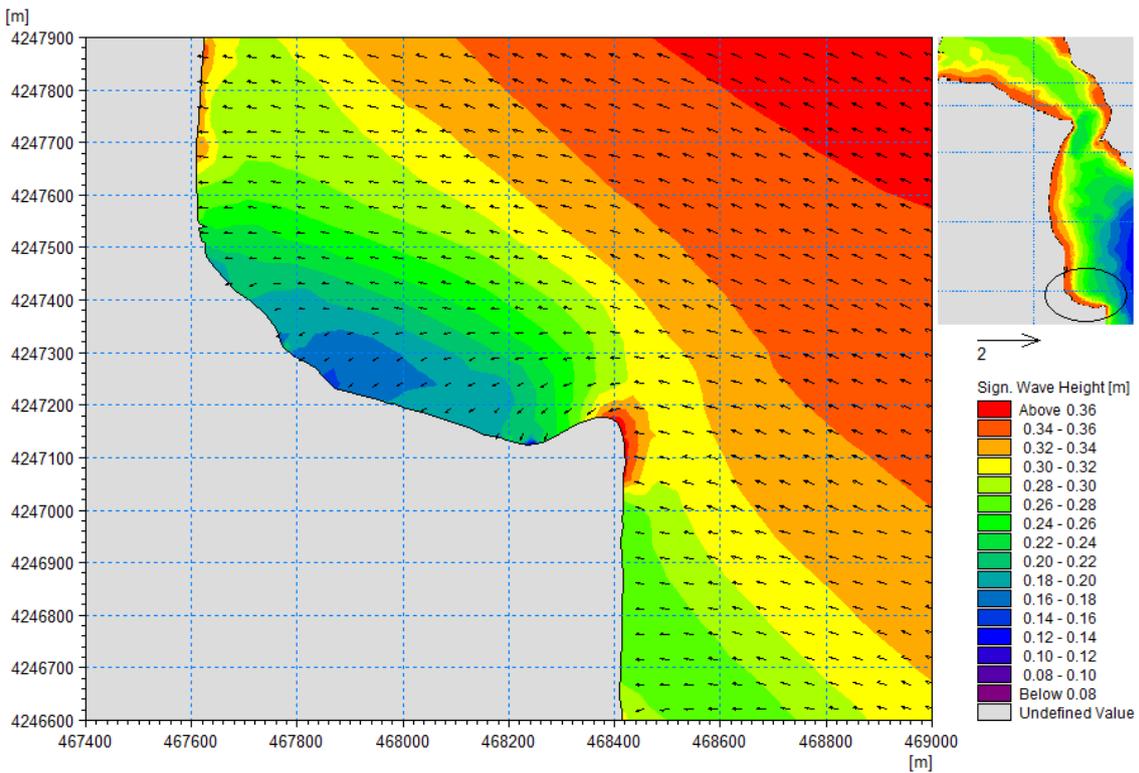
Σχήμα 7.16: Σημαντικό ύψος κύματος – Περιοχή 1



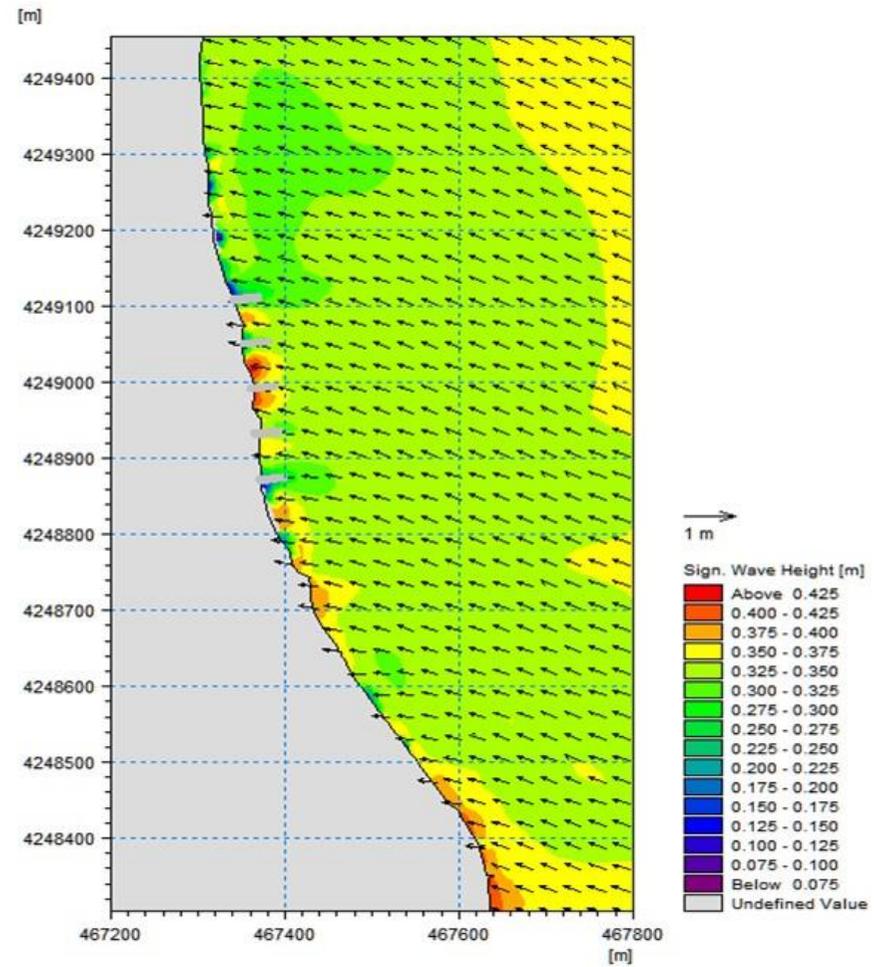
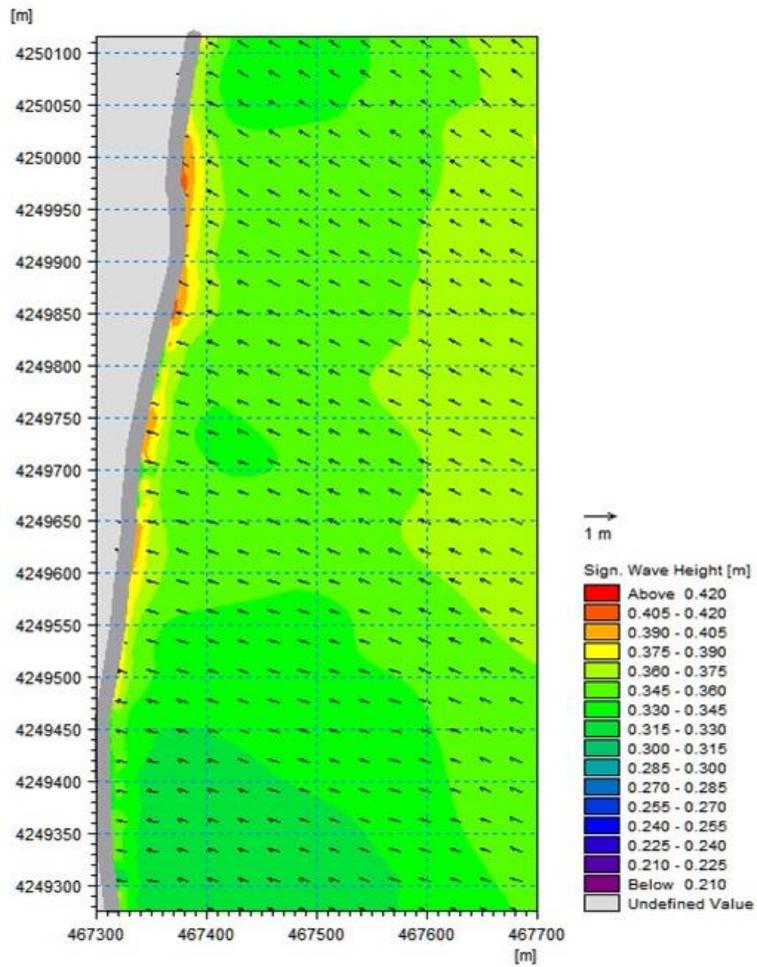
Σχήμα 7.17: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.18: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.19: Σημαντικό ύψος κύματος -Υποπεριοχή III

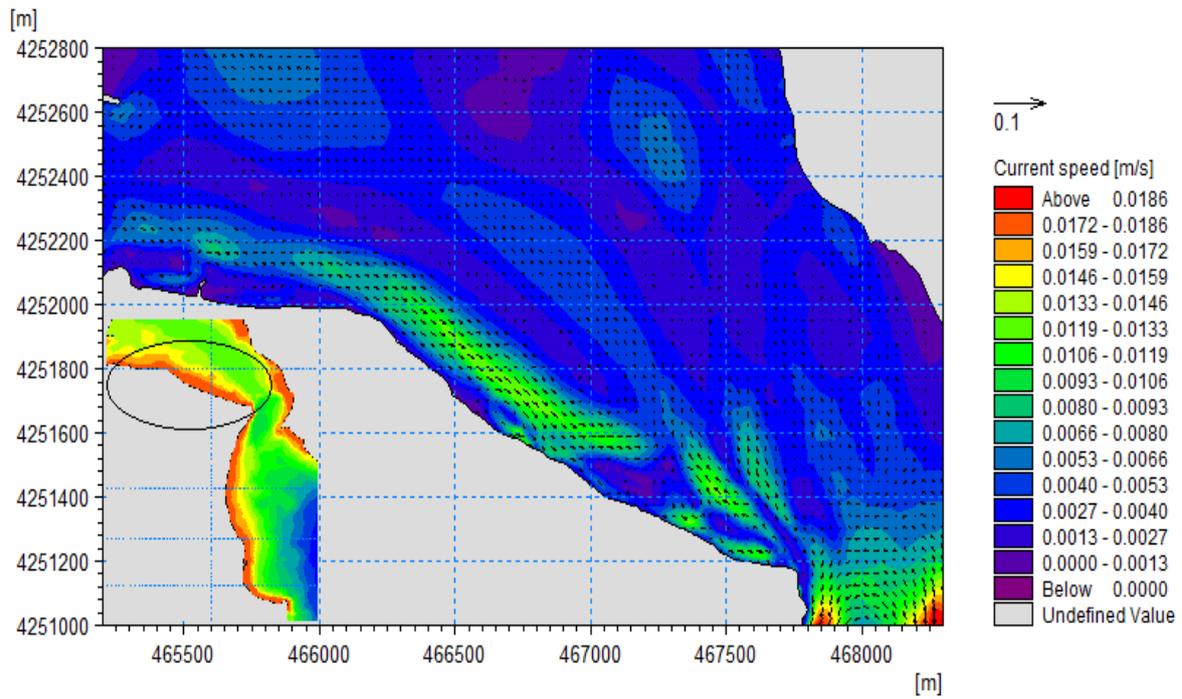


Σχήμα 7.20: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

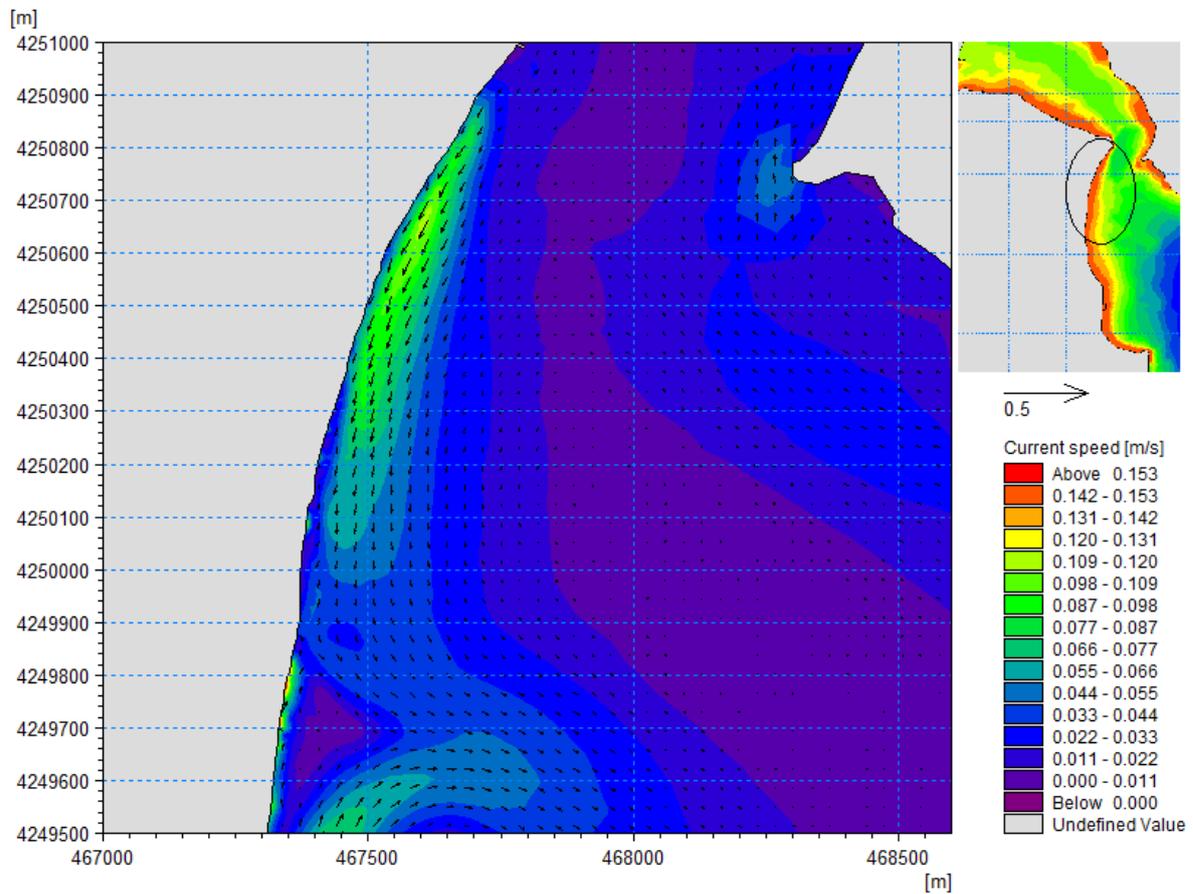
## Υδροδυναμικό μοντέλο

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πως η υδροδυναμική κυκλοφορία χαρακτηρίζεται από παράκτιο ρεύμα με σημαντικά μικρότερες ταχύτητες συγκριτικά με τα αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος (Σχήμα 7.22, Σχήμα 7.23) στις υποπεριοχές I, II ύστερα από τη θωράκιση της ακτογραμμής με λιθορριπή παρατηρείται εξάλειψη του βελοειδούς ρεύματος που δημιουργούταν εξαιτίας των ανακλάσεων και ο προσανατολισμός της υδροδυναμικής κυκλοφορίας είναι προς τα Νότια. Το πιο ισχυρό ρεύμα εντοπίζεται στην υποπεριοχή I όπου δεν έχουν προταθεί έργα προστασίας καθώς στο σημείο υπάρχει παραλία (Σχήμα 7.22). Στο τμήμα της υποπεριοχής II όπου προτείνεται η κατασκευή των προβόλων η υδροδυναμική κυκλοφορία στη σκιά αυτών χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό στροβίλων με εντατικοποίηση της ταχύτητας του ρεύματος μεταξύ των προβόλων και τη δημιουργία μικρού βελοειδούς ρεύματος στο βόρειο τμήμα αυτών (Σχήμα 7.23, Σχήμα 7.25). Στην περιοχή πέριξ του λιμενίσκου η οποία παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.23 και 7.24 η κύρια κατεύθυνση των ρευμάτων τόσο ανάντη του λιμενίσκου όσο και κατάντη είναι προς τα Νότια με χαμηλές ταχύτητες. Στο βορειότερο τμήμα της ακτογραμμής, στον οικισμό Βαθύ και στο νοτιότερο άκρο της ακτής μελέτης η κυματική ενέργεια είναι μειωμένη με αποτέλεσμα το πεδίο κυματογενούς κυκλοφορίας να είναι εξίσου σημαντικά μειωμένο.

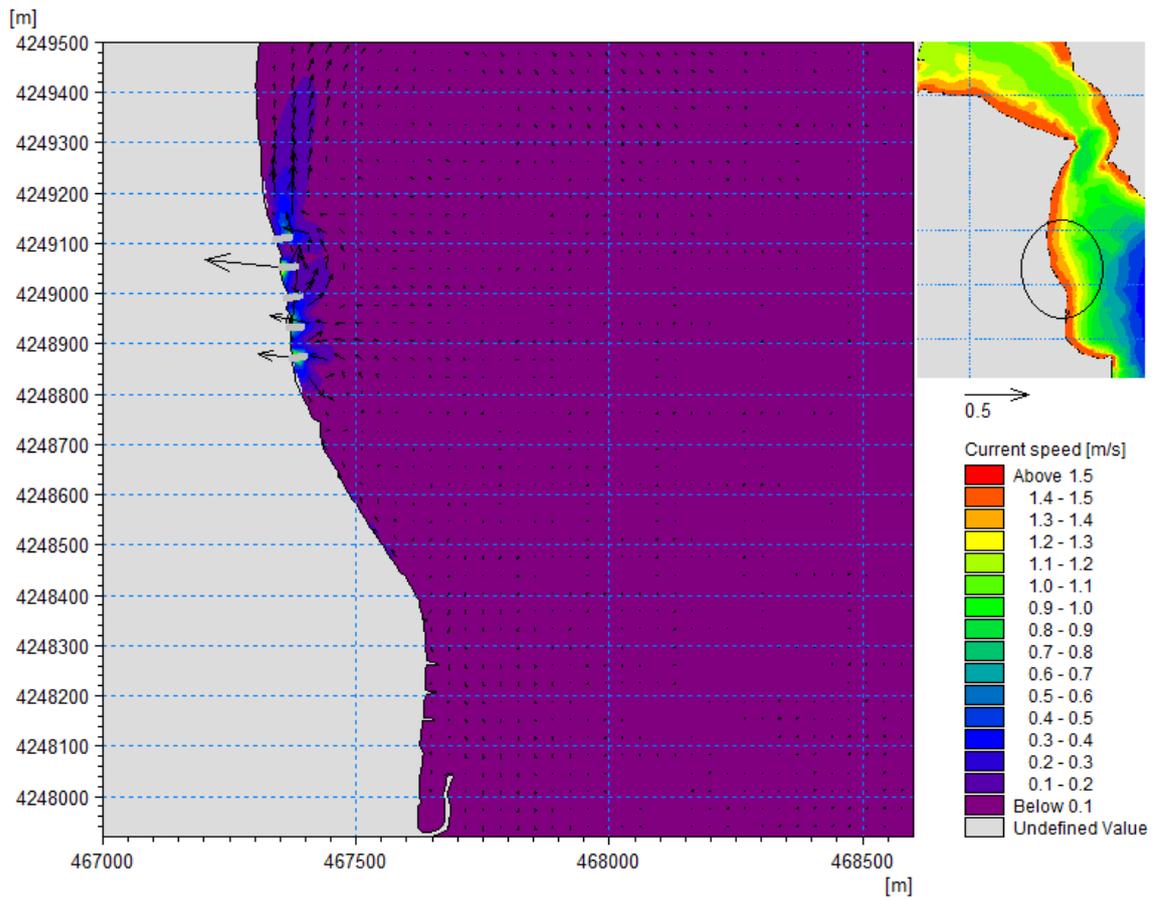
Οι τιμές που λαμβάνει το εύρος της ταχύτητας των παράκτιων ρευμάτων μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η ταχύτητα των παράκτιων ρευμάτων λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,0133 m/s (Σχήμα 7.21). Στην περιοχή 2 όπου προτείνονται τα έργα προστασίας η ταχύτητα των ρευμάτων σημειώνει χαμηλές τιμές. Πιο συγκεκριμένα στην υποπεριοχή I, όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές, η ταχύτητα των ρευμάτων δεν ξεπερνά τα 0,11 m/s. Στην υποπεριοχή II οι τιμές είναι πολύ χαμηλές της τάξης των 0,08 m/s με εξαίρεση τους στροβίλους που δημιουργούνται ανάμεσα στους προβόλους. Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος είναι μικρότερες από 0,040 m/s. Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,020 m/s.



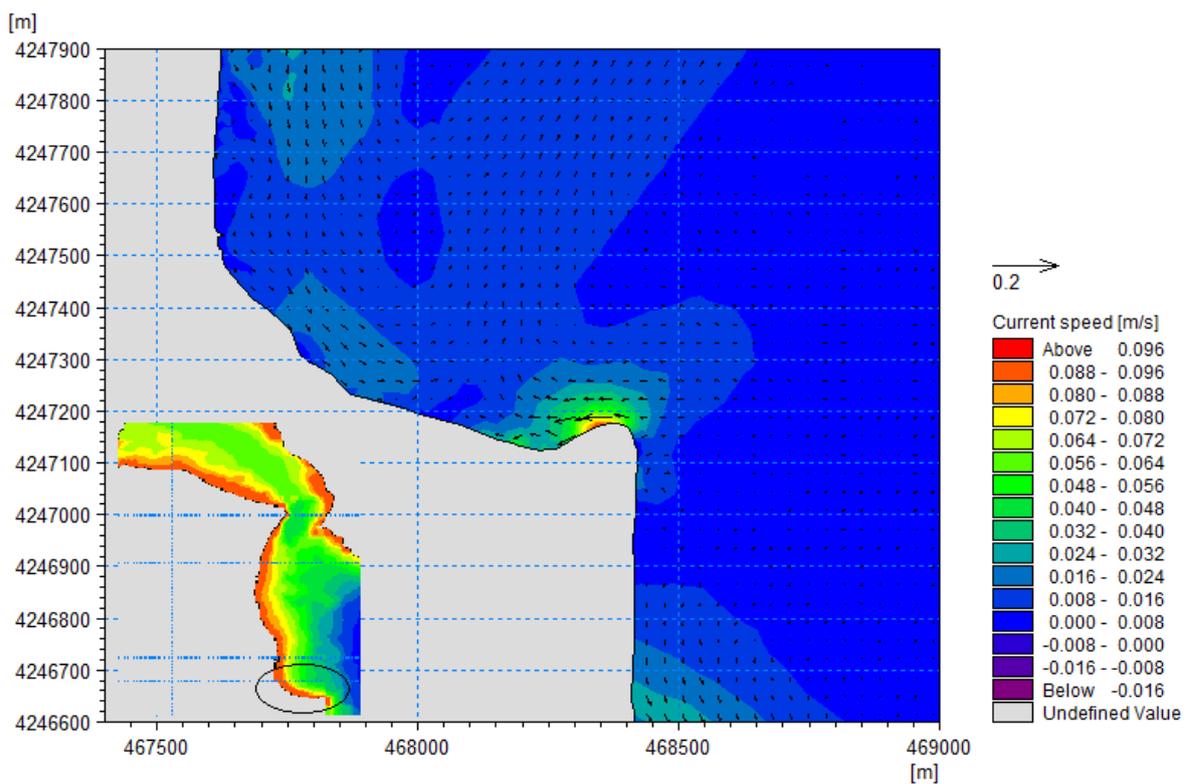
Σχήμα 7.21: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1



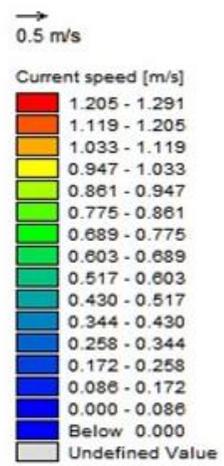
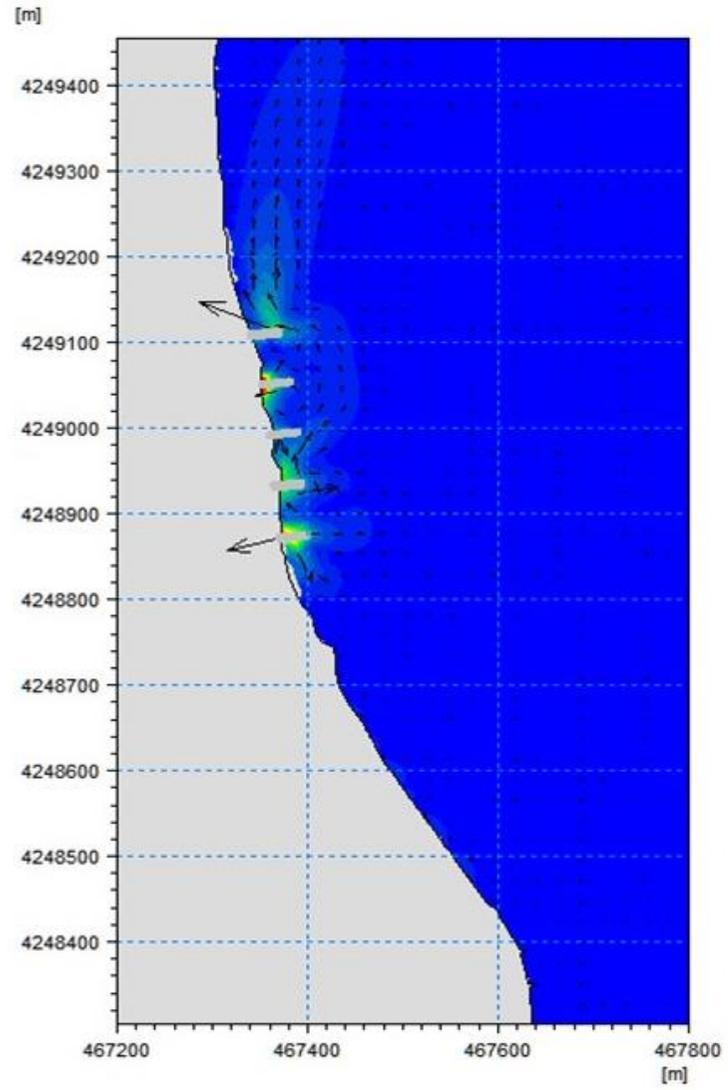
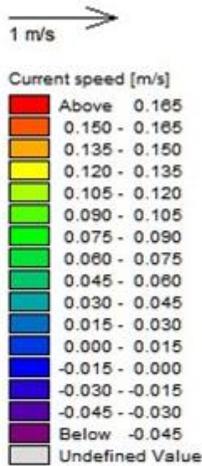
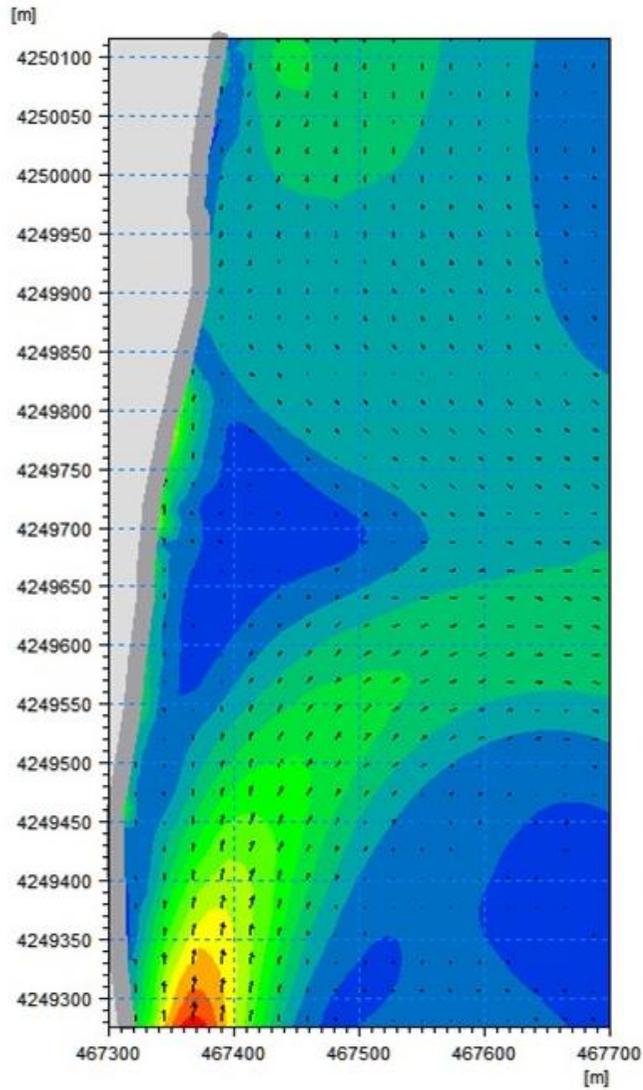
Σχήμα 7.22: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή I



Σχήμα 7.23: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.24: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III

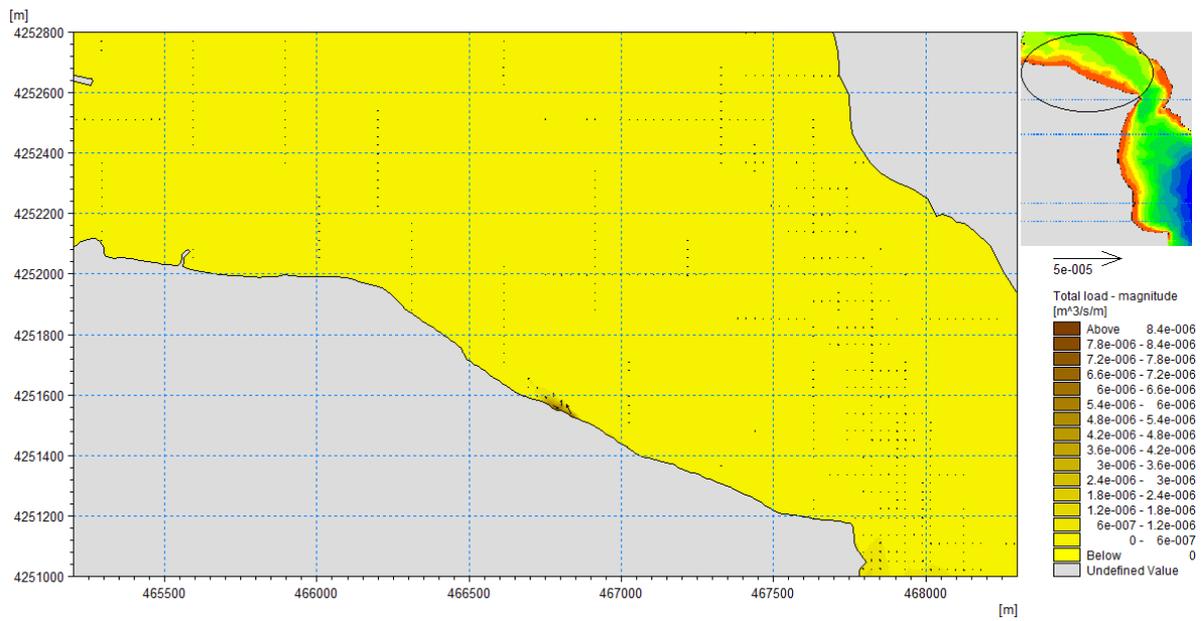


Σχήμα 7.25: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

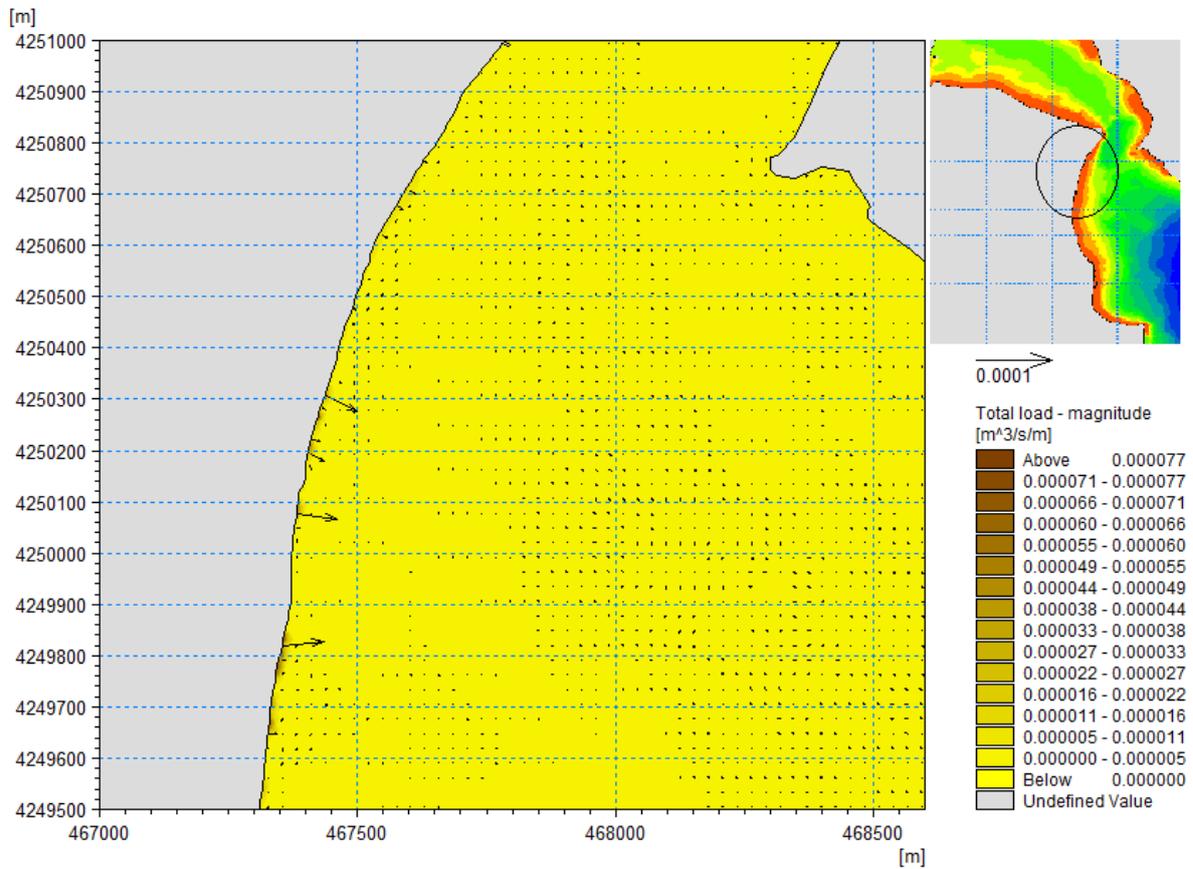
## Μοντέλο στερεομεταφοράς και μορφολογικής εξέλιξης πυθμένα

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το πεδίο της στερεομεταφοράς συγκριτικά με εκείνα της υφιστάμενης κατάστασης παρατηρείται πως τα διανύσματα της στερεομεταφοράς παρουσιάζουν αισθητή μείωση των τιμών τους σε κάποιες περιοχές. Η διατομή της θωράκισης με λιθορριπή διαμορφώνεται με κατάλληλη διαβάθμιση ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση του φυσικού πρηνούς της ακτής και να εξασφαλίζεται έτσι η σταθερότητά της. Παράλληλα το σύστημα των κάθετων προβόλων προτείνεται με σκοπό τη συγκράτηση της παράκτιας στερεοπαροχής που απομακρύνεται από την πηγή ώστε να ελεγχθεί η διάβρωση και να σταθεροποιηθεί η ακτή. Πιο συγκεκριμένα, βόρεια στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Βαθύ και στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα. Στην υποπεριοχή I παρατηρείται αισθητή μείωση των τιμών της στερεομεταφοράς οι οποίες παρουσιάζουν αμελητέες τιμές στην περιοχή της προτεινόμενης θωράκισης. Στην υποπεριοχή II στο τμήμα των κάθετων προβόλων τα διανύσματα ακολουθούν τους στροβιλισμούς των ρευμάτων με παράλληλη εναπόθεση ιζημάτων στις περιοχές με ασθενές ρεύμα και κυματισμό, δηλαδή ανάντη των προβόλων. Κατάντη της «σκιάς» του προβόλου η ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος βαθμιαία αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν και η υδροδυναμική κατάσταση δεν επηρεάζεται πλέον από την παρουσία του προβόλου. Ως αποτέλεσμα έχουμε τη μεταφορά φερτών από τη βάση του έργου (περιοχή του στροβίλου) προς τα κατάντη (περιοχή αποκατάστασης του παράκτιου κυματογενούς ρεύματος). Η μεταφορά αυτή δημιουργεί διάβρωση κατάντη του βραχίονα. (Καραμπάς, 2012). Στην περιοχή βόρεια του λιμενίσκου η στερεομεταφορά παρουσιάζει επίσης πολύ μειωμένες τιμές.

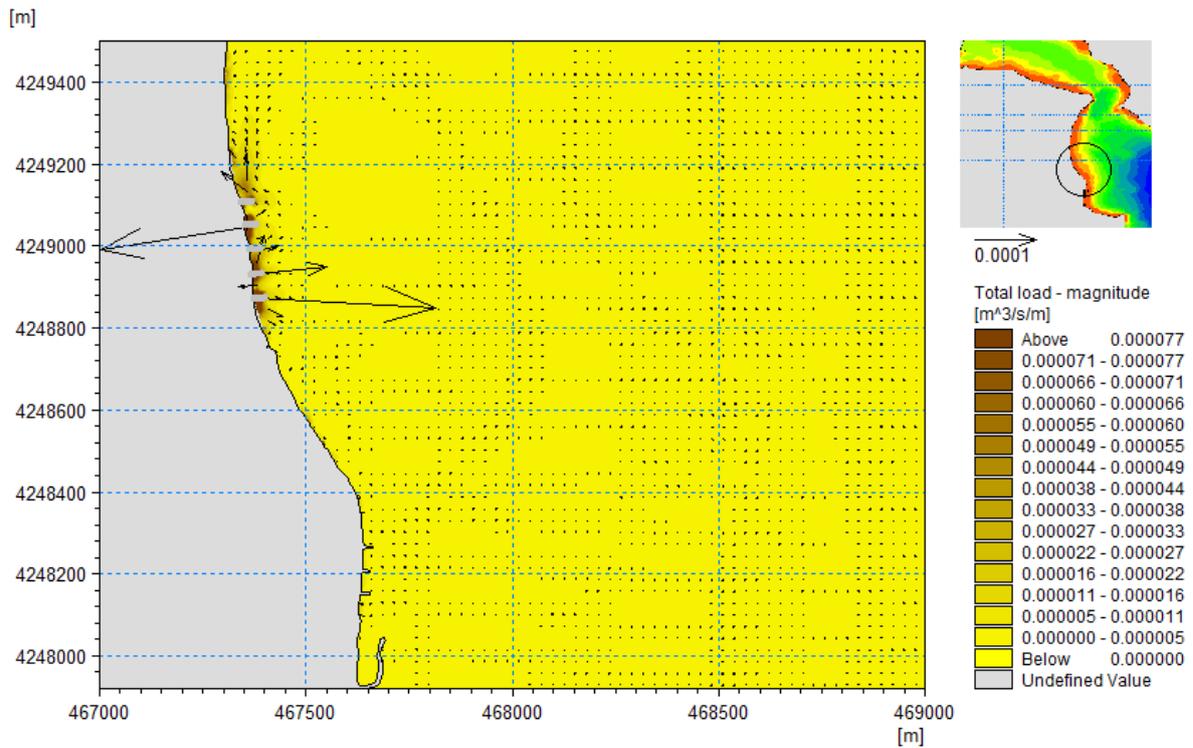
Οι τιμές που λαμβάνει η στερεομεταφορά κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα (Σχήμα 7.26). Στην υποπεριοχή I που αφορά το παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος, όπου προτείνεται η θωράκιση με λιθορριπή η στερεομεταφορά είναι σχεδόν αμελητέα με τιμές μικρότερες των  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.27). Στην υποπεριοχή II όπου προτείνεται το σύστημα προβόλων το φαινόμενο είναι έντονο καθώς παρατηρείται συσσώρευση ιζήματος ανάντη αυτών καθώς και ίζημα που ακολουθεί το σχηματισμό του μικρού βελοειδούς ρεύματος. Η στερεομεταφορά προσεγγίζει την τιμή των  $11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.28). Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης, η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή της τάξης των  $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.29).



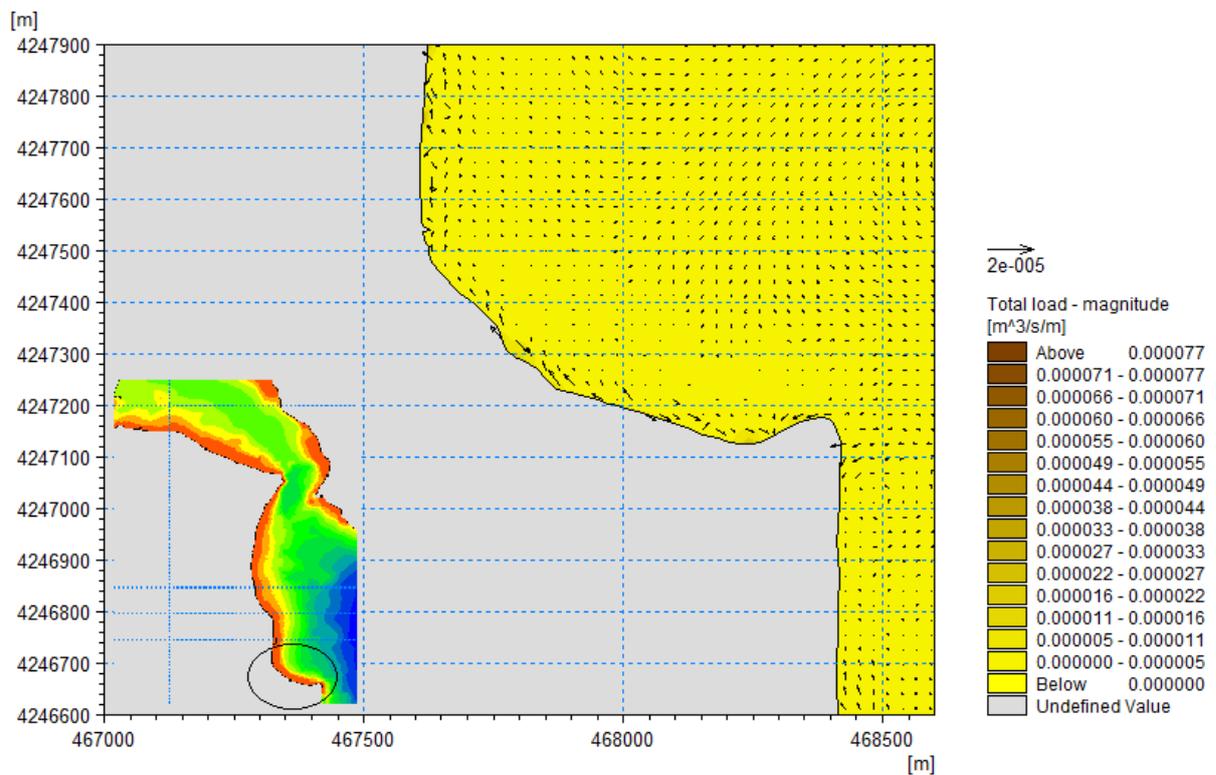
Σχήμα 7.26: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1



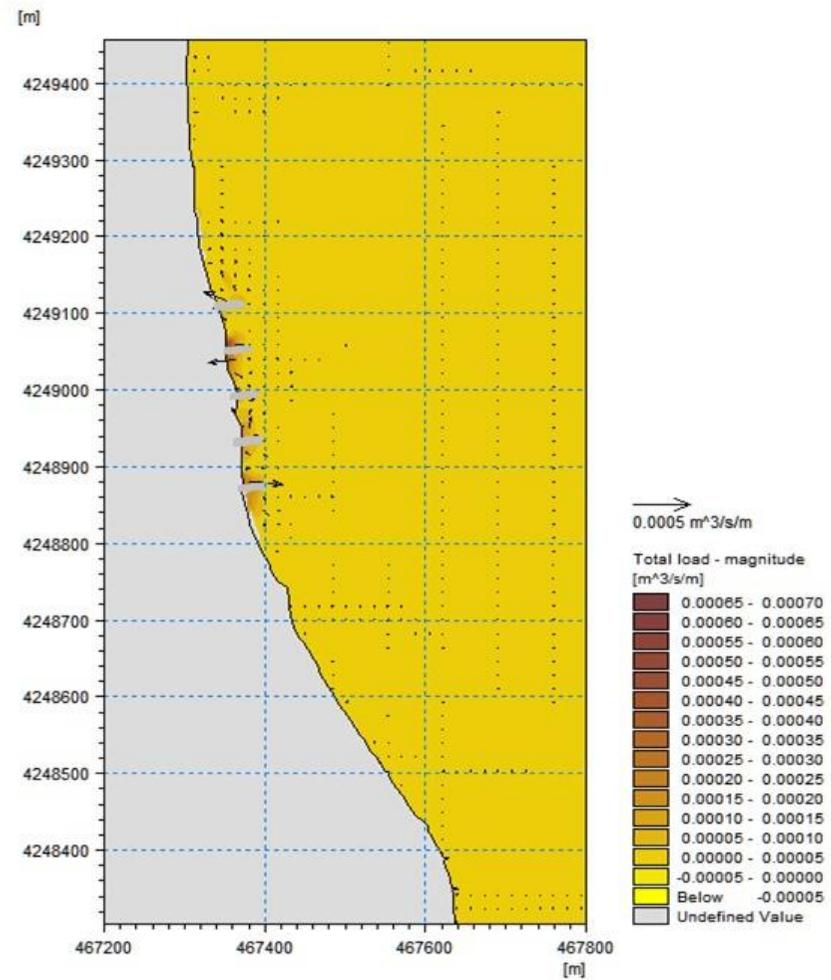
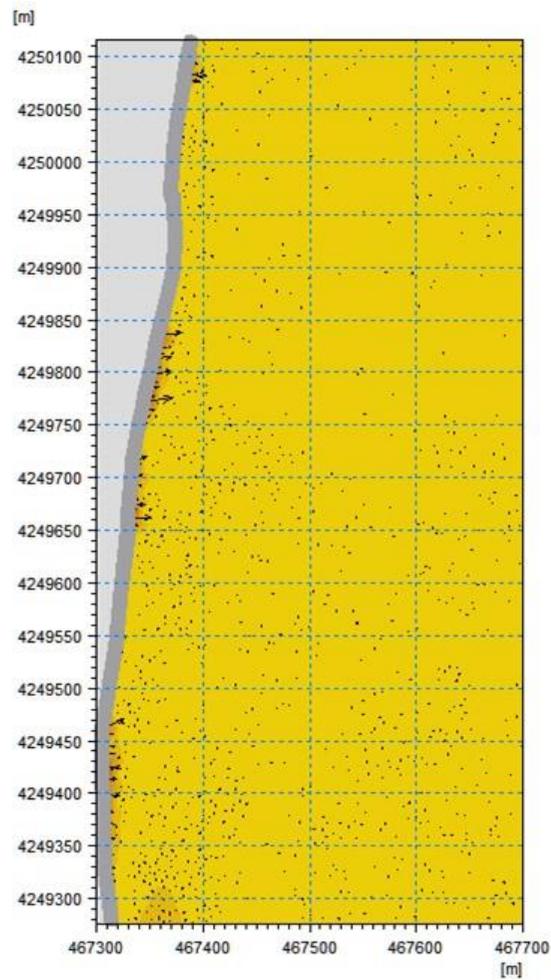
Σχήμα 7.27: Διανύσματα στερεομεταφοράς – Υποπεριοχή I



Σχήμα 7.28: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II



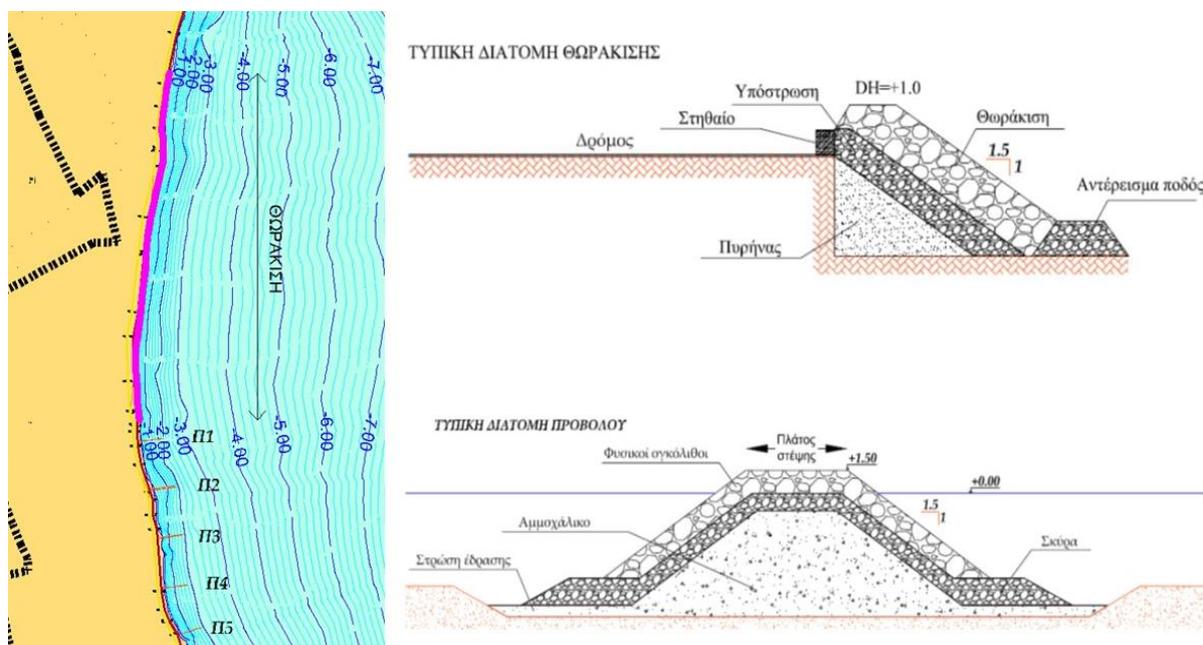
Σχήμα 7.29: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III



Σχήμα 7.30: Διανύσματα στερεομεταφοράς περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

#### 7.4.2 Εναλλακτική λύση II

Η δεύτερη εναλλακτική λύση περιλαμβάνει ήπιες παρεμβάσεις στην περιοχή 1 και στην υποπεριοχή III της περιοχής 2 ενώ στην υποπεριοχή I και II της περιοχής 2 εξετάζεται περιμετρική θωράκιση του παράκτιου μετώπου, στο οποίο εμφανίζεται έντονη διάβρωση, λόγω του φαινομένου της ανάκλασης των προσπιπτόντων κυματισμών και ρευμάτων. Η θωράκιση θα γίνει με φυσικούς λίθους και ογκόλιθους καλής ποιότητας και ορθής διαβάθμισης και σκοπός είναι να αποφευχθεί η διάβρωση της ακτής αλλά και να προστατευτούν οι υποδομές (δρόμοι, δίκτυα κ.λπ.) καθώς και οι παράκτιοι οικισμοί από τις πλημμύρες, κάτω από συνθήκες ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων συνδυασμένης αναρρίχησης κυματισμών και ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Καραμπάς, 2012). Στην υποπεριοχή II μελετάται επίσης η αφαίρεση των υφιστάμενων προβόλων του Νότιου τμήματος και η αντικατάστασή τους με ένα σύστημα πέντε προβόλων μήκους 60 μέτρων και σε απόσταση μήκους 120 μέτρων- μικρότερη από την τιμή  $D=3*L$ , όπως απαιτείται- και καλύπτοντας όλο το πλάτος της ζώνης θραύσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.31:



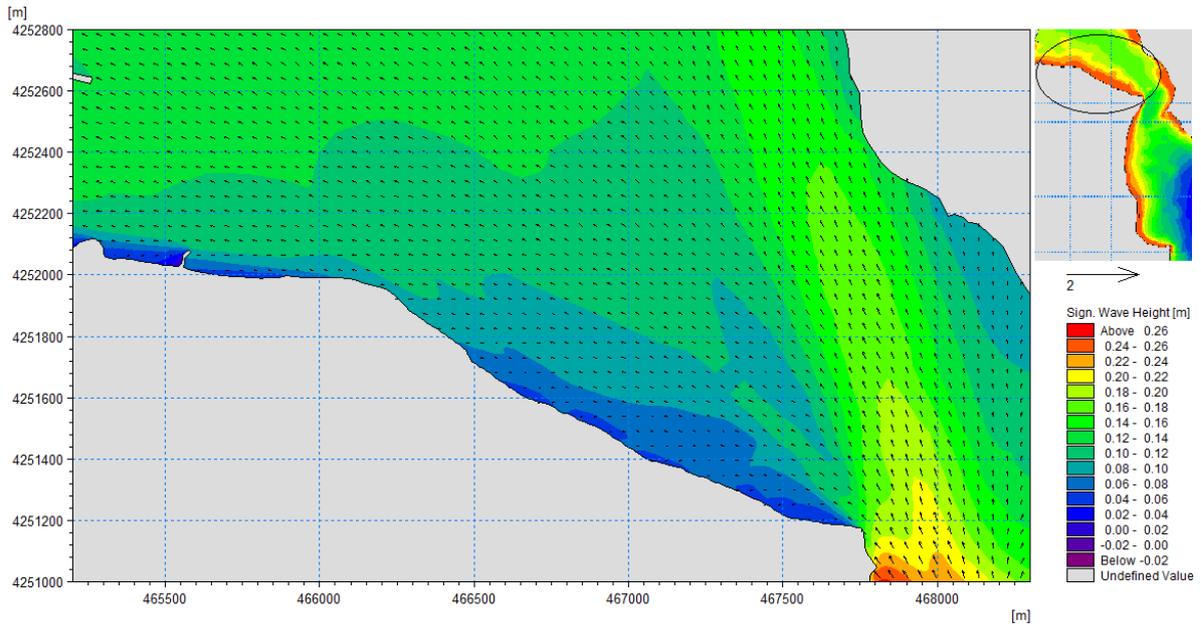
Σχήμα 7.31: Εναλλακτική λύση έργων παράκτιας προστασίας II

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης έχουν ως εξής:

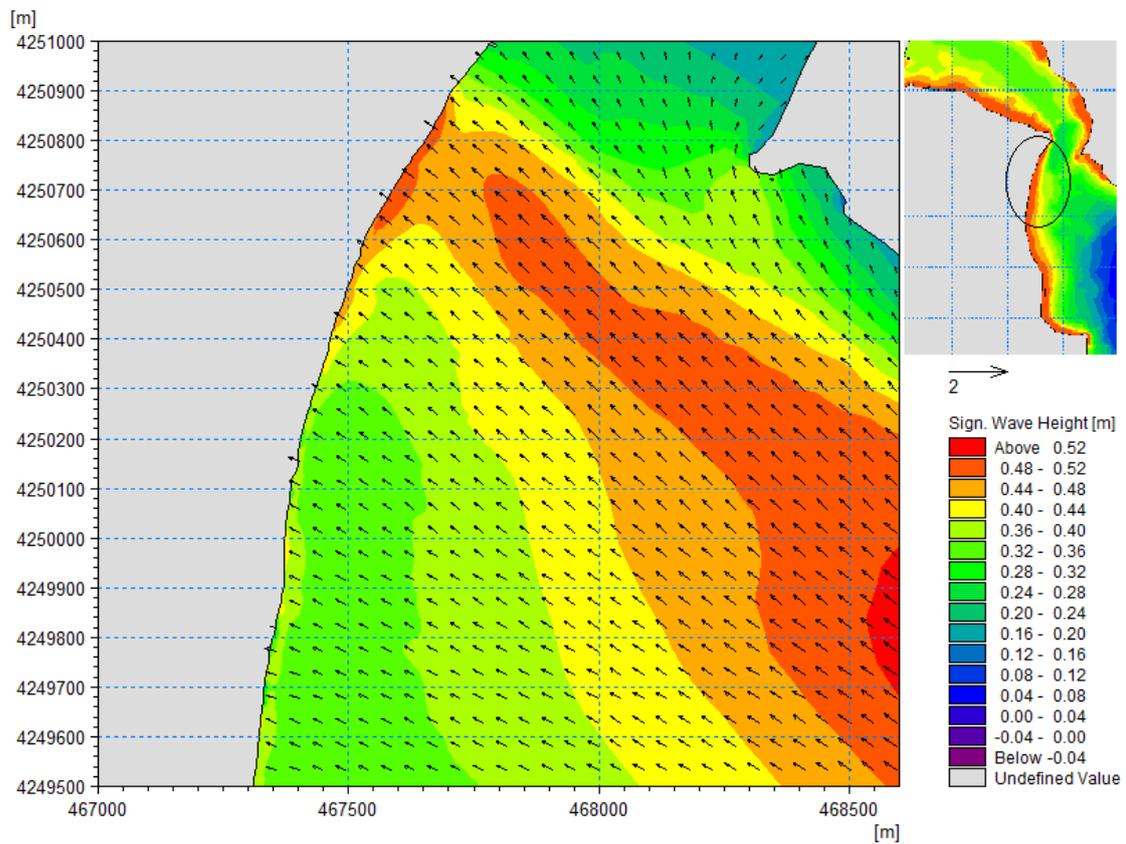
### **Κυματικό μοντέλο**

Μελετώντας τα αποτελέσματα για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρούνται μειωμένα κυματικά χαρακτηριστικά συγκριτικά με εκείνα τη υφιστάμενης κατάστασης, ακόμα και στα σημεία της ακτογραμμής που θεωρούνταν κρίσιμα όπως το τμήμα της υποπεριοχής II, που δέχεται μεγάλες φορτίσεις εξαιτίας του αναπτύγματος πελάγους. Πιο συγκεκριμένα η θωράκιση της ακτής με λιθορριπή καταργεί τον υψηλό συντελεστή ανάκλασης που παρουσίαζε το κατακόρυφο τοίχιο με αποτέλεσμα οι υδροδυναμικές συνθήκες στην περιοχή να ομαλοποιούνται. Ομοίως η ύπαρξη προβόλων μειώνει την επίδραση του ανακλαστικού μετώπου και απορροφά μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος κυματισμού.

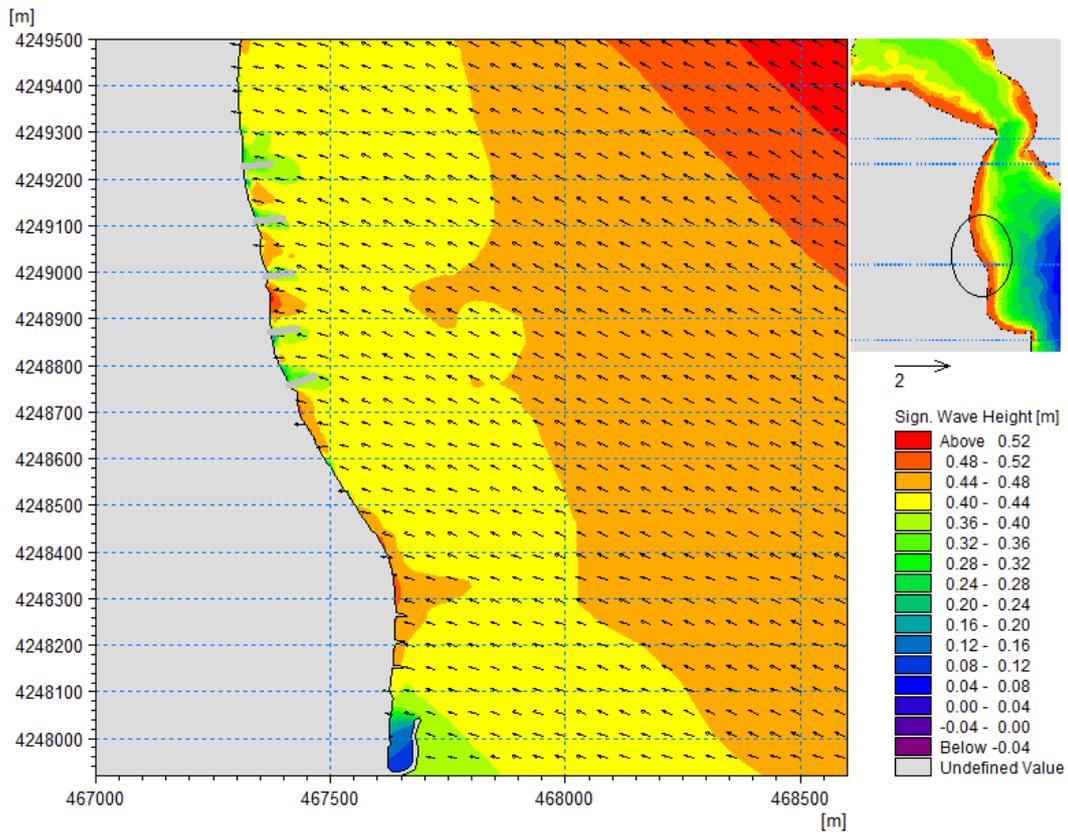
Οι τιμές που λαμβάνει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, όπως αναφέρθηκε, ποικίλουν ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης το ύψος κύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,12 μέτρα χωρίς καμία διαφοροποίηση συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 7.32). Στις υποπεριοχές I, II της περιοχής 2 όπου εμφανίζονται τα πιο έντονα κυματικά χαρακτηριστικά οι τιμές του ύψους κύματος έχουν μειωθεί και δεν ξεπερνούν τα 0,52 μέτρα (Σχήμα 7.33, Σχήμα 7.34). Παρατηρείται πως οι υψηλότερες αυτές τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος καταγράφονται πλέον στην περιοχή του Φάρου η οποία αντιστοιχεί στην υποπεριοχή I, όπου εντοπίζεται ο σχηματισμός της παραλίας και δεν κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός έργων προστασίας εκτός από ήπιες παρεμβάσεις συγκράτησης του ιζήματος (Σχήμα 7.33). Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές του ύψους κύματος είναι μικρότερες, της τάξης των 0,32-0,36 μέτρων και εντός της λιμενολεκάνης δεν ξεπερνούν τα 0,2 μέτρα (Σχήμα 7.34, Σχήμα 7.35). Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης, οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,36 μέτρα (Σχήμα 7.35).



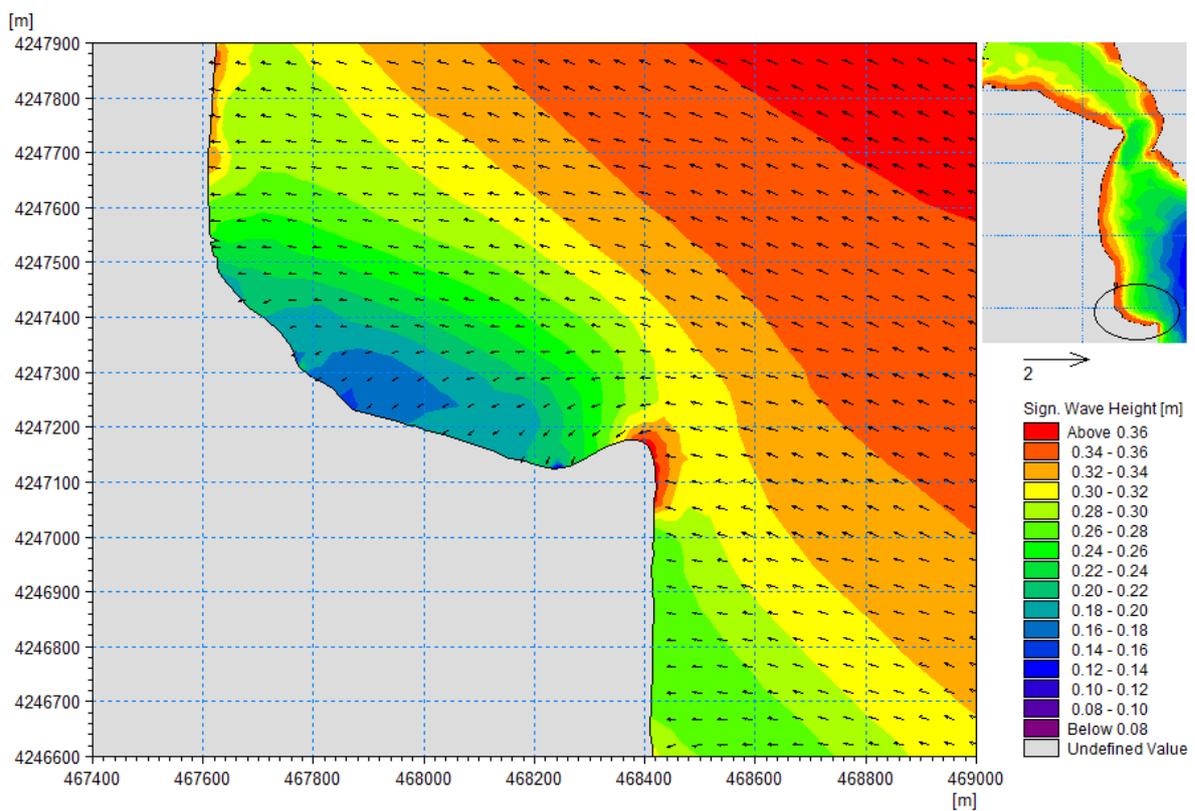
Σχήμα 7.32: Σημαντικό ύψος κύματος – Περιοχή 1



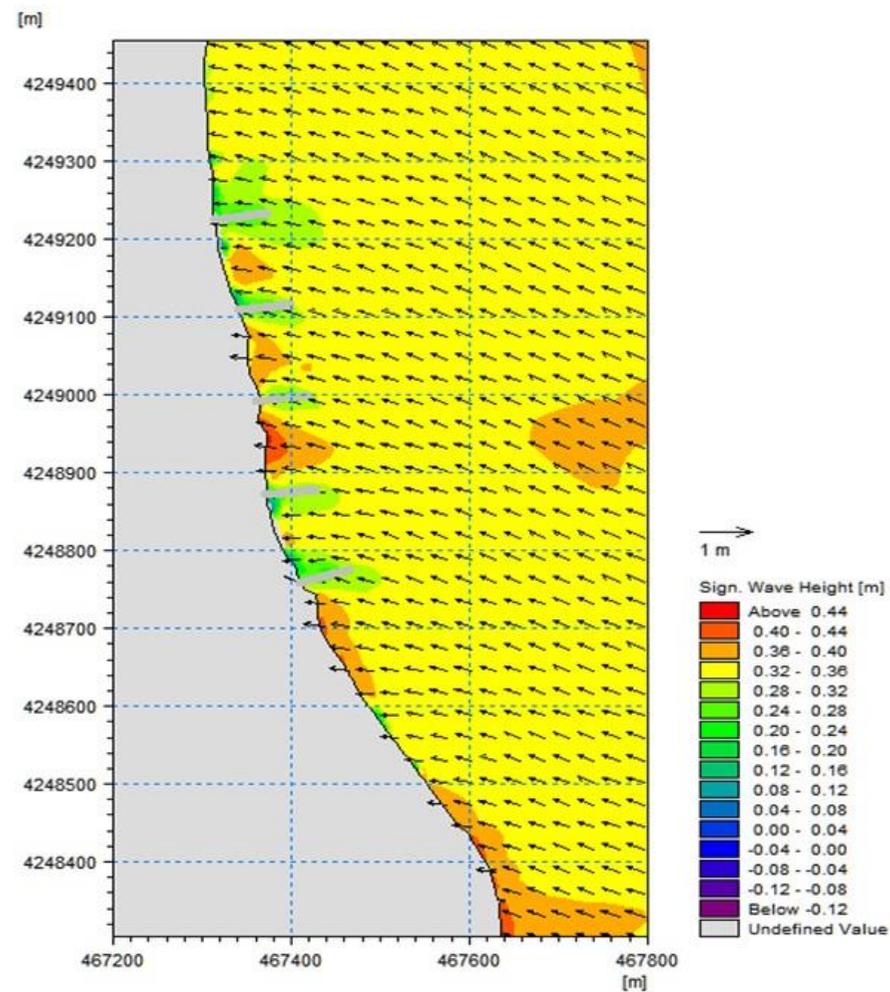
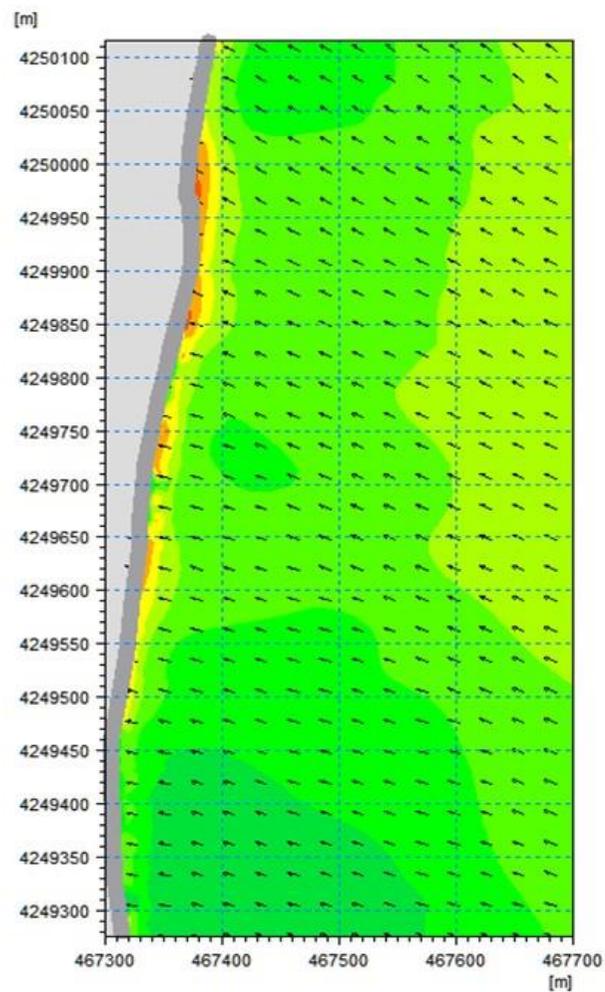
Σχήμα 7.33: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.34: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.35: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή III

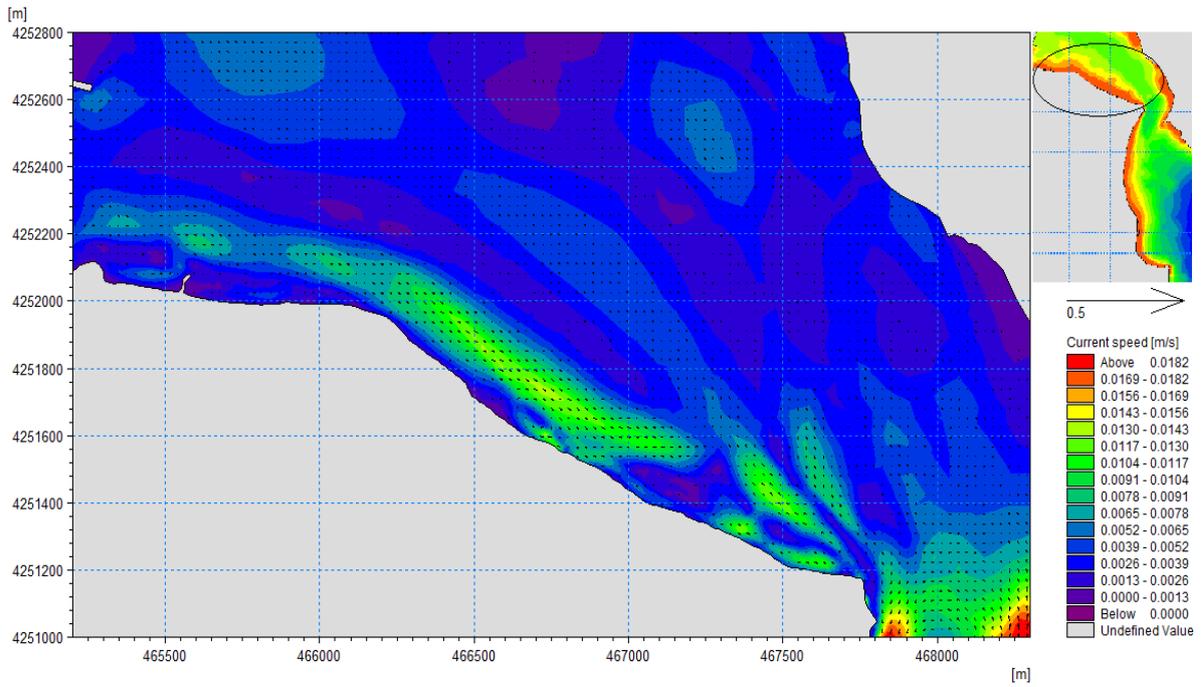


Σχήμα 7.36: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

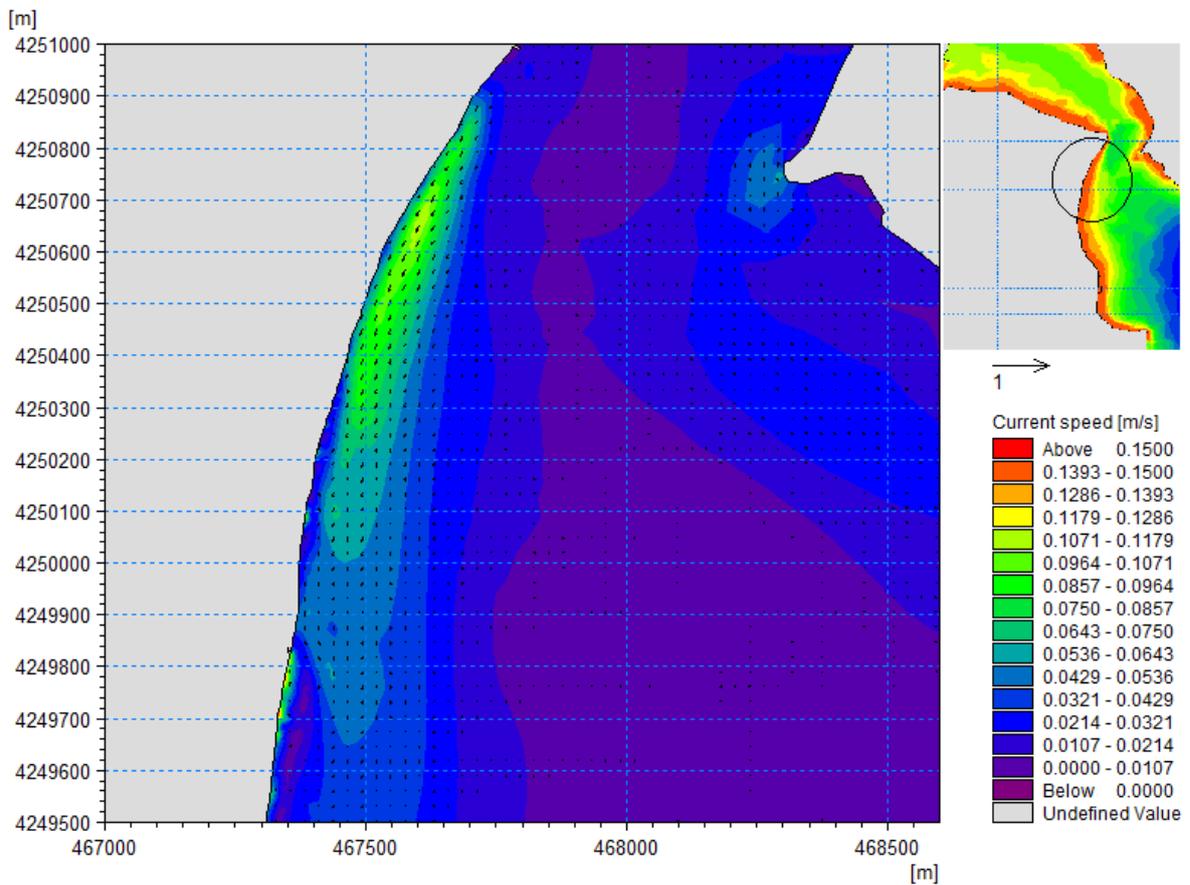
## Υδροδυναμικό μοντέλο

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πως η υδροδυναμική κυκλοφορία χαρακτηρίζεται από παράκτιο ρεύμα με σημαντικά μικρότερες ταχύτητες συγκριτικά με τα αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος (Σχήμα 7.38, Σχήμα 7.39) στις υποπεριοχές I, II ύστερα από τη θωράκιση της ακτογραμμής με λιθορριπή παρατηρείται εξάλειψη του βελοειδούς ρεύματος που δημιουργούταν εξαιτίας των ανακλάσεων και ο προσανατολισμός της υδροδυναμικής κυκλοφορίας είναι προς τα Νότια. Στο τμήμα της υποπεριοχής II όπου προτείνεται η κατασκευή των προβόλων η υδροδυναμική κυκλοφορία στη σκιά αυτών χαρακτηρίζεται από τον σχηματισμό στροβίλων (Σχήμα 7.39, Σχήμα 7.41). Στο παράκτιο τμήμα του οικισμού Βαθύ (Σχήμα 7.37) και στο νοτιότερο άκρο της ακτής μελέτης (Σχήμα 7.40) η κυματική ενέργεια είναι μειωμένη με αποτέλεσμα το πεδίο κυματογενούς κυκλοφορίας να είναι εξίσου σημαντικά μειωμένο. Στην περιοχή νότια του λιμενίσκου η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.40 η κύρια κατεύθυνση των ρευμάτων είναι προς τα Νότια με χαμηλές ταχύτητες.

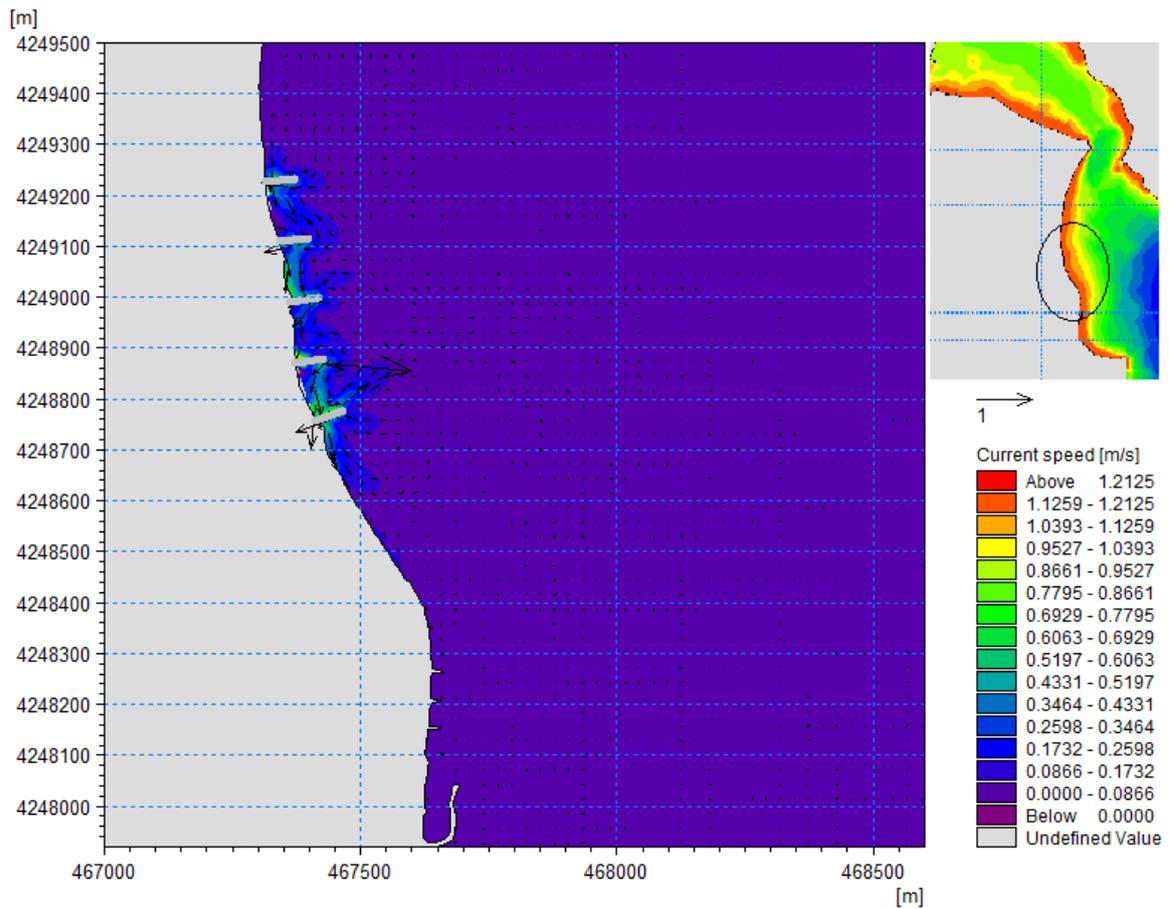
Οι τιμές που λαμβάνει το εύρος της ταχύτητας των παράκτιων ρευμάτων μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η ταχύτητα των παράκτιων ρευμάτων λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,0130 m/s (Σχήμα 7.37). Στην περιοχή 2 όπου προτείνονται τα έργα προστασίας η ταχύτητα των ρευμάτων σημειώνει χαμηλές τιμές. Πιο συγκεκριμένα στην υποπεριοχή I, όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές, η ταχύτητα των ρευμάτων δεν ξεπερνά τα 0,11 m/s. Στην υποπεριοχή II οι τιμές είναι πολύ χαμηλές της τάξης των 0,08 m/s με εξαίρεση τους στροβίλους που δημιουργούνται ανάμεσα στους προβόλους όπου και εντείνεται η κυκλοφορία. Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος είναι μικρότερες από 0,040 m/s. Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,020 m/s.



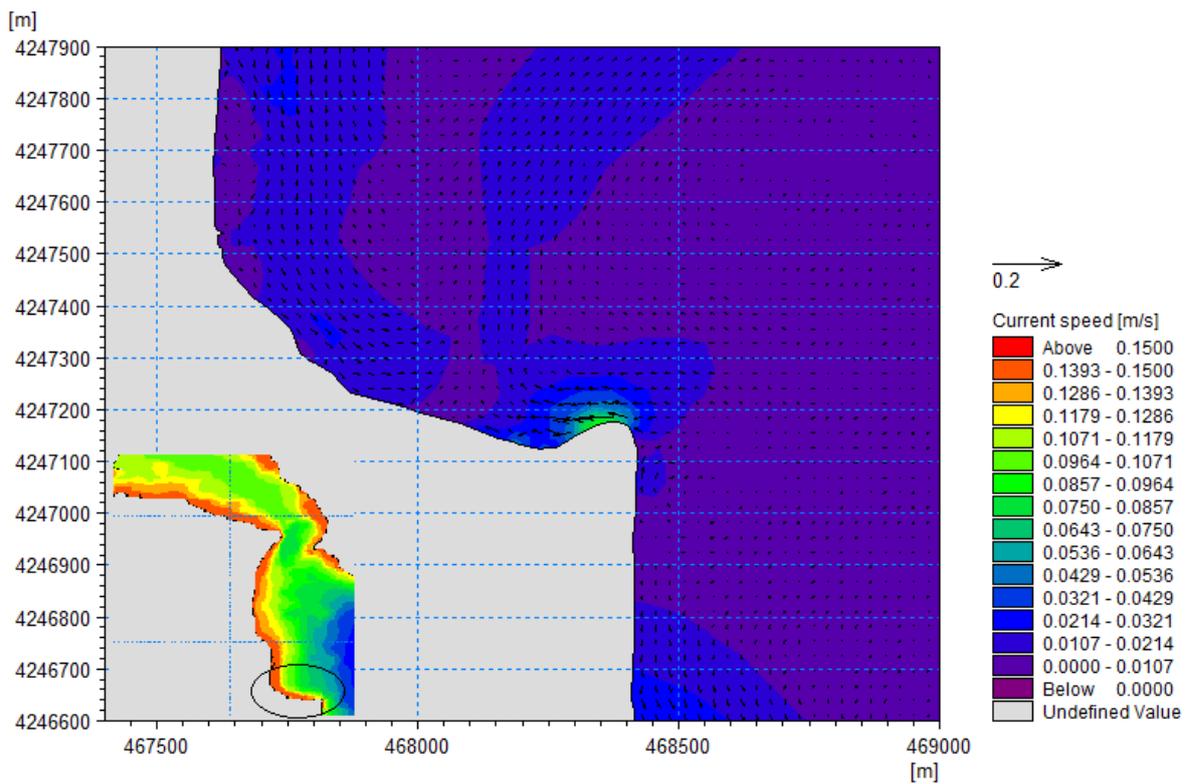
Σχήμα 7.37: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1



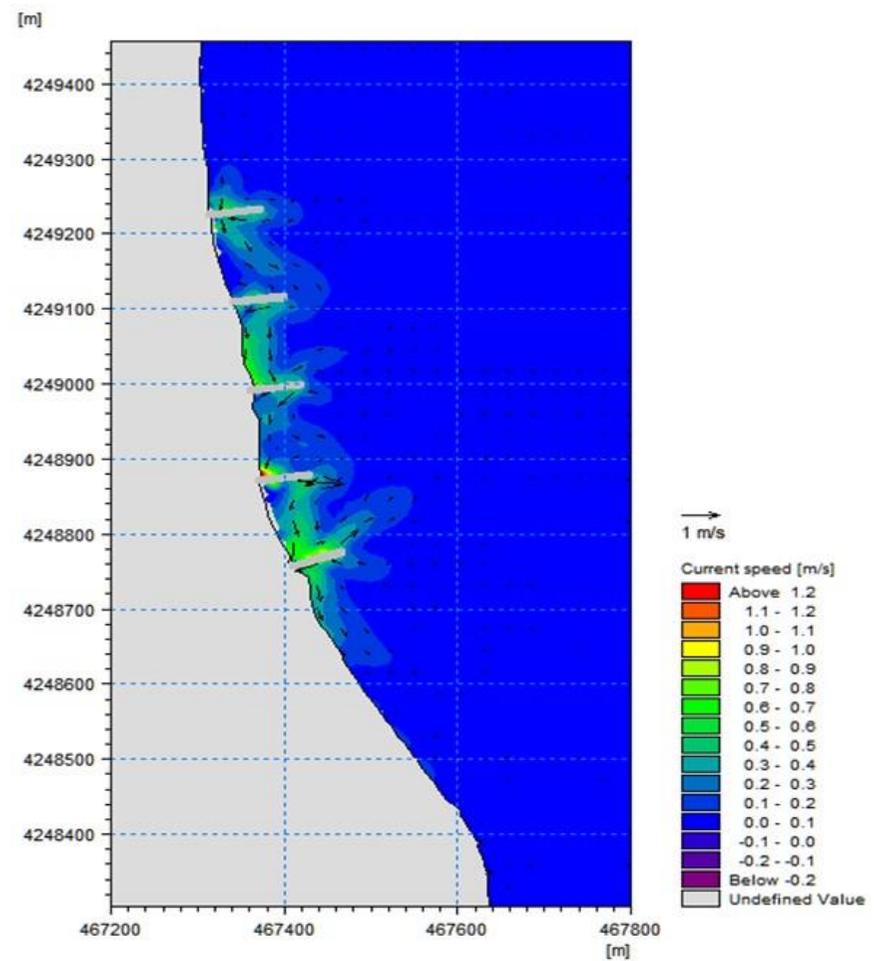
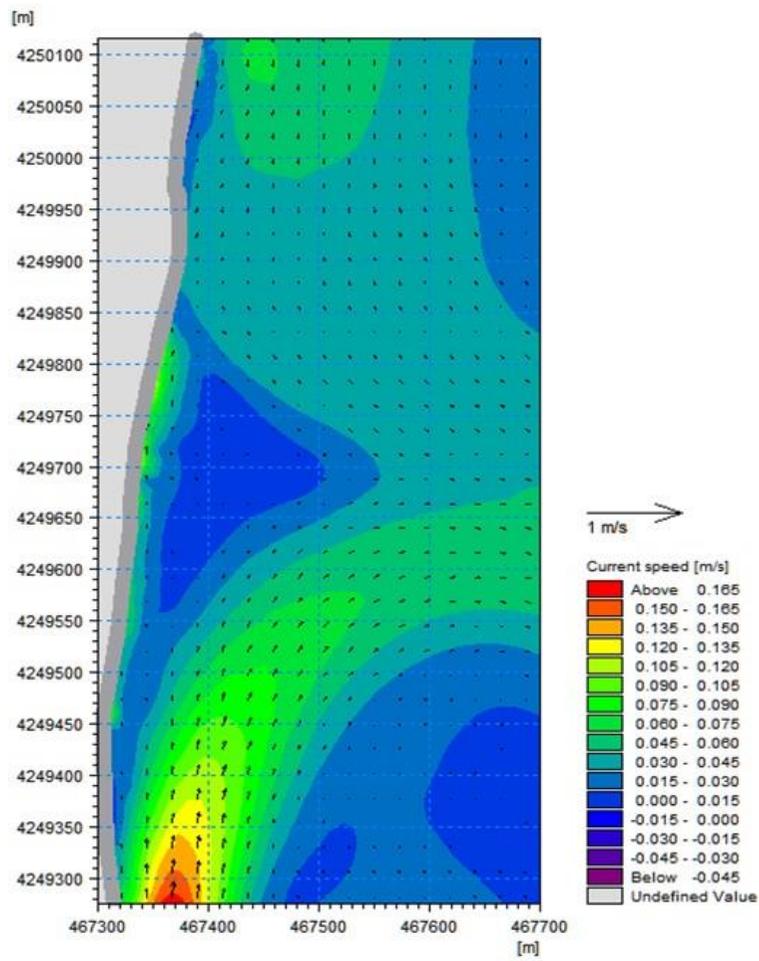
Σχήμα 7.38: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.39: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.40: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III

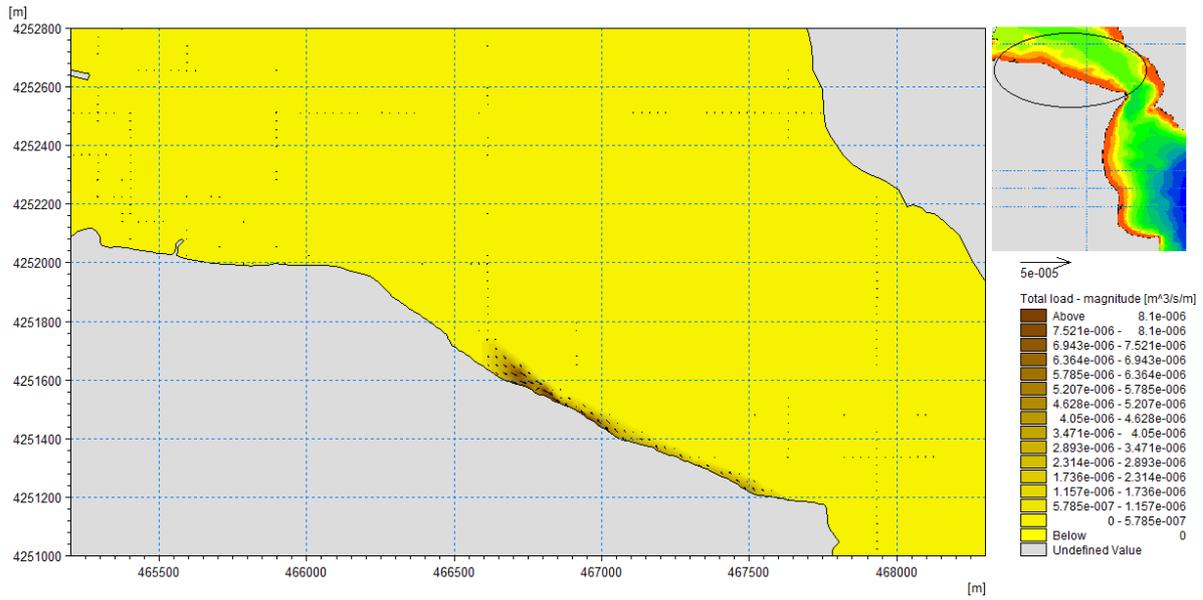


Σχήμα 7.41: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

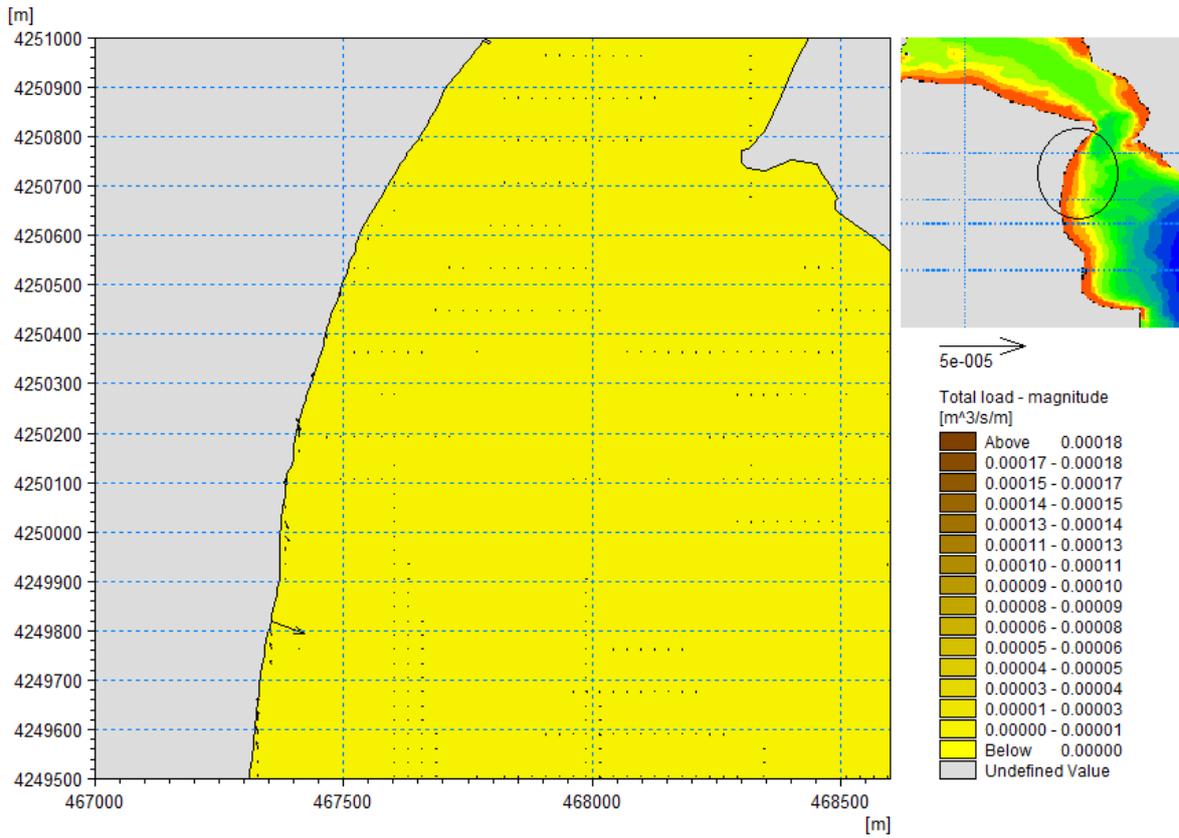
## Μοντέλο στερεομεταφοράς και μορφολογικής εξέλιξης πυθμένα

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το πεδίο της στερεομεταφοράς συγκριτικά με εκείνα της υφιστάμενης κατάστασης παρατηρείται πως τα διανύσματα της στερεομεταφοράς παρουσιάζουν αισθητή μείωση των τιμών τους σε κάποιες περιοχές. Η διατομή της θωράκισης με λιθορριπή διαμορφώνεται με κατάλληλη διαβάθμιση ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση του φυσικού πρηνούς της ακτής και να εξασφαλίζεται έτσι η σταθερότητά της. Παράλληλα το σύστημα των κάθετων προβόλων προτείνεται με σκοπό τη συγκράτηση της παράκτιας στερεοπαροχής που απομακρύνεται από την πηγή ώστε να ελεγχθεί η διάβρωση και να σταθεροποιηθεί η ακτή. Πιο συγκεκριμένα, βόρεια στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Βαθύ και στο νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα. Στην υποπεριοχή I παρατηρείται αισθητή μείωση των τιμών της στερεομεταφοράς οι οποίες παρουσιάζουν αμελητέες τιμές στην περιοχή της προτεινόμενης θωράκισης. Στην υποπεριοχή II στο τμήμα των κάθετων προβόλων τα διανύσματα ακολουθούν τους στροβιλισμούς των ρευμάτων με παράλληλη εναπόθεση ιζημάτων στις περιοχές με ασθενές ρεύμα και κυματισμό, δηλαδή ανάντη των προβόλων. Κατάντη της «σκιάς» του προβόλου η ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος βαθμιαία αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν και η υδροδυναμική κατάσταση δεν επηρεάζεται πλέον από την παρουσία του προβόλου. Ως αποτέλεσμα έχουμε τη μεταφορά φερτών από τη βάση του έργου (περιοχή του στροβίλου) προς τα κατάντη (περιοχή αποκατάστασης του παράκτιου κυματογενούς ρεύματος). Η μεταφορά αυτή δημιουργεί διάβρωση κατάντη του βραχίονα. (Καραμπάς, 2012). Στην περιοχή βόρεια του λιμενίσκου η στερεομεταφορά παρουσιάζει επίσης πολύ μειωμένες τιμές.

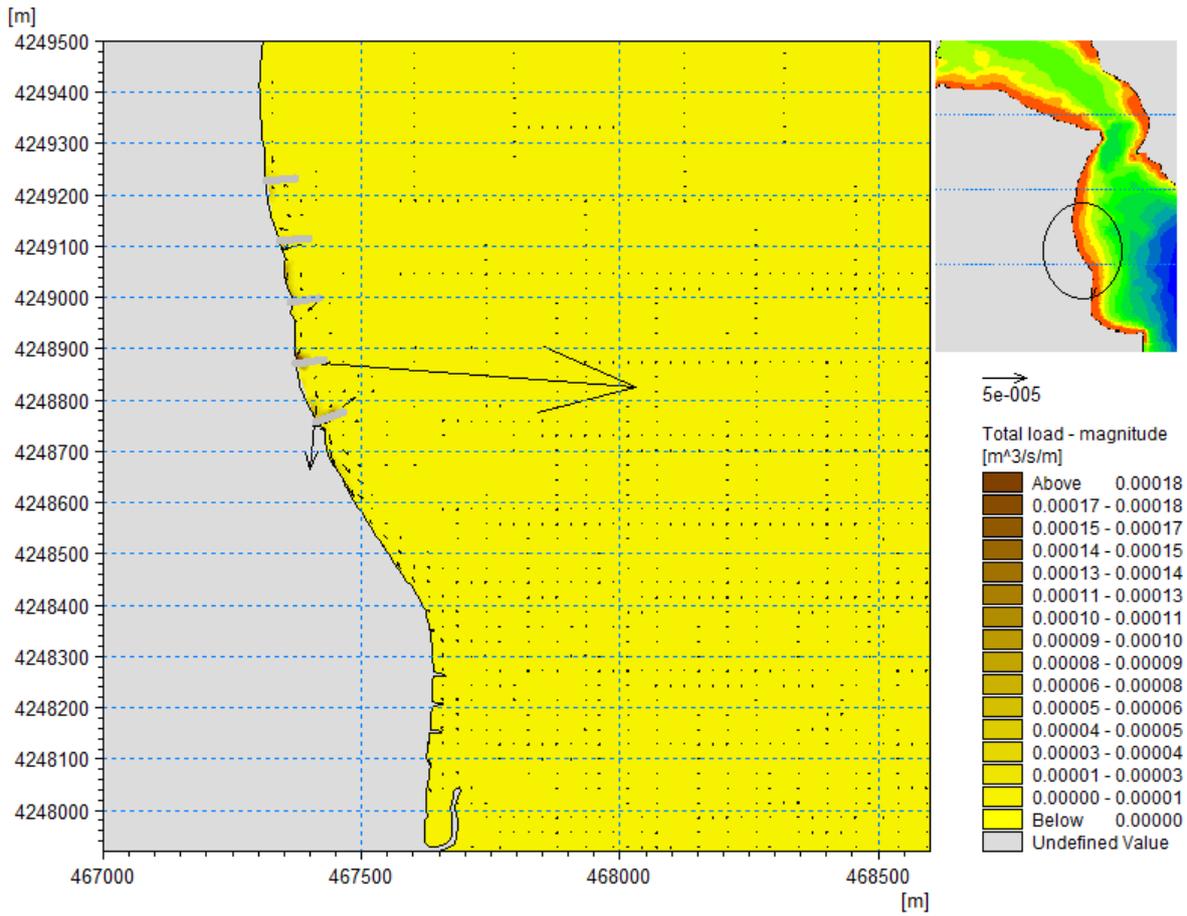
Οι τιμές που λαμβάνει η στερεομεταφορά κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα (Σχήμα 7.42). Στην υποπεριοχή I που αφορά το παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος, όπου προτείνεται η θωράκιση με λιθορριπή η στερεομεταφορά είναι σχεδόν αμελητέα με τιμές μικρότερες των  $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.43). Στην υποπεριοχή II όπου προτείνεται το σύστημα προβόλων το φαινόμενο είναι έντονο καθώς παρατηρείται συσσώρευση ιζήματος ανάντη. Η στερεομεταφορά προσεγγίζει την τιμή των  $11 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.44). Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης, η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή της τάξης των  $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.45).



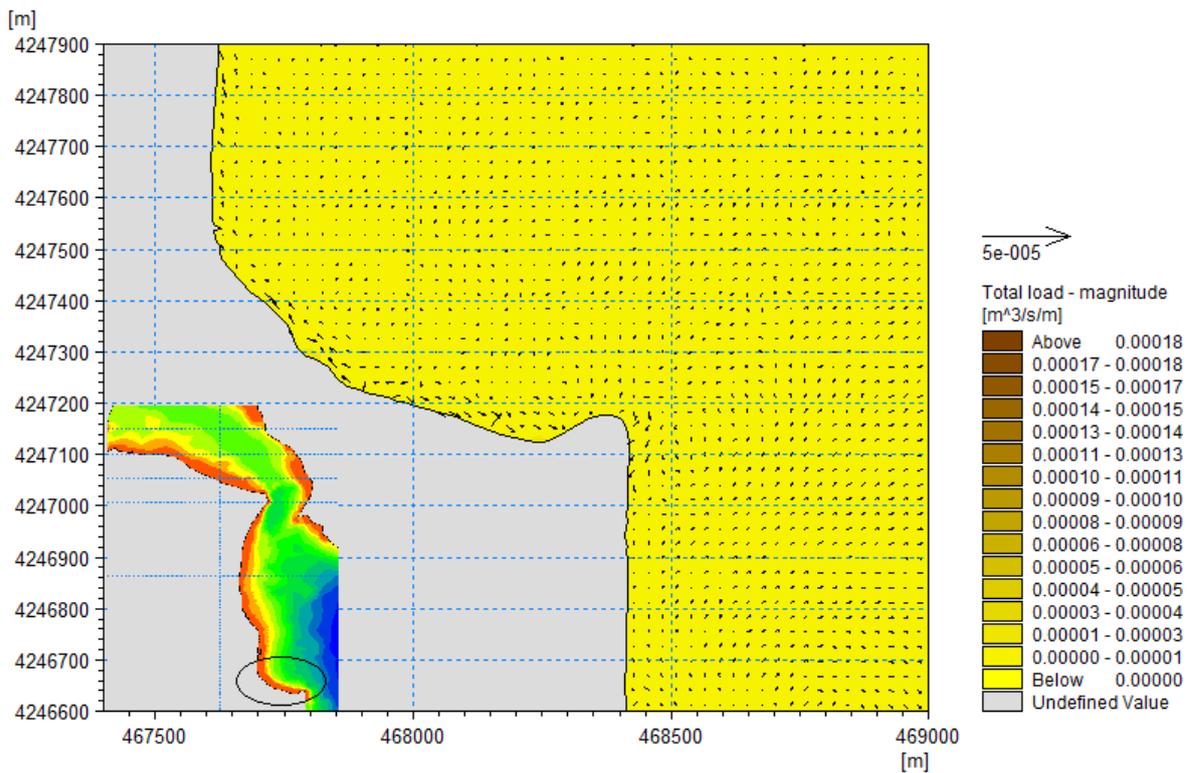
Σχήμα 7.42: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή Ι



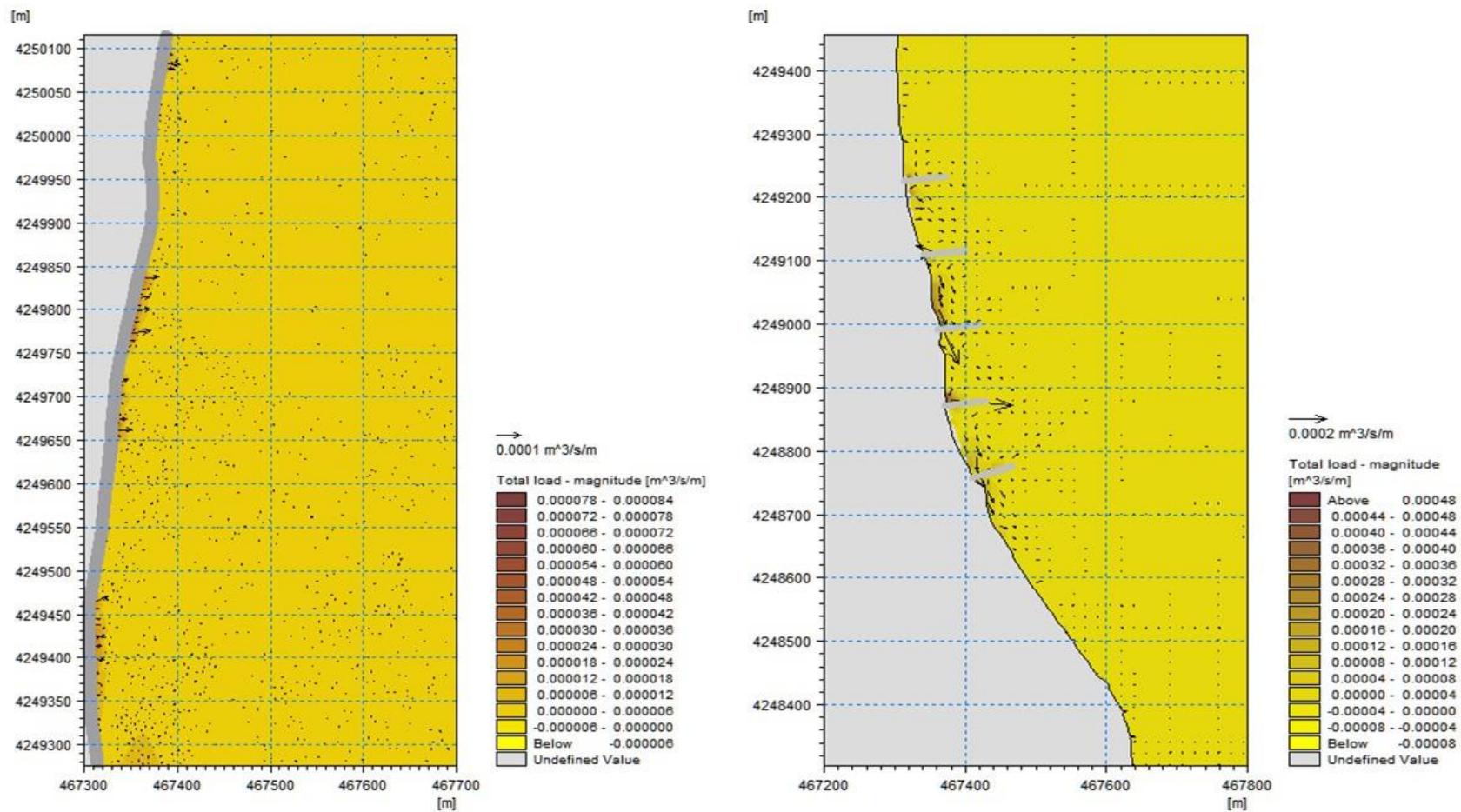
Σχήμα 7.43: Διανύσματα στερεομεταφοράς – Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.44: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II



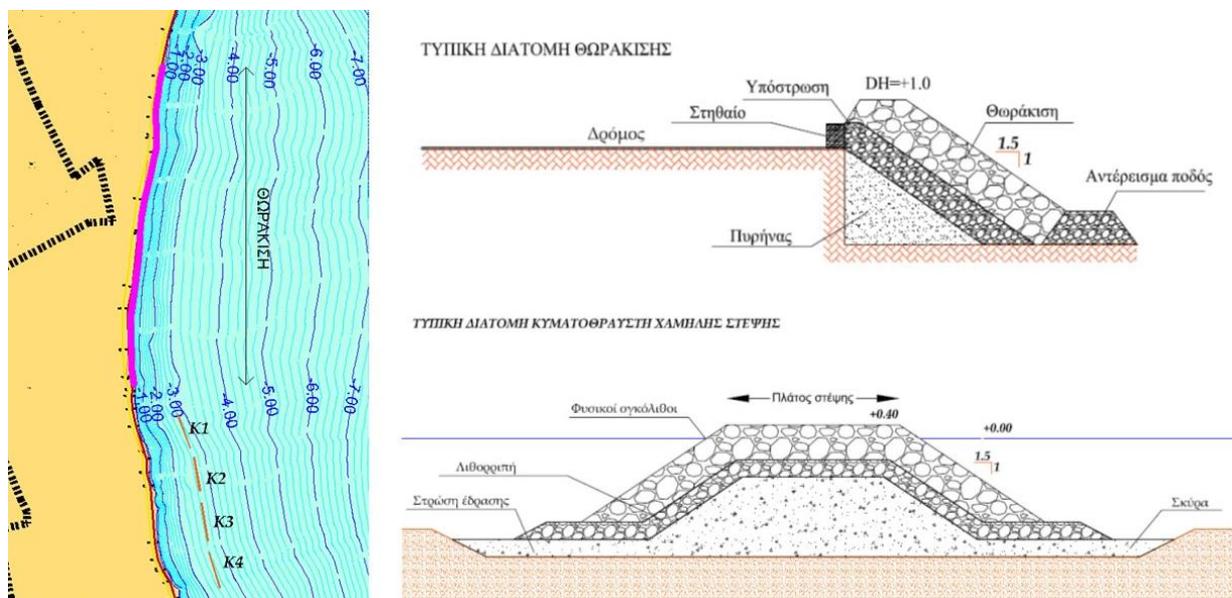
Σχήμα 7.45: Διανύσματα στερεομεταφοράς-Υποπεριοχή III



Σχήμα 7.46: Διανύσματα στερεομεταφοράς περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

### 7.4.3 Εναλλακτική λύση III

Η τρίτη εναλλακτική λύση περιλαμβάνει ήπιες παρεμβάσεις στην περιοχή 1 και στην υποπεριοχή III της περιοχής 2, ενώ στην υποπεριοχή I και II της περιοχής 2 εξετάζεται περιμετρική θωράκιση του παράκτιου μετώπου, στο οποίο εμφανίζεται έντονη διάβρωση, λόγω του φαινομένου της ανάκλασης των προσπιπτόντων κυματισμών και ρευμάτων. Η θωράκιση θα γίνει με φυσικούς λίθους και ογκόλιθους καλής ποιότητας και ορθής διαβάθμισης. Σκοπός είναι να αποφευχθεί η διάβρωση της ακτής αλλά και να προστατευτούν οι υποδομές (δρόμοι, δίκτυα κ.λπ.) καθώς και οι παράκτιοι οικισμοί από τις πλημμύρες, κάτω από συνθήκες ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων συνδυασμένης αναρρίχησης κυματισμών και ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Καραμπάς, 2012). Στην υποπεριοχή II μελετάται επίσης η αφαίρεση των υφιστάμενων προβόλων του Νότιου τμήματος και προτείνεται η κατασκευή συστήματος τεσσάρων αποσπασμένων κυματοθραυστών (K1, K2, K3, K4), (μήκους ~ 90 μέτρων έκαστος) χαμηλής στέψης (+0,40 μέτρα από τη στάθμη ηρεμίας) σε βάθος νερού (-3) μέτρων από φυσικούς λίθους και ογκόλιθους, με διάκενο μεταξύ τους μήκους 28 μέτρων, ώστε να προστατευθεί η παραλία (Σχήμα 7.47):



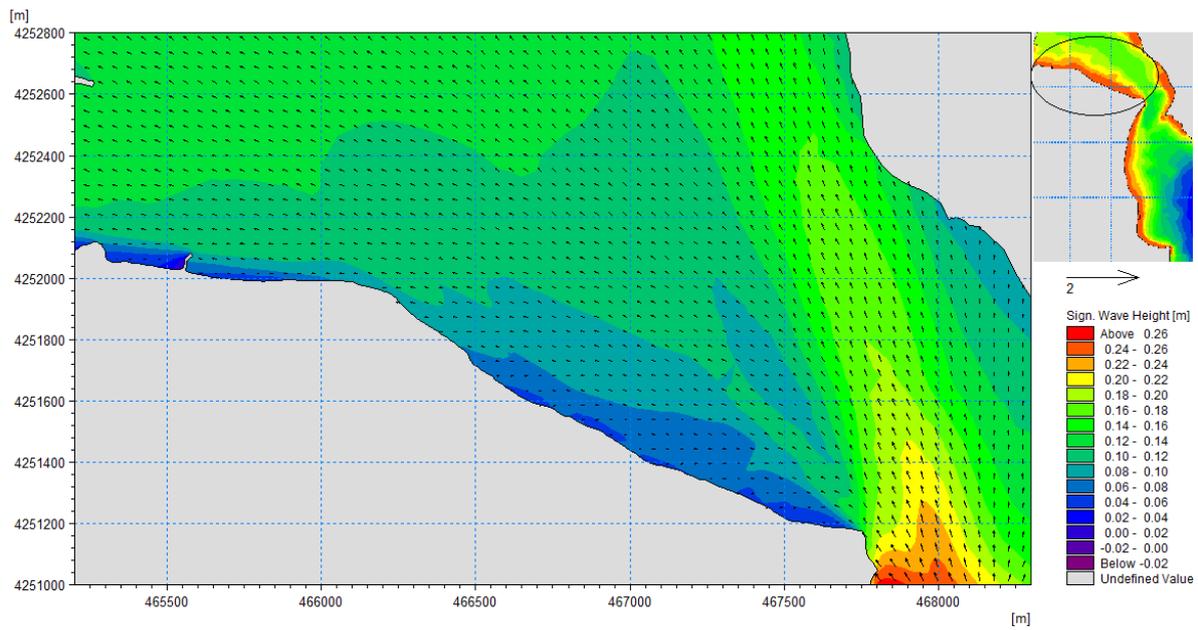
Σχήμα 7.47: Εναλλακτική λύση έργων παράκτιας προστασίας III

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης έχουν ως εξής:

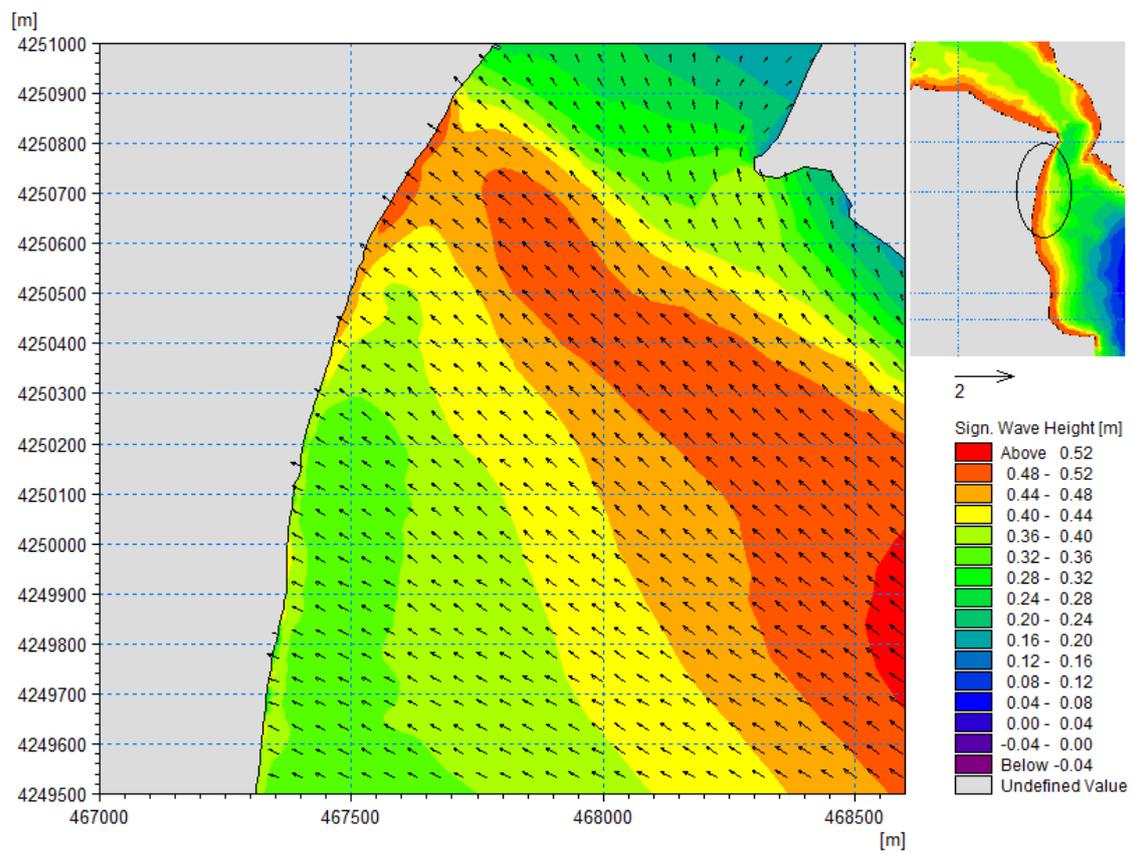
### **Κυματικό μοντέλο**

Μελετώντας τα αποτελέσματα για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται σημαντική μείωση των κυματικών χαρακτηριστικών συγκριτικά με εκείνα τη υφιστάμενης κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα η θωράκιση της ακτής με λιθορριπή καταργεί τον υψηλό συντελεστή ανάκλασης που παρουσίαζε το κατακόρυφο τοίχιο με αποτέλεσμα οι υδροδυναμικές συνθήκες στην περιοχή να ομαλοποιούνται. Ταυτόχρονα η κατασκευή κυματοθραυστών παράλληλα σε μια ακτή λειτουργεί ως εμπόδιο στη διάδοση των κυματισμών προς την ακτή και διαταράσσει σημαντικά το κυματικό πεδίο. Θεωρώντας εγκάρσια πρόσπτωση κυματισμών, λόγω της παρουσίας του έργου, οι κυματισμοί (εξαιτίας του φαινομένου της περίθλασης) θα έχουν μικρότερο ύψος στη «σκιά» του κυματοθραύστη από ό,τι εκτός του πεδίου επιρροής του. (Καραμπάς, 2012)

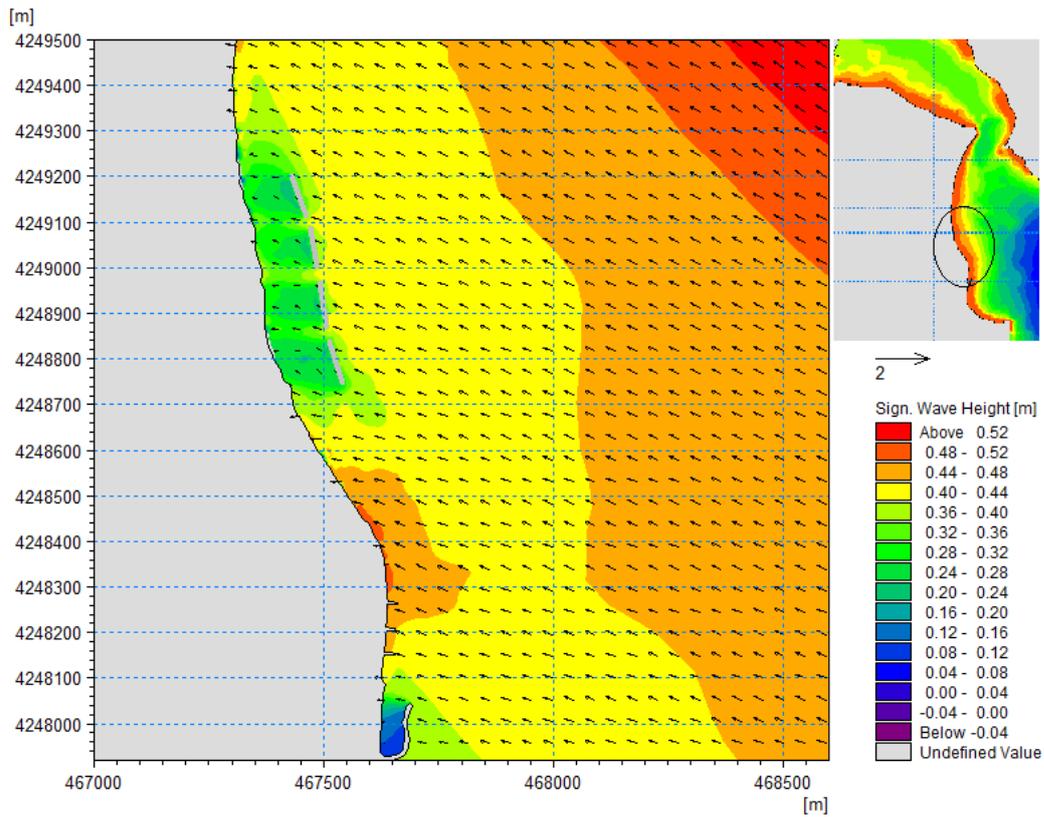
Οι τιμές που λαμβάνει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος, όπως αναφέρθηκε, ποικίλουν ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης το ύψος κύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,12 μέτρα χωρίς καμία διαφοροποίηση συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 7.48). Στις υποπεριοχές I, II της περιοχή 2 όπου εμφανίζονται τα πιο έντονα κυματικά χαρακτηριστικά εξαιτίας του αναπτύγματος πελάγους οι τιμές του ύψους κύματος έχουν μειωθεί και δεν ξεπερνούν τα 0,52 μέτρα. Παρατηρείται πως οι υψηλότερες αυτές τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος καταγράφονται πλέον στην περιοχή του Φάρου η οποία αντιστοιχεί στην υποπεριοχή I. Στην περιοχή αυτή εντοπίζεται ο σχηματισμός της παραλίας και δεν κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός έργων προστασίας εκτός από ήπιες παρεμβάσεις συγκράτησης του ιζήματος. Στο τμήμα της περιοχής όπου προτείνεται η θωράκιση με λιθορριπή τα κυματικά χαρακτηριστικά αποσβένουν ομαλά με μια μικρή αύξηση στο χαρακτηριστικό ύψος κύματος κατά τη θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτογραμμή (Σχήμα 7.49, Σχήμα 7.52). Στη σκιά των παράλληλων κυματοθραυστών καταγράφονται, όπως ήταν αναμενόμενο, χαμηλές τιμές του ύψους κύματος (Σχήμα 7.50, Σχήμα 7.52). Στη συνέχεια περίξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές του ύψους κύματος είναι μικρότερες, της τάξης των 0,32-0,36 μέτρων και εντός της λιμενολεκάνης δεν ξεπερνούν τα 0,2 μέτρα (Σχήμα 7.50, Σχήμα 7.51). Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης, οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,36 μέτρα (Σχήμα 7.51).



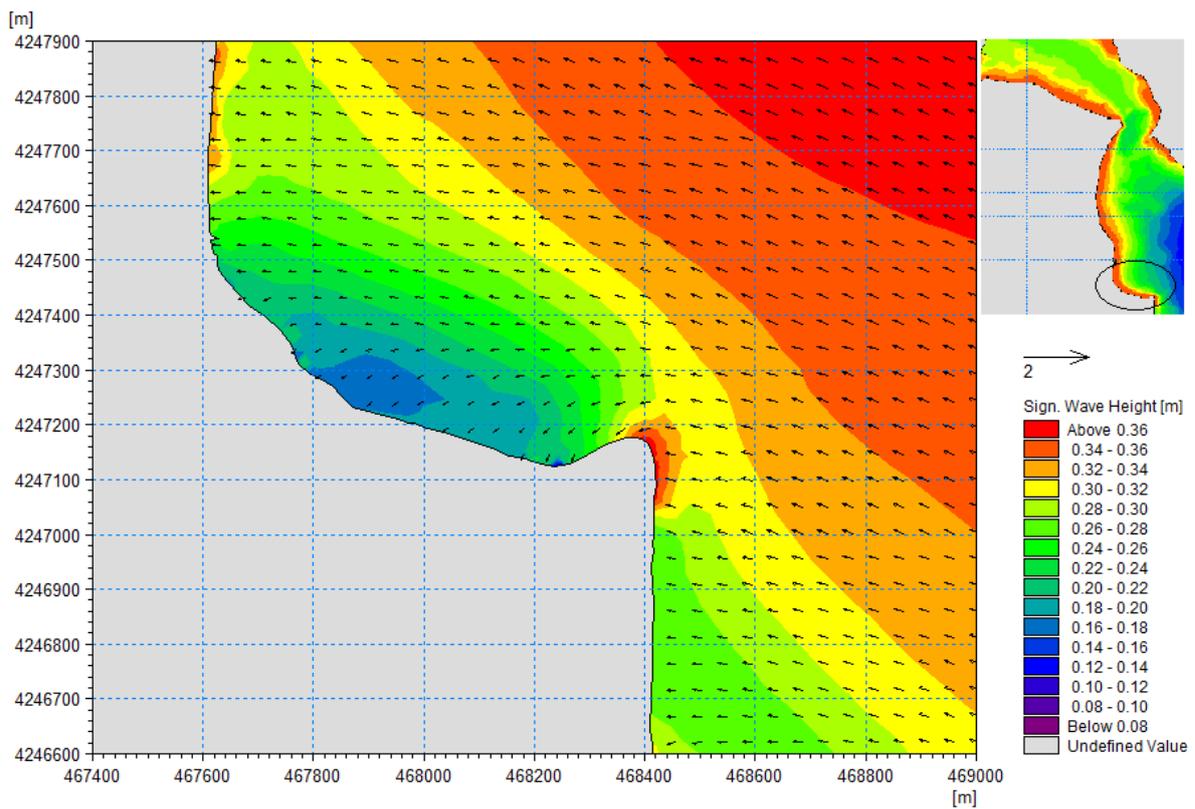
Σχήμα 7.48: Σημαντικό ύψος κύματος – Περιοχή 1



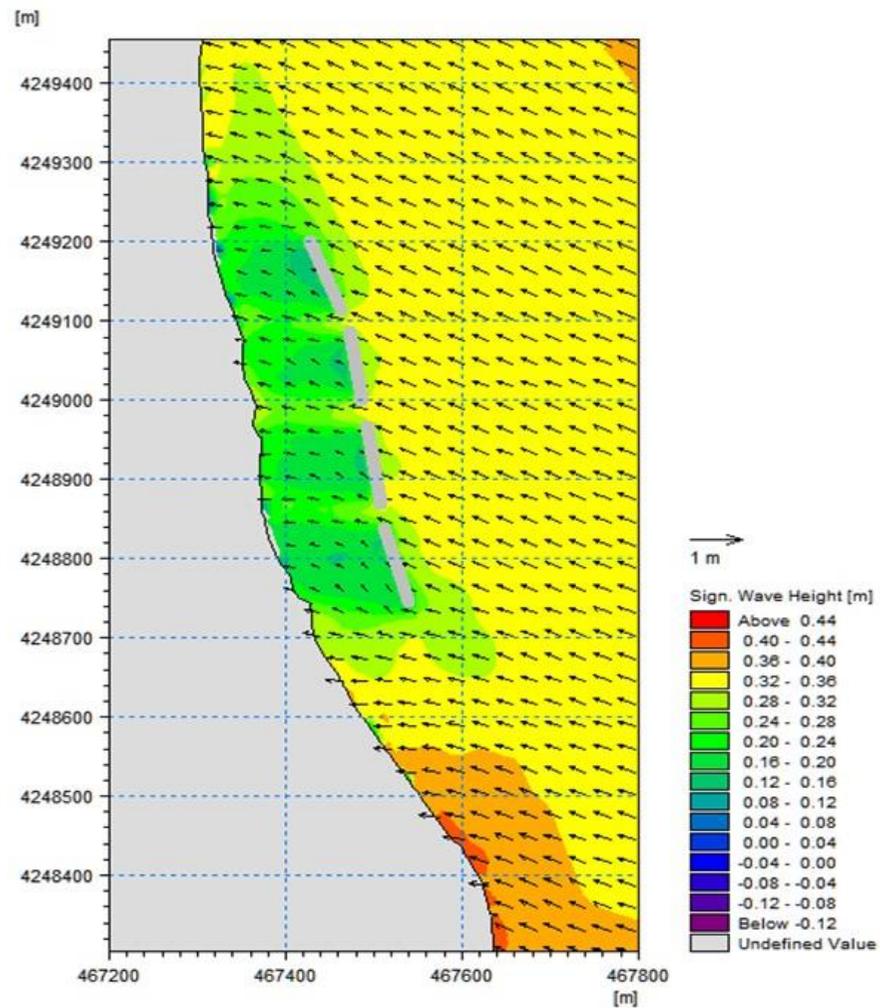
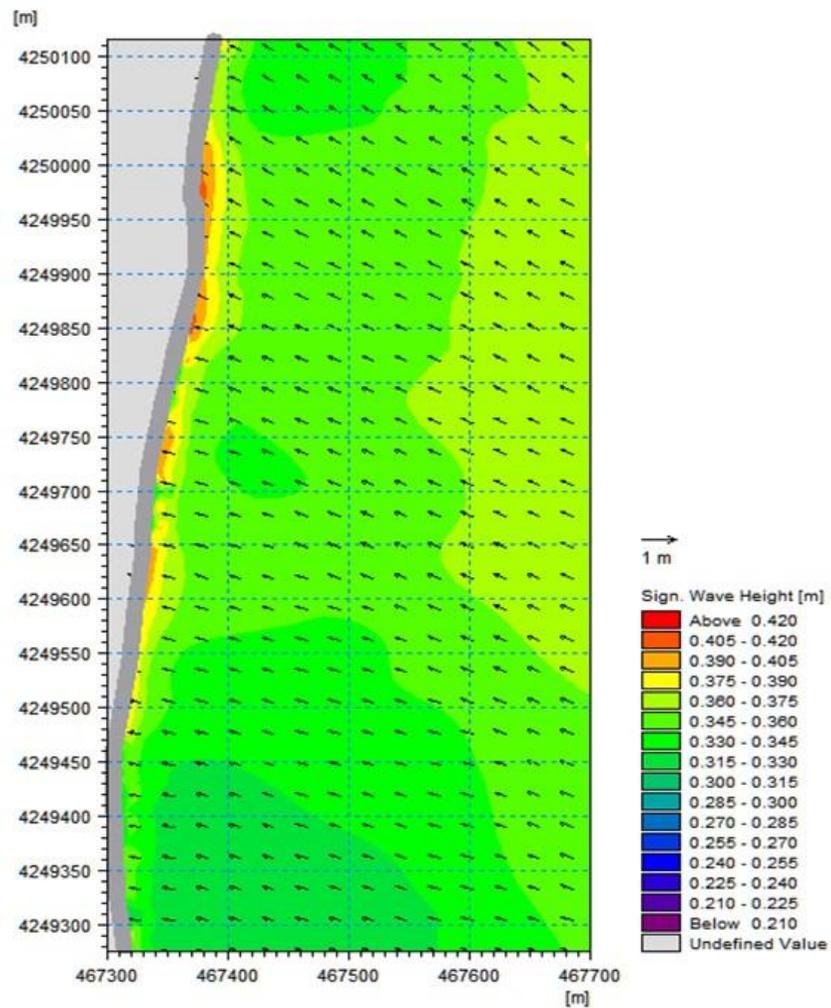
Σχήμα 7.49: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.50: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.51: Σημαντικό ύψος κύματος - Υποπεριοχή III

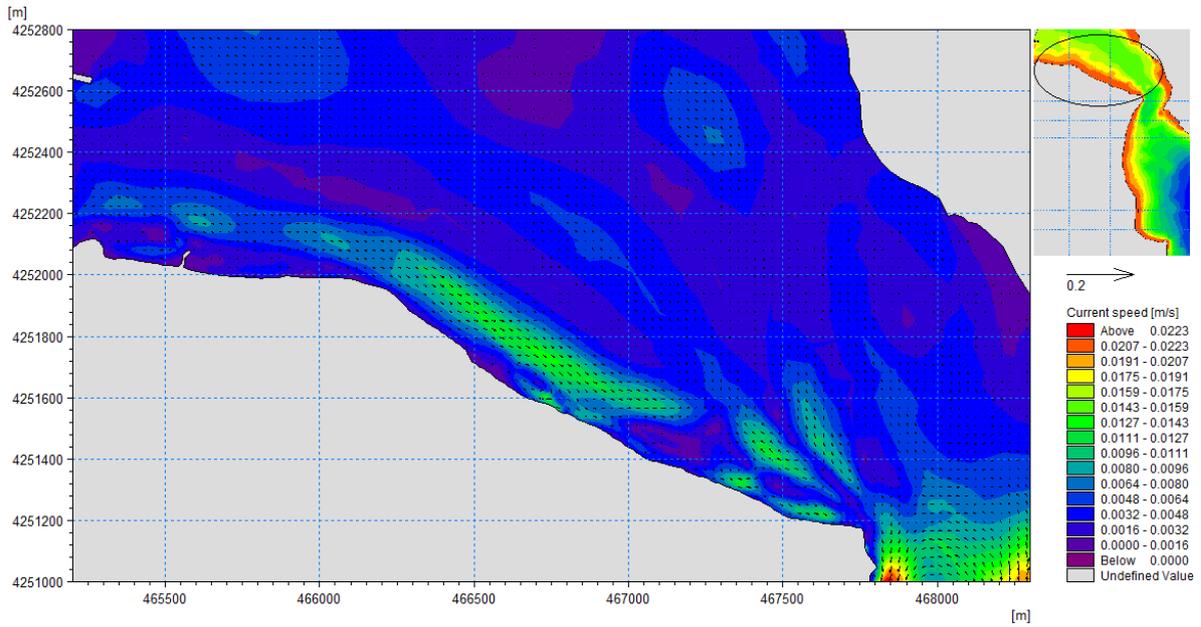


Σχήμα 7.52: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος περίξ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

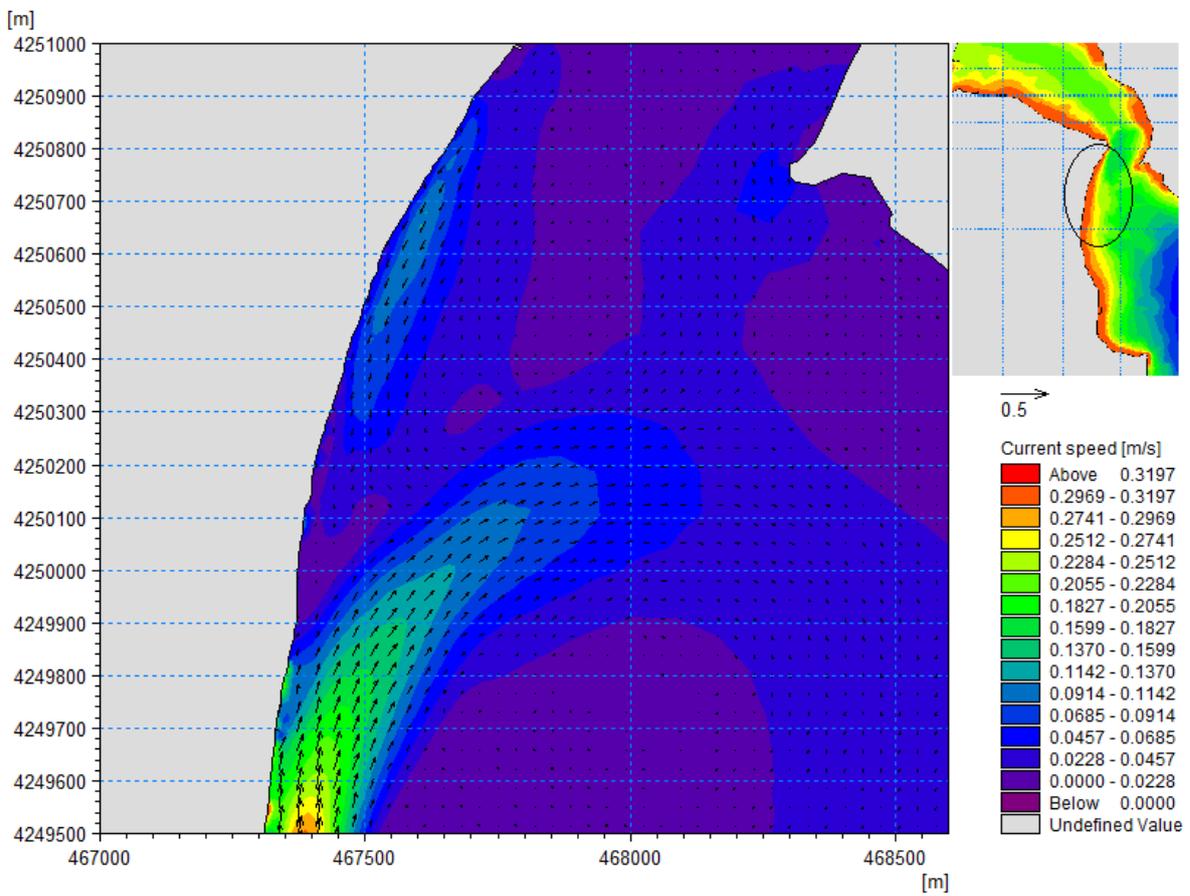
## Υδροδυναμικό μοντέλο

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πως η υδροδυναμική κυκλοφορία χαρακτηρίζεται από παράκτιο ρεύμα με σημαντικά μικρότερες ταχύτητες συγκριτικά με τα αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος (Σχήμα 7.54, Σχήμα 7.55) στις υποπεριοχές I, II ύστερα από τη θωράκιση της ακτογραμμής με λιθορριπή παρατηρείται εξάλειψη του βελοειδούς ρεύματος που δημιουργούταν εξαιτίας των ανακλάσεων στο κατακόρυφο τοίχιο, δημιουργείται όμως νέο βελοειδές εξαιτίας των παράλληλων κυματοθραυστών που εκτρέπει τη ροή προς τα ανοιχτά. Στο τμήμα της υποπεριοχής II όπου προτείνεται η κατασκευή παράλληλων κυματοθραυστών (Σχήμα 7.55) τα διανύσματα των ρευμάτων παρουσιάζονται ιδιαίτερα μειωμένα ενώ αυξάνονται στις περιοχές γύρω από τους κυματοθραύστες λόγω της θραύσης των κυματισμών στα σημεία αυτά, αλλά και λόγω της διατήρησης της ορμής σε σχέση με την ανακλώμενη ταχύτητα πάνω στο έργο (Αφεντούλης, 2017). Στην περιοχή νότια του λιμενίσκου η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.56 η κύρια κατεύθυνση των ρευμάτων είναι προς τα Νότια με χαμηλές ταχύτητες. Στο παράκτιο τμήμα του οικισμού Βαθύ, βόρεια της περιοχής μελέτης, και στο νοτιότερο άκρο της η κυματική ενέργεια είναι μειωμένη με αποτέλεσμα το πεδίο κυματογενούς κυκλοφορίας να είναι εξίσου σημαντικά μειωμένο.

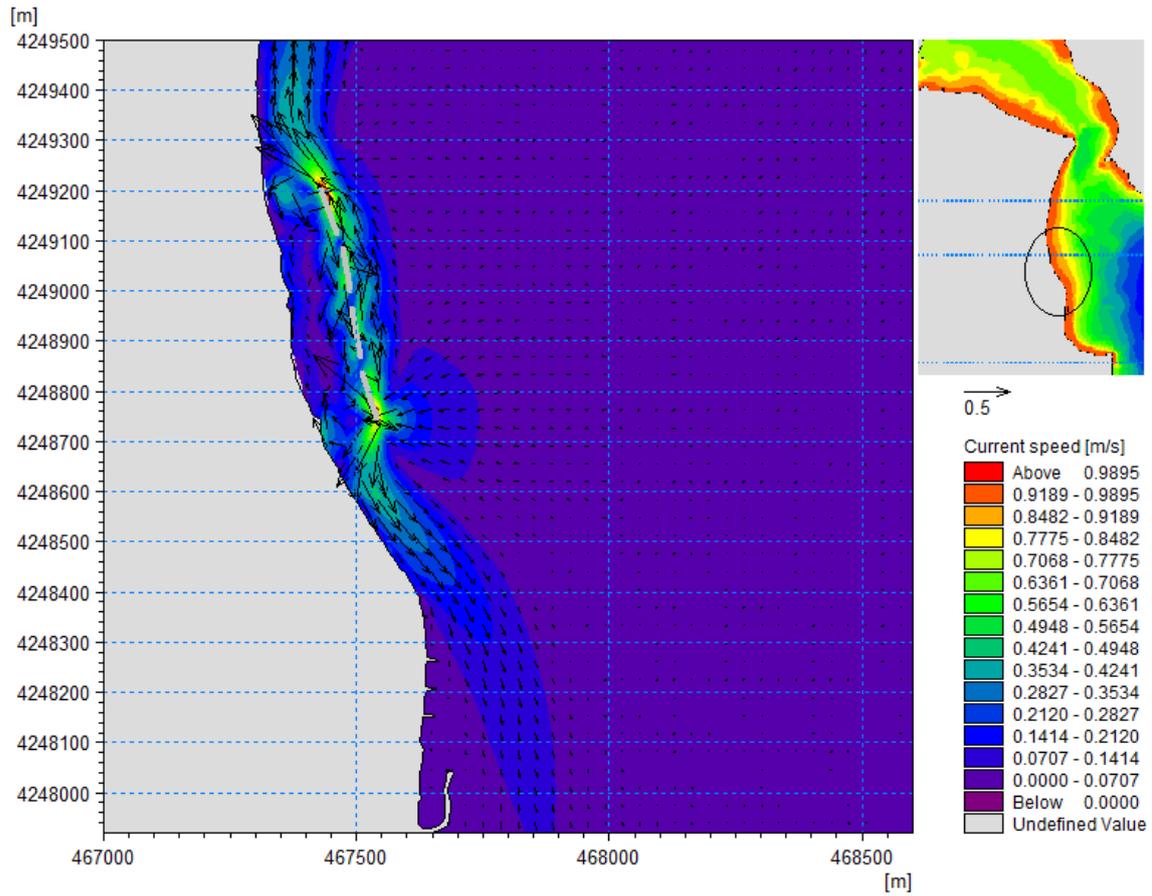
Οι τιμές που λαμβάνει το εύρος της ταχύτητας των παράκτιων ρευμάτων μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η ταχύτητα των παράκτιων ρευμάτων λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,0127 m/s (Σχήμα 7.53). Στην υποπεριοχή I η ταχύτητα παίρνει αυξημένες τιμές (Σχήμα 7.54). Στην υποπεριοχή II παρουσιάζονται επίσης αυξημένες τιμές στην περιοχή των έργων όπου η ροή μάζας νερού δημιουργεί υψηλές ταχύτητες ανάντη αυτών καθώς και βελοειδές ρεύμα στα βόρεια και στα νότια των κυματοθραυστών με ταχύτητες που πλησιάζουν τα 0,42 m/s (Σχήμα 7.55, Σχήμα 7.57). Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος είναι μικρότερες από 0,040 m/s. Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,020 m/s (Σχήμα 7.56).



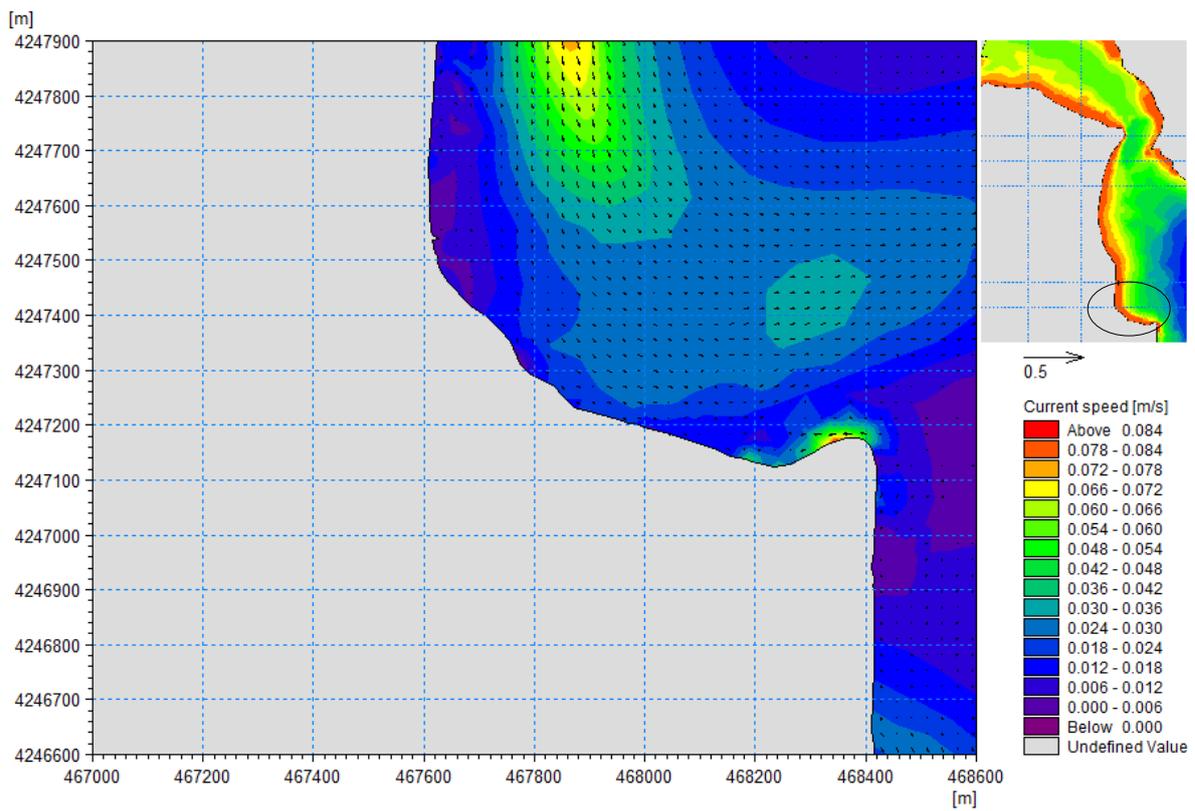
Σχήμα 7.53: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1



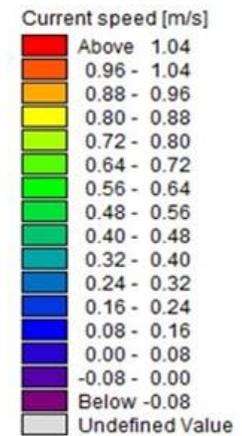
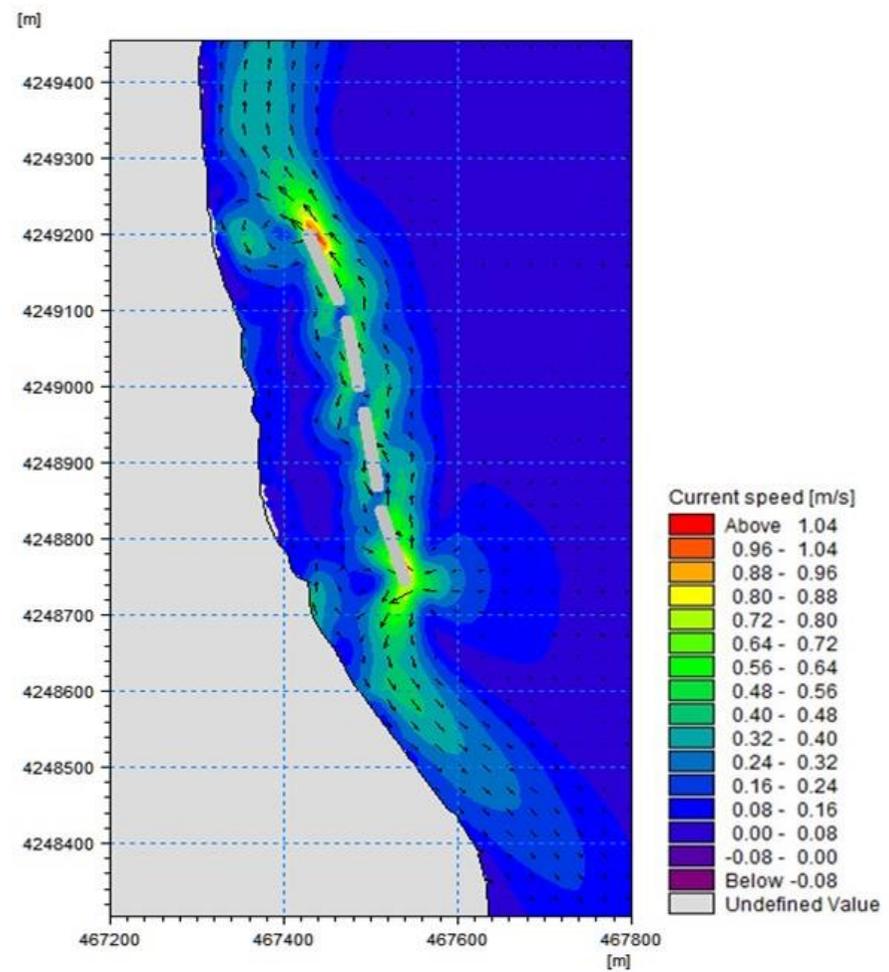
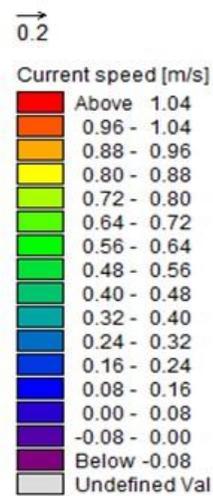
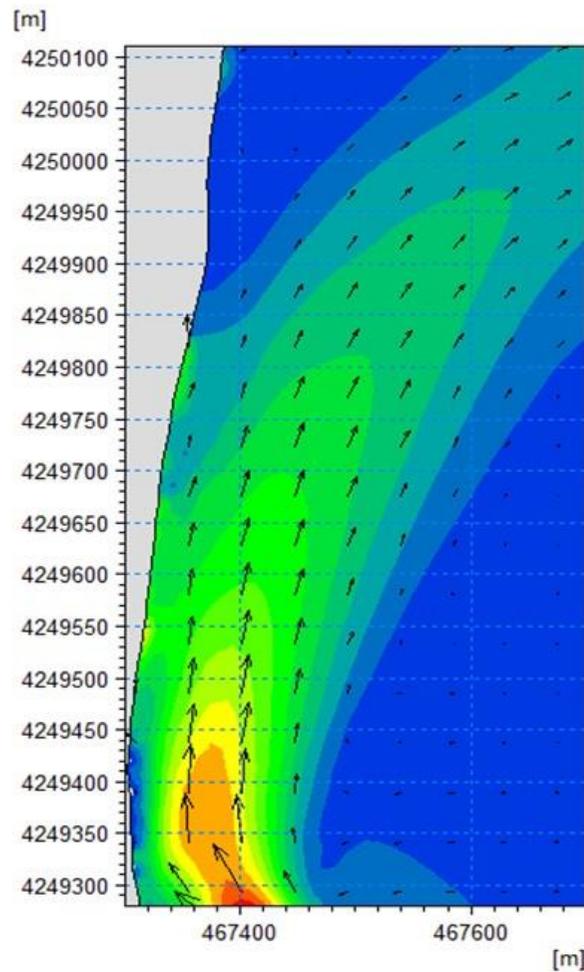
Σχήμα 7.54: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή I



Σχήμα 7.55: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.56: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων-Υποπεριοχή III



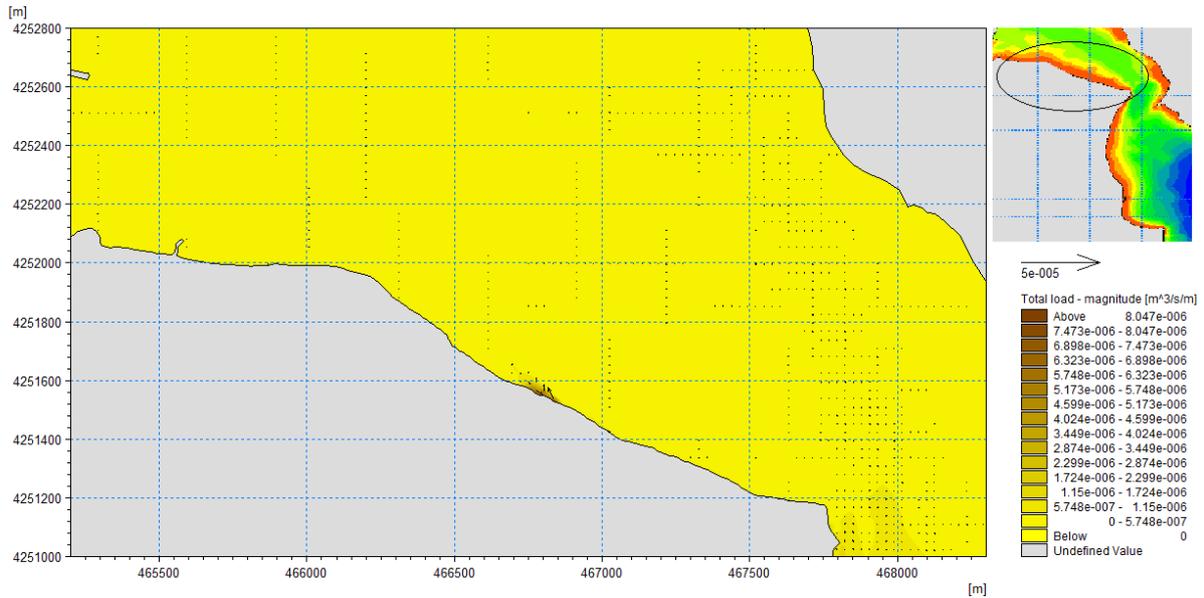
Σχήμα 7.57: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων περίχ των κάθετων προβόλων και της θωράκισης με λιθορριπή

## Μοντέλο στερεομεταφοράς

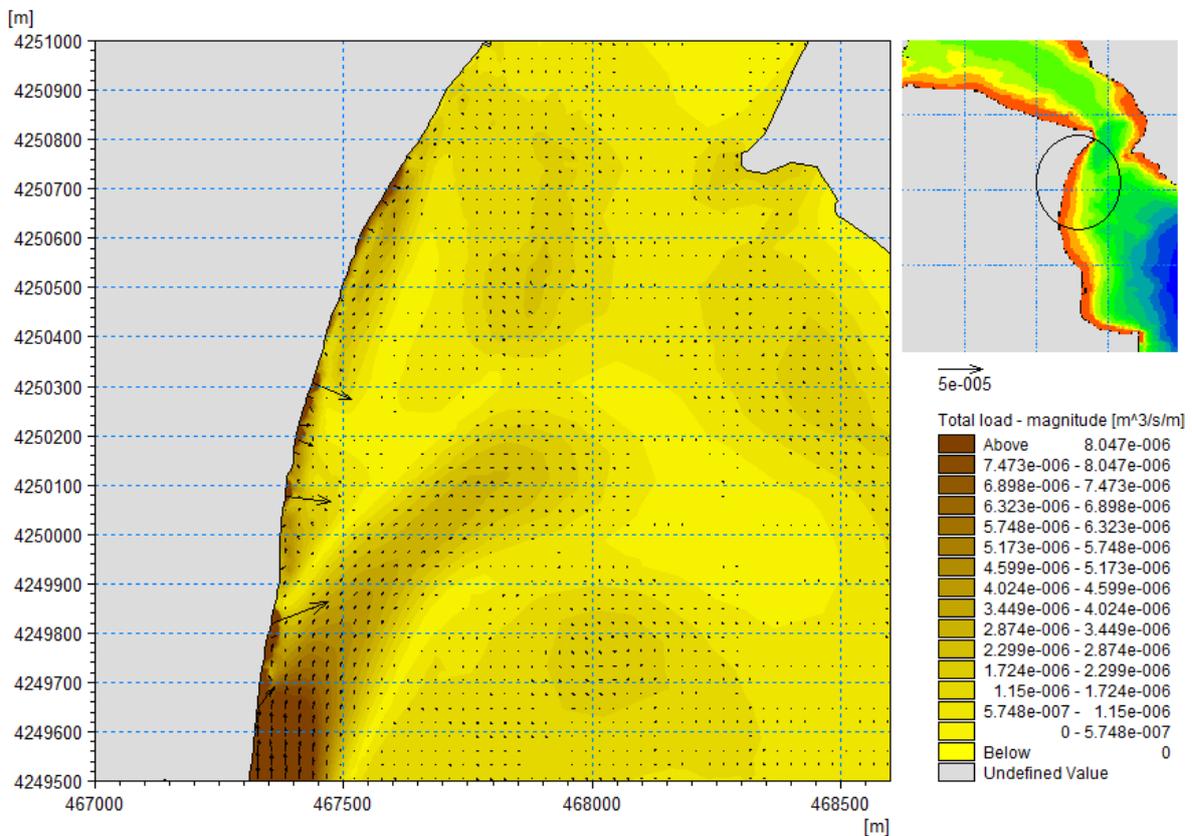
Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το πεδίο της στερεομεταφοράς συγκριτικά με εκείνα της υφιστάμενης κατάστασης παρατηρείται πως τα διανύσματα της στερεομεταφοράς παρουσιάζουν αισθητή μείωση των τιμών τους. Η κατεύθυνση της στερεομεταφοράς σύμφωνα με τα διαγράμματα ακολουθεί εν γένει την πορεία της υδροδυναμικής κυκλοφορίας ενώ δεν παρατηρούνται έντονες μετακινήσεις στην περιοχή ανάμεσα στην ακτογραμμή και τα έργα, κάτι που οδηγεί στη συγκράτηση του ιζήματος. Πιο συγκεκριμένα, οι κυματισμοί εξαιτίας της περίθλασης θα έχουν μικρότερο ύψος στη «σκιά» του κυματοθραύστη από ό,τι εκτός του πεδίου επιρροής του. Οι τελευταίοι θα θραύονται σε μεγαλύτερο βάθος θραύσης  $d_b$  και με μεγαλύτερο ύψος θραύσης  $H_b$  από αυτούς που μεταδίδονται πίσω από τον κυματοθραύστη. Η ανύψωση της μέσης στάθμης θάλασσας είναι ανάλογη του ύψους του κύματος και του βάθους στο σημείο θραύσης. Συνεπώς, δημιουργούνται διαφορές στη στάθμη της θάλασσας κατά μήκος της ακτής, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία δύο κυματογενών ρευμάτων που κατευθύνονται προς το κέντρο του πεδίου. Τα δύο ρεύματα συναντώνται και κατευθύνονται προς το τεχνικό έργο που αποτελεί στερεό όριο, σχηματίζοντας δύο στροβίλους αντίθετης φοράς. Τα ρεύματα αυτά, με τη βοήθεια και των κυματισμών που συμβάλλουν στην αποσταθεροποίηση των κόκκων και την αυξημένη ικανότητα στερεομεταφοράς (αυξάνοντας τις διατμητικές τάσεις του πυθμένα), μεταφέρουν την άμμο από τα άκρα του πεδίου προς το κέντρο. Εκεί, όπου επικρατεί σχετική κυματική ηρεμία με ελαττωμένη ικανότητα στερεομεταφοράς, την εναποθέτουν. Κατ' αυτόν τον τρόπο μεταβάλλεται η αρχική βυθομετρία και δημιουργείται μια προεξοχή (salient) στη «σκιά» του κυματοθραύστη αλλά και πλευρική διάβρωση. Η πρόσκωση αυτή, όταν ο κυματοθραύστης βρίσκεται κοντά στην ακτή, μπορεί να προχωρήσει και να ενωθεί με το παράλληλο έργο σχηματίζοντας tombolo (Καραμπάς, 2012). Οι κυματοθραύστες τοποθετούνται σε μεγάλη απόσταση από την ακτογραμμή ώστε να μην εγκλωβιστούν μεγάλες ποσότητες ιζήματος στην ακτή.

Οι τιμές που λαμβάνει η στερεομεταφορά κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης έχουν ως εξής: Στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα (Σχήμα 7.58). Στην υποπεριοχή I που αφορά το παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος, όπου προτείνεται η θωράκιση με λιθορριπή, η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή και προσεγγίζει την τιμή των  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.59) ενώ η στερεομεταφορά που ακολουθεί το βελοειδές ρεύμα προς τα βόρεια προσεγγίζει τα  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Ομοίως στην υποπεριοχή II η στερεομεταφορά προσεγγίζει την τιμή των  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ενώ η στερεομεταφορά που ακολουθεί το βελοειδές ρεύμα προς τα νότια προσεγγίζει τα  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - 3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.60). Στο τμήμα της υποπεριοχής όπου προτείνεται το σύστημα των παράλληλων κυματοθραυστών το φαινόμενο είναι έντονο καθώς δημιουργείται κυματογενής ροή μάζας εξαιτίας των θραυόμενων κυματισμών πάνω στις κατασκευές και εξαιτίας της περίθλασης των κυματισμών με τιμές που φαίνονται στα σχήματα 7.60 και 7.62. Νότια του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας που αποτελεί και το

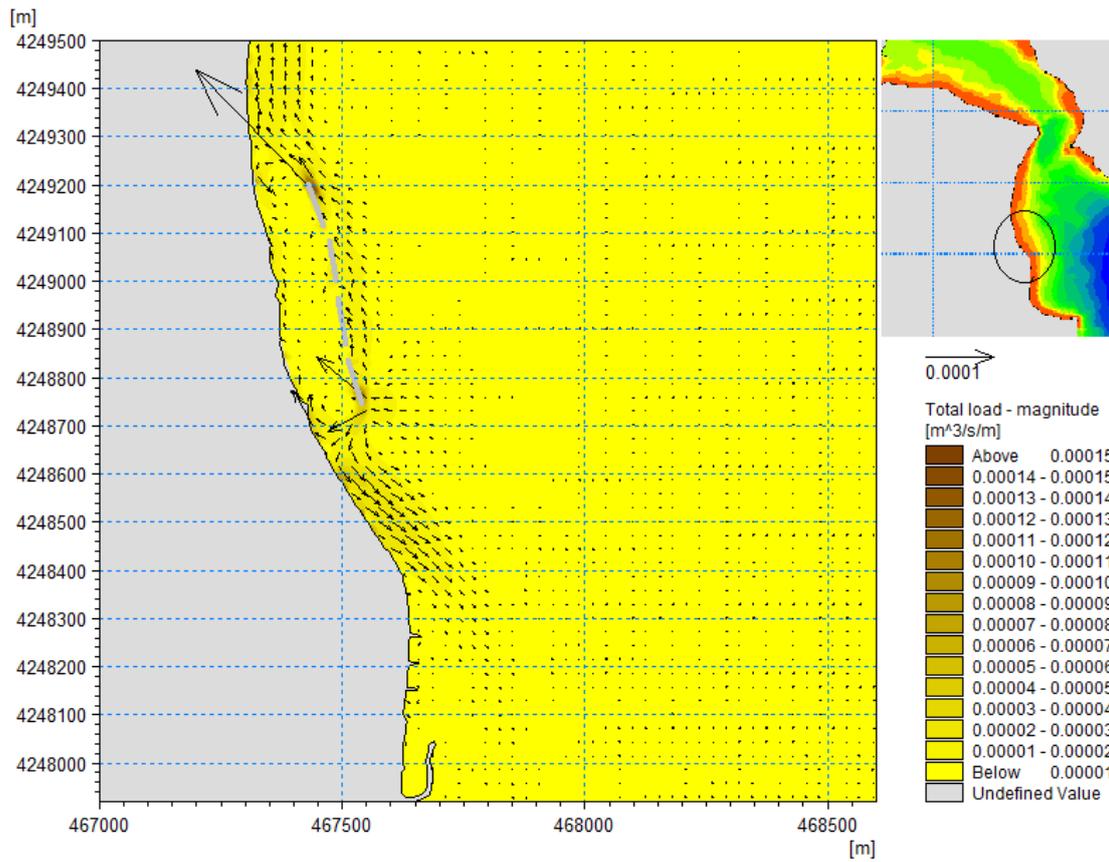
νοτιότερο τμήμα της ακτής μελέτης η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή και μικρής έντασης της τάξης των  $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.61).



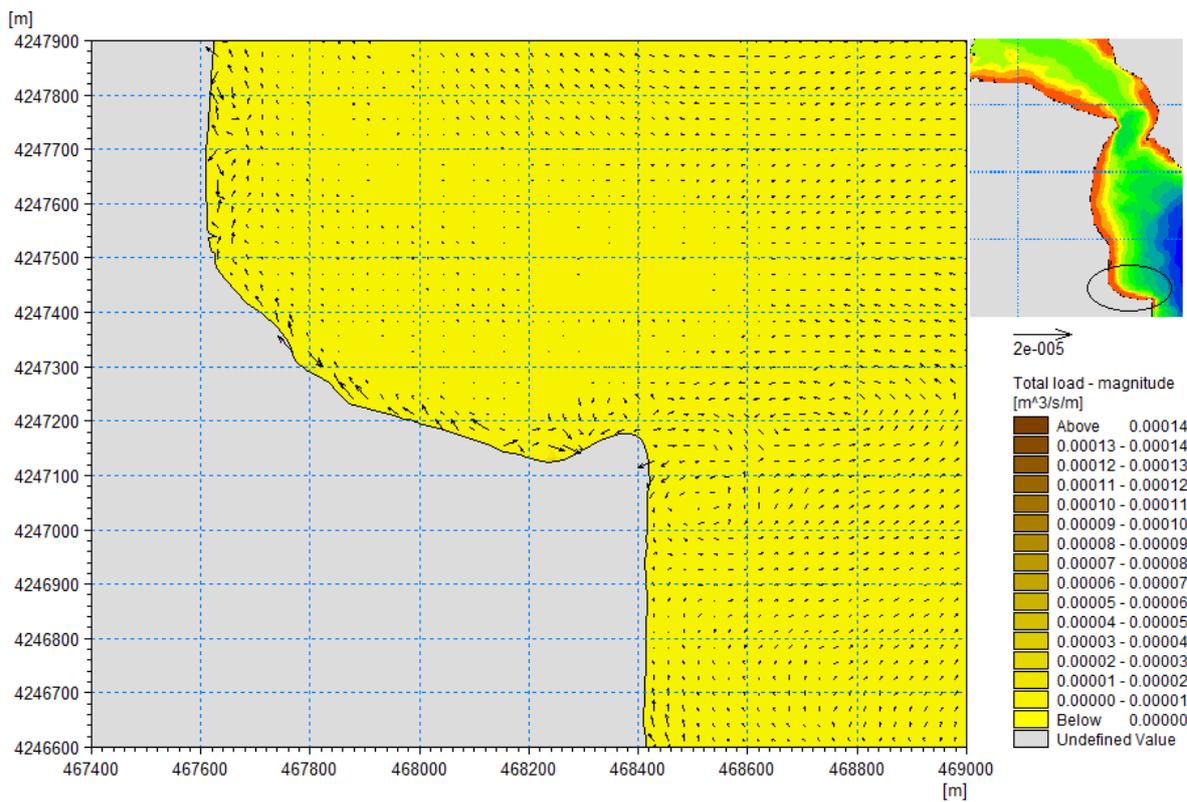
Σχήμα 7.58: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1



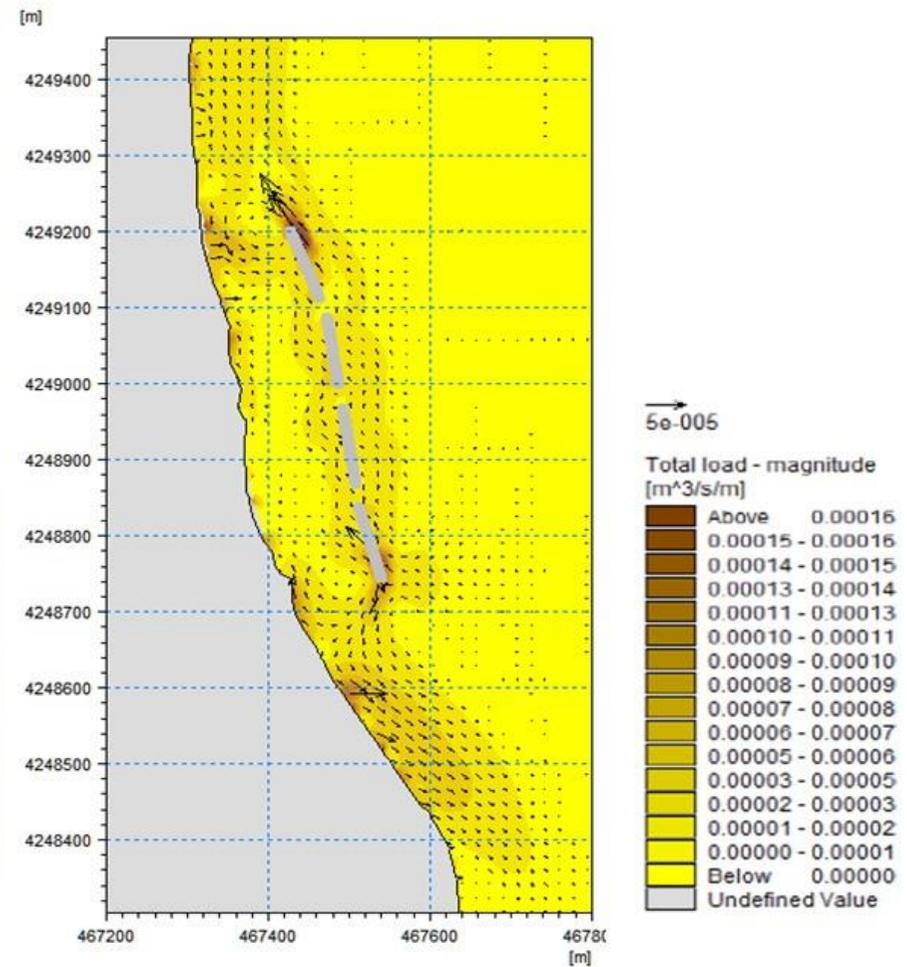
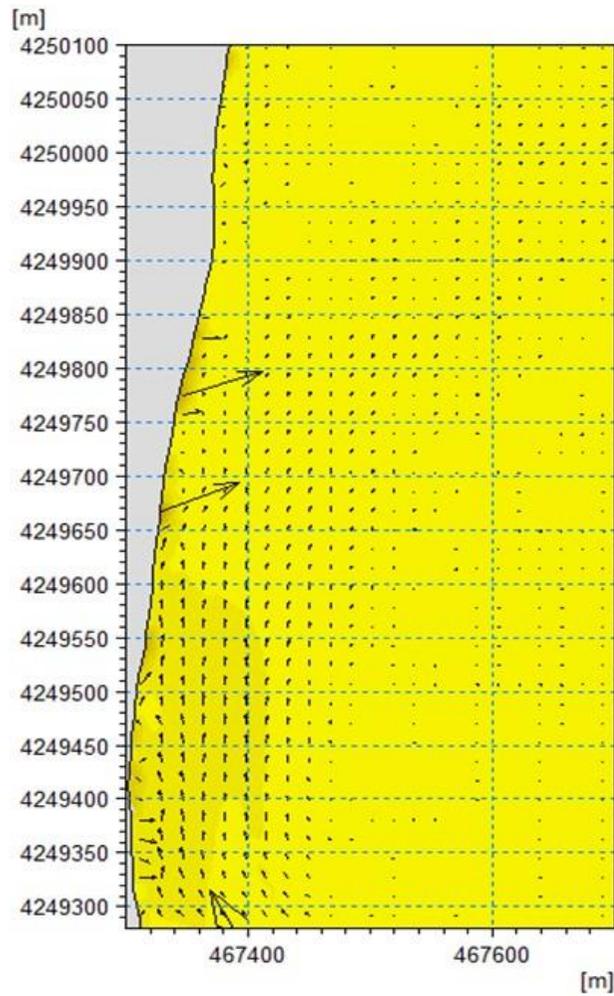
Σχήμα 7.59: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.60: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II



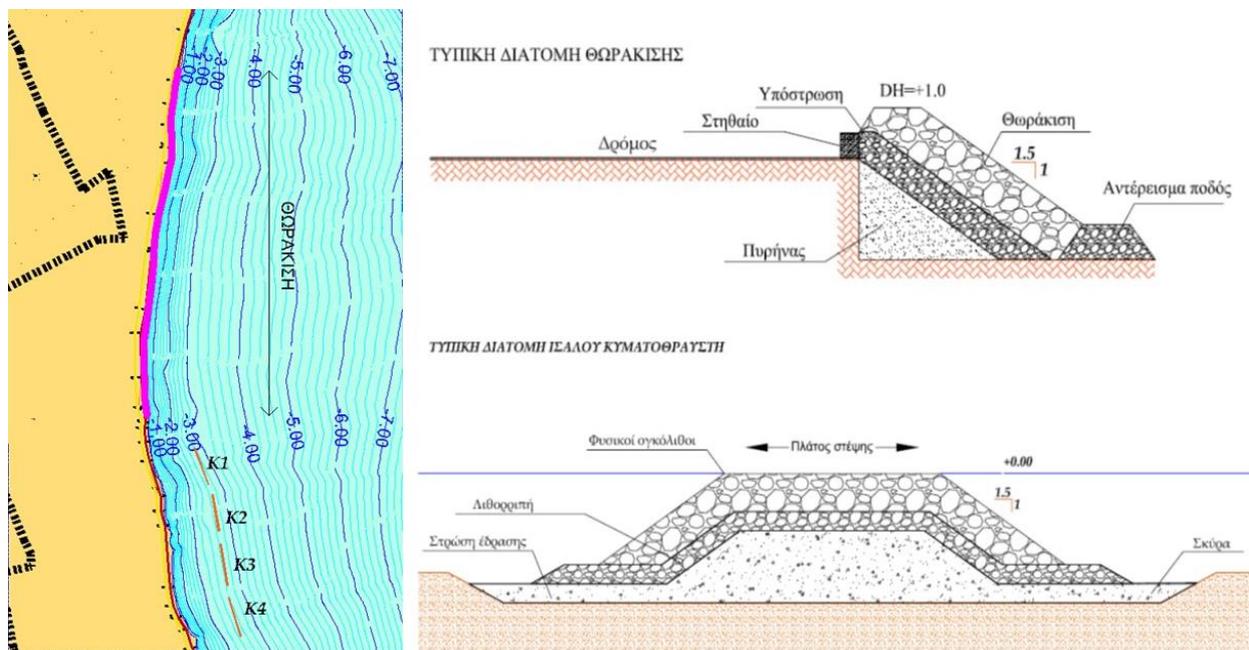
Σχήμα 7.61: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III



Σχήμα 7.62: Διανύσματα στερεομεταφοράς περίξ των παράλληλων κυματοθραυστών και της θωράκισης με λιθορριπή

#### 7.4.4 Εναλλακτική λύση IV

Η τέταρτη εναλλακτική λύση περιλαμβάνει ήπιες παρεμβάσεις στην περιοχή 1 και στην υποπεριοχή III της περιοχής 2, ενώ στην υποπεριοχή I και II της περιοχής 2 εξετάζεται περιμετρική θωράκιση του παράκτιου μετώπου, στο οποίο εμφανίζεται έντονη διάβρωση, λόγω του φαινομένου της ανάκλασης των προσπιπτόντων κυματισμών και ρευμάτων. Η θωράκιση θα γίνει με φυσικούς λίθους και ογκόλιθους καλής ποιότητας και ορθής διαβάθμισης. Σκοπός είναι να αποφευχθεί η διάβρωση της ακτής αλλά και να προστατευτούν οι υποδομές (δρόμοι, δίκτυα κ.λπ.) καθώς και οι παράκτιοι οικισμοί από τις πλημμύρες, κάτω από συνθήκες ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων συνδυασμένης αναρρίχησης κυματισμών και ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Καραμπάς, 2012). Στην υποπεριοχή II μελετάται επίσης η αφαίρεση των υφιστάμενων προβόλων του Νότιου τμήματος και προτείνεται η κατασκευή συστήματος τεσσάρων ίσαλων αποσπασμένων κυματοθραυστών (K1, K2, K3, K4), μήκους ~ 90 μέτρων έκαστος, (0,0) μέτρα πάνω στη στάθμη ηρεμίας, σε βάθος νερού -3 μέτρων από φυσικούς λίθους και ογκόλιθους με διάκενο μεταξύ τους μήκους 28 μέτρων, ώστε να προστατευθεί η παραλία. (Σχήμα 7.63)



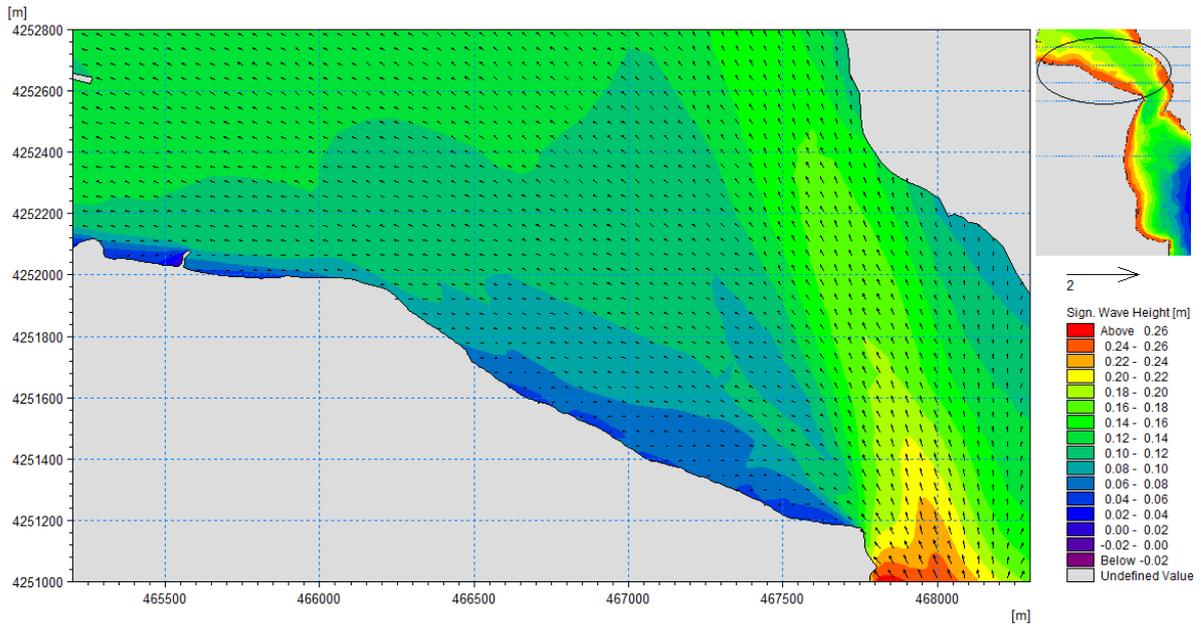
Σχήμα 7.63: Εναλλακτική λύση έργων παράκτιας προστασίας IV

Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης έχουν ως εξής:

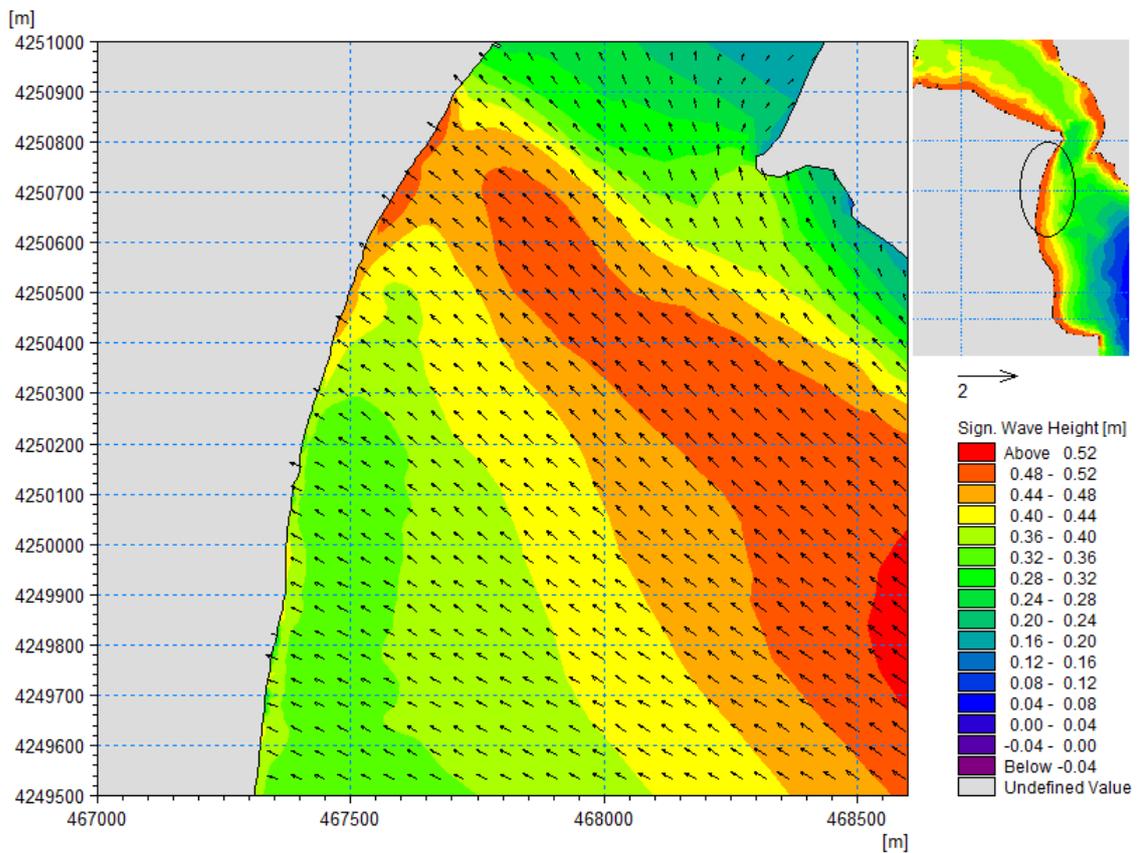
### **Κυματικό μοντέλο**

Μελετώντας τα αποτελέσματα για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος παρατηρείται μείωση των κυματικών χαρακτηριστικών συγκριτικά με εκείνα τη υφιστάμενης κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα η θωράκιση της ακτής με λιθορριπή καταργεί τον υψηλό συντελεστή ανάκλασης που παρουσίαζε το κατακόρυφο τοίχιο με αποτέλεσμα οι υδροδυναμικές συνθήκες στην περιοχή να ομαλοποιούνται. Ταυτόχρονα με την κατασκευή κυματοθραυστών χαμηλής στέψης παράλληλα σε μια ακτή ένα μέρος της κυματικής ενέργειας ανακλάται προς τα ανοιχτά, ένα μέρος αποσβένεται και ένα μέρος της μεταδίδεται προς την ακτή. (Καραμπάς, 2012)

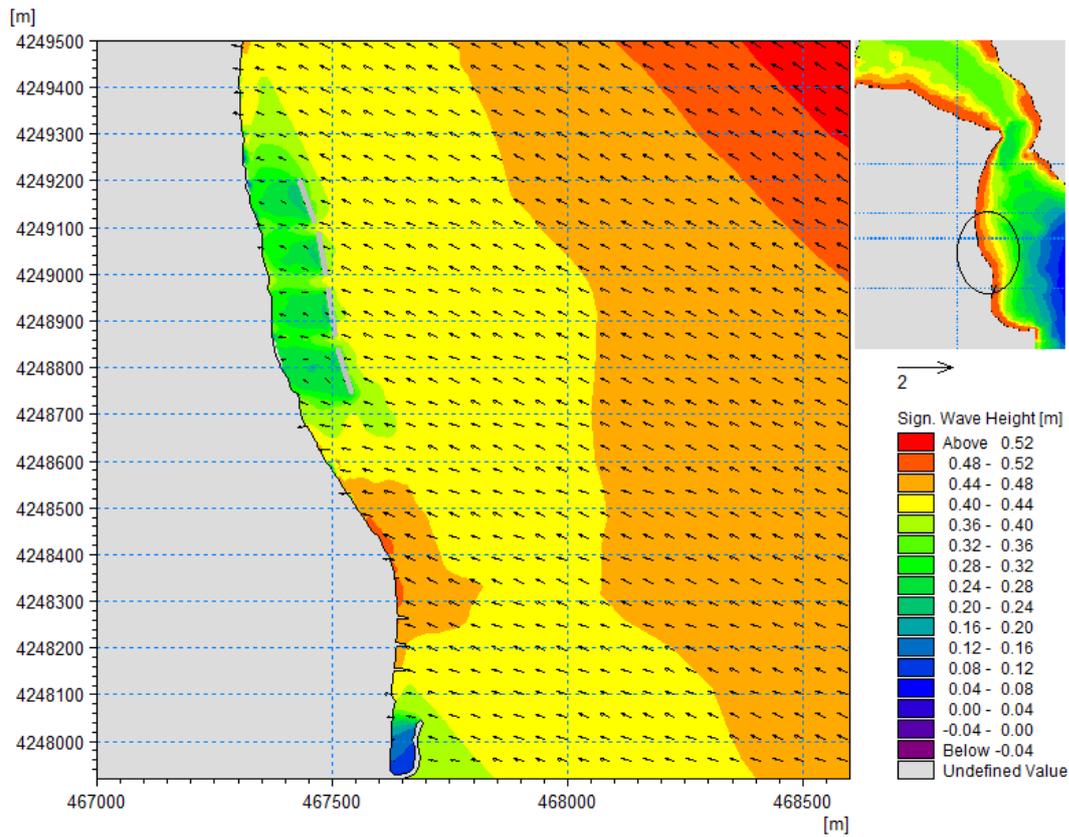
Οι τιμές που λαμβάνει το χαρακτηριστικό ύψος κύματος έχουν ως εξής: Στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης το ύψος κύματος λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,12 μέτρα χωρίς καμία διαφοροποίηση συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση (Σχήμα 7.64). Στην περιοχή 2 όπου εμφανίζονται τα πιο έντονα κυματικά χαρακτηριστικά εξαιτίας του αναπτύγματος πελάγους οι τιμές του ύψους κύματος έχουν μειωθεί και δεν ξεπερνούν τα 0,52 μέτρα. Παρατηρείται πως οι υψηλότερες αυτές τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος καταγράφονται πλέον στην περιοχή του Φάρου η οποία αντιστοιχεί στην υποπεριοχή Ι. Στην περιοχή αυτή εντοπίζεται ο σχηματισμός της παραλίας και δεν κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός έργων προστασίας εκτός από ήπιες παρεμβάσεις συγκράτησης του ιζήματος. Στο τμήμα της περιοχής όπου προτείνεται η θωράκιση με λιθορριπή τα κυματικά χαρακτηριστικά αποσβένουν ομαλά με μια μικρή αύξηση στο χαρακτηριστικό ύψος κύματος κατά τη θραύση των κυματισμών κοντά στην ακτογραμμή (Σχήμα 7.65, Σχήμα 7.68). Στη σκιά των παράλληλων κυματοθραυστών καταγράφονται, όπως ήταν αναμενόμενο, χαμηλές τιμές του ύψους κύματος, πιο υψηλές όμως συγκριτικά με την εναλλακτική λύση ΙΙΙ που αφορά έξαλλους κυματοθραύστες (Σχήμα 7.66). Στη συνέχεια περίξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές του ύψους κύματος είναι μικρότερες, της τάξης των 0,32-0,36 μέτρων και εντός της λιμενολεκάνης δεν ξεπερνούν τα 0,2 μέτρα (Σχήμα 7.66, Σχήμα 7.67). Στο τμήμα της υποπεριοχής ΙΙΙ, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης, οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,36 μέτρα (Σχήμα 7.67).



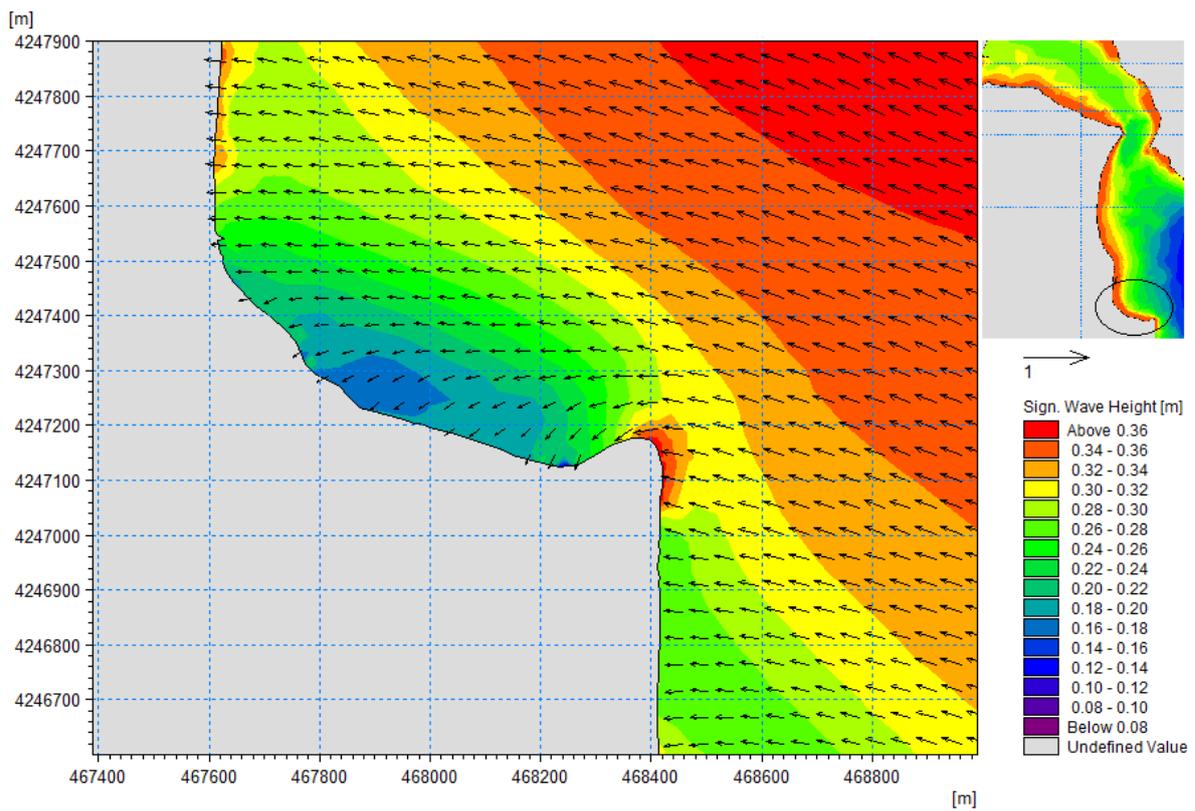
Σχήμα 7.64: Σημαντικό ύψος κύματος -Περιοχή 1



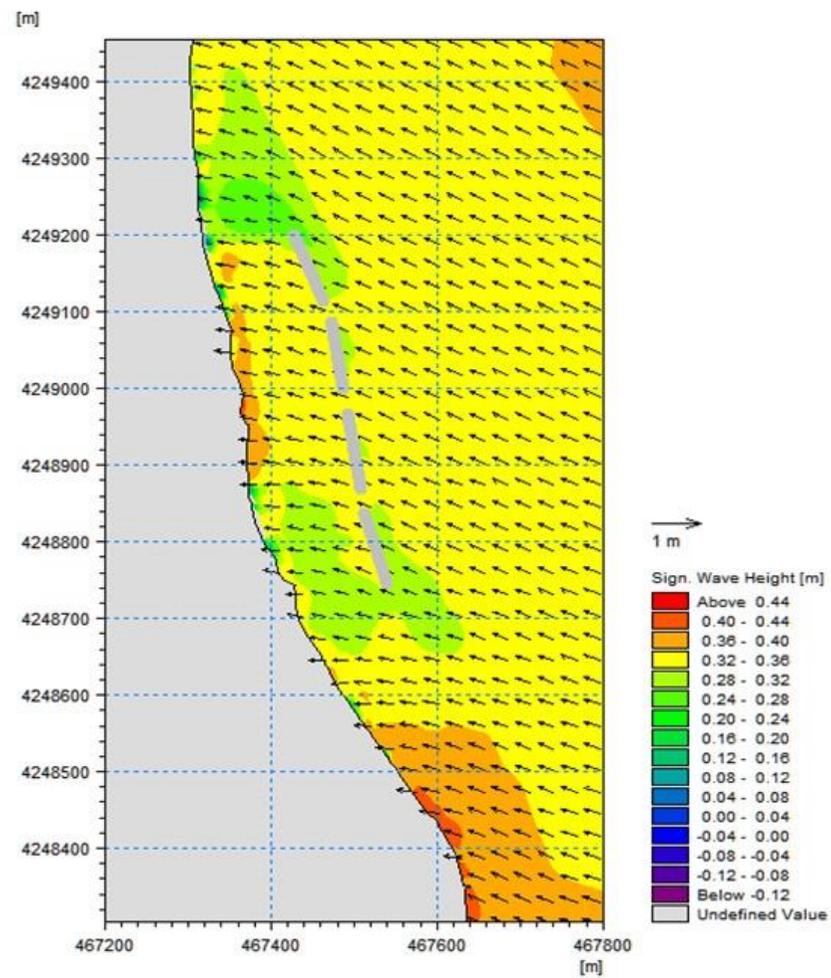
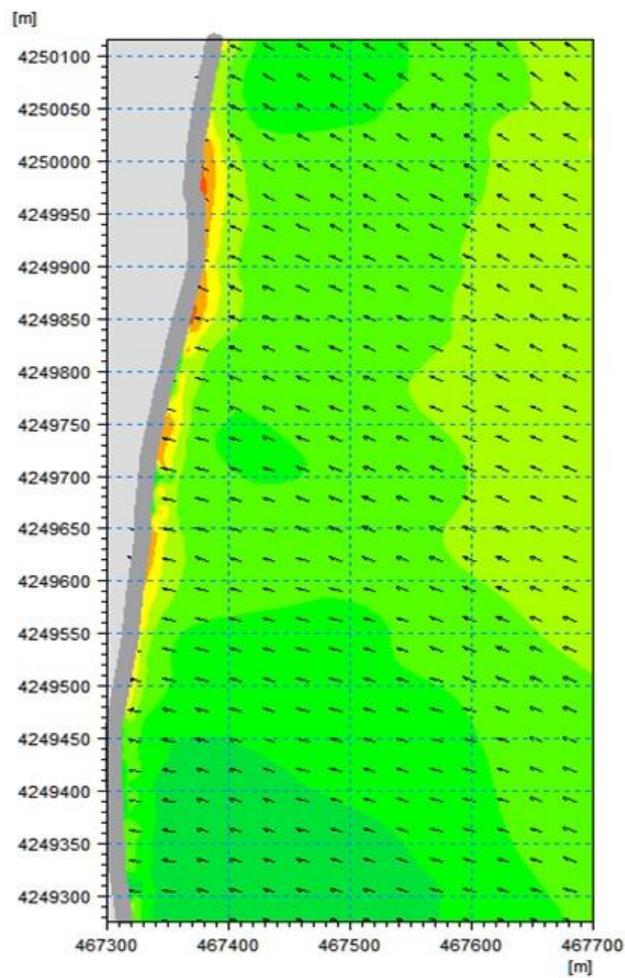
Σχήμα 7.65: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.66: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.67: Σημαντικό ύψος κύματος- Υποπεριοχή III

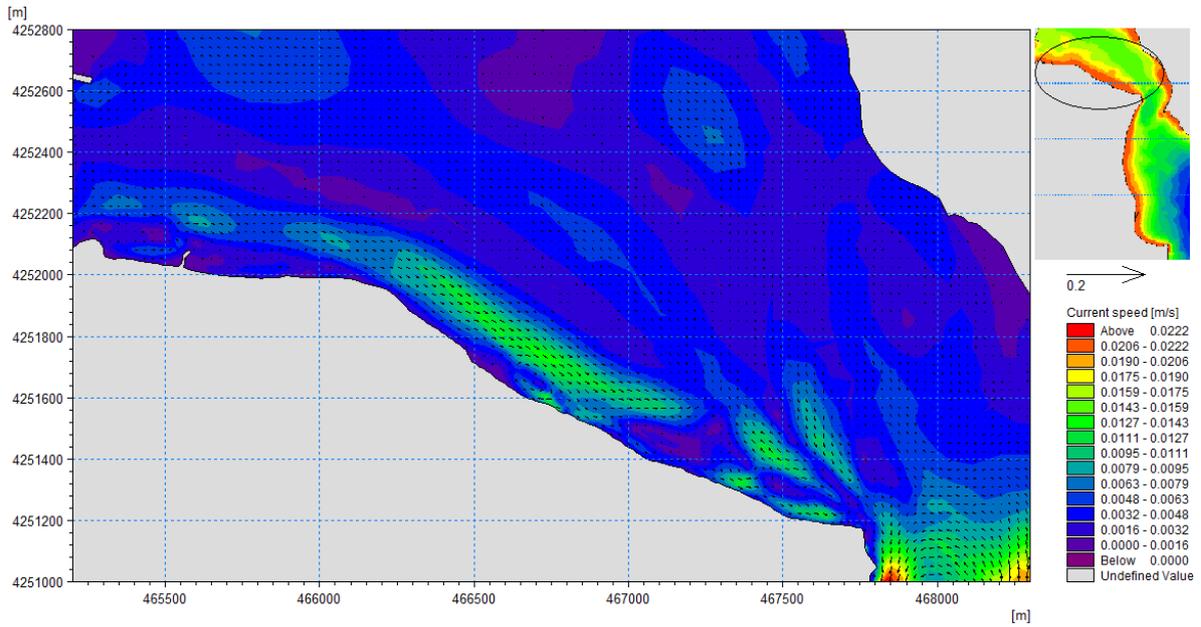


Σχήμα 7.68: Χαρακτηριστικό ύψος κύματος πέριξ των κυματοθραυστών και της θωράκισης με λιθορριπή

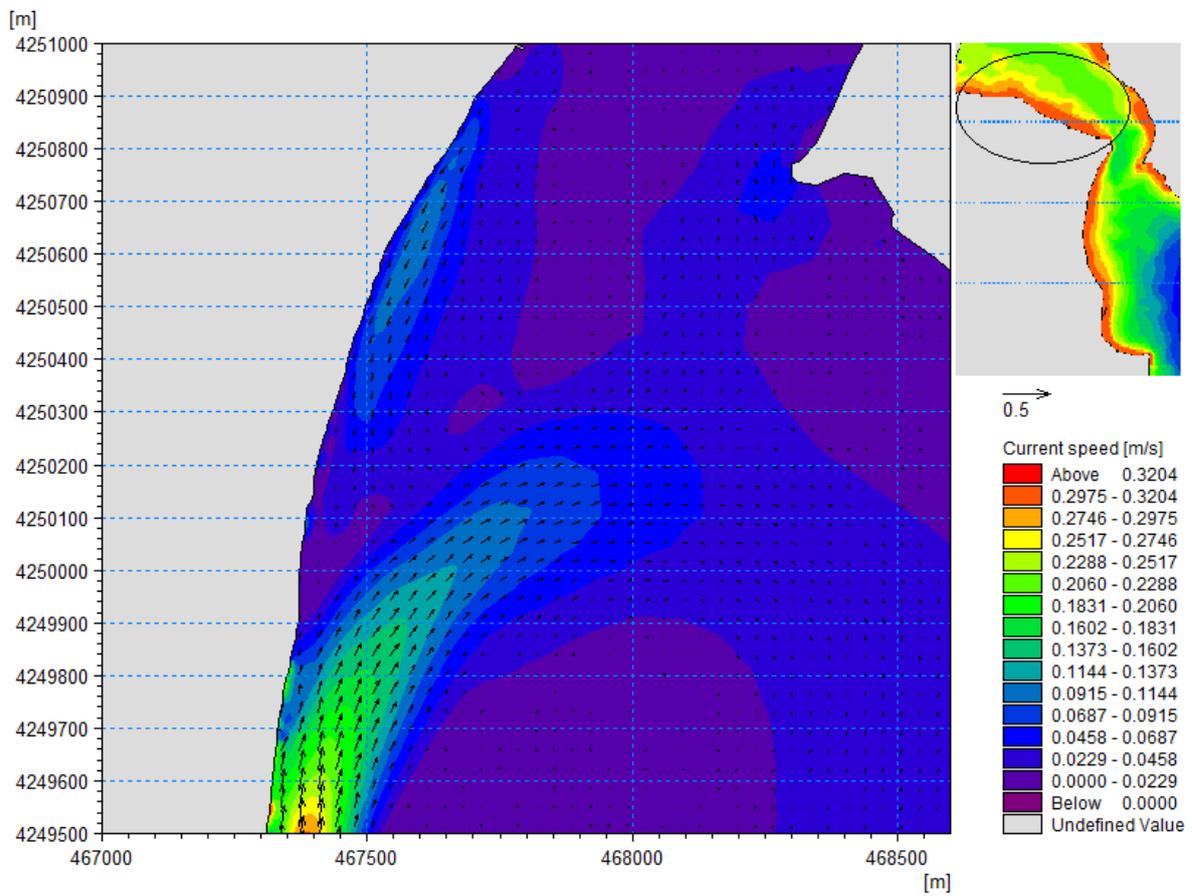
## Υδροδυναμικό μοντέλο

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα παρατηρείται πως η υδροδυναμική κυκλοφορία χαρακτηρίζεται από παράκτιο ρεύμα με σημαντικά μικρότερες ταχύτητες συγκριτικά με τα αποτελέσματα της υφιστάμενης κατάστασης. Πιο συγκεκριμένα στο παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος (Σχήμα 7.70, Σχήμα 7.71) στις υποπεριοχές I, II ύστερα από τη θωράκιση της ακτογραμμής με λιθορριπή παρατηρείται εξάλειψη του βελοειδούς ρεύματος που δημιουργούταν εξαιτίας των ανακλάσεων και παράλληλα δημιουργία νέων βελοειδών ρευμάτων εξαιτίας της παρουσίας των παράλληλων κυματοθραυστών. Στο τμήμα της υποπεριοχής II όπου προτείνεται η κατασκευή των έργων αυτών (Σχήμα 7.71, Σχήμα 7.73) τα διανύσματα των ρευμάτων παρουσιάζονται μειωμένα στη σκιά των κυματοθραυστών ενώ αυξάνονται στις περιοχές γύρω από τους κυματοθραύστες λόγω της θραύσης των κυματισμών στα σημεία αυτά, αλλά και λόγω της διατήρησης της ορμής σε σχέση με την ανακλώμενη ταχύτητα πάνω στο έργο (Αφεντούλης, 2017). Στην περιοχή πέριξ του λιμενίσκου η οποία παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.71 και 7.72 η κύρια κατεύθυνση των ρευμάτων τόσο ανάντη του λιμενίσκου όσο και κατάντη είναι προς τα Νότια. Στο παράκτιο τμήμα του οικισμού Βαθύ και στο νοτιότερο άκρο της ακτής μελέτης η κυματική ενέργεια είναι μειωμένη με αποτέλεσμα το πεδίο κυματογενούς κυκλοφορίας να είναι εξίσου σημαντικά μειωμένο.

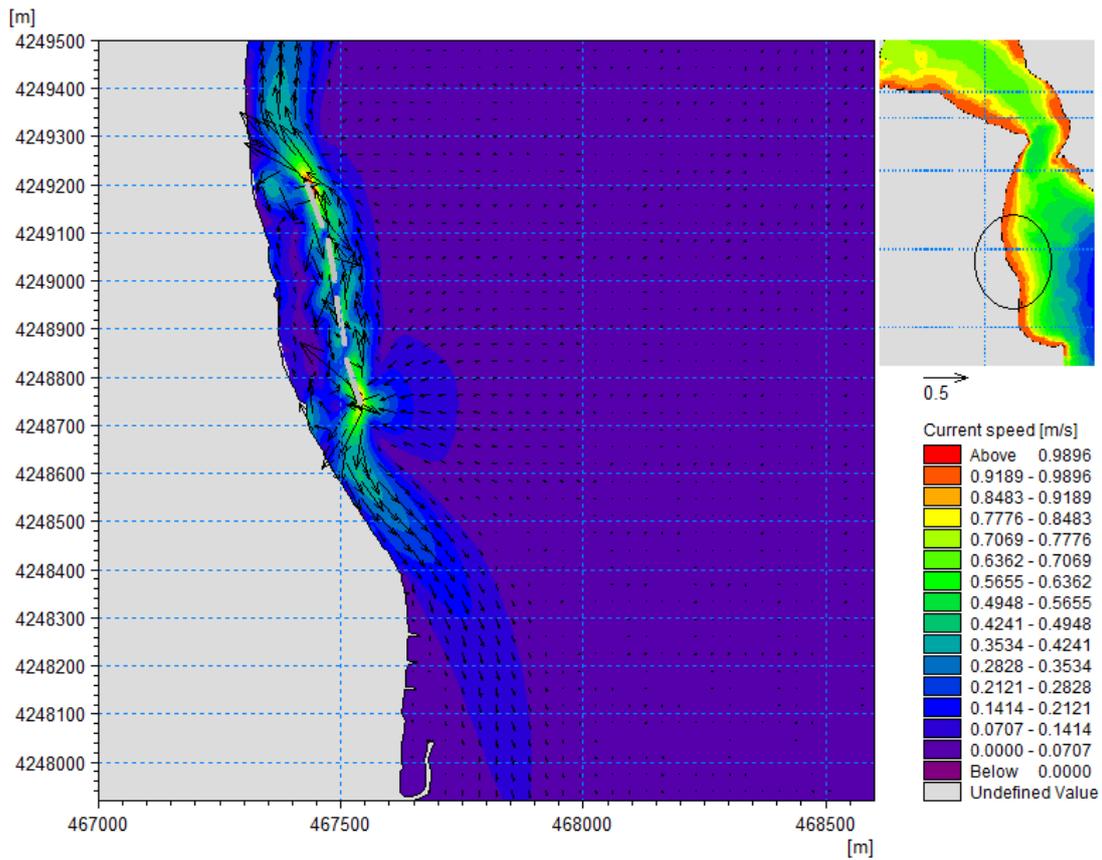
Οι τιμές που λαμβάνει το εύρος της ταχύτητας των παράκτιων ρευμάτων μεταβάλλονται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η ταχύτητα των παράκτιων ρευμάτων λαμβάνει τιμές μικρότερες από 0,0127 m/s (Σχήμα 7.69). Στην υποπεριοχή I η ταχύτητα παίρνει αυξημένες τιμές (Σχήμα 7.70). Στην υποπεριοχή II παρουσιάζονται επίσης αυξημένες τιμές στην περιοχή των έργων όπου η ροή μάζας νερού δημιουργεί υψηλές ταχύτητες ανάντη αυτών καθώς και βελοειδές ρεύμα στα βόρεια και στα νότια των κυματοθραυστών με ταχύτητες που πλησιάζουν τα 0,42m/s (Σχήμα 7.71). Πέριξ του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας οι τιμές της ταχύτητας του παράκτιου ρεύματος είναι μικρότερες από 0,040 m/s. Στο τμήμα της υποπεριοχής III, το οποίο αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτογραμμής μελέτης οι τιμές είναι μικρότερες από τα 0,020 m/s (Σχήμα 7.72).



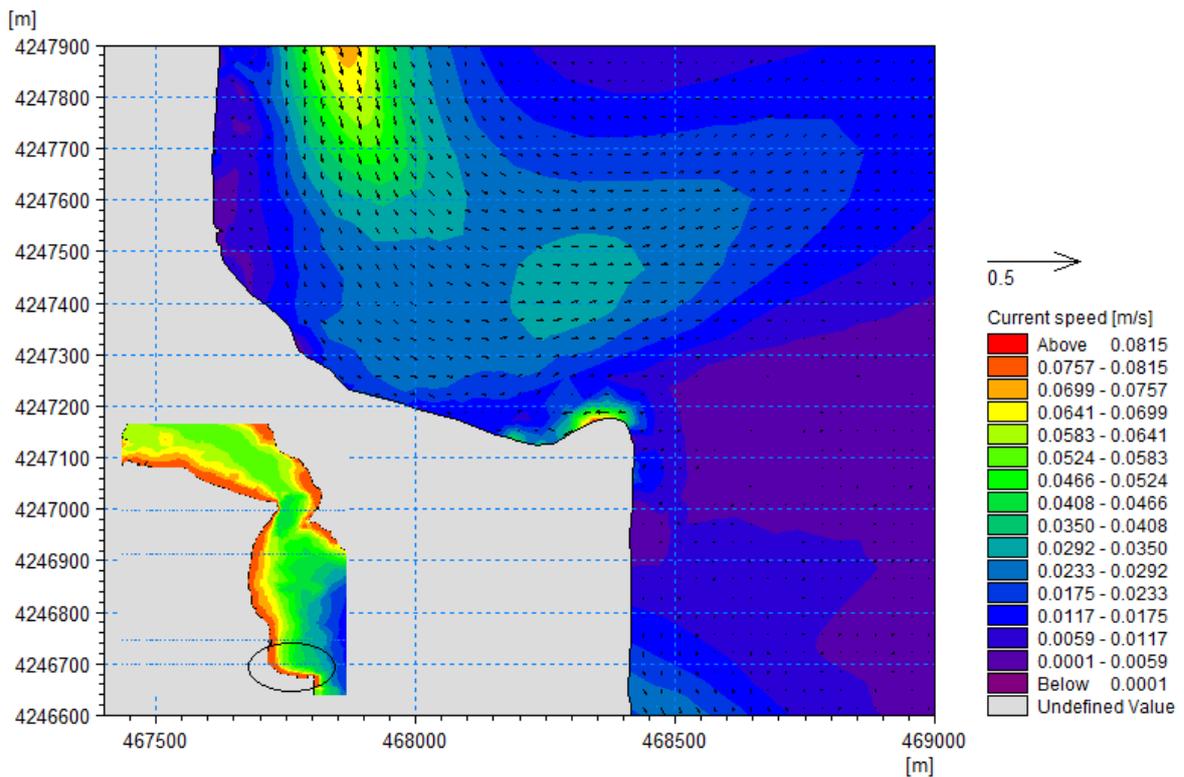
Σχήμα 7.69: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Περιοχή 1



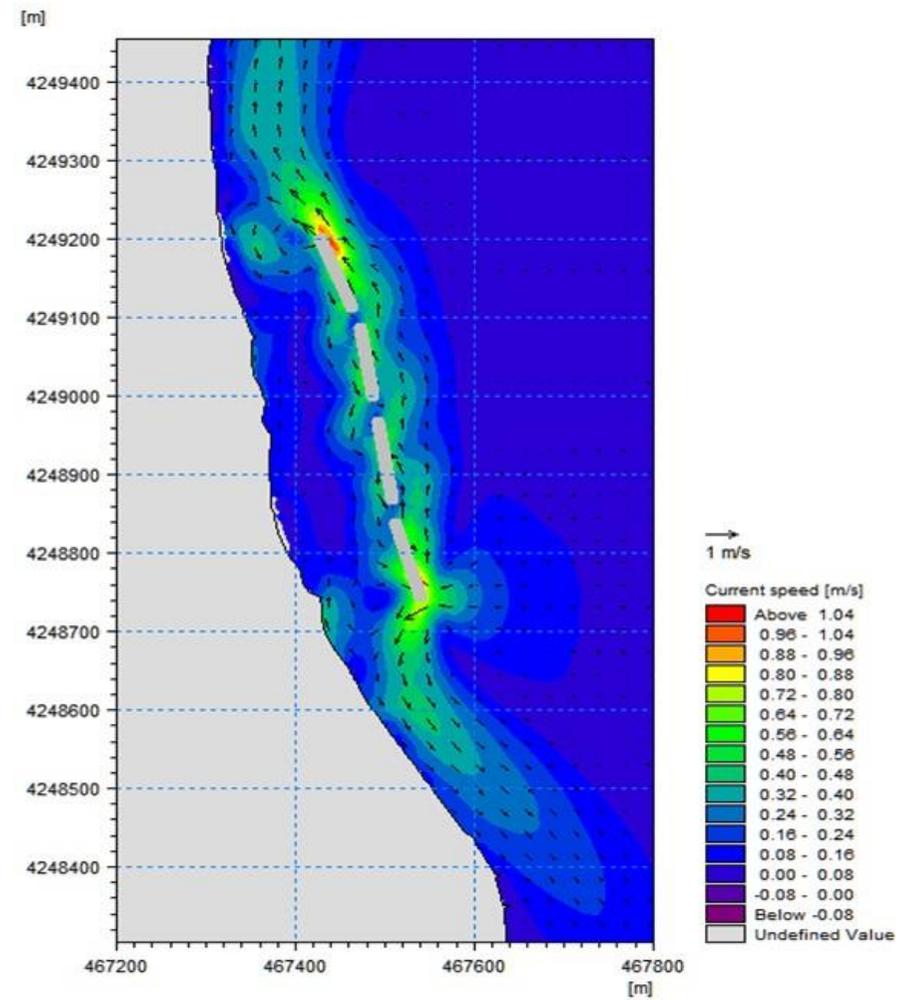
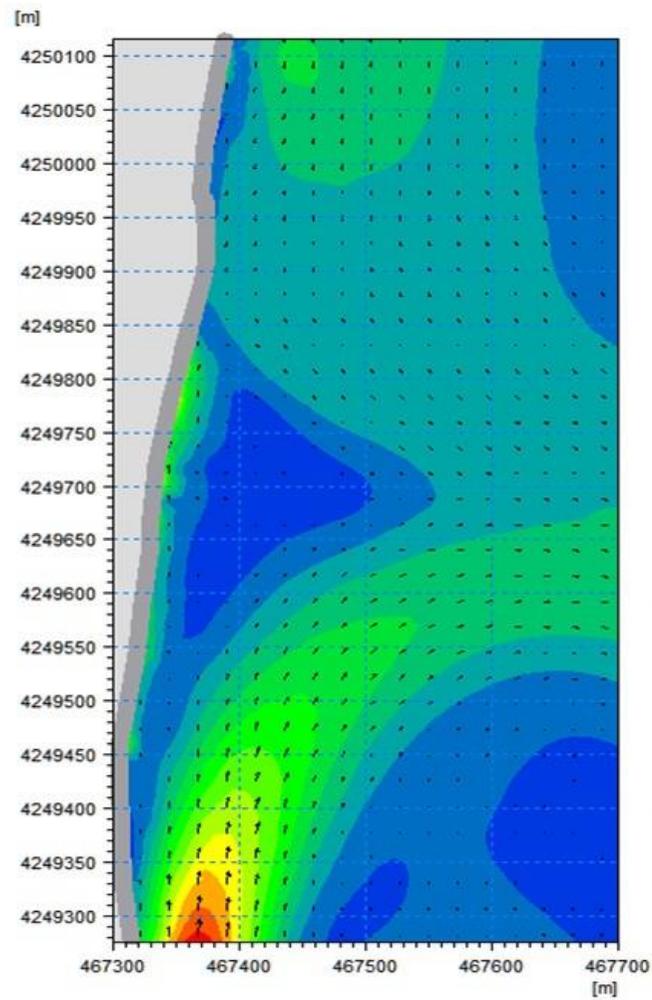
Σχήμα 7.70: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή I



Σχήμα 7.71: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή II



Σχήμα 7.72: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- Υποπεριοχή III

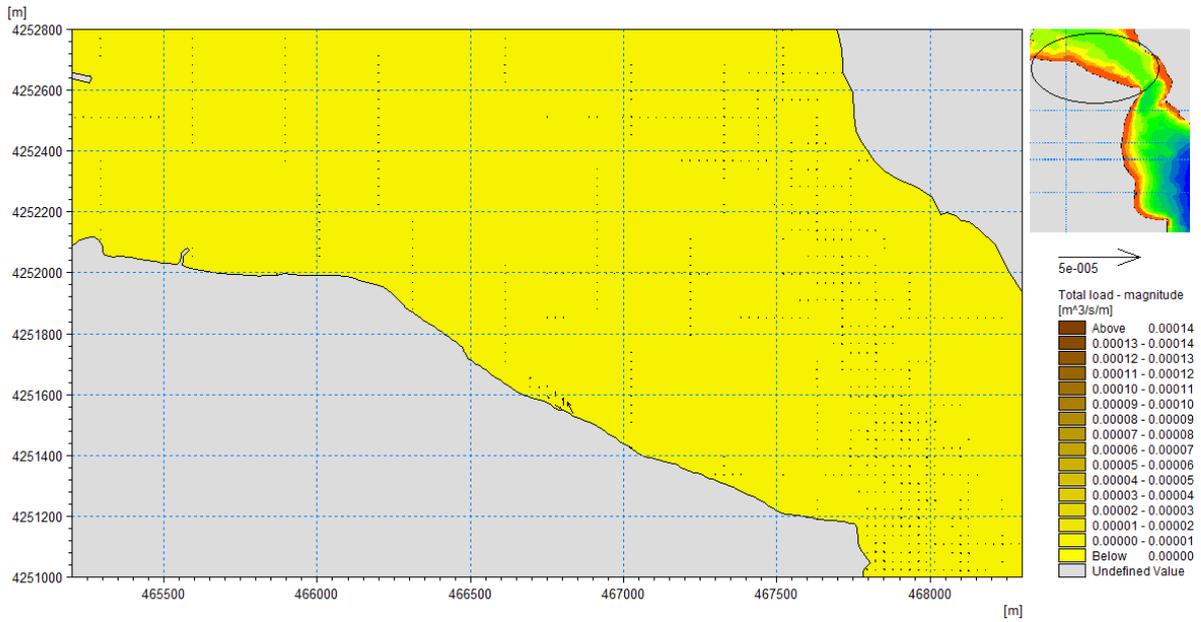


Σχήμα 7.73: Διανύσματα πεδίου ταχυτήτων- περίξ των κυματοθραυστών και της θωράκισης με λιθορριπή

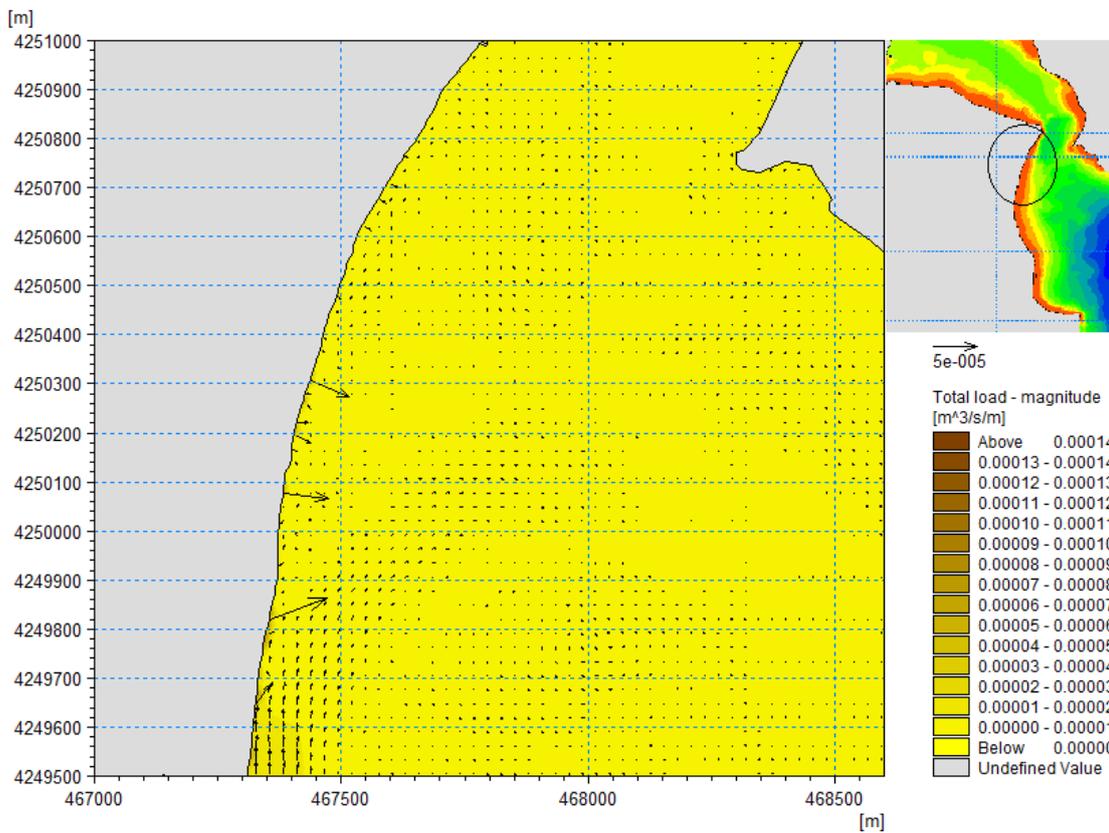
## Μοντέλο στερεομεταφοράς

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για το πεδίο της στερεομεταφοράς συγκριτικά με εκείνα της υφιστάμενης κατάστασης παρατηρείται πως τα διανύσματα της στερεομεταφοράς παρουσιάζουν μείωση των τιμών τους. Η κατεύθυνση της στερεομεταφοράς σύμφωνα με τα διαγράμματα ακολουθεί εν γένει την πορεία της υδροδυναμικής κυκλοφορίας ενώ παρατηρούνται έντονες μετακινήσεις στην περιοχή ανάμεσα στην ακτογραμμή και τα έργα γεγονός που εμποδίζει τη συγκράτηση του ιζήματος. Οι κυματοθραύστες τοποθετούνται σε μεγάλη απόσταση από την ακτογραμμή ώστε να μην εγκλωβιστούν μεγάλες ποσότητες ιζήματος στην ακτή και σχηματισμός προεξοχών.

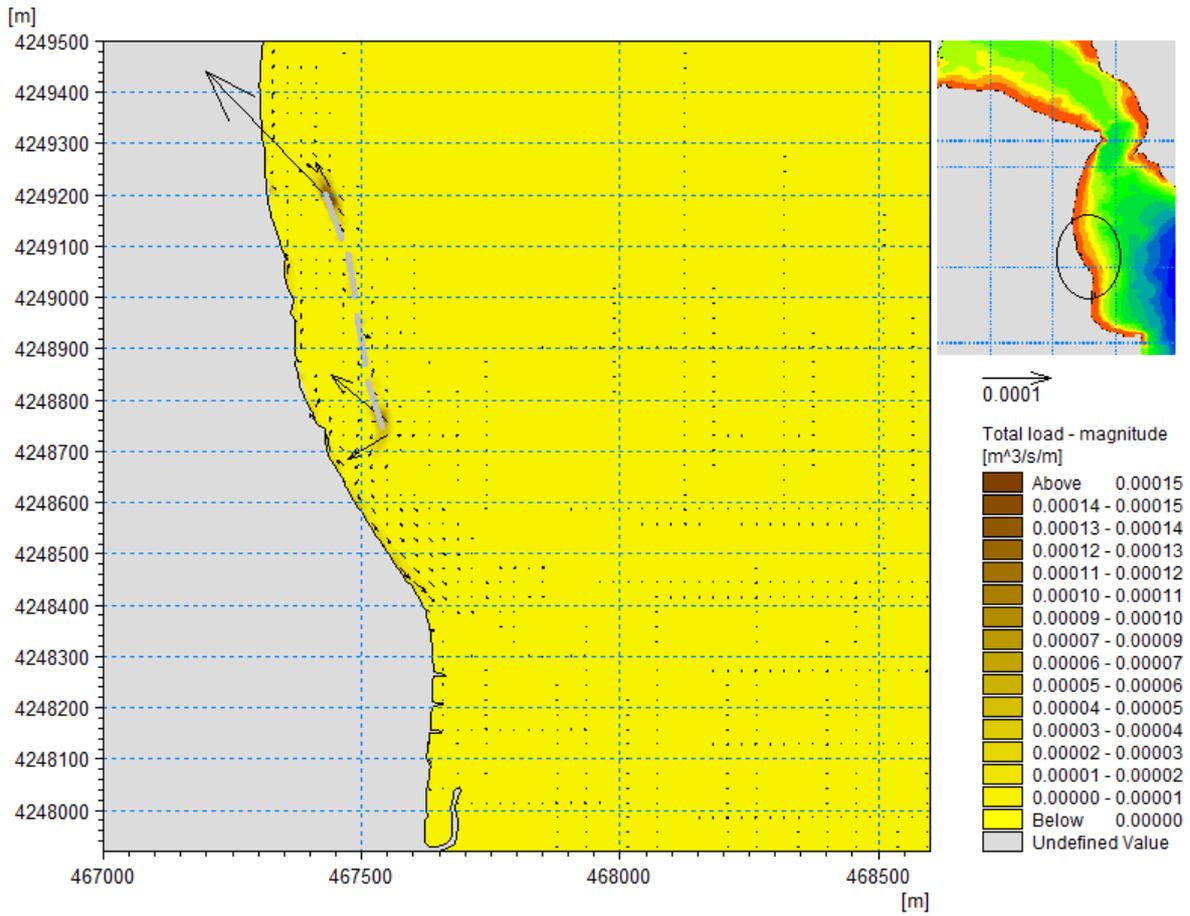
Οι τιμές που λαμβάνει η στερεομεταφορά κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης έχουν ως εξής: Στο τμήμα της περιοχής 1 η οποία αναφέρεται στην περιοχή Βαθύ, που αποτελεί και το βορειότερο τμήμα της ακτής μελέτης η στερεομεταφορά είναι αμελητέα (Σχήμα 7.74). Στην υποπεριοχή I που αφορά το παράκτιο μέτωπο του οικισμού Φάρος, όπου προτείνεται η θωράκιση με λιθορριπή, η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή και προσεγγίζει την τιμή των  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.75) ενώ η στερεομεταφορά που ακολουθεί το βελοειδές ρεύμα προς τα βόρεια προσεγγίζει μόνο σε μικρή απόσταση από τα έργα τα  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ -  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Ομοίως στην υποπεριοχή II η στερεομεταφορά προσεγγίζει την τιμή των  $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ενώ η στερεομεταφορά που ακολουθεί το βελοειδές ρεύμα προς τα νότια προσεγγίζει μόνο σε μικρή απόσταση από τα έργα τα  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ -  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.76). Στο τμήμα της υποπεριοχής όπου προτείνεται το σύστημα των παράλληλων κυματοθραυστών το φαινόμενο είναι έντονο καθώς δημιουργείται κυματογενής ροή μάζας εξαιτίας των θραυόμενων κυματισμών πάνω στις κατασκευές και εξαιτίας της περίθλασης των κυματισμών με τιμές που φαίνονται στα σχήματα 7.76 και 7.78. Νότια του λιμενίσκου στην Παραλία Αυλίδας που αποτελεί και το νοτιότερο τμήμα της ακτής μελέτης η στερεομεταφορά είναι παράλληλη στην ακτογραμμή και μικρής έντασης της τάξης των  $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Σχήμα 7.77).



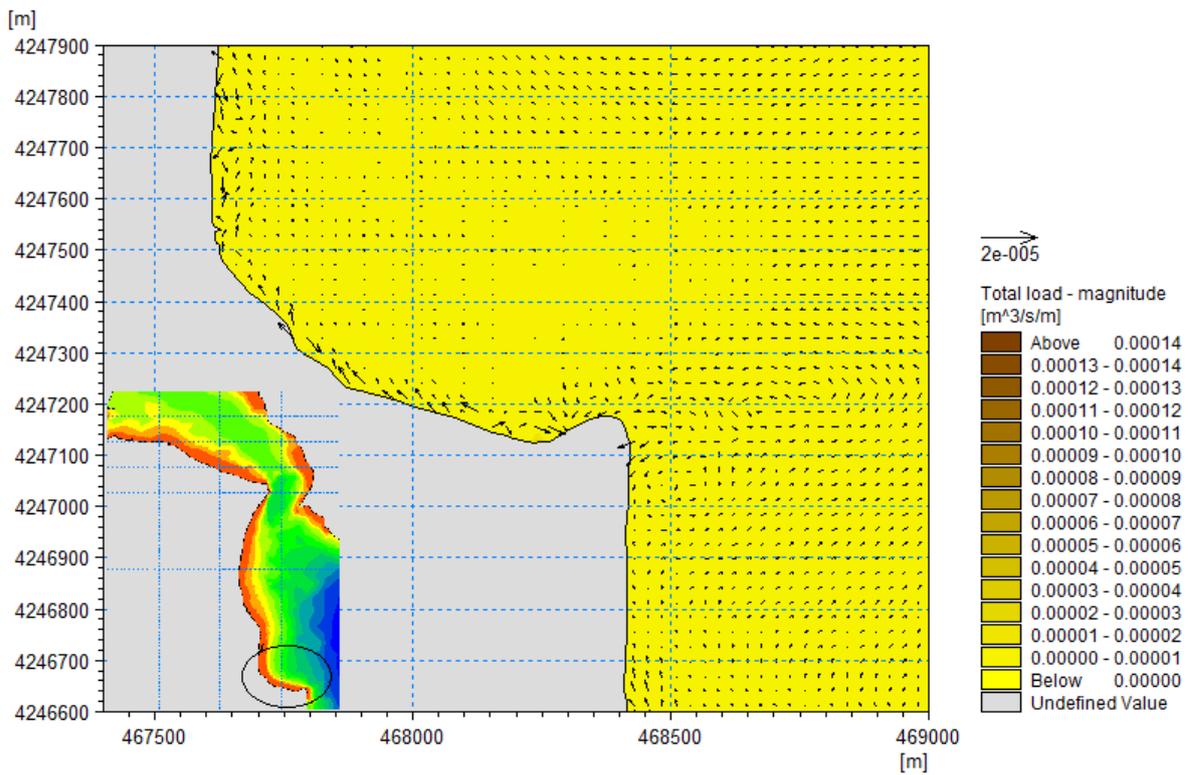
Σχήμα 7.74: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Περιοχή 1



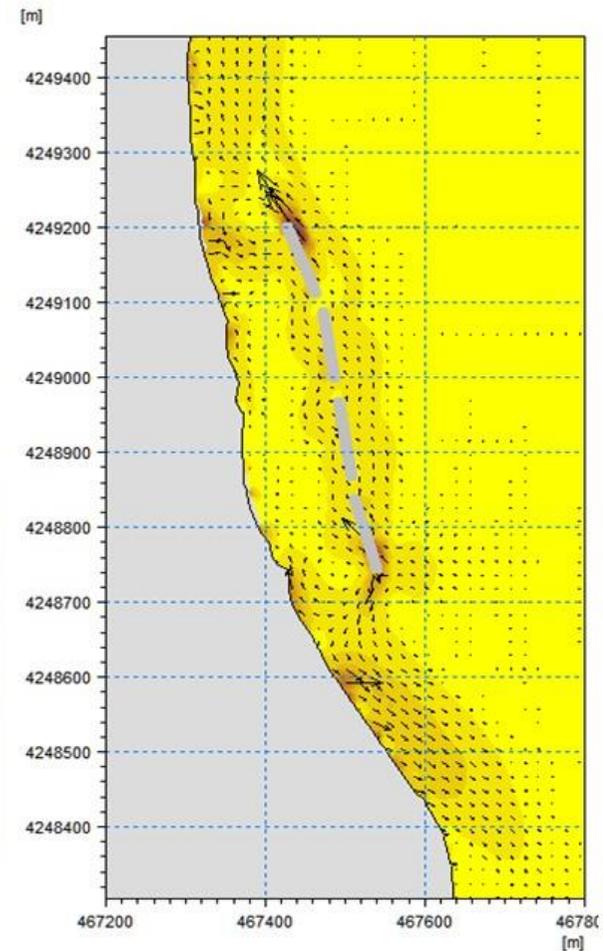
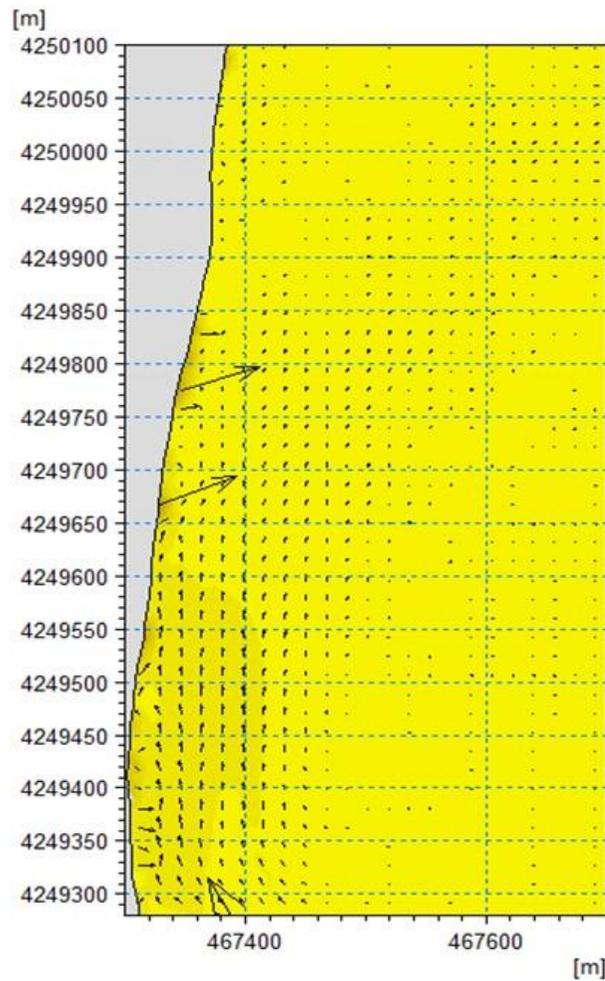
Σχήμα 7.75: Διανύσματα στερεομεταφοράς – Υποπεριοχή Ι



Σχήμα 7.76: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή II



Εικόνα 7.77: Διανύσματα στερεομεταφοράς- Υποπεριοχή III



**Σχήμα 7.78:** Διανύσματα στερεομεταφοράς περίξ των παράλληλων κυματοθραυστών και της θωράκισης με λιθορριπή

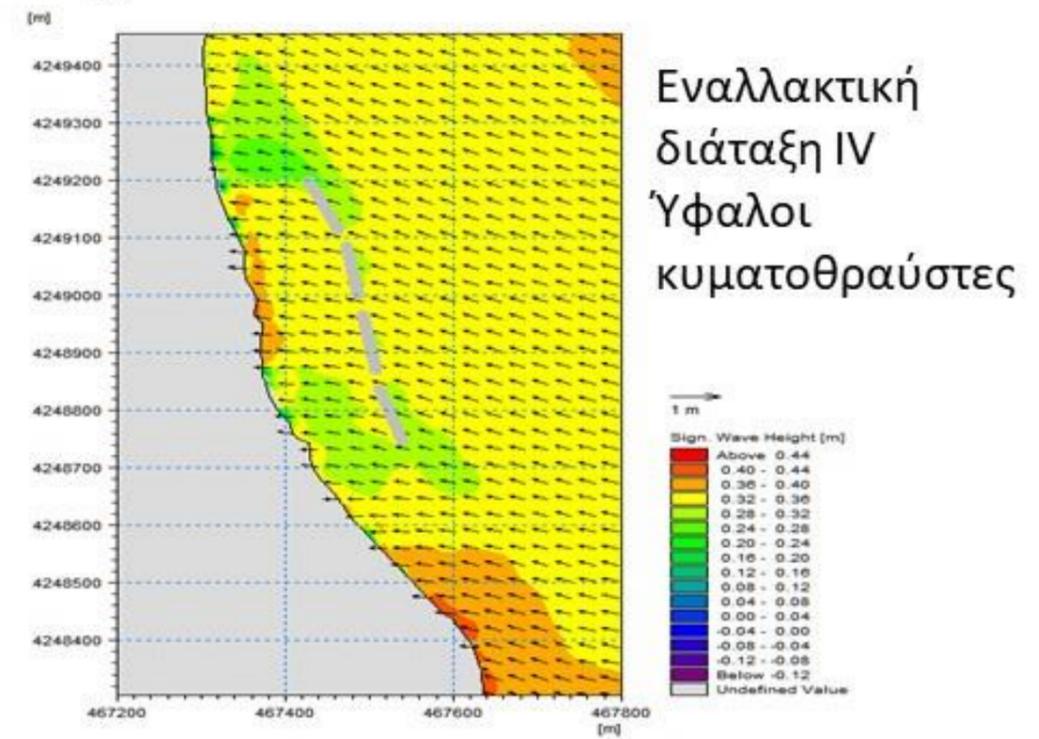
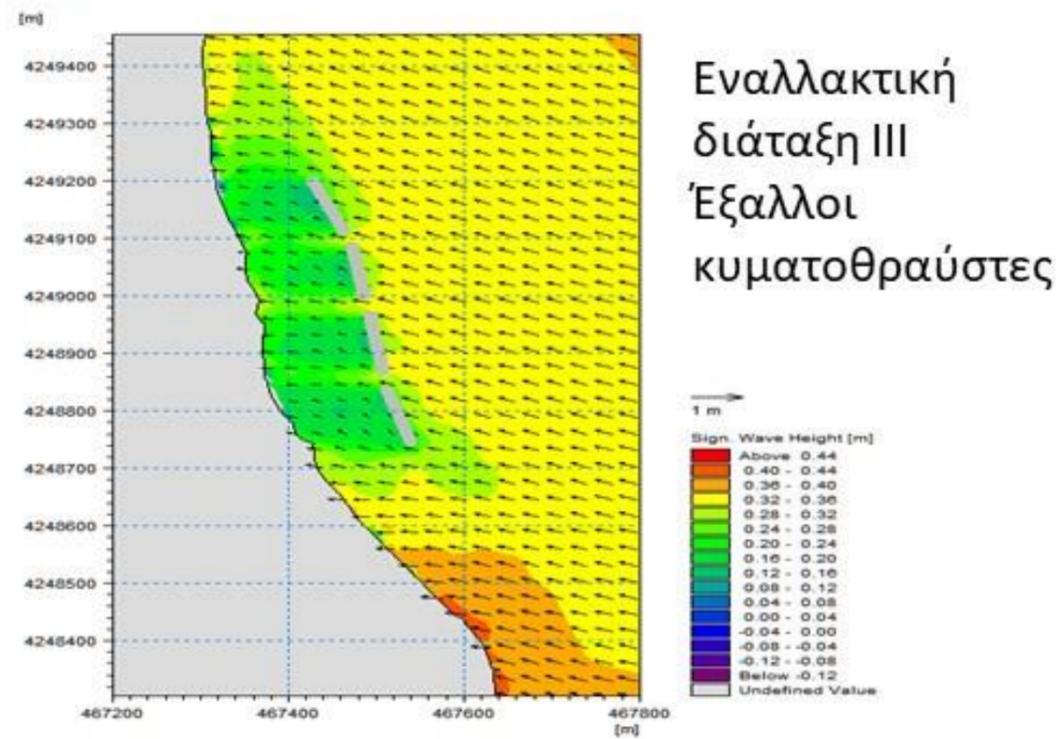
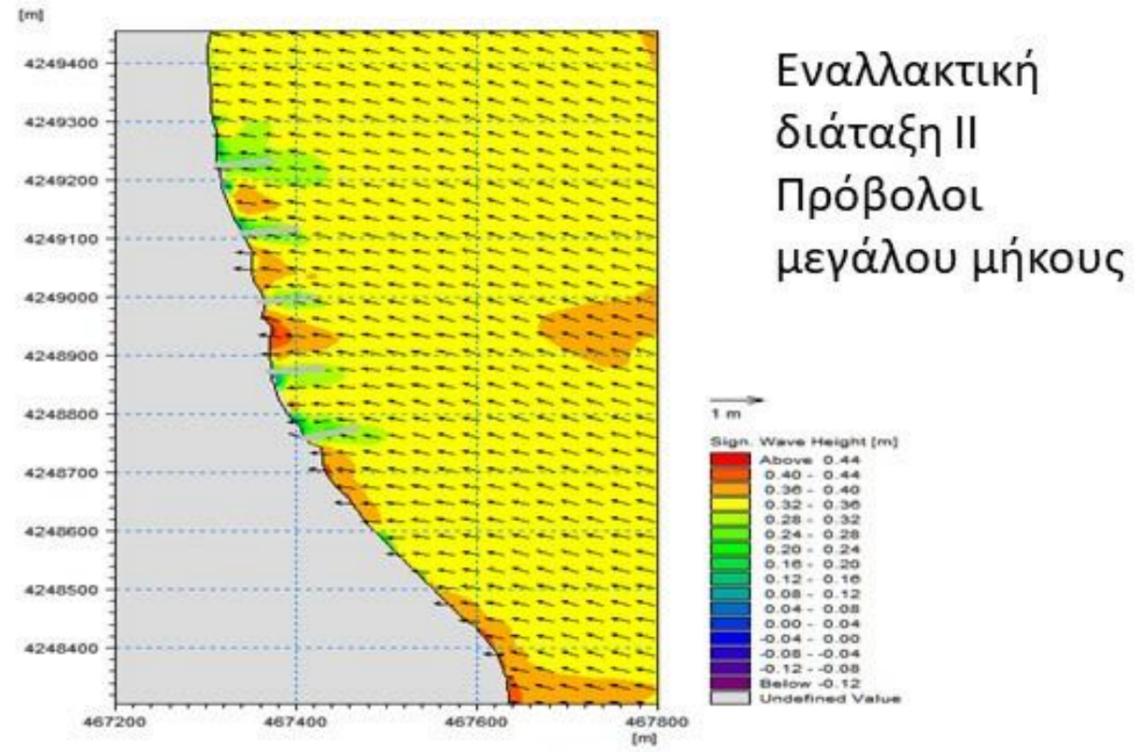
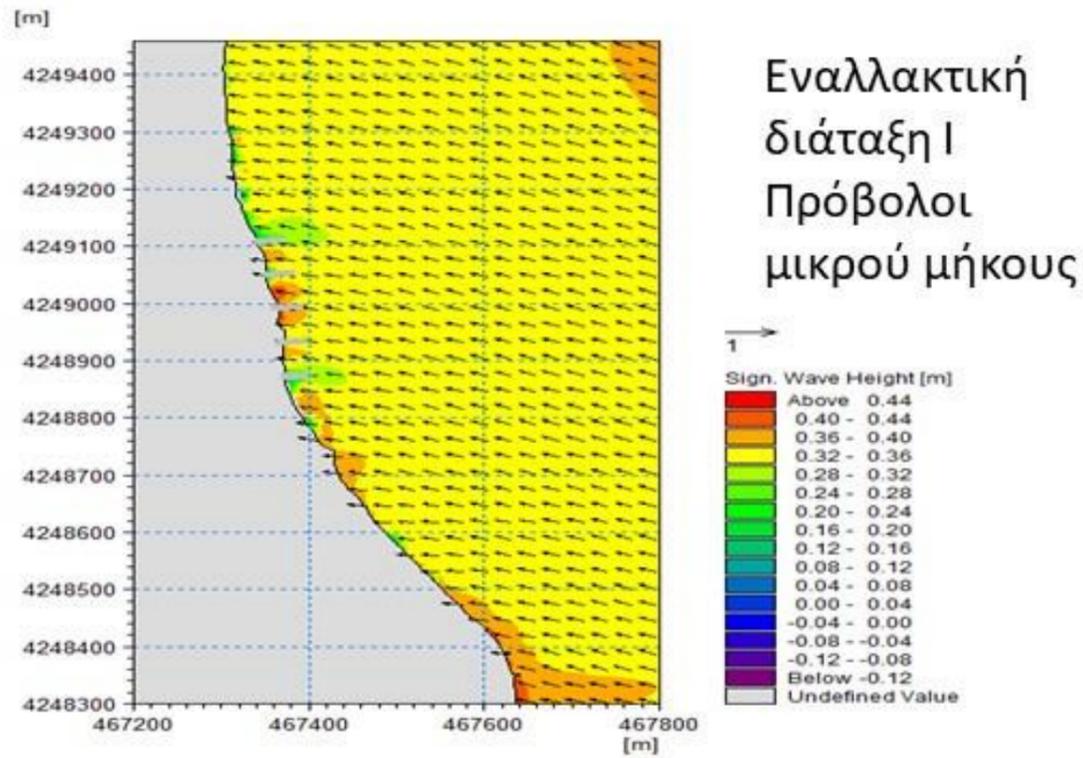
## 8. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΕΣΣΑΡΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ- ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί ασκούν σημαντικές επιδράσεις στην παράκτια ζώνη, άλλοτε προκαλώντας διάβρωση και άλλοτε προσχώνοντας τη. Η ανάπτυξη εγκαταστάσεων στη θάλασσα μεταβάλλει τα τοπικά χαρακτηριστικά της κυκλοφορίας των νερών με συνέπειες στην ευρύτερη περιοχή του ίδιου του έργου. Τα τελευταία χρόνια η ανθρώπινη παρέμβαση στον παράκτιο χώρο έχει ενταθεί λόγω οικονομικών και κοινωνικών πιέσεων, παράλληλα όμως και εξαιτίας της ανάγκης προστασίας παράκτιων υποδομών ή ακόμα και των ίδιων των ακτών.

Στη παρούσα εργασία μελετήθηκε η τρωτότητα της παράκτιας ζώνης της Αυλίδας υπό συνήθεις κυματικές συνθήκες και ύστερα από σχεδιασμό παρεμβάσεων με προσθήκη έργων παράκτιας προστασίας.

Ύστερα από την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 7 ακολουθεί συγκριτική αξιολόγηση των τεσσάρων εναλλακτικών λύσεων ώστε να επιλεγεί εκείνη που συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα και είναι η πιο αποδοτική ως προς τα κυματικά και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης καθώς και με βάση την στερεομεταφορά. Η συγκριτική αξιολόγηση θα πραγματοποιηθεί αρχικά ως προς τα κυματικά χαρακτηριστικά με βάση τον τύπο των έργων, πιο συγκεκριμένα ως προς την επιλογή έργων παράλληλων στην ακτογραμμή ή έργων κάθετων. Σχετικά με τα κυματικά χαρακτηριστικά και πιο συγκεκριμένα με το ύψος κύματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.1, και οι δύο διατάξεις σε συνδυασμό με τη θωράκιση της ακτής, η οποία θα τοποθετηθεί στο βόρειο τμήμα της υποπεριοχής II, φαίνονται να είναι αποδοτικές. Όσον αφορά τους προβόλους σε συνδυασμό με τη θωράκιση παρατηρείται πως έχουν συμβάλει ώστε να εξαλειφθεί το φαινόμενο της ανάκλασης που δημιουργείται στην υφιστάμενη κατάσταση και αυξάνει τα ύψη κύματος κοντά στην ακτή. Στην σκιά των προβόλων οι κυματισμοί έχουν μικρότερο ύψος εξαιτίας της περίθλασης. Στην περίπτωση των έξαλων κυματοθραυστών οι οποίοι λειτουργούν ως εμπόδιο στη διάδοση των κυματισμών, τα ύψη κύματος κατάντη των έργων παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Κατά συνέπεια και στις δύο περιπτώσεις τα έργα συμβάλουν στην απόσβεση των υψηλών τιμών του σημαντικού ύψους κύματος κοντά στην ακτογραμμή. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η κατασκευή παράλληλων κυματοθραυστών διαταράσσει έντονα το κυματικό πεδίο και όλες τις παράκτιες διεργασίες καθώς προκαλεί το φαινόμενο της περίθλασης και της θραύσης των επερχόμενων κυματισμών σε μεγαλύτερο βάθος και με μεγαλύτερο ύψος θραύσης από αυτούς που μεταδίδονται πίσω από τον κυματοθραύστη. (Καραμπάς Θ.,2015)

Ακολουθεί η σύγκριση ανάμεσα στα έργα που ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Ως εκ τούτου οι πρόβολοι μεγάλου μήκους κρίνονται πιο αποδοτικοί καθώς αρχικά τοποθετούνται σε μεγαλύτερες αποστάσεις όποτε παρέχουν προστασία σε μεγαλύτερο μήκος ακτογραμμής ενώ παράλληλα καλύπτουν επαρκώς όλη τη ζώνη θραύσης δημιουργώντας συνθήκες ηρεμίας σε μεγαλύτερη έκταση συγκριτικά με τους πρόβλους μικρότερου μήκους. Για τα έργα παράλληλα στην ακτογραμμή οι έξαλοι κυματοθραύστες είναι εκείνοι που αποδίδουν περισσότερο καθώς απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό κυματικής ενέργειας.



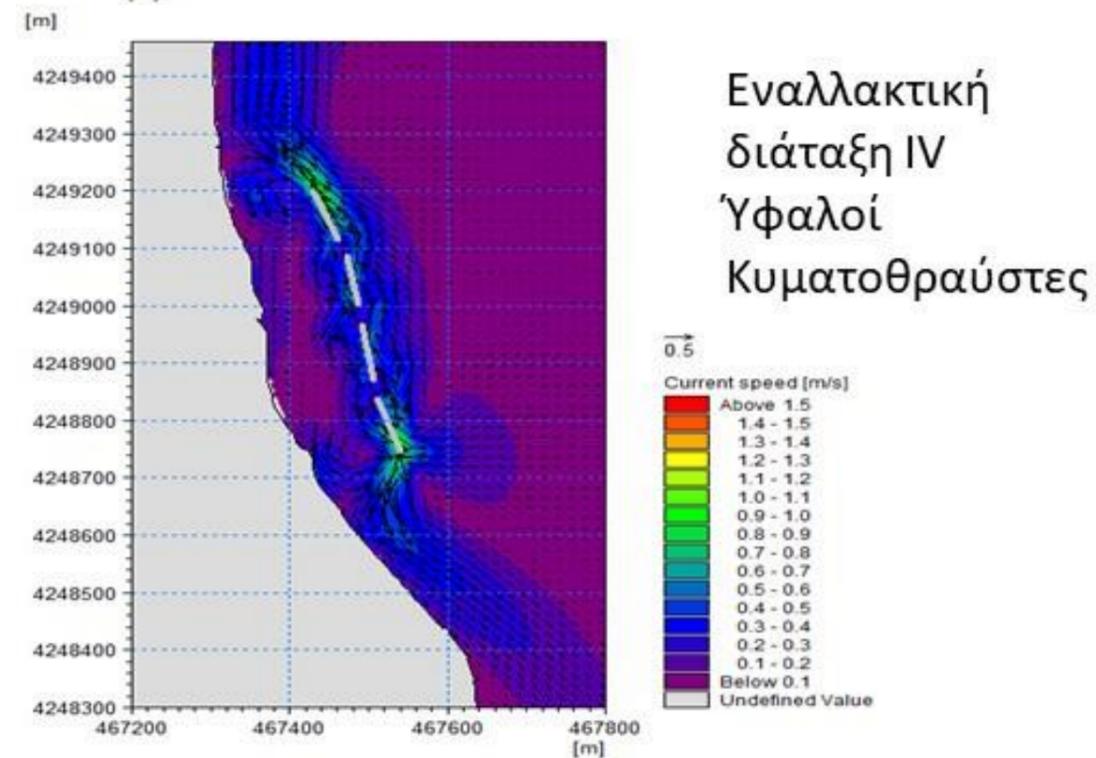
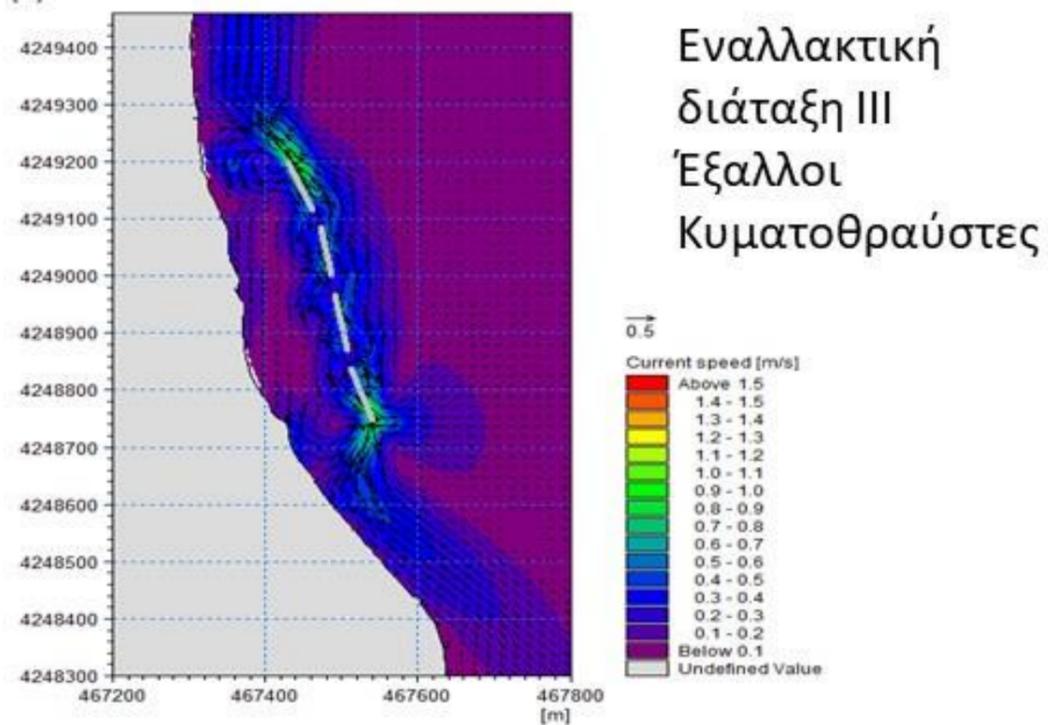
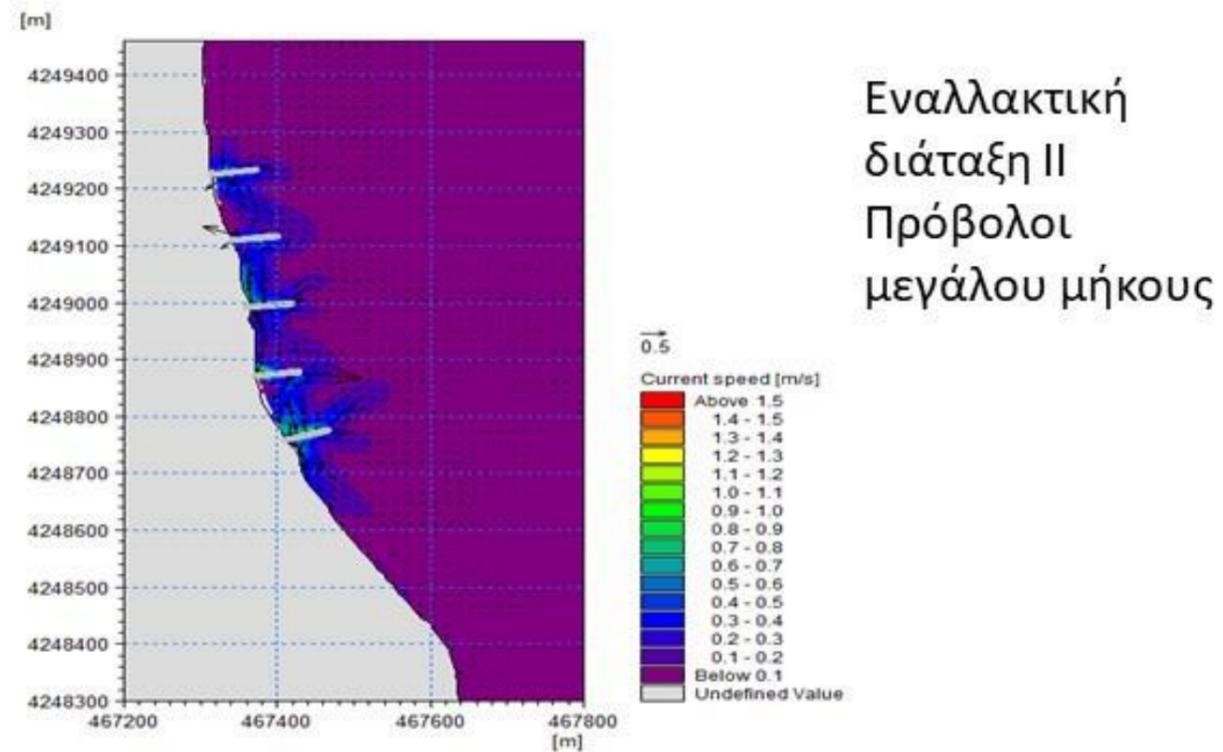
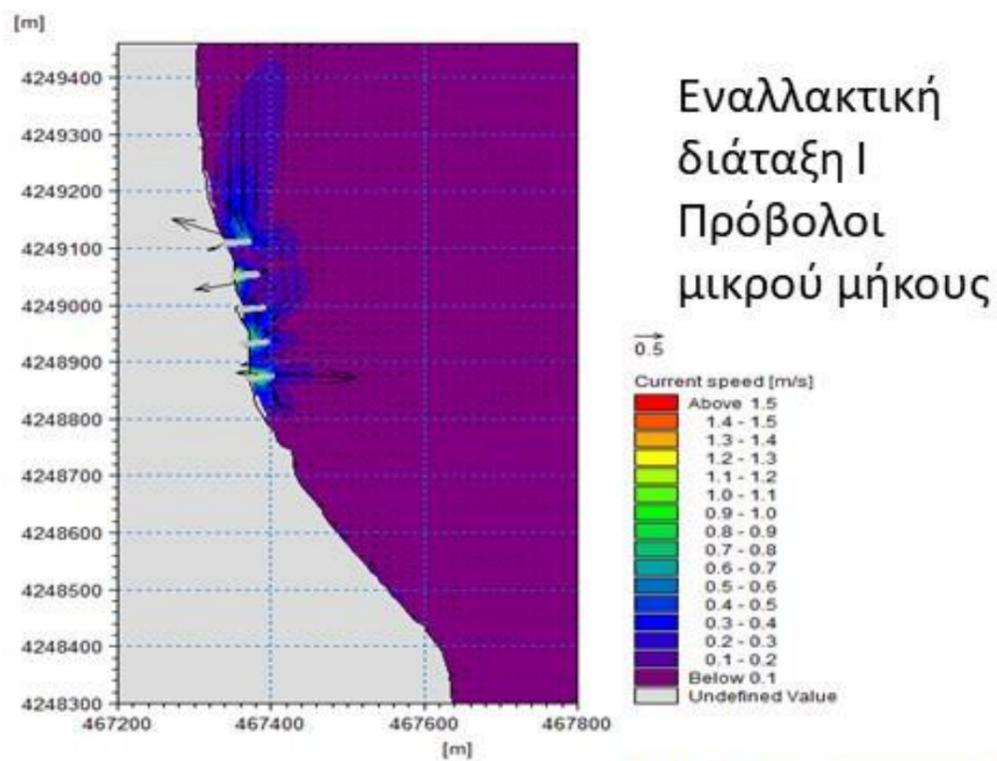
Σχήμα 8.1: Συγκριτική αξιολόγηση έργων προστασίας ως προς το ύψος κύματος

Σχετικά με τα κυματογενή ρεύματα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.2 η επιλογή ανάμεσα στους δύο τύπους έργων, στα έργα κάθετα και στα έργα παράλληλα στην ακτογραμμή, προκύπτει ως συμπέρασμα από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της υφιστάμενης κατάστασης. Κατά συνέπεια η μελέτη των χαρακτηριστικών της υπάρχουσας κατάστασης καθορίζει την επιλογή των προβόλων ως την πιο αποδοτική καθώς κατά την υφιστάμενη κατάσταση καταγράφονται κατά κύριο λόγο κυματογενή ρεύματα παράλληλα στην ακτή. Η παρουσία των προβόλων μηδενίζει την εγκάρσια σε αυτούς ταχύτητα των ρευμάτων, τα εκτρέπει και τα κατευθύνει στα ανοιχτά. Στη σκιά των προβόλων οι στρόβιλοι που δημιουργούνται όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρές ταχύτητες κυματογενών ρευμάτων. Ο τύπος των παράλληλων έργων στην ακτογραμμή είναι πιο αποδοτικός στην περίπτωση ρευμάτων με φορά κάθετα στην ακτή γεγονός που δεν αντιπροσωπεύει τα αποτελέσματα της παρούσας διερεύνησης. Σχετικά με τη σύγκριση που ακολουθεί μεταξύ των προβόλων διαφορετικών διαστάσεων κρίνονται πιο αποδοτικοί οι πρόβολοι μεγάλου μήκους. Εκτός του πλεονεκτημάτος τους ότι προστατεύουν μεγαλύτερο μήκος ακτογραμμής, παρατηρείται ύστερα από αξιολόγηση του Σχήματος 8.2 πως δεν συμβάλλουν όπως οι πρόβολοι μικρότερου μήκους στη δημιουργία βελοειδούς ρεύματος το οποίο εκτρέπει το ίζημα προς τα ανοιχτά με κίνδυνο διάβρωσης.

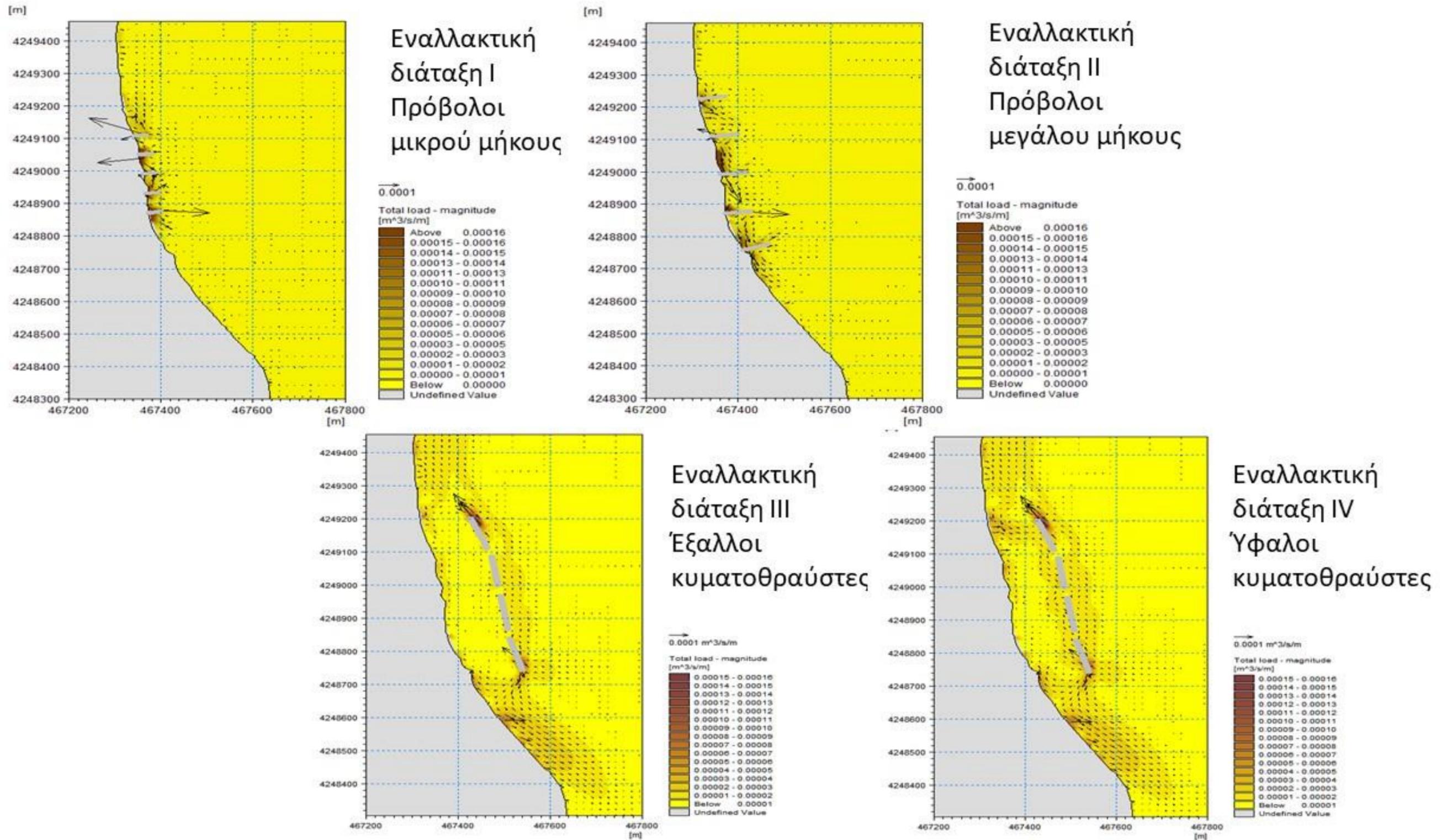
Η αλληλεπίδραση των έργων με τα κυματογενή ρεύματα καθορίζει επίσης το φαινόμενο της στερεομεταφοράς το οποίο είναι και το πιο κρίσιμο (Σχήμα 8.3). Ως εκ τούτου στην περίπτωση των κάθετων προβόλων διακόπτεται η παράκτια στερεοπαροχή παράλληλα στην ακτή και τα ιζήματα εναποτίθενται ανάντη των προβόλων. Υπάρχει κίνδυνος για διάβρωση στα κατάντη. Στην περίπτωση των κυματοθραυστών παράλληλα στην ακτογραμμή τα κυματογενή ρεύματα που δημιουργούνται από τη θραύση των κυματισμών αυξάνουν τη στερεομεταφορά και το ίζημα εναποτίθεται εκεί όπου επικρατεί σχετική ηρεμία. Προκαλείται αλλαγή στη μορφολογία της ακτής με το σχηματισμό αρχικά μιας προεξοχής (salient) η οποία σε περίπτωση που ο κυματοθραύστης βρίσκεται κοντά στην ακτή μπορεί να καταλήξει στο σχηματισμό tombolo. Παρατηρείται επίσης δημιουργία βελοειδών ρευμάτων που εκτρέπουν το ίζημα.

Σε συνδυασμό με τα παραπάνω οι κατασκευές παράλληλα στην ακτογραμμή έχουν μεγαλύτερο κόστος. Επιπρόσθετα το γεγονός ότι ο σχεδιασμός των έργων γίνεται κοντά στο λιμενίσκο της Αυλίδας μπορεί να δημιουργήσει πρόβλημα στις θαλάσσιες μεταφορές καθώς η ανάπλαση της περιοχής μελέτης έχει σαν στόχο της προσέλκυση σκαφών. Στην περίπτωση αυτή οι παράλληλοι κυματοθραύστες καθώς τοποθετούνται σε μεγαλύτερο βάθος για την αποφυγή προσχώσεων μπορεί να δημιουργήσουν εμπόδιο στη ναυσιπλοΐα.

Σχετικά με τη σύγκριση που ακολουθεί μεταξύ των προβόλων διαφορετικών διαστάσεων κρίνονται πιο αποδοτικοί οι πρόβολοι μεγάλου μήκους καθώς οι πρόβολοι μικρού μήκους ενώ αποτρέπουν τη διάβρωση στα κατάντη δεν παρέχουν επαρκή προστασία καθώς καλύπτουν οριακά το εύρος της ζώνης θραύσης.



Σχήμα 8.2: Συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών διατάξεων ως προς τα κυματογενή ρεύματα



Σχήμα 8.3: Συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών διατάξεων ως προς τη στερεομεταφορά

## 9. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Αρχικά προτείνεται η ακτομηχανική διερεύνηση της ακτής μελέτης με βάση ένα λεπτομερέστερο και πυκνότερο τριγωνικό κάναβο ανάλυσης 1-2 μέτρων στις πιο κρίσιμες περιοχές, σ' εκείνες δηλαδή που παρουσιάζουν τα εντονότερα προβλήματα εξαιτίας της διάβρωσης, ώστε να πραγματοποιηθεί μικροσκοπική αξιολόγηση των παράκτιων διεργασιών σε αλληλεπίδραση με τις ακτές και με το σχεδιασμό έργων παράκτιας προστασίας σε τοπική κλίμακα.

Στη συνέχεια θα ήταν χρήσιμο να αξιοποιηθεί βαθυμετρική αποτύπωση με βάση τις πραγματικές συνθήκες της περιοχής μελέτης και να διεξαχθεί εκ νέου προσομοίωση τόσο της υφιστάμενης κατάστασης όσο και της παράκτιας ζώνης ύστερα από την προσθήκη των έργων παράκτιας προστασίας για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων.

Σε επόμενο στάδιο θα μπορούσε επίσης να πραγματοποιηθεί αναλυτική διαστασιολόγηση των έργων ώστε να ακολουθήσει επιπλέον συγκριτική αξιολόγηση για την επιλογή της αποδοτικότερης διάταξης με βάση οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά.

Σημαντικό πεδίο για περαιτέρω έρευνα αποτελεί επίσης η επιλογή και προσομοίωση διαφορετικών μεθόδων παράκτιας προστασίας όπως γεωσωλήνες ή πλωτοί κυματοθραύστες ώστε να εκτιμηθεί αρχικά αν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν στις υπάρχουσες ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες και σε περίπτωση που ανταποκρίνονται να πραγματοποιηθεί σύγκριση με τις συμβατικές κατασκευές αλλά και αξιολόγηση της επίδρασης τους στην ακτή.

Τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση της προσομοίωσης των κυματικών και υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της υφιστάμενης κατάστασης της ακτής μελέτης χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό μοντέλο του MIKE 21 FM που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, με την προσομοίωση που προέκυψε χρησιμοποιώντας άλλα υπολογιστικά μοντέλα όπως το TELEMAC – MASCARET κ.α. τα οποία είναι ανοικτά προς τον εκάστοτε χρήστη όπως πραγματοποιήθηκε στη διπλωματική εργασία του Παπαδημητρίου Αντρέα με τίτλο: «Εκτίμηση παράκτιων φυσικών διεργασιών στη θαλάσσια περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού με χρήση αριθμητικών μοντέλων και υπολογιστικών εργαλείων». Σκοπός της προτεινόμενης σύγκρισης θα είναι η αξιολόγηση της αποδοτικότητας των ανοικτών προγραμμάτων και η περαιτέρω αξιοποίησή τους με την προσομοίωση σε αυτά των έργων παράκτιας προστασίας που προτάθηκαν.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Ιστοσελίδα «[penteli.meteo.gr/stations/avlida](http://penteli.meteo.gr/stations/avlida)»

Ιστοσελίδα «<http://oceanica.cofc.edu>»

Καραμπάς Θ., Κρεστενίτης Ι. και Κουτίτας Χ., 2015, Ακτομηχανική Έργα Προστασίας Ακτών, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2092>

Καρύμπαλης Θ., 2010, Παράκτια Γεωμορφολογία, Αθήνα

Κουτίτας Χ., 1994, Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα, Θεσσαλονίκη

Μέμος Κ., 1992, Μαθήματα λιμενικών έργων, Αθήνα

Μέμος Κ., 2008, Εισαγωγή στα λιμενικά έργα, Αθήνα

Μέμος Κ., 2016, Θαλάσσια Υδροδυναμική, Αθήνα

Μουτζούρης Κ., 2005, Εισαγωγή στην ακτομηχανική, Σημειώσεις Πολυτεχνείου για το μάθημα «Ακτομηχανική», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα

Παπαδημητρίου Α., 2017, Εκτίμηση παράκτιων φυσικών διεργασιών στη θαλάσσια περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού με χρήση αριθμητικών μοντέλων και υπολογιστικών εργαλείων, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Σκαρλάτου Ε., 2016, Διερεύνηση ακτομηχανικών διεργασιών λαμβάνοντας υπόψη ακραίες κυματικές συνθήκες- Εφαρμογή περιοχή Ρέθυμνο, Διπλωματική εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Τσιαμπάος Γ., Σαρόγλου Χ., «Γεωλογική - Γεωτεχνική Έρευνα για το έργο «Καταγραφή – Αξιολόγηση και ιεράρχηση προβλημάτων διάβρωσης της ακτής Παραλία Αυλίδας έως Βαθύ του Δήμου Χαλκίδας και οργάνωση του σχεδιασμού προστασίας»

Afentoulis V., Tsoukala V., Bijan M., 2016, Experimental and numerical modeling of fluid-seabed interaction in shallow water

Afentoulis V. et al., 2017, Coastal Processes Assessment Under Extreme Storm Events Using Numerical Modelling Approaches.

Ahmadian A.S., 2016, Numerical Models for Submerged Breakwaters, Coastal Hydrodynamics and Morphodynamics.

Arnouil Dana S., 2008, Shoreline Response for a Reef Ball TM Submerged Breakwater System Offshore of Grand Cayman Island. Florida Institute of Technology.

Arns et al., 2017, Sea-Level Rise Induced Amplification of Coastal Protection Design Heights

Borah D.K. and Balloffet A., 1985, Beach evolution caused by littoral drift barrier, J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, vol. 111, no4, 645-660.

D.H.I., 2013, MIKE 21 SW FM User Guide and Scientific Documentation. Danish Hydraulic

Institute.

D.H.I., 2017, MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute.

D.H.I., 2015, MIKE 21 HD FM User Guide and Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute.

D.H.I., 2017, MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Sand Transport Module, Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute.

Dean R.G., Dalrymple R.A., 2001, Coastal Processes with Engineering Applications

Goda et al., 1967, Laboratory Investigation of Wave Transmission over Breakwaters, Report of the Port and Harbor Research Institute, No. 13

Hardaway C.S., Gunn J.R., 2010, A Brief History of Headland Breakwaters for Shore Protection in Chesapeake Bay, USA.

Komar PD, 1998. Beach Processes and Sedimentation: Second Edition. Prentice Hall: New Jersey.

Komen G.J., Cavaleri L., Donelan M., Hasselmann K., Hasselmann S., Janssen P.A.E.M., 1994, Dynamics and Modelling of Ocean Waves

Le Blond P.H., Mysak L.A., 1978, Waves in the ocean, Elsevier Oceanography Series.

Malliouri D., Afentoulis V., Bonaros V., Memos C. and Tsoukala V., 2017, Integrated Design Of Coastal Structures And Adaptation To Climate Change Hazards.

Martin- Rosales W. et al., 2007, Hydrological implications of desertification in southeastern Spain.

Miller et al., 2016, Living Shorelines Engineering Guidelines.

Phillips et al., 1977. The dynamics of the upper ocean (2nd Ed.). Cambridge University Press. 336.

Shahidi E., 2009, On the prediction of wave parameters using simplified methods.