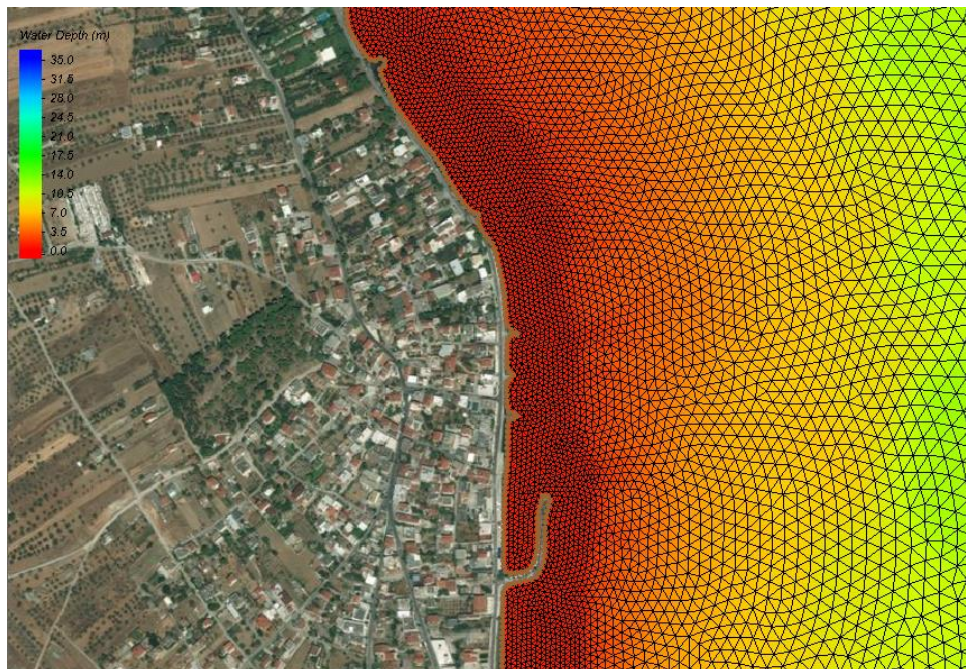




## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

### Εκτίμηση παράκτιων φυσικών διεργασιών στη θαλάσσια περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού με χρήση αριθμητικών μοντέλων



## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανδρέας Γ. Παπαδημητρίου**

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2017



# **Εκτίμηση παράκτιων φυσικών διεργασιών στη θαλάσσια περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού με χρήση αριθμητικών μοντέλων**

**Λέξεις κλειδιά:** Παράκτια ζώνη, κυματικό κλίμα, παράκτια ρεύματα, παλίρροια, εξέλιξη πυθμένα, Telemac-Mascaret, SMS, Mohid Studio, Delft-3D, Νότιος Ευβοϊκός Κόλπος, Αυλίδα

## **Assessment of the coastal zone related physical processes in the area of South Euboean Bay, using numerical models**

**Key words:** Coastal zone, wave climate, littoral currents, tide, morphological bed evolution, Telemac-Mascaret, SMS, Mohid Studio, Delft-3D, South Euboean Bay, Avlida



## Ευχαριστίες

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια μου, κα. Βίκυ Τσουκαλά, για την ανάθεση του θέματος, την αμέριστη βοήθεια και συνεχή καθοδήγησή της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, και για την ευκαιρία που μου έδωσε να επισκεφτώ την περιοχή μελέτης.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ στον υπ. διδάκτορα Βασίλη Αφεντούλη για την εξαιρετική επικοινωνία, τη συνεχή βοήθεια του και για το γεγονός ότι ήταν πάντα διαθέσιμος σε οποιοδήποτε ζήτημα ανέκυπτε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, που πίστευε πάντα στις δυνατότητες μου και με στήριζει σε κάθε προσπάθειά μου, και στους φίλους μου για τη συνεχή ενθάρρυνση.



## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	i
Ευρετήριο Εικόνων.....	iii
Ευρετήριο Πινάκων.....	v
Ευρετήριο Σχημάτων.....	vi
Περίληψη.....	xi
Abstract.....	xiii
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας.....	2
2. Ανασκόπηση βασικών εννοιών.....	4
2.1 Παράκτια ζώνη και φυσικές διεργασίες.....	4
2.1.1 Θαλάσσιοι κυματισμοί και μηχανισμοί γένεσής τους.....	5
2.1.2 Θαλάσσια ρεύματα.....	7
2.1.3 Παράκτια στερεομεταφορά και μηχανισμοί της.....	8
2.1.3.1 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτογραμμή.....	10
2.1.3.2 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτογραμμής.....	11
3. Περιγραφή των λογισμικών και μεθόδων υπολογισμού.....	13
3.1 Telemac-Mascaret.....	13
3.1.1 Μοντέλο υπολογισμού κυματικού κλίματος TOMAWAC.....	13
3.1.2 Μοντέλο υδροδυναμικής συμπεριφοράς Telemac-2D.....	19
3.1.3 Μοντέλο στερεομεταφοράς SISYPHE.....	22
3.2 SMS.....	27
3.2.1 Φασματικό κυματικό μοντέλο CMS-Wave (ST-Wave).....	28
3.2.2 Μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς CMS-Flow.....	31
3.3 Mohid Studio.....	37
3.3.1 Φασματικό κυματικό μοντέλο SWAN.....	37
3.3.2 Μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς Mohid Water.....	40
3.4 Σύνοψη των γνωρισμάτων των μοντέλων που περιέχονται σε κάθε πλατφόρμα λογισμικών.....	42
4. Περιοχή μελέτης.....	48
4.1 Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης.....	50
4.2 Ανεμολογικά δεδομένα, κυματικό κλίμα και δεδομένα στάθμης της θάλασσας..	58
4.3 Βασικές παράμετροι εισόδου/υπολογισμού της μελέτης.....	64
5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	68

5.1 Αποτελέσματα Telemac-Mascaret.....	68
5.2 Αποτελέσματα CMS-Wave και CMS-Flow.....	80
5.3 Αποτελέσματα Mohid Studio.....	92
5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συγκριτική ανάλυση λογισμικών.....	103
5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων SWAN με το υπολογισθέν ύψος κύματος από το ισοδύναμο κυματικό κλίμα.....	110
6. Συμπεράσματα-Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	113
6.1 Σύνοψη συμπερασμάτων.....	113
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	114
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	116
Παράρτημα.....	118



## Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2.1: Η παράκτια ζώνη και οι επιμέρους ζώνες της (Σκαρλάτου, 2016, τροποποιημένη από Komar et al,1998) .....	4
Εικόνα 2.2: Τυπικό φάσμα κυματισμών .....	6
Εικόνα 2.3: Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015) .....	9
Εικόνα 2.4: Φορτίο αιωρήσεως (Καραμπάς Θ. κ.α.,2015).....	9
Εικόνα 2.5: Χειμερινό προφίλ-διάβωση (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015) .....	11
Εικόνα 2.6: Θερινό προφίλ-πρόσχωση (Καραμπάς Θ. κ.α.,2015) .....	11
Εικόνα 3.1: Σύζευξη μοντέλων στερεομεταφοράς με α)ρεύματα β)ρεύματα και κύματα .....	23
Εικόνα 3.2: Διευθύνσεις ακτίνας κυματισμού και ταχύτητας ρεύματος, σε σχέση με την κορυφή του κύματος .....	29
Εικόνα 3.3: Προσανατολισμός του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων .....	30
Εικόνα 3.4: Επεξήγηση των κατακόρυφων μετατροπών για την υπερύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας και του επίπεδου αναφοράς του πυθμένα.....	32
Εικόνα 3.5: Παράδειγμα κανάβου στο CMS-Flow με βαθυμετρία και τη θέση σημείου έναρξης αρίθμησης των κελιών .....	35
Εικόνα 4.1: Γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης.....	48
Εικόνα 4.2: Κατάρρευση προστατευτικών τοιχίων κατά μήκος του παραλιακού δρόμου .....	49
Εικόνα 4.3: Διάβρωση του παραλιακού δρόμου στο σημείο 2 της περιοχής μελέτης	49
Εικόνα 4.4: Υφιστάμενοι πρόβολοι στο σημείο 3 της περιοχής μελέτης.....	49
Εικόνα 4.5: Υφιστάμενοι πρόβολοι μεταξύ του σημείου 3 και σημείου 4 της περιοχής μελέτης .....	49
Εικόνα 4.6: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Telemac-Mascaret ...	51
Εικόνα 4.7: Βαθυμετρία περιοχής μελέτης στο λογισμικό Telemac-Mascaret .....	51
Εικόνα 4.8: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό CMS-Flow και CMS-Wave.....	52
Εικόνα 4.9: Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης στο λογισμικό CMS-Flow και CMS-Wave.....	52
Εικόνα 4.10: Μικρός κάναβος στο λογισμικό Mohid Studio (δεν περιέχονται πολύγωνα που δεν υπολογίζεται βαθυμετρία).....	53
Εικόνα 4.11: Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης στο λογισμικό Mohid Studio .....	53
Εικόνα 4.12: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων της διευρυμένης περιοχής (περιέχονται πολύγωνα που δεν υπολογίζεται βαθυμετρία).....	54
Εικόνα 4.13: Βαθυμετρία διευρυμένης περιοχής μελέτης στο λογισμικό Mohid Studio .....	54
Εικόνα 4.14: Χρήση του εργαλείου Tidal Tool στο Mohid Studio .....	56
Εικόνα 4.15: Ψηφιακά δεδομένα βαθυμετρίας του Ελληνικού χώρου στην ευρύτερη περιοχή του Ευβοϊκού κόλπου .....	58
Εικόνα 4.16: Δεδομένα βαθυμετρίας για την περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού κόλπου, τροποποιημένα από χάρτες Navionics.....	58
Εικόνα 4.17: Αποτύπωση της ανύψωσης της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας για το λιμένα της Ν. Χαλκίδας με χρήση του λογισμικού Matlab .....	64
Εικόνα 4.18: Μετρηθέν ύψος κύματος από μετρητή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. ανοιχτά του νησιού της Σύρου.....	66

Εικόνα 5.1: Θέση σημείου εξαγωγής χρονοσειράς του χαρακτηριστικού ύψους κύματος με το SWAN, αναφορικά με τις δύο βαθυμετρίες της περιοχής.....110

## Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 3.1: Παρουσίαση των βασικών στοιχείων και γνωρισμάτων κάθε μοντέλου της πλατφόρμας λογισμικών Telemac-Mascaret.....	43
Πίνακας 3.2: Παρουσίαση των βασικών στοιχείων και γνωρισμάτων κάθε μοντέλου της πλατφόρμας λογισμικών SMS .....	44
Πίνακας 3.3: Παρουσίαση των βασικών στοιχείων και γνωρισμάτων κάθε μοντέλου της πλατφόρμας λογισμικών Mohid Studio .....	45
Πίνακας 3.4: Περιγραφή των οριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν στο κάθε αριθμητικό μοντέλο .....	46
Πίνακας 4.1: Χρησιμοποιούμενο σύστημα συντεταγμένων για κάθε πλατφόρμα λογισμικών.....	55
Πίνακας 4.2: Στοιχεία κανάβων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε λογισμικό.....	57
Πίνακας 4.3: Μέσες ετήσιες συχνότητες πνοής ανέμων .....	59
Πίνακας 4.4: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους ανά διεύθυνση πνοής ανέμου.....	60
Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου .....	61
Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη κύματος για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου ..	62
Πίνακας 4.7: Ισοδύναμο κυματικό κλίμα για την περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου .....	63
Πίνακας 4.8: Βασικές παράμετροι υπολογισμού σε κάθε λογισμικό .....	65
Πίνακας 5.1: Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας.....	107
Πίνακας 5.2: Ποσοτική σύγκριση των υπολογισθέντων χαρακτηριστικών του κύματος, με εφαρμογή του ισοδύναμου κυματικού κλίματος και του μοντέλου SWAN .....	112

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 5.1: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον ΒΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο Tomawac .....	69
Σχήμα 5.1α: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο Tomawac .....	69
Σχήμα 5.2: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο Tomawac .....	70
Σχήμα 5.2α: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων στο μοντέλο Tomawac .....	70
Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον ΝΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο Tomawac .....	71
Σχήμα 5.3α: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον ΝΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων στο μοντέλο Tomawac .....	71
Σχήμα 5.4: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στην περιοχή μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Telemac-2D .....	72
Σχήμα 5.4α: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Telemac-2D .....	73
Σχήμα 5.4β: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Telemac-2D .....	73
Σχήμα 5.4γ: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στο πέρας προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D .....	74
Σχήμα 5.5: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά x και y (m <sup>2</sup> /s) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Sisyphe .....	75
Σχήμα 5.5α: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά xy (m <sup>2</sup> /s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyphe.....	76
Σχήμα 5.5β: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατα xy (m <sup>2</sup> /s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων στο μοντέλο Sisyphe .....	76
Σχήμα 5.5γ: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά xy (m <sup>2</sup> /s) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphe.....	77
Σχήμα 5.6: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphe .....	78
Σχήμα 5.6α: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyphe .....	79
Σχήμα 5.6β: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Sisyphe .....	79
Σχήμα 5.6γ: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphe .....	80
Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον ΒΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο CMS-Wave.....	82
Σχήμα 5.8: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο CMS-Wave.....	82

Σχήμα 5.9: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον NA κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο CMS-Wave.....	83
Σχήμα 5.10: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στο τέλος της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow .....	84
Σχήμα 5.10α: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο CMS-Flow	85
Σχήμα 5.10β: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο CMS-Flow .....	85
Σχήμα 5.10γ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του κατώτερου ορίου της περιοχής μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow .....	86
Σχήμα 5.11: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά xy (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στη διευρυμένη περιοχή μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow.....	87
Σχήμα 5.11α: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά xy (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο CMS-Flow .....	88
Σχήμα 5.11β: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά xy (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο CMS-Flow .....	88
Σχήμα 5.11γ: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά xy (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του κατώτερου ορίου της περιοχής μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow.....	89
Σχήμα 5.12: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow .....	90
Σχήμα 5.12α: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο CMS-Flow (με τη μορφή ισοδυναμικών καμπυλών).....	91
Σχήμα 5.12β: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο CMS-Flow (με τη μορφή ισοδυναμικών καμπυλών).....	91
Σχήμα 5.12γ: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του κατώτερου ορίου της περιοχής μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow (με τη μορφή ισοδυναμικών καμπυλών) .....	92
Σχήμα 5.13: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον BA κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο SWAN .....	93
Σχήμα 5.14: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον A κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο SWAN .....	94
Σχήμα 5.15: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον NA κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο SWAN .....	94
Σχήμα 5.16: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Mohid Water .....	95
Σχήμα 5.16α: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Mohid Water .....	96
Σχήμα 5.16β: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Mohid Water.....	96

Σχήμα 5.16γ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων $u$ (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Mohid Water .....	97
Σχήμα 5.17: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Mohid Water.....	98
Σχήμα 5.17α: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Mohid Water.....	99
Σχήμα 5.17β: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Mohid Water.....	99
Σχήμα 5.17γ: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Mohid Water .....	100
Σχήμα 5.18: Ρυθμός απόθεσης άμμου ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Mohid Water.....	101
Σχήμα 5.18α: Ρυθμός απόθεσης άμμου ( $m^2/s$ ) μπροστά στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Mohid Water.....	102
Σχήμα 5.19: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m), από την προσομοίωση στο μοντέλο SWAN .....	111
Σχήμα 5.20: Χρονοσειρά του χαρακτηριστικού ύψους του κύματος στο σημείο A .	111
Σχήμα 5.21: Χρονοσειρά της περιόδου του κυματισμού στο σημείο A.....	112
Σχήμα Π.1: Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος (m) για τον A κυματισμό για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα στο μοντέλο Delft-3D.....	119
Σχήμα Π2: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow.....	120
Σχήμα Π.2α: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στο άνω μέρος της περιοχής μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης μοντέλο Delft3D-Flow .....	120
Σχήμα Π.2β: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow.....	121
Σχήμα Π.2γ: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow.....	121
Σχήμα Π.3: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά $xy$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow .....	122
Σχήμα Π.3α: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά $xy$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο άνω σημείο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Delft3D-Flow.....	123
Σχήμα Π.3β: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά $xy$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Delft3D-Flow.....	123
Σχήμα Π.4: Καθορισμός των ανοιχτών και κλειστών ορίων που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό Telemac-Mascaret.....	124
Σχήμα Π.5: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $u$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $x$ στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D .....	124
Σχήμα Π.5α: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $u$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $x$ στο πέρας της προσομοίωσης στο άνω μέρος της περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D .....	125

Σχήμα Π.5β: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $u$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $x$ στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Telemac-2D .....	125
Σχήμα Π.5γ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $u$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $x$ στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Telemac-2D.....	126
Σχήμα Π.5δ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $u$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $x$ στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D .....	126
Σχήμα Π.6: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $v$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $y$ στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D .....	127
Σχήμα Π.6α: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $v$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $y$ στο πέρας της προσομοίωσης στο άνω μέρος της περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D .....	127
Σχήμα Π.6β: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $v$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $y$ στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Telemac-2D .....	128
Σχήμα Π.6γ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας $v$ των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση $y$ στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D .....	128
Σχήμα Π.7: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $x$ ( $m^2/s$ ) στην περιοχή μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Sisyphé.....	129
Σχήμα Π.7α: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $x$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyphé....	129
Σχήμα Π.7β: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $x$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Sisyphé .....	130
Σχήμα Π.7γ: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $x$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphé .....	130
Σχήμα Π.8: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $y$ ( $m^2/s$ ) στην περιοχή μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Sisyphé.....	131
Σχήμα Π.8α: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $y$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyphé....	131
Σχήμα Π.8β: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $y$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Sisyphé .....	132
Σχήμα Π.8γ : Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά $y$ ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphé .....	132
Σχήμα Π.9: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Sisyphé .....	133
Σχήμα Π.9α: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Sisyphé .....	133
Σχήμα Π.10: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου αιώρησης ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Sisyphé .....	134

Σχήμα Π.10α: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου αιωρήσεως ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Sisyphé .....	134
Σχήμα Π.11: Χωρική κατανομή της διατμητικής τάσης του πυθμένα ( $N/m^2$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Sisyphé .....	135
Σχήμα Π.11α: Χωρική κατανομή της διατμητικής τάσης του πυθμένα ( $N/m^2$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Sisyphé .....	135
Σχήμα Π.12: Σχηματική απεικόνιση των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα CMS-Wave και CMS-Flow .....	136
Σχήμα Π.13: Χωρική κατανομή του μεγέθους της ταχύτητας υν ( $m/s$ ) των ρευμάτων στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow .....	136
Σχήμα Π.14: Συγκέντρωση της αλατότητας (psu) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow .....	137
Σχήμα Π.15: Κλάσμα ιζήματος σε αιώρηση στο μοντέλο CMS-Flow .....	137



## Περίληψη

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα από τα πιο ευμετάβλητα συστήματα του φυσικού περιβάλλοντος και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συγκεντρώνει πλήθος ανθρωπίνων διεργασιών. Η αποσταθεροποίηση της οφείλεται σε ένα πλήθος φυσικών παραγόντων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, με κινητήριους μηχανισμούς κυρίως τους κυματισμούς και τα παράκτια ρεύματα. Συνέπεια της δράσης των παραπάνω μηχανισμών είναι η στερεομεταφορά που σε βάθος χρόνου συμβάλει στη μορφολογική εξέλιξη της ακτογραμμής.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η εξέταση των παράκτιων φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου, δίνοντας έμφαση στην παραλιακή ζώνη της Αυλίδας. Η περιοχή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς είναι από τις λίγες περιοχές του ελλαδικού χώρου που έχει παρατηρηθεί σχετικά αυξημένη παλιρροιακή δράση. Για την καλύτερη κατανόηση του φαινομένου της παλίρροιας και την αλληλεπίδραση του με τους υπάρχοντες κυματισμούς κρίνεται απαραίτητη η διερεύνηση με υπάρχοντα αριθμητικά μοντέλα.

Για μια πληρέστερη συνολική εικόνα και εποπτεία των αποτελεσμάτων, η προσομοίωση των ακτομηχανικών διεργασιών στην περιοχή μελέτης έγινε με χρήση τεσσάρων διαφορετικών υπολογιστικών εργαλείων και συγκεκριμένα των μοντέλων που περιλαμβάνονται στα πακέτα λογισμικών Telemac-Mascaret, SMS, Mohid Studio και Delft-3D.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ως προς την εξέλιξη του πυθμένα συμβαδίζουν με την εικόνα που παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή, με φαινόμενα διάβρωσης κατά μήκος της ακτογραμμής, ιδιαίτερα οξυμένα στη θέση όπου βρίσκεται κατασκευασμένος ο παραλιακός δρόμος. Αναμένεται αυτά τα αποτελέσματα να αποτελέσουν έναυσμα για πιο ενδελεχή έρευνα και για την ολοκληρωμένη διαχείριση της παράκτιας ζώνης.



## **Abstract**

The coastal zone is one of the most susceptible entities of the natural environment and presents a great interest, due to the large number of human activities that take place in the area. From a physical perspective, the driving mechanisms, which contribute to its destabilization, are mainly related to waves and currents. The combined action of the aforementioned mechanisms results in sediment transport, which contributes to the morphological evolution of the coastline.

The present study aims to examine the coastal physical processes that take place in the wider area of the South Euboean Bay, with emphasis on the coast of Avlida. The interest that the area presents, derives from the fact that it is one of the few greek areas with increased tidal activity. To better understand and examine the tidal phenomena more thoroughly, it is imperative to use and implement existing numerical models.

In order to better supervise the results, the simulation was executing using four different integrated software suites, namely, Telemac-Mascaret, SMS, Mohid Studio and Delft-3D, which possess different capabilities and are based on different numerical equations.

The general consensus is that the obtained results of the morphological bed evolution are in agreement with the observed view of the study area. Specifically, the larger proportion of the erosion is observed along the position where a coastal road is constructed. It is expected that the results of the present study will be used as a starting point for more thorough examination, in order to protect the area from the erosion related problems.



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παράκτια ζώνη είναι η παραθαλάσσια περιοχή στην οποία συγκεντρώνεται πλήθος διεργασιών που σχετίζονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Συγκεκριμένα, εκτείνεται μεταξύ της ακτογραμμής και της ισοβαθής εκείνης, στην οποία γίνεται αισθητή η επίδραση των κυμάτων ως τον πυθμένα. Εγγενές χαρακτηριστικό της παράκτιας ζώνης είναι η μεταβλητότητά της και η φυσική εξέλιξη της με την πάροδο του χρόνου, που εξαρτάται από πλήθος παραγόντων οι οποίοι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαμόρφωση της ακτογραμμής λόγω της επίδρασης των κυματισμών και των παράκτιων ρευμάτων. Συγκεκριμένα, η ενέργεια που μεταφέρεται μέσω κυματισμών και ρευμάτων θέτει σε κίνηση το ίζημα του πυθμένα (στερεομεταφορά ιζήματος) και διαμορφώνει σε βάθος χρόνου τη μορφή της ακτογραμμής.

Τα τελευταία χρόνια, τον κλάδο της προστασίας των ακτών απασχολεί η επίδραση της μεταβολής των κυματικών χαρακτηριστικών στην παράκτια ζώνη, τόσο ως προς την ένταση όσο και ως προς τη χρονική διάρκεια, καθώς και η επίδραση των παράκτιων ρευμάτων (λόγω παλίρροιας και κυματικής δράσης). Τα δύο αυτά φαινόμενα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και απαιτούν ενδελεχή ανάλυση και κατανόηση των μηχανισμών συμβολής τους στη διαμόρφωση της ακτογραμμής. Συγκεκριμένα έχει παρατηρηθεί ότι η θεώρηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κυμάτων και ρευμάτων έχει πολλές φορές αποτέλεσμα έως και το διπλασιασμό της μέγιστης διατμητικής τάσης πυθμένα, γεγονός που αποδεικνύει τη σημασία αυτής της αλληλεπίδρασης (Rosales et al.,2007).

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση της δυνατότητας προσομοίωσης των παράκτιων φυσικών διεργασιών με χρήση τεσσάρων λογισμικών, τα οποία βασίζονται σε διαφορετικές παραδοχές και μετέρχονται διαφορετικές αριθμητικές μεθόδους, και η εφαρμογή τους στην περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου. Αναλυτικότερη περιγραφή των δυνατοτήτων των λογισμικών και οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκαν παρουσιάζονται ενδελεχέστερα στην ενότητα 1.2. Η περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς πρόκειται για τις λίγες περιοχές του ελλαδικού χώρου όπου παρατηρείται αυξημένη παλιρροιακή δραστηριότητα, με συνέπεια τη γένεση παλιρροιακών ρευμάτων, και που συμβάλλουν στην παράκτια στερεομεταφορά ιζήματος. Όλα τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν, και θα παρουσιαστούν σε επόμενο κεφάλαιο, εκτιμούν την εξέλιξη των κυματικών και υδροδυναμικών συνθηκών της περιοχής, καθώς και των συνθηκών στερεομεταφοράς, υπό τη συνδυασμένη επίδραση κυματικών και υδροδυναμικών φαινομένων.

## 1.2 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), πέντε κεφάλαια επιπλέον, που περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

- Στο Κεφάλαιο 2, γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση των βασικών εννοιών που αφορούν την παράκτια ζώνη και τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτή, καθώς και στους ανεμογενείς κυματισμούς και στα παράκτια ρεύματα που αποτελούν σημαντικό αντικείμενο της παρούσας μελέτης.
- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική. Συνοπτικά αυτά είναι:
  - i. Η πλατφόρμα λογισμικών Delft3D (ανοιχτής πρόσβασης) και συγκεκριμένα το φασματικό μοντέλο Delft3D – Wave και το υδροδυναμικό και συνάμα μοντέλο στερεομεταφοράς Delft3D – Flow, που έχουν αναπτυχθεί από το ινστιτούτο Deltares
  - ii. Η πλατφόρμα λογισμικών Telemac-Mascaret (ανοιχτής πρόσβασης) και συγκεκριμένα το φασματικό μοντέλο Tomawac, το δι-διάστατο υδροδυναμικό μοντέλο Telemac-2D καθώς και το δι-διάστατο μοντέλο στερεομεταφοράς Sisyphé, που έχουν αναπτυχθεί από το Εθνικό Εργαστήριο Υδραυλικής (Laboratoire National d'Hydraulique) της Γαλλίας
  - iii. Η πλατφόρμα λογισμικών που περιλαμβάνονται στο γραφικό περιβάλλον Mohid Studio (εμπορικής χρήσης) και συγκεκριμένα το φασματικό Μοντέλο SWAN και το υδροδυναμικό και μοντέλο στερεομεταφοράς Mohid – Water, που έχουν αναπτυχθεί από την εταιρεία ACTION Modulers
  - iv. Η πλατφόρμα λογισμικών SMS (εμπορικής χρήσης) και συγκεκριμένα το μοντέλο πεπερασμένων διαφορών CMS–Wave, το υδροδυναμικό και μοντέλο στερομεταφοράς CMS–Flow που προσομοιάζει ποικίλα φαινόμενα μεταφοράς και κυκλοφορίας

Παρουσιάζονται για καθένα από τα προαναφερθέντα μοντέλα (εκτός του Delft3D), οι κύριες εξισώσεις υπολογισμού στις οποίες βασίζουν τη λειτουργία τους και επιπρόθετα βασικές παράμετροι εισόδου/εξόδου, για τις οποίες περιγράφεται εν συντομία η διαδικασία που ακολουθήθηκε. Το λογισμικό Delft3D μοιάζει πολύ στη λειτουργία του με τα μοντέλα που περιέχονται Mohid Studio, υστερεί όμως αισθητά στην οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων, γι' αυτό και τα αποτελέσματα των αναλύσεων σε αυτό το λογισμικό παρουσιάζονται στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας.

- Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου με έμφαση στην περιοχή που εκτείνεται μεταξύ της παραλίας της Αυλίδος – Βαθέως. Τονίζονται οι ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης, και παρουσιάζεται η βαθυμετρία που εισήχθη σε κάθε πακέτο λογισμικού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής, τα χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος όπως αυτά προέκυψαν από μετρήσεις του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) καθώς και στοιχεία παλίρροιας από την περιοχή που παρασχέθηκαν από την Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού.
- Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για το κυματικό κλίμα, την κατανομή των συνιστωσών της υδροδυναμικής ταχύτητας και κυρίως του μεγέθους του φαινομένου της στερεομεταφοράς. Γίνεται επίσης σύγκριση των

αποτελεσμάτων των ανωτέρω λογισμικών τόσο ως προς το μέγεθος των φαινομένων που παρουσιάζονται, όσο και ως προς τη φορά των εκάστοτε εξαγόμενων υπολογισθέντων παραμέτρων.

- Στο Κεφάλαιο 6, συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Γίνεται προσπάθεια να αιτιολογηθούν οι διαφορές που προέκυψαν από τις αναλύσεις στα εκάστοτε λογισμικά και προτείνονται βελτιώσεις που θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν σε μεταγενέστερες αναλύσεις.

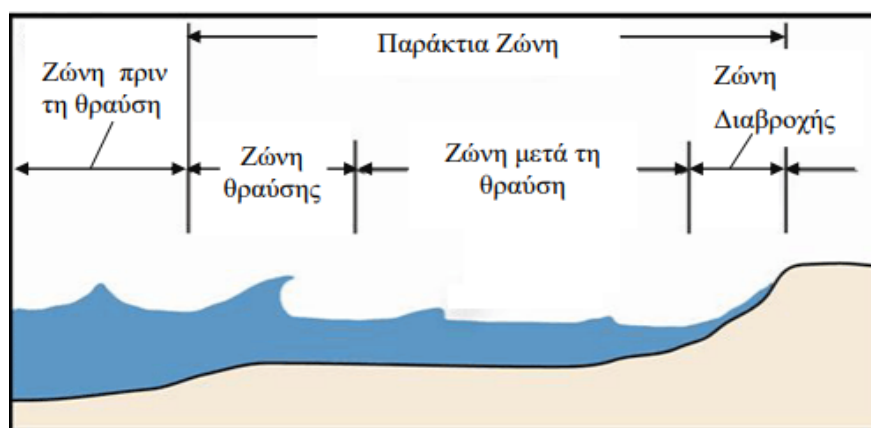
## 2. Ανασκόπηση βασικών εννοιών

### 2.1 Παράκτια ζώνη και φυσικές διεργασίες

Η παράκτια ζώνη είναι το πεδίο αλληλεπίδρασης μεταξύ της υδρόσφαιρας, της λιθόσφαιρας, της βιόσφαιρας και της ατμόσφαιρας. Πρόκειται για τη θαλάσσια ζώνη που έχει σαν εσωτερικό όριο την ακτογραμμή, ενώ το εξωτερικό της όριο ορίζεται από την ισοβαθή στην οποία γίνεται αισθητή η επίδραση των κυμάτων ως τον πυθμένα. Περαιτέρω, η παράκτια ζώνη υποδιαιρείται στην επάκτια ζώνη (inshore zone) και προάκτια ζώνη (foreshore zone) ή μέτωπο ακτής. Το όριο μεταξύ της επάκτιας και της προάκτιας ζώνης τοποθετείται στη γραμμή κατώτατης ρηχιάς (mean low-water line).

Ενδιάμεσα διακρίνονται οι ακόλουθες ζώνες (Komar, 1998)

- Βαθύτερη ζώνη ή ζώνη πριν τη θραύση. Πρόκειται για το πεδίο όπου εμφανίζονται οι παραμορφώσεις των κυμάτων που τελικά οδηγούν στη θραύση.
- Ζώνη θραύσεως (breaker zone), που είναι το κατ' εξοχήν δυναμικό τμήμα της παράκτιας ζώνης. Σ' αυτήν εμφανίζεται και ολοκληρώνεται ο φυσικός μηχανισμός της θραύσης του κύματος, που αποτελεί γενεσιουργός αιτία των περισσότερων διεργασιών που απασχολούν τον κλάδο της ακτομηχανικής.
- Ζώνη μετά τη θραύση, η οποία με τη σειρά της υποδιαιρείται σε ζώνη αποσβέσεως (surf zone) και σε ζώνη διαβροχής (swash zone). Η ζώνη αποσβέσεως είναι αυτή στην οποία αποσβένεται το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του θραυόμενου κύματος με τη μορφή θερμότητας, τύρβης κλπ. Η ζώνη διαβροχής από την άλλη είναι μεταβλητού πλάτους και έχει σαν εξωτερικό όριο την κατώτερη θέση της ακτογραμμής και ως εσωτερικό την ανώτερη θέση της ακτογραμμής. Η θέση και το πλάτος και των δύο προαναφερθέντων υποζωνών επηρεάζεται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων, την κλίση του πυθμένα, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη δράση της παλίρροιας.



Εικόνα 2.1: Η παράκτια ζώνη και οι επιμέρους ζώνες της (Σκαρλάτου, 2016, τροποποιημένη από Komar et al,1998)



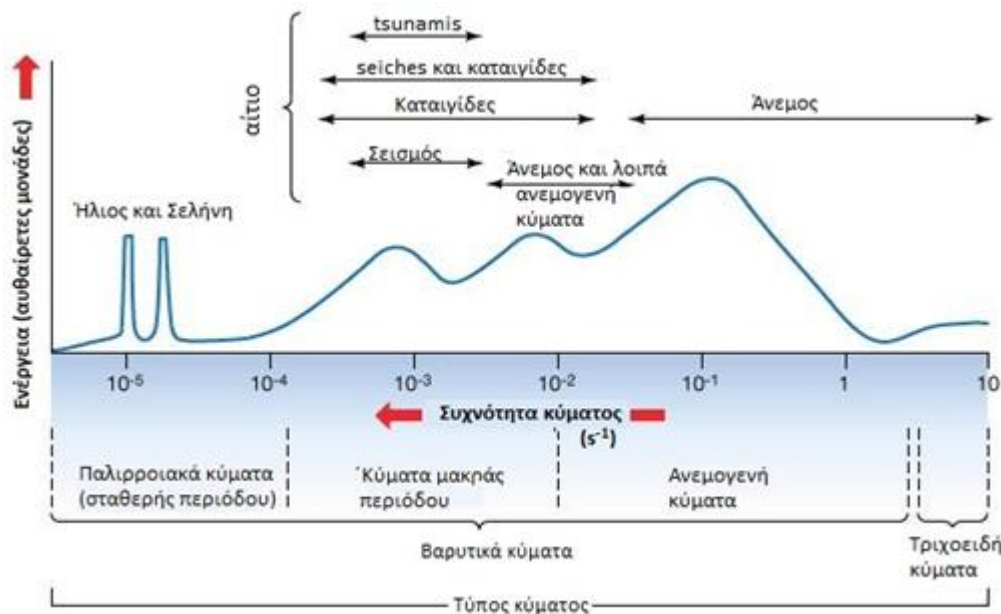
### 2.1.1 Θαλάσσιοι κυματισμοί και μηχανισμοί γένεσής τους

Οι κυματισμοί που συναντώνται σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον είναι πολλών μορφών και δρουν πολλές φορές ταυτόχρονα μεταξύ τους, έτσι ώστε η κίνηση των υδάτινων σωματιδίων προκύπτει σαν υπέρθεση όλων αυτών των διαφορετικών κυματισμών. Συνεπώς είναι πολύ δύσκολο να διακριθούν. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές και διαφορετικές κατατάξεις σχετικά με τις κυματικές μορφές που συναντώνται στο θαλάσσιο περιβάλλον, εδώ θα αναφερθεί αυτή που έγινε από τον Massel ,2013:

- Ακουστικά κύματα (sound waves) που δημιουργούνται λόγω της συμπιεστότητας του νερού. Στην πραγματικότητα είναι πολύ μικρού μεγέθους, επομένως αυτή η τάξη κυμάτων αποτελείται από κύματα μικρού μήκους και ύψους
- Εσωτερικά κύματα (internal waves) τα οποία δημιουργούνται στη διεπιφάνεια δυο στρωμάτων θαλασσινού νερού διαφορετικής πυκνότητας
- Βαρυτικά κύματα (gravity waves), τα οποία προκαλούνται από την επίδραση βαρυτικών δυνάμεων. Αυτές οι δυνάμεις ασκούνται σε υγρά σωματίδια που έχουν μετακινηθεί από τη θέση ισορροπίας τους και δημιουργούν τα βαρυτικά κύματα. Σ' αυτή την κατηγορία ανήκουν τα επιφανειακά κύματα (surface waves) τα οποία αποτελούν και το μεγαλύτερο μέρος των κυματισμών που συναντώνται στο υδάτινο περιβάλλον
- Τριχοειδή κύματα (capillary waves) τα οποία δημιουργούνται στη διεπιφάνεια νερού και της ατμόσφαιρας. Ο συνδυασμός του τυρβώδους ανέμου και της υψηλής επιφανειακής τάσης σ' αυτή τη διεπιφάνεια προκαλεί τη δημιουργία τριχοειδών κυματισμών υψηλής συχνότητας.
- Πλανητικά κύματα (planetary or Rosby waves) που προκαλούνται από τη σχετική κίνηση πλανητών και Γης. Πρόκειται για κύματα μεγάλου μήκους και μικρής ταχύτητας και συχνότητας.

Οι επιφανειακοί κυματισμοί, όπως προαναφέρθηκε καλύπτουν σημαντικό φάσμα των κυματισμών σε όρους ενεργειακής πυκνότητας, και αντιστοιχούν σε περιόδους που σχετίζονται με τις κυριότερες ανθρώπινες δραστηριότητες. Με κριτήριο τη γενεσιουργό αιτία δημιουργίας τους οι επιφανειακοί κυματισμοί διακρίνονται σε:

- Ανεμογενείς κυματισμούς (wind generated waves), με αίτιο δημιουργίας τη δράση του ανέμου. Σ' αυτήν την κατηγορία ανήκουν και οι αποθαλασσιές (swell) που οφείλονται σε άνεμο που έπνεε σε προηγούμενο χρόνο ή ακόμα και σε διαφορετική περιοχή. Τα κύματα αυτής της κατηγορίας αντιστοιχούν σε περιόδους από  $T= 0.5 \text{ sec}$  έως  $T= 25 \text{ sec}$  περίπου.
- Κύματα παραγόμενα από κινήσεις επιπλεόντων ή βυθισμένων αντικειμένων (body generated waves), τα οποία, γενικώς, 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 και  $T= 40 \text{ min}$
- Σεισμογενείς κυματισμούς (tsunamis) που καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος του φάσματος, με περιόδους από  $T= 4 \text{ min}$  έως και  $T= 2.5 \text{ h}$  περίπου



Εικόνα 2.2: Τυπικό φάσμα κυματισμών

Τα βασικά χαρακτηριστικά των κυματισμών είναι το ύψος κύματος  $H$ , η περίοδος τους  $T$ , το μήκος κύματος  $L$  και η γωνία πρόσπτωσης τους  $\theta$ . Τα μεγέθη αυτά για περιοχές βαθιών νερών ( $d > 0.5 L$ ), παραμένουν σταθερά, καθώς εκεί οι τροχιές των υγρών σωματιδίων είναι κυκλικές. Αντίθετα, στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά ( $d < 0.5 L$ ), οι τροχιές τείνουν να γίνουν περίπου ελλειπτικές και σχετικά πεπλατυσμένες και η επίδραση του πυθμένα καθίσταται ολόένα και σημαντικότερη με συνέπεια τα φαινόμενα να αποκλίνουν από τη γραμμικότητά τους παρουσιάζοντας σημαντική διασπορά.

Ειδικότερα για την περιοχή των ενδιάμεσων και των ρηχών νερών παρατηρούνται τα πιο σημαντικά και χαρακτηριστικά κυματικά φαινόμενα. Αυτά είναι τα εξής:

- Ανάκλαση και διάθλαση (σε περίπτωση μη κάθετης γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού ως προς τις ισοβαθείς), καθώς και τροποποίηση του πλάτους του κυματισμού λόγω της επίδρασης του πυθμένα, η λεγόμενη ρήγωση
- Αλληλεπίδραση με την βαθυμετρία στο χώρο και φαινόμενα περίθλασης ή σκέδασης των κυματισμών (diffraction), λόγω εμποδίων στη θαλάσσια ροή
- Διασπορά (dispersion) των κυματισμών
- Εξασθένιση της κυματικής ενέργειας και τριβή πυθμένα (wave energy dissipation and bottom friction)
- Δημιουργία κυματογενών ρευμάτων (wave induced currents) και μεταφορά ενέργειας
- 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)
- Αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών κυμάτων (wave-wave interactions)
- Θραύση των κυμάτων κοντά στην ακτή (wave breaking)

Το τελευταίο φαινόμενο είναι από τα πλέον σημαντικά στον κλάδο της ακτομηχανικής καθώς παρατηρείται αύξηση στα φαινόμενα κυκλοφορίας με την αύξηση των τάσεων ακτινοβολίας, όπως και στην ενέργεια του παράκτιου συστήματος λόγω της πρόσθετης υψηλής ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τη θραύση των κυματισμών.

### 2.1.2. Θαλάσσια ρεύματα

Τα θαλάσσια ρεύματα σε παράκτιες περιοχές είναι εξαιρετικά δύσκολο να προβλεφθούν με αξιοπιστία, λόγω των πολλών επί μέρους συνιστωσών τους, οι κυριότερες των οποίων είναι (Μέμος, 2008):

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

Οι πρώτες δύο κατηγορίες αφορούν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, οι επόμενες δύο αναφέρονται σε τοπικά φαινόμενα ενώ η τελευταία εμφανίζεται με αυξημένη σπουδαιότητα στη ζώνη ρηχών νερών. Για τα ανεμογενή ρεύματα έχει παρατηρηθεί ότι η φορά τους διαφέρει από την κύρια διεύθυνση πνοής του ανέμου και μεταβάλλεται σημαντικά με το βάθος. Από την άλλη η φορά των κυματογενών ρευμάτων συμπίπτει με τη φορά μετάδοσης των κυματισμών και του πρωτογενούς φαινομένου του ανέμου.

Τα ρεύματα που προκαλούνται από την παλίρροια είναι περισσότερο αισθητά σε στενά γεωγραφικών περιοχών (π.χ. στενό Ευρίπου στη Χαλκίδα). Οι αιτίες που επηρεάζουν αυτόν τον τύπο ρευμάτων είναι (Μαρκάκης, 1972):

1. Αυξομειώσεις της βαρομετρικής πίεσης
2. Η μεταβολή της πνοής του ανέμου κατά ένταση και διεύθυνση
3. Η διαφορά θερμοκρασίας ή αλατότητας
4. Τοπικές διαμορφώσεις ακτών και πυθμένα
5. Σεισμικές δονήσεις και εκρήξεις ηφαιστείων

Τα ρεύματα που συναντώνται στη παράκτια ζώνη χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα ρεύματα κατά μήκος της ακτής (longshore currents) και τα βελοειδή ρεύματα (rip currents). Ο διαχωρισμός τους βασίζεται στη μορφή τους και στη διεύθυνση της κίνησής τους. Το βελοειδές ρεύμα είναι ένα στενό ρεύμα μεταφοράς μάζας που κινείται από τη ζώνη θραύσης και εξαλείφεται στη ζώνη πριν τη θραύση. Δημιουργείται πολλές φορές από τοπογραφικές ανωμαλίες του πυθμένα ή από τη συμβολή δύο ρευμάτων παρόμοιας έντασης. Κινείται με μεγάλη ταχύτητα (έως και 2.5 m/s) μακριά από την ακτογραμμή, διασχίζοντας θραυόμενους κυματισμούς και με κίνηση που θυμίζει κίνηση ποταμού μέσω της θαλάσσης.

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί προκαλούν κινήσεις των υγρών σωματιδίων που είναι έντονες στα επιφανειακά στρώματα και αποσβένουν με την αύξηση του βάθους της θαλάσσιας στήλης (απόσταση πυθμένα από ελεύθερη επιφάνεια). Γίνεται λοιπόν

κατανοητό ότι η ένταση του κυματογενούς ρεύματος αυξάνει καθώς μειώνεται το σχετικό βάθος και μεγιστοποιείται στη ζώνη θραύσης των κυμάτων. Στη ζώνη θραύσης έχουμε ανάπτυξη τόσο ρευμάτων κάθετα στην ακτή (βελοειδή) όσο και ρεύματα κατά μήκος της ακτής (ρμκα).

Η γένεση των ρευμάτων κατά μήκος της ακτής οφείλεται στην ανομοιόμορφη κατανομή του ύψους κύματος στη ζώνη θραύσης καθώς και στην κλίση της γραμμής θραύσεως των κυματισμών ως προς την ακτογραμμή. Η ανομοιόμορφη αυτή κατανομή δημιουργεί υδραυλικές βαθμίδες με συνέπεια τη δημιουργία ρευμάτων. Οι σημαντικότερες δυνάμεις που συμβάλουν στη δημιουργία ρευμάτων κατά μήκος της ακτής είναι η διατμητική τάση ακτινοβολίας (radiation stress) και η τριβή του πυθμένα (bottom friction).

Κατανοώντας την πολυπλοκότητα της γένεσης των ρευμάτων καθώς και την πολυπλοκότητα των μορφών τους γίνεται φανερό ότι μια θεωρητική πρόβλεψη του μεγέθους και της φοράς τους δεν είναι δυνατή. Γι' αυτό συχνά προτιμάται η απ' ευθείας μέτρηση των ρευμάτων με χρήση κατάλληλων μετρητικών οργάνων.

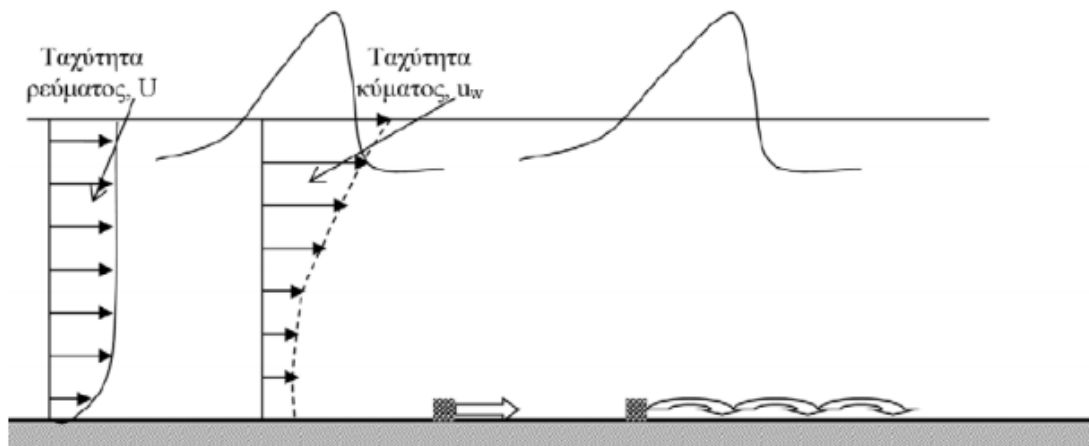
### 2.1.3. Παράκτια στερεομεταφορά και μηχανισμοί της

Ως παράκτια στερεομεταφορά ορίζεται η μεταφορά ιζήματος και εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της θαλάσσιας διαταραχής που την προκαλεί. Αποτελεί προϊόν της αποσταθεροποιητικής δράσης των κυματισμών και της μεταφορικής δράσης των ρευμάτων. Τα επιφανειακά ιζήματα βρίσκονται είτε σε δυναμική ισορροπία με τις φορτίσεις του περιβάλλοντος είτε σε κίνηση που μπορεί να γίνει στον πυθμένα ή στα ανώτερα στρώματα του υδάτινου στρώματος. Η διαδικασία της μεταφοράς των ιζημάτων ορίζεται κυρίως από το μέγεθος των κόκκων του εδαφικού υλικού και τη διατμητική τάση που εξασκεί η ροή πάνω σε αυτό. Οι διάφορες συνιστώσες των δυνάμεων που δρουν στους επιφανειακούς κόκκους του πυθμένα, δηλαδή οι ορθές και διατμητικές τάσεις από το κινούμενο νερό, οι δυνάμεις αλληλεμπλοκής μεταξύ των κόκκων, οι υδροδυναμικές υποπίεσεις λόγω διήθησης και οι δυνάμεις λόγω κρούσης με άλλους κόκκους, είναι δυνατόν να δημιουργήσουν τις κατάλληλες δυναμικές συνθήκες αποκόλλησης των επιφανειακών κόκκων. Ειδικότερα, έχει αποδειχθεί ότι στη περίπτωση συνεκτικών εδαφών, όπως αργιλικών, οι μοριακές δυνάμεις συνοχής, κάνουν πιο δύσκολη την έναρξη της διάβρωσης του πυθμένα, ιδίως σε πυθμένες όπου έχει προχωρήσει διαδικασία της στερεοποίησης. (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)

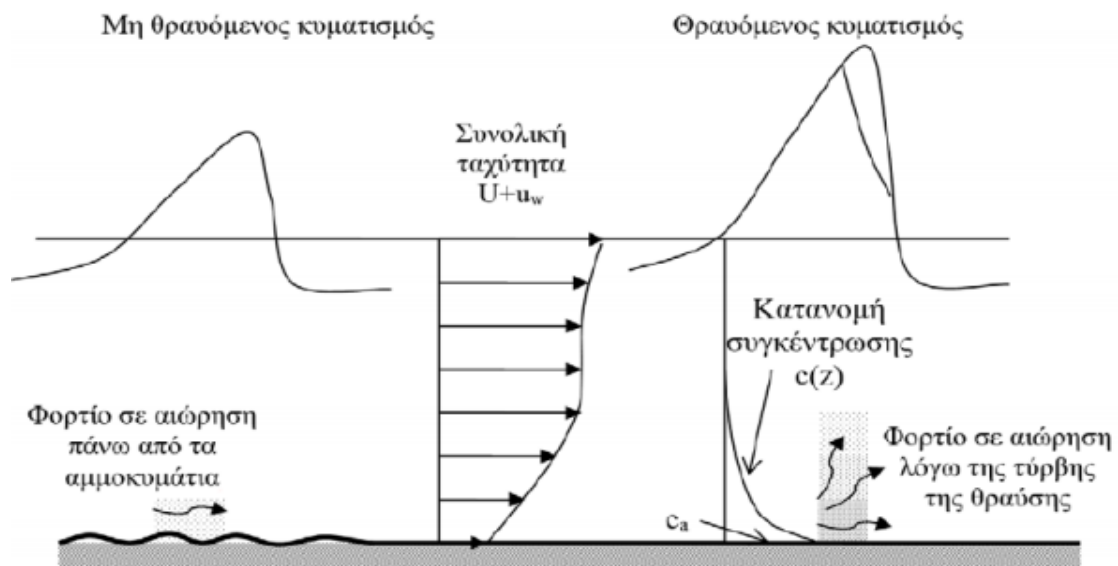
Η έναρξη κίνησης ενός κόκκου ιζήματος στον πυθμένα εξαρτάται από την αναπτυσσόμενη διατμητική ή επιφανειακή τάση στον κόκκο. Όταν η προαναφερθείσα τάση ξεπεράσει μια κρίσιμη οριακή τιμή τότε ο κόκκος τίθεται σε κίνηση. Η κίνηση των ιζημάτων συνεχίζεται μέχρι ότου να εκλείψουν τα γενεσιουργά αίτια που την προκάλεσαν, ή μέχρι να συναντηθούν παράκτια εμπόδια.

Η κίνηση των κόκκων γίνεται είτε σε επαφή με τον πυθμένα (φορτίο πυθμένα) είτε σε αιώρηση (φορτίο αιωρήσεως). Για μεγάλες ταχύτητες ροής και/ή μικρότερο μέγεθος κόκκων το φορτίο τείνει να τεθεί σε αιώρηση. Σε αντίθετη περίπτωση η κίνηση του ιζήματος γίνεται με τη μορφή φορτίου πυθμένα. Στην εικόνα 2.3

παρουσιάζεται κίνηση ιζήματος με τη μορφή φορτίου πυθμένα ενώ στην εικόνα 2.4 παρουσιάζεται κίνηση ιζήματος με τη μορφή φορτίου αιωρήσεως.



Εικόνα 2.3: Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)



Εικόνα 2.4: Φορτίο αιωρήσεως (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)

Οι κυματισμοί που προσπίπτουν υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή συμβάλλουν σημαντικά στη μεταφορά ιζήματος κατά μήκος της παράκτιας ζώνης. Ανάλογα με το μέγεθος της γωνίας προκαλείται διαφορετικής έντασης στερεομεταφορά. Με βάση τις πειραματικές μελέτες που έχουν διεξαχθεί, έχει παρατηρηθεί ότι κύματα με γωνία πρόσπτωσης  $45^\circ$  ως προς την ακτή προκαλούν τη μέγιστη δυνατή στερεομεταφορά και επιφέρουν μεγάλες επιπτώσεις στην ακτογραμμή.

Με βάση τα παραπάνω 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

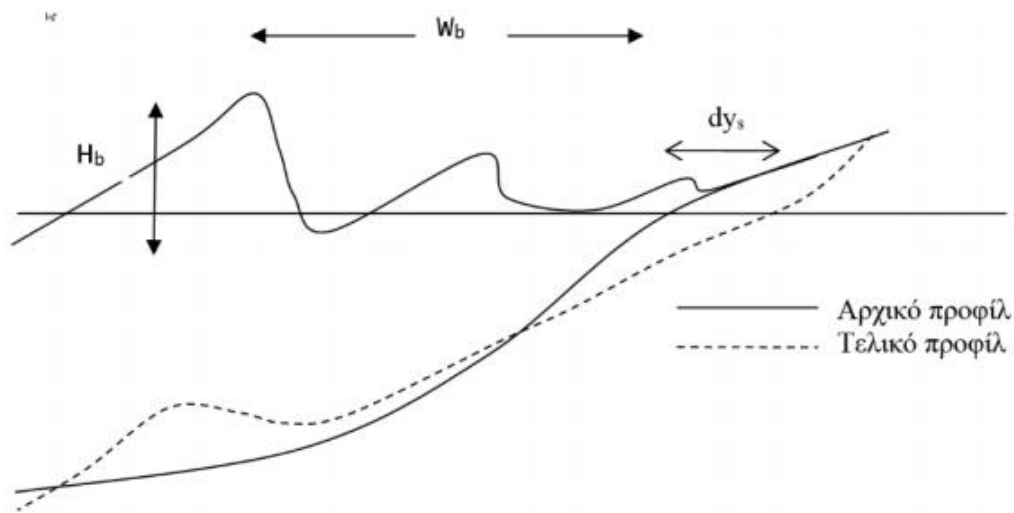
κυματική δύναμη) βρίσκονται σε ισορροπία, ονομάζεται ουδέτερη γραμμή. Η θέση της ουδέτερης γραμμής είναι συνάρτηση της τοπογραφίας του πυθμένα και των χαρακτηριστικών των κυμάτων, ωστόσο πάντα βρίσκεται προς τα ανοιχτά της ζώνης θραύσης. Τα ιζήματα που βρίσκονται σε βαθύτερα ύδατα σε σχέση με την ουδέτερη γραμμή κινούνται προς τα ανοιχτά, ενώ τα ιζήματα που βρίσκονται πιο ρηχά κινούνται με κατεύθυνση την ακτή.

### 2.1.3.1 Στερεομεταφορά κάθετα στην ακτογραμμή

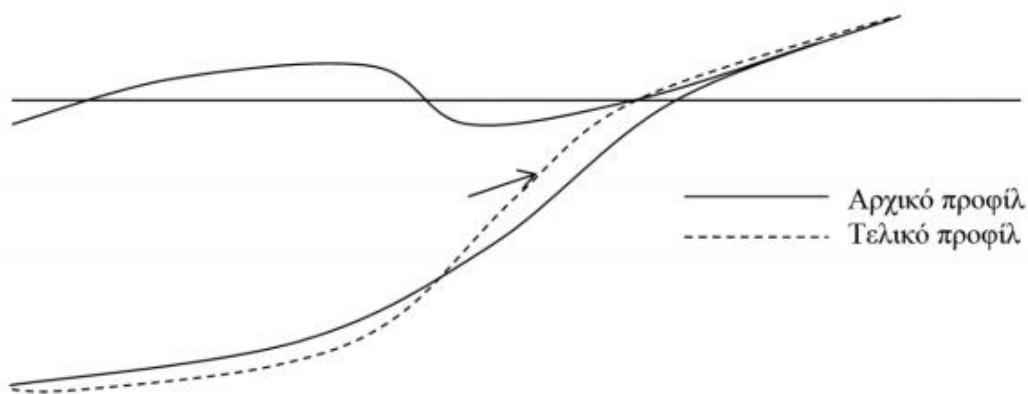
Η εγκάρσια κίνηση των ιζημάτων οφείλεται κατά κύριο λόγο στους κυματισμούς. Ιζήματα τίθενται σε κίνηση από την κάθετη συνιστώσα της τροχιακής κίνησης των υγρών σωματιδίων και στη συνέχεια μεταφέρονται από το κυματογενές ρεύμα. Η δράση της τροχιακής κινήσεως είναι τελείως διαφορετική στις ζώνες πριν και μετά τη θραύση. Η εγκάρσια συνιστώσα της στερεομεταφοράς καθορίζει το προφίλ της ακτής καθώς μεταβάλλει τη βαθυμετρία της και το ύψος των έξαλλων 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) και παρουσιάζονται κατ' αντιστοιχία στις εικόνες 2.5 και 2.6.

- 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 του καθορίζεται 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 έξαλλος αναβαθμός στην ακτή εμπλουτίζοντάς τη με υλικό και η ζώνη θραύσης μετατοπίζεται και πάλι στα πιο ρηχά.



Εικόνα 2.5: Χειμερινό προφίλ-διάβρωση (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)



Εικόνα 2.6: Θερινό προφίλ-πρόσχωση (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)

### 2.1.3.2 Στερομεταφορά κατά μήκος της ακτογραμμής

Η στερομεταφορά κατά μήκος της ακτής οφείλεται κυρίως, όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη θραύση κυμάτων υπό γωνία με την ακτογραμμή. Επιπλέον όμως επηρεάζεται από πολλές παραμέτρους, όπως το ύψος και η περίοδος του κύματος, η κλίση, καθώς και οι ιδιότητες του υλικού του πυθμένα.

Η παροχή στερομεταφοράς κατά μήκος μιας ακτής είναι ένα στοιχείο απαραίτητο για το σχεδιασμό όλων σχεδόν των παράκτιων έργων.

Οι μέθοδοι υπολογισμού της είναι κατά σειρά μειούμενης ακρίβειας οι παρακάτω (Μουτζούρης 2005):

- Μετρήσεις στην ακτή υπό μελέτη ή στο εργαστήριο

- Προσαρμογή μιας γνωστής τιμής στερεοπαροχής από μια γειτονική ακτή αφού ληφθούν υπ' όψη τυχόν 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 το πλείστον 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 αθροιστικά τα φορτία πυθμένα και αιωρήσεως που διακινούνται στις ζώνες θραύσεως και αποσβέσεως. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ο ρυθμός στερεομεταφοράς παράλληλα στην ακτή υπολογίζεται ως:

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

Όπου η ροή ενέργειας  $P_I$  υπολογίζεται ως:

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

Στις παραπάνω σχέσεις υπολογισμού υπεισέρχονται οι ακόλουθοι παράμετροι:

$Q_I$ : η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής σε  $m^3/\acute{\epsilon}τος$

$P_I$ : 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 (τιμή για αμμώδες υλικό)

$H_b$ : το ύψος κύματος στη θραύση σε  $m$

$\alpha_b$ : η γωνία θραύσης

$C_{gb}$  ( $= \sqrt{gdb}$ ): η ταχύτητα ομάδας κυματισμών στη θραύση σε  $m/s$



### 3. Περιγραφή των λογισμικών και μεθόδων υπολογισμού

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν υπολογιστικά προγράμματα για την αξιολόγηση των δυνατοτήτων τους στην περιοχή που εξετάζεται. Το χαρακτηριστικό όλων των πακέτων λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν είναι ότι αποτελούνται από συζευγμένα μοντέλα τα οποία πραγματοποιούν την ανάλυση τμηματικά. Συγκεκριμένα, σε πρώτο στάδιο γίνεται υπολογισμός του κυματικού κλίματος και στη συνέχεια μέσω υδροδυναμικού προγράμματος ή/και προγράμματος στερεομεταφοράς λαμβάνει μέρος ο υπολογισμός των μορφοδυναμικών φαινομένων στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Μια ειδοποιός διαφορά ανάμεσα στις εξετασθείσες πλατφόρμες αφορά στη γεωμετρία του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων (grid) που έχει το καθένα από αυτά. Πιο συγκεκριμένα τα προγράμματα του Delft3D, του Mohid Studio και του CMS χρησιμοποιούν ορθογωνικό κানাβο με τετραπλευρικά στοιχεία (συνήθως ορθογωνικά) ενώ τα μοντέλα που περιλαμβάνονται στην πλατφόρμα Telemac-Mascaret πραγματοποιούν τους υπολογισμούς τους σε κানাβο με στοιχεία ακανόνιστης γεωμετρίας (unstructured mesh)

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα λογισμικά:

- Telemac – Mascaret, που αναπτύχθηκε και συντηρείται από Πανεπιστήμια και εταιρείες Γαλλίας και Γερμανίας (Ανοιχτός Κώδικας)
- Mohid Studio, της εταιρείας Action Modulers (Εμπορικής Χρήσης)
- SMS, της εταιρείας Aquaveo (Εμπορικής Χρήσης)

Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη ανάλυση των παραμέτρων εισόδου και των βασικών εξισώσεων υπολογισμού κάθε προγράμματος. Η παρουσίαση θα γίνει διαχωρίζοντας τα μοντέλα όχι ως προς τη λειτουργία τους, αλλά ως προς την πλατφόρμα λογισμικού που τα περιλαμβάνει

#### 3.1 Telemac – Mascaret

##### 3.1.1 Μοντέλο υπολογισμού κυματικού κλίματος TOMAWAC

Το αριθμητικό μοντέλο TOMAWAC (TELEMAC based Operational Model Addressing Wave Action Computation ) είναι ένα τρίτης γενιάς φασματικό μοντέλο κυμάτων και ανέμων, το οποίο προσομοιώνει την ανάπτυξη, την απόσβεση και τον μετασχηματισμό των ανεμογενών κυμάτων και έχει εφαρμογές τόσο σε παράκτιες ζώνες όσο και σε ωκεάνιες περιοχές. Είναι μέρος του συστήματος TELEMAC και αναπτύχθηκε από το EDF R&D's Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE). Το μοντέλο χρησιμοποιεί τη μέθοδο επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων και βασίζεται στην εξίσωση ισορροπίας κυματικής

ενέργειας υπολογίζοντας την πυκνότητα δράσης σε κάθε σημείο του κάναβου πεπερασμένων στοιχείων.

Το TOMAWAC μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως στις ακόλουθες τρεις (3) περιπτώσεις εφαρμογής:

- Εκτίμησης / πρόβλεψης κυματικού κλίματος
- Εκτίμησης επιπτώσεων με τη μέθοδο της αντίστροφης ανάλυσης
- Μελέτης σε ακραία φαινόμενα (π.χ. καταγίδες)

Το πεδίο εφαρμογής του είναι ιδιαίτερα ευρύ και καλύπτει εξίσου τις περιοχές βαθέων υδάτων, ενδιάμεσων νερών και τις παράκτιες περιοχές. Η ικανότητά του αυτή βασίζεται στο ότι στον κάναβο υπολογισμού, είναι δυνατό ο μέγιστος λόγος του μεγέθους των μεγαλύτερων πεπερασμένων στοιχείων προς τα μικρότερα που έχουν κατασκευαστεί να ξεπερνά το 100. Πρακτικά δηλαδή επιτρέπεται η χρήση του TOMAWAC σε περιοχές με μεγάλες διαφορές στο σχετικό βάθος νερού, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος αστάθειας στους υπολογισμούς.

Οι επόμενες φυσικές διεργασίες λαμβάνονται υπ' όψη κατά την εκτέλεση του TOMAWAC:

Διεργασίες ενέργειας πηγής / απόσβεσης:

- Αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα και γένεση κυμάτων από τον άνεμο
- Απόσβεση λόγω του φαινομένου whitecapping
- Απόσβεση λόγω τριβής του πυθμένα
- Απόσβεση λόγω θραύσης κυμάτων από την επίδραση του πυθμένα
- Απόσβεση λόγω θραύσης κυμάτων υπό την παρουσία ισχυρών ρευμάτων αντίθετης κατεύθυνσης (π.χ. βελοειδές)

Μη γραμμικές συντηρητικές διαδικασίες μεταφοράς ενέργειας:

- Μη γραμμική συντονισμένη τετραπλή αλληλεπίδραση ( non-linear resonant quadruplet interactions), μηχανισμό που κυριαρχεί στα βαθιά νερά
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση τριάδων ( non-linear triplet interactions), μηχανισμό που επικρατεί στα ρηγά νερά

Διεργασίες σχετικές με τη διάδοση του κύματος

- Διάδοση του κύματος εξαιτίας της ταχύτητας της κυματικής ομάδας και κατά περίπτωση, της ταχύτητας του μέσου διάδοσης (π.χ. θαλάσσια ρεύματα)
- Διάθλαση λόγω της επίδρασης του πυθμένα
- Ρήγωση λόγω της επίδρασης του πυθμένα
- Διάθλαση λόγω της παρουσίας ρευμάτων
- Αλληλεπίδραση με ασταθή ρεύματα και μεταφορά συχνότητας (π.χ. σε περιοχές με έντονα φαινόμενα παλίρροιας)
- Περίθλαση λόγω ανθρώπινων εμποδίων (π.χ. κυματοθραύστες, λιμένες)

Σ αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι παρ' όλο που το TOMAWAC μπορεί να περιλαμβάνει την περίθλαση στους υπολογισμούς του αυτή η λειτουργία βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο και στον τομέα εφαρμογής του δεν περιλαμβάνονται οι λιμένες. Αυτό σημαίνει ότι δεν συνίσταται η χρήση του σε περιπτώσεις όπου η επίδραση της ανάκλασης και της περίθλασης δεν μπορεί να αγνοηθεί.

### Θεωρητικές εξισώσεις TOMAWAC

Στη γενική περίπτωση της διάδοσης κύματος σε ένα μη σταθερό μέσο (π.χ. λόγω της επίδρασης ρευμάτων ή/με μεταβολή της στάθμης της θάλασσας). Τα ανεμογενή κύματα περιγράφονται σε αυτή την περίπτωση από τη φασματική πυκνότητα της κυματικής δράσης  $N(f,q)$ . Αυτό το φάσμα πυκνότητας δράσης σχετίζεται με το κατευθυντικό φάσμα της πυκνότητας διακύμανσης από τη σχέση:

$$N = \frac{F}{s} \quad (3.1)$$

όπου το  $s$  δηλώνει τη σχετική ή την εγγενή γωνιακή συχνότητα

Αυτή η συχνότητα διαφέρει από την απόλυτη γωνιακή συχνότητα  $\omega$ , που χρησιμοποιείται σε ένα καθορισμένο σύστημα συντεταγμένων. Οι δύο συχνότητες συνδέονται μέσω του φαινομένου Doppler, παρουσία ενός ρεύματος  $U$ :

$$\Omega(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t) = \omega = \sigma + \mathbf{k}U \quad (3.2)$$

όπου:

$\mathbf{k}$  είναι το διάνυσμα κατεύθυνσης του κύματος με μέτρο  $k$  και διεύθυνση  $\theta$ , ενώ  $U$  το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος.

Η σχετική ή εγγενής γωνιακή συχνότητα  $\sigma$  δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad (3.3)$$

όπου  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $d$  το βάθος του κύματος στη θέση ενδιαφέροντος,  $k$  ο αριθμός του κύματος.

Το φάσμα πυκνότητας δράσης θεωρείται συνάρτηση 5 μεταβλητών

$$N(\mathbf{k}, \mathbf{x}, t) = N(k_x, k_y, x, y, t) \quad (3.4)$$

Με  $\mathbf{x} = (x, y)$  να αντιπροσωπεύει το διάνυσμα θέσης σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων,  $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (k \sin\theta, k \cos\theta)$  το διάνυσμα του αριθμού του κύματος στη διεύθυνση διάδοσης  $\theta$  του κυματισμού.

Λαμβάνοντας υπ' όψη τις φυσικές διεργασίες του μοντέλου, καθώς και την περιοχή εφαρμογής του μπορούμε να καταλήξουμε στην ακόλουθη σχέση εξέλιξης του φάσματος της κυματικής δράσης.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(k_x N)}{\partial k_x} + \frac{\partial(k_y N)}{\partial k_y} = Q(k_x, k_y, x, y, t) \quad (3.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει ότι στη γενική περίπτωση διάδοσης κυμάτων σε ένα μη ομοιογενές και ασταθές μέσο, η δράση των κυμάτων διατηρείται μέσα στους όρους πηγής και απώλειας (source and sink terms) που ορίζονται με τον όρο Q.

Οι ρυθμοί μεταφοράς δίνονται από την γραμμική θεωρία κύματος ως εξής:

$$\dot{x} = C_g \frac{k_x}{k} + U_x \quad (3.6)$$

$$\dot{y} = C_g \frac{k_y}{k} + U_y \quad (3.7)$$

$$\dot{k}_x = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial x} - \mathbf{k} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (3.8)$$

$$\dot{k}_y = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial y} - \mathbf{k} \frac{\partial U}{\partial y} \quad (3.9)$$

Το  $C_g$  είναι η σχετική (ή εγγενής) ταχύτητα ομαδική ταχύτητα των κυμάτων και δίνεται με τη σειρά της από τη σχέση:

$$C_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = n \frac{\sigma}{k} \quad (3.10)$$

με το  $n$  να αντιπροσωπεύει την εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε χρονική στιγμή.

#### Επίλυση εξισώσεων σε καρτεσιανές συντεταγμένες

Αλλάζοντας τις μεταβλητές από  $(x, y, k_x, k_y, t)$  σε  $(x, y, fr, q)$  αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$N(x, y, k_x, k_y, t) = \frac{C_g}{2\pi\sigma} \tilde{N}(x, y, fr, q, t) = \tilde{B} \tilde{F}(x, y, fr, \theta, t) \quad (3.11)$$

Στην εξίσωση (3.11) ο όρος  $C = \frac{\sigma}{k}$  αντιπροσωπεύει την σχετική (ή εγγενή) ταχύτητα φάσης του κύματος

Θέτοντας όπου  $\tilde{B} = \frac{C_g}{(2\pi)^2 k fr}$  στην εξίσωση (3.5) προκύπτει η τελική εξίσωση μετάδοσης του κύματος σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

$$\frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial t} + \dot{x} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial x} + \dot{y} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial y} + \dot{\theta} \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial \theta} + fr \frac{\partial(\tilde{B}\tilde{F})}{\partial fr} = \tilde{B} \tilde{Q}(x, y, \theta, fr, t) \quad (3.12)$$

με τα παρακάτω ποσοστά μεταφοράς, όπως έχουν υπολογισθεί από τη γραμμική θεωρία κύματος:

$$\dot{x} = C_g \sin\theta + U_x \quad (3.13)$$

$$\dot{y} = C_g \cos\theta + U_y \quad (3.14)$$

$$\dot{\theta} = -\frac{1}{k} \frac{\partial \sigma}{\partial d} \mathbf{n} \nabla d - \frac{k}{k} \mathbf{n} \nabla U \quad (3.15)$$

$$\dot{f}r = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{U} \nabla d \right) - C_g k t \nabla U \right] \quad (3.16)$$

Οι χωρικοί ρυθμοί μεταφοράς  $\dot{x}$  και  $\dot{y}$  (εξισώσεις 3.13 και 3.14) αντιπροσωπεύουν τη διάδοση των κυμάτων στο χώρο και τη ρήχωση. Ο ρυθμός κατεύθυνσης μεταφοράς  $\dot{\theta}$  μοντελοποιεί την επαγόμενη από διάθλαση αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης κύματος. Η διάθλαση δημιουργείται από τις χωρικές διακυμάνσεις εκείνων των ιδιοτήτων του περιβάλλοντος στο οποίο τα κύματα διαδίδονται και μπορούν να προκύψουν είτε από μια βαθυμετρική μεταβολή (πρώτος όρος) είτε από την επίδραση των ρευμάτων (δεύτερος όρος). Η σχετική συχνότητα μεταφοράς συχνότητας  $\dot{f}r$  μορφοποιεί τις σχετικές μεταβολές συχνότητας που προκύπτουν από τις διακυμάνσεις της στάθμης της θάλασσας τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο ή / και από τις μεταβολές των ρευμάτων στο χώρο.

### Εξίσωση και όροι πηγής

Οι όροι πηγής που εμφανίζονται στο δεξί μέλος των εξισώσεων (3.5) και (3.12) στις εξισώσεις εξέλιξης της κυματικής δράσης λαμβάνουν υπ' όψιν τις φυσικές διεργασίες που έχουν ήδη αναλυθεί σε αυτή την παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου.

$$Q = Q_{in} + Q_{ds} + Q_{nl} + Q_{bf} + Q_{br} + Q_{tr} + Q_{ds,cur} + Q_{veg} \quad (3.17)$$

Στην παραπάνω ισότητα:

$Q_{in}$  : στιγμιαία μετάδοση της ενέργειας του ανέμου για τη δημιουργία ανεμογενών κυματισμών

$Q_{ds}$  : απόσβεση ενέργειας λόγω whitecapping

$Q_{nl}$  : μεταφορά ενέργειας λόγω μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των κυμάτων (σε τετράδες)

$Q_{bf}$  : όρος που αντιπροσωπεύει την απόσβεση ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα

$Q_{br}$  : απόσβεση ενέργειας λόγω του φαινομένου της θραύσης κυματισμών

$Q_{tr}$  : μεταφορά ενέργειας λόγω μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των κυμάτων (σε τριάδες)

$Q_{ds,curv}$  : περαιτέρω απόσβεση ενέργειας λόγω θραύσης που οφείλεται στην επίδραση ρευμάτων

$Q_{veg}$  : Απόσβεση ενέργειας σε περίπτωση ύπαρξης βλάστησης

### Παράμετροι εισόδου/εξόδου Tomawac

Στο Tomawac απαιτείται η δημιουργία αρχείων, κάποια από τα οποία είναι υποχρεωτικά για την εκτέλεση της προσομοίωσης (mandatory files) ενώ κάποια όχι (optional). Τα βασικότερα αρχεία εισόδου είναι:

- Το αρχείο οδήγησης (cas/steering file) (υποχρεωτικό) που περιλαμβάνει όλες τις παραμέτρους και μεθόδους υπολογισμού που ορίζονται με τη χρήση λέξεων κλειδιών που περιέχονται στον κώδικα του προγράμματος.
- Το γεωμετρικό αρχείο (geometry file) (υποχρεωτικό) που περιέχει τον κানাβο πεπερασμένων στοιχείων και τη βαθυμετρία.
- Το αρχείο των οριακών συνθηκών (boundary conditions file) (υποχρεωτικό) που περιλαμβάνει τα ελεύθερα όρια και τα κλειστά όρια στην περιοχή μελέτης.
- Το αρχείο FORTRAN (προαιρετικό) που περιλαμβάνει τις υπορουτίνες στη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN 77 (π.χ. μη σταθερές ως προς το χρόνο κυματικές συνθήκες στο ανοιχτό όριο)
- Το αρχείο ανέμων (προαιρετικό) που περιέχει τις συνθήκες ανέμου που επικρατούν στον κানাβο πεπερασμένων στοιχείων.

Το αρχείο εξόδου είναι σε δι-διάστατη μορφή και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις εξής παραμέτρους που δίνονται με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται στο αρχείο εισόδου, όλες υπολογισμένες σε κάθε σημείο του κανάβου:

- $M_0$  : είναι η διακύμανση της θαλάσσιας επιφάνειας (m)
- $H_{m_0}$  : είναι το φασματικό χαρακτηριστικό ύψος του κύματος ( $H_{m_0} = 4\sqrt{m_0}$ )
- $ZF$  : είναι η μέση ανύψωση του πυθμένα
- $WD$  : το βάθος του νερού
- $U_x, U_y$  : Οι συνιστώσες των ταχυτήτων των ρευμάτων στις διευθύνσεις x,y αντίστοιχα, εφόσον έχουν προσφερθεί στο TOMAWAC σαν παράμετροι εισόδου
- $V_x, V_y$  : Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στις διευθύνσεις x,y αντίστοιχα, εφόσον έχουν προσφερθεί στο TOMAWAC σαν παράμετροι εισόδου
- $F_x, F_y$  : Οι συνιστώσες των δυνάμεων ακτινοβολίας στις διευθύνσεις x,y αντίστοιχα

- $T_{m01}$  : Είναι η μέση περίοδος υπολογισμένη από το φάσμα της κυματικής δράσης.

Στην παρούσα διπλωματική η προετοιμασία των αρχείων εισόδου έγινε με τη χρήση του γραφικού περιβάλλοντος ελεύθερης πρόσβασης Blue Kenue που αναπτύχθηκε από το NRCC (National Research Center of Canada). Στο πρόγραμμα εισάγεται αρχείο με την επέκταση .xyz που περιέχει γεωγραφικά σημεία σε προκαθορισμένες συντεταγμένες (για τις αναλύσεις του λογισμικού Telemac χρησιμοποιήθηκε η προβολή UTM ), που έχουν προκαθορισμένο βάθος μετρημένο από την επιφάνεια της θάλασσας προς τα κάτω. Στη συνέχεια δίνεται η επιλογή κατασκευής κανάβου πεπερασμένων στοιχείων απευθείας στο Blue Kenue και η δημιουργία βαθυμετρίας από το αρχείο xyz με ολοκλήρωση, ή η εισαγωγή απευθείας κανάβου κατασκευασμένου σε άλλα λογισμικά (π.χ. Mike21, SMS). Έπειτα με τη χρήση μόνο του κανάβου γίνεται η κατασκευή του γεωμετρικού αρχείου (που περιλαμβάνει τον κανάβο πεπερασμένων στοιχείων αλλά σε όρους βαθυμετρίας) και του αρχείου οριακών συνθηκών.

Οι διαθέσιμες οριακές συνθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο TOMAWAC αλλά και στα μοντέλα TELEMAC-2D και SISYPHE χαρακτηρίζονται από ένα αριθμό που αναφέρεται στον τύπο του ορίου και τοποθετείται σε συγκεκριμένη στήλη στο αρχείο που περιέχει τις οριακές συνθήκες. Για περισσότερες οδηγίες σχετικά με τον τύπο αρχείου ο αναγνώστης παραπέμπεται στα εγχειρίδια οδηγιών των παραπάνω μοντέλων. Συνοπτικά προσφέρονται οι ακόλουθες διαθέσιμες οριακές συνθήκες που είναι δύο τύπων:

Ελεύθερα όρια που απορροφούν πλήρως την κυματική ενέργεια εκ των οποίων:

- Υγρά όρια (Liquid boundaries) στα οποία γίνεται η υπόθεση ότι πέρα αυτών γίνεται η κυματική διάδοση και τίποτα άλλο δεν εισέρχεται στο μοντέλο
- Στερεά όρια (solid Boundaries) στα οποία θεωρείται ότι η ακτή απορροφά πλήρως την κυματική ενέργεια

Οριακές συνθήκες με προκαθορισμένες τιμές (είτε ύψους κύματος, είτε ταχύτητας, είτε παροχής και συνδυασμούς τους). Σ αυτή την περίπτωση η κυματική δράση ορίζεται σε κάθε σημείο του ορίου μέσω του φάσματος κυματικής δράσης.

Στο TOMAWAC γίνεται η υπόθεση ότι σε κάθε ανοιχτό όριο η προκαθορισμένη τιμή ύψους κύματος είναι σταθερή στο χρόνο και στο χώρο. Σε περίπτωση που απαιτείται χρονική ή/και χωρική μεταβολή των κυματικών χαρακτηριστικών πρέπει να προγραμματιστεί η κατάλληλη υπορουτίνα (Limwac.f) η οποία επιτελεί αυτή τη λειτουργία.

### 3.1.2 Μοντέλο υδροδυναμικής συμπεριφοράς Telemac-2D

Το μοντέλο Telemac-2D είναι μέρος του συστήματος TELEMAC και αναπτύχθηκε από το EDF R&D's Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE).

Βασική του λειτουργία είναι η επίλυση εξισώσεων ελεύθερης επιφάνειας σε δύο διαστάσεις (depth-averaged surface flow equations), όπως διατυπώθηκαν πρώτα από τον St. Venant το 1871 και τα αποτελέσματά του σε κάθε σημείο του υπολογιστικού κανάβου είναι το βάθος και οι συνιστώσες των ταχυτήτων σε συνάρτηση με το χρόνο.

Το λογισμικό έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής. Συγκεκριμένα στο θαλάσσιο χώρο, χρησιμοποιείται συχνά σε εφαρμογές για την εκτίμηση του μεγέθους λιμένων, για να διαπιστωθεί η επίδραση βυθοκορήσεων καθώς και σε εφαρμογές περιβαλλοντικής ρευστομηχανικής (θερμές φλέβες νερού, πετρελαιοκηλίδες κ.α.). Έχει χρησιμοποιηθεί όμως και σε μελέτες σχετικές με ποτάμιας εφαρμογές, για να διαπιστωθεί πόσο επιδρούν στη ροή του ποταμού ανθρωπογενείς κατασκευές (γέφυρες, σωλήνες κ.α.), σε αστοχίες φραγμάτων (Malpasset), καθώς και σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ. πτώση χιονοστιβάδων σε ταμιευτήρα)

Το Telemac-2D μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και να λάβει υπ' όψη του τα παρακάτω φαινόμενα

- Μετάδοση κυμάτων με μεγάλο μήκος σε συνδυασμό με μη γραμμικά φαινόμενα
- Τριβή πυθμένα
- Την επίδραση της δύναμης Coriolis
- Την επίδραση μετεωρολογικών φαινομένων όπως ατμοσφαιρική πίεση, εξατμισοδιαπνοή, βροχή και πνοή ανέμου
- Τύρβη
- Υποκρίσιμες και υπερκρίσιμες ροές
- Επίδραση της θερμοκρασίας και της αλατότητας
- Χρήση κανάβων σε σφαιρικές ή καρτεσιανές συντεταγμένες
- Επιλογή για περιοχές που παραμένουν στεγνές κατά τη διαδικασία υπολογισμού (tidal flats, flood-plains)
- Συρρίκνωση και διάχυση ιχνηθετών, υπό την επίδραση ρευμάτων
- Παρακολούθηση σωματιδίων και τροχιών της μορφής Lagrange
- Επίδραση ρωγμών σε αναχώματα
- Δυνάμεις αντιστάσεις από την ύπαρξη κατακόρυφων κατασκευών
- Φαινόμενα σχετικά με το πορώδες
- Ρεύματα παραγόμενα από κύματα (σε παράλληλη λειτουργία με TOMAWAC)
- Εύρεση στερεομεταφοράς (σε παράλληλη λειτουργία με το SISYPHE)
- Συνδυασμός με λογισμικά ποιότητας νερού (DELWAQ)

#### Θεωρητικές εξισώσεις Telemac-2D

Ο κώδικας του Telemac-2D επιλύει τις ακόλουθες τέσσερις (4) εξισώσεις υδροδυναμικής ταυτόχρονα:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla(h) + h \operatorname{div}(\mathbf{u}) = S_h \text{ (εξίσωση συνέχειας)} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla(u) = -g \frac{\partial z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \operatorname{div}(h \nu_t \nabla u) \text{ (διατήρηση ορμής κατά } x \text{)} \quad (3.19)$$



$$\frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h \mathbf{v}_t \nabla v) \quad (\text{διατήρηση ορμής κατά } y) \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \nabla(T) = S_T + \frac{1}{h} \text{div}(h \mathbf{v}_t \nabla T) \quad (\text{διατήρηση ιχνηθετών}) \quad (3.21)$$

όπου:

$h$  : Το βάθος του νερού (m)

$u, v$  : Συνιστώσες της ταχύτητας (m/s)

$T$  : παθητικός ιχνηθέτης ( °C ή g/l)

$g$  : επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s<sup>2</sup>)

$v_t, v_T$  : σταθερές διατήρησης της ορμής και διασποράς ιχνηθέτη αντίστοιχα (m<sup>2</sup>/s)

$Z$  : Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (m)

$x, y$  : Συντεταγμένες στις δύο διαστάσεις (m)

$S_h$  : Όρος πηγής ή απώλειας του υγρού (m/s)

$S_T$  : Όρος πηγής ή απώλειας του ιχνηθέτη (g/l/s)

$h, u, v, T$  : είναι οι άγνωστοι των εξισώσεων

$S_x, S_y$  : Όροι πηγής που αντιπροσωπεύουν την επίδραση του ανέμου, της δύναμης Coriolis και της τριβής του πυθμένα (m<sup>2</sup>/s)

Όταν τα μη υδροστατικά φαινόμενα δεν είναι αμελητέα οπότε δεν μπορούν να αγνοηθούν, στις εξισώσεις του St.Venant (3.18 – 3.21) πρέπει να προστεθούν επιπλέον όροι. Στη βιβλιογραφία συναντώνται πολλές μέθοδοι υπολογισμού για αυτά τα φαινόμενα (Serre, Boussinesq, Korteweg και DeVries). Για παράδειγμα αν προτιμηθούν οι εξισώσεις Boussinesq πρέπει να προστεθούν οι ακόλουθοι όροι στο δεύτερο μέλος των εξισώσεων St. Venant:

$$-\frac{H_0^2}{8} \overrightarrow{grad} \left[ \text{div} \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} \right) \right] + \frac{H_0}{2} \overrightarrow{grad} \left[ \text{div} (H_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}) \right]$$

### Παράμετροι εισόδου/εξόδου Telemac-2D

Στο Telemac-2D απαιτείται η δημιουργία αρχείων, κάποια από τα οποία είναι υποχρεωτικά για την εκτέλεση της προσομοίωσης (mandatory files) ενώ κάποια όχι (optional). Σε περίπτωση ειδικά που γίνεται σύζευξη μεταξύ Telemac-2D και Tomawac απαιτείται το γεωμετρικό αρχείο να είναι το ίδιο και στα δύο μοντέλα, δηλαδή πρακτικά να έχουν τον ίδιο κানাβο πεπερασμένων στοιχείων. Τα άλλα αρχεία εισόδου είναι ίδια όπως και στην περίπτωση του Tomawac και έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Η μόνη διαφοροποίηση είναι ότι το αρχείο ανέμου

μπορεί να δημιουργηθεί μέσω του Telemac προγραμματίζοντας την κατάλληλη υπορουτίνα (meteo.f), και να χρησιμοποιηθεί αυτό το αρχείο σαν παράμετρος εισόδου του Tomawac. Το αρχείο εξόδου είναι σε δι-διάστατη μορφή και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις εξής παραμέτρους που δίνονται με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται στο αρχείο εισόδου, όλες υπολογισμένες σε κάθε σημείο του κανάβου:

- U : είναι η ταχύτητα ως προς το μέσο βάθος στον άξονα x
- V : είναι η ταχύτητα ως προς το μέσο βάθος στον άξονα y
- C : είναι ταχύτητα του κύματος
- H : το βάθος του νερού
- L : Ο αριθμός Courant
- X,Y : Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στις διευθύνσεις x,y αντίστοιχα

Εφόσον στην παρούσα διπλωματική το μοντέλο Telemac-2D βρίσκεται σε απευθείας σύζευξη με το μοντέλο Tomawac χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια αρχεία αναφορικά με τον κανάβο πεπερασμένων στοιχείων και τις οριακές συνθήκες.

### 3.1.3 Μοντέλο στερεομεταφοράς SISYPHE

Το μοντέλο SISYPHE είναι μέρος του συστήματος TELEMAC και αναπτύχθηκε από το EDF R&D's Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE). Προσομοιάζει τη στερεομεταφορά και την εξέλιξη του πυθμένα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση φαινομένων κυκλοφορίας σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, όπως λίμνες, ποτάμια, ακτές, για διαφορετικά είδη ιζημάτων και συνθηκών στερεομεταφοράς.

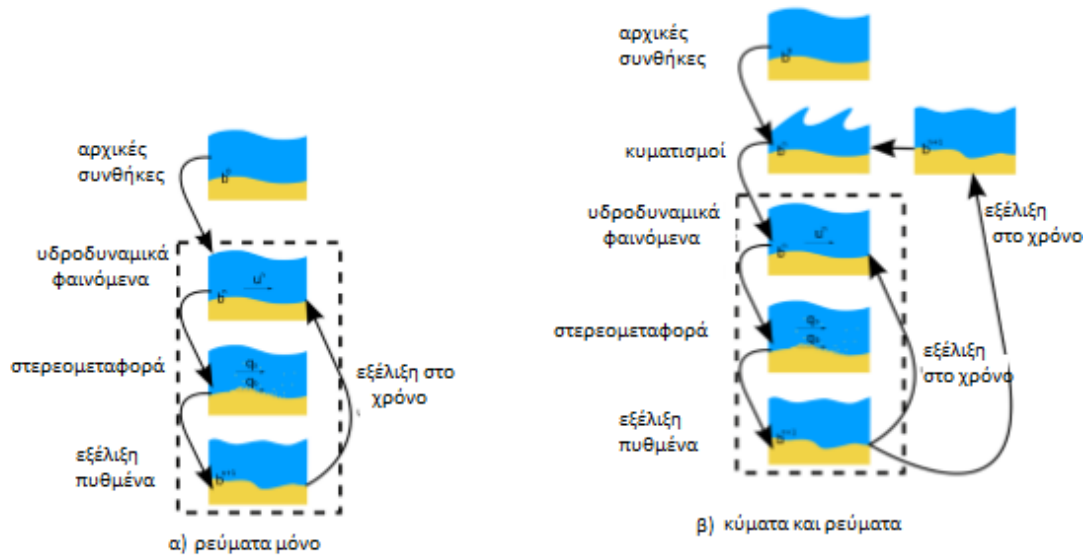
Στο SISYPHE, οι φυσικές διεργασίες στερεομεταφοράς χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, φορτίο πυθμένα (bed load), φορτίο αιωρήσεως (suspended load) και συνολικό φορτίο (total load). Υποστηρίζεται επίσης μια πληθώρα είδους ιζημάτων, μη-συνεκτικά ομοιόμορφα στον πυθμένα (single sized) ή μη ομοιόμορφα (graded), συνεκτικά ιζήματα (ιλυώδη, αργιλώδη), ακόμη και αναμίξεις συνεκτικών και μη-συνεκτικών ιζημάτων.

Μεταξύ άλλων στο μοντέλο εμπεριέχονται οι ακόλουθες φυσικές διεργασίες

- Η επίδραση δευτερογενών ρευμάτων (secondary currents)
- Η επίδραση του πυθμένα
- Η επίδραση της βαρύτητας
- Μέθοδοι πρόβλεψης της τραχύτητας του πυθμένα
- Περιοχές που δεν επιτρέπεται η διάβρωση του πυθμένα (non-erodible bed)
- Εσωτερική σύζευξη με το Telemac-2D (Εικόνα 3.1-α) ή/και το TOMAWAC (Εικόνα 3.1-β) για να ληφθεί υπ' όψη η επίδραση στη στερεομεταφορά των ρευμάτων ή/και των κυμάτων.

Τα μοντέλα μορφολογικών αλλαγών, μπορούν να είναι ολοκληρωτικά συζευγμένα (fully coupled) ή μη συζευγμένα (decoupled). Η πρώτη προσέγγιση χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που οι μορφολογικές αλλαγές είναι ταχείς στο χρόνο και πρακτικά οι

εξισώσεις στερεομεταφοράς και υδροδυναμικής επιλύονται ταυτόχρονα. Η δεύτερη επιλογή προτιμάται όταν η χρονική κλίμακα μορφοδυναμικών αλλαγών είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή στην οποία πραγματοποιούνται οι αλλαγές στο υδροδυναμικό μοντέλο.



Εικόνα 3.1: Σύζευξη μοντέλων στερεομεταφοράς με α)ρεύματα β)ρεύματα και κύματα

### Εξισώσεις υπολογισμού μοντέλου SISYPHE

Το μοντέλο SISYPHE επιλύει στο χρόνο την εξίσωση διατήρησης της μάζας του ιζήματος (conservative law) ή την εξίσωση Exner :

$$(1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \nabla \mathbf{Q}_b = 0 \quad (3.22)$$

όπου  $\lambda$  είναι το πορώδες του πυθμένα,  $z_b$  η ανύψωση του πυθμένα (m) και  $\mathbf{Q}_b$  είναι το διάνυσμα στερεοπαροχής ανά μέτρο πλάτους ( $m^2/s$ ), με συνιστώσες  $Q_{bx}$  και  $Q_{by}$  στη διεύθυνση  $x$  και  $y$  αντίστοιχα.

Ο αδιαστατοποιημένος ρυθμός μεταφοράς ιζήματος λόγω ρευμάτων ( $\Phi_b$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_b = \frac{Q_b}{\sqrt{g(s-1)d_3}} \quad (3.23)$$

όπου  $Q_b$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς ιζήματος με τη μορφή φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ),  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $s = \rho_s / \rho$  όπου  $\rho_s$  είναι η πυκνότητα στερεών κόκκων του ιζήματος ( $kg/m^3$ ),  $\rho$  η πυκνότητα του νερού ( $kg/m^3$ ),  $d$  η διάμετρος των κόκκων ( $=d_{50}$  για ομοιόμορφο ίζημα στον πυθμένα (m)),  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $m^2/s$ )

### Διαθέσιμες εξισώσεις υπολογισμού στερεομεταφοράς σαν φορτίο πυθμένα

Συνήθως, οι σχέσεις υπολογισμού της στερεομεταφοράς με τη μορφή φορτίου πυθμένα είναι συναρτήσεις του αριθμού Shields  $\theta$ :

$$\theta = \frac{\mu\tau_b}{(\rho_s - \rho)gd} \quad (3.24)$$

Στο μοντέλο SISYPHE υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες επιλογές για την επιλογή της σχέσης υπολογισμού της στερεομεταφοράς με τη μορφή φορτίου πυθμένα και οι οποίες είναι:

1. MEYER-PETER and MUELLER
2. EINSTEIN-BROWN
3. ENGELUND-HANSEN + CHOLLET ET CUNGE (για τη συνολική μεταφορά ιζήματος)
4. ENGELUND-HANSEN (για τη συνολική μεταφορά ιζήματος)
5. VAN RIJN
6. BIJKER
7. SOULSBY-VAN RIJN
8. BAILARD
9. DIBAJNIA-WATANABE

Οι μέθοδοι υπολογισμού από (1-5) δε λαμβάνουν υπ' όψιν τους την επίδραση των κυμάτων στο φαινόμενο της στερεομεταφοράς σε αντίθεση με τις εναπομείνουσες (6-9). Στην παρούσα διπλωματική, επειδή οι κυματισμοί θεωρούνται πολύ σημαντικό φαινόμενο που συμβάλλει στη στερεομεταφορά, θα αναλυθούν οι σχέσεις (6-9).

#### Μέθοδος υπολογισμού Bijker

Ο ρυθμός μεταφοράς υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$Q_b = bd_{50} \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} e^{-\left[\frac{0.27(\rho_s - \rho)gd_{50}}{\mu\tau_{cw}}\right]} \quad (3.25)$$

όπου:  $\tau_c$  είναι η διατμητική τάση στον πυθμένα λόγω της δράσης των ρευμάτων,  $\tau_{cw}$  η διατμητική τάση λόγω της αλληλεπίδρασης ρευμάτων και κυματισμών και  $\mu$  διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπ' όψιν την επίδραση του φαινομένου των πτυχώσεων (ripples).

#### Μέθοδος υπολογισμού Soulsby-Van Rijn

Σ' αυτή τη μέθοδο ο ρυθμός μεταφοράς υπολογίζεται από τη σχέση

$$Q_{b,s} = A_{b,s} U_c \left[ \sqrt{\left( U_c^2 + \frac{0.018}{C_D} U_w^2 \right)} - U_{cr} \right]^2 \quad (3.26)$$

Η παραπάνω μέθοδος έχει εφαρμογή σε τραχείς πυθμένες (με τραχύτητα  $k_s$  της τάξεως των 6 mm ) και υπολογίζει και τις δύο συνιστώσες της στερεομεταφοράς και λόγω φορτίου πυθμένα και λόγω κίνησης ιζήματος σε αιώρηση.

Οι συντελεστές  $A_b$  (bed load coefficient) και  $A_s$  (suspended load coefficient) δίνονται από τις σχέσεις

$$A_b = \frac{0.005h(d_{50}/h)^{1.2}}{[(s-1)gd_{50}]^{1.2}} \quad \text{και} \quad A_s = \frac{0.012d_{50}D^{*-0.6}}{[(s-1)gd_{50}]^{1.2}} \quad (3.27)$$

ενώ στη σχέση 3.26 εμφανίζονται ακόμη οι παράμετροι:  $U_c$  η ταχύτητα του ρεύματος ως προς το μέσο βάθος,  $U_w$  η ταχύτητα τροχιών των κυματισμών,  $C_D$  ο συντελεστής αντίστασης λόγω ρεύματος και  $U_c$  η κρίσιμη ταχύτητα την θέση του ιζήματος σε κίνηση που με τη σειρά της δίνεται από τη σχέση:

$$U_{cr} = \begin{cases} 0.19d_{50}^{0.1} \log_{10}\left(\frac{4h}{d_{90}}\right), & 0.1 \text{ mm} \leq d_{50} < 0.5 \text{ mm} \\ 8.50d_{50}^{0.6} \log_{10}\left(\frac{4h}{d_{90}}\right), & 0.5 \text{ mm} \leq d_{50} < 2.0 \text{ mm} \end{cases} \quad (3.28)$$

#### Μέθοδος υπολογισμού Bailard

Όπως ήδη έχει αναφερθεί αυτή η μέθοδος υπολογίζει τη συνολική στερεομεταφορά (total sediment transport). Λαμβάνει υπ' όψη κυματικά φαινόμενα, θεωρώντας μέσες τιμές μεταξύ πολλών περιόδων και έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\vec{Q}_s = \frac{C_f}{g(s-1)(1-n)} \left( \frac{e_c}{tgf} < |\vec{u}|^2 |\vec{u}| > + \frac{e_s}{w_s} < |\vec{u}|^3 |\vec{u}| > \right) \quad (3.29)$$

Στην παραπάνω εξίσωση (3.29),  $\vec{u}$  είναι η συνδυασμένη ταχύτητα στον πυθμένα λόγω της δράσης ρευμάτων και κυμάτων,  $W_s$  η ταχύτητα καθιζήσεως,  $e_b$  (=0.2) και  $e_s$ (=0.025) συντελεστής απόδοσης του φορτίου πυθμένα και σε αιώρηση αντίστοιχα. Ο πρώτος όρος του δεξιού μέλους της (3.29) αντιπροσωπεύει την μεταφορά σε φορτίο πυθμένα ενώ ο δεύτερος όρος την μεταφορά ιζήματος σε αιώρηση.

#### Μέθοδος υπολογισμού Dibajnia-Watanabe

Πρόκειται για μια από τις πιο σύγχρονες σχέσεις υπολογισμού της στερεομεταφοράς. Ακολουθεί την ενδιαφέρουσα προσέγγιση του διαχωρισμού της μεταφοράς ιζήματος σε δύο κύκλους υπολογισμού, στον πρώτο το ίζημα κινείται κατά την κύρια διεύθυνση διάδοσης του κύματος, ενώ στο δεύτερο έχουν αντίθετες κατευθύνσεις. Συνέπεια του παραπάνω είναι η δυνατότητα να μπορούν να ληφθούν υπ' όψη στους υπολογισμούς φαινόμενα ασυμμετρίας των κυμάτων και να ελεγχθεί πώς αυτά επιδρούν στη στερεομεταφορά. Ο υπολογισμός του συνολικού ογκομετρικού φορτίου σε κίνηση στον πυθμένα υπολογίζεται ως εξής:

$$\vec{Q}_s = 0.001 \frac{W_s d}{1-n} \frac{\bar{F}}{\Gamma} \Gamma^{0.55} \quad (3.30)$$

όπου  $W_s$  είναι η ταχύτητα καθίζησης,  $d$  το πάχος του πυθμένα,  $n$  το πορώδες του ιζήματος ενώ ο συντελεστής  $\Gamma$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{\Gamma} = \frac{T_c(\Omega_c^3 + \Omega_t^3)\vec{u}_c + T_t(\Omega_c^3 + \Omega_t^3)\vec{u}_t}{(|\vec{u}_c| + |\vec{u}_t|)T} \quad (3.31)$$

όπου,  $T_c$  και  $T_t$  είναι οι ημιπεριόδοι στις οποίες λαμβάνεται υπ' όψη η επίδραση των ρευμάτων,  $\Omega_c$  και  $\Omega_t$  ο όγκος του κινούμενου ιζήματος στη διάρκεια των ημιπεριόδων  $T_c$  και  $T_t$  αντίστοιχα,  $\Omega_c'$  και  $\Omega_t'$   $\Omega_c$  και  $\Omega_t$  ο όγκος του κινούμενου ιζήματος μετά το πέρασμα των ημιπεριόδων  $T_c$  και  $T_t$  αντίστοιχα και  $u_c$  και  $u_t$  η συνισταμένη της ορθογωνικής της ταχύτητας κύματος και ρεύματος στη διάρκεια των ημιπεριόδων  $T_c$  και  $T_t$  αντίστοιχα.

### Φορτίο σε αιώρηση

Το αιωρούμενο φορτίο είναι το τμήμα του ιζήματος που μεταφέρεται λόγω ροής και που καθιζάνει αρκετά αργά έτσι ώστε να μην αγγίζει σχεδόν ποτέ τον πυθμένα. Ο στροβιλισμός της ροής διατηρεί το ίζημα σε αιώρηση ενώ τα ιζήματα αυτής της κατηγορίας είναι αμμώδη, αργιλώδη ή ιλυώδη. Στο SISYPHE επιλύεται η διδιάστατη εξίσωση οριζόντιας μεταφοράς και διάχυσης η οποία εκφράζεται ως:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hUC}{\partial x} + \frac{\partial hVC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( h\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( h\epsilon_s \frac{\partial C}{\partial y} \right) + E - D \quad (3.32)$$

στην παραπάνω,  $C=C(x,y,t)$  είναι η συγκέντρωση του ιζήματος εκφρασμένη σε ποσοστό % του συνολικού όγκου,  $(U,V)$  είναι οι ταχύτητες της ροής στη διεύθυνση  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,  $\epsilon_s$  ο βαθμός διάχυσης του ιζήματος, που συχνά συνδέεται με την τυρβώδη διάχυση  $\epsilon_s = v_t / \sigma_c$  ( $\sigma_c = 1$ , ο αριθμός Schmidt). Ο ρυθμός διάβρωσης μη-συνεκτικών ιζημάτων  $E = w_s C_{eq}$  (όπου  $C_{eq}$  η συγκέντρωση ισοζυγίου κοντά στον πυθμένα) ενώ  $E - D$  είναι η καθαρή ροή ιζημάτων.

Στο μοντέλο SISYPHE υπάρχουν τέσσερις διαθέσιμες επιλογές για την επιλογή της σχέσης υπολογισμού της στερεομεταφοράς με τη μορφή φορτίου αιωρήσεως και οι οποίες είναι:

1. ZYSERMAN AND FRESDOE
2. BIJKER
3. VAN RIJN
4. SOULSBY & VAN RIJN

### Μέθοδος Zyserman and Fresdoe

Η συγκέντρωση του ισοζυγίου δίνεται από τη σχέση:

$$C_{eq} = \frac{0.031 (\theta' - \theta_{cr})^{1.75}}{1 + 0.72(\theta' - \theta_{cr})^{1.75}} \quad (3.33)$$

όπου  $\theta_{cr}$  είναι η κρίσιμη παράμετρος του Shields, ενώ  $\theta' = \mu\theta$  είναι η διατμητική τάση λόγω επιφανειακής τριβής.

### Μέθοδος Van Rijn

Η συγκέντρωση του ισοζυγίου δίνεται από τη σχέση:

$$C_{eq} = \frac{0.015d_{50} \left(\frac{\theta' - \theta_{cr}}{\theta_{cr}}\right)^{1.75}}{0.5k_s D^{0.3}} \quad (3.34)$$

Αυτή η μέθοδος δίνει αποτελέσματα στο SISYPHE μόνο όταν σαν μέθοδος υπολογισμού του φορτίου πυθμένα έχει επιλεγεί η μέθοδος Soulsby-Van Rijn.

### Μέθοδος Bijker

Η συγκέντρωση του ισοζυγίου δίνεται από τη σχέση:

$$C_{eq} = \frac{Q_b}{bz_{ref}u_*} \quad (3.35)$$

Στην παραπάνω σχέση  $z_{ref} = k_{s,r}$  (όπου  $k_{s,r}$  είναι η τραχύτητα του πυθμένα με τη θεώρηση πτυχώδους πυθμένα) και  $b=6.34$  σταθερός όρος.

### Παράμετροι εισόδου/εξόδου SISYPHE

Στο Sisyphus τα αρχεία εισόδου, όπως και στα άλλα δύο μοντέλα, χωρίζονται σε προαιρετικής φύσεως και σε υποχρεωτικά καθώς χωρίς αυτά δε γίνεται να εκτελεστεί η προσομοίωση. Σε περίπτωση ειδικά που γίνεται σύζευξη μεταξύ Telemac-2D και Sisyphus απαιτείται το γεωμετρικό αρχείο να είναι το ίδιο και στα δύο μοντέλα, δηλαδή πρακτικά να έχουν τον ίδιο κানাβο πεπερασμένων στοιχείων. Τα άλλα αρχεία εισόδου είναι ίδια όπως και στην περίπτωση του Tomawac και έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Το αρχείο εξόδου είναι σε δι-διάστατη μορφή και περιλαμβάνει μεταξύ άλλων τις εξής παραμέτρους που δίνονται με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται στο αρχείο εισόδου, όλες υπολογισμένες σε κάθε σημείο του κανάβου:

- U : είναι η ταχύτητα ως προς το μέσο βάθος στον άξονα x
- V : είναι η ταχύτητα ως προς το μέσο βάθος στον άξονα y
- C : είναι ταχύτητα του κύματος
- H : το βάθος του νερού
- M : η ανηγμένη παροχή του φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ )
- E : Η εξέλιξη της μορφολογία του πυθμένα με την πάροδο του χρόνου
- KS : Η συνολική τραχύτητα στον πυθμένα
- QSSUSP : Ο ρυθμός μεταφοράς σε όρους φορτίου σε αιώρηση
- QSBL : Ο ρυθμός μεταφοράς σε όρους φορτίου πυθμένα.
- W : Το ύψος του κύματος

Εφόσον στην παρούσα διπλωματική το μοντέλο Telemac-2D βρίσκεται σε απευθείας σύζευξη με το μοντέλο Tomawac χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια αρχεία αναφορικά με τον κানাβο πεπερασμένων στοιχείων και τις οριακές συνθήκες.

## 3.2 SMS

Το πακέτο λογισμικών SMS (Surface-water Modeling System) αναπτύχθηκε από την εταιρεία Aquaveo και διαθέτει πλήθος μοντέλων για επίλυση προβλημάτων ροής με ελεύθερη επιφάνεια κυρίως στον τομέα της παράκτιας μηχανικής και σε ποτάμιες εφαρμογές. Από τα μοντέλα που διατίθενται, στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε το φασματικό κυματικό μοντέλο CMS-Wave και το μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς CMS-Flow

### 3.2.1 Φασματικό κυματικό μοντέλο CMS-Wave (ST-Wave)

Το CMS-Wave είναι μοντέλο μετασχηματισμού φασματικών κυμάτων και επιλύει την εξίσωση φασματικής πυκνότητας κυματικής δράσης, χρησιμοποιώντας μια μέθοδο μετωπικής πορείας πεπερασμένων διαφορών (Lin et al., 2008). Ουσιαστικά το CMS-Wave βασίζει τη λειτουργία του στο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών ST-Wave, το οποίο και τελικώς θα αναλυθεί σε αυτή την παράγραφο της εργασίας, μόνο που το CMS-Wave επιτρέπει την κατασκευή κανάβου που θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα για την ανταλλαγή αποτελεσμάτων με το CMS-Flow.

Το πρόγραμμα ST-WAVE (STeady-state spectral WAVE), είναι ένα φασματικό μοντέλο μέσης τιμής φάσεως που, όπως ήδη αναφέρθηκε, για την επίλυσή του βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Αναπτύχθηκε από το U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC) σε συνεργασία με το Coastal and Hydraulics Laboratory (CHL) προκειμένου να προσομοιώσει τη διάδοση και μετασχηματισμό των κυματισμών στην παράκτια ζώνη και περιλαμβάνει φαινόμενα όπως διάθλαση, ρήγωση, γένεση κυματισμών από ανέμους και αλληλεπίδραση μεταξύ των κυματισμών. Πραγματοποιεί τους υπολογισμούς του σε ορθογωνικό κανάβο πεπερασμένων στοιχείων τα οποία είναι τετραπλευρικά, ενώ για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικά στοιχεία.

Παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας του ST-WAVE σε δύο επιλογές, μισού επιπέδου (half plane) και ολόκληρου επιπέδου (full plane). Η μεν πρώτη επιτρέπει τη διάδοση της κυματικής ενέργειας από την περιοχή των βαθέων υδάτων προς την παράκτια ζώνη. Αυτό σημαίνει ότι οποιοδήποτε κύματα (ακόμα και αυτά που προέρχονται από ανάκλαση) κινούνται προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτή των κυμάτων που προέρχονται από τον ανοιχτό όριο αγνοούνται. Στην επιλογή ολόκληρου επιπέδου επιτρέπεται η διάδοση των κυματισμών σε όλες τις διευθύνσεις. Η επιλογή αυτή ενδείκνυται σε αναλύσεις εύρεσης κυματισμών σε λίμνες και κλειστούς κόλπους, για την περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού κρίνεται σημαντική μια τέτοια θεώρηση λόγω της υψηλής ανακλαστικής δυνατότητας που παρατηρείται σε ορισμένα σημεία της ακτογραμμής.

Το μοντέλο του ST-Wave βασίζεται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Πρόκειται για μοντέλο μέσης φάσης (phase averaged). Οι σχετικές φάσεις των φασματικών στοιχείων είναι τυχαία κατανομημένες, ενώ οι πληροφορίες σχετικά με την φάση δεν αποθηκεύονται ανά βήμα εκτέλεσης



- Η κλίση πυθμένα είναι ήπια ενώ αγνοείται οποιαδήποτε μορφή ανακλώμενων κυμάτων
- Η πιο σημαντική ίσως παραδοχή του μοντέλου είναι αυτή της σταθερής κατάστασης κυμάτων, ανέμων και ρευμάτων. Αυτό σημαίνει ότι τα κύματα έχουν αναπτυχθεί πλήρως ή περιορίζονται από το ανάπτυγμα πελάγους (fetch limited conditions) και δεν περιορίζονται από τη διάρκεια πνοής του ανέμου (duration limited conditions)
- Γραμμική θεώρηση διάθλασης και ρήχωσης
- Τα ρεύματα που υπολογίζονται από το μοντέλο ακολουθούν την παραδοχή της ομοιομορφίας του βάθους του πυθμένα
- Οι τάσεις ακτινοβολίας υπολογίζονται με τη γραμμική θεωρία

### Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

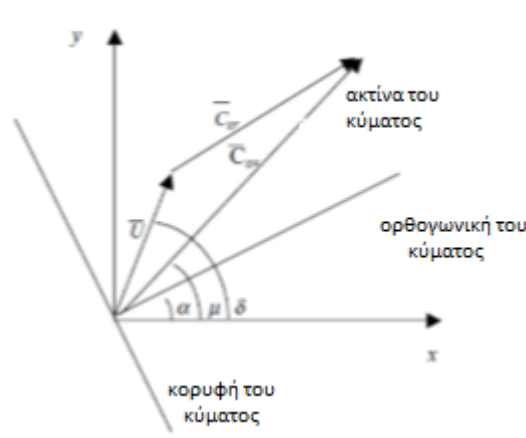
#### Εξίσωση διασποράς κυματισμών

Η εξίσωση που περιγράφει την διασπορά των κυματισμών υπό την παρουσία ρευμάτων είναι:

$$\omega_c = gk \tanh(kd) + k U_c \cos(\delta - \alpha) \quad (3.36)$$

όπου: (σε παράλληλη αναφορά με την εικόνα 3.2)

$U_c$  η οριζόντια συνιστώσα ταχύτητας του ρεύματος,  $\delta$  η διεύθυνση του ρεύματος σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα  $x$ ,  $\alpha$  η διεύθυνση ορθογωνίου του κύματος (σε σχέση με την κορυφή του )



Εικόνα 3.2: Διευθύνσεις ακτίνας κυματισμού και ταχύτητας ρεύματος, σε σχέση με την κορυφή του κύματος

#### Βασική εξίσωση διάδοσης κυματισμών ST-WAVE

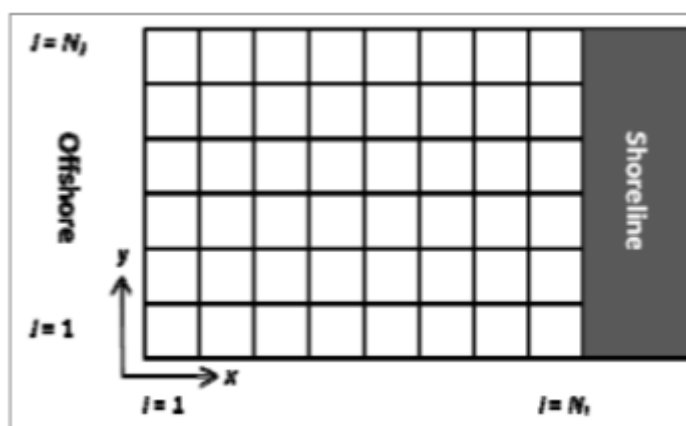
Η κατευθυντήρια εξίσωση, με την οποία υπολογίζεται η διάδοση του κυματισμού υπό σταθερές συνθήκες (Steady State), λαμβάνοντας υπ' όψη την αλληλεπίδραση ρευμάτων και κυμάτων είναι:

$$C_{ga} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a C_{ga} \cos(\mu - \alpha) E(\omega, \alpha)}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r} \quad (3.37)$$

Στην ανωτέρω εξίσωση,  $C_{ga}$  είναι η διεύθυνση της ορθογωνικής του κύματος,  $C_a$  η συνισταμένη της ταχύτητας διάδοσης του κύματος,  $\mu$  η διεύθυνση της ακτίνας του κύματος,  $\alpha$  η διεύθυνση ορθογωνίου του κύματος (σε σχέση με την κορυφή του),  $\omega_r$  είναι η σχετική γωνιακή συχνότητα κύματος,  $S$  οι όροι πηγής και απώλειας (θραύση κύματος, άνεμος, αλληλεπίδραση κυματισμών και white capping, τριβή πυθμένα) και τέλος  $E$  η πυκνότητα της ενέργειας του κύματος διαιρούμενη τόσο με την πυκνότητα του νερού ( $\rho_w$ ) όσο και με την επιτάχυνση της βαρύτητας ( $g$ )

### Παράμετροι εισόδου/εξόδου ST-Wave

Αφού το μοντέλο βασίζεται στη μέθοδο επίλυσης με πεπερασμένες διαφορές, ο κানাβος των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να είναι ορθογωνικός με τετραγωνικά στοιχεία. Ο κানাβος προετοιμάζεται στο γραφικό περιβάλλον του SMS και στο συγκεκριμένα στο μοντέλο CMS-Wave. Σαν αρχείο εισόδου για την κατασκευή του κανάβου και της βαθυμετρίας χρησιμοποιείται αρχείο κειμένου που έχει σε κάθε γραμμή συντεταγμένες στο εκάστοτε σύστημα συντεταγμένων (x,y) και το βάθος μετρημένο από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας στον πυθμένα (θετικό προς τα κάτω). Ο κানাβος πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να έχει συγκεκριμένο προσανατολισμό και συγκεκριμένα το ανοιχτό όριο να βρίσκεται απέναντι από την ακτογραμμή. (Εικόνα 3.3)



Εικόνα 3.3: Προσανατολισμός του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων

Στη συνέχεια, αφού γίνει με προκαθορισμένες μεθόδους ολοκλήρωσης η ανάθεση της βαθυμετρίας στον κানাβο, σε ένα σημείο που προτιμάται να είναι όσο πιο κοντά στο ανοιχτό όριο, ορίζεται το κυματικό φάσμα ως προς το χρόνο (με τη μέθοδο Jonswap) καθορίζοντας το χαρακτηριστικό κύμα και την περίοδο κάθε κύματος. Τέλος μέσω της καρτέλας Model Control καθορίζονται οι παράμετροι με τις οποίες θα γίνει η

προσομοίωση (π.χ. μορφή ανέμου, θεώρηση ανάκλασης, επιλογή διαθέσιμου φάσματος).

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε κάθε κελί του τετραγωνικού κανάβου. Τέσσερα είναι τα αρχεία αποτελεσμάτων που προκύπτουν και αυτά είναι:

- Το αρχείο χαρακτηριστικού ύψους κύματος ως προς το χρόνο
- Το αρχείο με τις χαρακτηριστικές περιόδους του κύματος
- Το αρχείο με τα διανύσματα της κατεύθυνσης διάδοσης του κύματος
- Το αρχείο με την απόσβεση του κύματος με την πάροδο του χρόνου

Και τα τέσσερα παραπάνω αρχεία εισάγονται σαν παράμετρος εισόδου στο μοντέλο CMS-Flow και μ' αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η σύζευξη των δύο μοντέλων.

### 3.2.2 Μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς CMS-Flow

Το CMS-Flow (Coastal Modeling System-Flow) αποτελεί ένα μοντέλο παράκτιας κυκλοφορίας που υπολογίζει τις ταχύτητες ρευμάτων και τη μεταβολή της στάθμης του νερού λαμβάνοντας υπ' όψιν πολλές φυσικές διεργασίες. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Φαινόμενα οριζόντιας μεταφοράς (advection)
- Τυρβώδη ανάμιξη (turbulent mixing)
- Τριβή στον πυθμένα λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας ρευμάτων και κυματισμών
- Ύπαρξη ατμοσφαιρικής πίεσης
- Επίδραση της παλίρροιας
- Επίδραση της δύναμης Coriolis
- Επίδραση παράκτιων κατασκευών

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα υπολογισμού της στερεομεταφοράς και της εξέλιξης της αλατότητας στο μοντέλο.

Οι μέθοδοι επίλυσης που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό είναι δύο ειδών, ο απεριόριστος (implicit solver) και ο διακεκριμένος (explicit solver). Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο επίλυσης SIMPLEC (Van Doormal and Raithby 1984) για τον υπολογισμό των ταχυτήτων και της στάθμης του νερού. Η δεύτερη μέθοδος υπολογίζει στα κέντρα των κελιών του υπολογιστικού κανάβου την μεταβολή του βάθους και του ύψους του νερού ενώ στις παρυφές των στοιχείων υπολογίζει τις συνιστώσες των ταχυτήτων  $u$  και  $v$ .

Το μοντέλο βρίσκει συχνά εφαρμογή σε θέματα υπολογισμού στερεομεταφοράς σε διαύλους επικοινωνίας λιμένων, σε φυσικές εισόδους καναλιών καθώς και σε αλληλεπιδράσεις κυμάτων ρευμάτων σε παράκτιες περιοχές.

#### Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

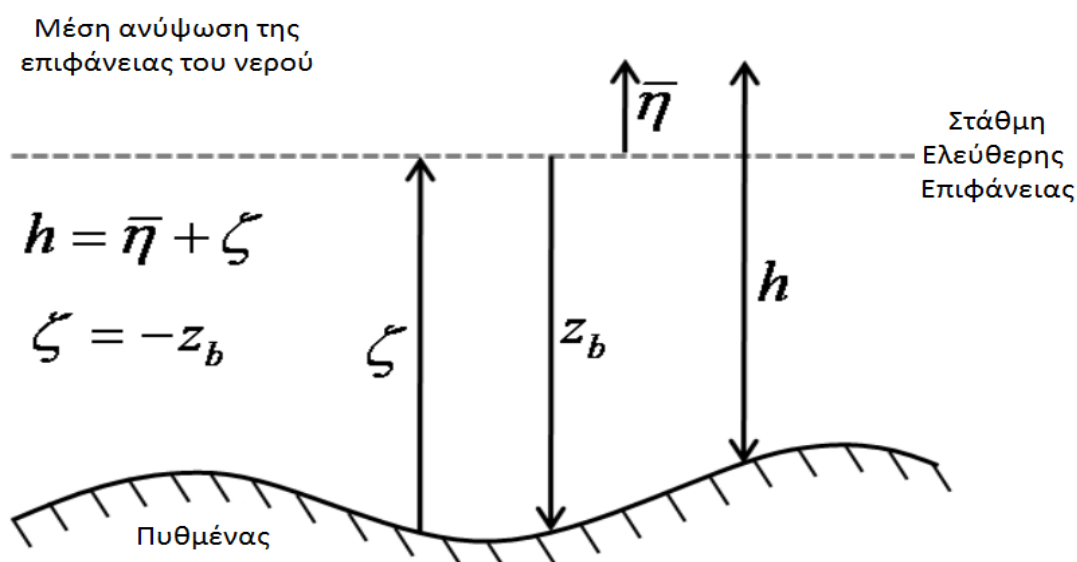
## Εξισώσεις Υδροδυναμικής

Υποθέτοντας ότι τα υποθαλάσσια ρεύματα είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα ως προς το βάθος υπό την παρουσία κυμάτων, οι γενικές εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής, ως προς το βάθος και τη φάση είναι οι εξής (Svendsen, 2006)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hV_j)}{\partial x_j} = S_M \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial(hV_i)}{\partial t} + \frac{\partial(hV_i V_j)}{\partial x_j} - \varepsilon_{ij} f_c h V_j = -gh \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x_i} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_{atm}}{\partial x_i} + \frac{\partial(v_i h \frac{\partial V_i}{\partial x_i})}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial(S_{ij} + R_{ij} - \rho h U_{wi} U_{wj})}{\partial x_j} + \frac{\tau_{si}}{\rho} + \frac{\tau_{bi}}{\rho} \quad (3.39)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις 3.39 και 3.40 υπεισέρχονται στους υπολογισμούς οι εξής παράμετροι:  $t$  ο χρόνος,  $f_c$  παράμετρος Coriolis εξαρτώμενη από το γεωγραφικό πλάτος,  $\bar{\eta}$  η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας (Εικόνα 3.3),  $\zeta$  το βάθος του νερού (θετικό προς τα κάτω),  $S_M$  όροι πηγής και απώλειας λόγω εξάτμισης, παρουσίας κατασκευών και βροχοπτώσεων,  $V_i = U_{wi} + U_i$  η συνολική ταχύτητα ροής,  $U_i$  η ταχύτητα ως προς το βάθος του ρεύματος,  $U_{wi}$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κυματισμού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $p_{atm}$  η ατμοσφαιρική πίεση,  $\rho$  η πυκνότητα του νερού,  $v_i$  ο συντελεστής τυρβώδους εσωτερικής τριβής,  $\tau_{si}$  η τάση του ανέμου στη διεπιφάνεια θάλασσας και ατμόσφαιρας,  $S_{ij}$  η τάση ακτινοβολίας,  $R_{ij}$  ο τανυστής της επιφανειακής τάσης και  $\tau_{bi}$  το συνολικό διάνυσμα της διατμητικής τάσης στον πυθμένα λόγω αλληλεπίδρασης ρευμάτων και κυμάτων.



Εικόνα 3.4: Επεξήγηση των κατακόρυφων μετατροπών για την υπερύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας και του επίπεδου αναφοράς του πυθμένα

Παρουσία κυμάτων, και λόγω ταλάντωσης των υδάτινων σωματιδίων που κινούνται με την διάδοση του κύματος παράγεται μια κινούμενη μάζα που ονομάζεται Stokes

Drift. Η ταχύτητα ροής της μάζας του κύματος ορίζεται ως η ροή μάζας κυμάτων και προσεγγίζεται από τη σχέση (Svedsen, 2007) :

$$U_{wi} = \frac{(E_w + 2E_{st})w_i}{\rho hc} \quad (3.40)$$

όπου,  $c$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος,  $E_w = \rho g H_s^2 / 16$  είναι η ενέργεια του κύματος,  $E_{st}$  είναι η πυκνότητα ενέργειας στην επιφάνεια,  $H_s$  το χαρακτηριστικό ύψος του κύματος,  $w_i = [\cos\theta, \sin\theta]$  το διάνυσμα διάδοσης του κύματος.

Η μέση διατμητική τάση στον πυθμένα  $\tau_{bi}$  υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_{bi} = \rho m_b \lambda_{wc} c_b U U_i \quad (3.41)$$

στην οποία  $c_b$  είναι συντελεστής της τριβής του πυθμένα,  $m_b$  είναι συντελεστής της κλίσης του πυθμένα,  $\lambda_{wc}$  αυξητικός μη γραμμικός συντελεστής αύξησης της τριβής του πυθμένα και  $U = \sqrt{U_i U_i}$  το μέτρο της ταχύτητας του ρεύματος.

Η τραχύτητα του πυθμένα καθορίζεται είτε με το συντελεστή τραχύτητας του Manning, είτε με το συντελεστή του Nikuradse είτε με το συντελεστή τριβής πυθμένα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η τιμή τραχύτητας διατηρείται σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης και δεν αλλάζει ανάλογα με τη σύνθεση και τα στρώματα του πυθμένα.

### Εξισώσεις στερεομεταφοράς

Το μοντέλο μεταφοράς ιζημάτων ενός μεγέθους (Sánchez and Wu, 2011) επεκτείνεται και σε ιζήματα πολλαπλών διαστάσεων. Σε αυτό το μοντέλο, η στερεομεταφορά χωρίζεται σε αυτή που προκαλείται από ρεύματα και από κύματα αντίστοιχα. Η μεταφορά λόγω ρευμάτων περιλαμβάνει το φαινόμενο της ανάδευσης των κυμάτων ενώ αυτή που σχετίζεται με την κυματική δράση λαμβάνει υπ' όψιν φαινόμενα ασυμμετρίας της κίνησης του κύματος καθώς και επίσης σταθερές συνεισφορές από την εκτροπή Stokes και υποθαλάσσιων ρευμάτων στον πυθμένα. Η μεταφορά ιζήματος λόγω ρευμάτων τόσο σαν φορτίο πυθμένα όσο και σαν φορτίο αιώρησης συνδυάζονται σε μία ενιαία εξίσωση μεταφοράς ολικού φορτίου, μειώνοντας έτσι το υπολογιστικό κόστος και απλουστεύει τον υπολογισμό της εξέλιξης του πυθμένα. Η εξίσωση μεταφοράς για το συνολικό φορτίο που σχετίζεται με το ρεύμα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h C_{tk}}{\beta_{tk}} \right) + \frac{\partial (h V_j C_{tk})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_s h \frac{\partial (r_{sk} C_{tk})}{\partial x_j} \right] + a_{t\omega_{sk}} (C_{t^*k} - C_{tk}) \quad (3.41)$$

Στην παραπάνω εξίσωση  $j=1,2$ ,  $k=1,2,\dots,N$  αριθμός που αντιπροσωπεύει το πλήθος των κλάσεων των ιζημάτων,  $t$  είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα,  $h$  το βάθος του νερού,  $x_j$  είναι η συντεταγμένη σε καρτεσιανό σύστημα στη διεύθυνση  $j$ ,  $V_j$  η μέση ως προς το βάθος ταχύτητα του ρεύματος,  $C_{tk}$  είναι η μέση ως προς το βάθος συνολική συγκέντρωση ιζήματος για την κλάση  $k$ ,  $\beta_{tk}$  είναι διορθωτικός συντελεστής της συνολικής μεταφοράς,  $r_{sk}$  το κλάσμα του φορτίου σε αιώρηση του συνολικού φορτίου για την τάξη μεγέθους και που λαμβάνει τιμή μονάδας για καλώς διαβαθμισμένα

ιζήματα,  $v_s$  είναι οριζόντιος συντελεστής ανάμιξης ιζήματος,  $a_i$  συντελεστής προσαρμογής συνολικού φορτίου και τέλος  $\omega_{sk}$  η ταχύτητα πτώσης του ιζήματος.

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εφαρμοστεί σε μεταφορές ιζημάτων ενός μεγέθους, ωστόσο, επιτρέπεται η σύνθεση του πυθμένα να μεταβάλλεται ακόμη και σε αυτή την περίπτωση.

Το κλάσμα της εξέλιξης της μορφολογίας του πυθμένα με την πάροδο του χρόνου υπολογίζεται ως:

$$\frac{1-p'_m}{f_{morph}} \left( \frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = a_t \omega_{sk} (C_{tk} - C_{tk*}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_s |q_{bk}| \frac{\partial z_b}{\partial x_j} \right) \quad (3.41)$$

όπου:  $z_b$  είναι η ανύψωση του πυθμένα αναφορικά με το τοπικό μηδενικό επίπεδο αναφοράς,  $p'_m$  το πορώδες του πυθμένα,  $D_s$  συντελεστής της κλίσης του πυθμένα,  $q_{bk} = hUC_{tk}(1-r_{sk})$  είναι το ανηγμένο φορτίο πυθμένα και τέλος  $f_{morph}$  ο συντελεστής επιτάχυνσης των μορφολογικών διεργασιών.

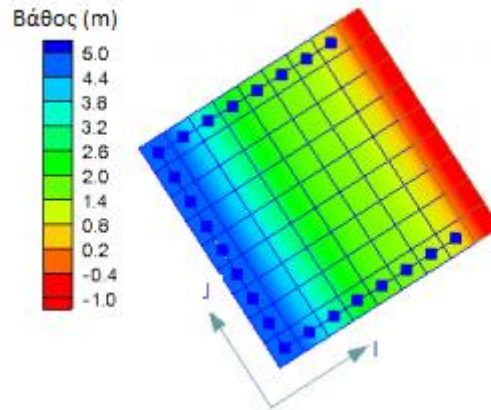
Η συνολική μεταβολή του πυθμένα υπολογίζεται ως το άθροισμα της εξίσωσης (3.41) για όλα τα μεγέθη κλάσεων ιζημάτων και συγκεκριμένα:

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = \sum_k \left( \frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k \quad (3.42)$$

Ο σκοπός της χρήσης του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης  $f_{morph}$  είναι η επιτάχυνση των αλλαγών του πυθμένα έτσι ώστε ο χρόνος προσομοίωσης  $t_{sim}$  αντιπροσωπεύει περίπου τις μεταβολές που θα συνέβαιναν σε χρόνο  $t_{morph} = f_{morph} t_{sim}$ . Ο παράγοντας πρέπει να χρησιμοποιείται με σύνεση και μόνο για εξιδανικευμένες περιπτώσεις ή χρονικές περιόδους που είναι περιοδικές (κυρίως παλιρροϊκά φαινόμενα). Εάν στην προσομοίωση χρησιμοποιούνται άνεμοι και κύματα που μεταβάλλονται με το χρόνο και επηρεάζουν τη στερεομεταφορά, τότε η χρήση αυτού του συντελεστή δε συνίσταται.

#### Παράμετροι εισόδου/εξόδου CMS-Flow

Σε περίπτωση που το CMS-Flow δέχεται αποτελέσματα από το CMS-Wave και τα χρησιμοποιεί στο μοντέλο του, απαιτείται ο κánaβος πεπερασμένων στοιχείων να είναι ο ίδιος ως προς το μέγεθος και τα γωνιακά σημεία να έχουν ίδιες συντεταγμένες. Η μόνη διαφορά εμφανίζεται στον προσανατολισμό, καθώς ο κánaβος στο CMS-Flow έχει προκαθορισμένο σημείο αρίθμησης συντεταγμένων, και είναι στην κάτω αριστερά γωνία του. (Εικόνα 3.5)



Εικόνα 3.5: Παράδειγμα κανάβου στο CMS-Flow με βαθυμετρία και τη θέση σημείου έναρξης αρίθμησης των κελιών

Σε περίπτωση που ο κανάβος πεπερασμένων στοιχείων διαθέτει και περιοχές που δεν ανήκουν στην περιοχή ενδιαφέροντος, που είναι και η συνηθέστερη περίπτωση, καθώς με τετραγωνικά στοιχεία είναι πολύ πιο δύσκολο να προσεγγιστεί η περίπλοκη μορφολογία των ακτογραμμών, ορίζεται ένα πολύγωνο μεταξύ της ακτογραμμής και του ανοιχτού ορίου σαν ενεργό, που σημαίνει ότι τα κυματικά φαινόμενα, καθώς και αυτά της υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς εκτελούνται εντός της περιοχής που περικλείει το πολύγωνο.

Όσον αφορά στις οριακές συνθήκες του μοντέλου αυτές καθορίζονται κατά μήκος μιας συστοιχίας κελιών (cellstring) του κανάβου, τα οποία με τη σειρά τους δημιουργούνται αυτόματα με τη δημιουργία του κανάβου. Στο CMS-Flow δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ 5 τύπων οριακών συνθηκών που παρουσιάζονται με συντομία στη συνέχεια.

- Ελεύθερο όριο ροής. Στη συγκεκριμένη περίπτωση καθορίζεται μέσω χρονοσειράς η παροχή ( $m^3/s$ ) που εισέρχεται από το ελεύθερο όριο στον υπόλοιπο κανάβο
- Ελεύθερο όριο με προκαθορισμένη καμπύλη χρονοσειράς στάθμης νερού. Σ αυτή την περίπτωση καθορίζεται χρονοσειρά μεταβολής της στάθμης νερού η οποία προσδίδεται σε όλα τα σημεία του ελεύθερου ορίου.
- Αποτελέσματα μεταβολής στάθμης νερού. Σ αυτή την περίπτωση αναζητούνται σε βάσεις δεδομένων (Le Provost, ADCIRC) τα συστατικά της παλίρροιας (tidal constituents) τα οποία χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της παλίρροιας στο ανοιχτό όριο
- Παλίρροιακές/Αρμονικές οριακές συνθήκες. Το CMS-Flow υποστηρίζει 37 διαφορετικά συστατικά παλίρροιας, τα οποία εφόσον είναι γνωστά για την περιοχή μελέτης μπορούν να τεθούν σαν οριακή συνθήκη.

Οι διαφορετικές παράμετροι υπολογισμού του μοντέλου καθορίζονται με την επιλογή «Model Control».

Η πρώτη καρτέλα αυτής της επιλογής αφορά τις γενικές παραμέτρους του μοντέλου. Εδώ καθορίζεται η χρονική διάρκεια της προσομοίωσης καθώς και αν θα

χρησιμοποιηθεί ο κατηγορηματικός τρόπος επίλυσης (explicit), ο οποίος είναι απαραίτητο να επιλεγεί σε περίπτωση που δεν αγνοούνται φαινόμενα στερεομεταφοράς, ή ο απεριόριστος (implicit) που χρησιμοποιείται μόνο για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών φαινομένων. Σε περίπτωση χρήσης του κατηγορηματικού τρόπου επίλυσης πρέπει το χρονικό βήμα της προσομοίωσης να είναι της τάξης του 1-2 sec για την εξασφάλιση της σταθερότητας του μοντέλου και για να ληφθούν υπ' όψη φαινόμενα όπως η θραύση των κυματισμών.

Η δεύτερη καρτέλα (flow) αφορά τα υδροδυναμικά φαινόμενα. Εδώ καθορίζεται αν θα ληφθούν υπόψη φαινόμενα σχετικά με τη οριζόντια μεταφορά, τη δύναμη Coriolis, και τη μέθοδο υπολογισμού της τραχύτητας του πυθμένα (Manning, Nikuradse κ.α.)

Η τρίτη καρτέλα (transport) αφορά φαινόμενα στερεομεταφοράς. Επιλέγεται η μέθοδος υπολογισμού της ολικής μεταφοράς ιζημάτων από τέσσερις διαθέσιμες (Lund-CIRP (2006), Van Rijn (1984,2007), Watanabe (1987), Soulsby-Van Rijn (1997)). Καθορίζονται επίσης παράμετροι όπως η πυκνότητα του ιζήματος ( $D_{50}$ ) ο συντελεστής αύξησης των μορφολογικών φαινομένων ( $f_{morph}$ ) καθώς και αν ληφθούν υπ' όψη σύνθετα φαινόμενα (avalanching).

Η επόμενη καρτέλα (wave) αφορά τα κυματικά φαινόμενα. Αυτά μπορούν να οριστούν αναλυτικά (κύμα μιας διεύθυνσης που εισέρχεται από το ανοιχτό όριο) ή με την επιλογή εισαγωγής φάσματος που έχει προκύψει σαν παράμετρος εξόδου από το CMS-Wave. Σ' αυτή την καρτέλα καθορίζεται επίσης ο χρόνος επικοινωνίας μεταξύ των μοντέλων CMS-Flow και CMS-Wave.

Η καρτέλα που αφορά τον άνεμο (wind) επιτρέπει να οριστεί αν θα ληφθεί υπ' όψη η επίδραση του ανέμου στην προσομοίωση. Σε περίπτωση που ο άνεμος δεν αγνοείται υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τρόποι αναλυτικής περιγραφής του. Στο CMS-Flow προσφέρεται η επιλογή σταθερού ανέμου ως προς διεύθυνση και ένταση αναφορικά με το χρόνο και το χώρο (uniform wind), σταθερού ανέμου ως προς το χώρο και μεταβλητού κατά διεύθυνση και ταχύτητα ως προς το χρόνο (time varying, spatially constant wind), ή ακόμα να καθοριστεί μεταβλητός άνεμος ως προς το χρόνο και το χώρο ανά διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου. Αυτή η επιλογή καθορίζεται σε συγκεκριμένες συντεταγμένες που αποτελούν θέσεις μετεωρολογικών σταθμών και γίνεται ολοκλήρωση του ανέμου στον κানাβο πεπερασμένων στοιχείων.

Η τελική καρτέλα (output) αφορά τις παραμέτρους εξόδου. Καθορίζεται ο χρόνος εκτύπωσης των αποτελεσμάτων καθώς και ποιες από τις παραμέτρους που θα υπολογιστούν είναι επιθυμητές να εκτυπωθούν από το λογισμικό σε αρχεία.

Τα κυριότερα αρχεία εξόδου που προκύπτουν από την προσομοίωση στο CMS-Flow και ιδιαίτερα αυτά που απασχολούν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής είναι:

- Το αρχείο ύψους κύματος υπό μορφή χρωματισμένων περιγραμμάτων (contours)
- Το αρχείο έντασης της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας (μορφή χρωματισμένων περιγραμμάτων)
- Το αρχείο διεύθυνσης της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας (μορφή διανυσμάτων)



- Το αρχείο εξέλιξης της μορφολογίας του πυθμένα (μορφή χρωματισμένων περιγραμμάτων)
- Το αρχείο συνολικής στερεομεταφοράς (μορφή διανυσμάτων)

Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται στο γραφικό περιβάλλον που προσφέρεται από το SMS 12.2.

### 3.3 Mohid Studio

Το γραφικό περιβάλλον Mohid Studio είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα που επιτρέπεται τη δημιουργία και οπτικοποίηση αρχείων και αποτελεσμάτων και επιτρέπει τη χρήση των αριθμητικών μοντέλων που περιλαμβάνονται στο μοντέλο Mohid Water. Αναπτύσσεται και συντηρείται από την εταιρεία Action Modulers. Στο γραφικό περιβάλλον περιλαμβάνεται πλήθος πρόσθετων εφαρμογών (π.χ. Tidal Tool) ενώ τα κύρια μοντέλα στα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις είναι το φασματικό μοντέλο κυματισμών SWAN και το μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς Mohid Water, τα οποία αναλύονται συνοπτικά στη συνέχεια.

#### 3.3.1 Φασματικό κυματικό μοντέλο SWAN

Το μοντέλο SWAN (Simulating Waves Nearshore) 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 βαθιών νερών και τις παράκτιες περιοχές. Το SWAN αναπτύχθηκε στο Delft Institute of Technology και αποτελεί ένα ανοιχτής πρόσβασης πρόγραμμα (open source). Αρχικά αναπτύχθηκε για να πραγματοποιεί επιλύσεις σε ορθογωνικό κάναβο και σε σταθερές συνθήκες κυματικού κλίματος (SWAN Cycle 1). Πλέον με το μοντέλο SWAN cycle 2 επιτρέπεται η χρήση καμπυλόγραμμων κανάβων (curvilinear grids) πεπερασμένων στοιχείων, ενώ ιδιαίτερως σημαντική είναι η αξιοποίηση μη σταθερών συνθηκών αρχικών κυματισμών (non-stationary wave conditions).

Το μοντέλο βασίζεται στην εξίσωση ισορροπίας κυματικής ενέργειας (ή ενεργειακού ισοζυγίου με απουσία ρευμάτων).

Οι ακόλουθες διεργασίες διάδοσης κυμάτων εμπεριέχονται στο SWAN:

- Διάδοση μέσω γεωγραφικού χώρου
- Διάθλαση λόγω χωρικών μεταβολών στον πυθμένα και στα ρεύματα
- Περίθλαση
- Ρήγωση λόγω χωρικών μεταβολών στον πυθμένα και στα ρεύματα
- Παρεμπόδιση και ανάκλαση λόγω παρουσίας ρευμάτων αντίθετης κατεύθυνσης

- Μετάδοση, απόφραξη ή ανάκλαση λόγω παρουσίας εμποδίων

Επιπρόσθετα περιλαμβάνονται και οι ακόλουθες διεργασίες γένεσης και απόσβεσης κυματισμών.

- Η ανάπτυξη των κυματισμών από τη δράση των ανέμων
- Απόσβεση λόγω του φαινομένου white capping
- Απόσβεση λόγω της θραύσης των κυματισμών
- Απόσβεση λόγω τριβής πυθμένα
- Αλληλεπίδραση κυματισμών τόσο σε ρηχά όσο και σε βαθιά ύδατα

Σημαντικό μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι δεν δύναται να υπολογιστούν παράκτια ρεύματα τα οποία προκαλούνται από τη δράση των κυματισμών. Σε περίπτωση που απαιτείται η διερεύνηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο φαινομένων τα ρεύματα θα πρέπει να παρέχονται σαν παράμετρος εισόδου στο SWAN.

#### Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

##### Εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης

Στο SWAN τα κύματα περιγράφονται με το φάσμα της δισδιάστατης κυματικής πυκνότητας δράσης ακόμη και όταν κυριαρχούν μη γραμμικά φαινόμενα (π.χ. στη ζώνη θραύσης). Η λογική πίσω από τη χρήση του προαναφερθέντος φάσματος ακόμη και σε τέτοιες μη γραμμικές συνθήκες, στηρίζεται στο ότι είναι δυνατό να προβλεφθεί με σημαντική ακρίβεια αυτή η κατανομή της δευτέρας τάξεως κίνησης του κυματισμού.

Το φάσμα που χρησιμοποιείται στο SWAN είναι το φάσμα πυκνότητας δράσης  $N(\sigma, \theta)$  και όχι το φάσμα ενεργειακής πυκνότητας  $E(\sigma, \theta)$  αφού υπό την παρουσία ρευμάτων διατηρείται η πυκνότητα δράσης ενώ η ενεργειακή πυκνότητα όχι (Whitham, 1974).

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι η σχετική συχνότητα  $\sigma$  και η κατεύθυνση κύματος  $\theta$ .

Η πυκνότητα δράσης είναι ίση με την ενεργειακή πυκνότητα που διαιρείται με τη σχετική συχνότητα:

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (3.43)$$

Σημειώνεται ότι για πλήρως αναπτυγμένους κυματισμούς, σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία, η σχετική συχνότητα δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3.44)$$

Στο SWAN το φάσμα πυκνότητας δράσης μπορεί να μεταβάλλεται τόσο χρονικά όσο και χωρικά.

Η εξέλιξη του κυματικού φάσματος διέπεται από την εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης σε καρτεσιανές συντεταγμένες (Hasselmann et al.1973)

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (3.45)$$

Ο πρώτος όρος στο αριστερό μέλος της εξίσωσης αντιπροσωπεύει τον τοπικό ρυθμό μεταβολής της πυκνότητας δράσης στο χρόνο, ο δεύτερος και ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύουν τη διάδοση της κυματικής διαταραχής στο γεωγραφικό χώρο (με ταχύτητες διάδοσης  $c_x$  και  $c_y$  στην  $x$ - και  $y$ - διεύθυνση αντίστοιχα). Ο τέταρτος όρος αφορά τη διαφοροποίηση της σχετικής συχνότητας λόγω μεταβολών του βάθους του πυθμένα και των ρευμάτων (με ταχύτητα διάδοσης  $c_\sigma$  στο χώρο  $\sigma$ -). Ο πέμπτος όρος αντιπροσωπεύει διάθλαση που προκαλείται λόγω μεταβολής βάθους αλλά και παρουσίας ρευμάτων (με ταχύτητα διάδοσης  $c_\theta$  στο χώρο  $\theta$ -). Ο όρος στο δεξί μέλος της εξίσωσης αποτελεί τους όρους πηγής (source terms) σε όρους ενεργειακής πυκνότητας και αντιπροσωπεύουν την επίδραση των φαινομένων της γένεσης και απόσβεσης κυματισμών καθώς και τη μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

#### Παράμετροι εισόδου/εξόδου SWAN

Στο SWAN ο χρήστης πρέπει να παράσχει αριθμό αρχείων (αρχεία εισόδου) με τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Ένα αρχείο (command file) με τις βασικές παραμέτρους υπολογισμού (κυματικό κλίμα στα όρια, χρόνος προσομοίωσης, σύστημα συντεταγμένων κ.α.)
- Αρχεία που περιέχουν πληροφορίες για τον κানাβο, τη βαθυμετρία, την ένταση και διεύθυνση ανέμου (προαιρετικά) και τις ταχύτητες των ρευμάτων (προαιρετικά)

Το SWAN είναι αρκετά ευέλικτο αναφορικά με την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Υπάρχουν διαθέσιμες επιλογές για πολλές διαφορετικές παραμέτρους κυματικών χαρακτηριστικών, ενώ τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή πινάκων όπου κάθε στοιχείο αντιπροσωπεύει το κάθε μέγεθος σε ένα κελί του κανάβου. Οι επιλογές εξόδου που προκύπτουν από το SWAN και χρησιμοποιούνται μετέπειτα από το μοντέλο Mohid Water είναι οι εξής:

- Αρχείο σε μορφή πίνακα με τα ύψη κύματος σε κάθε κελί του ορθογωνικού κανάβου
- Αρχείο σε μορφή πίνακα με τις διευθύνσεις κύματος σε κάθε κελί του ορθογωνικού κανάβου
- Αρχείο με τις τάσεις ακτινοβολίας (στη διεύθυνση  $x$  και  $y$ ) σε κάθε κελί του ορθογωνικού κανάβου

Το γραφικό περιβάλλον Mohid Studio συνδυάζει τις πληροφορίες των παραπάνω αρχείων σε ένα καινούριο, το οποίο είναι κατάλληλης μορφής (επέκταση .hdf) και

χρησιμοποιείται από το μοντέλο Mohid Water για να ληφθεί υπ' όψιν η επίδραση των κυμάτων στα φαινόμενα υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς.

### 3.3.2 Μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς Mohid Water

Το Mohid Water είναι ένα δι-διάστατο, ολοκληρωμένο ως προς το βάθος, μοντέλο υδροδυναμικής που αρχικά αναπτύχθηκε στο Instituto Superior Técnico (IST), στη Λισαβόνα της Πορτογαλίας. Το μοντέλο επιλύει τις εξισώσεις ρηχών νερών, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο πεπερασμένων διαφορών. Επιτρέπει τη προσομοίωση ροής που παράγεται από έναν διαφορετικό αριθμό παραγόντων όπως η παλίρροια, ο άνεμος και τα ανεμογενή κύματα.

Ο κώδικας του μοντέλου χωρίζεται σε υποενότητες (π.χ. sediment, hydrodynamics, tide κ.α.) στις οποίες ο χρήστης μέσω ορισμένων λέξεων κλειδιών ορίζει τις βασικές παραμέτρους για τη λειτουργία του λογισμικού.

#### Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

#### Εξισώσεις Υδροδυναμικής

Οι βασικές εξισώσεις που επιλύει το μοντέλο είναι οι εξισώσεις ρηχών νερών, συμπεριλαμβανομένης της επέκτασης για μη υδροστατική πίεση (εξισώσεις Boussinesq), για ένα κατακόρυφα ομοιογενές υγρό με σταθερή πυκνότητα και είναι:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{h}{2} \left[ \frac{\partial^3 (hu)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 (hv)}{\partial x \partial y \partial t} \right] - \frac{h^2}{6} \left( \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t} + \frac{\partial^3 v}{\partial x \partial y \partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - \frac{c_b}{H} |u| u + \frac{c_s}{H} |w| w_x \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{h}{2} \left[ \frac{\partial^3 (hv)}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 (hu)}{\partial x \partial y \partial t} \right] - \frac{h^2}{6} \left( \frac{\partial^3 v}{\partial y^2 \partial t} + \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial y \partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \frac{c_b}{H} |v| v + \frac{c_s}{H} |w| w_x \end{aligned} \quad (3.48)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις:  $t$  είναι ο χρόνος,  $(x,y)$  είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες στο οριζόντιο επίπεδο,  $\zeta$  η ανύψωση της υδάτινης επιφάνειας πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας,  $h$  είναι το τοπικό βάθος (αναφορικά με το μηδενικό επίπεδο

αναφοράς στον πυθμένα), Η το ολικό βάθος ροής μετρημένο από τον πυθμένα ως την επιφάνεια της θάλασσας,  $u$  και  $v$  οι μέσες ως προς το βάθος συνιστώσες της ταχύτητας ροής στη διεύθυνση  $x$  και  $y$  αντίστοιχα,  $f$  η παράμετρος Coriolis,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\mu$  η μέση ως προς το βάθος δυναμική συνεκτικότητα,  $c_b$  παράμετρος της διατμητικής τάσης πυθμένα,  $c_s$  παράμετρος της επιφανειακής διατμητικής τάσης και τέλος  $(w_x, w_y)$  οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στη διεύθυνση  $x$  και  $y$  αντίστοιχα.

Το Mohid Water μπορεί να λειτουργήσει βασιζόμενο στην επίλυση των εξισώσεων Saint-Venant (υδροστατική πίεση-εξισώσεις 3.18-3.21) ή των εξισώσεων Boussinesq (μη υδροστατική πίεση-εξισώσεις 3.46-3.48). Η πρώτη επιλογή είναι ορθότερη για την προσομοίωση κυμάτων μεγαλύτερου μήκους (π.χ. παλίρροια) ενώ η δεύτερη είναι απαραίτητη για την προσομοίωση βραχύτερων κυμάτων (π.χ. ανεμογενή κύματα).

### Εξισώσεις στερεομεταφοράς

Στο μοντέλο Mohid Water υπάρχει η δυνατότητα για προσομοίωση μεταφοράς πολλών ειδών ιζήματος (συνεκτικά και μη-συνεκτικά) καθώς και συνδυασμούς τους. Για τη μεταφορά μη-συνεκτικών ιζημάτων λαμβάνεται υπ' όψιν και η μεταφορά ως φορτίου πυθμένα και ως φορτίου σε αιώρηση. Η μεταφορά αιωρούμενων ιζημάτων υπολογίζεται με την επίλυση της εξίσωσης προσαρμογής/διάχυσης. Αυτή η προσέγγιση είναι πιο ρεαλιστική από την εξέταση εμπειρικών εξισώσεων με βάση τη στιγμιαία διατμητική τάση του πυθμένα, καθώς το φορτίο που βρίσκεται σε αιώρηση δε βρίσκεται σε ισορροπία με τις στιγμιαίες διατμητικές τάσεις στον πυθμένα όταν οι ροές είναι ασταθείς. Η μεταφορά φορτίου πυθμένα υπό τη συνδυασμένη επίδραση ρευμάτων και κυμάτων υπολογίζονται ακολουθώντας μια από τις εξής μεθόδους υπολογισμού:

- Bijker-Battachraya (1968)
- Van Rijn (1984, 1993)
- Bailard (1981,1984)
- Dibajnia (1992)

Οι παραπάνω μέθοδοι είναι ακριβώς οι ίδιες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο Sisyphé του λογισμικού Telemac-Mascaret και στο αντίστοιχο μέρος αυτού του κεφαλαίου έχουν αναλυθεί οι εξισώσεις στις οποίες βασίζονται.

### Παράμετροι εισόδου/εξόδου Mohid Water

Για την ευκολία στο χειρισμό του, το Mohid Water χωρίζεται σε υποπρογράμματα κάθε ένα από τα οποία διαθέτει τις παραμέτρους εισόδου που είναι απαραίτητες για την εκτέλεση μιας διεργασίας. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικότερα υποπρογράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της μελέτης:

- Atmosphere: Περιέχει τις βασικές παραμέτρους για τη θεώρηση του ανέμου και καθορίζει αν θα περιγραφεί με αναλυτικές εκφράσεις ή θα δοθεί με τη μορφή χρονοσειράς σε ξεχωριστό αρχείο

- **Geometry:** Αρχείο με τις βασικές παραμέτρους σχετικά με τη γεωμετρία του προβλήματος, όπως το ελάχιστο βάθος ή τη θεώρηση διαφορετικών επιπέδων στον πυθμένα
- **Hydrodynamic:** Καθορίζει ποια φαινόμενα θεωρείται ότι έχουν επίδραση στις υδροδυναμικές διεργασίες (παλίρροια, άνεμος, κυματισμοί, παροχή, Coriolis κ.α.)
- **InterfaceSedimentWater:** Καθορίζει τις ιδιότητες των ιζημάτων στη διεπιφάνεια νερού και πυθμένα, δηλαδή τον τύπο του ιζήματος (συνεκτικό ή μη) καθώς και δευτερογενή φαινόμενα όπως η διάβρωση της επιφάνειας του.
- **Model:** Περιέχει τις βασικές παραμέτρους της προσομοίωσης, όπως το χρονικό βήμα και η συνολική διάρκεια της προσομοίωσης. Με τη χρήση των λέξεων κλειδιών `SEDIMENT=1` και `WAVES=1` ενεργοποιούνται φαινόμενα στερεομεταφοράς και αλληλεπίδρασης κυμάτων-ρευμάτων στο Mohid Water
- **Sediment:** Καθορίζει τις βασικές παραμέτρους των ιζημάτων όπως η διάμετρος των κόκκων ( $D_{50}$ ), το συντελεστή μορφολογικής κλίμακας ( $f_{morph}$ ), τη μέθοδο υπολογισμού της στερεομεταφοράς
- **Tide:** Περιέχει ανά γεωγραφικό σημείο τα συστατικά παλίρροιας (tidal constituents) τα οποία υπολογίζονται από το ενσωματωμένο εργαλείο Tidal Tool και που θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο
- **Turbulence:** Περιέχει παραμέτρους όπως η οριζόντια και η κάθετη μεταφορά του μοντέλου
- **WaterProperties:** Εδώ καθορίζονται παράμετροι οι οποίοι υπεισέρχονται σε υπολογισμούς και μεταβάλλονται, όπως το ιζημα, η αλατότητα και η θερμοκρασία του νερού
- **Waves:** Σ αυτό το αρχείο δίνεται η θέση στην οποία βρίσκεται το αρχείο το οποίο εξάγεται από την προσομοίωση του SWAN. Το Mohid Water «διαβάζει» από αυτό το αρχείο το ύψος του κύματος, την περίοδο και τις τάσεις ακτινοβολίας σε κάθε σημείο του κανάβου

Στα παραπάνω υποπρογράμματα αν τεθεί η λέξη κλειδί `OUTPUTHDF=1`, δίνεται η εντολή στο Mohid Water να «γράψει» τα αποτελέσματα του σε ένα αρχείο της μορφής `hdf`, το οποίο μπορεί να οπτικοποιηθεί στο γραφικό περιβάλλον Mohid Studio. Ορισμένα αρχεία, όπως το προφίλ των ταχυτήτων και η μεταφορά ιζημάτων επιτρέπουν την χρησιμοποίηση διανυσμάτων για την απεικόνιση τους.

### **3.4 Σύνοψη των γνωρισμάτων των μοντέλων που περιέχονται σε κάθε πλατφόρμα λογισμικών**

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται συνοπτικά στους συγκριτικούς Πίνακες 3.1-3.3, τα κύρια στοιχεία και γνωρίσματα που διαθέτει κάθε μοντέλο που περιλαμβάνεται στις πλατφόρμες λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν. Επίσης στον Πίνακα 3.4 παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στην περιοχή μελέτης στα διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα. Η γνώση των οριακών συνθηκών, επιτρέπει να κατανοήσουμε καλύτερα τη φυσική λειτουργία των μοντέλων και τον εντοπισμό πιθανών υπολογιστικών ασταθειών που εμφανίζονται κοντά στα ανοιχτά όρια της περιοχής μελέτης.

**Πίνακας 3.1: Παρουσίαση των βασικών στοιχείων και γνωρισμάτων κάθε μοντέλου της πλατφόρμας λογισμικών Telemac-Mascaret**

Αριθμητικό Μοντέλο	Περιπτώσεις εφαρμογής	Βασικές εξισώσεις	Υποχρεωτικές παράμετροι εισόδου	Παράμετροι εξόδου	Σχόλια/Αδυναμίες
TOMAWAC	Εκτίμησης-πρόβλεψης κυματικού κλίματος	Εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης (Action Balance equation)	Αρχείο οδήγησης (cas file)	Οι παράμετροι εξόδου υπολογίζονται σε κάθε σημείο του υπολογιστικού κανάβου και μερικές είναι: $H_{mo}$ ZF $U_x, U_y$ $F_x, F_y$	Δε λαμβάνεται υπ' όψη η περίθλαση και η ανάκλαση στη συζευγμένη λειτουργία του μοντέλου
	Εκτίμησης επιπτώσεων με τη μέθοδο της αντίστροφης ανάλυσης		Αρχείο γεωμετρίας (geometry file)		Ενδέχεται να απαιτείται προγραμματισμός σύνθετων υπορουτίνων από μέρος του χρήστη
	Μελέτης σε ακραία φαινόμενα (π.χ. καταιγίδες)		Αρχείο οριακών συνθηκών (boundary conditions file)		Δύσκολος ο εντοπισμός λάθους κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης
TELEMAC-2D	Σχεδιασμός λιμένων-Βυθοκορήσεις	Εξισώσεις St Venant με τη δυνατότητα να εμπλουτιστούν με μη υδροστατικούς όρους (Serre, Bussinesq κ.α.)	Αρχείο οδήγησης (cas file)	Οι παράμετροι εξόδου υπολογίζονται σε κάθε σημείο του υπολογιστικού κανάβου και μερικές είναι: H U, V X, Y L	Δύσκολος ο εντοπισμός λάθους κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης
	Εφαρμογές περιβαλλοντικής υδραυλικής		Αρχείο γεωμετρίας (geometry file)		
	Ποτάμια εφαρμογές και αστοχίες φραγμάτων		Αρχείο οριακών συνθηκών (boundary conditions file)		
SISYPHE	Στερεομεταφορά σε ποτάμια	Εξίσωση Exner (conservative law). Διαθέτει πλήθος σχέσεων γι τον υπολογισμό του φορτίου αιωρήσεως και του φορτίου πυθμένα	Αρχείο οδήγησης (cas file)	Οι παράμετροι εξόδου υπολογίζονται σε κάθε σημείο του υπολογιστικού κανάβου και μερικές είναι: U, V E QSSUSP QSBED	Απαιτείται μικρό χρονικό βήμα και πύκνωση κοντά στην ακτογραμμή για να είναι δυνατός ο υπολογισμός της στερεομεταφοράς, εντός της ζώνης θραύσης
	Στερεομεταφορά σε παράκτιες ζώνες		Αρχείο γεωμετρίας (geometry file)		Σε ορισμένες μεθόδους υπολογισμού φορτίου πυθμένα και αιωρήσεων απαιτείται περίοδος σύζευξης με το υδροναμικό μοντέλο ίση με 1
	Στερεομεταφορά σε λίμνες		Αρχείο οριακών συνθηκών (boundary conditions file)		Δύσκολος ο εντοπισμός λάθους κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης

**Πίνακας 3.2: Παρουσίαση των βασικών στοιχείων και γνωρισμάτων κάθε μοντέλου της πλατφόρμας λογισμικών SMS**

Αριθμητικό Μοντέλο	Περιπτώσεις εφαρμογής	Βασικές εξισώσεις	Υποχρεωτικές παράμετροι εισόδου	Παράμετροι εξόδου	Σχόλια/Αδυναμίες
CMS-Wave	Διάδοση κυμάτων σε ωκεάνιες και παράκτιες περιοχές	Εξίσωση διάδοσης κυματισμού υπό σταθερές συνθήκες (Steady State)	Αρχείο κειμένου ASCII (.xyz) που περιέχει συντεταγμένες και βάθος νερού για προκαθορισμένα σημεία	Αρχείο χαρακτηριστικού ύψους κύματος (χωρική κατανομή)	Δυσκολία στην ακριβή αποτύπωση της ακτογραμμής λόγω του ορθογωνικού κανάβου πεπερασμένων στοιχείων
	Εφαρμογή για κυματισμούς που περιορίζονται μόνο από το ανάπτυγμα πελάγους		Αρχείο φάσματος (spectral) στο ανοιχτό όριο	Αρχείο χαρακτηριστικής περιόδου του κύματος (χωρική κατανομή)	Μη δυνατή εφαρμογή του μοντέλου σε περιοχές όπου οι κυματισμοί περιορίζονται από τη διάρκεια πνοής ανέμου
	Εφαρμογή σε περιπτώσεις όπου τα ανακλώμενα κύματα δεν αγνοούνται		Αρχείο που περιλαμβάνει τον κανάβο πεπερασμένων στοιχείων και την αντίστοιχη βαθυμετρία	Αρχείο με την απόσβεση του κύματος (χωρική κατανομή)	Ενδεχόμενες υπολογιστικές αστάθειες σε μεμονωμένα κελιά του κανάβου
CMS-Flow	Ευρύ περίο εφαρμογών σε περιπτώσεις παράκτιας κυκλοφορίας	Εξισώσεις συνέχειας και ποσότητας κίνησης κατά Svedsen (2006)	Κανάβος πεπερασμένων στοιχείων με την αντίστοιχη βαθυμετρία	Αρχείο μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας ρευμάτων (χωρική κατανομή και μορφή διανυσμάτων)	Δυσκολία στην ακριβή αποτύπωση της ακτογραμμής λόγω του ορθογωνικού κανάβου πεπερασμένων στοιχείων
			Καθορισμός των οριακών συνθηκών στο ανοιχτό όριο	Το αρχείο ολικής στερεομεταφοράς (μορφή διανυσμάτων)	Απαίτηση μικρού χρονικού βήματος (1-2 sec) για υπολογισμό στερεομεταφοράς
			Καθορισμός περιοχών του υπολογιστικού κανάβου που δεν λαμβάνονται υπ' όψη φαινόμενα μεταφοράς	Το αρχείο εξέλιξης της μορφολογίας του πυθμένα (μορφή περιγραμμάτων)	Ενδεχόμενες υπολογιστικές αστάθειες σε μεμονωμένα κελιά του κανάβου



Πίνακας 3.3: Παρουσίαση των βασικών στοιχείων και γνωρισμάτων κάθε μοντέλου της πλατφόρμας λογισμικών Mohid Studio

Αριθμητικό Μοντέλο	Περιπτώσεις εφαρμογής	Βασικές εξισώσεις	Υποχρεωτικές παράμετροι εισόδου	Παράμετροι εξόδου	Σχόλια/Αδυναμίες
SWAN	Διάδοση κυματισμών σε ωκεάνια κλίμακα και σε παράκτιες περιοχές	Εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης σε καρτεσιανές συντεταγμένες	Αρχείο εντολών (command file) με τις βασικές παραμέτρους υπολογισμού (κυματικό κλίμα, χρόνος προσομοίωσης, σύστημα συντεταγμένων κ.α.)	Αρχείο σε μορφή πίνακα με τα ύψη κύματος σε κάθε κελί του ορθογωνικού κανάβου	Δυσκολία στην ακριβή αποτύπωση της ακτογραμμής λόγω του ορθογωνικού κανάβου πεπερασμένων στοιχείων
				Αρχείο μορφής πίνακα με τις διευθύνσεις του κύματος σε κάθε κελί του ορθογωνικού κανάβου	Η επίδραση των ρευμάτων δε λαμβάνεται υπ' όψη
				Αρχείο με τις τάσεις ακτινοβολίας σε κάθε κελί του ορθογωνικού κανάβου	Ενδεχόμενες υπολογιστικές αστάθειες σε μεμονωμένα κελιά του κανάβου
Mohid Water	Φαινόμενα κυκλοφορίας σε ποταμούς και παράκτιες ζώνες	Εξισώσεις συνέχειας Stokes και ρηχών νερών, επαυξημένες με τους όρους Boussinesq	Υποπρογράμματα από τα οποία τα πιο σημαντικά είναι: -Atmosphere -Geometry -Hydrodynamic -InterfaceSedimentWater -Model -Sediment -Tide -WaterProperties -Waves	Αρχεία με την παρακάτω μορφή:  -Atmosphere.hdf -Hydrodynamic.hdf -InterfaceSedimentWater.hdf -Sediment.hdf -WaterProperties.hdf -Waves.hdf	Δυσκολία στην ακριβή αποτύπωση της ακτογραμμής λόγω του ορθογωνικού κανάβου πεπερασμένων στοιχείων  Ενδεχόμενες υπολογιστικές αστάθειες σε μεμονωμένα κελιά του κανάβου

Πίνακας 3.4: Περιγραφή των οριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν στο κάθε αριθμητικό μοντέλο

Αριθμητικό μοντέλο	Όρια που εφαρμόστηκαν		Οριακή συνθήκη στο «ανοιχτό» όριο
	Στερεά όρια	Υγρά όρια	
Tomawac	Οριακή συνθήκη τοίχου-πλήρης απορρόφηση της κυματικής ενέργειας	Ανοιχτό όριο εισόδου της κυματικής δράσης-προκαθορισμένου βάθους και προκαθορισμένης τιμής του ύψους κύματος	Dirichlet B.C.
Telemac-2D	Οριακή συνθήκη τοίχου-μηδενική ροή στο όριο	Ανοιχτό όριο εισόδου της κυματικής δράσης-προκαθορισμένου βάθους και μη προκαθορισμένης τιμής των υδροδυναμικών ταχυτήτων (free velocity)	Neumann B.C
Sisyphe	Οριακή συνθήκη τοίχου-μηδενική στερεομεταφορά στο όριο	Ανοιχτό όριο εισόδου της κυματικής δράσης-προκαθορισμένου βάθους και εφαρμογή συγκέντρωσης ισοζυγίου ιζήματος	Dirichlet B.C.
CMS-Wave	Οριακή συνθήκη τοίχου στην ακτογραμμή-μερική απορρόφηση της κυματικής ενέργειας- θεώρηση ανάκλασης	Αυτόματη θεώρηση ανοιχτών ορίων στις παρειές του κανάβου με θετικές τιμές βάθους νερού-καθορισμός φάσματος κυματικής δράσης σημειακά στο όριο	Dirichlet B.C.
CMS-Flow (υδροδυναμική)	Οριακή συνθήκη τοίχου-αύξηση αντίστασης στη ροή (flow drag)	Καθορισμός ανοιχτού ορίου έναντι της ακτογραμμής, προκαθορισμένη τιμή ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας	Dirichlet B.C.
CMS-Flow (στερεομεταφορά)	Οριακή συνθήκη τοίχου-μηδενική στερεομεταφορά στο όριο	Καθορισμός ανοιχτού ορίου έναντι της ακτογραμμής-εφαρμογή συγκέντρωσης ισοζυγίου ιζήματος	Dirichlet B.C.
SWAN	Οριακή συνθήκη τοίχου στις περιοχές μηδενικής ή αρνητικής βαθυμετρίας-πλήρης απορρόφηση της κυματικής ενέργειας	Καθορισμός του ανοιχτού ορίου της κυματικής δράσης μέσω του αρχείου εισόδου-καθορισμός του ύψους, της περιόδου και της διεύθυνσης διάδοσης του κυματισμού	Dirichlet B.C.
Mohid Water (υδροδυναμική)	Οριακή συνθήκη τοίχου στις περιοχές μηδενικής ή αρνητικής βαθυμετρίας-μηδενική ροή στο όριο	Θεώρηση ίδιου ανοιχτού ορίου με το SWAN, προκαθορισμένης ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας μέσω της βάσης δεδομένων παλίρροιας FES	Dirichlet B.C.
Mohid Water (υδροδυναμική)	Οριακή συνθήκη τοίχου στις περιοχές μηδενικής ή αρνητικής βαθυμετρίας-μηδενική στερεομεταφορά στο όριο	Θεώρηση ίδιου ανοιχτού ορίου με το SWAN, εφαρμογή συγκέντρωσης ισοζυγίου ιζήματος	Dirichlet B.C.

Στο παρόν κεφάλαιο, δεν έχουν παρουσιαστεί ακόμη τυχόν δυσκολίες που ανέκυψαν κατά την προσομοίωση με το κάθε μοντέλο, οπότε η ποσοτική/ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5).

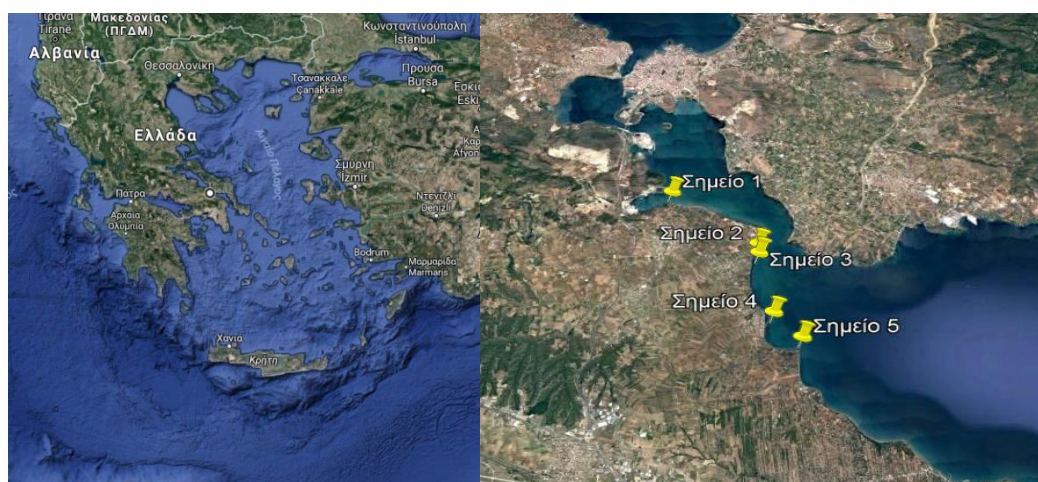
Η πλατφόρμα λογισμικών Telemac-Mascaret παρουσιάζει πλεονεκτήματα που σχετίζονται με το μεγάλο εύρος εφαρμογής που έχουν τα μοντέλα της, καθώς και ότι οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σε κλίμακα με πεπερασμένα στοιχεία ακανόνιστης γεωμετρίας (flexible mesh). Δίνεται έτσι η δυνατότητα μιας πιο λεπτομερούς περιγραφής της μορφολογίας της ακτογραμμής και ενδεχόμενης πύκνωσης των στοιχείων, σε σημεία αυξημένου ενδιαφέροντος. Το γεγονός ότι πρόκειται για λογισμικό ανοιχτού κώδικα συνδέεται με ευελιξίες προγραμματισμού και προσαρμογής του κάθε μοντέλου στις ανάγκες του χρήστη.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν από την πλατφόρμα λογισμικών SMS, παρουσιάζουν ευελιξία στη μετατροπή του συστήματος συντεταγμένων και διαθέτουν σύγχρονα μέσα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων. Ωστόσο, το γεγονός ότι πραγματοποιούν τους υπολογισμούς τους σε ορθογωνικό κλίμακα, ενδεχόμενα προκαλεί υπολογιστικές αστάθειες σε μεμονωμένα κελιά, και δεν επιτρέπει την λεπτομερή περιγραφή της μορφολογίας της ακτογραμμής.

Κατ' αντιστοιχία, τα μοντέλα SWAN και Mohid Water που περιλαμβάνονται στο γραφικό περιβάλλον του Mohid Studio, διαθέτουν σύγχρονα μέσα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων, είναι φιλικά προς το χρήστη και διαθέτουν μεγάλο αριθμό προσθηκών (add-ons) και δυνατότητα σύνδεσης με βάσεις δεδομένων από το διαδίκτυο ( π.χ. MyOCEAN). Ωστόσο, το γεγονός ότι πραγματοποιούν τους υπολογισμούς τους σε ορθογωνικό κλίμακα, ενδεχόμενα προκαλεί υπολογιστικές αστάθειες σε μεμονωμένα κελιά, και δεν επιτρέπει την λεπτομερή περιγραφή της μορφολογίας της ακτογραμμής.

## 4. Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή μελέτης (Εικόνα 4.1) βρίσκεται στην περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στην περιοχή της Παραλίας της Αυλίδας. Ανήκει στην περιφερειακή ενότητα Ευβοίας και ο πληθυσμός της ανέρχεται στους 210.815 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Γεωγραφικά η Δημοτική ενότητα της Αυλίδας ανήκει στο διαμέρισμα της Βοιωτίας διοικητικά όμως υπάγεται στο Δήμο της Χαλκίδας. Συγκεκριμένα η παραλία της Αυλίδας εκτείνεται σε απόσταση 6 km περίπου. Στην περιοχή υπάρχουν αρκετά εστιατόρια, και οι οικονομικές δραστηριότητες των κατοίκων σχετίζονται κυρίως με τον κλάδο του τουρισμού.



Εικόνα 4.1: Γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης

Στην περιοχή τα τελευταία χρόνια έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα έντονων μορφολογικών αλλαγών, και κυρίως διάβρωση στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου. Τα κυματικά φαινόμενα στην περιοχή δεν είναι ιδιαίτερος έντονα, και οι μορφολογικές αλλαγές πιθανώς οφείλονται σε μεγάλο ποσοστό στη δράση ρευμάτων και στην ύπαρξη ανθρώπινων κατασκευών (κατακόρυφο μέτωπο του παραλιακού δρόμου, λιμένας Αυλίδας κ.α.). Η διάβρωση που έχει παρατηρηθεί τελευταία στην ακτογραμμή μειώνει την προσβασιμότητά της στους λουόμενους, γεγονός που έχει αρνητικές επιπτώσεις στην οικονομία και τον τουρισμό.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται φωτογραφίες από επί τόπου επίσκεψη στην περιοχή μελέτης.



**Εικόνα 4.2: Κατάρρευση προστατευτικών τοιχίων κατά μήκος του παραλιακού δρόμου**



**Εικόνα 4.3: Διάβρωση του παραλιακού δρόμου στο σημείο 2 της περιοχής μελέτης**



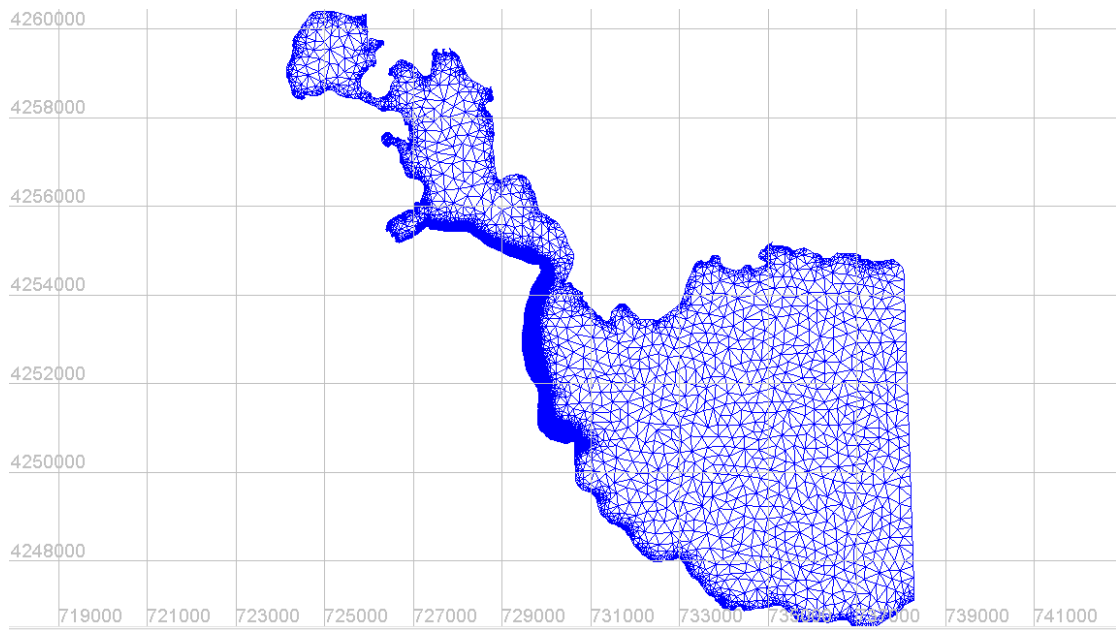
**Εικόνα 4.4: Υφιστάμενοι πρόβολοι στο σημείο 3 της περιοχής μελέτης**



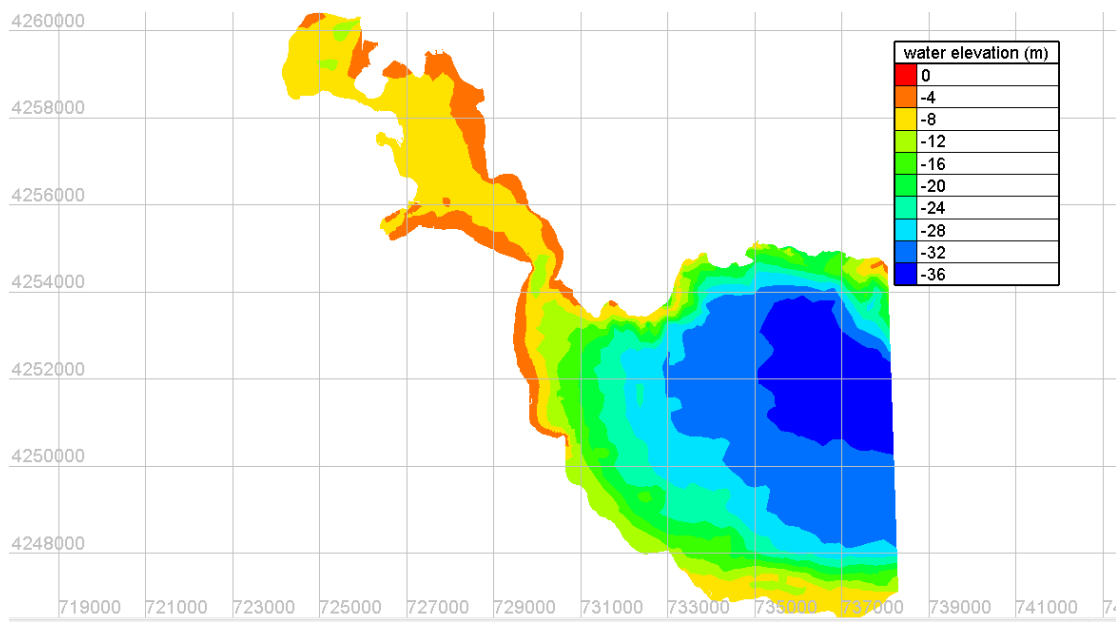
**Εικόνα 4.5: Υφιστάμενοι πρόβολοι μεταξύ του σημείου 3 και σημείου 4 της περιοχής μελέτης**

## 4.1 Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης έχει περίπου εμβαδόν 70.06 km<sup>2</sup>. Στην ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο μοντέλο SWAN (μέσω του Mohid Studio) χρησιμοποιήθηκε και μεγαλύτερος κανάβος που περιείχε ολόκληρο το νησί της Εύβοιας και τμήμα της Βοιωτίας. Τα πρωτογενή δεδομένα για τη βαθυμετρία του μεγαλύτερου κανάβου προέρχονται από ελεύθερα γεωγραφικά δεδομένα που διατίθενται από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού, και παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στο τέλος της παρούσας ενότητας. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε και κανάβος που καλύπτει μεγαλύτερο γεωγραφικό εύρος, είναι για να εκμεταλευτεί η δυνατότητα που παρέχει το SWAN ονόματι “nesting”. Μέσω αυτής της μεθόδου μπορούν να συνδεθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιούνται στο μεγαλύτερο κανάβο και να εισαχθούν στο μικρότερο. Στις παρακάτω εικόνες (4.6-4.13) παρουσιάζονται κατά σειρά οι κানাβοι πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και η αντίστοιχη βαθυμετρία που χρησιμοποιήθηκαν κατά σειρά στα λογισμικά Telemac-Mascaret, CMS Flow και CMS-Wave, και στο Mohid Studio. Σημειώνεται ότι στο λογισμικό Mohid Studio, δίνεται η δυνατότητα κατά τη δημιουργία της βαθυμετρίας να οριστούν πολύγωνα, στα οποία τα αριθμητικά μοντέλα δεν θα υπολογίζουν βάθος νερού. Τέτοια πολύγωνα είναι σημεία ξηράς ή νήσοι που πιθανώς υπάρχουν στον υπολογιστικό κανάβο. Στην εικόνα που παρουσιάζεται ο μικρός κανάβος στο λογισμικό Mohid Studio δεν παρουσιάζονται τέτοια πολύγωνα, ενώ στο διευρυμένο κανάβο, τέτοια πολύγωνα είναι ορατά.



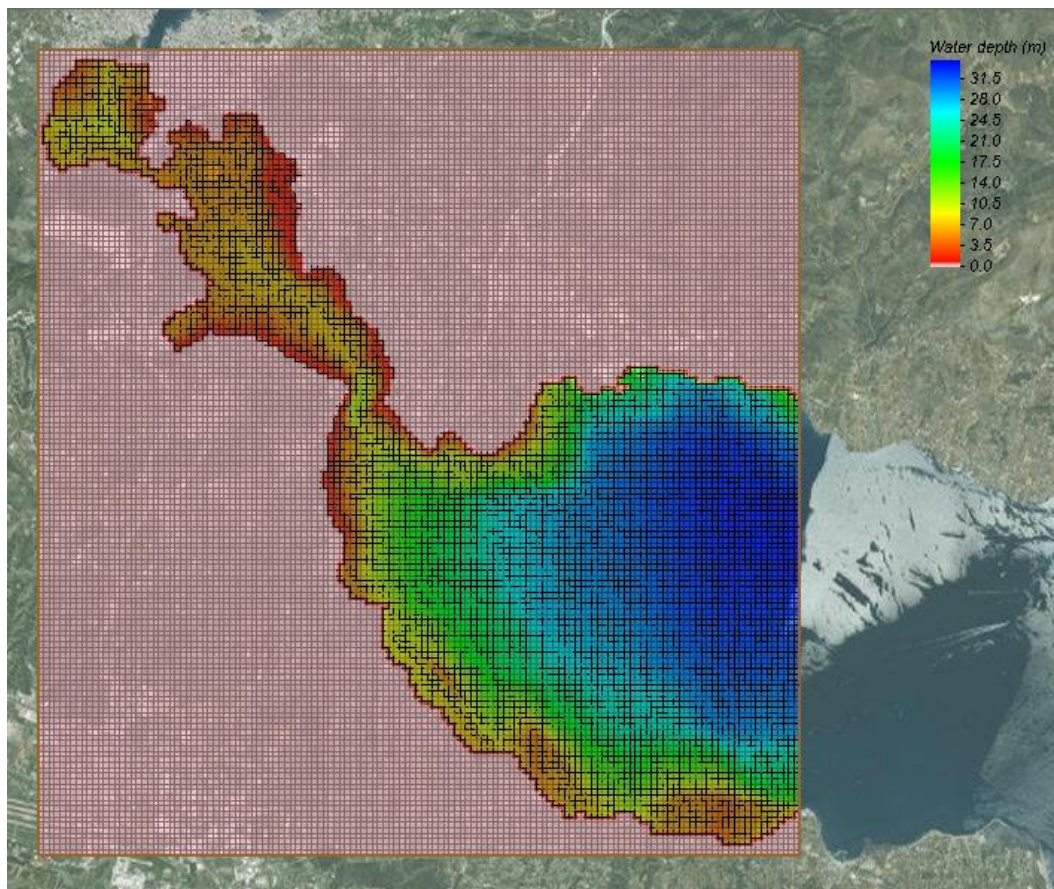
**Εικόνα 4.6:** Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό Telemac-Mascaret



**Εικόνα 4.7:** Βαθυμετρία περιοχής μελέτης στο λογισμικό Telemac-Mascaret



Εικόνα 4.8: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων στο λογισμικό CMS-Flow και CMS-Wave

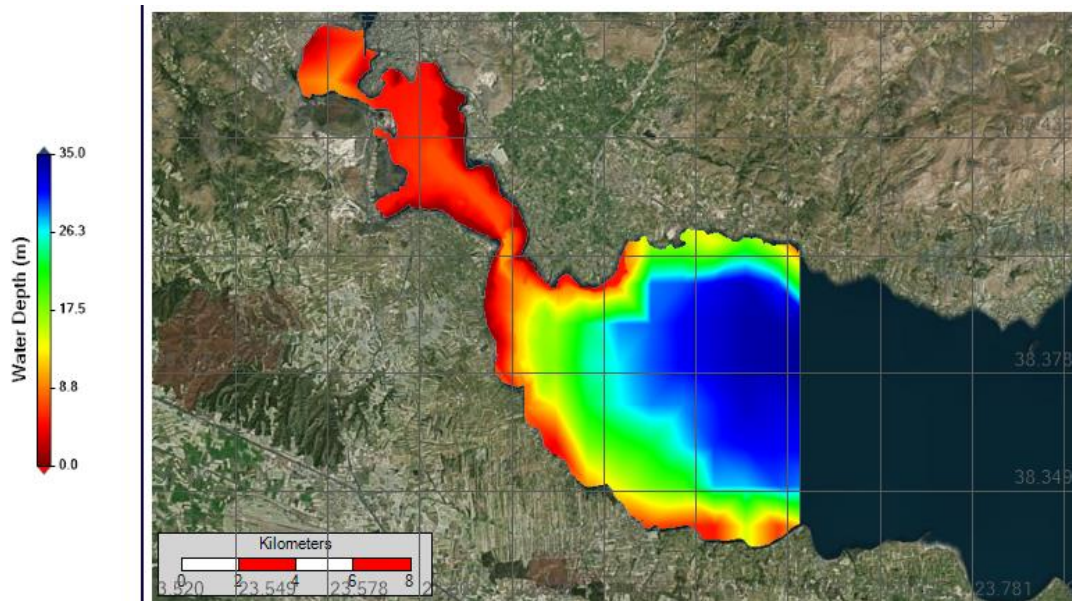


Εικόνα 4.9: Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης στο λογισμικό CMS-Flow και CMS-Wave

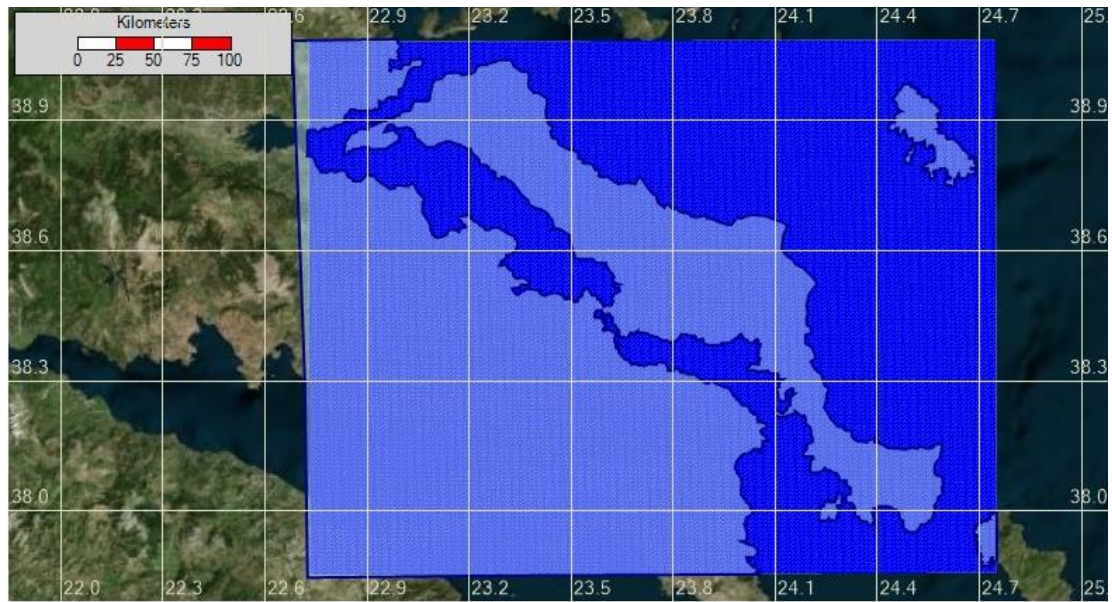




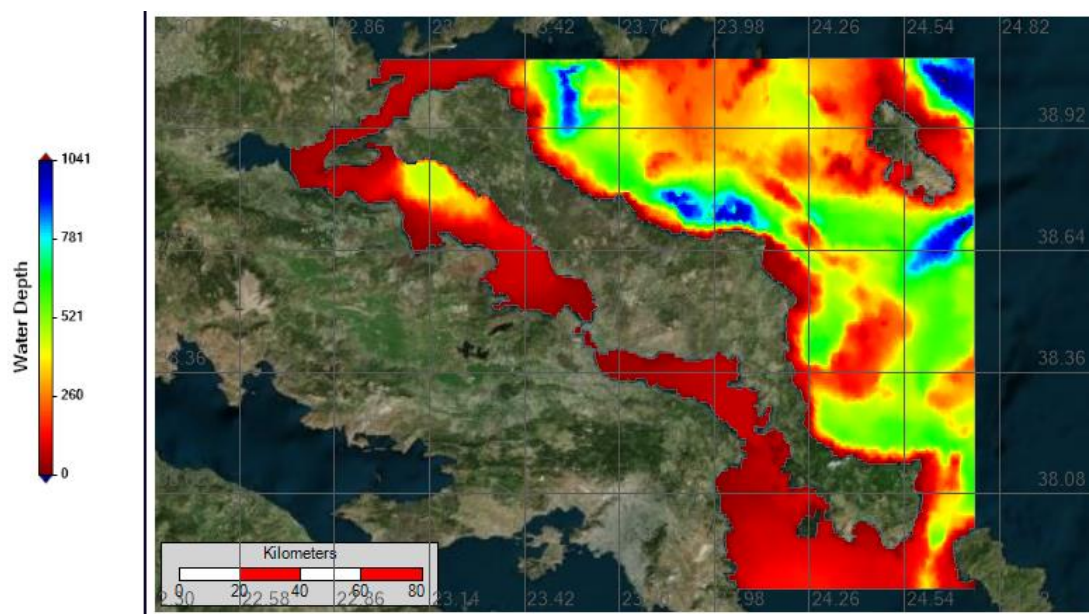
Εικόνα 4.10: Μικρός κάναβος στο λογισμικό Mohid Studio (δεν περιέχονται πολύγωνα που δεν υπολογίζεται βαθυμετρία)



Εικόνα 4.11: Βαθυμετρία της περιοχής μελέτης στο λογισμικό Mohid Studio



Εικόνα 4.12: Κάναβος πεπερασμένων στοιχείων της διευρυμένης περιοχής (περιέχονται πολύγωνα που δεν υπολογίζεται βαθυμετρία)



Εικόνα 4.13: Βαθυμετρία διευρυμένης περιοχής μελέτης στο λογισμικό Mohid Studio

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι σε κάθε λογισμικό χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων. Συγκεκριμένα, στο λογισμικό Telemac-Mascaret χρησιμοποιήθηκε το σύστημα συντεταγμένων UTM (Universal Transverse Mercator) σε προβολή WGS '84, στο λογισμικό SMS το Εθνικό σύστημα συντεταγμένων (Greek Grid) σε προβολή ΕΓΣΑ '87 και στο λογισμικό Mohid Studio το γεωγραφικό σύστημα συντεταγμένων (Geographic Coordinate System) σε προβολή WGS'84. Ο λόγος για αυτές τις επιλογές συντεταγμένων οφείλεται στη χρησιμοποίηση βάσεων δεδομένων για τον υπολογισμό των συστατικών στοιχείων της παλίρροιας. Στο CMS-Flow αξιοποιήθηκαν στοιχεία ανύψωσης της θαλάσσιας

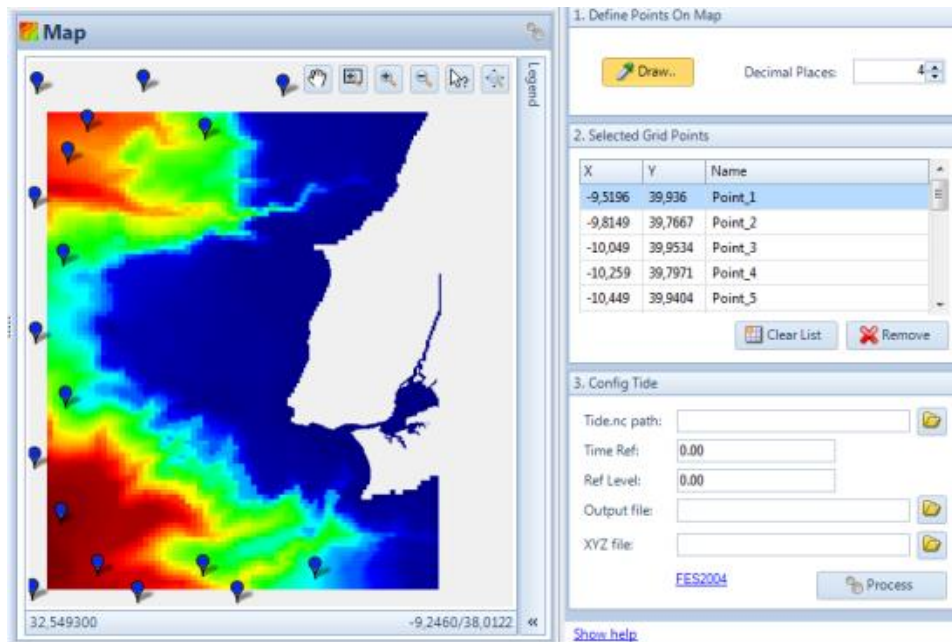
επιφάνειας που χορηγήθηκαν από την Υδρογραφική υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού από τον παλιρροιογράφο που είναι τοποθετημένος στη νότια πλευρά του λιμένα της Χαλκίδας. Τα δεδομένα που χορηγήθηκαν καταχρηστικά τέθηκαν σαν οριακή συνθήκη στο ανοιχτό όριο της περιοχής μελέτης με τη μορφή χρονοσειράς. Αυτή η απλοποιητική παραδοχή γίνεται καθώς αυτός ο παλιρροιογράφος είναι ο κοντινότερος στην περιοχή μελέτης και τα παλιρροιακά φαινόμενα αναμένεται να μην μεταβάλλονται σημαντικά σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων. Στα άλλα δύο λογισμικά εκμεταλλεύτηκε η δυνατότητα σύνδεσης με δυναμικές βάσεις δεδομένων για την εκτίμηση της παλίρροιας στην περιοχή μελέτης. Αυτές είναι η TPXO για το πρόγραμμα Telemac-Mascaret και η FES (Finite Element Solution) της Aviso για το λογισμικό Mohid Studio. Απαιτείται όμως η περιοχή μελέτης να βρίσκεται σε παγκόσμιο σύστημα συντεταγμένων, και όχι τοπικό όπως το Εθνικό Σύστημα, ώστε να γίνει η σύνδεση με τα στοιχεία των βάσεων δεδομένων. Ειδικότερα η βάση TPXO απαιτεί το σύστημα συντεταγμένων να είναι το UTM ή το γεωγραφικό, ενώ η βάση FES απαιτεί αυστηρά το σύστημα συντεταγμένων να είναι το γεωγραφικό (Πίνακας 4.1).

**Πίνακας 4.1: Χρησιμοποιούμενο σύστημα συντεταγμένων για κάθε πλατφόρμα λογισμικών**

Πλατφόρμα λογισμικών	Telemac-Mascaret	SMS	Mohid Studio
Σύστημα συντεταγμένων	UTM (34-N)	Greek Grid	WGS '84

Στο Telemac η βάση δεδομένων για δεδομένα παλίρροιας TPXO ενεργοποιείται όταν η λέξη κλειδί TIDAL DATABASE λαμβάνει την τιμή 2. Στον ίδιο φάκελο που βρίσκεται το αρχείο οδήγησης του Telemac πρέπει να βρίσκονται αρχεία που περιέχουν τις ταχύτητες και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της βάσης TPXO ώστε αυτές οι τιμές να χρησιμοποιηθούν σαν παράμετροι εισόδου στο Telemac.

Στο Mohid Studio υπάρχει ενσωματωμένο εργαλείο που ονομάζεται Tidal Tool, και επιτρέπει να καθοριστούν σημεία στο ελεύθερο όριο της περιοχής μελέτης, στα οποία και θα γίνει ο υπολογισμός των συστατικών της παλίρροιας. Τα σημεία προτείνεται να καθορίζονται εναλλάξ σε μορφή «zig-zag» εντός και εκτός του κανάβου πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια καθορίζεται η θέση του αρχείου της βάσης δεδομένων FES και τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε έγγραφο κειμένου με τη γεωγραφική θέση κάθε σημείου με τα αντίστοιχα συστατικά παλίρροιας. Παράδειγμα χρήσης και καθορισμού των σημείων μέσω του Tidal Tool δίνονται στην εικόνα 4.14.



Εικόνα 4.14: Χρήση του εργαλείου Tidal Tool στο Mohid Studio

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στο λογισμικό Telemac-Mascaret χρησιμοποιήθηκε κανάβος με τριγωνικά στοιχεία (flexible mesh), σε αντίθεση με τα άλλα δύο λογισμικά που χρησιμοποιήθηκε ορθογωνικός κανάβος με τετραγωνικά στοιχεία (structured grid). Το πλεονέκτημα στην πρώτη περίπτωση είναι ότι δύναται να χρησιμοποιηθούν στοιχεία μεγαλύτερου μεγέθους στην περιοχή των βαθιών νερών ενώ κοντά στην ακτογραμμή να γίνει πυκνώση των στοιχείων. Για να γίνει εμφανές το φαινόμενο της θραύσης στο Telemac, πρέπει το μέγεθος των στοιχείων να είναι της τάξης των 1-2 m. Στην παρούσα διπλωματική το μέγεθος των πιο πυκνών στοιχείων επιλέχθηκε να είναι 2 m. Αντίθετα τα λογισμικά CMS-Wave και Swan, που αναλαμβάνουν την προσομοίωση της διάδοσης του κύματος, μιας και είναι προγραμματισμένα να επιλύουν την εξίσωση της κυματικής δράσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, απαιτούν εξ ορισμού τη χρήση κανάβου με τετραγωνικά στοιχεία. Μειονέκτημα αυτού του τύπου κανάβων είναι ότι δε γίνεται να χρησιμοποιηθούν στοιχεία μεταβλητού μεγέθους. Αντίστοιχα η χρησιμοποίηση στοιχείων μικρού μεγέθους (ακόμα και της τάξης των 10 m για τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης) θα αύξανε σε πολύ μεγάλο βαθμό το υπολογιστικό κόστος. Συμπερασματικά, ο τριγωνικός κανάβος προσφέρει καλύτερη απεικόνιση της ακτογραμμής και των έργων που πιθανώς υπάρχουν, με το μειονέκτημα ότι απαιτείται ένας πολύ μεγάλος χρόνος προσομοίωσης. Αντίθετα, στους κανάβους με τετραγωνικά στοιχεία ναί μεν ο υπολογιστικός χρόνος είναι πολύ μικρότερος, όμως κοντά στην ακτογραμμή δε γίνεται να περιγραφεί με μεγάλη ακρίβεια η μεταβολή διάφορων φαινομένων λόγω της ύπαρξης έργων.

Ο κανάβος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε στο λογισμικό Telemac και στα μοντέλα του κατασκευάστηκε στο εύχρηστο περιβάλλον Mesh Generator του λογισμικού Mike21 που αναπτύχθηκε από την εταιρεία DHI, στο Εθνικό σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87. Στη συνέχεια αυτός ο κανάβος εισήχθη στο λογισμικό SMS όπου έγινε μετατροπή στο σύστημα συντεταγμένων UTM (Zone 34 N) σε

προβολή WGS'84, και τέλος μεταφέρθηκε στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού Blue Kenue όπου έγινε η προετοιμασία των αρχείων για την εκτέλεση του Telemac.

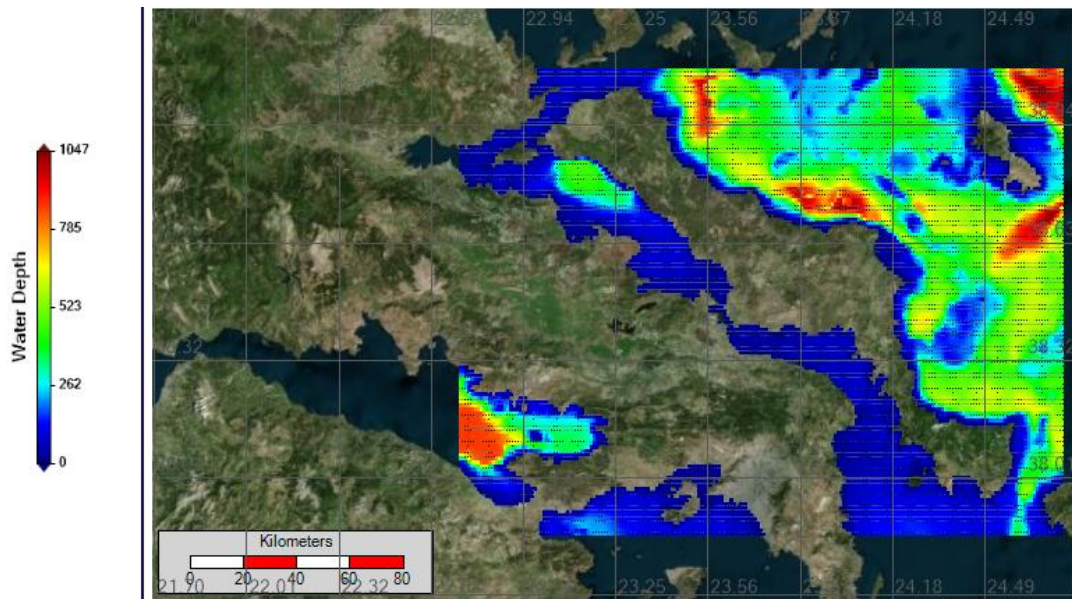
Στα λογισμικά CMS-Wave (και CMS-Flow) καθώς και στο Mohid Studio ο κανάβος πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάζεται στο γραφικό περιβάλλον που προσφέρεται στην εκάστοτε πλατφόρμα.

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά στοιχεία για τους κανάβους που κατασκευάστηκαν.

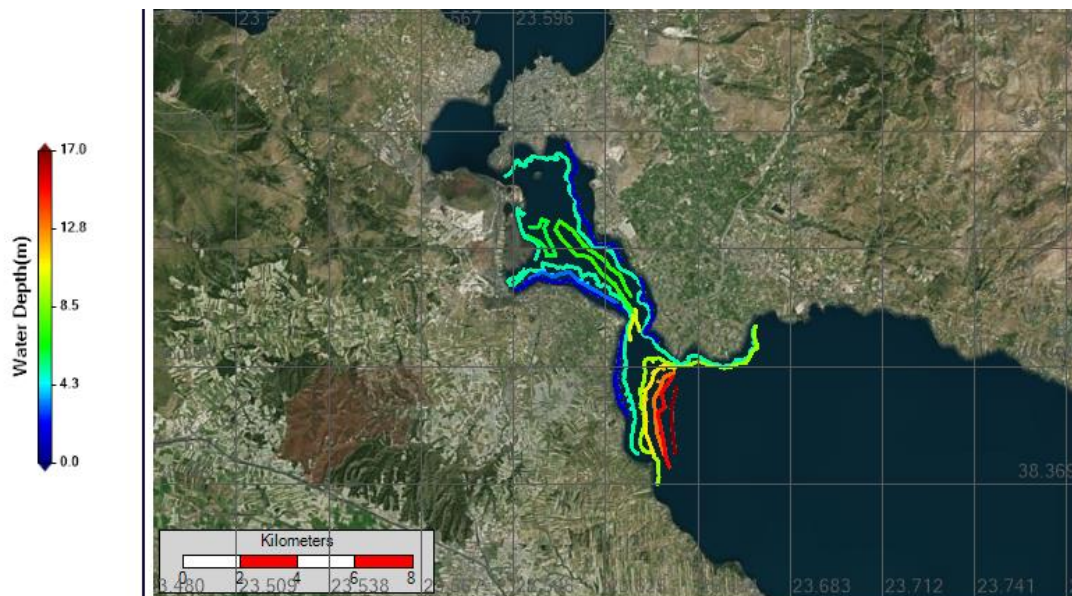
**Πίνακας 4.2: Στοιχεία κανάβων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε λογισμικό**

	Telemac-Mascaret	CMS-Wave/CMS-Flow	Mohid Studio	
			Μικρός κανάβος	Μεγάλος κανάβος
<b>Είδος κανάβου</b>	Flexible Mesh	Structured grid	Structured grid	Structured grid
<b>Είδος στοιχείων</b>	Τριγωνικά (3-noded triangles)	Τετραγωνικά	Τετραγωνικά	Τετραγωνικά
<b>Μέγιστο μέγεθος στοιχείων</b>	500x500 m <sup>2</sup>	100x100 m <sup>2</sup>	0.00025°x0.00025° (28x28 m <sup>2</sup> )	0.005°x0.005° (557x557m <sup>2</sup> )
<b>Ελάχιστο μέγεθος στοιχείων</b>	2x2 m <sup>2</sup>	100x100 m <sup>2</sup>	0.00025°x0.00025° (28x28 m <sup>2</sup> )	0.005°x0.005° (557x557m <sup>2</sup> )

Τα βαθυμετρικά δεδομένα της περιοχής αποκτήθηκαν από την ιστοσελίδα της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Πολεμικού Ναυτικού όπου διατίθεται αρχείο σε ψηφιακή μορφή ελεύθερης πρόσβασης, με μοντέλο του βυθού (DTM) του ελλαδικού χώρου σε ανάλυση 15''. Επειδή στην περιοχή μελέτης απαιτήθηκε ακριβέστερη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τους χάρτες Navionics για την περιοχή σε κλίμακα 1:25000. Οι ισοβαθείς των χαρτών εισήχθησαν στο λογισμικό Autocad της Autodesk με τη μορφή polylines και σαν αποτέλεσμα ήταν ένα ακόμη αρχείο με βαθυμετρικά δεδομένα. Στις επόμενες εικόνες (4.15-4.16) παρουσιάζονται τα βαθυμετρικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και ήταν κοινά για όλα τα λογισμικά, με εξαίρεση το διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων.



Εικόνα 4.15: Ψηφιακά δεδομένα βαθυμετρίας του Ελληνικού χώρου στην ευρύτερη περιοχή του Ευβοϊκού κόλπου



Εικόνα 4.16: Δεδομένα βαθυμετρίας για την περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού κόλπου, τροποποιημένα από χάρτες Navionics

## 4.2 Ανεμολογικά δεδομένα, κυματικό κλίμα και δεδομένα στάθμης θάλασσας

Τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα προέρχονται από το σταθμό της Χαλκίδας της ΕΜΥ, με διαθέσιμες μετρήσεις για την περίοδο 1974-1997 και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Οι επικρατούσες διευθύνσεις ανέμου που πνέουν στο Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο είναι η Βόρεια, η Βορειοανατολική αλλά και η Νοτιοδυτική.

Πίνακας 4.3: Μέσες ετήσιες συχνότητες πνοής ανέμων

Όνομα Σταθμού Χαλκίδα		Κωδικός Σταθμού 16697		Γεωγ. Μήκος Σταθμού 24			Γεωγ. Πλάτος Σταθμού 38			Περίοδος 1/1/1974 ΕΩΣ 31/12/1997	
Διεύθυνση Ανέμου		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CLM	ΑΘΡΟΙΣΜΑ
Beaufort	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.99	3.99
Beaufort	1	18.82	5.06	1.93	1.79	0.96	2.57	2.34	4.66	0.00	38.11
Beaufort	2	10.78	5.61	1.18	2.23	1.49	2.57	1.63	5.35	0.00	30.85
Beaufort	3	5.53	3.65	0.59	1.09	0.80	0.95	0.75	3.85	0.00	17.22
Beaufort	4	2.66	1.71	0.23	0.33	0.14	0.47	0.26	1.74	0.00	7.53
Beaufort	5	0.53	0.45	0.04	0.10	0.00	0.07	0.12	0.41	0.00	1.72
Beaufort	6	0.09	0.14	0.01	0.01	0.00	0.01	0.04	0.10	0.00	0.39
Beaufort	7	0.03	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.06
Beaufort	8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Beaufort	>= 9	0.06	0.04	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.13
ΑΘΡΟΙΣΜΑ		38.50	16.67	3.97	5.56	3.40	7.16	5.13	16.13	3.99	100.00

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, 2017).

Για τον υπολογισμό του κυματικού κλίματος στα ανοιχτά της θαλάσσιας περιοχής της Αυλίδας γίνεται η εκτίμηση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος  $H_s$  και της περιόδου κύματος  $T_s$  του χαρακτηριστικού κύματος ως μονοσήμαντες συναρτήσεις της ταχύτητας  $U$  του ανέμου, του αναπτύγματος πελάγους (fetch)  $F$  και της διάρκειας πνοής του ανέμου  $D$ , σύμφωνα με το μοντέλο SMB (Etemad Shahidi et al, 2009) που βασίζεται στις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0,283 \tanh(0,0125\Phi^{0,42}) \quad (4.1)$$

$$\frac{gT_s}{U} = 7,540 \tanh(0,077\Phi^{0,25}) \quad (4.2)$$

$$\frac{gD}{U} = 6,588 \exp((0,016(\ln \Phi)^2 - 0.0369(\ln \Phi) + 2,2024)^{0,5} + 0,8798(\ln \Phi)) \quad (4.3)$$

Επομένως υπολογίστηκε η ενεργός διαδρομή κυματισμών (effective fetch) για κάθε διεύθυνση ανέμου για την οποία είναι δυνατή η ανάπτυξη κυματισμού (κρίσιμες διευθύνσεις). Από τους υπολογισμούς προέκυψαν τα παρακάτω μήκη ενεργών αναπτυγμάτων του Πίνακα 4.4:

Πίνακας 4.4: Ενεργό ανάπτυγμα πελάγους ανά διεύθυνση πνοής ανέμου

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ	ΑΝΑΠΤΥΓΜΑ ΠΕΛΑΓΟΥΣ (km)
ΒΟΡΕΙΟΣ	1,688
ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ	3,424
ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ	14,588
ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ	11,854
ΝΟΤΙΟΣ	3,872

Οι άνεμοι που θεωρείται ότι επηρεάζουν τη διάδοση των κυματισμών στην περιοχή μελέτης είναι ο Βορειοανατολικός, ο Ανατολικός και ο Νοτιοανατολικός και για ενεργό μήκος ανάπτυξης κυματισμών  $\pm 45^\circ$ . Οι υπολογισμοί έγιναν για δύο ανεμολογικές συνθήκες:

- 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 παρακάτω πίνακες. Όπως αναμενόταν οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι σχετικά μικρές καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των αναπτυγμάτων πελάγους της περιοχής μελέτης είναι περιορισμένα από το μήκος του αναπτύγματος πελάγους. (fetch limited conditions)

Για αυτές τις διευθύνσεις ανέμου υπολογίστηκαν τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος και παρουσιάζονται στους επόμενους πίνακες (4.5 - 4.6).

Όπως αναμενόταν οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι σχετικά μικρές καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό των αναπτυγμάτων πελάγους της περιοχής μελέτης δεν περιορίζονται από τη διάρκεια πνοής ανέμου, και κάνουν δυνατή τη χρήση λογισμικών πεπερασμένων διαφορών.



Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη του κύματος για πραγματική διάρκεια πνοής ανέμου

<b>ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΝΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ</b>			
<b>ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ</b>		<b>FETCH = 3,424km</b>	
<b>Beaufort</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>L (m)</b>
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
<b>ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ</b>		<b>FETCH = 14,588 km</b>	
<b>Beaufort</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>L (m)</b>
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
<b>ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ</b>		<b>FETCH = 11,854km</b>	
<b>Beaufort</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>L (m)</b>
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 4.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη κύματος για άπειρη διάρκεια πνοής ανέμου

<b>ΑΠΕΙΡΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΠΝΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ</b>			
<b>ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ</b>		<b>FETCH = 3,424km</b>	
<b>Beaufort</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>L (m)</b>
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
<b>ΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ</b>		<b>FETCH = 14,588 km</b>	
<b>Beaufort</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>L (m)</b>
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
<b>ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ</b>		<b>FETCH = 11,854km</b>	
<b>Beaufort</b>	<b>Hs (m)</b>	<b>Ts (s)</b>	<b>L (m)</b>
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

Το κυματικό κλίμα της παράκτιας περιοχής του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου προσομοιώθηκε στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιώντας το μέσο ετήσιο ισοδύναμο

κυματισμό ανά διεύθυνση πνοής ανέμου (Βορειοανατολικού, Ανατολικού και Νοτιοανατολικού), Ο ισοδύναμος αυτός κυματισμός αντιπροσωπεύει την κυματική κατάσταση στην περιοχή σε ετήσια βάση. Συγκεκριμένα, έχοντας επιλεγεί ή υπολογιστεί η αντιπροσωπευτική περίοδος  $T_e$  [ $T_e = \frac{\sum T_i f_i}{\sum f_i}$ ] του ισοδύναμου κυματισμού για κάθε διεύθυνση πνοής, υπολογίστηκε το ύψος του ισοδύναμου κυματισμού  $H_e$  από τη μέση τετραγωνική τιμή των Borah και Balloffet, 1985:

$$H_e^2 T_e = \frac{\sum H_i^2 T_i f_i}{\sum f_i} \quad (4.1)$$

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 την σχετική διεύθυνση. Ουσιαστικά ο ισοδύναμος κυματισμός είναι ο κυματισμός που εμφανίζεται με συχνότητα  $f = \sum f_i$  και έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο ίσο με το σύνολο των κυματισμών των διαφόρων εντάσεων του σχετικού τομέα (διεύθυνσης πνοής ανέμου).

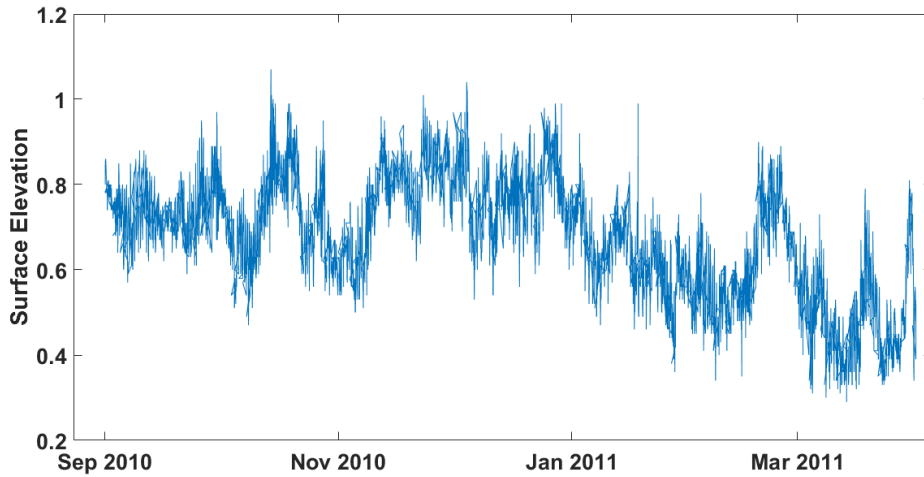
Σύμφωνα με τα παραπάνω συνοψίζονται ανά διεύθυνση πνοής ανέμου στον πίνακα 4.7 τα εξής χαρακτηριστικά ισοδύναμων κυματισμών.

**Πίνακας 4.7: Ισοδύναμο κυματικό κλίμα για την περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού Κόλπου**

$H_e$ (m)	$T_e$ (s)	Διεύθυνση (°) (nautical convention)	Ποσοστό εμφάνισης (%)
0.44	2.2	45	67
0.65	3.0	90	12.5
0.71	3.2	135	20.5

Τα ποσοστά εμφάνισης χρησιμοποιούνται ώστε με την κατάλληλη μετατροπή να αντιστοιχιστεί το ισοδύναμο κυματικό κλίμα που αναφέρεται σε ένα χρόνο, στη χρονική διάρκεια της εκάστοτε προσομοίωσης.

Τα δεδομένα παλίρροιας που χορηγήθηκαν από την Υδρογραφική υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού προέρχονται από το σταθμηγράφο που είναι τοποθετημένος στο νότιο τμήμα του Λιμένα της Χαλκίδας, και όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση με το μοντέλο CMS-Flow. Τα δεδομένα καλύπτουν την περίοδο Σεπτεμβρίου 2010 – Μαρτίου 2011. Όλες οι τιμές αναφέρονται σε μέτρα, ενώ το μηδέν του παλιρροιομέτρου συμπίπτει με το μηδενικό επίπεδο αναφοράς (Κατωτάτη Ρηχία) και είναι συνδεδεμένο με τοπικό δίκτυο χωροστάθμησης. Η σχηματική απεικόνιση των μετρήσεων παρουσιάζεται στην εικόνα 4.17.



Εικόνα 4.17: Αποτύπωση της ανύψωσης της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας για το λιμένα της Ν. Χαλκίδας με χρήση του λογισμικού Matlab

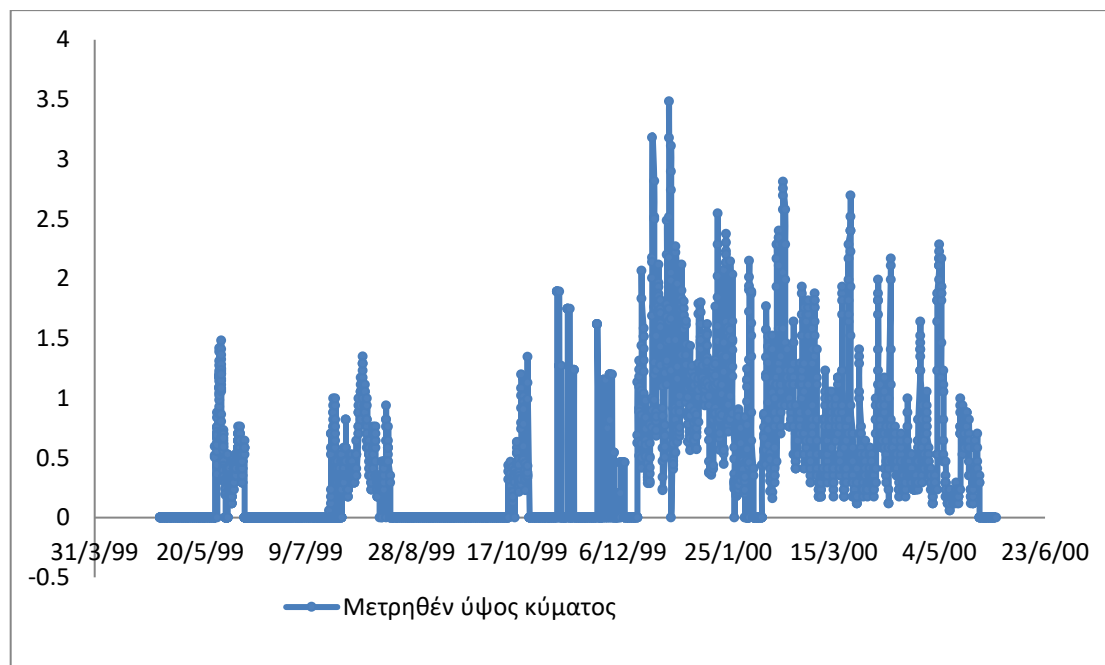
### 4.3 Βασικές παράμετροι εισόδου/υπολογισμού της μελέτης

Για την προσομοίωση των ακτομηχανικών διεργασιών στην περιοχή του Νότιου Ευβοϊκού κόλπου, όπως προαναφέρθηκε χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά λογισμικά. Για το λόγο αυτό στον Πίνακα 4.8 δίνονται οι βασικές παράμετροι εισόδου για καθένα από αυτά.

Πίνακας 4.8: Βασικές παράμετροι υπολογισμού σε κάθε λογισμικό

	Telemac-Mascaret	CMS-Wave/CMS-Flow	Mohid Studio
	Γενικές παράμετροι		
Διάρκεια προσομοίωσης	1 ημέρα	6 ημέρες	1 ημέρα
Χρονικό βήμα	2 sec	2 sec	5 sec
Άνεμος	✓	✓	✓
Παλίρροια	✓	✓	✓
	Κυματικό κλίμα		
Φάσμα υπολογισμού	Jonswap	Jonswap	Jonswap
Ανάκλαση	✗	✓	✗
Περίθλαση	✗	✓	✓
	Υδροδυναμική		
Δύναμη Coriolis	✓	✓	✓
Αλληλεπίδραση ρευμάτων-κυμάτων	✓	✓	✓
Τριβή πυθμένα	✓	✓	✓
	Στερεομεταφορά		
Συνεκτικό ίζημα	✗	✗	✗
D <sub>50</sub>	0.3 mm	0.3 mm	0.3 mm
Μέθοδος υπολογισμού	Bijker	Lund-Cirp	Bijker
Morphological scale factor	364	61	364

Ο κάρναβος για την μεγαλύτερη περιοχή μελέτης κατασκευάστηκε προκειμένου να συγκριθούν πραγματικά δεδομένα που αποκτήθηκαν από μετρητή του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) που είναι τοποθετημένος στο νησί της Σύρου με τα δεδομένα που υπολογίστηκαν από τη μέθοδο SMB. Οι τιμές του ύψους κύματος από τον προαναφερθέντα μετρητή παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.18.



Εικόνα 4.18: Μετρηθέν ύψος κύματος από μετρητή του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. ανοιχτά του νησιού της Σύρου

Οι μετρήσεις του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε. περιέχουν δεδομένα ανά 3 ώρες, δεν παρέχουν τη διεύθυνση προέλευσης του κύματος, ενώ στο διάγραμμα με την τιμή μηδέν (0) υποδηλώνεται ότι ο μετρητής δε λειτουργούσε τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο .

Στην παρούσα διπλωματική εκμεταλλεύτηκε η δυνατότητα του SWAN της επίλυσης ταυτόχρονα σε μεγαλύτερης και σε μικρότερης κλίμακας κάρναβος (nesting). Σαν ένα πιο δυσμενές σενάριο, θεωρείται ότι στο ανοιχτό όριο του μεγαλύτερης κλίμακας κάρναβου επιβάλλεται κύμα με τη μεγαλύτερη μετρημένη τιμή ( $H_0=3.5$  m). Γίνεται επίσης η παραδοχή ότι μιας και βρισκόμαστε σε περιοχή βαθέων υδάτων, τα κυματικά χαρακτηριστικά δεν αποσβένουν σε μεγάλο βαθμό. Επομένως ακόμα και αν το ανατολικό ανοιχτό όριο του κάρναβου δεν βρίσκεται ακριβώς στη θέση του μετρητή, δεν απέχει πολύ από την πραγματικότητα να θεωρηθεί ότι και στο ανατολικό όριο το ύψος κύματος είναι περίπου 3.5 m. Τα αποτελέσματα της παραπάνω δοκιμαστικής ανάλυσης θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο.

Το λογισμικό Delft3D, που αναπτύχθηκε στο ινστιτούτο Deltares, χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και βασίζεται για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών στο μοντέλο SWAN, ενώ το μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς είναι το Delft3D-Flow. Οι εξισώσεις που βασίζεται το μοντέλο Delft3D-Flow είναι οι εξισώσεις Saint-Venant (με δυνατότητα προσθήκης των κατάλληλων όρων μη υδροστατικής κατανομής πίεσης Boussinesq). Είναι σχεδόν όμοιο με το λογισμικό Mohid Studio, μόνο που τα εργαλεία που χρησιμοποιεί για την

οπτικοποίηση αποτελεσμάτων δεν κρίνονται το ίδιο ικανοποιητικά. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση στο Delft3D-Flow παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

## 5. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε κάθε λογισμικό για το κυματικό κλίμα, την κατανομή των ταχυτήτων και τη στερεομεταφορά. Όπως έχει ήδη αναλυθεί εκτενέστερα στο κεφάλαιο 3, η βασική αρχή λειτουργίας των λογισμικών αυτών είναι η ανταλλαγή αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων. Συγκεκριμένα αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση για το κυματικό μοντέλο, οι δεδομένες τάσεις ακτινοβολίας εισάγονται στο μοντέλο υδροδυναμικής, όπου υπολογίζονται οι ταχύτητες ροής και στη συνέχεια η μεταφορά ιζήματος ως φορτίο πυθμένα ή φορτίο σε αιώρηση. Μια αντίστοιχη αλληλουχία θα ακολουθηθεί και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, αρχικά θα παρουσιαστεί η χωρική κατανομή των ισοδύναμων κυματισμών, στη συνέχεια το υδροδυναμικό κλίμα σε όρους ταχυτήτων στη διεύθυνση  $x$  και  $y$ , και τέλος η στερεομεταφορά και η εξέλιξη του πυθμένα με την πάροδο του χρόνου.

Ιδιαίτερη έμφαση στην παρουσίαση των μεγεθών της κατανομής ταχυτήτων και της στερεομεταφοράς θα γίνει στο σημείο της περιοχής μελέτης που βρίσκεται ο παραλιακός δρόμος και στο σημείο όπου υπάρχει μια σειρά προβόλων κατασκευασμένων σε παλαιότερη εποχή.

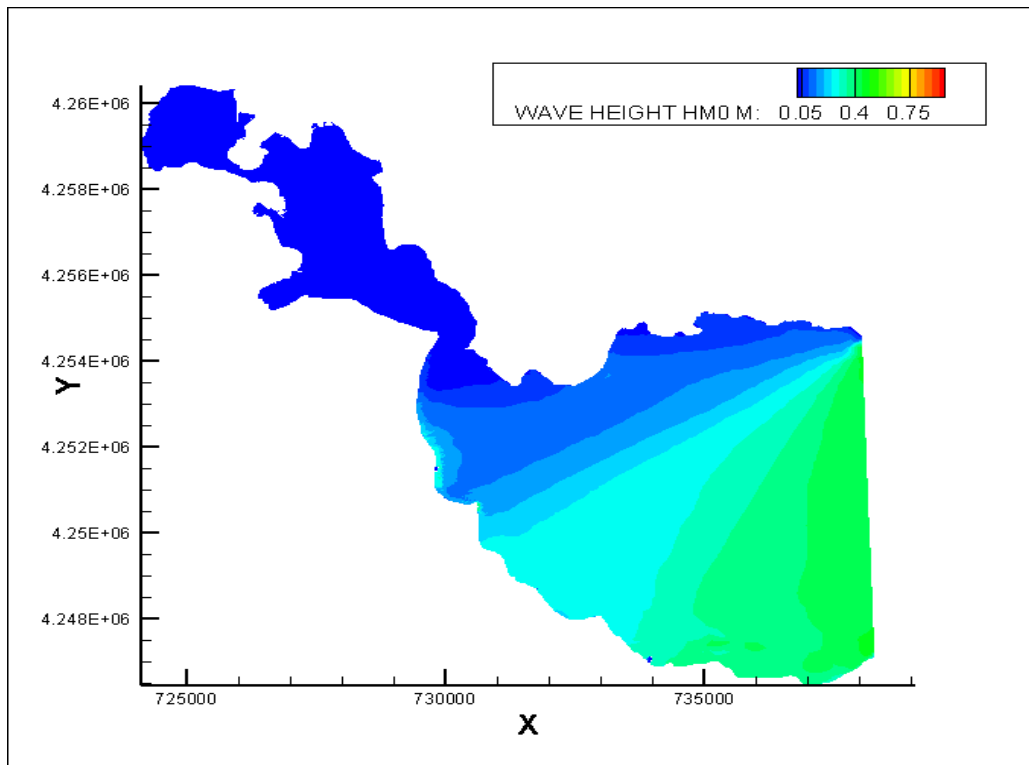
Να διευκρινιστεί πως το κάθε υποπρόγραμμα των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού κι άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών, ωστόσο για καλύτερη εποπτεία και κατανόηση επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν τα ανωτέρω για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας σε αυτό το κεφάλαιο, πολλά από αυτά τα μεγέθη παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

### 5.1 Αποτελέσματα Telemac-Mascaret

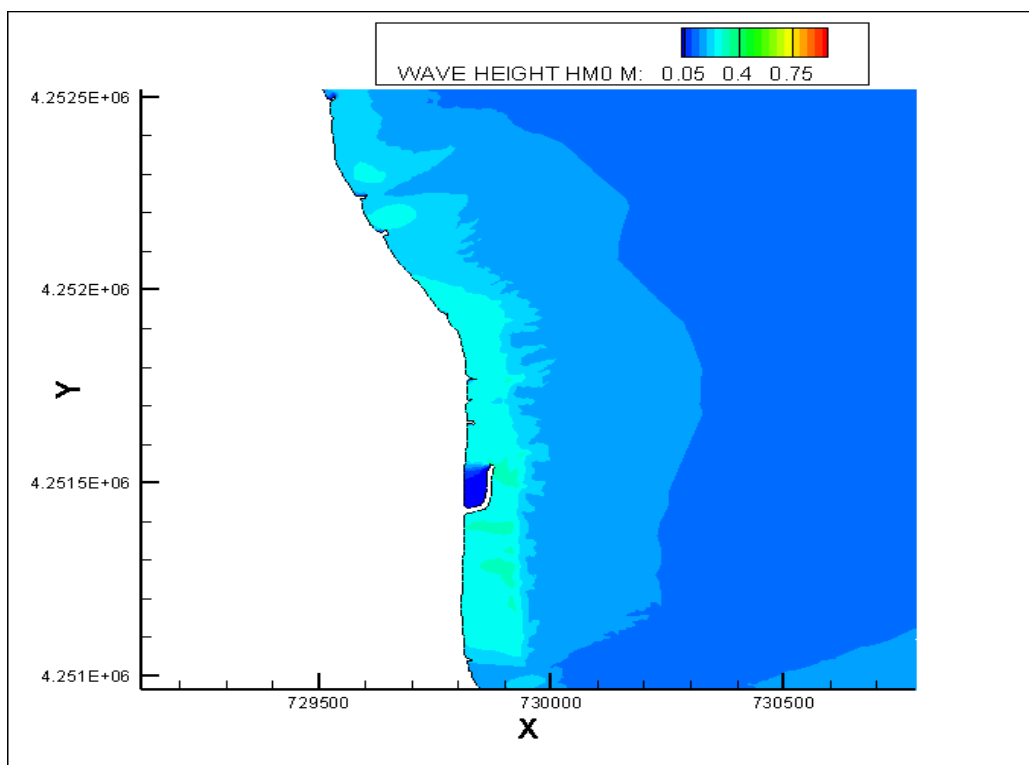
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις του λογισμικού Telemac-Mascaret θα γίνει στο λογισμικό Tecplot της Genias Graphics, που είναι πιο εύχρηστο στην οπτικοποίηση αποτελεσμάτων μη διανυσματικών μεγεθών και στο Blue Kenue που είναι πιο κατάλληλο για παρουσίαση διανυσματικών μεγεθών.

Στα σχήματα 5.1-5.3 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του ισοδύναμου κυματισμού στην περιοχή μελέτης. Στη συνέχεια, στα σχήματα 5.1α-5.3α γίνεται μια εστίαση στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων. Αυτό γίνεται για να δειχθεί πως παρόλο που δεν λαμβάνονται υπ' όψη φαινόμενα περίθλασης και ανάκλασης στο Tomawac, παρατηρούμε μια εικόνα κατανομής του κύματος που μοιάζει πολύ με την αντίστοιχη που θα προέκυπτε αν αυτά τα φαινόμενα είχαν ληφθεί υπ' όψη. Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των ταχυτήτων, ενώ παρατηρούμε ότι σημαντικό μέρος της κυκλοφορίας παρουσιάζεται στην περιοχή της παραλίας της Αυλίδας, στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου, στην περιοχή που έχουν κατασκευαστεί οι πρόβολοι και στο νότιο όριο της περιοχής μελέτης. Οι ταχύτητες στην περιοχή μελέτης κυμαίνονται από 0 – 0.37 m/s. Στα σχήματα 5.4α-5.4γ εστιάζουμε στις ταχύτητες που εμφανίζονται στις προαναφερθείσες περιοχές. Τέλος η στερεομεταφορά παρουσιάζεται στα σχήματα 5.5 και 5.5α - 5.5γ κατ' αντιστοιχία με τα προηγούμενα, ενώ στα σχήματα 5.6 και 5.6α-5.6γ παρουσιάζεται η εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης, δηλαδή μετά από ένα χρόνο, που επετεύχθη χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης.

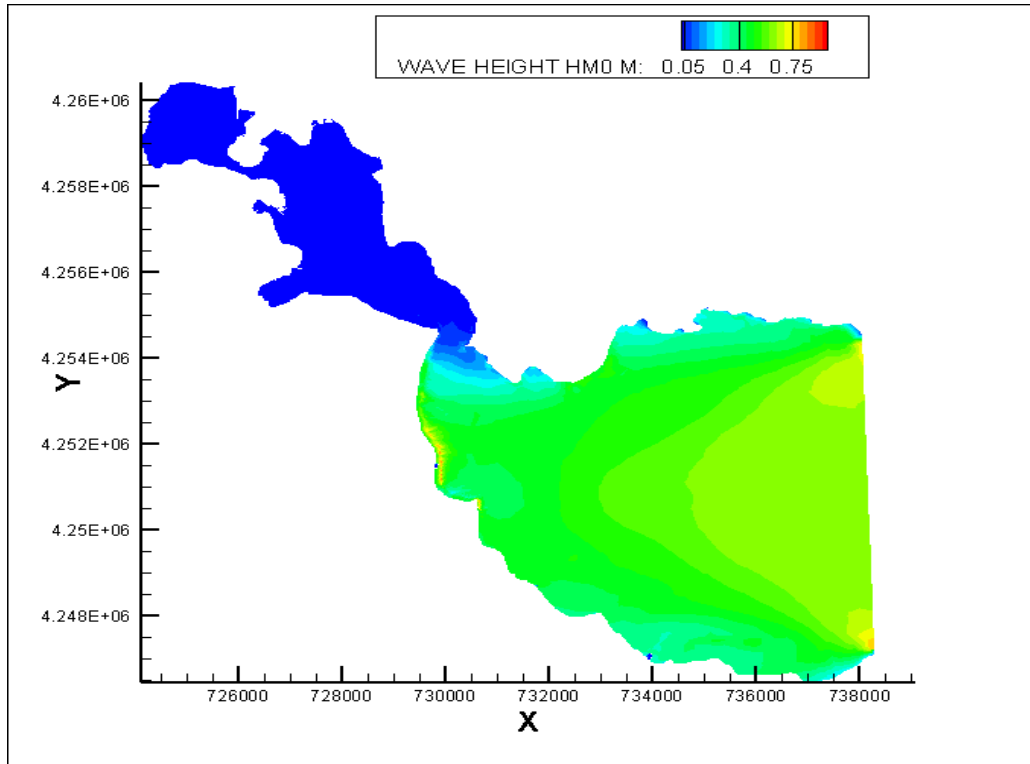




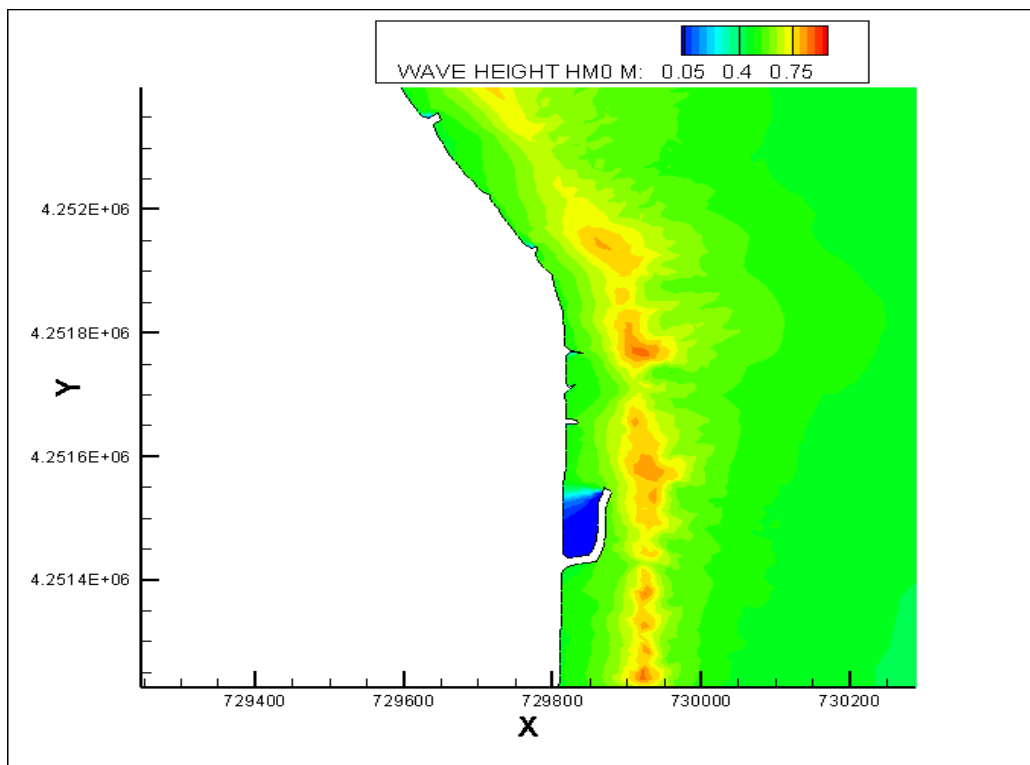
Σχήμα 5.1: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον ΒΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο Tomawac



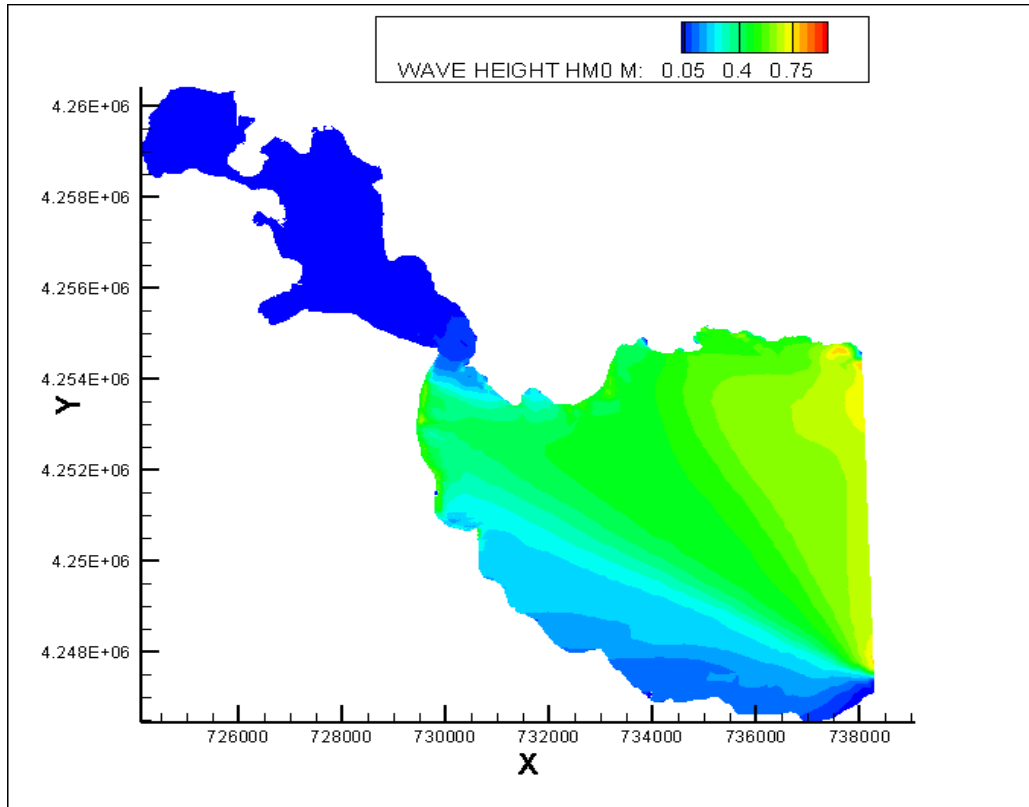
Σχήμα 5.1: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον ΒΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων στο μοντέλο Tomawac



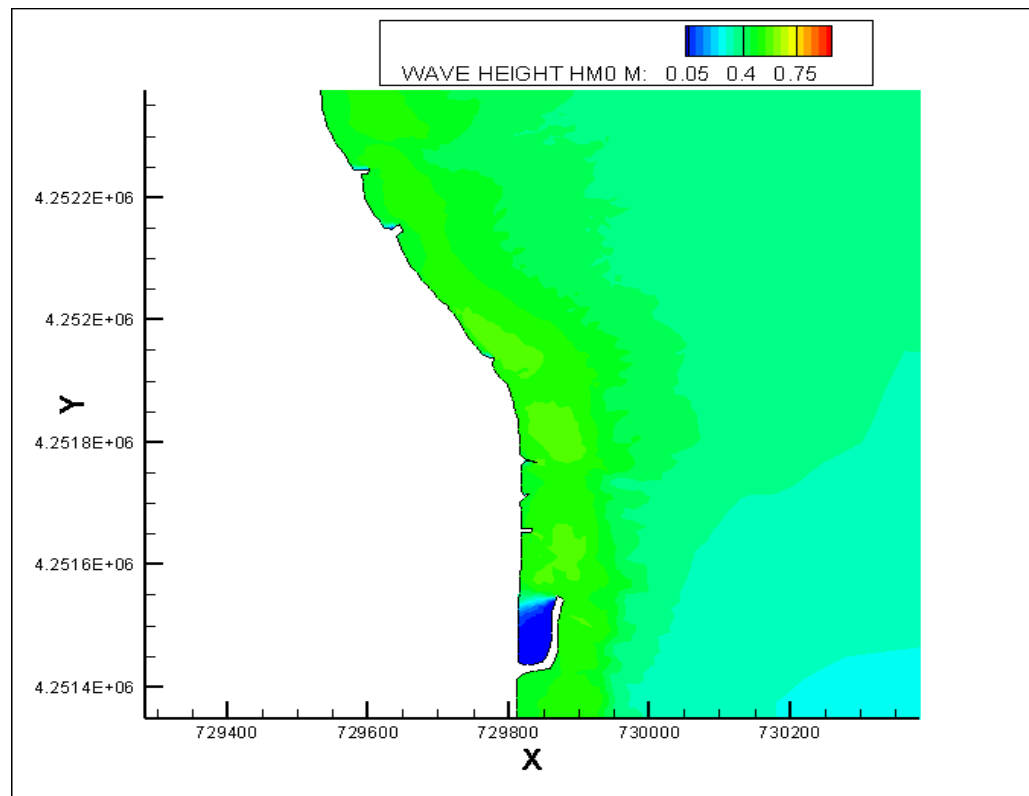
Σχήμα 5.2: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο Tomawac



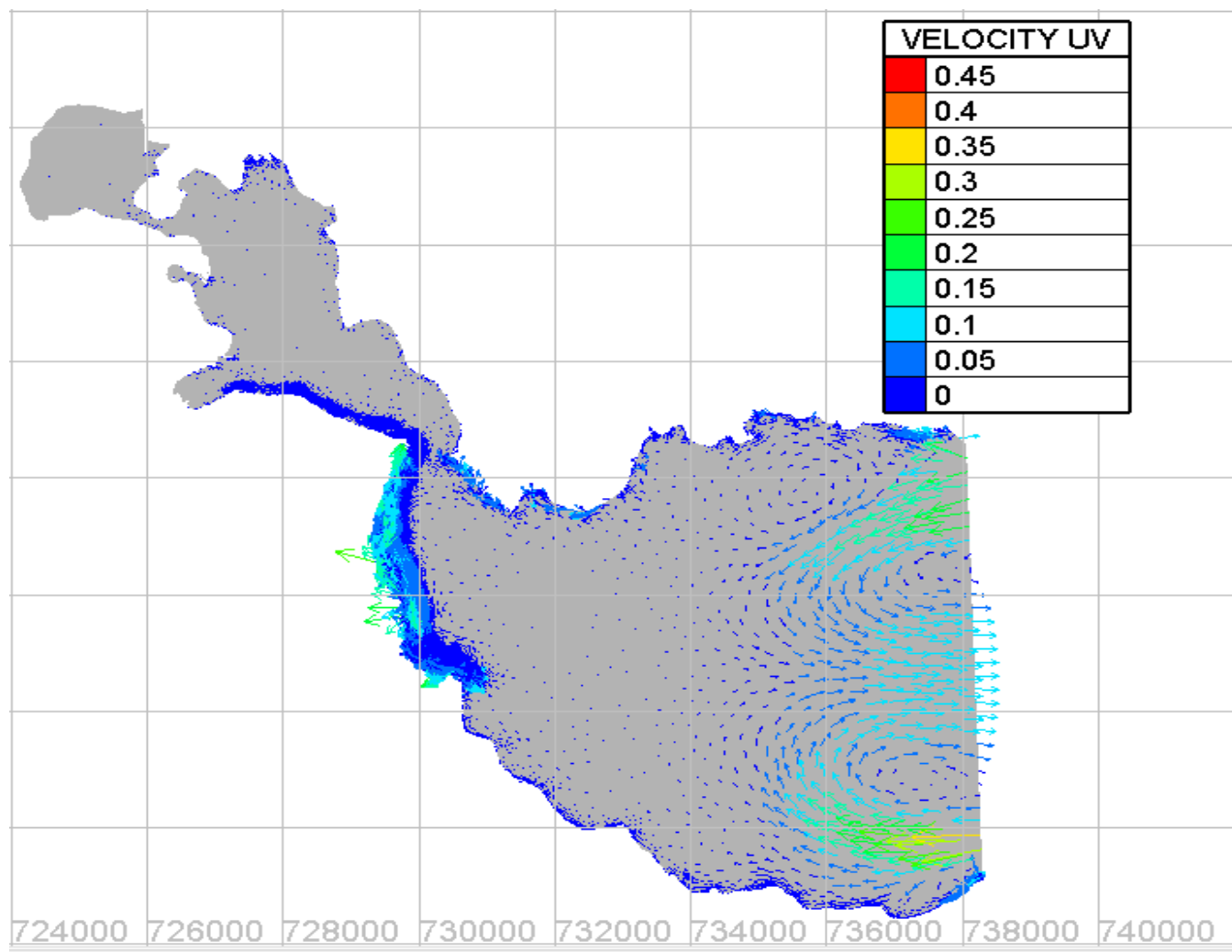
Σχήμα 5.2α: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων στο μοντέλο Tomawac



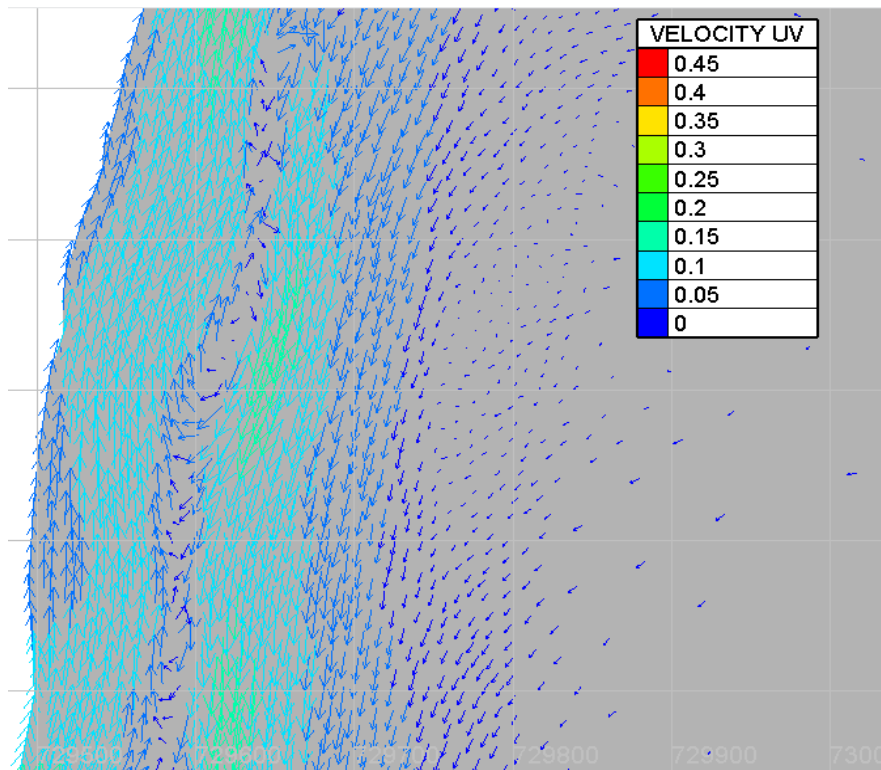
Σχήμα 5.3: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον NA κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο Tomawac



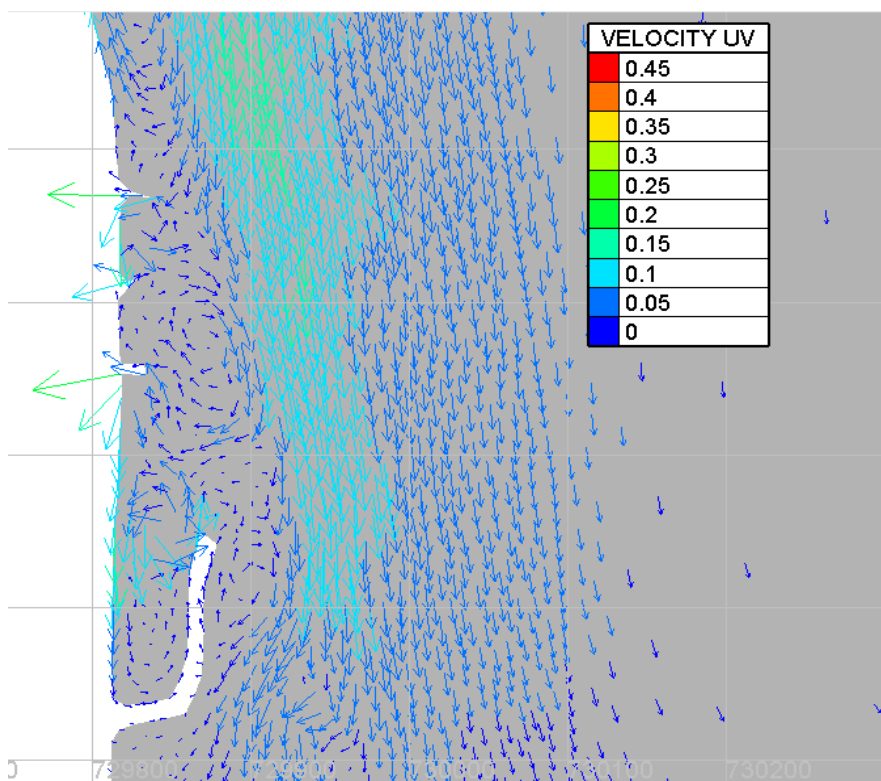
Σχήμα 5.3α: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος (m) για τον NA κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων στο μοντέλο Tomawac



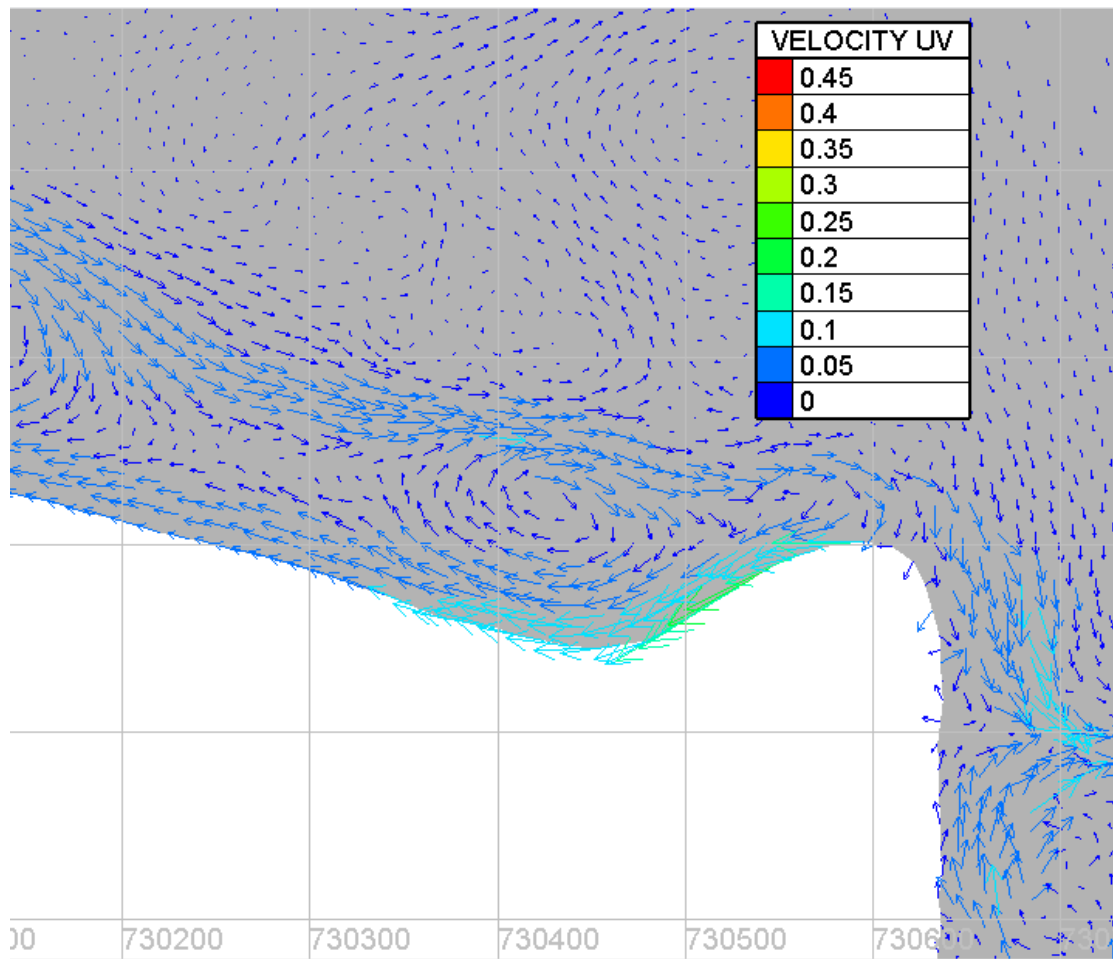
Σχήμα 5.4: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στην περιοχή μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Telemac-2D



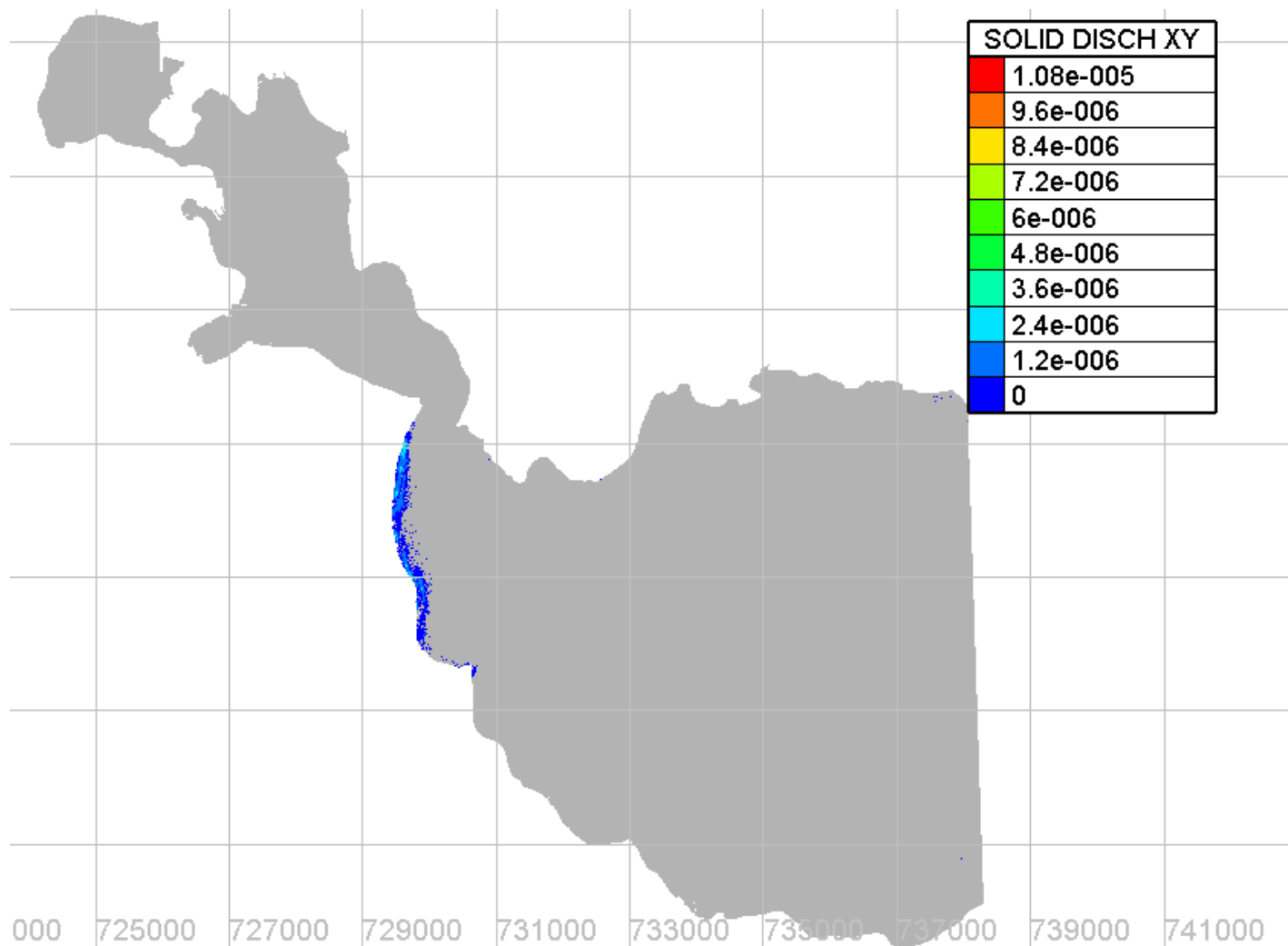
Σχήμα 5.4α: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Telemac-2D



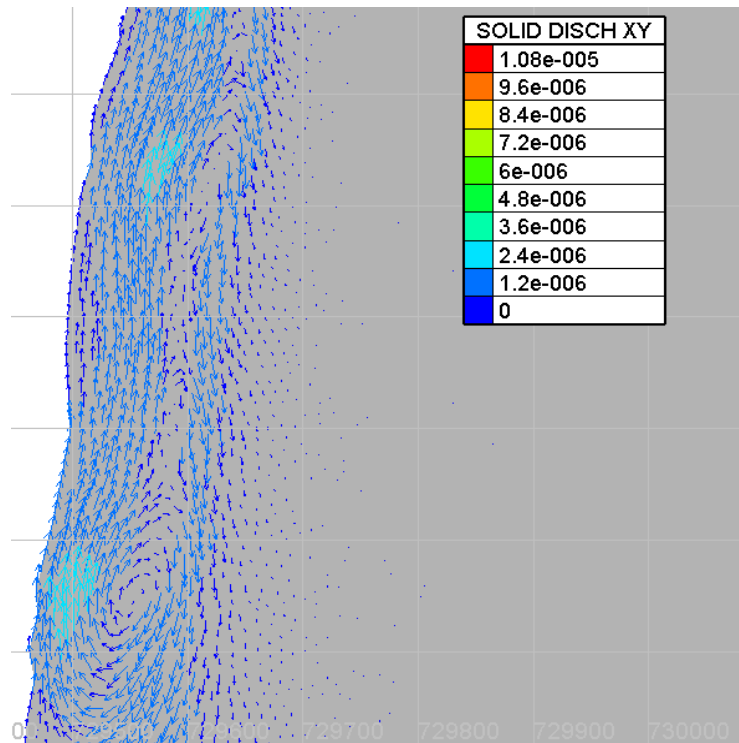
Σχήμα 5.4β: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Telemac-2D



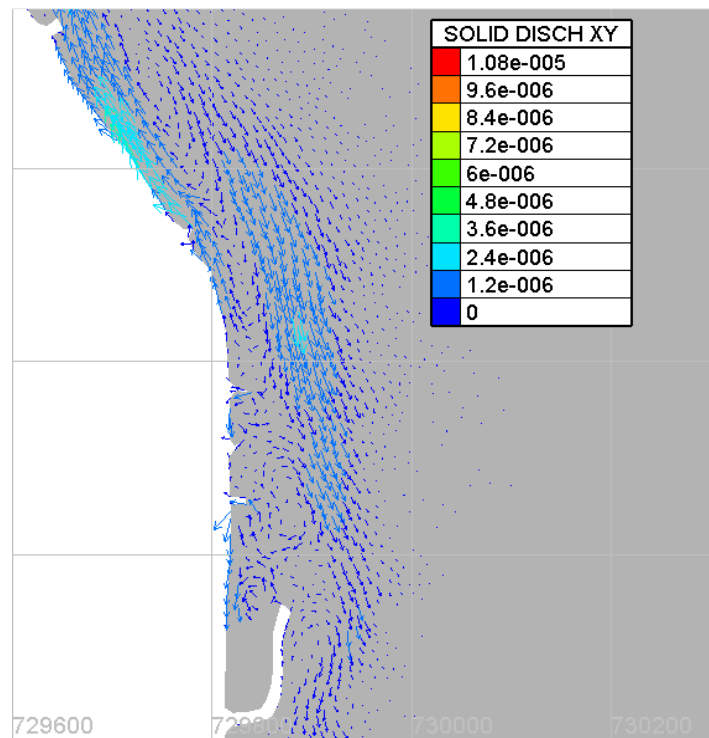
Σχήμα 5.4γ: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων υν των ρευμάτων (m/s) στο πέρας προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D



Σχήμα 2.5: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά x και y ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Sisyrhe

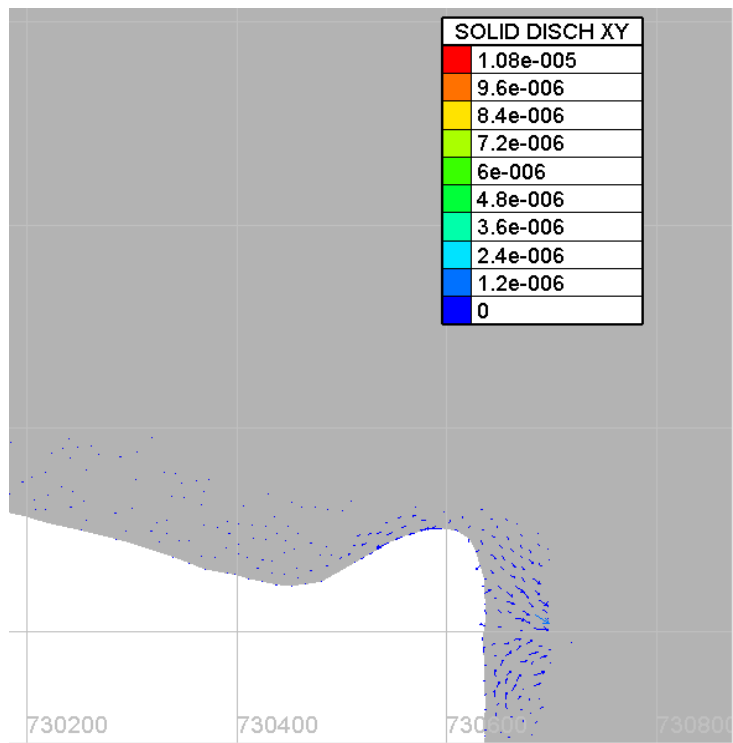


Σχήμα 5.5α: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $xy$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyrhe

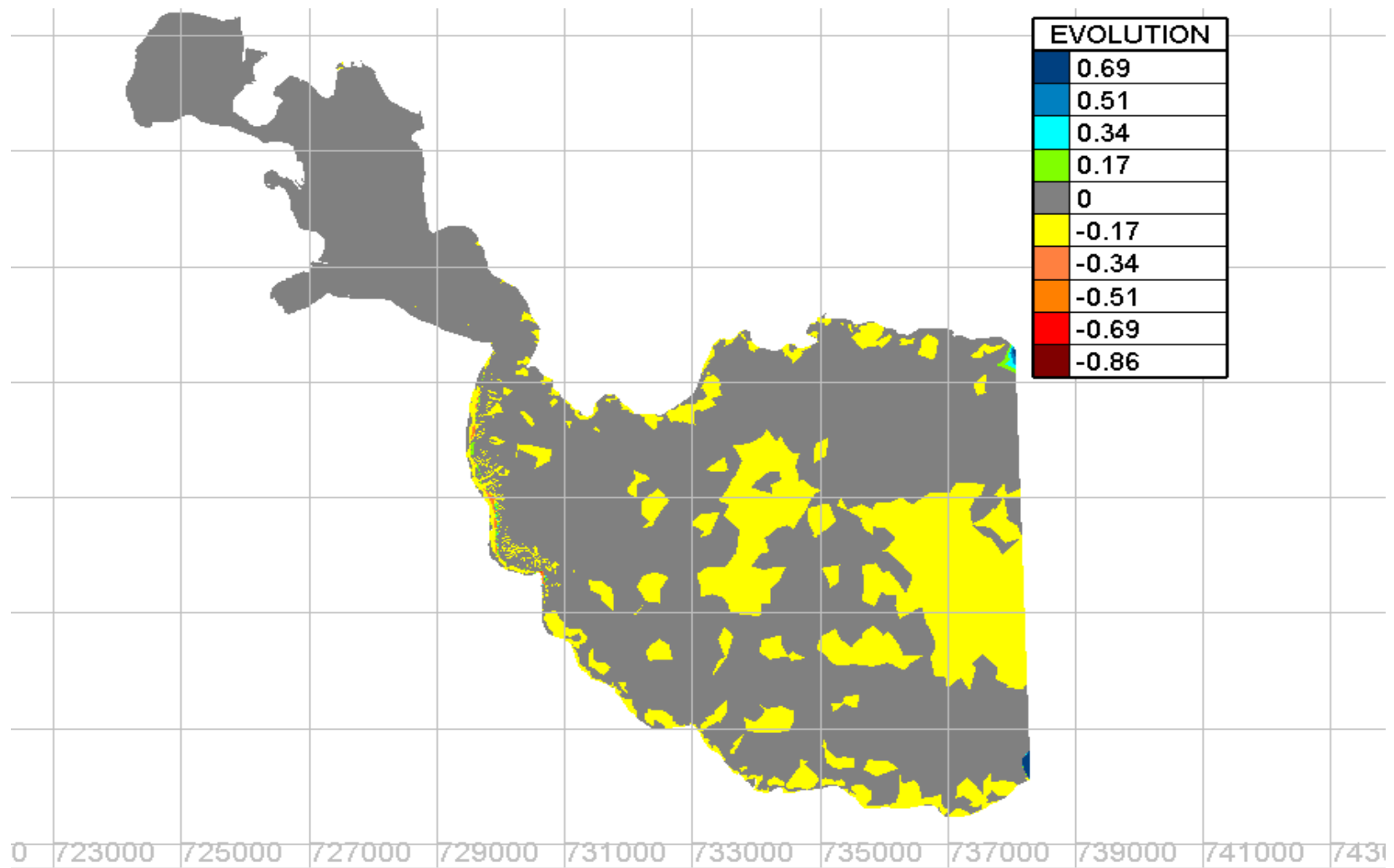


Σχήμα 5.5β: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $xy$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων στο μοντέλο Sisyrhe

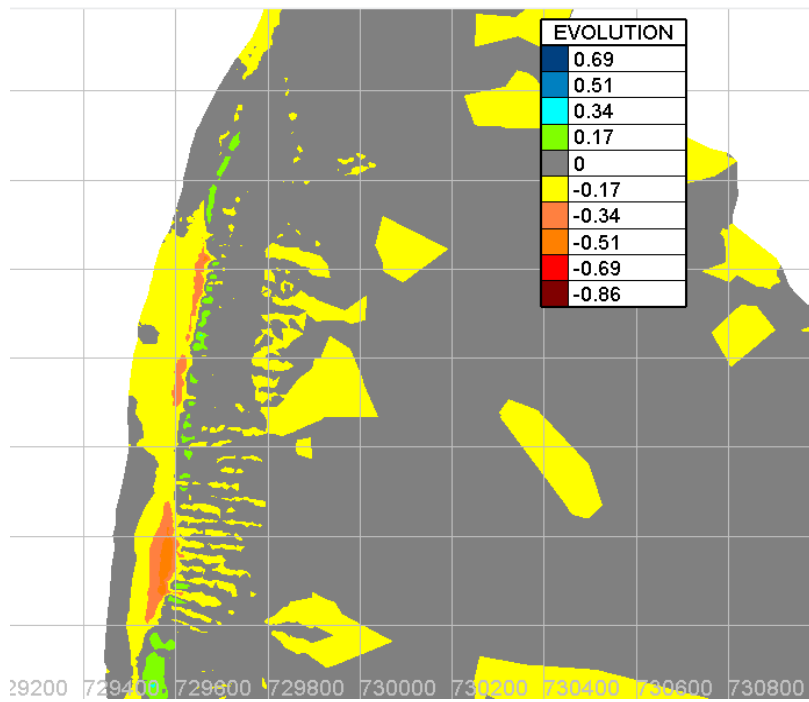




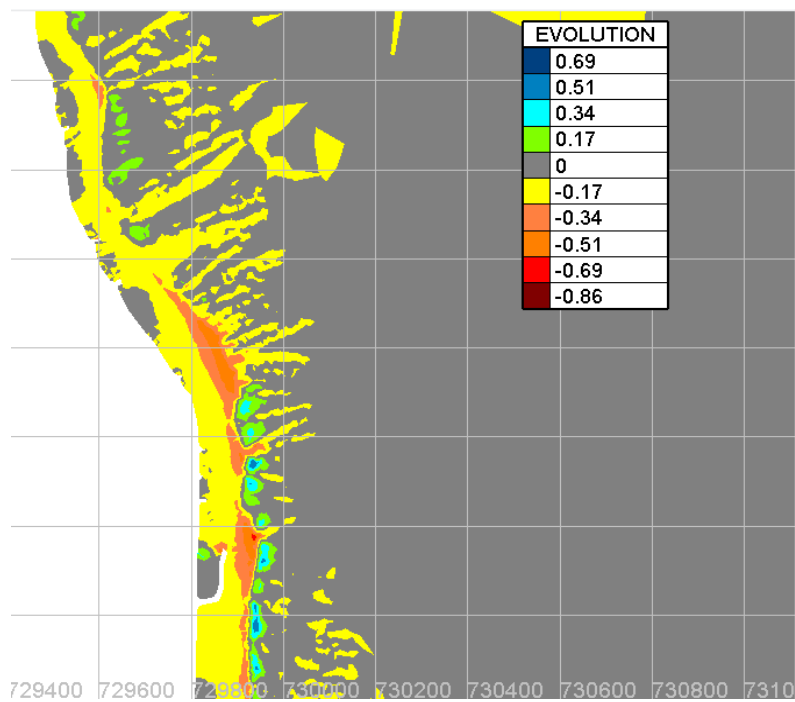
Σχήμα 5.5γ: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $xy$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphus



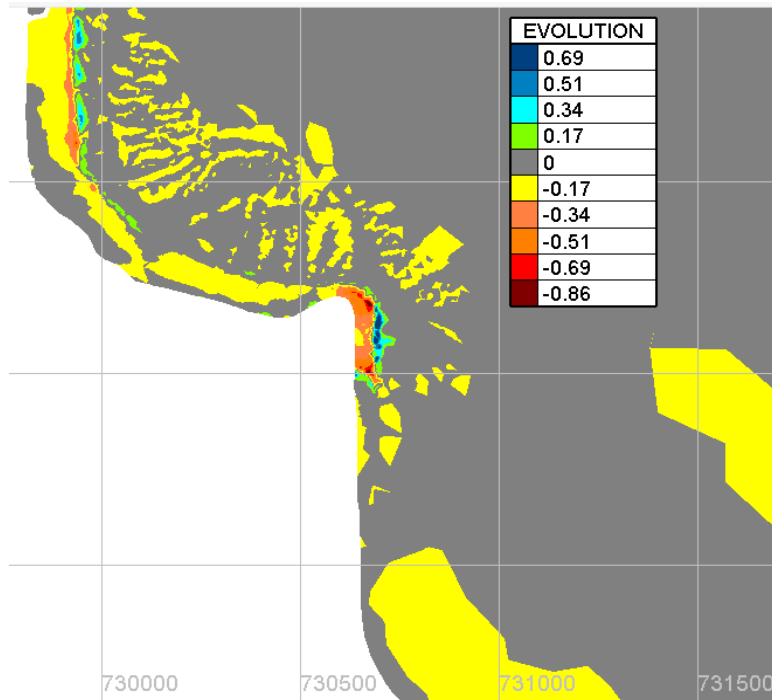
Σχήμα 5.6: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης σε όλη την έκταση της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphus



Σχήμα 5.6α: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyphus



Σχήμα 5.6β: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Sisyphus



Σχήμα 5.6γ: Εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyphé

Σ' αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι λόγω της υπερβολικής πύκνωσης κοντά στην ακτογραμμή (στοιχεία πλευράς 2 m) παρατηρείται συσσώρευση των ταχυτήτων και είναι δύσκολη η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η παραπάνω συνθήκη για πολύ μικρά στοιχεία κοντά στη ζώνη θραύσης είναι αναγκαίο κακό καθώς αν δεν ικανοποιείται δε θα εμφανίζονται αποτελέσματα στην παράκτια περιοχή, όχι σε όρους ταχυτήτων αλλά στερεομεταφοράς. Μια πιο λεπτομερής παρουσίαση των μεγεθών της ταχύτητας των ρευμάτων και στερεομεταφοράς ανά διεύθυνση δίνεται στο Παράρτημα, και προέρχεται από το λογισμικό Tecplot της Genias Graphics.

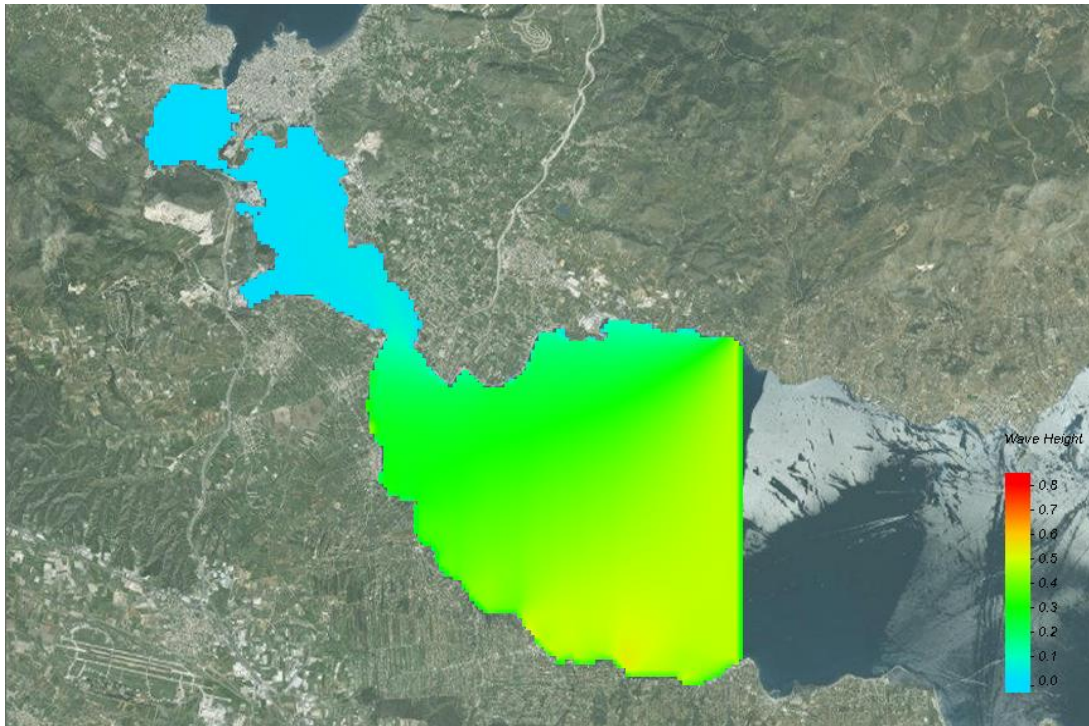
Από τα σχήματα 5.6, 5.6α, 5.6β και 5.6γ γίνεται εμφανές ότι παρατηρείται διάβρωση στο μεγαλύτερο μέρος του μετώπου του παραλιακού δρόμου καθώς και στην περιοχή που έχουν κατασκευαστεί οι πρόβολοι γεγονός που συμφωνεί με την εικόνα που έχει αποκτηθεί από τις επί τόπου επισκέψεις στην περιοχή μελέτης.

## 5.2 Αποτελέσματα CMS-Wave και CMS-Flow

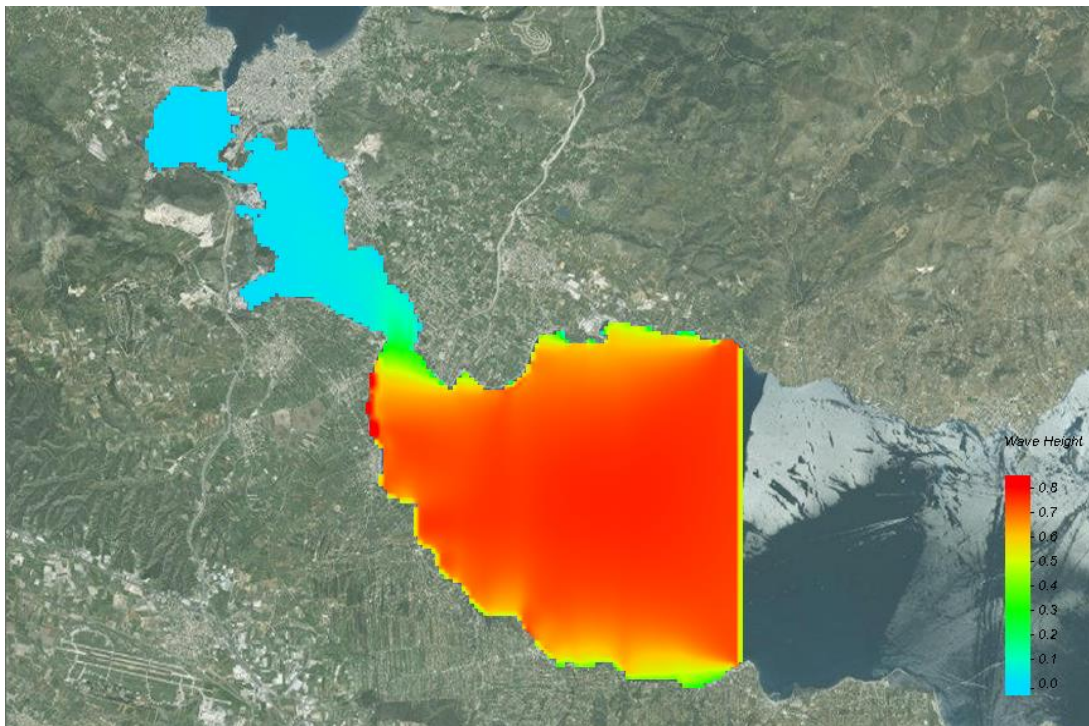
Η πορεία παρουσίασης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο λογισμικό CMS-Wave και CMS-Flow θα είναι της ίδιας λογικής με αυτής που ακολουθήθηκε για το Telemac-Mascaret, μόνο που στην παρουσίαση του ισοδύναμου κυματικού κλίματος δε θα γίνει εστίαση στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων, καθώς δεν είναι εμφανή φαινόμενα ανάκλασης και περίθλασης κυματισμών, λόγω των μεγάλου μεγέθους κελιών του κανάβου που χρησιμοποιήθηκε. Στα Σχήματα 5.10-5.10γ παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων στο πέρας της προσομοίωσης. Είναι εμφανές ότι οι ταχύτητες, ενδεικτικά σε απόσταση 50 m μπροστά από την ακτογραμμή στις περιοχές ενδιαφέροντος, κυμαίνονται μεταξύ των

0.10-0.15 m/s. Το μέγεθος της στερεομεταφοράς (Σχήματα 5.11-5.11γ) δίνεται σε όρους ταχυτήτων (m/s) και οφείλεται στη σχέση υπολογισμού που χρησιμοποιείται στο μοντέλο CMS-Flow. Τα εντονότερα μορφοδυναμικά φαινόμενα εντοπίζεται στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων, όπως ήταν αναμενόμενο. Η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα παρουσιάζεται στα Σχήματα (5.12-5.12γ). Στην παρουσίαση των μορφολογικών αλλαγών, όταν γίνεται η εστίαση στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος, για καλύτερη ευκρίνεια τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη μορφή ισοδυναμικών γραμμών (equipotential lines). Είναι εμφανή στα παραπάνω σχήματα μια μεγάλη ζώνη διάβρωσης κατά μήκος του μετώπου του παραλιακού δρόμου.

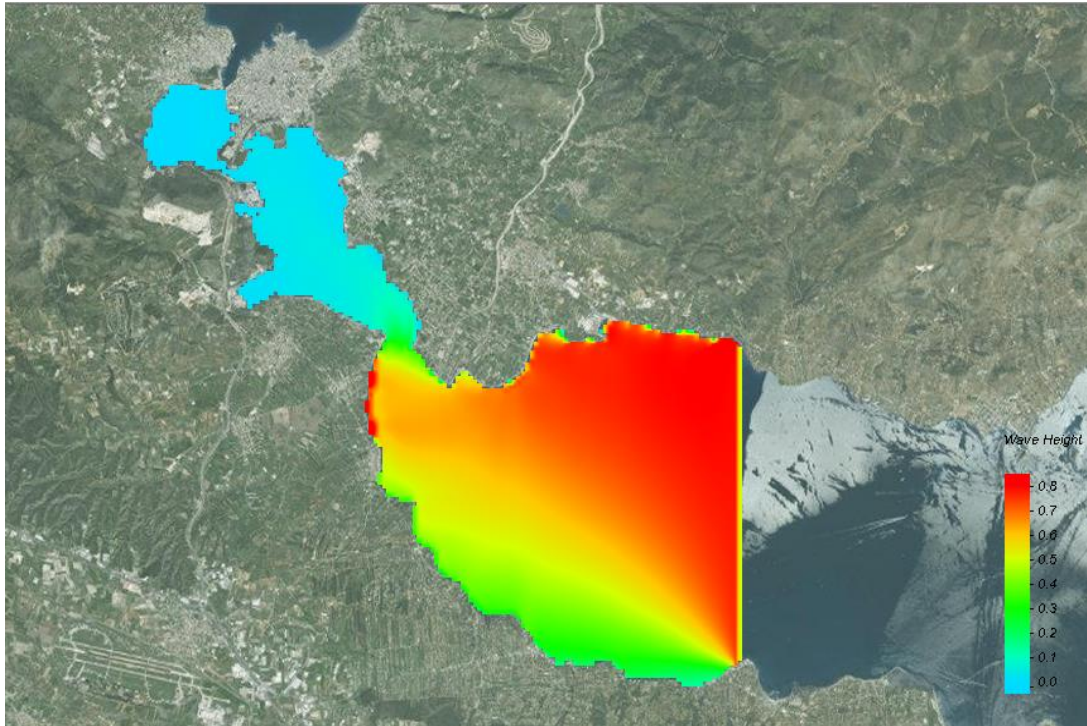
Σημειώνεται ότι στην παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων έχει αφαιρεθεί ο κানাβος πεπερασμένων στοιχείων καθώς το γραφικό περιβάλλον του SMS επιτρέπει τη χρήση στρώματος (layer) με τη μορφή παγκόσμιου χάρτη στο οποίο γίνεται η παρουσίαση αποτελεσμάτων.



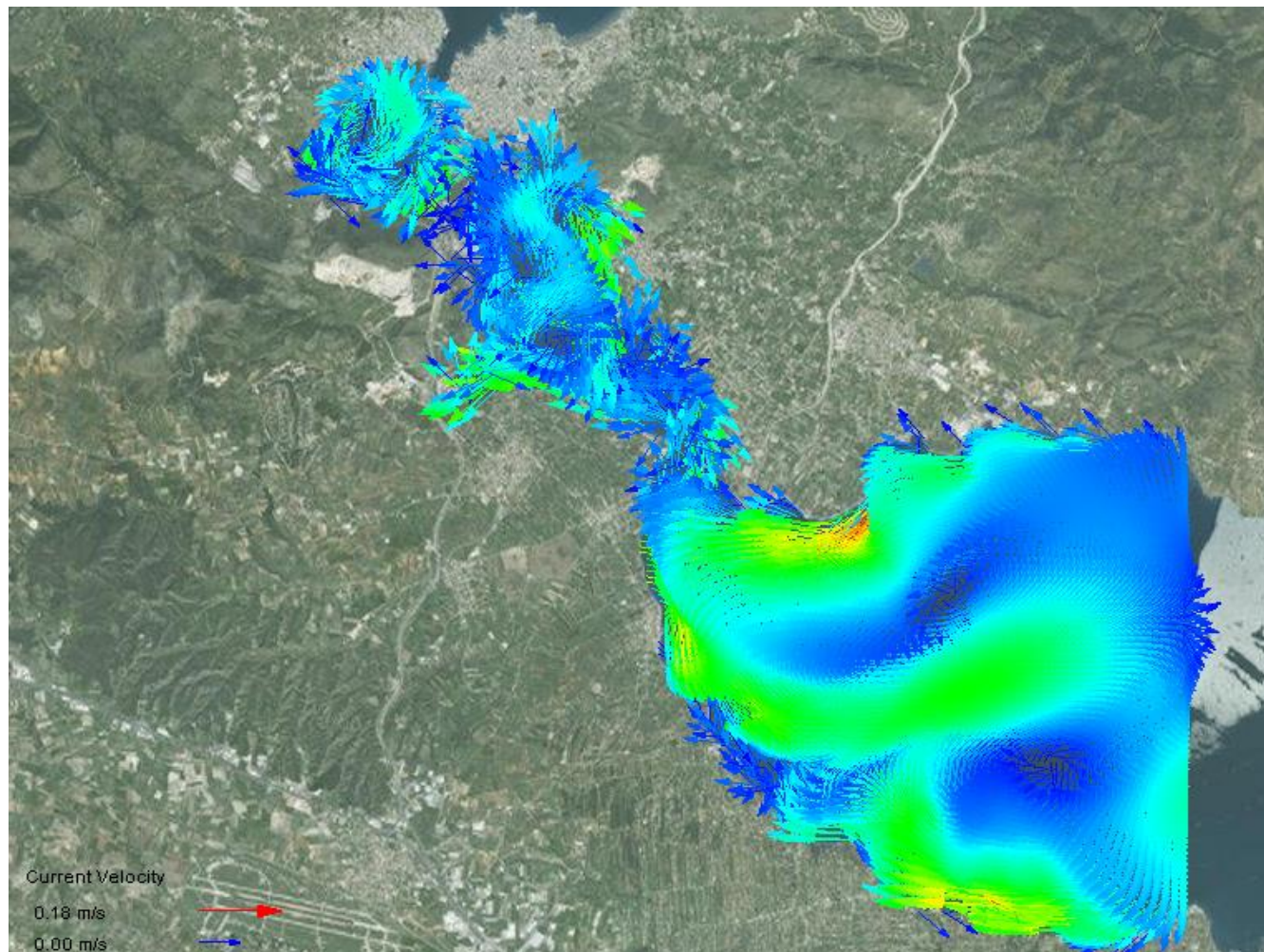
Σχήμα 5.7: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον ΒΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο CMS-Wave



Σχήμα 5.8: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο CMS-Wave

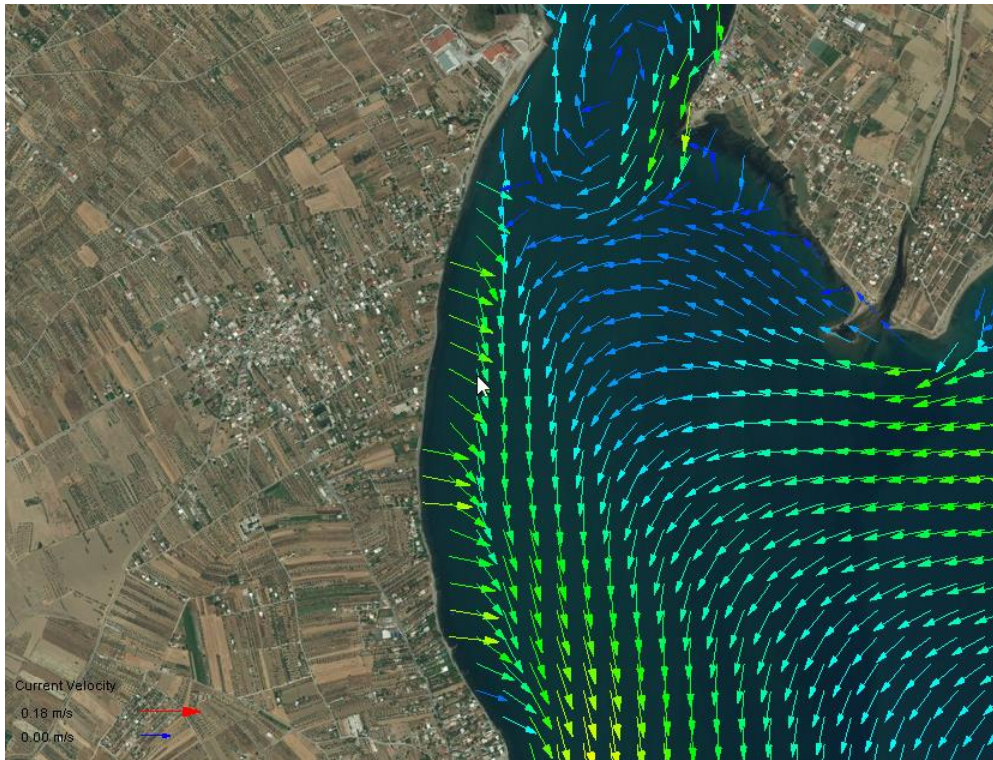


Σχήμα 5.9: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον ΝΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο CMS-Wave

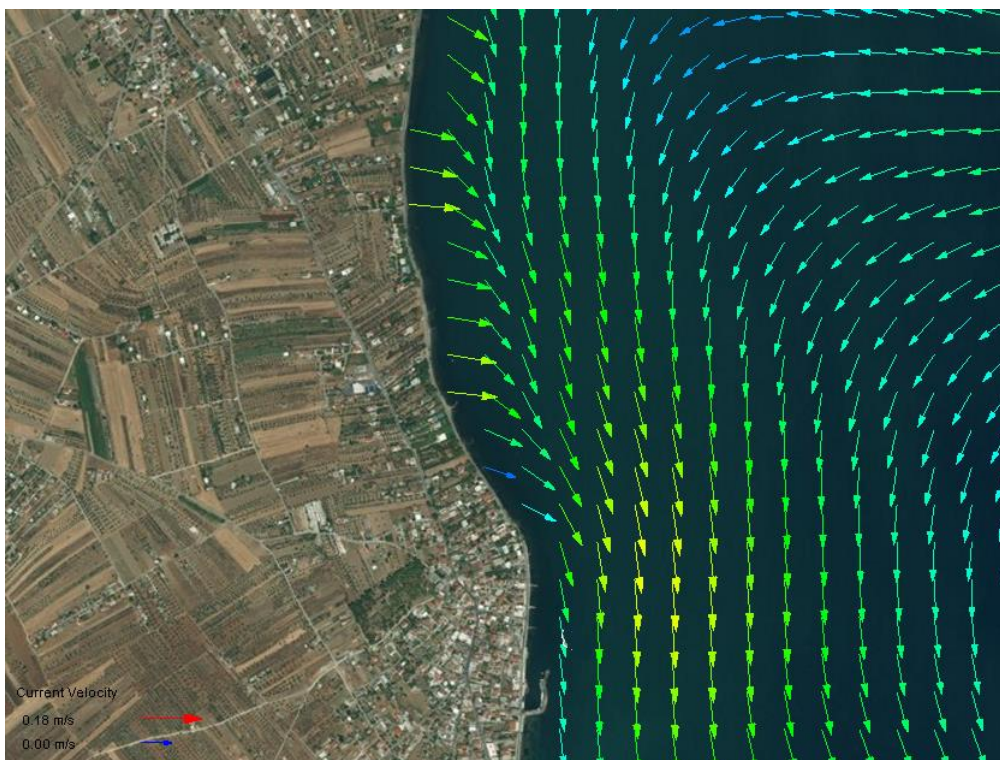


Σχήμα 5.10: Χωρική κατανομή των ταχυτήτων των ρευμάτων (m/s) στο τέλος της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow

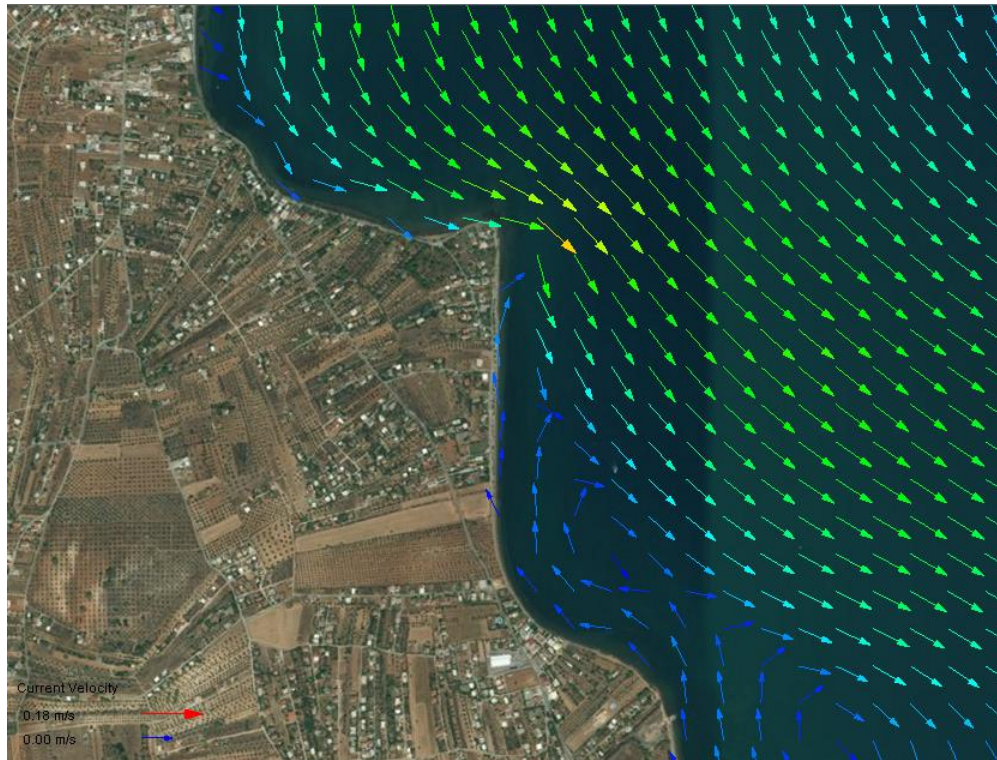




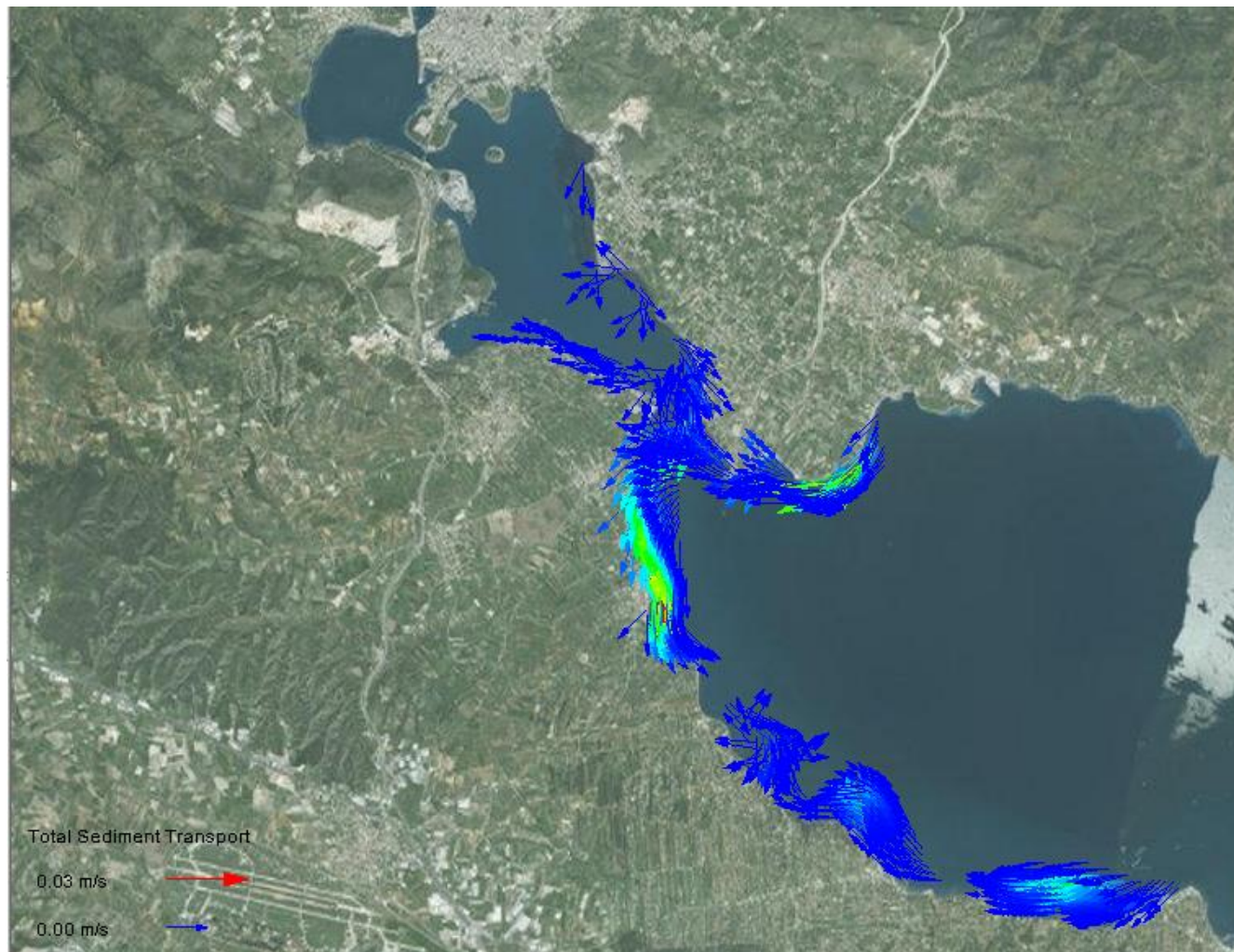
**Σχήμα 5.10α:** Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων  $u$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο CMS-Flow



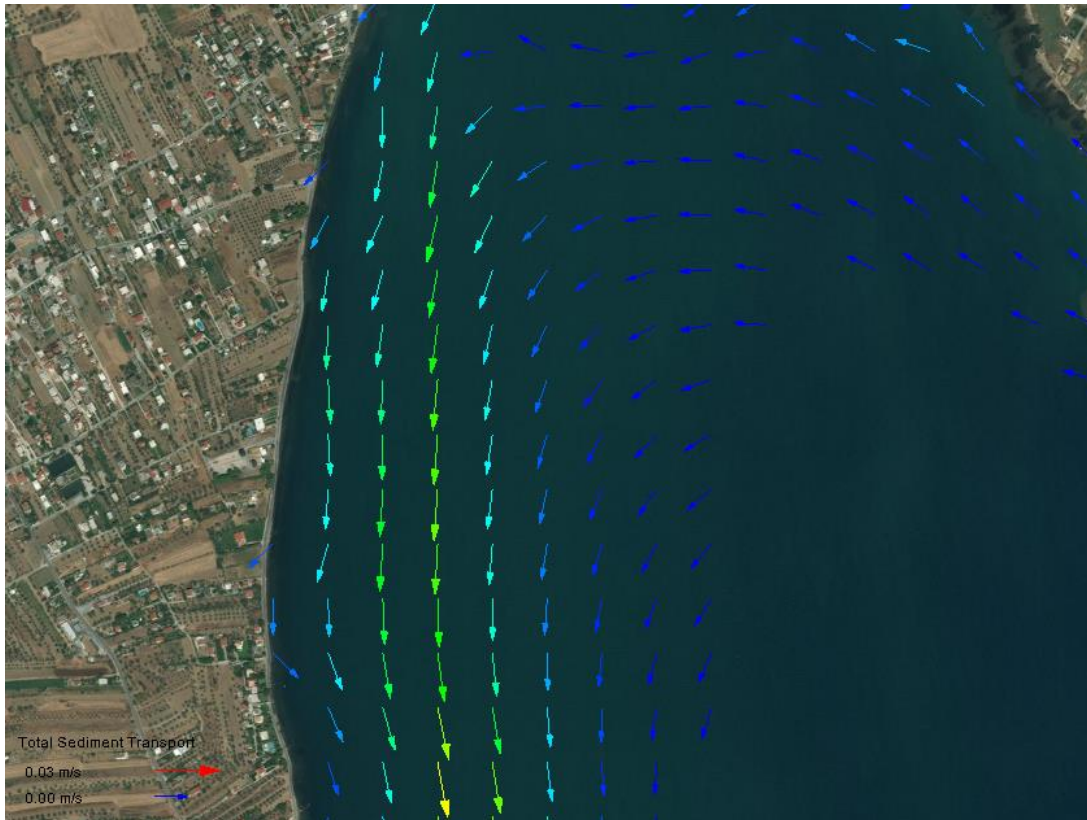
**Σχήμα 5.10β:** Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων  $u$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο CMS-Flow



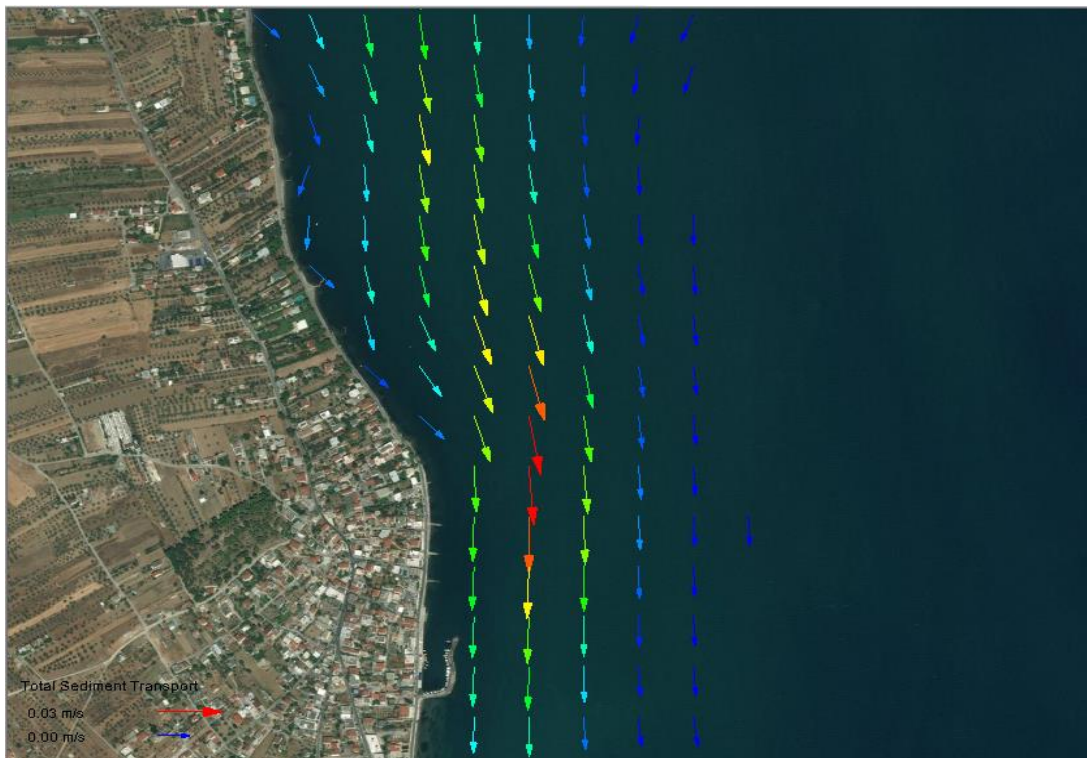
**Σχήμα 5.10γ:** Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων  $u$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του κατώτερου ορίου της περιοχής μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow



Σχήμα 5.11: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $xy$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στη διευρυμένη περιοχή μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow



Σχήμα 5.11α: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά  $xy$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο CMS-Flow



Σχήμα 5.11β: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά  $xy$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο CMS-Flow



**Σχήμα 5.11γ: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά  $xy$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του κατώτερου ορίου της περιοχής μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow**



Σχήμα 5.12: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow



Σχήμα 5.12α: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο CMS-Flow (με τη μορφή ισοδυναμικών καμπυλών)



Σχήμα 5.12β: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο CMS-Flow (με τη μορφή ισοδυναμικών καμπυλών)



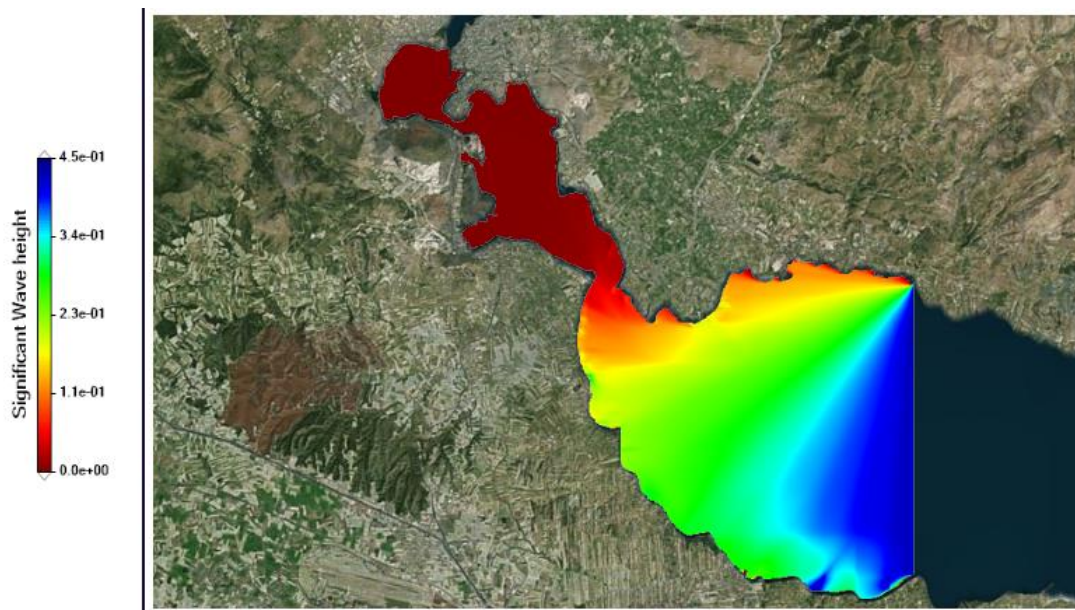
Σχήμα 5.12γ: Μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα (m) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του κατώτερου ορίου της περιοχής μελέτης στο μοντέλο CMS-Flow (με τη μορφή ισοδυναμικών καμπυλών)

### 5.3 Αποτελέσματα Mohid Studio

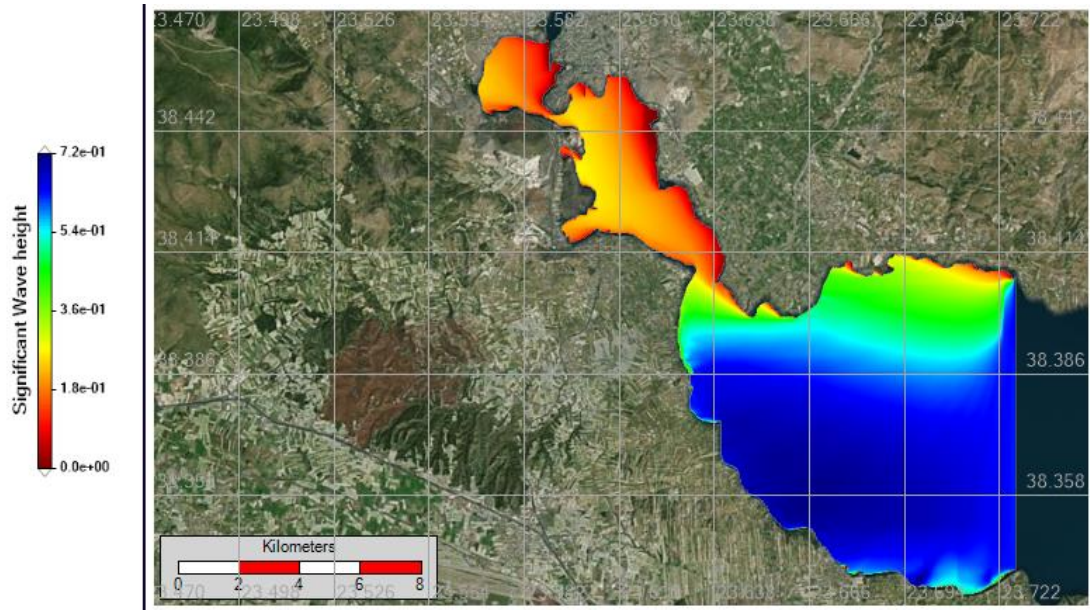
Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση στο Mohid Studio, θα παρουσιαστούν όπως και στην περίπτωση του CMS-Wave/CMS-Flow, δηλαδή για καλύτερη ευκρίνεια θα αφαιρεθεί ο κানাβος πεπερασμένων στοιχείων καθώς δίνεται η δυνατότητα της χρήσης επιπέδου (layer) χάρτη από τη βάση δεδομένων Bing (Aerial). Επίσης λόγω της ορθογωνικής μορφής του κανάβου, παρόλο που είναι πιο πυκνός από ότι στο CMS-Flow, στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων του ισοδύναμου κυματικού κλίματος δε θα γίνει εστίαση στην περιοχή του λιμένα και των προβόλων, καθώς δεν είναι εμφανή φαινόμενα ανάκλασης και περίθλασης κυματισμών. Για τον ανατολικό κυματισμό (Σχήμα 5.14) παρατηρούμε είσοδο κυματισμών (χαρακτηριστικού ύψους κύματος της τάξης των 0.18 m) στην περιοχή που στενεύει ο κόλπος, στο βορειοδυτικό τμήμα του υπολογιστικού κανάβου. Αυτή η εικόνα διαφέρει από αυτή που αποκτήθηκε από τα υπόλοιπα κυματικά μοντέλα, ωστόσο θεωρείται ότι δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα στις περιοχές αυξημένου ενδιαφέροντος. Οι ταχύτητες των ρευμάτων (Σχήματα 5.16-5.16γ) παρουσιάζουν μέγιστη τιμή 0.64 m/s, σε μεμονωμένα κελιά του υπολογιστικού κανάβου. Στην περιοχή που εκτείνεται από την ακτογραμμή στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και της ισοβαθής των 5 m όμως, οι παρατηρούμενες ταχύτητες κυμαίνονται μεταξύ 0.15-0.22 m/s. Η στερεομεταφορά (Σχήματα 5.17-5.17γ) παρουσιάζεται μόνο με τη μορφή φορτίου πυθμένα, καθώς φορτίο σε αιώρηση δεν υπολογίζεται στο Mohid Water. Ο λόγος που παρατηρούνται έντονα αυξημένες τιμές του προηγούμενου μεγέθους αναλύεται στην Ενότητα 5.4 του παρόντος κεφαλαίου. Στο Mohid Studio δε δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης της μορφολογικής εξέλιξης του πυθμένα, θα παρουσιαστεί ωστόσο το μέγεθος της χωρικής απόθεσης της άμμου στο τέλος της προσομοίωσης (Σχήματα 5.18-5.18α).



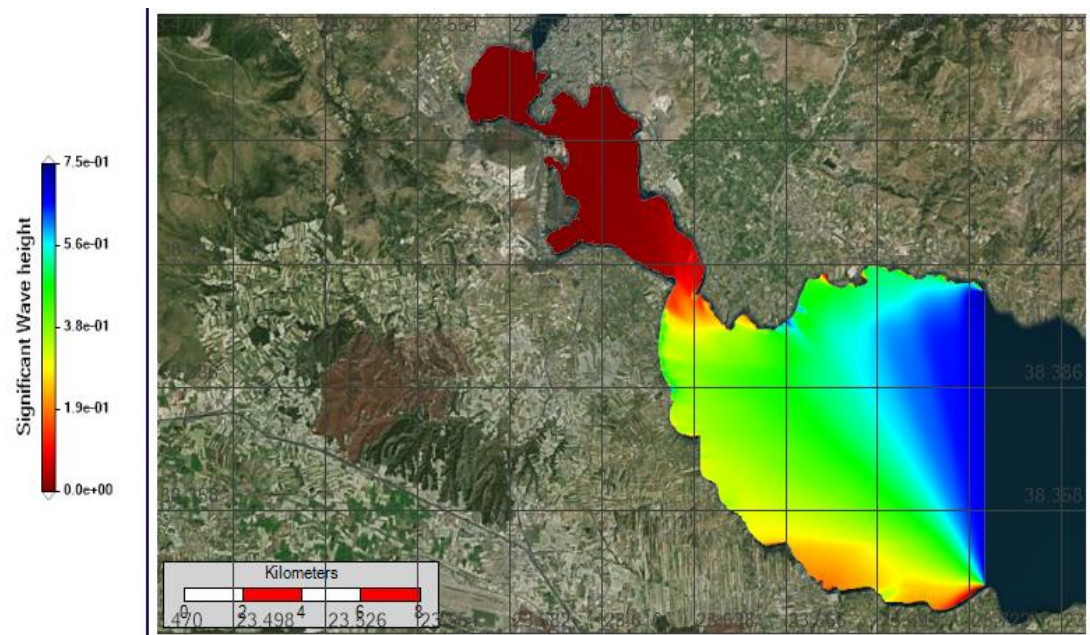
Συγκεκριμένα, στα προαναφερθέντα σχήματα με έντονα κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα κελια του υπολογιστικού κανάβου με σχεδόν μηδενικές αποθέσεις. Στις περιοχές που το χρώμα γίνεται πορτοκαλί (περίπου 40-60 m μπροστά από το πρανές του παραλιακού δρόμου) παρατηρούνται αποθέσεις άμμου με ρυθμό περί τα  $2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Η απόθεση άμμου είναι ένα αυστηρά θετικό μέγεθος και η εκτίμηση της διάβρωσης μπορεί να γίνει μόνο έμμεσα. Για παράδειγμα, αφού παρατηρείται απόθεση άμμου 40 m μπροστά από τον παραλιακό δρόμο μπορεί να εκτιμηθεί ότι για τη διατήρηση του ισοζυγίου αυτή η άμμος πιθανώς προέρχεται ακριβώς μπροστά από το πρανές του παραλιακού δρόμου, με συνεπαγόμενη διάβρωση σε αυτό το σημείο.



Σχήμα 5.13: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον ΒΑ κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο SWAN



Σχήμα 5.14: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον Α κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο SWAN



Σχήμα 5.15: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m) για τον NA κυματισμό του ισοδύναμου κυματικού κλίματος στο μοντέλο SWAN



Σχήμα 5.16: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων  $u$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Mohid Water



Σχήμα 5.16α: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Mohid Water



Σχήμα 5.16β: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων υν (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Mohid Water



Σχήμα 5.16γ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων  $u$  (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Mohid Water



Σχήμα 5.17: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Mohid Water



Σχήμα 5.17α: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Mohid Water

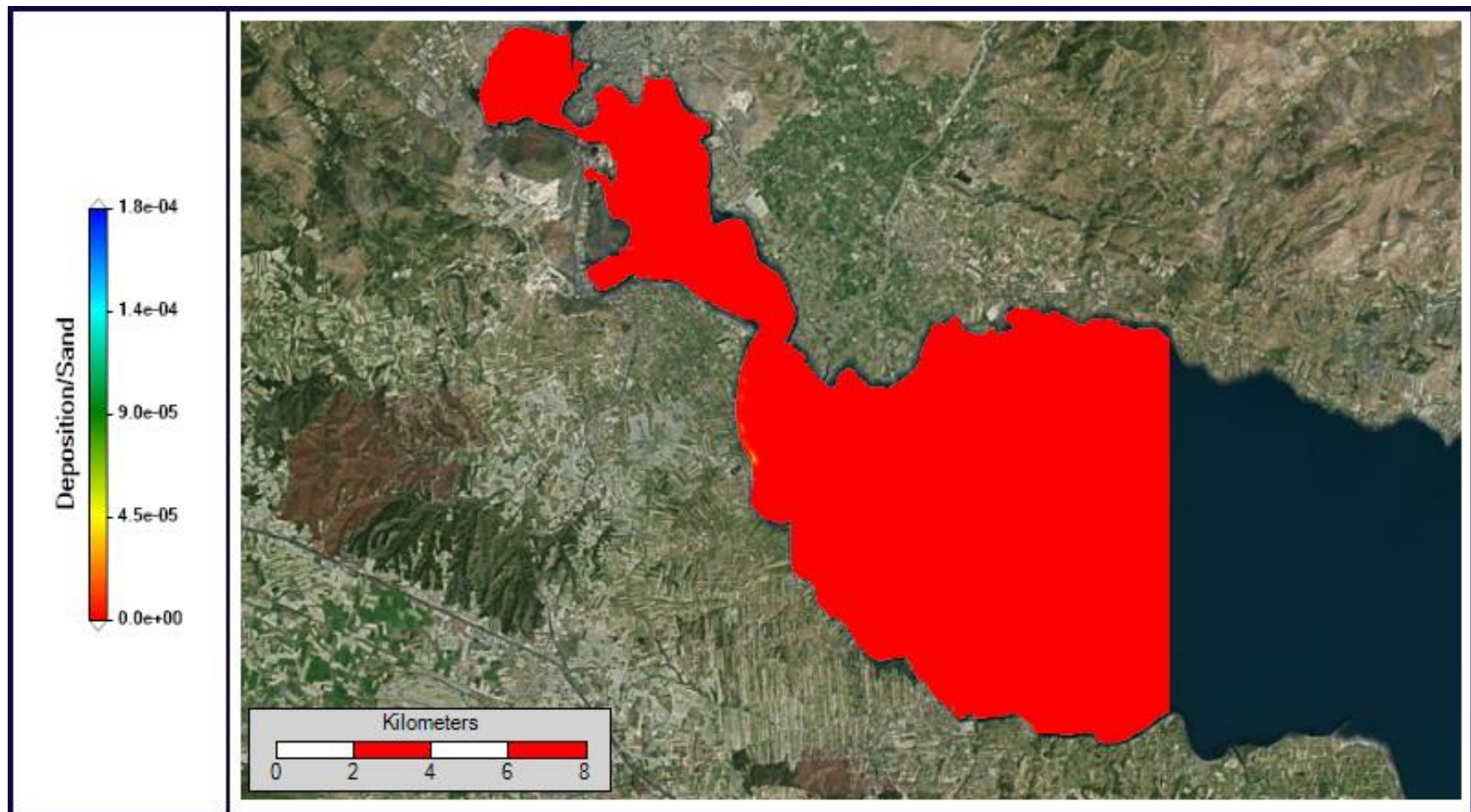


Σχήμα 5.17β: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του λιμένα και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Mohid Water

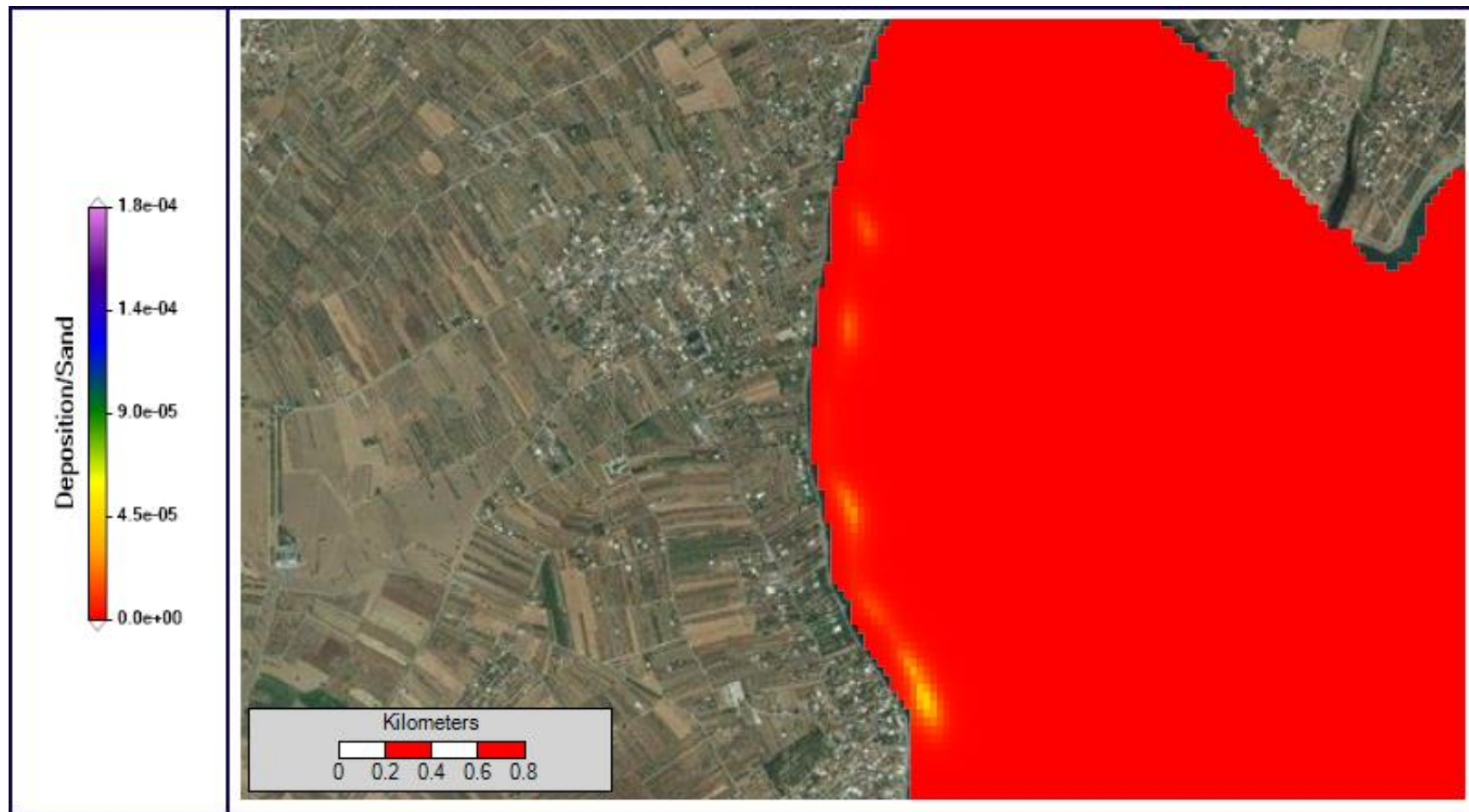


Σχήμα 5.17γ: Χωρική κατανομή του φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Mohid Water





Σχήμα 5.18: Ρυθμός απόθεσης άμμου ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Mohid Water



Σχήμα 5.18α: Ρυθμός απόθεσης άμμου ( $m^2/s$ ) μπροστά στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Mohid Water

## 5.4 Σχολιασμός αποτελεσμάτων και συγκριτική ανάλυση λογισμικών

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη διαφορετική φύση των λογισμικών, (λ.χ. ότι πραγματοποιούν τις επιλύσεις τους σε κανάβους πεπερασμένων στοιχείων διαφορετικής γεωμετρίας), μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις και στις τρεις πλατφόρμες λογισμικών παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα.

Ξεκινώντας το σχολιασμό από τα αποτελέσματα για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα, παρατηρείται ότι ειδικά για τον ΒΑ κυματισμό, που είναι και ο επικρατούντας από την άποψη της χρονικής διάρκειας, και τα τρία κυματικά μοντέλα παρουσιάζουν όμοια εικόνα. Μικρές διαφορές αρχίζουν να παρατηρούνται για τον Α και ΝΑ κυματισμό, και συγκεκριμένα στο μοντέλο CMS-Wave, όπου είναι εμφανής στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου μια αύξηση του ύψους κύματος. Αυτό πιθανώς οφείλεται στη δυνατότητα προσομοίωσης με τη θεώρηση «ολόκληρου επιπέδου» (full plane) για τη διάδοση του κυματισμού, που όπως έχει ήδη αναφερθεί, λαμβάνει υπ' όψη στους υπολογισμούς ανακλώμενα κύματα, που διαδίδονται σε διεύθυνση αντίθετη με αυτή του κυρίως κυματισμού. Παρόλο λοιπόν που τα στοιχεία του κανάβου στο CMS-Wave έχουν μεγάλες διαστάσεις και δεν είναι κατάλληλα για την ακριβή περιγραφή της μορφής της ακτογραμμής, το ίδιο το μοντέλο δίνει αύξηση του ύψους του κύματος στην περιοχή του παραλιακού δρόμου λόγω της δημιουργίας στάσιμων κυμάτων από την ανάκλαση που λαμβάνει υπ' όψη στους υπολογισμούς του.

Αναφορικά με τις ταχύτητες των ρευμάτων που προκύπτουν από τα υδροδυναμικά μοντέλα, τα αποτελέσματα συμφωνούν τόσο ως προς την τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων όσο και ως προς την κατεύθυνση των διανυσμάτων τους, στο πέρας της προσομοίωσης που δίνονται τα σχετικά αποτελέσματα.

Στην Εικόνα 4.16 είναι ορατή η ισοβαθής των 5m (γαλάζιο χρώμα) μπροστά από το μέτωπο του παραλιακού δρόμου, η οποία θα χρησιμεύσει ως σημείο αναφοράς για τη σύγκριση της ταχύτητας των ρευμάτων στην παρακείμενη περιοχή.

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη ταχύτητα στο μοντέλο Telemac-2D, στο πέρας της προσομοίωσης, παρατηρείται κοντά στο ανοιχτό όριο της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα κοντά στο νότιο τμήμα του, με μέτρο της τάξεως των 0.37 m/s. Μια τέτοια αυξημένη τιμή μπορεί να οφείλεται στο ότι, κοντά στην περιχή του ανοιχτού ορίου βρίσκεται στερεό όριο (λόγω ξηράς). Αυτή η απότομη μείωση του βάθους σε κοντινά στοιχεία του υπολογιστικού κανάβου προκαλεί την αύξηση της τιμής της ταχύτητας σε εκείνη την περιοχή, θεωρείται όμως ότι βρίσκεται αρκετά μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης, οπότε δεν επηρεάζει τα υπόλοιπα αποτελέσματα. Στην περιοχή της ισοβαθούς των 5 m μπροστά από τον παραλιακό δρόμο, που ορίστηκε ωρύτερα, παρατηρούμε ότι οι ταχύτητες των ρευμάτων στο μοντέλο κυμαίνονται περί τα 0.10-0.15 m/s.

Στο μοντέλο CMS-Flow είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η μέγιστη ταχύτητα που εντοπίζεται στο μοντέλο είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που έχει υπολογιστεί από τα άλλα δύο υδροδυναμικά μοντέλα, με τιμή 0.18 m/s. Πολλοί παράγοντες μπορεί να

ευθύνονται γι' αυτό, όπως οι εξισώσεις υπολογισμού του μοντέλου, ότι τέθηκε στο ανοιχτό όριο προκαθορισμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας, το μέγεθος των κελιών του κανάβου κ.α. Είναι ωστόσο σημαντικό να τονιστεί ότι στην προαναφερθείσα περιοχή της ισοβαθούς των 5 m η παρατηρηθείσες ταχύτητες είναι της τάξης των 0.10 m/s, δηλαδή πολύ κοντά στις τιμές που έχουν εξαχθεί από το μοντέλο Telemac-2D.

Στο Mohid Studio, που είναι και εύκολο να οπτικοποιηθεί η εξέλιξη των φαινομένων με την παρόδο του χρόνου παρατηρείται μια περιοδική αλλαγή της κατεύθυνσης των διανυσμάτων της ταχύτητας των ρευμάτων ανά 6 ώρες περίπου. Αυτό το γεγονός ενδεχόμενα οφείλεται στη παρουσία της πιο αξιόπιστης βάσης δεδομένων παλίρροιας FES που συμπεριλαμβάνεται στο Mohid Studio, και προσδίδει την περιοδική αλλαγή στις κατευθύνσεις των ταχυτήτων, ακολουθώντας τους παλιρροιακούς κύκλους που διαρκούν περίπου 6 ώρες στην περιοχή. Είναι σημαντικό επίσης να σημειωθεί ότι η μέγιστη ταχύτητα που παρατηρείται σε όλο τον υπολογιστικό κανάβο είναι περί τα 0.64 m/s αλλά παρατηρείται στην περιοχή που συναντώνται ξηρά και ανοιχτό όριο και θεωρείται ότι δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η ταχύτητα στην ισοβαθή των 5 m μπροστά στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου κυμαίνεται περί τα 0.15-0.18 m/s, δηλαδή παρόμοιας τάξης μεγέθους με τις ταχύτητες που υπολογίστηκαν στην ίδια περιοχή μέσω των μοντέλων Telemac-2D και CMS-Flow.

Και στα τρία μοντέλα στερεομεταφοράς, όπως είναι αναμενόμενο, η εικόνα που προκύπτει για τα διανύσματα της στερεομεταφοράς είναι ότι ακολουθούν τις κατευθύνσεις που έχουν προκύψει και από από τα μοντέλα υδροδυναμικής για τις ταχύτητες ρευμάτων.

Συγκεκριμένα, στο μοντέλο Sisyphé, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.5-5.5γ, το μεγαλύτερο ποσοστό της στερεομεταφοράς εντοπίζεται στην περιοχή που εκτείνεται μεταξύ του παραλιακού δρόμου και του λιμένα της Αυλίδας, επιβεβαιώνοντας ότι η συγκεκριμένη περιοχή είναι βαρύνουσας σημασίας και από την άποψη των φαινομένων μορφολογικής εξέλιξης. Στην περιοχή του παραλιακού δρόμου οι κατευθύνσεις των διανυσμάτων ολικής στερεομεταφοράς (σε μονάδες  $m^2/s$ ) έχουν κατεύθυνση προς τα πάνω, ενώ στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα η κύρια κατεύθυνση των παραπάνω διανυσμάτων αλλάζει κατεύθυνση και είναι προς τα κάτω. Η περιοχή του κατώτερου ορίου της περιοχής μελέτης δεν παρουσιάζει έντονα φαινόμενα στερεομεταφοράς, είναι εμφανής όμως μια κίνηση ίζημάτων (σχήμα 5.5γ) οπότε ενδεχόμενα σε μεταγενέστερο στάδιο, μια πιο εκτενής μελέτη για τη μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα σε αυτή την περιοχή να έχει ενδιαφέρον να πραγματοποιηθεί. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ή τάξη μεγέθους της στερεοπαροχής ( $\times 10^{-6}$ ) καθώς αυτό το μέγεθος θα ελεγχεί αν αντιστοιχεί με αυτά που υπολογίζονται από τα μοντέλα των άλλων πλατφόρμων λογισμικών (CMS-Flow και Mohid Water).

Στο μοντέλο CMS-Flow, η στερομεταφορά δίνεται σε όρους ολικής μεταφοράς (total transport) σε μονάδες  $m^3/s$ , οπότε μια άμεση σύγκριση των υπολογισθέντων μεγεθών σε αυτό το μοντέλο με το μοντέλα Sisyphé και Mohid Water, είναι εξ' ορισμού δύσκολη. Η κατεύθυνση κίνησης των διανυσμάτων ολικής στερεομεταφοράς στην περιοχή του παραλιακού δρόμου είναι προς τα κάτω και διαφέρει από αυτή που προκύπτει από το Sisyphé με μια πρώτη ανάγνωση. Ωστόσο στο Sisyphé, οι

υπολογισμοί έγιναν σε ένα πολύ πιο πυκνό και λεπτομερή κάρναβο και η κατεύθυνση στερεομεταφοράς στην περιοχή του παραλιακού δρόμου, κοντά όμως στην ακτογραμμή είναι προς τα κάτω όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο αυτής της ενότητας. Ωστόσο παρατηρούμε με την αύξηση του βάθους, την αντιστροφή αυτής της κατεύθυνσης. Θεωρήθηκε, ότι αφού στο μοντέλο CMS-Flow χρησιμοποιήθηκε κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων με κελιά αισθητά μεγαλύτερου μεγέθους από τα άλλα δύο μοντέλα, δεν έχουμε καλή προσομοίωση των φαινομένων στερεομεταφοράς πολύ κοντά στην ακτογραμμή αλλά ουσιαστικά τα υπολογισθέντα μεγέθη μπορούν να συγκριθούν σε βάθος τουλάχιστον 2 m πέρα από την ακτογραμμή.

Στο μοντέλο Mohid Water η περιοδική αλλαγή που παρατηρείται στην κατεύθυνση των διανυσμάτων της ταχύτητας ρευμάτων είναι εμφανής και στα μεγέθη της στερεομεταφοράς. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.17-5.17γ με αυτά που προέκυψαν από τα υπόλοιπα μοντέλα, γίνεται εμφανές ότι υπάρχει αρκετή ταύτιση στην κατεύθυνση του φορτίου πυθμένα ειδικά μεταξύ των μοντέλων CMS-Flow και Mohid Water (κίνηση προς τα κάτω στην περιοχή παραλιακού δρόμου, υφιστάμενων προβόλων και λιμένα). Ένα μεγάλο μειονέκτημα του μοντέλου Mohid Water είναι ότι δεν υπολογίζει κίνηση ιζήματος με τη μορφή φορτίου αιωρήσεως παρ' όλο που η μέθοδος υπολογισμού που έχει τεθεί δίνει αυτή τη δυνατότητα. Απαιτείται ενδεχόμενα προγραμματισμός από μέρους του χρήστη ώστε να μπορούν να οπτικοποιηθούν αποτελέσματα για την παράμετρο της στερεομεταφοράς με τη μορφή φορτίου πυθμένα. Στο Mohid Studio, σε αντίθεση με τα άλλα λογισμικά, ο συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης πολλαπλασιάζει και τα μεγέθη φορτίου πυθμένα και διαμηθικών τάσεων και όχι μόνο την εξέλιξη της μορφολογίας του πυθμένα, γι' αυτό και παρατηρούνται αρκετά υψηλότερες τιμές στα προαναφερθέντα μεγέθη συγκριτικά με αυτά που προκύπτουν από τα υπόλοιπα μοντέλα στερεομεταφοράς.

Εξαιρετικά σημαντικά είναι τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων για τη μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα. Αυτή η παράμετρος είναι βαρύνουσα σημασίας καθώς είναι η σύνθεση των αποτελεσμάτων των μοντέλων κυματικής δράσης, υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς, και μας επιτρέπει να ελέγξουμε αν τα αποτελέσματα που εξάγονται από την κάθε πλατφόρμα λογισμικού είναι έγκυρα και ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Στα σχήματα 5.6-5.6γ παρουσιάζεται η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα, στο πέρας της προσομοίωσης, όπως προκύπτει από το μοντέλο Sisyphé. Στο σχήμα 5.6α παρατηρούμε ότι μπροστά από το μέτωπο του παραλιακού δρόμου εμφανίζεται διάβρωση σε μεγάλο μήκος (με τιμή  $-0.2$  m σε όρους εξέλιξης πυθμένα), γεγονός που συνάδει με την παροντική εικόνα της περιοχής (Εικόνα 4.2). Στο σχήμα 5.6β γίνεται ξανά εμφανής διάβρωση, στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων, με αποθέσεις αντίστοιχα σε μεγαλύτερα βάθη αμέσως μπροστά από το λιμένα της Αυλίδας, σε μεγαλύτερο βαθμό.

Κατ' αντιστοιχία στα σχήματα 5.12-5.12γ παρουσιάζεται η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης, όπως προκύπτει από το μοντέλο CMS-Flow. Τα αποτελέσματα αυτής της παραμέτρου για τις περιοχές ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ταυτίζονται σε μεγάλο βαθμό με τα αντίστοιχα που έχουν προκύψει από το μοντέλο Sisyphé. Συγκεκριμένα στο μέτωπο του παραλιακού

δρόμου (Σχήμα 5.12α) παρατηρείται διάβρωση, καθώς η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα λαμβάνει τιμή περί τα -0.2 m, δηλαδή είναι σχεδόν ταυτόσημη στο μέγεθος με αυτή που προέκυψε από το μοντέλο Sisyphé. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μορφολογική εξέλιξη πυθμένα στην περιοχή του λιμένα της Αυλίδας και των υφιστάμενων προβόλων (Σχήμα 5.12β). Σ' αυτή την περιοχή, παρατηρείται μια σχετική «ισορροπία» στα μορφοδυναμικά φαινόμενα, με διαβρώσεις και αποθέσεις ειδικά στις θέσεις που ήταν κατασκευασμένα τα έργα προστασίας (πρόβολοι). Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα προαναφερθέντα έργα συμμετείχαν σε κάποιο βαθμό στην προστασία της παράκτιας ζώνης, καθώς εκατέρωθεν τους παρατηρούνται αποθέσεις ιζήματος. Παρόμοιες αποθέσεις παρατηρούνται και στο τμήμα δεξιά του προσήνεμου μώλου του λιμένα της Αυλίδας, γεγονός που ενδέχεται μακροχρόνια να επηρεάσει την εικόνα της παραλίας κοντά στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης.

Ένα ακόμη μειονέκτημα του μοντέλου Mohid Water είναι ότι δε διαθέτει κάποιο αντίστοιχο μέγεθος με αυτό της μορφολογικής εξέλιξης του πυθμένα. Το πιο σχετικό μέγεθος είναι από της απόθεσης άμμου που παρατίθεται στα σχήματα 5.18 και 5.18α. Παρατηρούμε από τα παραπάνω απόθεση άμμου μπροστά στο μέτωπο του παραλιακού δρόμου. Παρ' όλο που παρουσιάζεται απόθεση σχεδόν πάνω στην ακτογραμμή (Σχήμα 5.18α), και κάτι τέτοιο θα βρισκόταν σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δύο άλλα μοντέλα, παρατηρώντας την κλίμακα μηκών μπορούμε να δούμε ότι αυτή η απόθεση γίνεται σε σημαντική απόσταση από την ακτογραμμή (μεσολαβούν συνήθως 1-2 κελιά κανάβου μεταξύ του σημείου απόθεσης και του ορίου της ακτογραμμής). Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι έχουμε απόθεση σε κάποιο βάθος μπροστά από τον παραλιακό δρόμο, άρα ενδεχόμενη διάβρωση στο μέτωπο του. Τέλος σημειώνεται ότι ο ρυθμός απόθεσης άμμου είναι τάξης μεγέθους  $2.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ , και συνάδει ως προς το μέγεθος με τα αποτελέσματα της στερεομεταφοράς (solid discharge) που αποκτήθηκαν από το μοντέλο Sisyphé και αναλύθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο.

Το ζήτημα της ιδανικής σχέσης υπολογιστικού κόστους και διάρκειας προσομοίωσης είναι από αυτά που είχαν βαρύνουσα κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων για την παρούσα διπλωματική. Οι προσομοιώσεις στο λογισμικό Telemac-Mascaret προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα που συνδέονται με τον κάναβο πεπερασμένων στοιχείων ακανόνιστου μεγέθους (flexible mesh) ωστόσο για να διατηρηθεί υπολογιστική σταθερότητα απαιτείται πολύ μικρό χρονικό βήμα (1-2 sec). Αποτέλεσμα αυτού είναι χρονοβόρες προσομοιώσεις που δεν επιτρέπουν διάρκεια προσομοίωσης μεγαλύτερη της μιας μέρας. Για τα φαινόμενα παλίρροιας όμως απαιτείται χρόνος ίσος και πολλές φορές μεγαλύτερος της μιας μέρας προκειμένου το μοντέλο να έχει ικανοποιητικό χρόνο διάκλισης (ramp time). Στο λογισμικό CMS-Flow το υπολογιστικό κόστος είναι σημαντικά μικρότερο καθώς χρησιμοποιήθηκε κάναβος με πολύ μεγαλύτερο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων ( $100 \times 100 \text{ m}^2$ ). Υπήρξε έτσι η δυνατότητα να γίνει η προσομοίωση για διάρκεια 6 ημερών και να εξαιρεθούν επομένως αβεβαιότητες που σχετίζονται με τον ικανοποιητικό χρόνο διάκλισης του μοντέλου. Ωστόσο το μεγάλο μέγεθος και η γεωμετρία των στοιχείων, όπως είναι κατανοητό, δεν μπορεί να αποτυπώσει το ίδιο καλά την ακριβή μορφολογία της ακτογραμμής όπως ένας κάναβος με στοιχεία ακανόνιστης γεωμετρίας (flexible mesh).

Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας 5.1 που περιλαμβάνει τη σύγκριση των μεγεθών που προέκυψαν από τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής.

Πίνακας 5.1: Συγκριτική ανάλυση αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα διαφορετικά αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας

Συγκρινόμενο μέγεθος	Tomawac	CMS-Wave	SWAN
Χωρική κατανομή ύψους κύματος	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων	Ταύτιση με τα άλλα δύο μοντέλα, αύξηση κατά τόπους λόγω ανάκλασης	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων
	Telemac-2D	CMS-Flow	Mohid Water
Μέτρο ταχύτητας ρευμάτων στην ισοβαθή των 5 m μπροστά από το μέτωπο του παραλιακού δρόμου	~ 0.13 m/s	~ 0.10 m/s	~ 0.16 m/s
Ταύτιση κατεύθυνσης ταχύτητας ρευμάτων στην περιοχή του παραλιακού δρόμου	Όχι πλήρης ταύτιση με τα μοντέλα CMS-Flow και Mohid-Water	Σχεδόν πλήρης ταύτιση με το μοντέλο Mohid Water, μικρές διαφορές με το μοντέλο Telemac-2D	Σχεδόν πλήρης ταύτιση με το μοντέλο CMS-Flow, μικρές διαφορές με το μοντέλο Telemac-2D, περιοδική αλλαγή της κατεύθυνσης των διανυσμάτων
Ταύτιση κατεύθυνσης ταχύτητας ρευμάτων στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων, περιοδική αλλαγή της κατεύθυνσης των διανυσμάτων
	Sisyphé	CMS-Flow	Mohid Water
Σύγκριση τάξης μεγέθους στερεοπαροχής (ή απόθεσης άμμου)	Ταύτιση με το μοντέλο Mohid Water ( $\times 10^{-6}$ )	Δεν είναι δυνατή η σύγκριση- αποτελέσματα σε όρους ολικής στερεομεταφοράς (σε m/s)	Ταύτιση με το μοντέλο Sisyphé ( $\times 10^{-6}$ )
Ταύτιση κατεύθυνσης στερομεταφοράς στην περιοχή του παραλιακού δρόμου	Όχι πλήρης ταύτιση με τα μοντέλα CMS-Flow και Mohid-Water	Σχεδόν πλήρης ταύτιση με το μοντέλο Mohid Water, μικρές διαφορές με το μοντέλο Telemac-2D	Σχεδόν πλήρης ταύτιση με το μοντέλο CMS-Flow, μικρές διαφορές με το μοντέλο Telemac-2D, περιοδική αλλαγή της κατεύθυνσης των διανυσμάτων, αποτελέσματα με τη μορφή φορτίου πυθμένα
Ταύτιση κατεύθυνσης στερομεταφοράς στην περιοχή του παραλιακού δρόμου	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων	Ταύτιση με τα αποτελέσματα των άλλων δύο μοντέλων, περιοδική αλλαγή της κατεύθυνσης των διανυσμάτων, αποτελέσματα με τη μορφή φορτίου πυθμένα

Σ' αυτό το σημείο θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα Σχήματα που παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

Συγκεκριμένα τα Σχήματα Π.1-Π.3β προέρχονται από την προσομοίωση στην πλατφόρμα λογισμικών Delft3D. Καθώς το μοντέλο διάδοσης των κυματισμών είναι το SWAN, το οποίο εμπεριέχεται στην πλατφόρμα Mohid Studio και αναλύθηκε εκτενώς, παρουσιάζεται μόνο το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για τον ισοδύναμο κυματισμό Ανατολικής διεύθυνσης. Όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του Delft3D πραγματοποιείται με χρήση μετταγλωτιστή του υπολογιστικού εργαλείου Matlab και η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων κρίνεται ότι υστερεί σημαντικά, συγκριτικά με τα πιο σύγχρονα μέσα που διαθέτουν οι πλατφόρμες λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάστηκαν εκτενέστερα στο παρόν Κεφάλαιο. Μπορούμε ωστόσο να παρατηρήσουμε για τις ταχύτητες των ρευμάτων ότι στην περιοχή που εκτείνεται από την ακτογραμμή έως την ισοβαθή των 5 m μπροστά από τον παραλιακό δρόμο οι ταχύτητες κυμαίνονται μεταξύ 0.15-0.25 m/s. Οι κατευθύνσεις των διανυσμάτων παρουσιάζουν μια ασυμφωνία με την εικόνα που αποκτήθηκε από τα υπόλοιπα μοντέλα, ειδικά στην περιοχή του παραλιακού δρόμου που παρατηρούνται αρκετές εναλλαγές της κατεύθυνσης αυτής (άλλα διανύσματα έχουν φορά προς το Βορά και άλλα προς το Νότο). Η εξαγωγή αποτελεσμάτων για τη στερεομεταφορά (Σχήμα Π.3-Π.3β), ειδικά για την κατεύθυνσή της, είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω των μέσων οπτικοποίησης που παρέχονται. Ωστόσο μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μέγεθός της είναι μιας τάξης μεγέθους ( $\times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ) μεγαλύτερο από αυτό που υπολογίστηκε στα μοντέλα Sisyphé και Mohid Water.

Στα Σχήματα Π.4-Π.11α παρουσιάζονται αποτελέσματα των προσομοιώσεων της πλατφόρμας λογισμικών Telemac-Mascaret με χρήση του λογισμικού Tecplot της Genias Graphics, που χρησιμοποιείται εξειδικευμένα για την επεξεργασία και οπτικοποίηση αποτελεσμάτων από μοντέλα του πεδίου της Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD).

Στο Σχήμα Π.4 παρουσιάζονται τα «ανοιχτά» και «κλειστά» όρια που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση προσομοιώσεων στα μοντέλα του Telemac-Mascaret. Τα Σχήματα Π.5-Π.8γ ουσιαστικά παρουσιάζουν τα ίδια μεγέθη που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.4-5.5γ, δηλαδή τις ταχύτητες ρευμάτων και τη στερεομεταφορά στο πέρας της προσομοίωσης. Ωστόσο το λογισμικό Tecplot προσφέρει τη δυνατότητα να γίνει διαχωρισμός των μεγεθών ανά διεύθυνση (u και v για τις ταχύτητες ρευμάτων, x και y για τη στερεομεταφορά) και να γίνει συνδυασμός διανυσμάτων και χρωματισμένων περιγραμμάτων (contours). Αυτή η δυνατότητα εκμεταλλεύτηκε για μια πιο ενδεδειγμένη παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε όρους ταχύτητας ρευμάτων και στερεομεταφοράς για τα μοντέλα Telemac-2D και Sisyphé αντίστοιχα. Στα Σχήματα Π.9-Π.10α παρουσιάζεται η ανηγμένη στερεοπαροχή σε όρους φορτίου πυθμένα (Σχήμα Π.9 και Σχήμα Π.9α) και σε όρους φορτίου σε αιώρηση (Σχήμα Π.10 και Σχήμα Π.10α). Είναι φανερό ότι οι μεγαλύτερες τιμές της στερεοπαροχής εντοπίζονται στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και στην περιοχή του λιμένα και των υφιστάμενων προβόλων, όπου και παρατηρούνται τα πιο έντονα μορφοδυναμικά φαινόμενα. Στα σχήματα Π.11-Π.11α παρουσιάζεται η χωρική



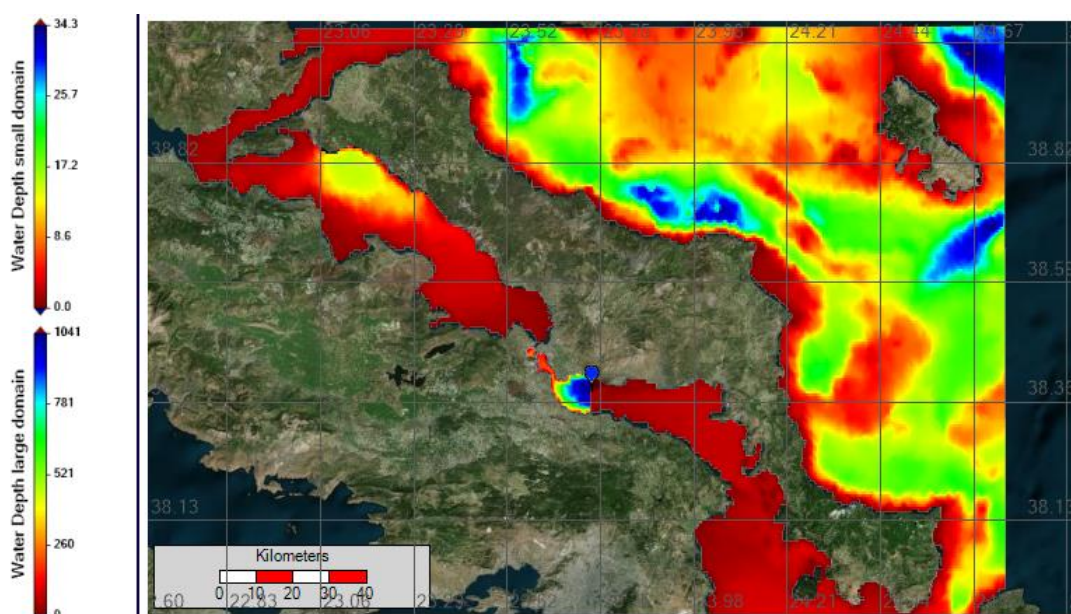
κατανομή της διατμητικής τάσης του πυθμένα. Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στην περιοχή συμβολής του ανοιχτού ορίου και του στερεού ορίου. Όπως έχει ήδη αναφερθεί αυτές οι περιοχές είναι υπολογιστικά ασταθείς, λόγω της απότομης μείωσης του βάθους και της μεγάλης κυματικής ενέργειας που δέχονται, ωστόσο βρίσκονται αρκετά μακριά από τις περιοχές ενδιαφέροντος και θεωρείται πως δεν επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Οι αμέσως μεγαλύτερες τιμές της συρτικής τάσης παρατηρούνται μπροστά από το μέτωπο του παραλιακού δρόμου ( $0.15 \text{ N/m}^2$ ).

Η τελική ομάδα σχημάτων (Π.12-Π.15) προέρχονται από τα λογισμικά CMS-Flow/CMS-Wave.

Αρχικά στο Σχήμα Π.12 παρουσιάζονται τα «ανοιχτά» και «κλειστά όρια» που χρησιμοποιήθηκαν στο κυματικό και το υδροδυναμικό μοντέλο. Το Σχήμα Π.13 αποτελεί μια χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow με τη μορφή χρωματισμένων περιγραμμάτων (filled contours) για να γίνουν πιο εμφανείς οι τιμές του μέτρου των ταχυτήτων σε κάθε περιοχή του υπολογιστικού κανάβου. Στο Σχήμα Π.14 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή της αλατότητας (salinity), καθώς το μοντέλο CMS-Flow προσφέρει τη δυνατότητα μαζί με τη στερεομεταφορά να υπολογίζεται η χρονική εξέλιξη και χωρική κατανομή της αλατότητας στον υπολογιστικό κανάβο. Τέλος στο Σχήμα Π.15 παρουσιάζεται το κλάσμα του ιζήματος σε αιώρηση. Ουσιαστικά πρόκειται για μια σχηματική παρουσίαση των περιοχών που παρουσιάζουν εντονότερη κίνηση ιζήματος σε αιώρηση (κλάσμα ιζήματος σε αιώρηση  $>0.5$ ) σε σχέση με τις περιοχές όπου κυριαρχεί η κίνηση με τη μορφή φορτίου πυθμένα (κλάσμα ιζήματος σε αιώρηση  $<0.5$ ). Παρατηρούμε έντονη κίνηση ιζήματος σε αιώρηση στην περιοχή του παραλιακού δρόμου. Αυτό ενδεχόμενα οφείλεται στην ανάκλαση του κυματισμού στον παραλιακό δρόμο (που μπορεί να υπολογιστεί στο CMS-Wave) και πιθανώς θέτει ένα μεγάλο ποσοστό του ιζήματος σε αιώρηση.

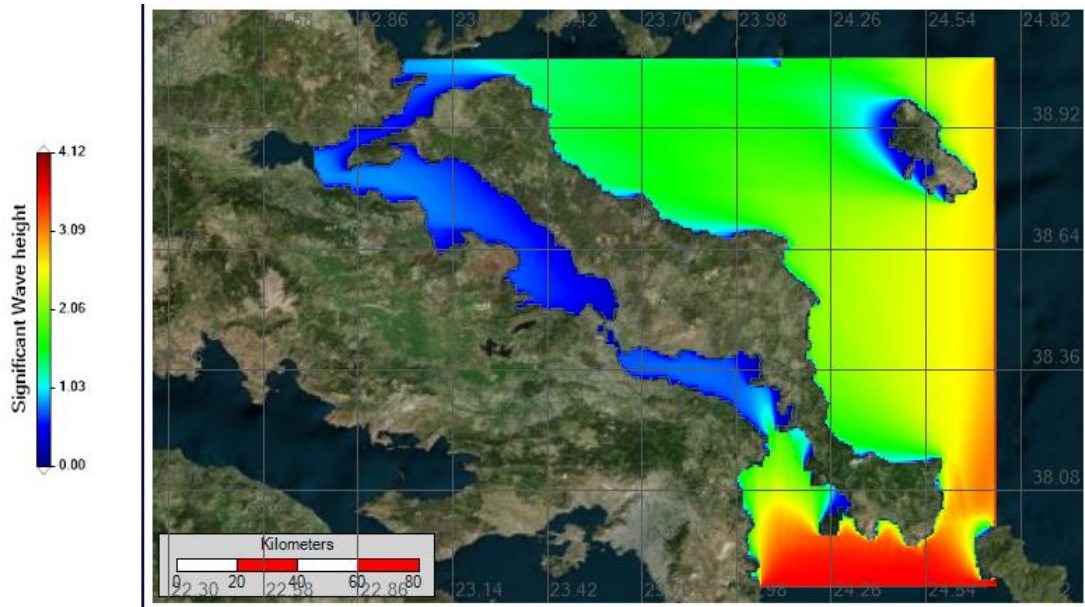
## 5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων SWAN με το υπολογισθέν ύψος κύματος από το ισοδύναμο κυματικό κλίμα

Σ' αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση στο SWAN του κυματικού κλίματος για τον διευρυμένο κανάβο που παρουσιάστηκε στην εικόνα 4.10 της παρούσας μελέτης. Η προσομοίωση έγινε για να συγκριθούν τα ύψη κύματος που προέκυψαν από το ισοδύναμο κυματικό κλίμα για τον Ανατολικό κυματισμό. Γι' αυτό το λόγο, στο ανατολικό και νότιο όριο του κανάβου τέθηκε κύμα ύψους 3.5 m, ενώ λόγω του μεγάλου εύρους της περιοχής επιλέχθηκε άνεμος με ταχύτητα πνοής 9 m/s (της τάξεως των 5 Beaufort), σταθερής διάρκειας και μεγέθους. Τα αποτελέσματα που εξάγονται από το μοντέλο SWAN θα είναι με τη μορφή χρονοσειράς σε ένα σημείο (στο εξής σημείο A) του κανάβου, το οποίο συμπίπτει με το ανατολικό ανοιχτό όριο της μικρής περιοχής μελέτης (Εικόνα 5.1).

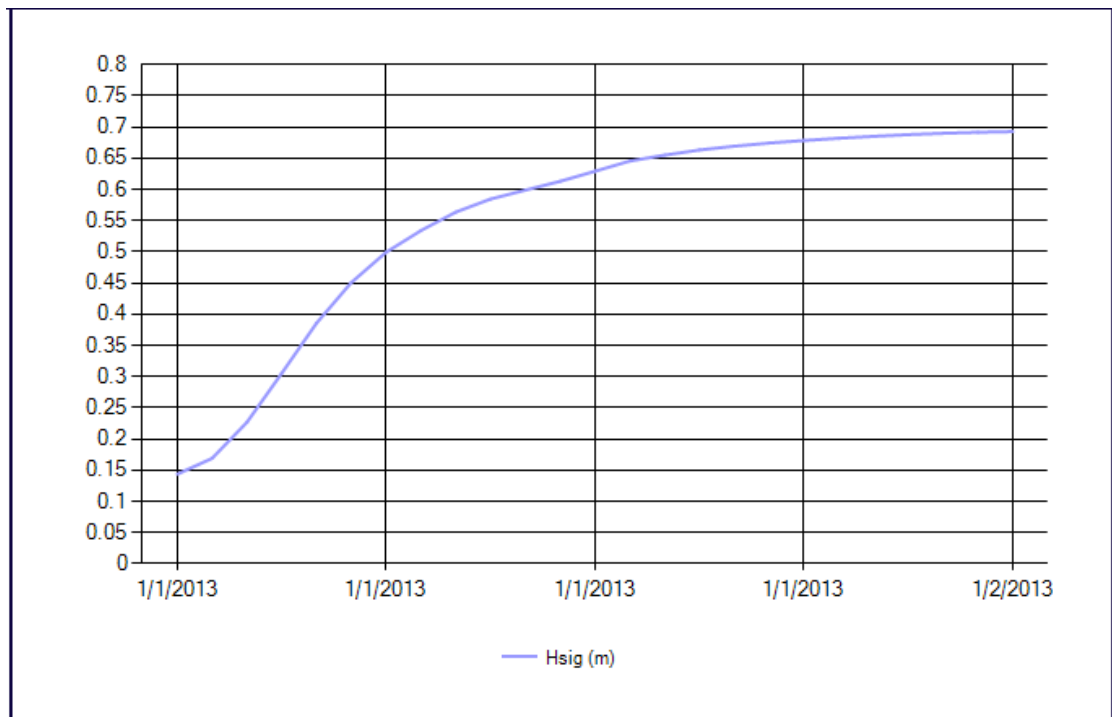


Εικόνα 5.1: Θέση σημείου εξαγωγής χρονοσειράς του χαρακτηριστικού ύψους κύματος με το SWAN, αναφορικά με τις δύο βαθυμετρίες τις περιοχής

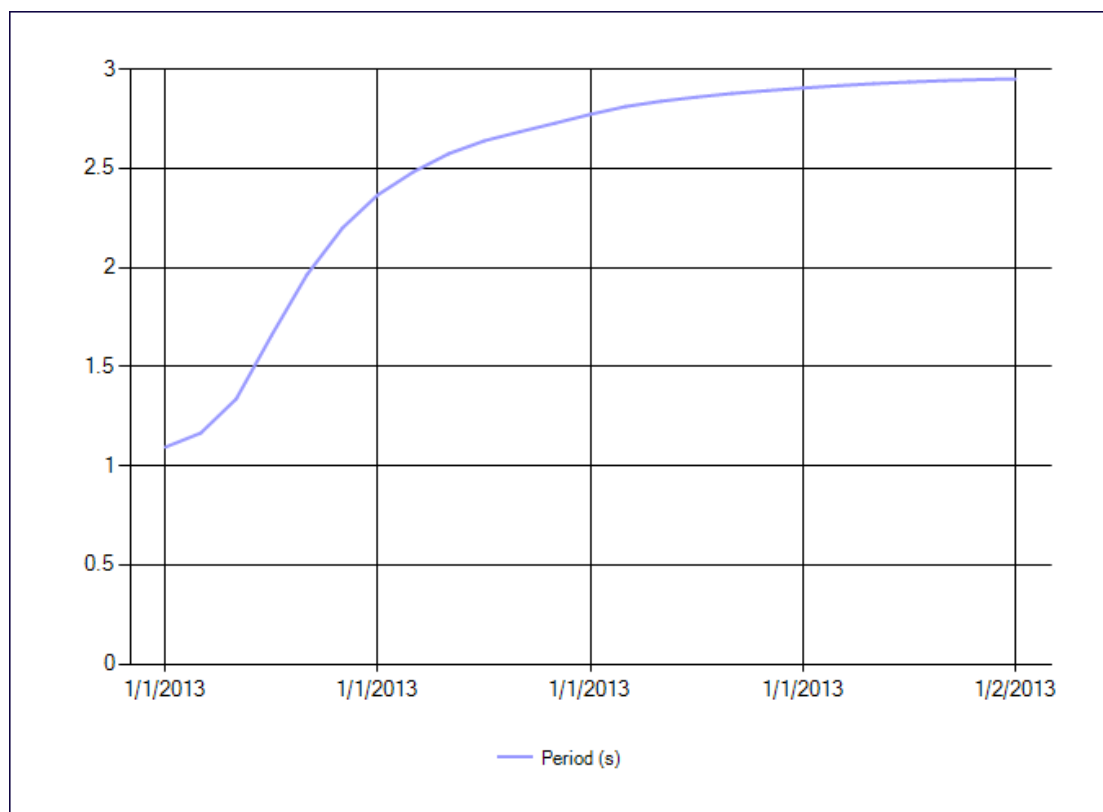
Στο σχήμα 5.19 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του ύψους του κύματος στο πέρας της προσομοίωσης (24 ώρες), στο σχήμα 5.20 η χρονοσειρά του ύψους του κύματος και στο σχήμα 5.21 η χρονοσειρά της περιόδου του κυματισμού στο σημείο A με συντεταγμένες (lat,lon) = (23.7264, 38.3774)



Σχήμα 5.19: Χωρική κατανομή του ύψους του κύματος (m), από την προσομοίωση στο μοντέλο SWAN



Σχήμα 5.20: Χρονοσειρά του χαρακτηριστικού ύψους του κύματος στο σημείο A



Σχήμα 5.21: Χρονοσειρά της περιόδου του κυματισμού στο σημείο A

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου SWAN και του ισοδύναμου ύψους κύματος από τη σχέση των Borah και Balloffet, 1985 προκύπτει σχεδόν πλήρης ταύτιση για την Ανατολική διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού. Σημειώνεται ωστόσο ότι χρησιμοποιήθηκε στο διευρυμένο κάρναβο η τιμή ύψους κύματος των 3.5 m, που εμφανίζεται μια και μοναδική φορά, οπότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι τα στοιχεία του κυματικού κλίματος που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική αντιπροσωπεύουν μια αρκετά δυσμενή περίπτωση.

Πίνακας 5.2: Ποσοτική σύγκριση των υπολογισθέντων χαρακτηριστικών του κύματος, με εφαρμογή του ισοδύναμου κυματικού κλίματος και του μοντέλου SWAN

	$H_s$ (m)	$T_s$ (m)
Ισοδύναμο κυματικό κλίμα	0.65	3
SWAN	0.69	2.9
Διαφορά (%)	-5.8	3.33

Στο παράρτημα, εκτός από τα αποτελέσματα του Delft-3D και του Telemac-Mascaret (μέσω του προγράμματος επεξεργασίας Tecplot), παρουσιάζονται και αποτελέσματα από το CMS-Flow και Mohid Studio, για παραμέτρους οι οποίες δε θεωρήθηκαν κρίσιμο να παρουσιαστούν σε αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας.

## 6. Συμπεράσματα – Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 6.1 Σύνοψη Συμπερασμάτων

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα από τα πιο ευμετάβλητα συστήματα στη φύση, καθώς οι παράκτιοι μηχανισμοί, όπως τα κύματα και τα παράκτια ρεύματα, συμβάλλουν στην αποσταθεροποίηση της. Επιπλέον, η κατασκευή παράκτιων έργων μεταβάλλει την ισορροπία του φυσικού συστήματος, διαμορφώνοντας μια νέα κατάσταση αλληλεπίδρασης. Η συνδυασμένη δράση όλων αυτών των παραγόντων επηρεάζει σημαντικά την εξέλιξη της ακτογραμμής.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η τρωτότητα της παράκτιας περιοχής στο Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο και συγκεκριμένα στην παραλιακή ζώνη Βαθέως-Αυλίδας. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση τριών λογισμικών, του Telemac-Mascaret (με τα μοντέλα Tomawac, Telemac-2D, Sisyphé), SMS (με τα μοντέλα CMS-Wave και CMS-Flow) και Mohid Studio (με τα μοντέλα SWAN και Mohid Water).

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας μελέτης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι και τα τρία λογισμικά προσομοιάζουν ικανοποιητικά τη διάβρωση που παρατηρείται στην ευρύτερη περιοχή και ειδικά στο τμήμα που είναι κατασκευασμένος ο παραλιακός δρόμος. Όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο το μοντέλο υδροδυναμικής και στερεομεταφοράς Mohid Water παρουσιάζει τη λιγότερο αξιόπιστη εικόνα, που οφείλεται σε ένα συνδυασμό παραμέτρων, όπως η μη εξαγωγή αποτελεσμάτων για ίζημα σε αιώρηση, η μη δυνατότητα υπολογισμού/οπτικοποίησης μορφολογικής εξέλιξης του πυθμένα κ.α.

Για το κυματικό κλίμα τα αποτελέσματα που εξήχθησαν και από τα τρία μοντέλα (Tomawac, CMS-Wave, Swan) δείχνουν μεγάλη αντιστοιχία ως προς τις τιμές σε όλη την έκταση του κανάβου. Παρόλο που το Tomawac είναι ένα πλήρως φασματικό μοντέλο τρίτης γενιάς ενώ τα άλλα δύο φασματικά μοντέλα πεπερασμένων διαφορών παρατηρείται μεγάλη συμφωνία αποτελεσμάτων και αυτό οφείλεται στο ότι οι κυματισμοί της περιοχής σε συντριπτικό ποσοστό (99%) δεν περιορίζονται από τη διάρκεια πνοής του ανέμου. Από το λογισμικό SWAN για την περίπτωση του Ανατολικού κυματισμού παρατηρήθηκε μικρή είσοδος κυματισμών στο βορειοδυτικό τμήμα όπου στενεύει ο κόλπος, σε αντίθεση με τα άλλα μοντέλα, αυτό το γεγονός όμως δε θεωρείται ότι επηρεάζει τα αποτελέσματα στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Όσον αφορά τις ταχύτητες των ρευμάτων, κυμαίνονται στην ίδια τάξη μεγέθους και για τα τρία μοντέλα στην περιοχή ενδιαφέροντος, με μικρές διαφορές στην κατεύθυνση που οφείλεται στο διαφορετικό κανάβο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης.

Σχετικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα, παρατηρείται αρκετά μεγάλη αντιστοιχία για τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το Sisyphé και το CMS-Flow, τόσο ως προς τη μορφή όσο και ως

προς το μέτρο. Το ίδιο ισχύει και για τα διανύσματα της στερεομεταφοράς μόνο που το Sisyphé δίνει αποτελέσματα ρυθμού στερεομεταφοράς ( $m^2/s$ ) και δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα στερεομεταφοράς από το CMS-Flow που δίνονται σε ( $m/s$ ).

Συνοψίζοντας, η προσομοίωση των κυματικών και υδροδυναμικών χαρακτηριστικών, καθώς και μορφοδυναμικών διεργασιών στην περιοχή μελέτης, κρίνεται ικανοποιητική και από τις τρεις πλατφόρμες λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν, με αρκετά μεγάλη συμφωνία αποτελεσμάτων. Μικρές βελτιώσεις ως προς υπολογιστικές ανακρίβειες, που συνδέονται με τις διαφορετικές φύσεις των αριθμητικών μοντέλων ενδεχόμενα να οδηγήσουν σε σχεδόν πλήρη ταύτιση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την κάθε πλατφόρμα λογισμικού.

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στην περιοχή του παραλιακού μετώπου της Αυλίδας όπως παρουσιάστηκε και στα αποτελέσματα υπάρχει μια περιοχή με υφιστάμενα έργα προστασίας της παράκτιας ζώνης (πρόβολοι) και μια δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, όπου είναι κατασκευασμένος ο παραλιακός δρόμος. Τα πιο πολλά από τα κάθετα έργα δείχνουν να έχουν αλλοιωθεί με την πάροδο του χρόνου, ωστόσο παρατηρείται ακόμα και σήμερα συγκέντρωση ιζήματος στην παρειά τους, που αποδεικνύει ότι λειτουργούσαν ικανοποιητικά σε κάποια χρονική περίοδο. Στην περιοχή του παραλιακού δρόμου, όπως έγινε φανερό και από τις προσομοιώσεις παρατηρείται το εντονότερο πρόβλημα διάβρωσης, που οφείλεται εν μέρει στο προστατευτικό πρανάς του δρόμου που λειτουργεί σαν ανακλαστικό μέτωπο για τους κυματισμούς.

Αρχικά, προτείνεται η χρήση λογισμικών που θα παρέχουν τη δυνατότητα να ληφθεί υπ' όψη η παρουσία των παράκτιων έργων. Τέτοια λογισμικά είναι το Mike 21 της DHI και το μοντέλο ADCIRC του ISEC που περιλαμβάνεται στην πλατφόρμα λογισμικών SMS της Aquaveo. Το ADCIRC είναι ένα μοντέλο κυκλοφορίας που πραγματοποιεί τους υπολογισμούς του σε κλίμακα με ακανόνιστης γεωμετρίας πεπερασμένα στοιχεία, και μπορεί να προσομοιώσει φαινόμενα στερεομεταφοράς, αν εισαχθεί κατάλληλο αρχείο με τις τάσεις ακτινοβολίας. Έχει συζευχτεί επιτυχώς με το SWAN, προτείνεται όμως να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο CGWAVE που επίσης περιλαμβάνεται στην πλατφόρμα λογισμικών SMS. Το CGWAVE είναι ένα εξελιγμένο μοντέλο υπολογισμού των κυματικών χαρακτηριστικών που στηρίζεται στην επίλυση των εξισώσεων ήπιας κλίσης (Mild-Slope equations). Επιτρέπει την αναλυτική περιγραφή της ακτογραμμής, στην οποία μπορούν να οριστούν έργα, για τα οποία θα ληφθούν υπ' όψη φαινόμενα όπως η ανάκλαση και η περίθλαση. Στο μοντέλο ADCIRC, στο ελεύθερο όριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί χρονοσειρά προκαθορισμένης στάθμης της θάλασσας, δηλαδή να υπάρχει ανεξαρτητοποίηση από την αβεβαιότητα των βάσεων δεδομένων με στοιχεία παλίρροιας. Το λογισμικό Mike 21 με τα μοντέλα Mike 21-SW, Mike 21-FM Hydrodynamic, Mike 21-FM Sediment Transport, έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών ανά τον κόσμο, και παρέχει τη δυνατότητα να οριστούν ανθρωπογενείς κατασκευές (structures) που επιδρούν στη διάδοση των κυματισμών και σε λοιπές παράκτιες διεργασίες.

Πέρα από τα μειονεκτήματα που σχετίζονται με την υπερβολική πύκνωση του κανάβου κοντά στην ακτογραμμή, και το μικρό χρονικό βήμα, το λογισμικό Telemac έχει το πλεονέκτημα της χρήσης κανάβων με πεπερασμένα στοιχεία ακανόνιστης

γεωμετρίας και είναι λογισμικό ελεύθερης πρόσβασης (open source). Το τελευταίο γεγονός συνεπάγεται μεγάλη ευελιξία στον προγραμματισμό και τις δυνατότητες που προσφέρουν τα επιμέρους μοντέλα. Επειδή όμως, όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, στο μοντέλο TOMAWAC δε λαμβάνονται υπ' όψη φαινόμενα περίθλασης και ανάκλασης προτείνεται να προγραμματιστεί κατάλληλα η σύζευξη των μοντέλων ώστε να περιλαμβάνεται και το ARTEMIS, ένα μοντέλο προσανατολισμένο στον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών σε περιοχές μερικών χιλιομέτρων. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την προσομοίωση κυματικού κλίματος σε λιμένες και προσφέρει τη δυνατότητα να ληφθούν υπ' όψη φαινόμενα όπως η περίθλαση και η ανάκλαση. Χρησιμοποιώντας λοιπόν το ARTEMIS στο συζευγμένο μοντέλο θα μπορούσε να παρατηρηθεί η επίδραση των παράκτιων έργων στη διάδοση των κυματισμών, και τελικά πώς επηρεάζονται οι ταχύτητες των ρευμάτων και η στερεομεταφορά.

Τέλος, θα μπορούσε σε μελλοντική βάση, για να διαπιστωθεί αν τα υφιστάμενα έργα μπορούν να ανταποκριθούν στο ρόλο της προστασίας της παράκτιας ζώνης εφόσον επισκευαστούν, να πραγματοποιηθεί μια ανάλυση με το μοντέλο GenCade που περιλαμβάνεται στην πλατφόρμα λογισμικών SMS της Aquaveo. Το GenCade είναι κατάλληλο σε εφαρμογές για υπολογισμό στερεομεταφοράς και εντοπισμού μορφολογικών αλλαγών, ιδιαίτερα επί τη παρουσία παράκτιων έργων. Οπότε μια ανάλυση με αυτό το μοντέλο θα μπορούσε να βοηθήσει στην εκτίμηση της σημαντικότητας των κάθετων έργων προστασίας και σε ποια κρίνεται πιο σημαντική η επισκευή τους.

## Βιβλιογραφικές Αναφορές

Καραμπάς, Θ., Κρεστενίτης, Ι., Κουτίτας, Χ., 2015. Ακτομηχανική - έργα προστασίας ακτών. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2095>

Μέμος Κ., 1992, Μαθήματα λιμενικών έργων, Αθήνα

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

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

Rosales P. et al, 2007, Wave-current interaction in coastal waters: Effects on the bottom-shear stress, Journal of Marine Systems 71 (2008) 131–148

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

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

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

Massel S., 2013, Ocean Surface Waves: Their physics and prediction: Second Edition, Institute of Oceanology of the Polish Academy of Sciences, Poland

Μαρκάκης Κ., 1972, Πλωταί Κατασκευαί, Αθήνα

Awk T., 2017, Tomawac User Manual, Version 7.2, Électricité de France

Ata R., 2017, Telemac2d User Manual, Version 7.2, Électricité de France

Tassi P., 2017, Sisyphé User Manual, Version 7.2, Électricité de France

Camenen B. and Larroude P., 2000, Numerical comparison of sediment transport formulae, Marine Sandware Dynamics, Lille

Camenen, B., and Larson, M. 2005, A general formula for non-cohesive bed load sediment transport. Estuarine, Coastal and Shelf Science 63, 249-260

Van Rijn et al, 1984, Sediment transport, part I: bed load transport, Journal of hydraulic engineering 110, 1431-1456



Dibajnia, M., Watanabe, A., 1992. Sheet flow under nonlinear waves and currents. In: Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng. ASCE, pp. 2015-2029, Venice

Soulsby, R.L., Damgaard, J.S., 2005, Bedload sediment transport in coastal waters, Coastal Eng. 52, 673—689

Sánchez A. et al., 2012, Coastal Modeling System Draft User Manual. Διαθέσιμο στο: [http://cirpwiki.info/images/6/67/CMS\\_UsersManual\\_050912.pdf](http://cirpwiki.info/images/6/67/CMS_UsersManual_050912.pdf)

Massey T. et al., 2011, STWAVE: Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 6.0, US Army Corps of Engineers

Lin et al., 2008, CMS-Wave: A Nearshore Spectral Wave Processes Model for Coastal Inlets and Navigation Projects, US Army Corps of Engineers

Van Doormaal, J. P. & Raithby, G. D., 1984, Enhancements of the Simple Method for Predicting Incompressible Fluid Flows, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, vol. 7, issue 2, pp. 147-163

Sánchez and Wu, 2011, A Non-Equilibrium Sediment Transport Model for Coastal Inlets and Navigation Channel, US Army Corps of Engineers

Delft University of Technology, 2017, SWAN Scientific and Technical Documentation. Διαθέσιμο στο: <http://swanmodel.sourceforge.net/download/zip/swantech.pdf>

Deltares, 2016, Delft3D-FLOW User Manual, Version: 3.15 Revision: 49020

Deltares, 2016, Delft3D-WAVE User Manual, Version: 3.15 Revision: 49030

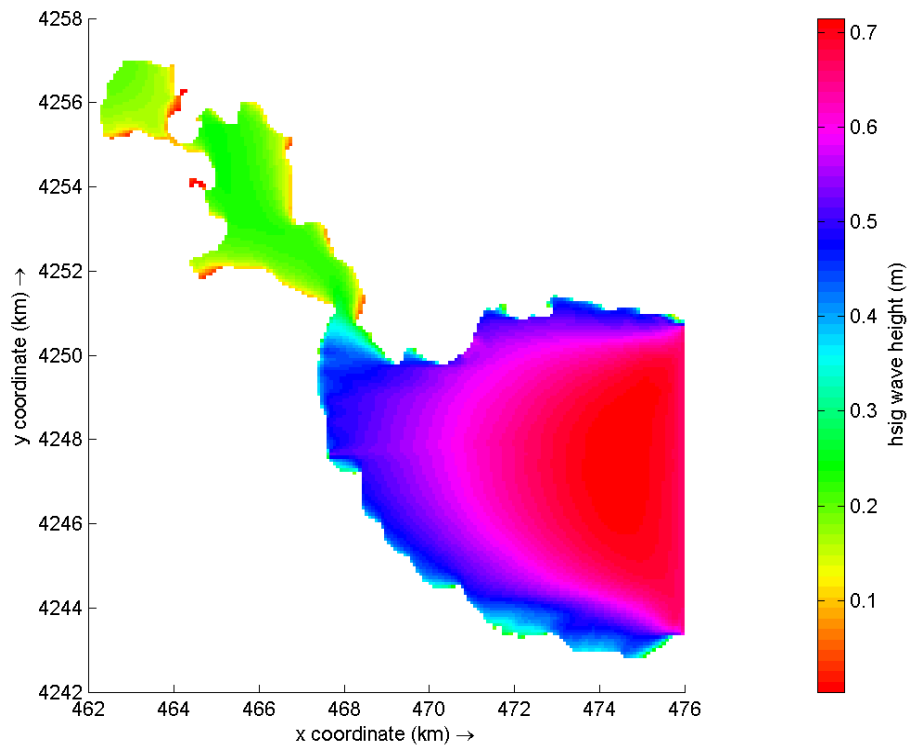
Brito D. et al., 2016, MOHID Studio Quick Start Guide for MOHID Water

Mateus M. and Neves R., 2013, Ocean modelling for coastal management-Case Studies with MOHID, IST Press, Lisbon

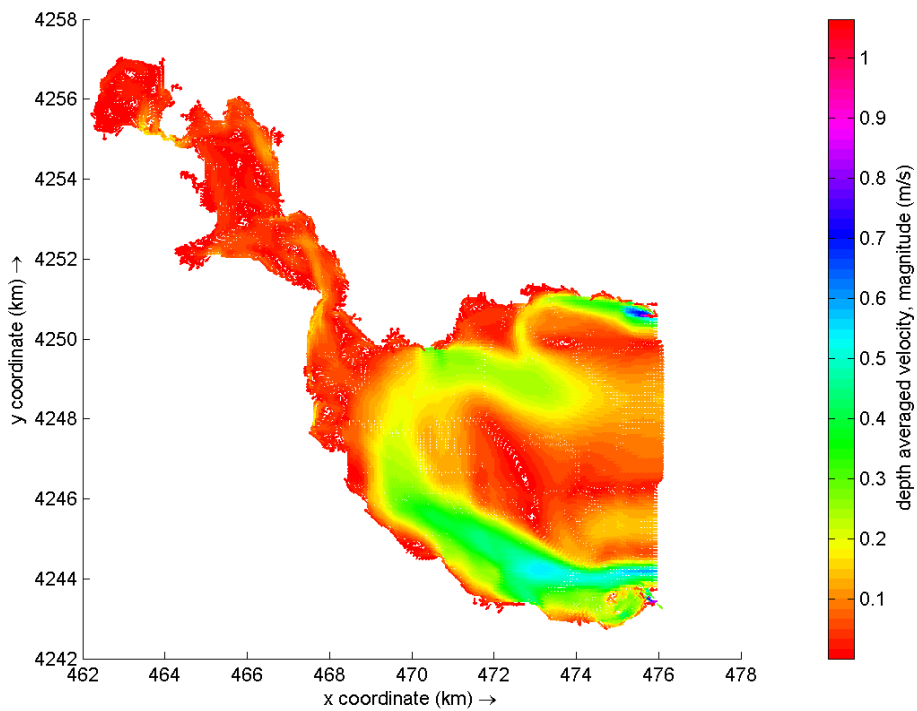
Afentoulis V. et al., 2017, Coastal Processes Assessment Under Extreme Storm Events Using Numerical Modelling Approaches, Environmental Processes, vol 4,no3, 731-747

Etemad-Shahidi A. et al., 2009, On the prediction of wave parameters using simplified methods, Journal of Coastal Research, Special Issue 56

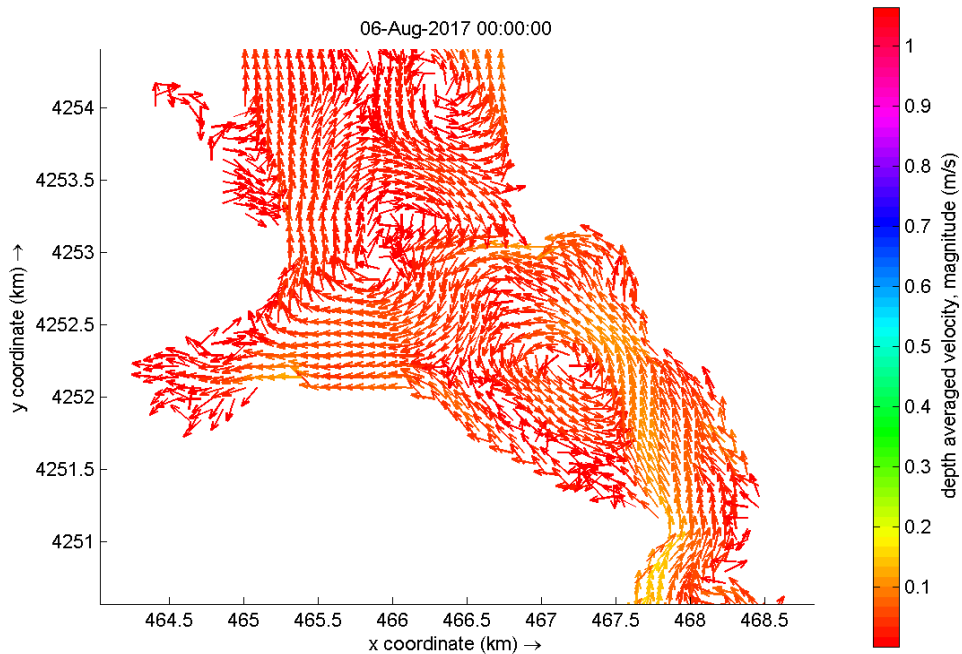
## Παράρτημα



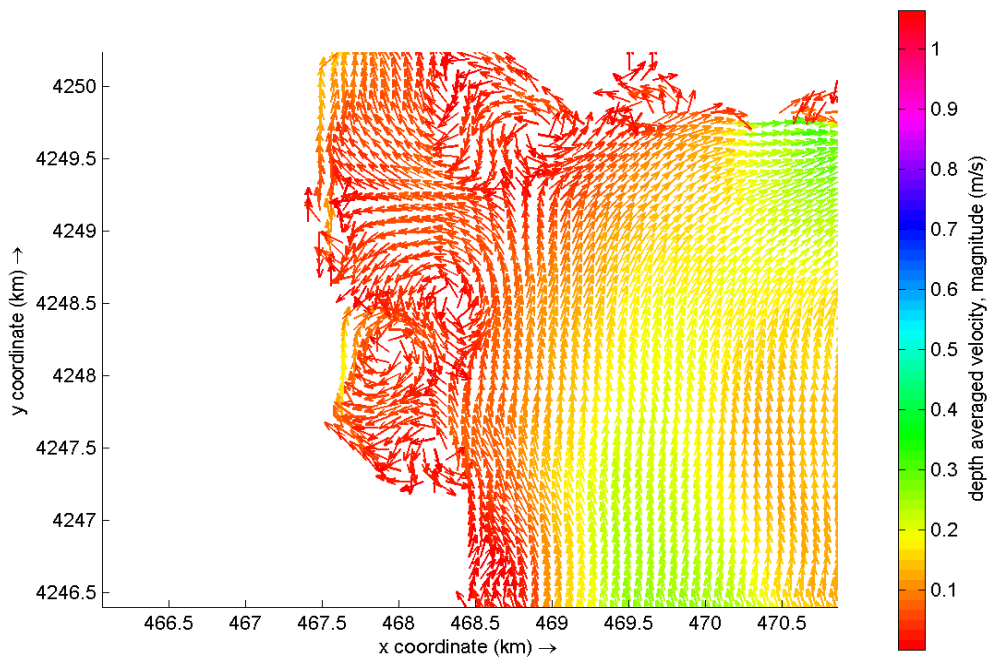
**Σχήμα Π.1:** Χωρική κατανομή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος (m) για τον Α κυματισμό για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα στο μοντέλο Delft-3D



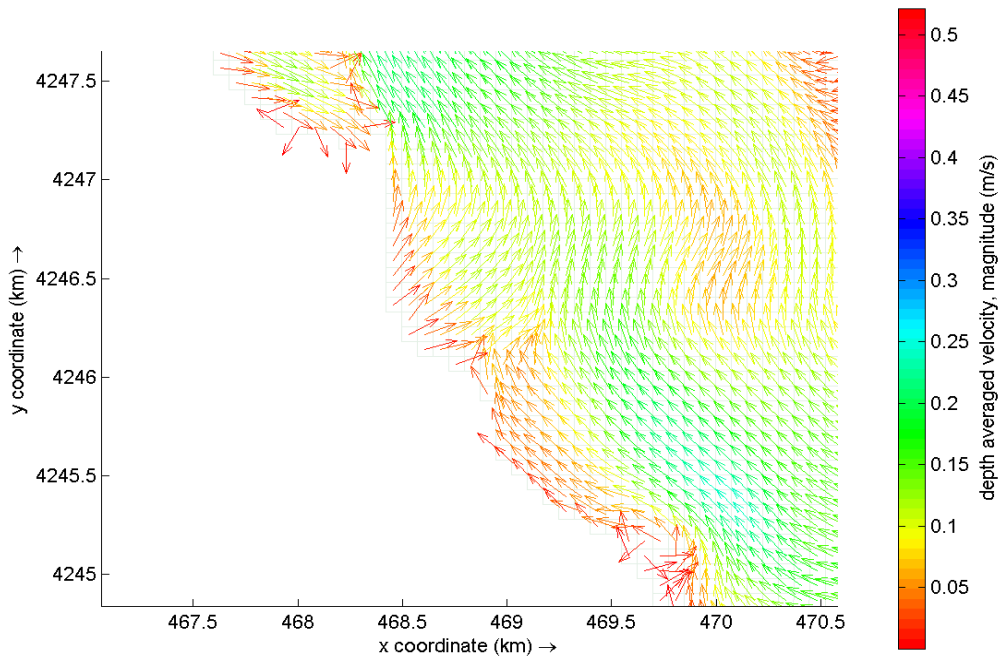
Σχήμα Π.2: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow



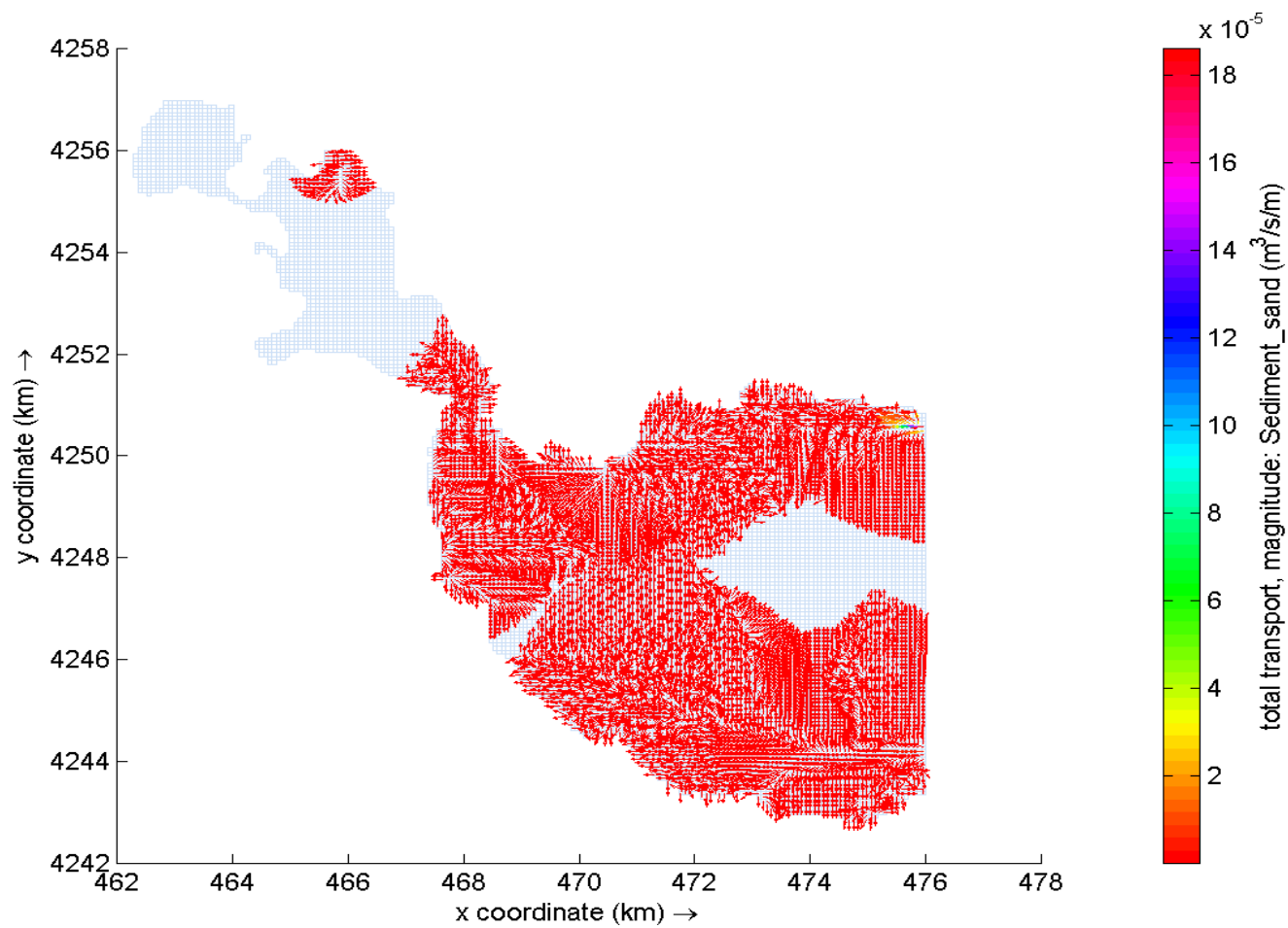
Σχήμα Π.2α: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στο ανω μέρος της περιοχής μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης μοντέλο Delft3D-Flow



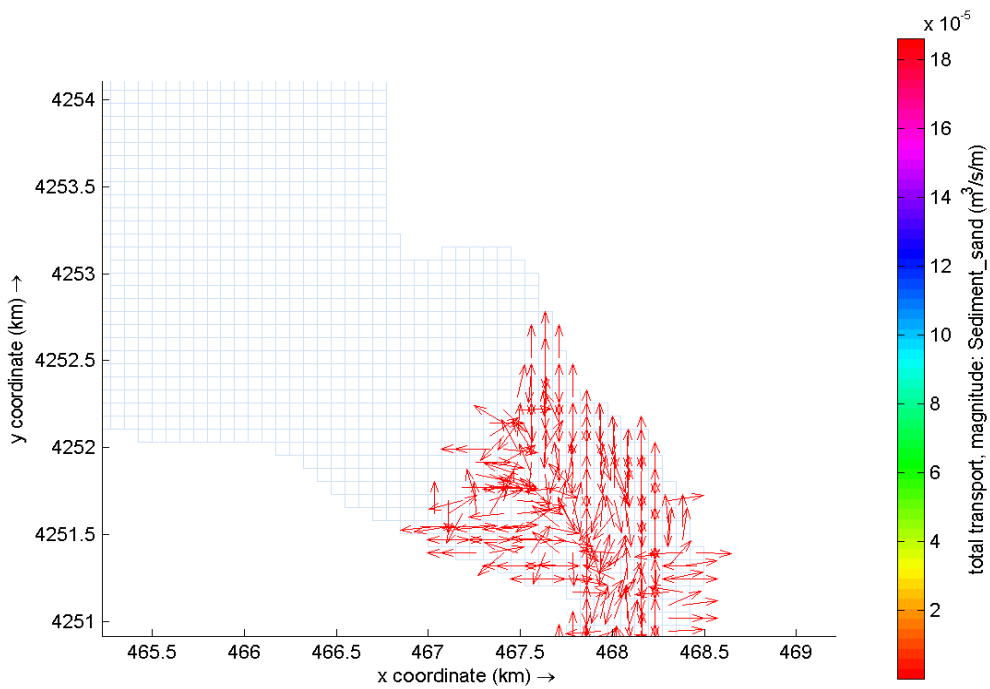
Σχήμα Π.2β: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow



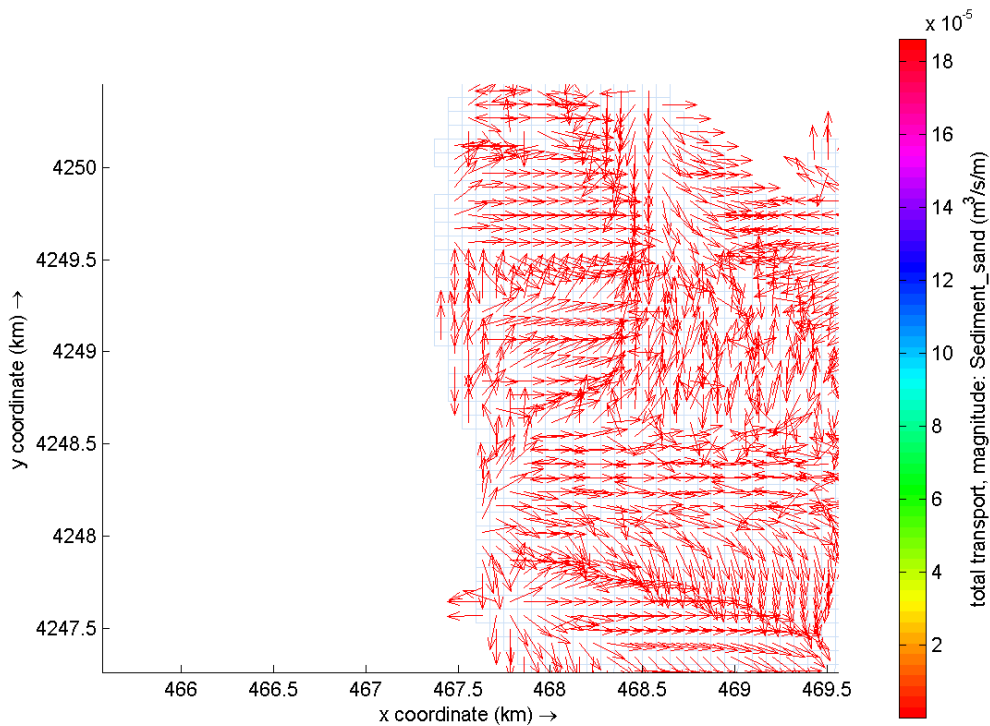
Σχήμα Π.2γ: Χωρική κατανομή της μέσης ως προς το βάθος ταχύτητας των ρευμάτων (m/s) στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow



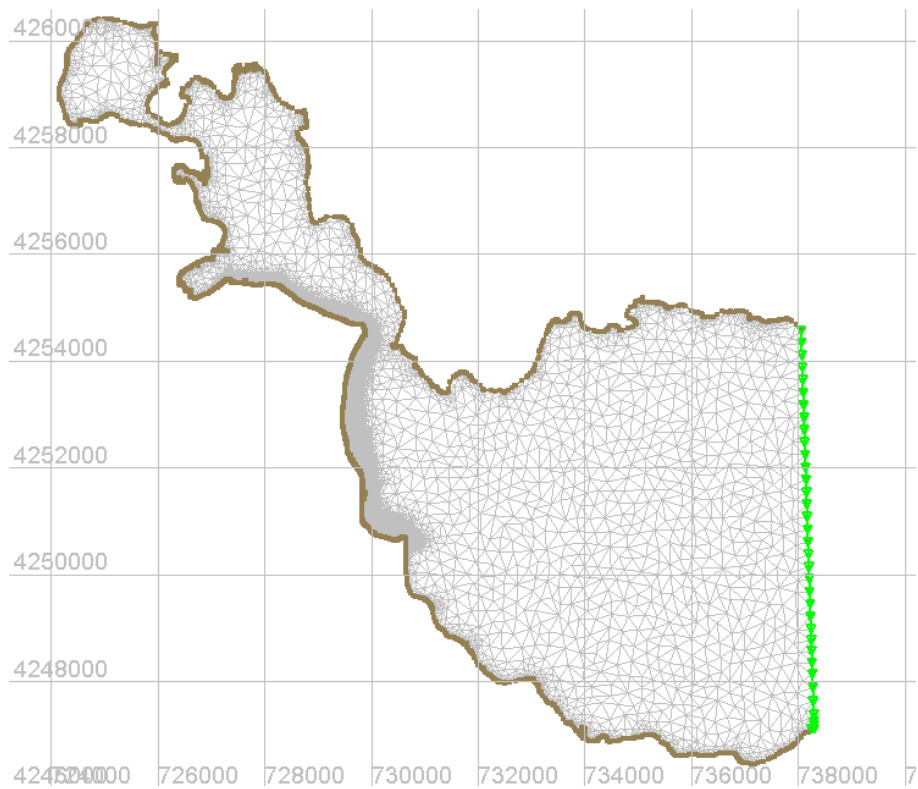
Σχήμα Π.3: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά  $xy$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Delft3D-Flow



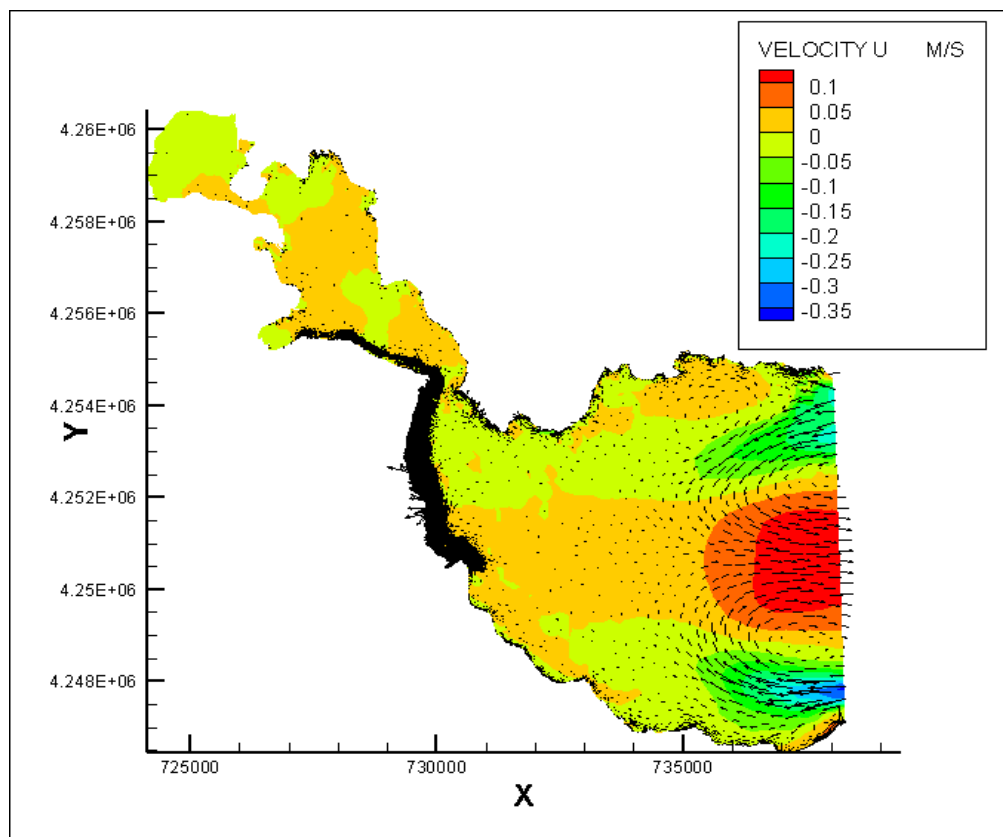
Σχήμα Π.3α: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά  $xy$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο ανώτερο σημείο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Delft3D-Flow



Σχήμα Π.3β: Χωρική κατανομή της ολικής στερεομεταφοράς κατά  $xy$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Delft3D-Flow

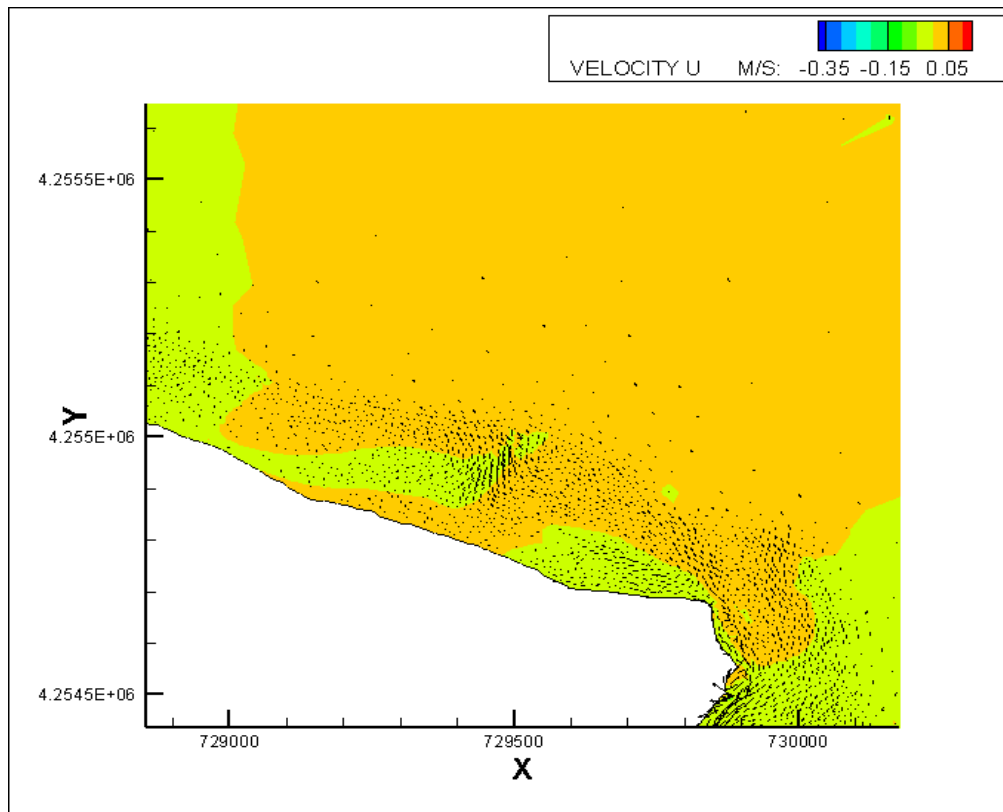


Σχήμα Π.4: Καθορισμός των ανοιχτών και κλειστών ορίων που χρησιμοποιήθηκαν στο λογισμικό Telemac-Mascaret

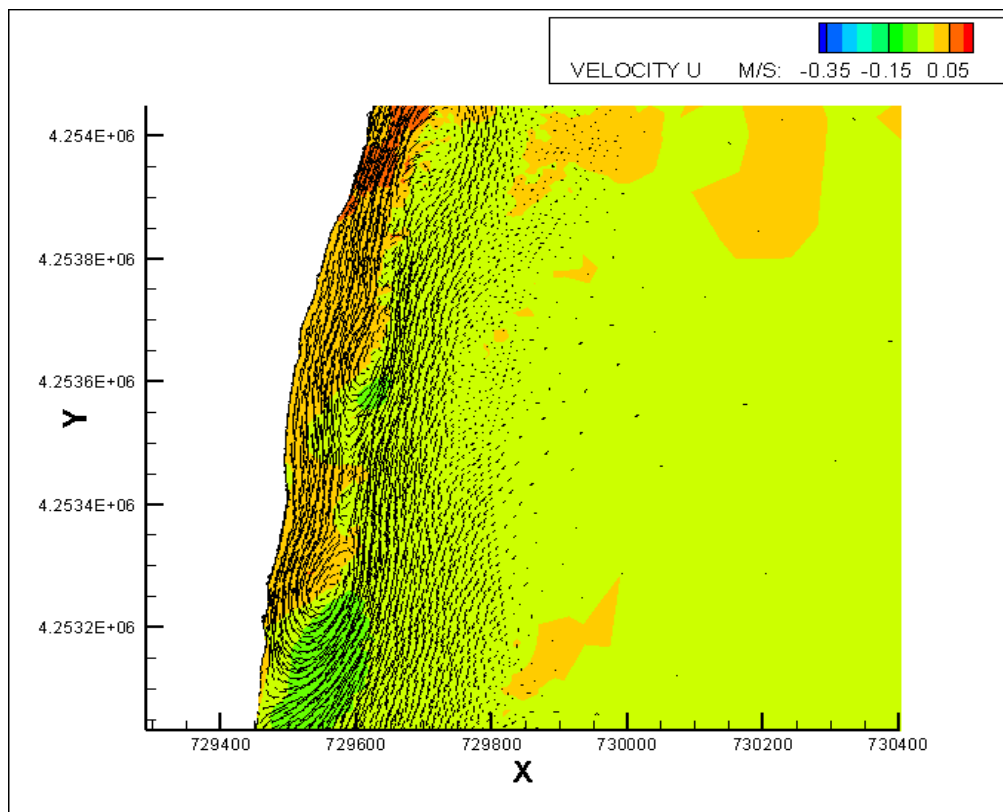


Σχήμα Π.5: Χωρική κατανομή της ταχύτητας u των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση x στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D

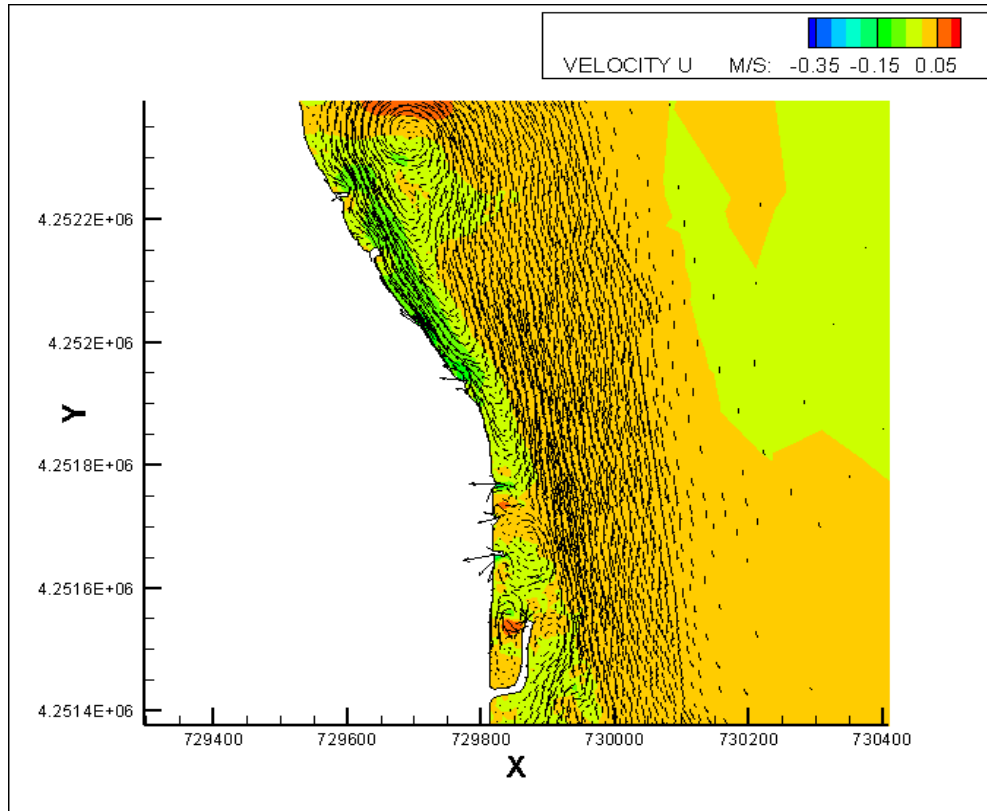




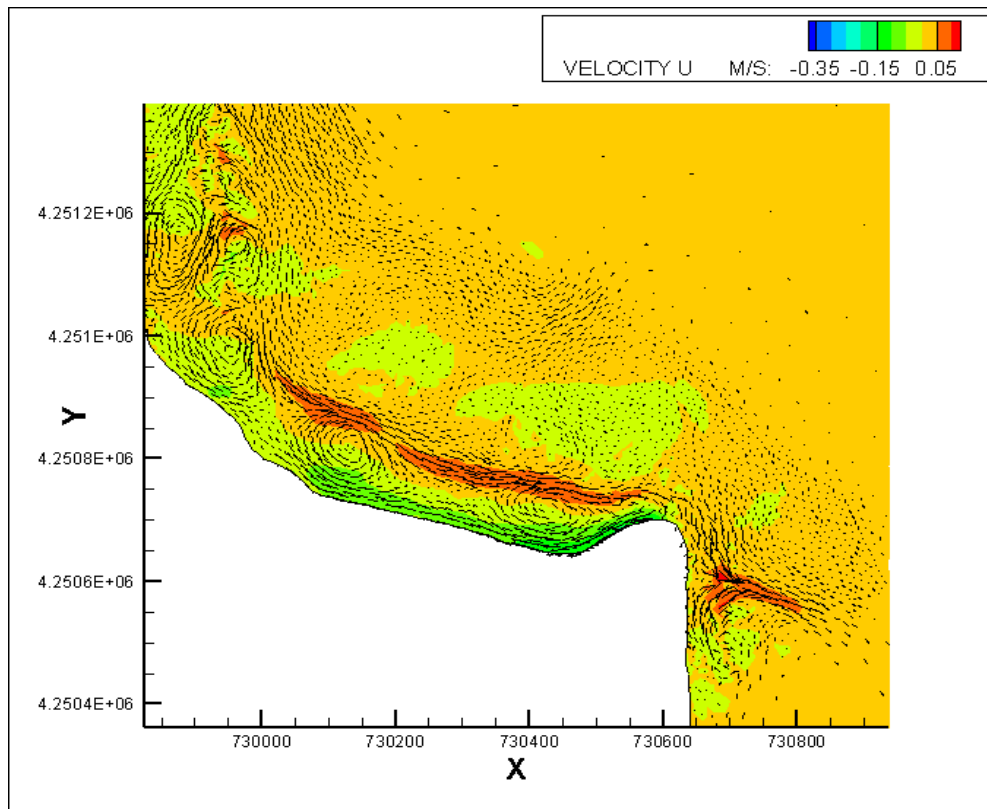
Σχήμα Π.5α: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $u$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $x$  στο πέρας της προσομοίωσης στο άνω μέρος της περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D



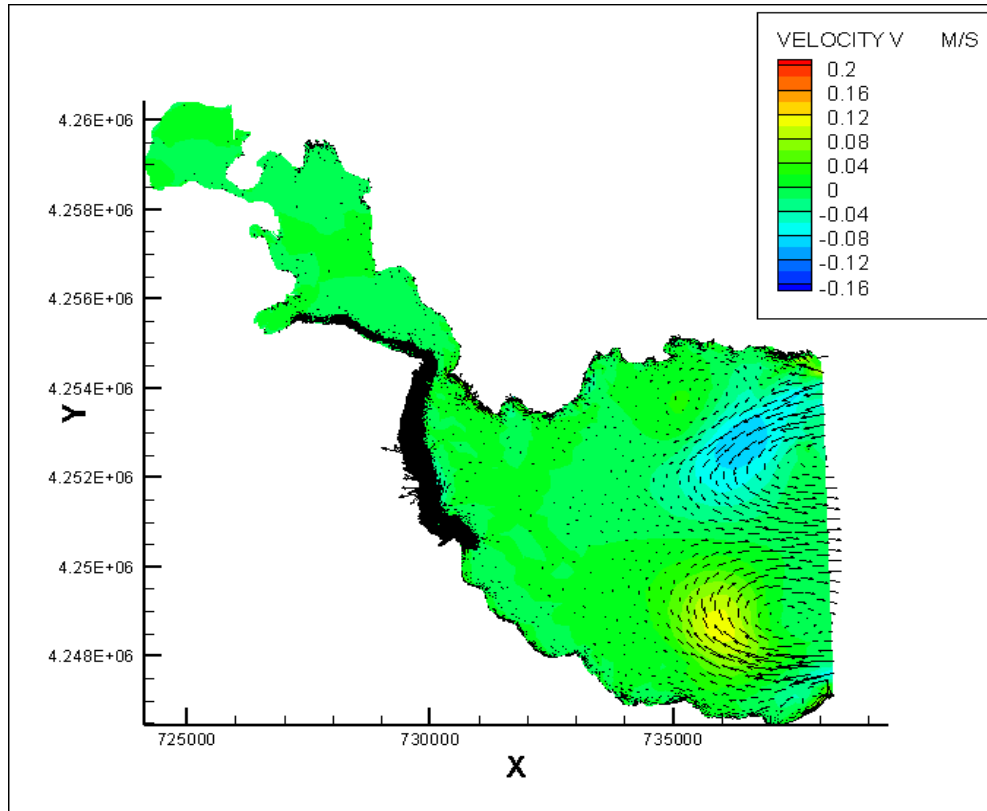
Σχήμα Π.5β: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $u$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $x$  στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Telemac-2D



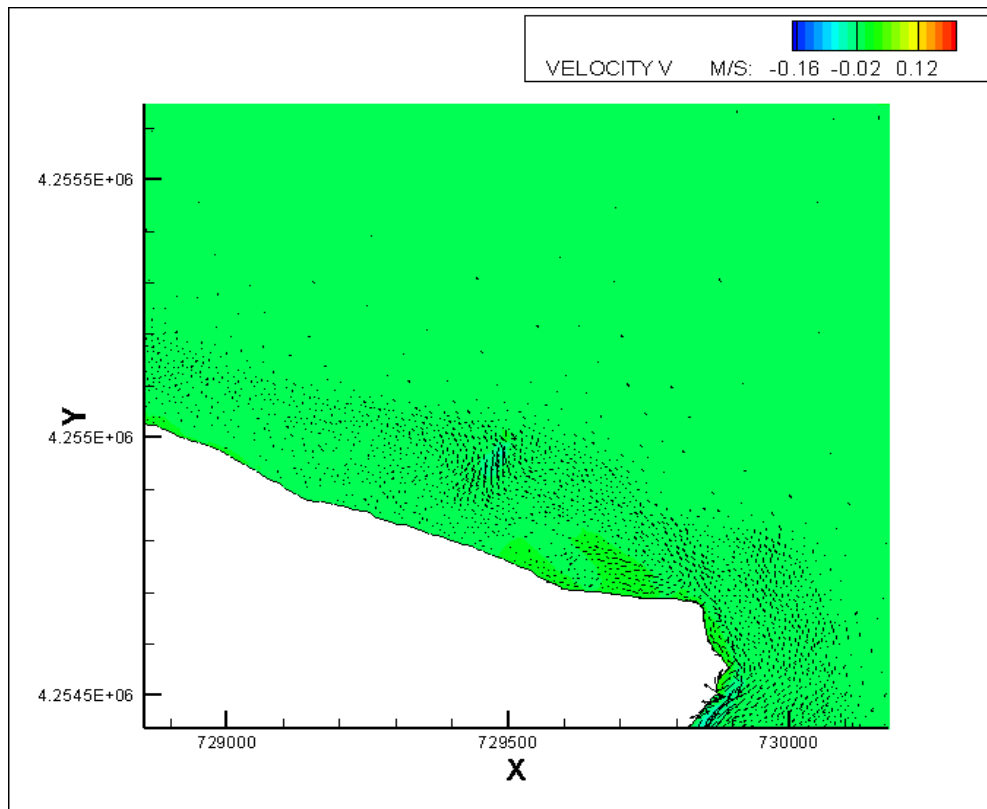
Σχήμα Π.5γ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $u$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $x$  στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Telemac-2D



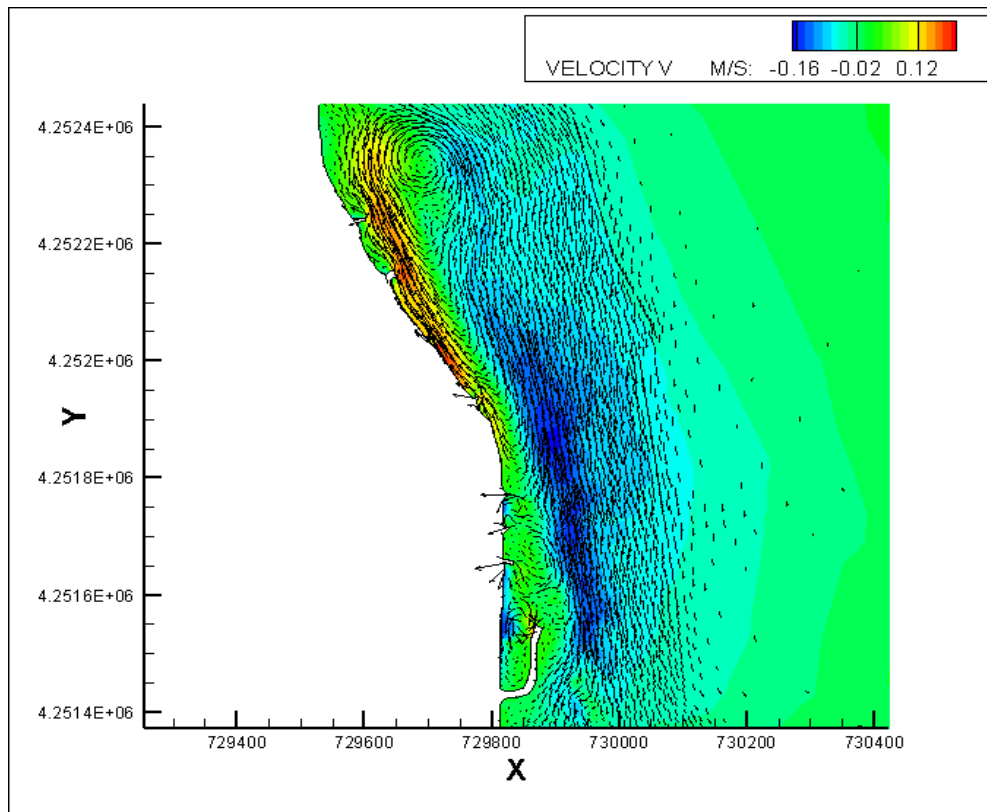
Σχήμα Π.5δ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $u$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $x$  στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D



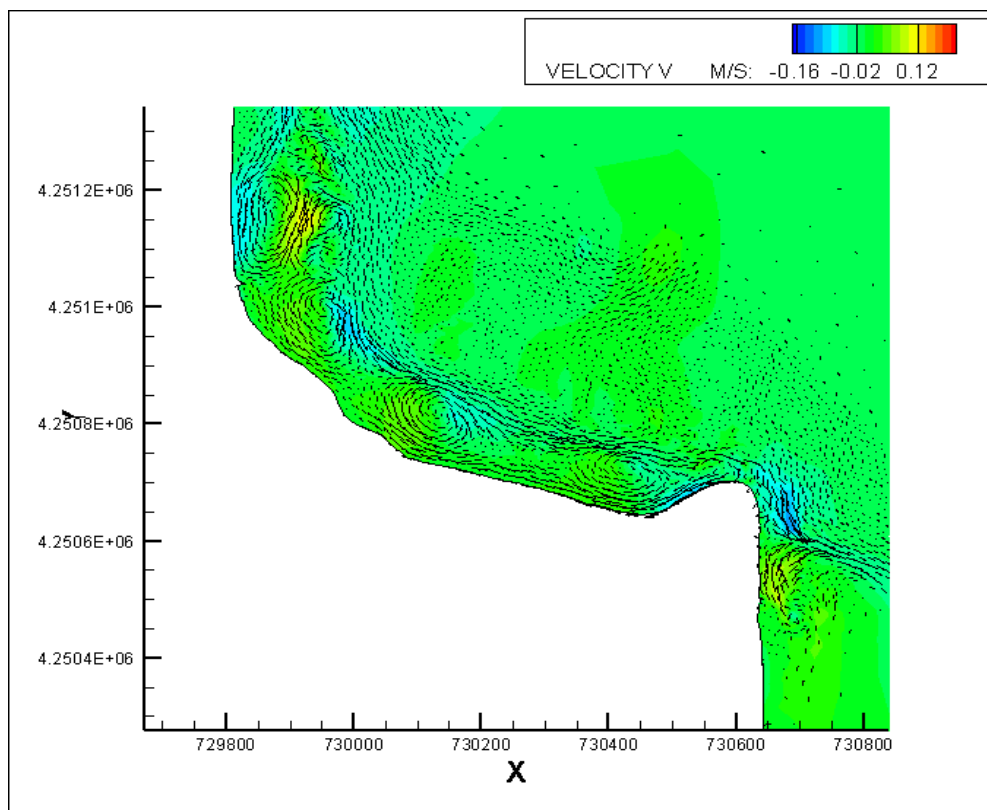
Σχήμα Π.6: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $v$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $y$  στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D



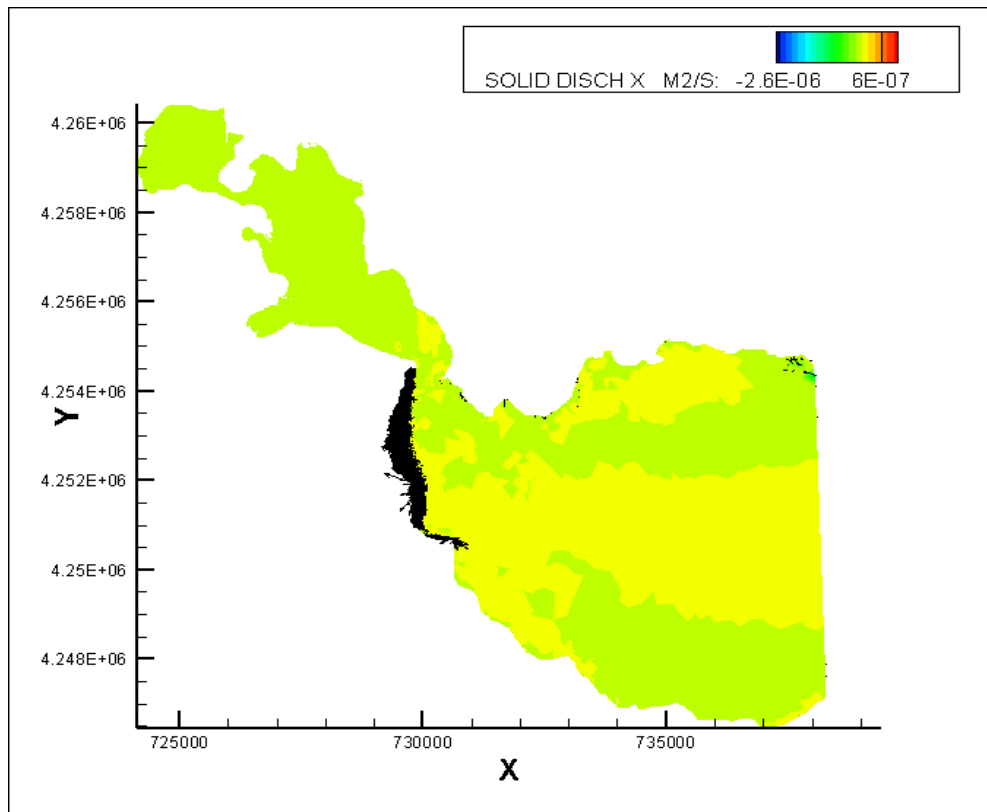
Σχήμα Π.6α: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $v$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $y$  στο πέρας της προσομοίωσης στο άνω μέρος της περιοχή μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D



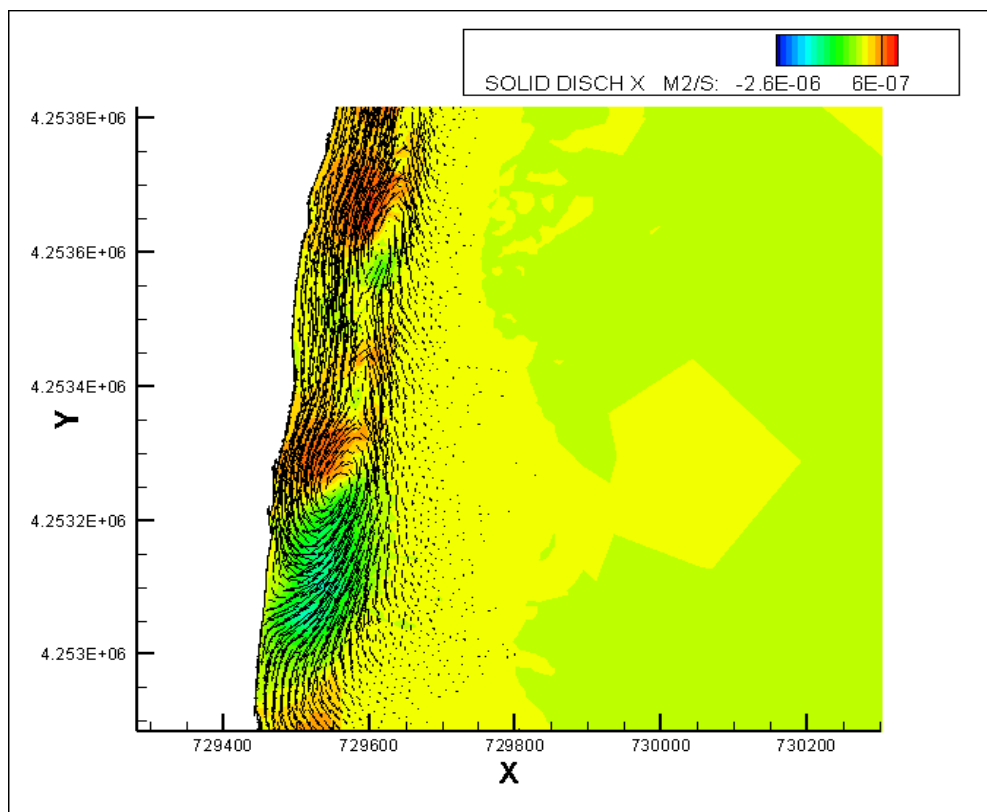
Σχήμα Π.6β: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $v$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $y$  στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Telemac-2D



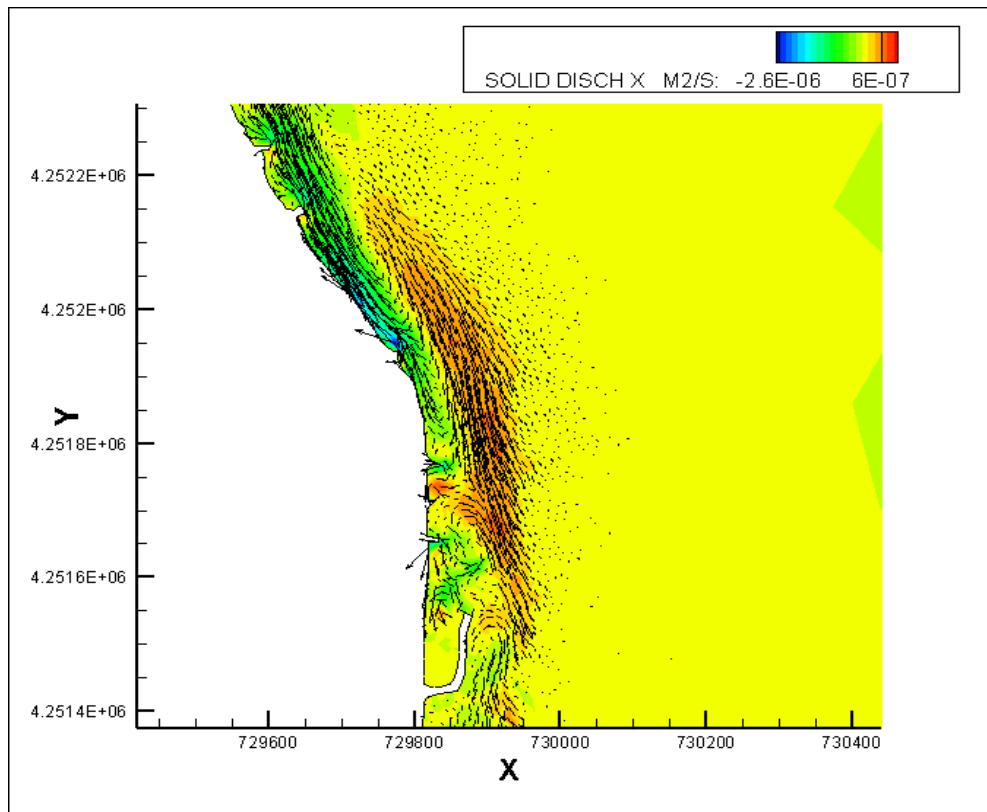
Σχήμα Π.6γ: Χωρική κατανομή της ταχύτητας  $v$  των ρευμάτων (m/s) στη διεύθυνση  $y$  στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Telemac-2D



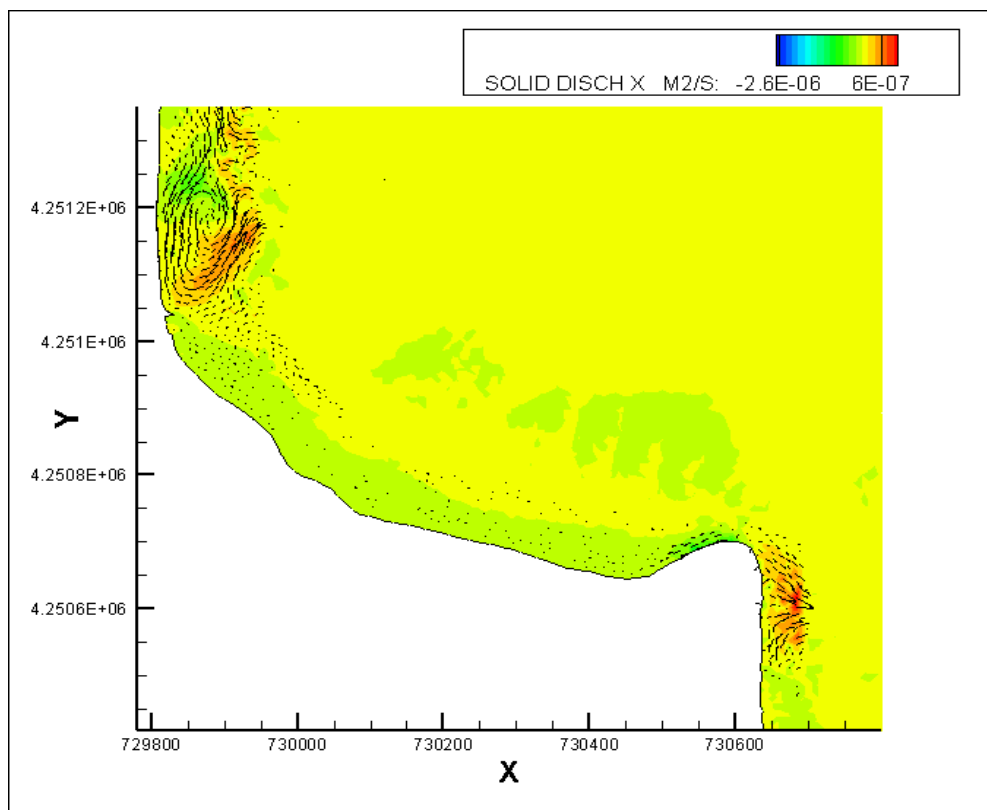
Σχήμα Π.7: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $x$  ( $m^2/s$ ) στην περιοχή μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Sisyphé



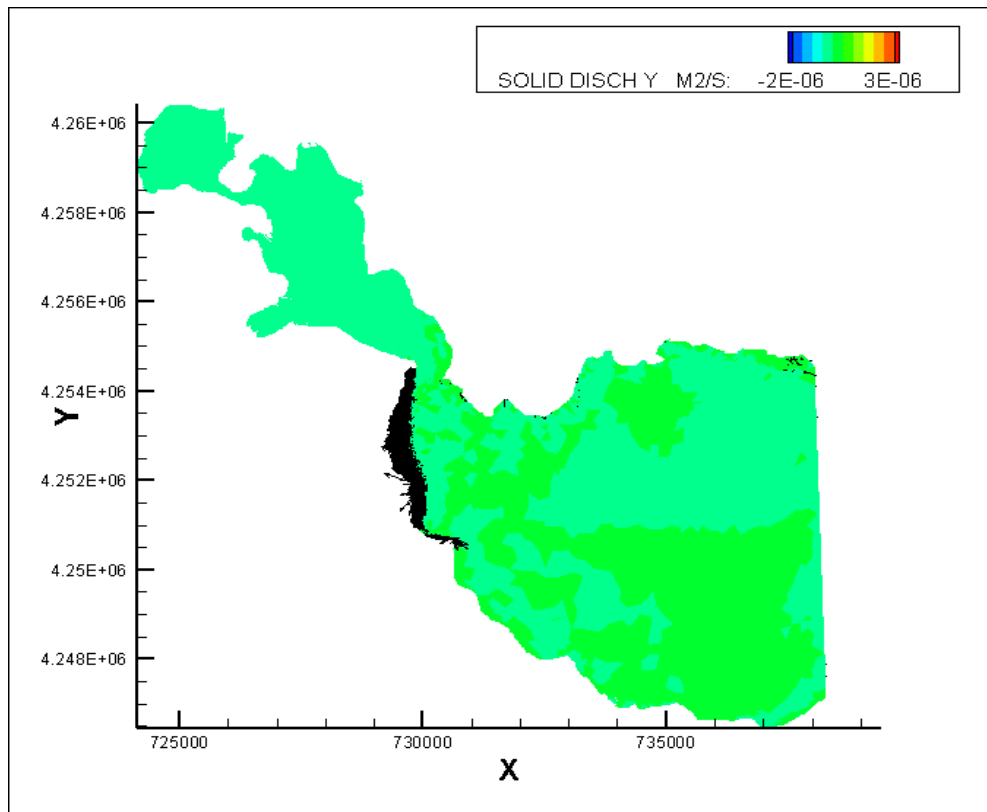
Σχήμα Π.7α: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $x$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyphé



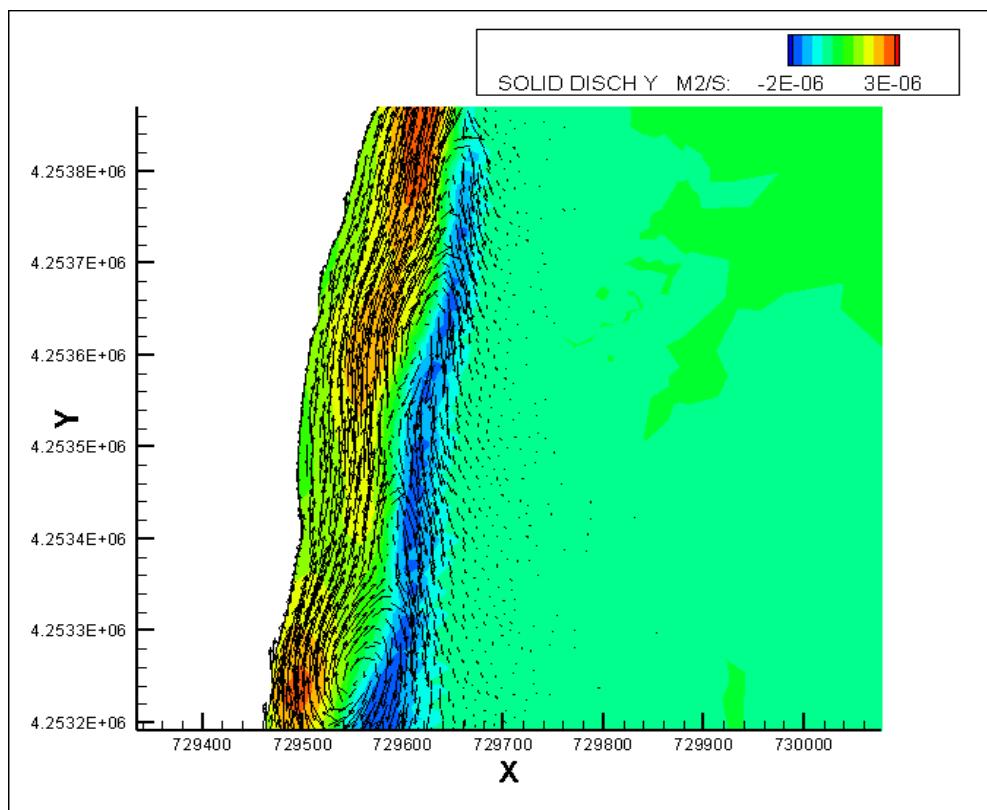
Σχήμα Π.7β: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $x$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Sisyrhe



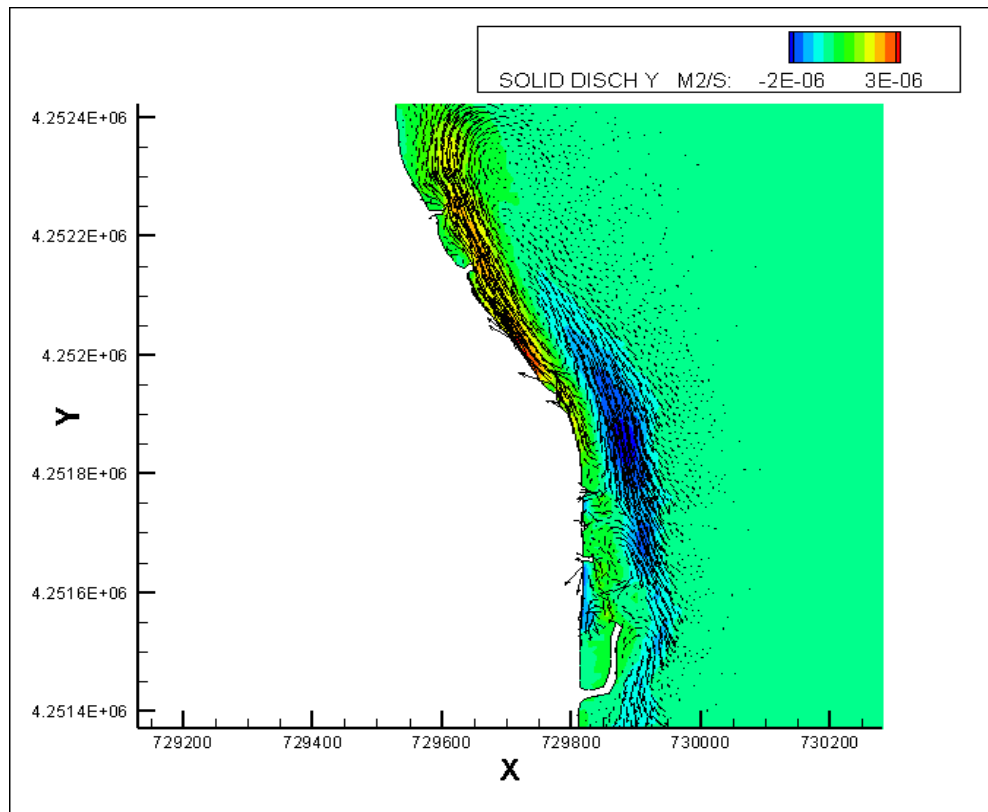
Σχήμα Π.7γ: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $x$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyrhe



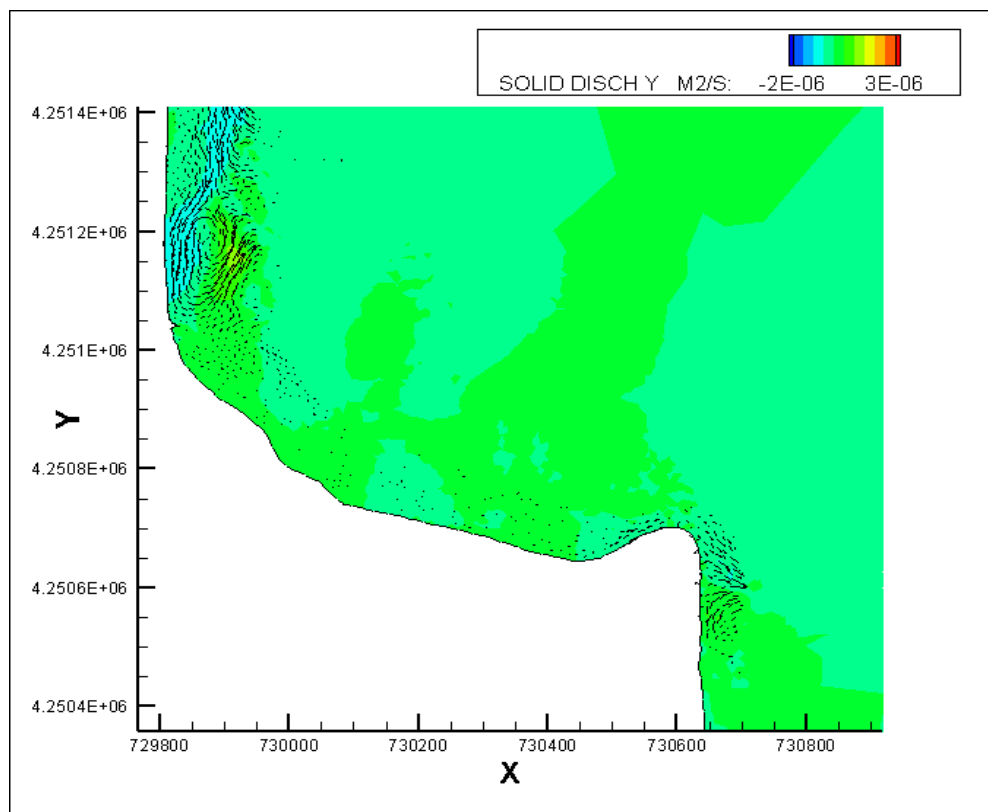
Σχήμα Π.8: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $\gamma$  ( $m^2/s$ ) στην περιοχή μελέτης στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο Sisyphé



Σχήμα Π.8α: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $\gamma$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου στο μοντέλο Sisyphé

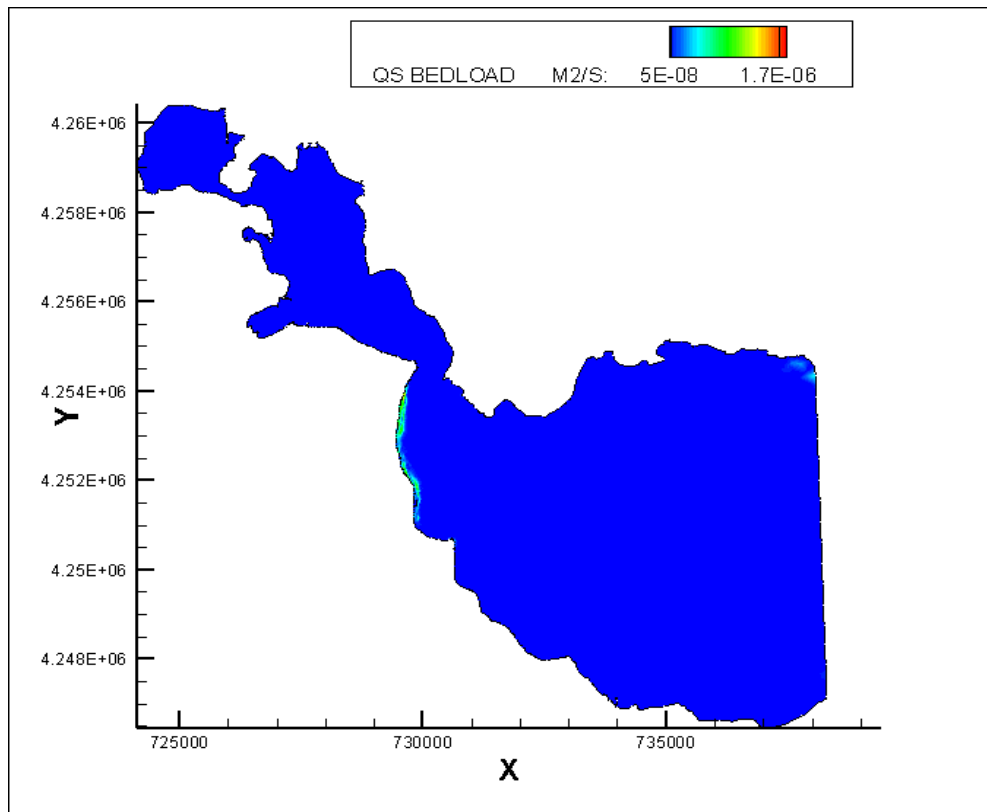


Σχήμα Π.8β: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $\gamma$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή των υφιστάμενων προβόλων και του λιμένα στο μοντέλο Sisyrhe

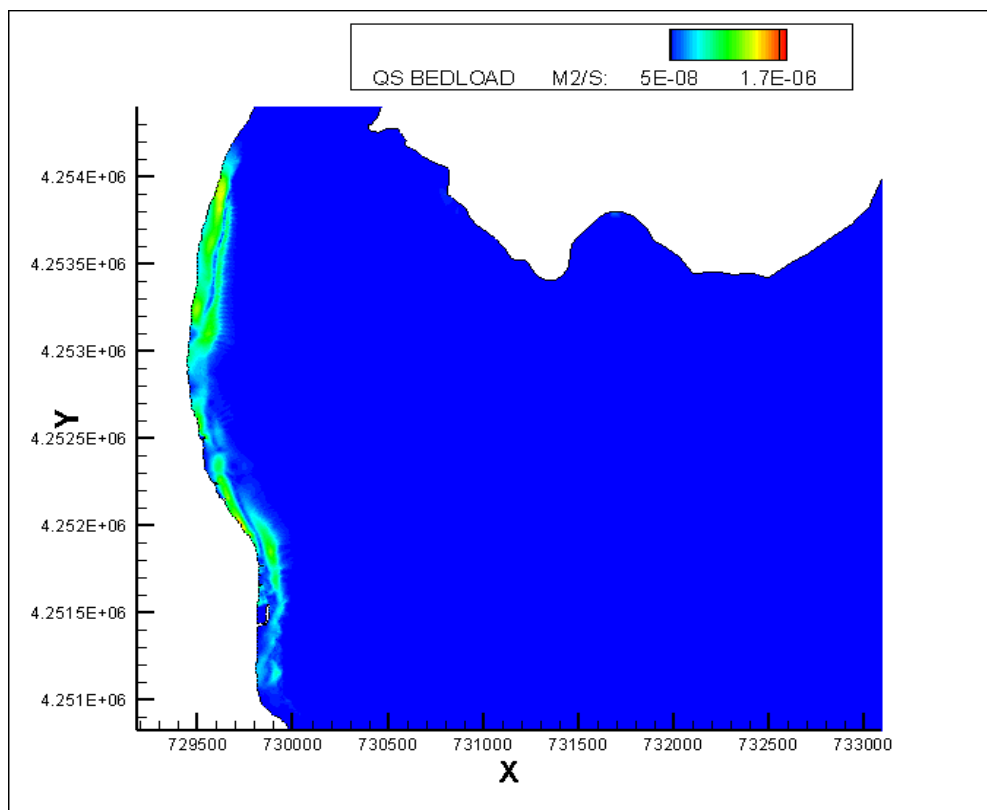


Σχήμα Π.8γ: Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς κατά  $\gamma$  ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στο κατώτερο όριο της περιοχής μελέτης στο μοντέλο Sisyrhe

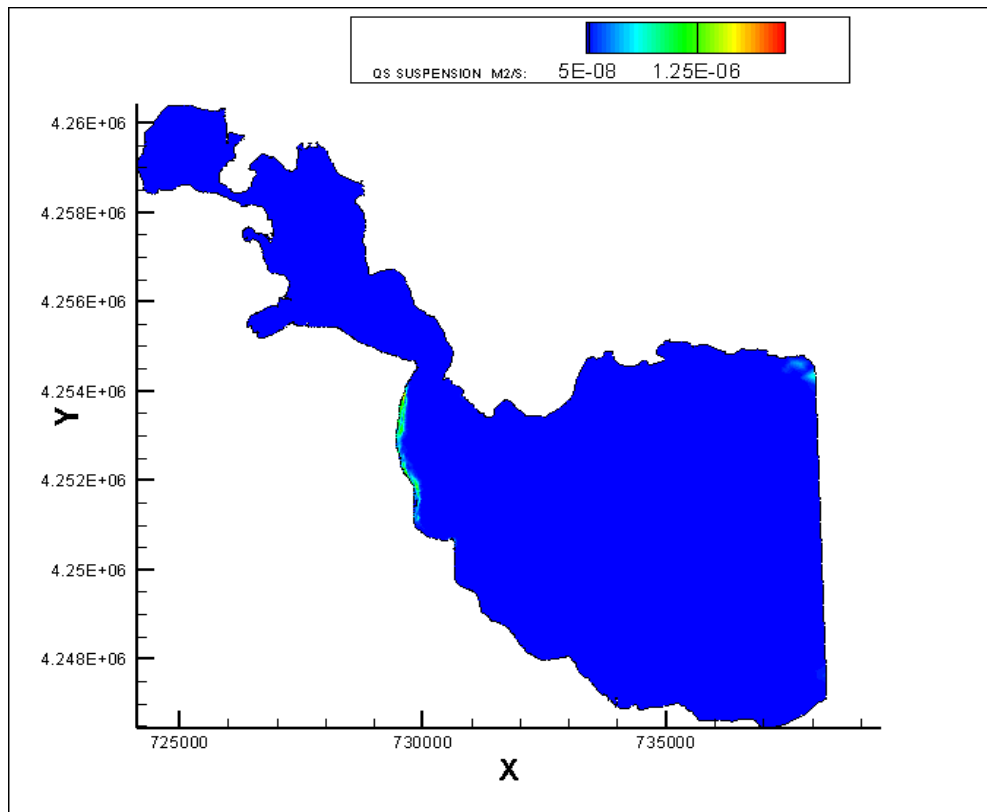




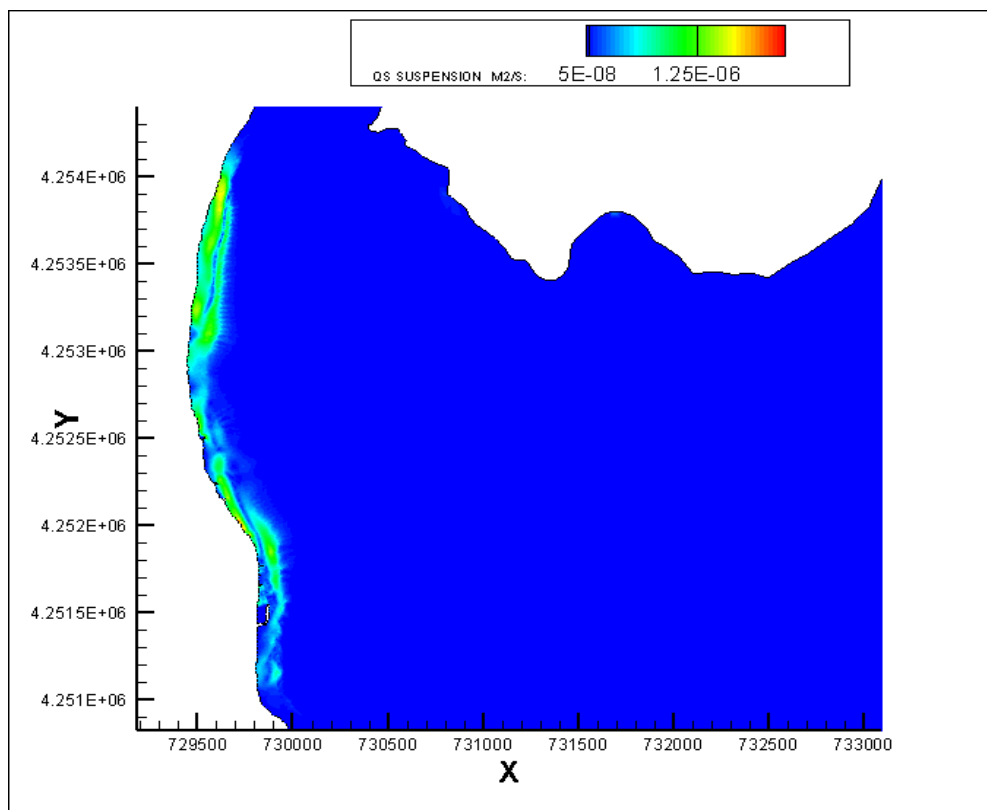
Σχήμα Π.9: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Sisyrhe



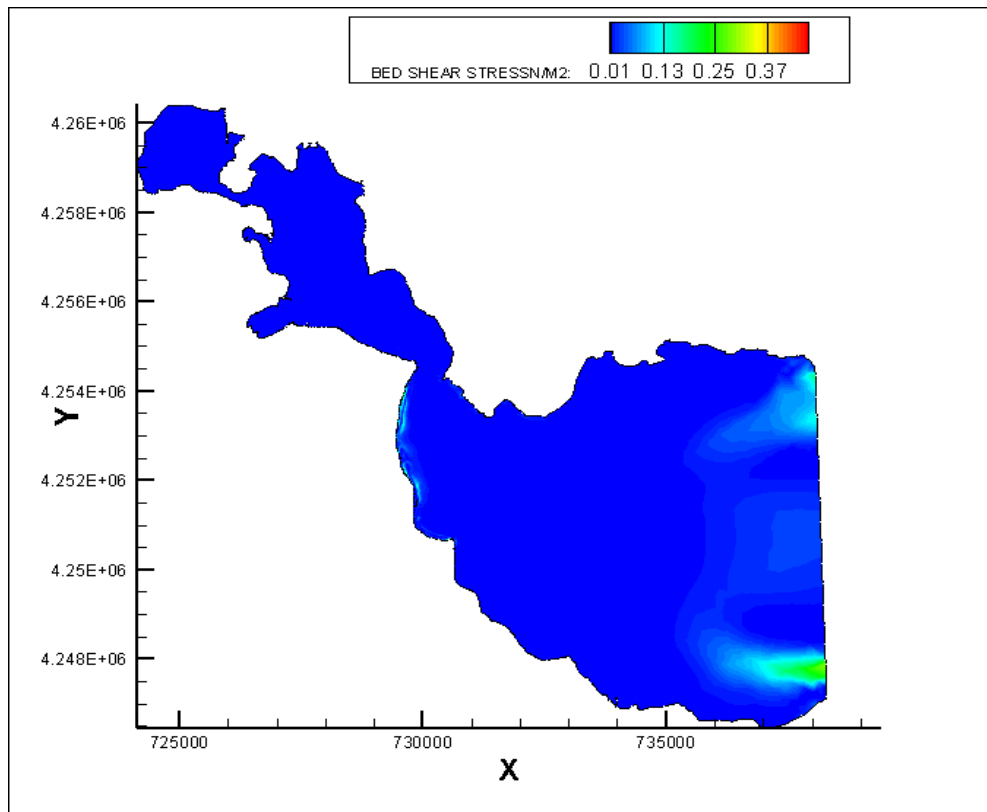
Σχήμα Π.9α: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου πυθμένα ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Sisyrhe



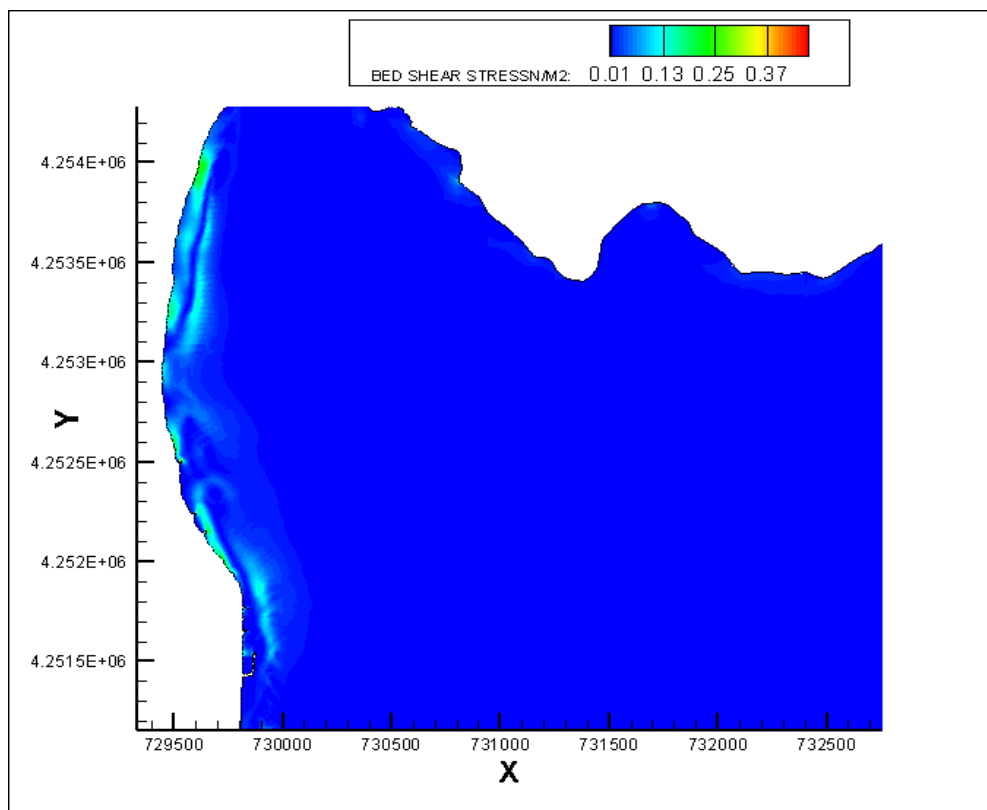
Σχήμα Π.10: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου αιώρησης ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Sisyrhe



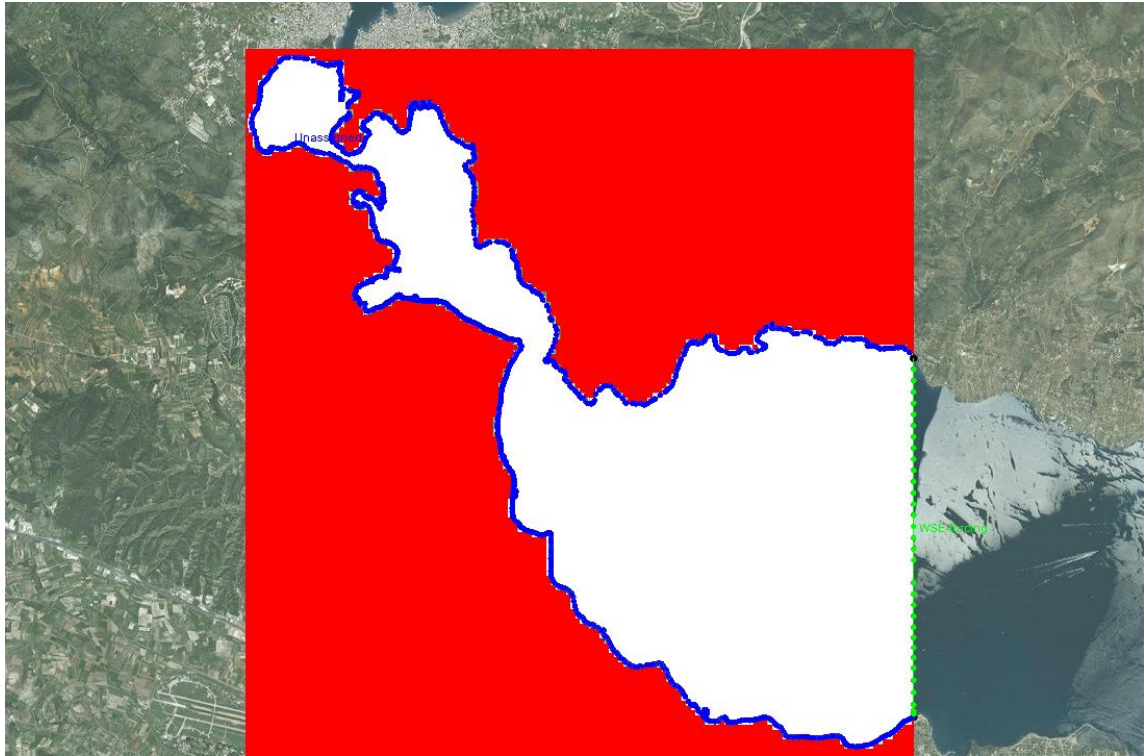
Σχήμα Π.10α: Χωρική κατανομή της ανηγμένης παροχής φορτίου αιώρησης ( $m^2/s$ ) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Sisyrhe



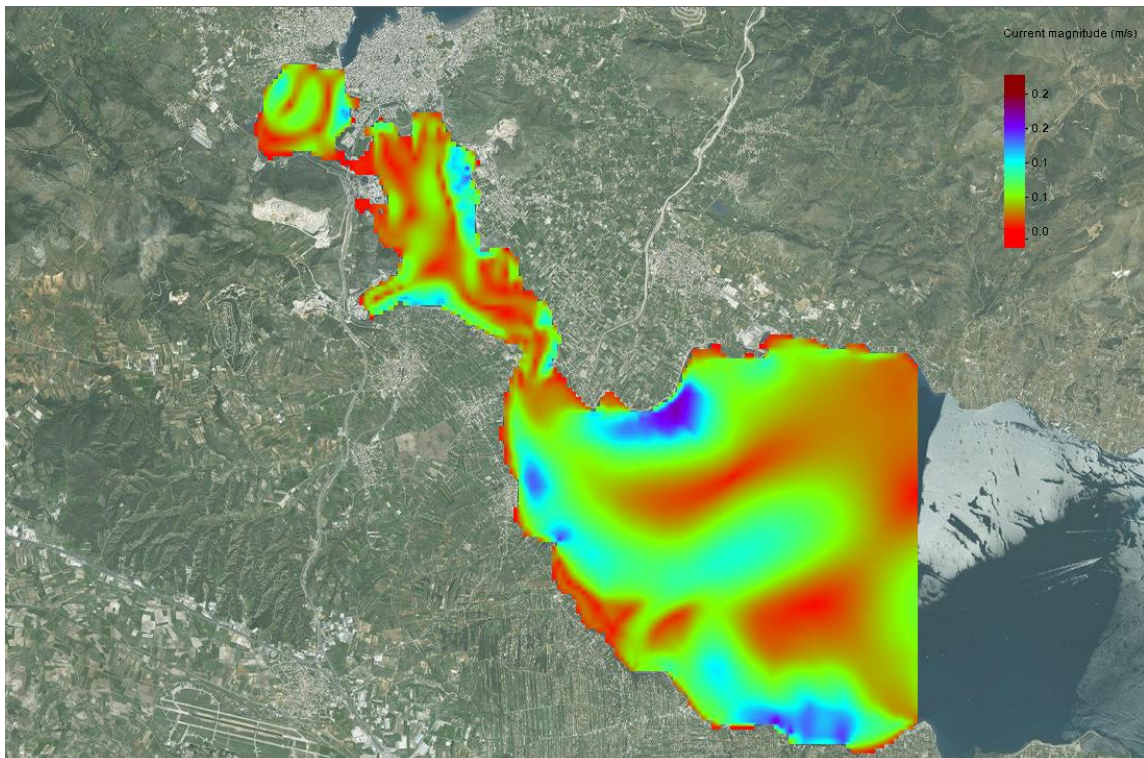
Σχήμα Π.11: Χωρική κατανομή της διατμητικής τάσης του πυθμένα (N/m<sup>2</sup>) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή μελέτης στο μοντέλο Sisyra



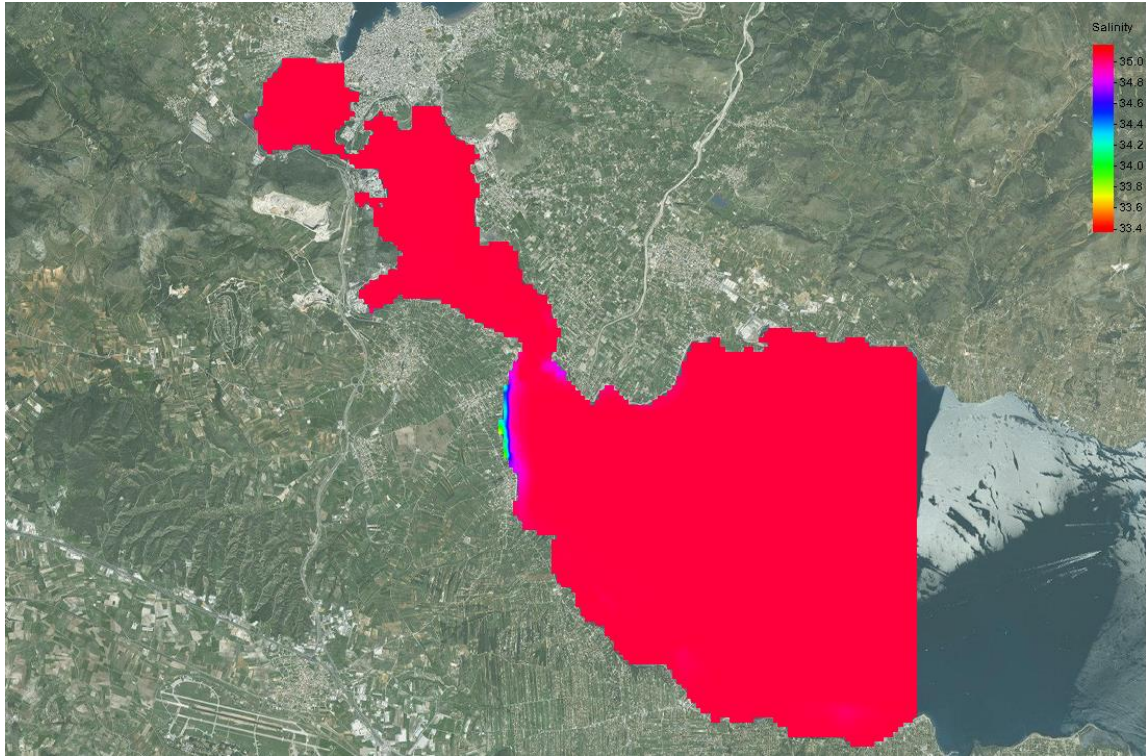
Σχήμα Π.11α: Χωρική κατανομή της διατμητικής τάσης του πυθμένα (N/m<sup>2</sup>) στο πέρας της προσομοίωσης στην περιοχή του παραλιακού δρόμου και των υφιστάμενων προβόλων στο μοντέλο Sisyra



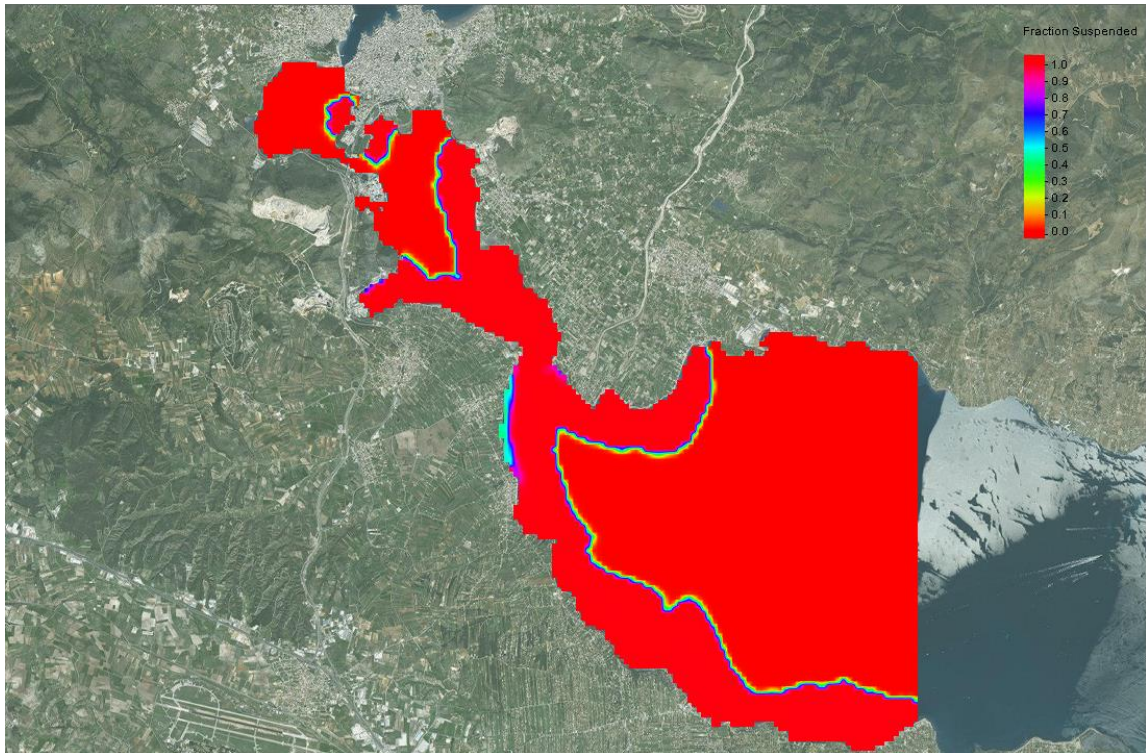
Σχήμα Π.12: Σχηματική απεικόνιση των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα CMS-Wave και CMS-Flow



Σχήμα Π.13: Χωρική κατανομή του μεγέθους της ταχύτητας υν (m/s) των ρευμάτων στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow



Σχήμα Π.14: Συγκέντρωση της αλατότητας (psu) στο πέρας της προσομοίωσης στο μοντέλο CMS-Flow



Σχήμα Π.15: Κλάσμα ιζήματος σε αιώρηση στο μοντέλο CMS-Flow