



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

---

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ  
ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΠΥΘΜΕΝΑ  
– ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ ΚΑΜΑΡΕΣ ΤΗΣ ΣΙΦΝΟΥ



ΠΥΘΑΡΟΥΛΙΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ – ΧΡΥΣΟΥΛΑ

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων: Ανδρέας Παπαδημητρίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

---

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ  
ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΠΥΘΜΕΝΑ  
– ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ ΚΑΜΑΡΕΣ ΤΗΣ ΣΙΦΝΟΥ

ΠΥΘΑΡΟΥΛΙΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ – ΧΡΥΣΟΥΛΑ

---

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων: Ανδρέας Παπαδημητρίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2020

Copyright © Πυθαρούλιου Αγγελική – Χρυσούλα, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς την συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Pytharouliou Angeliki - Chrysoula, 2020

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

---

Φωτογραφία εξωφύλλου: Ο όρμος Καμαρών της νήσου Σίφνου (Πηγή: Μηλίκια Νέα, [www.mileikanea.gr](http://www.mileikanea.gr))

---

# ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑΣ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΠΥΘΜΕΝΑ – ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΑΚΤΗ ΚΑΜΑΡΕΣ ΤΗΣ ΣΙΦΝΟΥ

Λέξεις κλειδιά:

Παράκτια ζώνη, κυματικό κλίμα, αριθμητικό μοντέλο MIKE 21 DHI, μέθοδοι προστασίας της ακτής, μέθοδοι σχηματοποίησης, μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών, διαχωρισμός κυματικού κλίματος σε διακριτά κυματικά σενάρια, συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac, αξιολόγηση απόδοσης μοντέλων

## ASSESSMENT OF LONG – TERM FORECASTING METHODS OF MORPHOLOGICAL BED LEVEL EVOLUTION – APPLICATION ON THE KAMARES COAST OF SIFNOS

Key words:

Coastal zone, wave climate, numerical model MIKE 21 DHI, coastal protection methods, schematization methods, Energy Flux method, separation of the wave climate into distinct wave scenarios, morphological acceleration factor Morfac, model performance evaluation

**ΠΥΘΑΡΟΥΛΙΟΥ ΑΓΓΕΛΙΚΗ – ΧΡΥΣΟΥΛΑ**  
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπουσα: Βασιλική Τσουκαλά, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων: Ανδρέας Παπαδημητρίου, Υποψήφιος Διδάκτωρ ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2020

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Έχοντας φτάσει στο τέλος της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνεισέφεραν στην ολοκλήρωσή της. Καταρχάς, ευχαριστώ θερμά την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου, αναπληρώτρια καθηγήτρια κα Βασιλική Τσουκαλά για την εμπιστοσύνη της προς το πρόσωπό μου ώστε να μου αναθέσει αυτήν την εργασία και για τη βοήθεια και τη συνεχή καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα Ανδρέα Παπαδημητρίου για την εξαιρετική επικοινωνία και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε από την πρώτη μέχρι και την τελευταία ημέρα. Ήταν πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να επιλύσει οποιοδήποτε απορία και συνέβαλλε καθοριστικά στην αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων που ανέκυπταν στην πορεία.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τον κ. Ηλία Μουσούλη, εκπρόσωπο του DHI στην Ελλάδα, για την παραχώρηση της εκπαιδευτικής άδειας για τη χρήση του προγράμματος MIKE 21 και για την άμεση ανταπόκρισή του ως προς την επίλυση αποριών και την αντιμετώπιση δυσκολιών που προέκυψαν κατά την εφαρμογή του λογισμικού.

Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, Νίκο και Άννα, που πίστευαν πάντα στις δυνατότητές μου και με στηρίζουν σε κάθε προσπάθειά μου.

Σας ευχαριστώ όλους,

Αγγελική – Χρυσούλα Πυθαρούλιου

Νοέμβριος 2020

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	ix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας .....	2
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	3
2.1. Έργα προστασίας ακτογραμμής.....	3
2.1.1. Συμβατικά – σκληρά έργα προστασίας ακτής.....	5
2.1.2. Ήπια έργα προστασίας ακτής.....	8
2.1.3. Εναλλακτικά έργα προστασίας ακτής .....	12
2.2. Μέθοδοι σχηματοποίησης.....	14
2.2.1. Μέθοδος διαχωρισμού των κυματικών χαρακτηριστικών σε διακριτά σενάρια .....	15
2.2.2. Μέθοδος Ροής Ενέργειας (Energy Flux Method) .....	17
2.3. Αποτίμηση μεθόδων μακροχρόνιας πρόβλεψης.....	19
2.4. Περιγραφή του αριθμητικού μοντέλου MIKE 21 .....	22
2.4.1. Γενικά.....	22
2.4.2. MIKE 21 SW .....	22
2.4.3. MIKE 21 HD .....	25
2.4.4. MIKE 21 ST .....	27
2.4.5. MIKE 21/3 Coupled Model .....	29
3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ .....	31
3.1. Γεωγραφική θέση – Γενικές πληροφορίες.....	31
3.2. Ανθρωπογενές περιβάλλον.....	32
3.2.1. Ιστορικά και πολιτιστικά στοιχεία.....	32
3.2.2. Πληθυσμός – Δημογραφία.....	32
3.2.3. Χρήσεις γης.....	33
3.3. Φυσικό περιβάλλον.....	35
3.3.1. Προστατευόμενες περιοχές .....	35
3.3.2. Παραλίες κολύμβησης.....	39
3.3.3. Υπουργικές Αποφάσεις - ΦΕΚ .....	42

3.3.4.	Αναπτυξιακά σχέδια.....	43
3.4.	Μορφολογία.....	44
3.4.1.	Γενικά στοιχεία .....	44
3.4.2.	Γεωλογικά και Τεκτονικά στοιχεία .....	44
3.4.3.	Υδρογεωλογικά στοιχεία .....	45
3.4.4.	Μορφολογία παράκτιας ζώνης .....	46
3.4.5.	Εξέλιξη ακτογραμμής .....	47
3.5.	Ανεμολογικά και κυματικά χαρακτηριστικά .....	49
3.5.1.	Γενικά κλιματολογικά στοιχεία .....	49
3.5.2.	Ανεμολογικά στοιχεία .....	50
3.5.3.	Κυματισμοί στα βαθιά.....	52
3.5.4.	Παλίρροια.....	52
3.6.	Υφιστάμενη κατάσταση.....	53
3.6.1.	Λιμενικά έργα.....	53
3.6.2.	Περιγραφή των προβλημάτων της περιοχής .....	54
3.6.3.	Κίνηση λιμένα.....	55
4.	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ .....	58
4.1.	Προσδιορισμός κυματικού κλίματος .....	58
4.2.	Δημιουργία του υπολογιστικού πεδίου .....	61
4.2.1.	Ανεξαρτησία αποτελεσμάτων από το υπολογιστικό πλέγμα .....	64
4.3.	Εφαρμογή μεθόδων σχηματοποίησης.....	65
4.3.1.	Μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών (Energy Flux Method) – Σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.....	65
4.3.2.	Μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών (Energy Flux Method) – Σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.....	69
4.3.3.	Μέθοδος διαχωρισμού κυματικών χαρακτηριστικών σε διακριτά σενάρια.....	72
4.3.4.	Σύγκριση μεθόδων σχηματοποίησης.....	76
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ .....	79
5.1.	Αποτελέσματα για την πλήρη χρονοσειρά του ενός έτους .....	79
5.1.1.	SW (Spectral Waves Model) .....	79
5.1.2.	HD (Hydrodynamic Model).....	80
5.1.3.	ST (Sand Transport Model).....	83
5.2.	Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής με τη μέθοδο Ροής Ενέργειας – 10 αντιπρόσωποι .....	84
5.2.1.	SW (Spectral Waves Model) .....	84

5.2.2.	HD (Hydrodynamic Model).....	85
5.2.3.	ST (Sand Transport Model).....	88
5.3.	Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής με τη μέθοδο Ροής Ενέργειας – 30 αντιπρόσωποι .....	90
5.3.1.	SW (Spectral Waves Model) .....	90
5.3.2.	HD (Hydrodynamic Model).....	91
5.3.3.	ST (Sand Transport Model).....	94
5.4.	Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής με τη μέθοδο διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.....	96
5.4.1.	SW (Spectral Waves Model) .....	96
5.4.2.	HD (Hydrodynamic Model).....	97
5.4.3.	ST (Sand Transport Model) .....	100
5.5.	Αξιολόγηση επίδοσης των αποτελεσμάτων των μοντέλων.....	102
6.	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΥΘΜΕΝΑ .....	104
6.1.	Πρόταση 1 – Επέκταση προσήνεμου προβλήτα και κρηπιδωμάτων .....	106
6.1.1.	SW (Spectral Waves Model) .....	107
6.1.2.	HD (Hydrodynamic Model).....	107
6.1.3.	ST (Sand Transport Model).....	110
6.2.	Πρόταση 2 – Επέκταση προσήνεμου προβλήτα .....	112
6.2.1.	SW (Spectral Waves Model) .....	113
6.2.2.	HD (Hydrodynamic Model).....	113
6.2.3.	ST (Sand Transport Model).....	116
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ .....	119
7.1.	Σύνοψη συμπερασμάτων.....	119
7.2.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	121
	ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	122



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2. 1: Κίνηση ιζήματος λόγω της παρουσίας προβόλου. (Πηγή: ARTAGAN, Salih Serkan,2006) .	4
Εικόνα 2. 2: Έργα προστασίας ακτής κατά σειρά: πρόβολοι, κυματοθραύστες, θωράκιση με ογκολίθους. (Πηγές: pixels.com, Dr.B.Garawell, wikipedia.org).....	4
Εικόνα 2. 3: Ζεύγος προβόλων (αριστερά) και σύστημα προβόλων (δεξιά). (Πηγές:marinas.com, julyamsvacationawaits.weebly.com) .....	5
Εικόνα 2. 4: Έργα θωράκισης ακτής κατά σειρά: κεκλιμένου μετώπου, κατακόρυφου μετώπου, με φυσικούς ογκολίθους, με τεχνητούς ογκολίθους.(Πηγές: coastalcare.org, pikist.com) .....	6
Εικόνα 2. 5: Σύστημα παράλληλων κυματοθραυστών στο οποίο διακρίνονται οι δύο μηχανισμοί προσχώσεως. (Πηγές: aeoengland.co.uk , www.ingenia.org.uk) .....	7
Εικόνα 2. 6: Σύστημα πυθμενικών προβόλων. (Πηγή: Pranzini E. et al.).....	8
Εικόνα 2. 7: Πλωτοί κυματοθραύστες για δημιουργία μαρίνας (αριστερά) και σε μεγάλα ύψη κύματος (δεξιά). (Πηγή: www.sfmarina.com) .....	9
Εικόνα 2. 8: Διατομή πλωτού κυματοθραύστη. (Πηγή: G. Elchahal, P. Lafon, 2010) .....	9
Εικόνα 2. 9: Διατομή ύφαλου κυματοθραύστη. (Πηγή: www.marinespecies.org) .....	10
Εικόνα 2. 10: Επιρροή του θαλάσσιου κυματισμού στην ακτή με αναπλήρωση. (Πηγή: nad.usace.army.mil) .....	11
Εικόνα 2. 11: Στιγμιότυπο αναπλήρωσης ακτής. (Πηγή: goldcoast.qld.gon.au) .....	11
Εικόνα 2. 12: Πυθμενικοί τεχνητοί ύφαλοι. (Πηγή: sciencephoto.com) .....	12
Εικόνα 2. 13: Μέθοδος παράκτιας προστασίας BEROSIN. (Πηγή: K. Pilarczyk et al, 2003) .....	13
Εικόνα 2. 14: Εφαρμογές της μεθόδου DRIM. (Πηγή: K. Pilarczyk et al, 2008) .....	13
Εικόνα 2. 15: Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια. ....	16
Εικόνα 2. 16: Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Ροής Ενέργειας για τον διαχωρισμό σε 10 κλάσεις. ....	18
.....	
Εικόνα 3. 1: Χάρτης Σίφνου. (Πηγή: Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, gys.gr).....	31
Εικόνα 3. 2: Χάρτης χρήσεων γης Δήμου Σίφνου (Πηγή: geoportat.ypen.gr).....	34
Εικόνα 3. 3: Χάρτης Natura 2000 για το νησί της Σίφνου (Πηγή: geodata.gov.gr/maps).....	35
Εικόνα 3. 4: Τοπία από την προστατευόμενη περιοχή Natura2000. (Πηγή: e-sifnos.com) .....	36
Εικόνα 3. 5: Τοποθεσία έλους Καμαρών (Πηγή: oikoskopio.gr/ygrotorio).....	37
Εικόνα 3. 6: Τοποθεσία έλους Φάρου (Πηγή: oikoskopio.gr/ygrotorio). ....	38
Εικόνα 3. 7: Έλος Φάρου (Πηγή: oikoskopio.gr). ....	39
Εικόνα 3. 8: Ακτές κολύμβησης και χρήσεις γης της ευρύτερης περιοχής. (Πηγή: bathingwaterprofiles.gr) .....	40
Εικόνα 3. 9: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας. (Πηγή: ΦΕΚ Β1154-12/08/2003, ΕΤ).....	45
Εικόνα 3. 10: Διαχρονική εξέλιξη της ακτογραμμής των Καμαρών 2011-2019. (Υπόβαθρο: Google Earth Pro) .....	47
Εικόνα 3. 11: Διαχρονική εξέλιξη της ακτογραμμής των Καμαρών 1960-2019 με χρήση δεδομένων από το Ελληνικό Κτηματολόγιο (Υπόβαθρο: Google Earth Pro, Πηγές: Google Earth Pro, gis.ktimanet.gr). ....	48
Εικόνα 3. 12: Κλιματικοί Χάρτες της Ελλάδας και της Σίφνου. (Πηγή: EMY, climatlas.hnms.gr) .....	49
Εικόνα 3. 13: Αεροφωτογραφία του λιμένα στις Καμάρες Ν. Σίφνου (Πηγή: Google Earth).....	54
.....	
Εικόνα 4. 1: Χρονοσειρά παρατηρήσεων του έτους 2018 – 2019. ....	60

Εικόνα 4. 2: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση σε 5 κλάσεις – Μέθοδος Energy Flux. ....	66
Εικόνα 4. 3: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος σε 10 κλάσεις – Μέθοδος Energy Flux. ....	66
Εικόνα 4. 4: Διαχωρισμός των δεδομένων σε 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους – Μέθοδος Energy Flux. ....	67
Εικόνα 4. 5: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά του σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος με 10 αντιπρόσωπους, διάρκειας 1 ημέρας (MIKE Zero) – Μέθοδος Energy Flux. ....	68
Εικόνα 4. 6: Χρονικό βήμα και συνολικός χρόνος προσομοίωσης – Μέθοδος Energy Flux. ....	68
Εικόνα 4. 7: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά του σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος με 30 αντιπρόσωπους, διάρκειας 1 ημέρας (MIKE Zero) – Μέθοδος Energy Flux. ....	71
Εικόνα 4. 8: Χρονικό βήμα και συνολικός χρόνος προσομοίωσης – Μέθοδος Energy Flux. ....	71
Εικόνα 4. 9: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διευθύνσεις σε 5 κλάσεις ίσου πλάτους 45° και οι αντιπρόσωποι.....	73
Εικόνα 4. 10: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διευθύνσεις και καθ' ύψος σε 36 κλάσεις.....	73
Εικόνα 4. 11: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά του σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος με 36 αντιπρόσωπους, διάρκειας 1 ημέρας (MIKE Zero).....	75
Εικόνα 4. 12: Χρονικό βήμα και συνολικός χρόνος προσομοίωσης. ....	75
Εικόνα 5. 1: Περιοχή πύκνωσης τριγωνικού κανάβου στα δεδομένα της οποίας πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των μεθόδων (Αριστερά: MIKE 21, Δεξιά: ArcMap 10.5.1).....	102
Εικόνα 6. 1: Προτεινόμενα έργα από τη μελέτη Διαμόρφωσης λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου, 2017. ....	105
Εικόνα 6. 2: Επέκταση προσήνεμου προβλήτα και διαπλάτυνση κρηπιδωμάτων (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου 2017) – Πρόταση 1. ....	106
Εικόνα 6. 3: Επέκταση προσήνεμου προβλήτα (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου 2017) – Πρόταση 2. ....	112

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2. 1: Κατηγοριοποίηση του δείκτη BSS (Van Rijn et al., 2003). .....	21
Πίνακας 3. 1: Εξέλιξη πληθυσμού κατά τις δεκαετίες 1991-2001, 2001-2011 (Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ.).....	33
Πίνακας 3. 2: Κατανομή χρήσεων γης Νήσου Σίφνου (Απογραφή 2001, ΕΣΥΕ).....	34
Πίνακας 3. 3: Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Μήλου 2012-2020. (Πηγή: Meteo, επεξεργασία: συντάκτη) .....	50
Πίνακας 3. 4: Στοιχεία μέσων εντάσεων και κατευθύνσεων ανέμων του σταθμού της Μήλου (ποσοστά επί τοις εκατό).....	50
Πίνακας 3. 5: Στοιχεία μέγιστων εντάσεων και κατευθύνσεων ανέμων του σταθμού της Μήλου (ποσοστά επί τοις εκατό). .....	51
Πίνακας 3. 6: Δεδομένα παλίρροιας από τον παλιρροιογράφο στο λιμένα της Σύρου. (Πηγή: Sea level station monitoring facility, ioc-sealevelmonitoring.org).....	52
Πίνακας 3. 7: Στοιχεία κίνησης επιβατών λιμένα 2005-2019. (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, επεξεργασία: συντάκτη) .....	55
Πίνακας 3. 8: Στοιχεία κίνησης επιβατών λιμένα 2005-2019. (Πηγή: CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου, 2017) .....	56
Πίνακας 4. 1: Χαρακτηριστικά των κυματικών δεδομένων της χρονοσειράς των 14 ετών. ....	59
Πίνακας 4. 2: Χαρακτηριστικά των κυματικών δεδομένων της χρονοσειράς ενός έτους 2018 – 2019. ....	59
Πίνακας 4. 3: Διεύθυνση και περίοδος κύματος που αντιστοιχούν στο μέγιστο και στο ελάχιστο ύψος κύματος για τη χρονοσειρά των 14 ετών.....	59
Πίνακας 4. 4: Διεύθυνση και περίοδος κύματος που αντιστοιχούν στο μέγιστο και στο ελάχιστο ύψος κύματος για τη χρονοσειρά ενός έτους 2018 – 2019. ....	59
Πίνακας 4. 5: Πυκνώσεις του υπολογιστικού πλέγματος σε όρους έκτασης μεταξύ των κόμβων (m <sup>2</sup> ). ....	64
Πίνακας 4. 6: Δείκτης RMSE για την αξιολόγηση της ακρίβειας των εναλλακτικών πλεγμάτων.....	64
Πίνακας 4. 7: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Energy Flux. ....	67
Πίνακας 4. 8: Αντιπρόσωποι των 30 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Energy Flux. ....	70
Πίνακας 4. 9: Αντιπρόσωποι διευθύνσεων και υψών και συχνότητες εμφάνισής τους.....	74
Πίνακας 4. 10: Μέσα ύψη κύματος ανά κατακόρυφη κλάση της σχηματοποίησης με 10 αντιπροσώπους – Μέθοδος Energy Flux. ....	76
Πίνακας 4. 11: Μέσα ύψη κύματος ανά κατακόρυφη κλάση της σχηματοποίησης με 30 αντιπροσώπους – Μέθοδος Energy Flux. ....	76
Πίνακας 4. 12: Μέσα ύψη κύματος ανά κατακόρυφη κλάση – Διαχωρισμός σε διακριτά σενάρια. ..	76
Πίνακας 5. 1: Δείκτες αξιολόγησης της εγκυρότητας της κάθε μεθόδου σχηματοποίησης. ....	103
Πίνακας 5. 2: Κατηγοριοποίηση του δείκτη BSS (Van Rijn et al., 2003). .....	103

## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3. 1: Μέσο ανεμολόγιο Σταθμού Μήλου 2012-2020.....	51
Σχήμα 3. 2: Μέγιστο ανεμολόγιο Σταθμού Μήλου 2012-2020. ....	52
Σχήμα 3. 3: Πλήθος διακινηθέντων επιβατών. ....	56
Σχήμα 3. 4: Πλήθος κατάπλων επιβατικών – οχηματαγωγών και φορτηγών πλοίων. ....	57
Σχήμα 3. 5: Πλήθος διακινηθέντων οχημάτων. ....	57
Σχήμα 4. 1: Απεικόνιση του τριγωνικού κανάβου. ....	62
Σχήμα 4. 2: Απεικόνιση του πυκνωμένου τριγωνικού κανάβου στην ευρύτερη περιοχή του λιμένα. ....	62
Σχήμα 4. 3: Λεπτομέρεια του πυκνωμένου τριγωνικού κανάβου κοντά στα λιμενικά έργα. ....	63
Σχήμα 4. 4: Βαθυμετρία υπολογιστικού πεδίου (MIKE21). ....	63
Σχήμα 5. 1: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους. ....	79
Σχήμα 5. 2: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.....	80
Σχήμα 5. 3: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	80
Σχήμα 5. 4: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 3/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.....	81
Σχήμα 5. 5: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 3/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	81
Σχήμα 5. 6: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 18/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.....	82
Σχήμα 5. 7: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 18/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	82
Σχήμα 5. 8: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους. ....	83
Σχήμα 5. 9: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους - Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα. ....	83
Σχήμα 5. 10: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.....	84
Σχήμα 5. 11: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.....	85
Σχήμα 5. 12: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	85
Σχήμα 5. 13: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 8/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.....	86
Σχήμα 5. 14: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 8/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	86
Σχήμα 5. 15: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.....	87
Σχήμα 5. 16: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	87
Σχήμα 5. 17: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους. ....	88
Σχήμα 5. 18: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα. ....	88

Σχήμα 5. 19: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.....	90
Σχήμα 5. 20: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.....	91
Σχήμα 5. 21: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	91
Σχήμα 5. 22: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.....	92
Σχήμα 5. 23: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	92
Σχήμα 5. 24: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.....	93
Σχήμα 5. 25: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	93
Σχήμα 5. 26: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.....	94
Σχήμα 5. 27: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	94
Σχήμα 5. 28: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.....	96
Σχήμα 5. 29: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.....	97
Σχήμα 5. 30: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	97
Σχήμα 5. 31: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 8/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.....	98
Σχήμα 5. 32: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 8/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	98
Σχήμα 5. 33: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 10/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.....	99
Σχήμα 5. 34: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 10/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	99
Σχήμα 5. 35: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.....	100
Σχήμα 5. 36: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια - Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	100
Σχήμα 6. 1: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Πρόταση 1.....	107
Σχήμα 6. 2: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Πρόταση 1.....	107
Σχήμα 6. 3: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 24/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	108
Σχήμα 6. 4: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 4/24)– Πρόταση 1.....	108
Σχήμα 6. 5: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	109
Σχήμα 6. 6: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 16/24)– Πρόταση 1.....	109
Σχήμα 6. 7: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	110
Σχήμα 6. 8: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 1.....	110

Σχήμα 6. 9: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα. ....	111
Σχήμα 6. 10: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Πρόταση 2. ....	113
Σχήμα 6. 11: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Πρόταση 2.....	113
Σχήμα 6. 12: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 24/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	114
Σχήμα 6. 13: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 4/24)– Πρόταση 2.....	114
Σχήμα 6. 14: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	115
Σχήμα 6. 15: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 16/24)– Πρόταση 2.....	115
Σχήμα 6. 16: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.....	116
Σχήμα 6. 17: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 2.....	116
Σχήμα 6. 18: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα. ....	117

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα από τα πιο ευαίσθητα συστήματα του φυσικού περιβάλλοντος και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συγκεντρώνει πλήθος ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και τεχνικών έργων. Η αποσταθεροποίησή της οφείλεται σε πλήθος φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Οι φυσικές διεργασίες, όπως οι κυματισμοί και τα παράκτια ρεύματα έχουν ως συνέπεια τη μεταφορά ιζήματος από και προς την ακτογραμμή, ενώ οι ανθρώπινες παρεμβάσεις μεταβάλλουν τους μηχανισμούς στερεομεταφοράς, εμποδίζοντας την ομαλή λειτουργία του παράκτιου χώρου.

Οι ακτομηχανικές μελέτες που εκπονούνται σε συνεχή βάση για την ορθή επιστημονικά διαχείριση των παρακτίων ζωνών απαιτούν την ανάπτυξη μοντέλων και την εκτέλεση προσομοιώσεων για την κατά το δυνατόν πιστή αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης. Τα μοντέλα παράκτιας μορφολογίας είναι πολύπλοκα και υπολογιστικά απαιτητικά λόγω των σύνθετων φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν υπόψη. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά τους μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κατάλληλη σχηματοποίηση των δεδομένων εισόδου του μοντέλου. Ως σχηματοποίηση νοείται η διαδικασία μείωσης των δεδομένων της πλήρους χρονοσειράς του κυματικού κλίματος σε ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών κυματισμών, οι οποίοι θα επιφέρουν παρόμοια μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα με την πλήρη χρονοσειρά, εξασφαλίζοντας τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου εκτέλεσης του μοντέλου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση της μορφολογικής εξέλιξης του πυθμένα της παράκτιας ζώνης της ακτής Καμάρες στη Σίφνο, με τη χρήση μεθόδων μακροχρόνιας πρόβλεψης. Το σημαντικότερο πρόβλημα της περιοχής είναι η έλλειψη χερσαίου χώρου για την εξυπηρέτηση της κίνησης πεζών και οχημάτων στον προσήνεμο προβλήτα και κατά μήκος του παραλιακού μετώπου. Για την ακριβή αναπαράσταση της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα που περιλαμβάνονται στο πακέτο λογισμικού MIKE 21 DHI, στο οποίο προσομοιώθηκε η κυματική διαταραχή και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα ως προς τον βαθμό μεταβολής της παράκτιας ισορροπίας. Σε ότι αφορά τη μείωση των δεδομένων εισόδου, εφαρμόστηκε η μέθοδος ροής ενέργειας (Energy Flux Method) για την αναπαράσταση της πλήρους χρονοσειράς με 10 και 30 αντιπροσώπους καθώς και η μέθοδος διαχωρισμού του κυματικού κλίματος σε διακριτά σενάρια.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της απόδοσης των μεθόδων σχηματοποίησης υποδεικνύουν την υπεροχή της μεθόδου ροής ενέργειας με τον μεγαλύτερο αριθμό αντιπροσώπων σε ότι αφορά την επαρκή αναπαράσταση του αρχικού κυματικού κλίματος. Οι αποκλίσεις της μεθόδου σε σχέση με την πραγματική κατάσταση ως προς τη μεταβολή του πυθμένα στο πέρας των προσομοιώσεων προέκυψαν μικρές και κρίθηκαν αποδεκτές ώστε να αναχθούν τα αποτελέσματα σε υπερετήσια βάση.

Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του λιμένα των Καμαρών και αναπτύσσονται μοντέλα για την προσομοίωση της παράκτιας κυματικής κυκλοφορίας με χρήση της αποδοτικότερης σχηματοποιημένης χρονοσειράς. Για κάθε πρόταση, παρατίθεται η τελική στερεομεταφορά και αξιολογούνται τα προτεινόμενα έργα ως προς την επιρροή τους στη μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα.

## ABSTRACT

The coastal zone is one of the most sensitive entities of the natural environment and presents a great interest due to the large number of human activities that take place in the area and the continuous construction of coastal works. Natural processes, such as waves and currents, result in sediment transport, while human interventions alter the sand transport mechanisms, impeding the proper function of the coastal environment.

Coastal engineering studies, carried out on an ongoing basis for the scientifically correct management of coastal zones, require the development of models and the execution of simulations for the most accurate representation of the actual environment. Coastal morphology models are complex and computationally demanding due to the large number of complex physical processes they include. However, their complexity and computational time can be reduced by properly schematizing the input data of the model. Schematization is defined as the process of reducing the full time series of the wave climate into a set of representative waves, ideally resulting in a morphological bed level evolution similar to the output of the full time series at the end of the simulation, thus ensuring the reduction of the computational load of the model.

The present study aims to examine and evaluate long-term forecasting methods of morphological bed level evolution of Kamares coast of Sifnos. In the case of Kamares coast, the most serious problem is the lack of space at the windward pier and along the coastal front which serves the vehicles and the travellers. For the accurate representation of the area, the models included in the MIKE 21 DHI software were used, in which the wave disturbance was simulated and the results were examined in the terms of the coastal morphological evolution. Regarding the reduction of the input data, two methods were applied, the Energy Flux method to produce 10 and 30 representatives of the full time series and the method of separating the wave climate into distinct scenarios.

The evaluation results of the schematization methods indicate the superiority of the Energy Flux method with the set of 30 representative waves, in sufficiently representing the overall wave climate. The deviations between the Energy Flux method and the actual situation, regarding the bed level evolution at the end of the simulation process, were inevitable but they were considered acceptable.

Finally, suggestions for expanding the port infrastructures are presented and simulated, using the most efficient schematized time series. The results of the simulations are presented and the proposed works are evaluated for their impact on the balanced coastal morphology.



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παράκτια ζώνη είναι η παραθαλάσσια περιοχή στην οποία συντελούνται οι περισσότερες διεργασίες που αφορούν στην ανθρώπινη δραστηριότητα. Εκτείνεται από την ακτογραμμή έως το βάθος εκείνο στο οποίο γίνεται αισθητή η επιρροή των κυματισμών στον πυθμένα της θάλασσας. Η μεταβλητότητα και η φυσική εξέλιξη της παράκτιας ζώνης επηρεάζεται από ένα πλήθος φυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η ενέργεια που μεταφέρεται από τους κυματισμούς και τα θαλάσσια ρεύματα προκαλεί τη μεταφορά ιζήματος, η οποία σε βάθος χρόνου μεταβάλλει τη μορφή της ακτογραμμής.

Λόγω της αύξησης των θαλάσσιων μεταφορών κατασκευάζονται συνεχώς νέα λιμενικά έργα, τόσο για σκάφη αναψυχής όσο και για εμπορικά ή επιβατηγά πλοία. Η κατασκευή αυτών των έργων στο δυναμικό παράκτιο περιβάλλον διαταράσσει την ισορροπία της περιοχής και μεταβάλλει τις υδροδυναμικές συνθήκες και τους ρυθμούς στερεομεταφοράς. Με την παρουσία τους τροποποιούν την κατεύθυνση και την ένταση των κυματισμών και των κυματογενών ρευμάτων και συνεπώς παρεμβάλλονται στις φυσιολογικές διεργασίες μεταφοράς ιζήματος. Έτσι, στη γειτονιά των λιμενικών κατασκευών παρατηρούνται συσσωρεύσεις ιζήματος και διάβρωση της ακτής που μπορεί να έχουν σημαντικές αρνητικές συνέπειες στην ανθρώπινη δραστηριότητα ή και στην λειτουργικότητα των λιμένων.

Οι ακτομηχανικές μελέτες που εκπονούνται για την ορθή διαχείριση των παράκτιων ζωνών απαιτούν τη χρήση μοντέλων και την εκπόνηση προσομοιώσεων για την ακριβέστερη αναπαράσταση των περιοχών και των χαρακτηριστικών τους. Για την επίτευξη του παραπάνω στόχου, τα μοντέλα χρειάζονται δεδομένα εισόδου τα οποία αποτελούνται από πλήθος πραγματικών παρατηρήσεων, όπως το ύψος και η περίοδος κύματος, η διεύθυνση εισερχόμενου κυματισμού κ.α. Ωστόσο, ο μεγάλος αριθμός των δεδομένων που απαιτείται για την ορθή αναπαράσταση των μοντέλων, δυσχεραίνει την υπολογιστική διαδικασία, αυξάνοντας σημαντικά τον χρόνο των προσομοιώσεων. Για τη μείωση του χρόνου των προσομοιώσεων, απαιτείται η επεξεργασία των δεδομένων και η σχηματοποίησή τους ώστε να καλύπτουν μικρότερη χρονική περίοδο αλλά παράλληλα να είναι αντιπροσωπευτικά του αρχικού δείγματος.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της μορφολογικής εξέλιξης του πυθμένα της παράκτιας ζώνης της ακτής Καμάρες στη Σίφνο. Το σημαντικότερο πρόβλημα της περιοχής είναι η έλλειψη χερσαίου χώρου για την εξυπηρέτηση της κίνησης πεζών και οχημάτων στον προσήνεμο προβλήτα και κατά μήκος του παραλιακού μετώπου. Για την αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης χρησιμοποιήθηκε χρονοσειρά πραγματικών μετρήσεων καθώς και σχηματοποιήσεις αυτής και διερευνήθηκε η αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου σχηματοποίησης. Για τον σκοπό της εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MIKE 21 DHI, στο οποίο προσομοιώθηκε η κυματική διαταραχή της περιοχής και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα ως προς τον βαθμό μεταβολής της παράκτιας ισορροπίας. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που αντιμετωπίζει ο λιμένας των Καμαρών και αξιολογούνται τα προτεινόμενα έργα ως προς την επιρροή τους στη μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα.

## 1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει, έκτος της εισαγωγής, έξι κεφάλαια επιπλέον, τα οποία περιγράφονται συνοπτικά στη συνέχεια.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται συνοπτικά τα θεωρητικά στοιχεία των έργων προστασίας της ακτογραμμής από το φαινόμενο της διάβρωσης και των μεθόδων σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος, η εφαρμογή των οποίων αναλύεται στο Κεφάλαιο 4. Επιπλέον, αναφέρονται οι μέθοδοι και οι δείκτες αποτίμησης που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της απόδοσης των μοντέλων. Τέλος, γίνεται περιγραφή των βασικών μοντέλων του υπολογιστικού πακέτου MIKE 21 DHI που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Καταγράφονται τα σημαντικότερα στοιχεία του κάθε μοντέλου, οι βασικές παράμετροι εισόδου/εξόδου, καθώς και οι κύριες εξισώσεις υπολογισμού στις οποίες βασίζουν τη λειτουργία τους.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η περιοχή του όρμου των Καμαρών της Σίφνου. Η γεωγραφική θέση, τα ιστορικά και πληθυσμιακά χαρακτηριστικά, οι προστατευόμενες περιοχές και τα αναπτυξιακά σχέδια για την περιοχή, αποτελούν ορισμένα από τα στοιχεία που απαρτίζουν το παρόν κεφάλαιο. Στη συνέχεια, γίνεται η ακτομηχανική αναγνώριση της περιοχής μελέτης. Αναλύονται τα μορφολογικά στοιχεία και περιγράφεται η εξέλιξη της ακτογραμμής σε βάθος χρόνου με χρήση αεροφωτογραφιών. Τέλος, περιγράφονται εκτενώς τα υφιστάμενα λιμενικά έργα και τονίζονται τα σημαντικότερα προβλήματα της περιοχής.

Στο Κεφάλαιο 4 περιλαμβάνεται ο προσδιορισμός του αρχικού κυματικού κλίματος, καθώς και η σχηματοποίησή του με διακριτά σενάρια και με την μέθοδο Ροής Ενέργειας (Energy Flux Method). Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία δημιουργίας του υπολογιστικού πεδίου στο πρόγραμμα MIKE 21 DHI.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Για την εκάστοτε προσομοίωση παρατίθενται η χωρική κατανομή του ύψους κύματος, της ταχύτητας του κύματος και η αλλαγή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων σχηματοποίησης με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση ολόκληρης της ετήσιας χρονοσειράς και υπολογίζεται ο στατιστικός δείκτης που θα κρίνει την απόδοση των μοντέλων.

Στο Κεφάλαιο 6 γίνεται συνοπτική περιγραφή των προτεινόμενων λύσεων και αναλύονται τα αποτελέσματά ως προς την επιρροή τους στην εξέλιξη της ακτογραμμής.

Στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα κύρια σημεία της διπλωματικής εργασίας, καταγράφονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη και δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

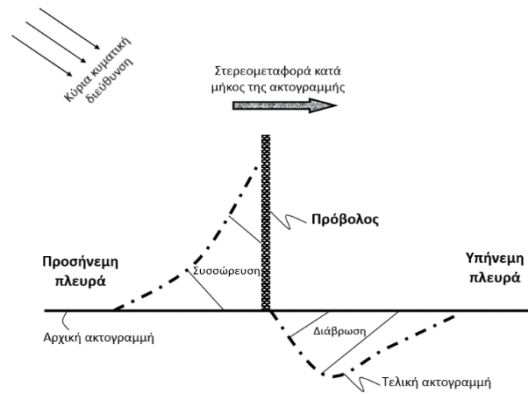
## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

### 2.1. Έργα προστασίας ακτογραμμής

Οι παράκτιες ζώνες παγκοσμίως χαρακτηρίζονται από σημαντική βιοποικιλότητα, δεδομένου ότι συγκεντρώνουν μεγάλα ποσοστά της χλωρίδας και της πανίδας του πλανήτη. Ταυτόχρονα, φιλοξενούν τις περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες που σχετίζονται με τη θάλασσα, όπως οι θαλάσσιες μεταφορές και η αλιεία, λιμενικές εγκαταστάσεις και έργα προστασίας της ακτογραμμής, ακόμα και παραθαλάσσιους οικισμούς. Στις παράκτιες ζώνες συναντάμε πλήθος κλιματολογικών και γεωμορφολογικών συνθηκών που ποικίλουν ανάλογα με την περιοχή και επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τους κυματισμούς, τα ρεύματα, τους ανέμους που αναπτύσσονται και τα ιζήματα που μεταφέρονται. Συνέπεια του πλήθους των φυσικών θαλάσσιων μηχανισμών αλλά και των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων/παρεμβάσεων, είναι η έντονη μεταβλητότητα των παράκτιων ζωνών σε ότι αφορά τη μορφολογία τους, τις συνιστώσες τους και τη γενικότερη χωρική εξέλιξή τους σε βάθος χρόνου.

Το ισοζύγιο των φερτών υλών σε μια παράκτια ζώνη προσδίδει μια σχετική μορφοδυναμική ισορροπία στο περιβάλλον. Η κατασκευή, όμως, νέων έργων στην πλέον δραστήρια περιοχή του παράκτιου χώρου, όπως λιμενικές εγκαταστάσεις, έργα προστασίας της ακτής (κυματοθραύστες, πρόβολοι, κλπ.) και λοιπές παρεμβάσεις, διαταράσσουν την φυσική ισορροπία σε βαθμό ανάλογο του μεγέθους των παρεμβάσεων. Συνέπεια της κατασκευής τέτοιων έργων είναι η αναμόρφωση των υδροδυναμικών συνθηκών της περιοχής, καθώς πλέον συντελούνται φαινόμενα όπως η ανάκλαση, η περίθλαση, η ρήγωση και η μετατόπιση της ζώνης θραύσεως σε περιοχές που δεν εμφανίζονταν παλαιότερα. Οι συνθήκες στερεομεταφοράς μεταβάλλονται, καθώς τα λιμενικά έργα με την παρουσία τους τροποποιούν την ένταση και την κατεύθυνση των κυματισμών και των κυματογενών ρευμάτων και συνεπώς παρεμβάλλονται στις φυσιολογικές διεργασίες μεταφοράς (*Καραμπάς et al., 2016*). Αποτέλεσμα της μεταβολής τους ρυθμού στερεομεταφοράς είναι η δημιουργία νέας βαθυμετρίας στο παράκτιο περιβάλλον και η εμφάνιση διάβρωσης και εναπόθεσης ιζήματος σε διαφορετικά σημεία της ακτογραμμής.

Η παρουσία παράκτιων έργων αναστατώνει το φυσικό περιβάλλον, καθώς μεταβάλλεται η μορφή της ακτογραμμής στην οποία βρίσκεται το έργο. Συνήθως, παρατηρείται προσάμμωση στα ανάντη του έργου, δηλαδή στην πλευρά της επικρατούσας διεύθυνσης ροής και σε μία μικρή ζώνη αμέσως κατάντη του έργου. Αυτό οφείλεται στη μείωση της ταχύτητας ροής λόγω της παρουσίας του έργου και κατά συνέπεια στη μείωση της δυνατότητάς μεταφοράς του ιζήματος. Σε μια ευρύτερη περιοχή κατάντη του έργου παρατηρείται εκτεταμένη διάβρωση, καθώς πλέον έχει μειωθεί η ταχύτητα ροής και δεν υπάρχει ίζημα προς μεταφορά από το ρεύμα. Η μείωση της ταχύτητας ροής στα ανάντη των έργων/εμποδίων οφείλεται είτε σε φαινόμενα ανάκλασης και περίθλασης, όπως σε ένα πρόβολο ή κυματοθραύστη, είτε σε ανυπαρξία συνθηκών θραύσης λόγω της απότομης αύξησης του βάθους, όπως σε περίπτωση βυθοκορημένου διαύλου ναυσιπλοΐας. Οι μεταβολές της ακτογραμμής που αναφέρθηκαν αντιστοιχούν στις μέσες συνθήκες ροής μιας παράκτιας περιοχής και είναι μακροχρόνιες. Βραχυπρόθεσμα, είναι πιθανό να μην εμφανιστούν οι ίδιες μεταβολές ή ακόμα να παρουσιαστούν οι αντίθετες, λόγω των διαφορετικών στιγμιαίων συνθηκών παράκτιας ροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε κατασκευή παρουσιάζει ανάλογες διαδικασίες που επηρεάζουν τις διεργασίες στερεομεταφοράς.



Εικόνα 2. 1: Κίνηση ιζήματος λόγω της παρουσίας προβόλου. (Πηγή: ARTAGAN, Salih Serkan, 2006)

Η διάβρωση των ακτών λόγω των φυσικών θαλάσσιων μηχανισμών παρατηρείται από τους αρχαίους χρόνους. Αυτή η διαβρωτική τάση των ακτών εντείνεται όσο ο αριθμός των λιμένων που κατασκευάζονται στις παράκτιες περιοχές αυξάνεται. Από τον 18<sup>ο</sup> αιώνα ξεκίνησαν οι προσπάθειες εφαρμογής μέτρων ελέγχου της διάβρωσης, τις περισσότερες φορές χωρίς επιτυχία, καθώς η μελέτη, ο σωστός σχεδιασμός και η κατασκευή τέτοιων έργων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και αποτελεί ένα από τα δυσκολότερα έργα του ακτομηχανικού.

Η ανάγκη για διατήρηση ακτογραμμής σταθερού πλάτους τόσο για περιβαλλοντικούς όσο και για οικονομικούς λόγους, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων μεθόδων και μέσων αντιμετώπισης του φαινομένου της διάβρωσης. Ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε περιοχής, επιλέγεται το αντίστοιχο έργο και εξετάζονται οι συνέπειές του στην παράκτια ζώνη (Καραμπάς *et al.*, 2016). Τα παράκτια τεχνικά έργα χωρίζονται σε συμβατικά και ήπια, με βάση το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα στον παράκτιο χώρο. Επιπλέον, ανάλογα με τον προσανατολισμό του διαμήκους άξονά τους και της απόστασής τους από την ακτογραμμή, διακρίνονται στα εξής:

- Έργα (σχεδόν) παράλληλα στην ακτογραμμή και σε απόσταση από αυτήν (κυματοθραύστες).
- Έργα (σχεδόν) κάθετα ή υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή και σε επαφή με αυτήν (πρόβολοι).
- Έργα επί της ακτής, όπως η θωράκιση μετώπου.
- Έργα αναπλήρωσης της παράκτιας ζώνης.



Εικόνα 2. 2: Έργα προστασίας ακτής κατά σειρά: πρόβολοι, κυματοθραύστες, θωράκιση με ογκολίθους. (Πηγές: pixels.com, Dr.B.Garawell, wikipedia.org)

### 2.1.1. Συμβατικά – σκληρά έργα προστασίας ακτής

Μέχρι πρότινος, η πρακτική που εφαρμοζόταν για την ανάπτυξη τεχνικών κατασκευών στις παράκτιες περιοχές για τη δημιουργία υποδομών και για την προστασία της περιοχής από τη μορφολογική μεταβολή της ακτογραμμής, αγνοούσε τις αρνητικές επιπτώσεις των έργων στην περιοχή τοποθέτησης. Η κατασκευή αυτών των έργων γινόταν με βάση τη λεγόμενη σκληρή προσέγγιση, καθώς αμελούσε τις επιπτώσεις τόσο στο θαλάσσιο όσο και στο ευρύτερο περιβάλλον.

Τα συμβατικά έργα παράκτιας προστασίας είναι τα εξής:

- Βραχίονες

Οι βραχίονες (ή πρόβολοι) κατασκευάζονται σε επαφή με την ακτή και εγκάρσια ή υπό γωνία ως προς αυτήν. Συνήθως συναντώνται σε ακτές με έντονη διάβρωση, σε περιπτώσεις όπου είναι επιθυμητή η αύξηση του πλάτους της παραλίας, στις εκβολές ποταμών για την αποφυγή εναπόθεσης φερτών (σε αυτή την περίπτωση ενδείκνυται η κατασκευή ζεύγους προβόλων) και στην είσοδο των λιμένων, ώστε να εμποδίσουν τη μεταφορά και εναπόθεση ιζημάτων στο εσωτερικό της λιμενολεκάνης. Η κατασκευή τους σε επαφή με την ακτή έχει ως στόχο τον έλεγχο του μεταφερόμενου ιζήματος και τη συγκράτησή του, ώστε να αυξηθεί και να σταθεροποιηθεί η ακτή. Ανάλογα με το μήκος και τις ανάγκες της κάθε ακτής, μπορεί να κατασκευαστεί ένας βραχίονας ή ένα σύστημα βραχιόνων, το οποίο μπορεί να συνδυαστεί με τεχνητή αναπλήρωση της ακτής στο εσωτερικό των ανοιγμάτων τους.

Οι πρόβολοι ρυθμίζουν την παράκτια κυματογενή κυκλοφορία και τη μεταφορά ιζήματος, κατακρατώντας σημαντικές ποσότητες φερτών στα ανάντη των έργων. Συνεπώς, είναι πιθανό να εμφανιστεί το φαινόμενο της διάβρωσης ακριβώς κατάντη των προβόλων, λόγω έλλειψης του προς μεταφορά ιζήματος. Το πρόβλημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό και αποτελεί το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου, ωστόσο, με κατάλληλη τοποθέτηση των προβόλων ή ακόμα και με τεχνικές αναπλήρωσης, μπορεί να αντιμετωπιστεί η διάβρωση που παρατηρείται (Καραμπάς *et al.*, 2016).

Η διάβρωση κατάντη της κατασκευής ενός συστήματος προβόλων είναι μια σημαντική επίπτωση στο παράκτιο περιβάλλον, όμως, δεν είναι η μοναδική. Οι πρόβολοι με την παρουσία τους, αλλοιώνουν την εικόνα του παράκτιου τοπίου και λόγω της διακοπής της φυσιολογικής παράκτιας κυκλοφορίας είναι πιθανόν να προκληθεί σημαντική ποιοτική υποβάθμιση των υδάτων σε περιοχές ήδη περιβαλλοντικά επιβαρυνμένες.



Εικόνα 2. 3: Ζεύγος προβόλων (αριστερά) και σύστημα προβόλων (δεξιά). (Πηγές: [marinas.com](http://marinas.com), [julyamsvacationawaits.weebly.com](http://julyamsvacationawaits.weebly.com))

- Θωράκιση μετώπου ακτής

Τα έργα θωράκισης της ακτής κατασκευάζονται στο μέτωπο της ακτής και σε επαφή με αυτήν, με στόχο την προστασία της, έναντι διαβρώσεως. Συνήθως κατασκευάζονται ως επένδυση της προσβαλλόμενης ακτής από την κυματική δράση, με υλικά όπως οι φυσικοί και οι τεχνητοί ογκόλιθοι ή οι πλάκες, τα οποία αντιστέκονται στη θαλάσσια δράση με το ίδιο βάρος τους σε συνδυασμό με την αλληλεμπλοκή τους.

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται κατά τον σχεδιασμό των έργων αυτών, λόγω της ευαισθησίας της θωρακίσεως σε υποσκαφή στον πόδα του έργου και της διάβρωσης που εμφανίζεται στα κατάντη. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων, η προστασία του πόδα γίνεται με λιθορριπή ή στοιχεία ειδικής μορφής. Η προστασία της κατάντη περιοχής επιτυγχάνεται με την συνέχιση της θωρακίσεως είτε έως την πλησιέστερη θέση με ανθεκτικό πέτρωμα, είτε έως το σημείο εκείνο στο οποίο παρατηρείται σημαντική μεταβολή της μορφής της ακτογραμμής (Καραμπάς *et al.*, 2016).

Τα έργα θωράκισης διακρίνονται σε έργα με κεκλιμένο μέτωπο, με κατακόρυφο μέτωπο και σε έργα με ειδικούς τύπους θωρακίσεως. Στα έργα με κεκλιμένο μέτωπο χρησιμοποιείται κυρίως επένδυση από φυσικούς ή τεχνητούς ογκόλιθους και ακολουθείται διαδικασία κατασκευής παρόμοια με τη διαδικασία που ακολουθείται στα εξωτερικά λιμενικά έργα με πρηνή. Η επιλογή του τύπου των ογκολίθων που θα τοποθετηθούν εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα του κοντινότερου λατομείου και από τα διαθέσιμα τεχνοοικονομικά μέσα. Τα έργα με κατακόρυφο μέτωπο κατασκευάζονται κυρίως με επένδυση από πλάκες, οι διαστάσεις των οποίων ποικίλουν ανάλογα με το υλικό και το σκοπό χρήσης τους. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην προστασία της βάσης της κατασκευής για την αποφυγή της υποσκαφής του πόδα.

Σε κάποιες περιπτώσεις ενδείκνυται η χρήση ειδικών κατασκευών για τη θωράκιση του μετώπου, όπως συρματοκιβώτια, αμμοσωλήνες και αμμόσακκοι. Οι αμμόσακκοι είναι ο φθηνότερος και ο παλιότερος τύπος θωρακίσεως. Οι αμμοσωλήνες αποτελούνται από ένα κυλινδρικό περίβλημα πληρωμένο με λεπτόκοκκο υλικό και εμφανίζουν ισχυρή αντίσταση στη θαλάσσια δράση. Τα συρματοκιβώτια αποτελούνται από ένα επίμηκες συρμάτινο περίβλημα με μικρούς αμμόσακκους ή χονδρόκοκκο υλικό και επιτυγχάνουν σημαντικότερη μείωση της αναρρίχησης του κύματος σε σχέση με τους αμμόσακκους και τους αμμοσωλήνες.

Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου θωρακίσεως είναι αποτέλεσμα πολλών παραμέτρων, όπως οικονομοτεχνικές παράμετροι, τα χαρακτηριστικά της περιοχής κατασκευής του έργου, τα διαθέσιμα μέσα και ο επιθυμητός βαθμός προστασίας της ακτής.



Εικόνα 2. 4: Έργα θωράκισης ακτής κατά σειρά: κεκλιμένου μετώπου, κατακόρυφου μετώπου, με φυσικούς ογκολίθους, με τεχνητούς ογκολίθους. (Πηγές: [coastalcare.org](http://coastalcare.org), [pikist.com](http://pikist.com))

- Έξαλλοι κυματοθραύστες παράλληλα στην ακτή

Η κατασκευή κυματοθραυστών παράλληλα σε μια ακτή και σε απόσταση από αυτήν είναι το πλέον σύνηθες μέτρο προστασίας από διάβρωση. Με την παρουσία τους, μειώνεται σημαντικά η κυματική δράση πίσω από αυτούς με αποτέλεσμα να προστατεύεται η ακτή από την κυματογενή διαβρωτική δράση. Ταυτόχρονα, τα ρεύματα που δημιουργούνται μεταξύ του έργου και της ακτής συμβάλουν στην αποσταθεροποίηση των κόκκων και μεταφέρουν την άμμο από τα άκρα, στο κέντρο του πεδίου. Εκεί, λόγω της κυματικής ηρεμίας που επικρατεί, η δυνατότητα στερεομεταφοράς είναι μειωμένη και συνεπώς οι κόκκοι καθιζάνουν δημιουργώντας μια προεξοχή στη σκιά του κυματοθραύστη. Σε περιπτώσεις όπου ο κυματοθραύστης βρίσκεται κοντά στην ακτή, είναι πιθανό η πρόσκωση να προχωρήσει και να ενωθεί με την ακτή. Οι σχηματισμοί ιζήματος που παρατηρούνται είναι ο salient, κατά τον οποίο σχηματίζονται προεξοχές κωνοειδούς μορφής στη σκιά των έργων σε συνδυασμό με προεξοχές σε μορφή καμπάνας στην ακτή και ο tombolo, κατά τον οποίο συνδέεται ουσιαστικά το έργο με την ακτή.

Η συνήθης πρακτική ορίζει την κατασκευή ενός μεμονωμένου κυματοθραύστη ή ενός συστήματος κυματοθραυστών, σε περίπτωση που υπάρχει ανάγκη για προστασία ακτής μεγάλου μήκους, ή ακόμα την κατασκευή του έργου κατάντη των λιμένων για έλεγχο της διάβρωσης. Η κατασκευή τους μπορεί να συνοδευτεί με αναπλήρωση της ακτής, στοχεύοντας στην αύξηση του πλάτους της παραλίας αλλά και στον έλεγχο της διάβρωσης που μπορεί να προκληθεί ανάμεσα στα ανοίγματα. Η εφαρμογή αυτής της μεθοδολογίας σε περιοχές, όπου υπάρχει σύστημα κυματοθραυστών μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία μικρών παραλιών τύπου θύλακα (Καραμπάς *et al.*, 2016).

Πρόκειται για κατασκευές με ύψος στέψης πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας (Μ.Σ.Θ.) μεγαλύτερο των 2 m. Ο σχεδιασμός τους λαμβάνει υπόψη την απαίτηση σε συνήθεις κυματικές συνθήκες να τους διαπερνά μικρό μέρος της κυματικής ενέργειας, είτε με τη μορφή υπερπήδησης των κυματισμών, είτε με τη μετάδοσή του μέσα από το πορώδες της κατασκευής. Σε περιπτώσεις, όμως, έντονων κυματικών επεισοδίων (όπως σημαντικές καταιγίδες) είναι πιθανό να μεταφερθεί σημαντική κυματική ενέργεια κατάντη της κατασκευής.



Εικόνα 2. 5: Σύστημα παράλληλων κυματοθραυστών στο οποίο διακρίνονται οι δύο μηχανισμοί προσχώσεως.  
(Πηγές: [aeroengland.co.uk](http://aeroengland.co.uk) , [www.ingenia.org.uk](http://www.ingenia.org.uk))

### 2.1.2. Ήπια έργα προστασίας ακτής

- Πυθμενικοί πρόβολοι

Η μέθοδος των ύφαλων προβόλων από σκυρόδεμα αποτελεί μία από τις συχνά εφαρμοζόμενες ήπιες μεθόδους προστασίας έναντι διαβρώσεως. Στόχος τους είναι η μεταβολή των παράκτιων ρευμάτων και η ενίσχυση της ικανότητας της ακτής να κατακρατά τα μεταφερόμενα ιζήματα. Με την παρουσία τους, προκαλούν στάσιμους κυματισμούς, καθώς το προσπίπτον κύμα θραύεται πάνω στην κατασκευή και μέρος αυτού ανακλάται. Επιπλέον δημιουργείται μια νέα κατάσταση κυματογενούς κυκλοφορίας με βασικό χαρακτηριστικό, τους στροβίλους ενδιάμεσα στους πρόβλους. Οι μηχανισμοί αυτοί οδηγούν στη μείωση των κυματογενών ρευμάτων και κατά συνέπεια στη μείωση του φαινομένου της διάβρωσης (Ιωαννίδης *et al.*, 2006).

Αν και η απόδοση ενός χαμηλού προβόλου είναι μικρότερη από την απόδοση ενός υψηλού με ίδιο μήκος, η επιλογή αυτού του τύπου προβόλου είναι ορισμένες φορές επιβεβλημένη για λόγους ναυσιπλοΐας ή στην περίπτωση που δεν είναι απαραίτητη η συγκράτηση όλου του φορτίου στερεομεταφοράς (Μουτζούρης, 2005).



Εικόνα 2. 6: Σύστημα πυθμενικών προβόλων. (Πηγή: Pranzini *et al.*)

- Πλωτοί κυματοθραύστες

Οι πλωτοί κυματοθραύστες χρησιμοποιούνται σήμερα ως εναλλακτική λύση έναντι των κλασικών σταθερών κυματοθραυστών και η εφαρμογή τους ενδείκνυται σε περιοχές όπου οι επικρατούσες συνθήκες θαλάσσιου κυματισμού βρίσκονται σε αποδεκτά για τον σχεδιασμό όρια (Cox *et al.*, 2009). Πρόκειται για προκατασκευασμένα στοιχεία από σκυρόδεμα αξιοσημείωτου μεγέθους και εκτοπίσματος, τα οποία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή και παράλληλα μεταξύ τους. Ορισμένες από τις χρήσεις των πλωτών αυτών κατασκευών είναι οι εξής:

- α) Η προστασία παράκτιων ζωνών από φαινόμενα έντονης διάβρωσης.
- β) Η τοποθέτησή τους σε περιοχές με μεγάλα ύψη κύματος, με στόχο την προστασία των λουόμενων.
- γ) Η τοποθέτησή τους σε υπάρχουσες λιμενολεκάνες, με στόχο την δημιουργία μικρότερων λεκανών για μεγαλύτερη κυματική προστασία.
- δ) Η χρήση για την δημιουργία μαρίνων ή αλιευτικών καταφυγίων σε περιοχές με περιορισμένη κυματική δράση.

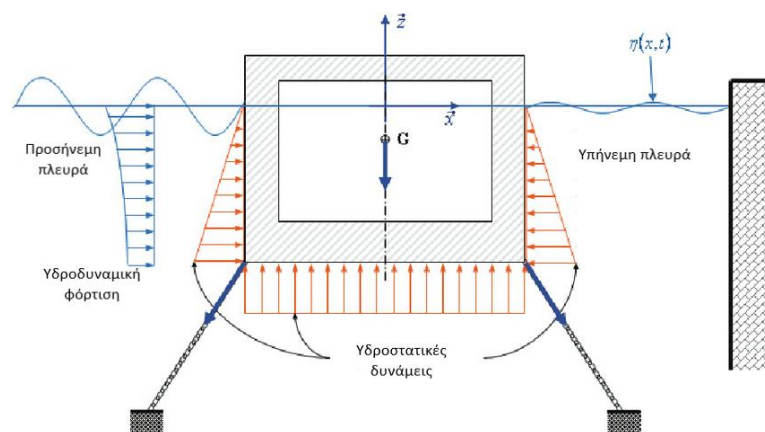




Εικόνα 2. 7: Πλωτοί κυματοθραύστες για δημιουργία μαρίνας (αριστερά) και σε μεγάλα ύψη κύματος (δεξιά).  
(Πηγή: [www.sfmarina.com](http://www.sfmarina.com))

Οι στόχοι του σχεδιασμού των πλωτών κυματοθραυστών είναι η επαρκής προστασία της περιοχής κατάντη του έργου, μέσω του περιορισμού της κυματικής ενέργειας και η αποφυγή της αστοχίας, η οποία εκφράζεται ως η αστοχία των καλωδίων αγκυρώσεως, των συνδέσεων και των επιμέρους πλωτήρων. Ωστόσο, τα έντονα εξωτερικά υδροδυναμικά φορτία των κυματισμών είναι δυνατόν να αποσταθεροποιήσουν το σύστημα, με συνέπεια την μεταβολή της συμπεριφοράς του συστήματος των πλωτήρων (Loukogeorgaki & Angelides, 2005).

Η εφαρμογή αυτών των κατασκευών παρουσιάζει πολλαπλά πλεονεκτήματα τόσο στο θαλάσσιο όσο και στο ευρύτερο περιβάλλον. Η απουσία βάσης στον πυθμένα επιτρέπει την ανανέωση των θαλάσσιων μαζών και ευνοεί την ανάπτυξη θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Επιπλέον, το κόστος κατασκευής και τοποθέτησής τους είναι χαμηλότερο συγκριτικά με το κόστος των σταθερών κυματοθραυστών και η ταχύτητα κατασκευής τους είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Γενικά, μπορούν να θεωρηθούν ως μια από τις πλέον τεχνολογικά σύγχρονες και περιβαλλοντικά φιλικές μεθόδους προστασίας ακτών και διαμόρφωσης μαρίνων. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών τύπων πλωτήρων, ωστόσο, οι πλέον χρησιμοποιούμενοι είναι οι ορθογώνιοι επιμήκεις πλωτήρες που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ημι-ελαστικών και χαλύβδινων καλωδίων, ενώ παράλληλα αγκυρώνονται στον θαλάσσιο πυθμένα.



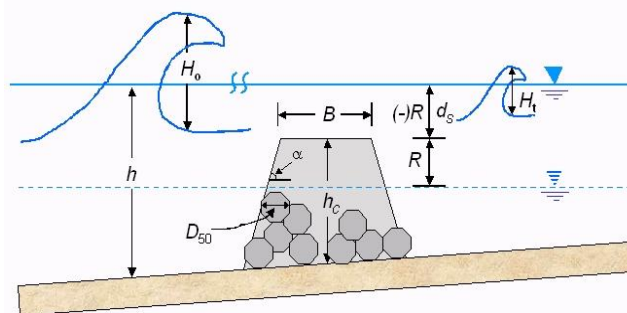
Εικόνα 2. 8: Διατομή πλωτού κυματοθραύστη. (Πηγή: G. Elchahal, P. Lafon, 2010)

- Χαμηλής στέψης και ύφαλοι κυματοθραύστες

Τα έργα χαμηλής και βυθισμένης στέψης είναι αρκετά εφαρμόσιμα ως μέτρα παράκτιας προστασίας και χρησιμοποιούνται είτε μεμονωμένα είτε ως σύστημα κυματοθραυστών σε συνδυασμό με τεχνητή αναπλήρωση. Στόχος τους είναι η μείωση του υδροδυναμικού φορτίου σε επιθυμητό επίπεδο, ώστε να εξασφαλίζεται ο φυσικός καθαρισμός της προστατευόμενης λεκάνης και να διατηρείται το ισοζύγιο φερτών της ακτογραμμής. Η στέψη τους βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, επιτρέποντας τη μετάδοση συγκεκριμένου ποσού κυματικής ενέργειας κατάντη του έργου, μέσω υπερπήδησης. Λόγω της παρουσίας τους, προκαλείται ανάκλαση τμήματος της κυματικής ενέργειας στα ανοιχτά και απόσβεση μέρους αυτής μέσω της θραύσης των κυματισμών πάνω στο έργο, ενώ παράλληλα γίνεται μετάδοση προς την ακτή.

Οι κυματοθραύστες αυτής της κατηγορίας έχουν ως συνήθη υλικά κατασκευής λιθορριπή και ογκολίθους, με εξαίρεση ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες χρειάζεται η τοποθέτηση άοπλου σκυροδέματος, όπως γίνεται στους έξαλλους κυματοθραύστες. Ακόμη, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου για την προστασία τόσο των λουόμενων όσο και των σκαφών, απαιτούνται σωλήνες γεωφάσματος, οι οποίοι περιέχουν άμμο.

Η παρουσία τέτοιου τύπου κυματοθραυστών προστατεύει την ακτή από τη διαβρωτική εγκάρσια δράση των κυματισμών. Συνήθως κατασκευάζονται σε βάθη μεγαλύτερα των 3 – 4 m και σε περιοχές με μικρό εύρος παλίρροιας. Η κατασκευή τους σε μεγάλα μήκη είναι δυνατόν να επιφέρει παρόμοιες κυματογενείς διεργασίες με εκείνες που παρατηρούνται λόγω της ύπαρξης έξαλλων κυματοθραυστών, με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση άμμου και τη δημιουργία προεξοχής στη σκιά τους (Καραμπάς *et al.*, 2016).



Εικόνα 2. 9: Διατομή ύφαλου κυματοθραύστη. (Πηγή: [www.marinespecies.org](http://www.marinespecies.org))

Οι ύφαλοι κυματοθραύστες επιλέγονται συνήθως για να προστατεύσουν:

- α) Αμμώδεις ακτές, οι οποίες κινδυνεύουν από σημαντικές περιοδικές διαβρώσεις.
- β) Παραλιακές περιοχές, οι οποίες κινδυνεύουν από πλημμύρες λόγω των κυματισμών που θραύονται κοντά στην ακτή.
- γ) Τη λεκάνη που σχηματίζεται μεταξύ του κυματοθραύστη και της ακτής και να διατηρήσουν την ηρεμία της.
- δ) Τα θεμέλια των παραλιακών έργων από τις κυματογενείς διεργασίες.

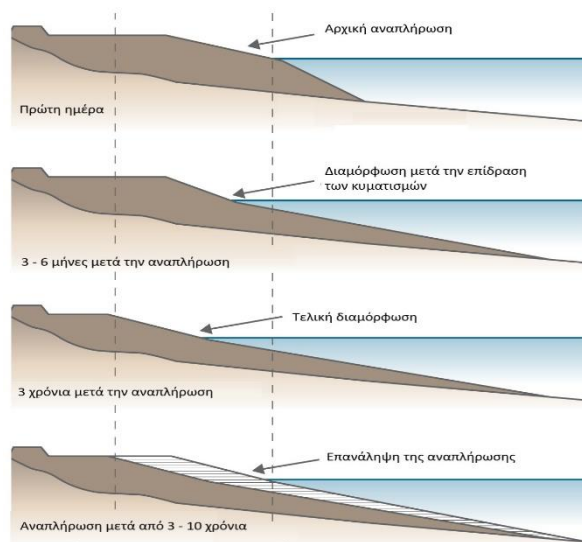
Η κατασκευή ύφαλων κυματοθραυστών προτιμάται σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλους ή ιστορικής παράδοσης, καθώς προκαλούν σημαντικά μικρότερη οπτική όχληση και εναρμονίζονται αισθητικά με το περιβάλλον. Τέλος, βασικό πλεονέκτημα αποτελεί το χαμηλό κόστος κατασκευής τους.

- Έργα αναπλήρωσης ακτής

Μια ήπια και περιβαλλοντικά φιλική τεχνική προστασίας της ακτής, η οποία προτιμάται σε διαρκώς αυξανόμενο βαθμό, είναι η τεχνητή αναπλήρωση της παράκτιας ζώνης. Πραγματοποιείται με τη συλλογή δάνειου ιζήματος συμβατό με το υφιστάμενο ίζημα στον πυθμένα της ζώνης και εξασφαλίζει έστω και πρόσκαιρη αύξηση της ζώνης αναψυχής. Η μεταφορά της άμμου γίνεται με βυθοκόρους, αντλίες, εκσκαφείς κλπ. Και εναποτίθεται στην ακτή η οποία επεκτείνεται προς τη θάλασσα. Η διάρκεια ζωής της αναπλήρωσης είναι σχεδόν πάντα περιορισμένη και απαιτείται η επανάληψή της ανά ορισμένα έτη. Ο χρόνος επαναλήψεως ορίζεται από την ένταση των παράκτιων μηχανισμών και μπορεί να επεκταθεί σημαντικά, αν η τροφοδότηση συνδυαστεί με έργα συγκρατήσεως του ιζήματος.

Η μαζική απόρριψη ιζήματος στην παράκτια ζώνη διαταράσσει σε κάθε περίπτωση την ισορροπία. Η δράση των θαλάσσιων μηχανισμών μπορεί να οδηγήσει σε νέα ισορροπία που είναι πιθανόν να διαφέρει από την επιθυμητή. Επομένως, βασική αρχή σχεδιασμού είναι η διαμόρφωση παρόμοιας μορφολογίας του πυθμένα, με τη διατομή ισορροπίας της ακτής υπό προστασία.

Η τεχνητή τροφοδότηση είναι μια ακριβή μέθοδος, όμως το κόστος της ανά μέτρο μήκους της ακτής μειώνεται όσο αυξάνεται το μήκος της ακτής υπό προστασία. Εφαρμόζεται αν είναι δυνατή η εύρεση δάνειου υλικού κατάλληλης ποιότητας και ποσότητας και εφόσον έχει εκτιμηθεί ένας ρεαλιστικός χρόνος ζωής της αναπληρώσεως (Μουτζούρης, 2005).



Εικόνα 2. 10: Επιρροή του θαλάσσιου κυματισμού στην ακτή με αναπλήρωση. (Πηγή: [nad.usace.army.mil](http://nad.usace.army.mil))



Εικόνα 2. 11: Στιγμιότυπο αναπλήρωσης ακτής. (Πηγή: [goldcoast.qld.gon.au](http://goldcoast.qld.gon.au))

### 2.1.3. Εναλλακτικά έργα προστασίας ακτής

Πολλές είναι οι παράκτιες κατασκευές οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν για την επίλυση του προβλήματος της διάβρωσης. Η προστασία που προσφέρουν είναι είτε άμεση (τοίχοι αντιστήριξης, θωράκιση της ακτής), είτε έμμεση (κυματοθραύστες, πρόβολοι) και έχουν σκοπό τη μείωση του υδραυλικού φορτίου που μεταφέρεται στην ακτή. Τα συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το σκυρόδεμα και οι φυσικοί ή τεχνητοί ογκόλιθοι.

Ωστόσο, η ανάγκη να δημιουργηθούν νέες μέθοδοι χαμηλού κόστους γίνεται ολοένα και πιο επιτακτική, καθώς το κόστος κατασκευής και συντήρησης των υπαρχόντων έργων παράκτιας προστασίας συνεχώς αυξάνεται. Η έλλειψη φυσικών ογκόλιθων σε ορισμένες περιοχές είναι ένας ακόμη σημαντικός λόγος, ώστε να μελετηθούν και να εφαρμοσθούν νέες μέθοδοι προστασίας της ακτογραμμής. Πρωτοποριακά συστήματα, όπως τα γεωσυστήματα (γεωκουρτίνες κ.α.) και άλλα μη συμβατικά συστήματα (Reef Balls κ.α.) γίνονται αρκετά δημοφιλή κυρίως λόγω της εύκολης κατασκευής και τοποθέτησής τους, αλλά και λόγω του ελάχιστου περιβαλλοντικού αποτυπώματός τους.

- Reef Balls

Οι μονάδες τεχνητών υφάλων τύπου Reef Balls είναι προκατασκευασμένα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα οποία διαθέτουν οπές διαφόρων μεγεθών, ώστε να προσομοιάζουν φυσικούς υφάλους. Στόχος αυτών των στοιχείων είναι η απόσβεση της κυματικής ενέργειας και η ανάπτυξη του θαλάσσιου βιοτόπου. Λόγω της κατασκευής τους, δημιουργούν το κατάλληλο περιβάλλον για την ανάπτυξη της θαλάσσιας πανίδας. Βασικό πλεονέκτημα του σχεδιασμού τους είναι η εύκολη κατασκευή και τοποθέτησή τους και μπορούν να πλεύσουν (με τη βοήθεια σκάφους) μέχρι το σημείο όπου θα τοποθετηθούν. Έπειτα από έρευνες διαπιστώθηκε ότι οι συγκεκριμένες κατασκευές είναι αποτελεσματικές όταν τοποθετούνται σε περιοχές με περιορισμένο εύρος παλίρροιας και ήρεμες κυματικές συνθήκες (Pilarczyk, 2008).



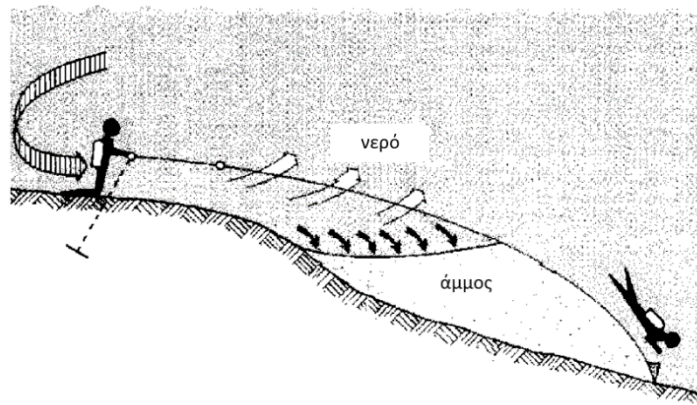
Εικόνα 2. 12: Πυθμενικοί τεχνητοί ύφαλοι. (Πηγή: sciencephoto.com)

- Γεωκουρτίνα (BEROSIN)

Ενδιαφέρουσα εφαρμογή για τον έλεγχο της μορφολογικής μεταβολής της ακτογραμμής αποτελεί η γεωκουρτίνα, η οποία είναι γνωστή με το όνομα BEROSIN. Πρόκειται για εύκαμπτη κατασκευή από γεωυφάσματα, η οποία τοποθετείται στην ακτή και αγκυρώνεται στον πυθμένα από ειδικά εκπαιδευμένους δύτες. Στόχος της μεθόδου είναι η παγίδευση των ιζημάτων που μεταφέρονται από τα ρεύματα, ευνοώντας την εναπόθεσή τους στην ακτή. Το τμήμα που βρίσκεται στην ακτή είναι

εξοπλισμένο με πλωτήρες για την αντιστάθμιση του βάθους και αγκυρώνεται κατάλληλα στο επιθυμητό σημείο της ακτής. Οι άκρες που θα τοποθετηθούν στον πυθμένα, βυθίζονται από τους δύτες και αγκυρώνονται.

Η επιλογή της διαπερατότητας του γεωφάσματος της κουρτίνας εξαρτάται κυρίως από το επιθυμητό μέγεθος και την ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων προς συγκράτηση, αλλά και από την απαίτηση να επιτρέπεται η ροή του νερού χωρίς να δημιουργούνται επιπρόσθετες δυνάμεις στην κουρτίνα και συνεπώς στις αγκυρώσεις της (Pilarczyk, 2008).



Εικόνα 2. 13: Μέθοδος παράκτιας προστασίας BEROSIN. (Πηγή: K. Pilarczyk et al, 2003)

- Distorted Ripple Mat (DRIM)

Πρόκειται για μια νέα μέθοδο προστασίας της ακτής από τη διάβρωση, η οποία αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στην Ιαπωνία. Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος τοποθετούνται στη ζώνη θραύσης, με στόχο να δημιουργήσουν ρεύματα τα οποία θα μεταφέρουν ιζημα στην ακτή. Λόγω της ασυμμετρίας της κατασκευής τους, δημιουργούνται πυθμενικά ρεύματα και συνεπώς εμφανίζεται ελεγχόμενη στερεομεταφορά. Η αποτελεσματικότητά τους έγκειται στον έλεγχο της ποσότητας του ιζήματος που μεταφέρεται στην ακτή και επιτυγχάνεται σε περιοχές όπου ισχύει  $H/D \leq 0.5$  (H το ύψος κύματος και d το βάθος) (Pilarczyk, 2008).

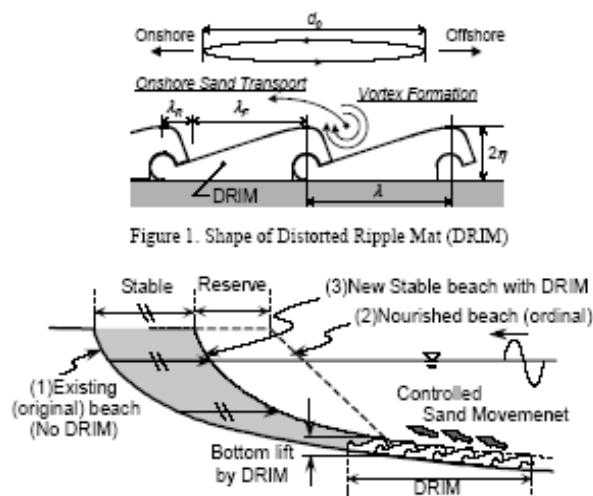


Figure 1. Shape of Distorted Ripple Mat (DRIM)

Εικόνα 2. 14: Εφαρμογές της μεθόδου DRIM. (Πηγή: K. Pilarczyk et al, 2008)

## 2.2. Μέθοδοι σχηματοποίησης

Τα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη μακροχρόνια πρόβλεψη της παράκτιας μορφολογικής εξέλιξης, προσομοιώνουν ένα μεγάλο εύρος κυματικών διεργασιών, όπως η γένεση και ο μετασχηματισμός των κυματισμών και η στερεομεταφορά. Ένα θεμελιώδες πρόβλημα που προκύπτει από τη μορφολογική μοντελοποίηση βασισμένη σε διαδικασίες, είναι ο ακριβής προσδιορισμός των κυματικών διεργασιών με μεγάλες χρονικές κλίμακες. Για την προσομοίωση των διεργασιών που συντελούνται στην περιοχή η οποία μελετάται, απαιτείται πλήθος δεδομένων εισόδου, όπως η βαθυμετρία, τα όρια και οι κυματικές συνθήκες της περιοχής.

Σύμφωνα με τον Lesser (2009), τα μοντέλα πρόβλεψης της παράκτιας μορφολογικής εξέλιξης με χρονική περίοδο μεγαλύτερη του ενός έτους έχουν σημαντικό υπολογιστικό φόρτο και μεγάλο αριθμό παραγόμενων αποτελεσμάτων. Αυτό οφείλεται κυρίως στις σύνθετες διαδικασίες που εμπιρεύονται στα εν λόγω μοντέλα, καθώς οι μορφολογικές μεταβολές συμβαίνουν σε χρονικές κλίμακες αρκετών τάξεων μεγαλύτερες από τη χρονική κλίμακα των υδροδυναμικών διεργασιών που προκαλούν τη στερεομεταφορά. Ωστόσο, όπως συζητήθηκε από τους de Vriend et al. (1993), αυτή η διαφοροποίηση στις χρονικές κλίμακες των μορφολογικών και υδροδυναμικών μοντέλων παρέχει τη βάση για μια σειρά προσεγγίσεων για την επιτάχυνση της μακροπρόθεσμης μορφοδυναμικής μοντελοποίησης, τρεις εκ των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια. Η πρώτη αναλύεται εκτενώς, καθώς αποτελεί τη προσέγγιση που υιοθετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, ενώ η δεύτερη και η τρίτη παρουσιάζονται επιγραμματικώς.

- Μείωση των δεδομένων εισόδου (input reduction), η οποία βασίζεται στην ιδέα ότι διαδικασίες μικρότερης χρονικής κλίμακας με μειωμένα δεδομένα, τα λεγόμενα αντιπροσωπευτικά (representatives), μπορούν να έχουν μακροπρόθεσμες επιδράσεις.
- Μείωση υπολογιστικού μοντέλου (model reduction), η οποία έχει ως βάση τη θεώρηση ότι το ίδιο το μοντέλο μπορεί να αναδιατυπωθεί στην επιθυμητή χρονική κλίμακα χωρίς να είναι απαραίτητη η περιγραφή των διαδικασιών μικρότερης χρονικής κλίμακας.
- Μοντελοποίηση προσανατολισμένη στη συμπεριφορά (behaviour – oriented modelling), η οποία επιχειρεί να μοντελοποιήσει τα επιθυμητά φαινόμενα χωρίς να κατανοεί και να περιγράφει τις υποκείμενες διαδικασίες (διεργασίες ιζημάτων στην ακτή κ.α.).

Η προσπάθεια μείωσης της πολυπλοκότητας ενός συστήματος φυσικών διεργασιών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή σε όλα τα στάδια δημιουργίας του μοντέλου καθώς η μείωση των δεδομένων εισόδου ή του μοντέλου ενδεχομένως να μην μπορεί να εφαρμοστεί σε ορισμένες περιπτώσεις. Για παράδειγμα, αν ο μελετητής ενδιαφέρεται να ερευνήσει μια μορφολογική μεταβολή της ακτής που σχετίζεται με τη δράση ενός ακραίου μεμονωμένου γεγονότος, όπως η καταιγίδα, οι μέθοδοι σχηματοποίησης του κυματικού κλίματος δεν μπορούν να εφαρμοστούν. Όπως τόνισαν οι de Vriend et al. (1993), η μείωση των δεδομένων εισόδου και των μοντέλων δεν έχει νόημα, εκτός εάν είναι εγγενώς συνδεδεμένη με τη διαμόρφωση ενός στόχου. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να προσδιοριστούν εκ των προτέρων οι παράγοντες της παράκτιας συμπεριφοράς που θα θεωρηθούν σημαντικοί.

Η μείωση των δεδομένων εισόδου έχει ως στόχο την αντικατάσταση των πολύπλοκων χρονοσειρών των κυματικών δεδομένων με συγκεκριμένου αριθμού κυματικά δεδομένα (αντιπροσωπευτικά) τα οποία στο σύνολό τους παράγουν τα ίδια μοτίβα στερεομεταφοράς με τις πλήρεις χρονοσειρές για μια δεδομένη χρονική περίοδο (Lesser, 2009). Διάφορες τεχνικές έχουν προταθεί για τη μείωση των κυματικών δεδομένων εισόδου (μέθοδος ροής ενέργειας, μέθοδος σταθερών κλάσεων, μέθοδος CERC, κ.α.), ωστόσο, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος ροής ενέργειας και η

μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά κυματικά σενάρια. Το θεωρητικό υπόβαθρο των δύο μεθόδων αναπτύσσεται στη συνέχεια, ενώ η μεθοδολογία εφαρμογής τους στα κυματικά δεδομένα περιγράφεται εκτενώς στο *Κεφάλαιο 4.3*.

Σύμφωνα με τον *Lesser (2009)*, οι γενικές αρχές των μεθόδων σχηματοποίησης των δεδομένων είναι ίδιες, ωστόσο, οι τεχνικές για την μείωση των δεδομένων ποικίλουν, όπως και ο αριθμός των αντιπροσώπων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Βάση όλων των μεθόδων σχηματοποίησης αποτελεί η θεώρηση ότι στις μακροχρόνιες μορφοδυναμικές μεταβολές τον μεγαλύτερο ρόλο έχει η κατά μήκος της ακτογραμμής στερεομεταφορά, η οποία συνδέεται με τη ροή ενέργειας των κυματισμών. Σύμφωνα με τους *Benedet et al. (2016)*, οι συνήθεις μεθοδολογίες σχηματοποίησης βασίζονται στον διαχωρισμό της χρονοσειράς των κυματικών γεγονότων σε κλάσεις κατά τη διεύθυνση και κατά το ύψος των εισερχόμενων κυματισμών και υπολογίζουν μια αντιπροσωπευτική τιμή για κάθε κλάση. Η διαφορά των μεθόδων έγκειται στα κριτήρια προσδιορισμού των κυματικών κλάσεων και των αντιπροσώπων.

Σε ότι αφορά την αναδιατύπωση της κλίμακας του μοντέλου, χρησιμοποιείται ο συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης *Morfac*, ο οποίος αυξάνει το ρυθμό μεταβολής του πυθμένα μέσω ενός σταθερού χρονικού παράγοντα (*Lesser, 2009*). Το νέο βάθος πυθμένα που προκύπτει αντιπροσωπεύει μια προσομοίωση συνολικών χρονικών βημάτων ίσων με τον σταθερό χρονικό παράγοντα. Για παράδειγμα, για κυματικά δεδομένα διάρκειας μίας ημέρας με συντελεστή *Morfac* ίσο με 365, θα προκύψουν αποτελέσματα με αντίστοιχο χρόνο προσομοίωσης 365 ημερών.

### 2.2.1. Μέθοδος διαχωρισμού των κυματικών χαρακτηριστικών σε διακριτά σενάρια

Βασική αρχή της μεθόδου είναι ο αυθαίρετος ορισμός των επιθυμητών αντιπροσώπων, του εύρους των διευθύνσεων και του εύρους των υψών κύματος. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγονται ως αντιπροσωπευτικές οι διευθύνσεις που προσβάλλουν την περιοχή, σύμφωνα με τον προσανατολισμό της και στη συνέχεια καθορίζεται το εύρος (ή βήμα) των διευθύνσεων που θα αντιστοιχεί σε κάθε αντιπρόσωπο. Σκοπός του συγκεκριμένου διαχωρισμού είναι η διερεύνηση της κυματικής διαταραχής της περιοχής υπό τη δράση κυματισμών συγκεκριμένων βασικών διευθύνσεων (Νότιος, Νοτιοδυτικός, Δυτικός, Βορειοδυτικός, Βόρειος), οι οποίοι από τη μελέτη των ανεμολογικών και κυματικών δεδομένων έχουν προκύψει ως επικρατέστεροι για την περιοχή.

Αρχικά, για τον διαχωρισμό κατά διεύθυνση χρησιμοποιείται το προκαθορισμένο βήμα (σε μοίρες) και στη συνέχεια κάθε κλάση χωρίζεται περαιτέρω με βάση το επιλεγμένο βήμα ύψους κύματος. Κατά συνέπεια, οι κλάσεις κατά διεύθυνση έχουν το ίδιο εύρος και ομοίως οι κλάσεις καθ' ύψος. Ωστόσο, το πλήθος των κλάσεων καθ' ύψος, που αντιστοιχεί σε κάθε κλάση κατά διεύθυνση, διαφέρει καθώς διαφέρουν τα ύψη κύματος που αντιστοιχούν σε κάθε εύρος διευθύνσεων (βλ. *Εικόνα 2. 15*). Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικότερα η διαδικασία που ακολουθείται.

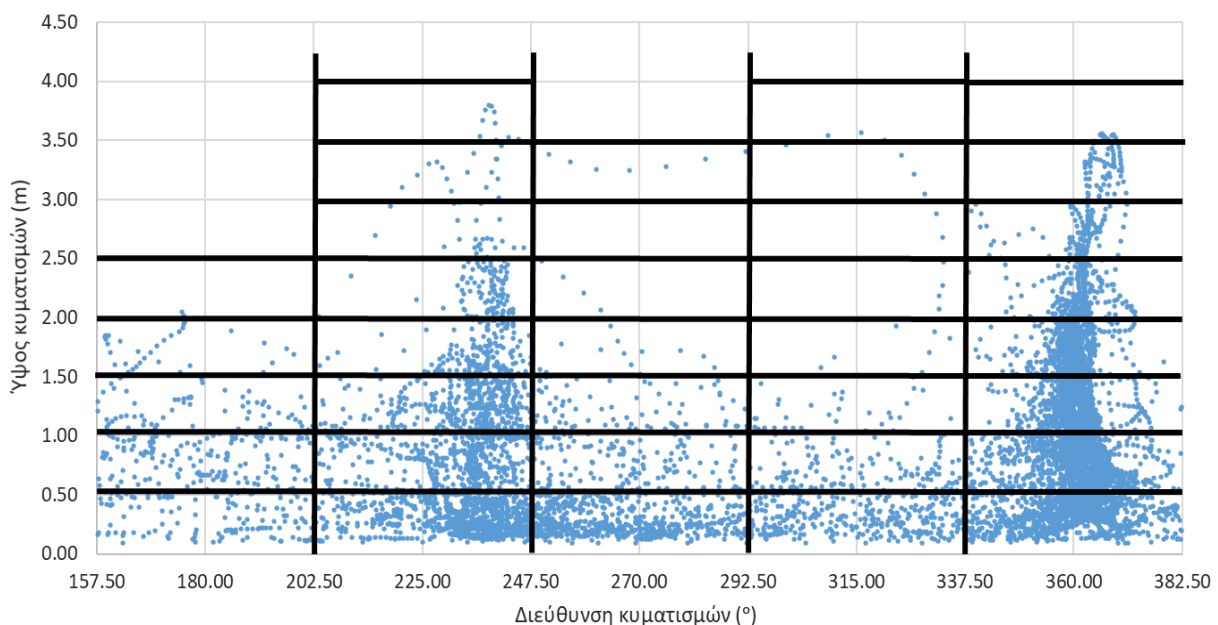
- Αρχική επιλογή αποτελεί το πλήθος των διευθύνσεων που θα οριστούν ως αντιπρόσωποι των οριζόντιων κλάσεων και κατά συνέπεια προκύπτει το πλάτος της κάθε κλάσης.
- Επιλέγεται αυθαίρετα το πλάτος των κατακόρυφων κλάσεων και με βάση αυτό χωρίζεται το εύρος των υψών κύματος σε υποκλάσεις. Συνεπώς οι διευθύνσεις χωρίζονται σε κλάσεις ίσου πλάτους και ομοίως τα ύψη κύματος. Ωστόσο, το πλήθος των υποκλάσεων των υψών κύματος που αντιστοιχεί στις κλάσεις κατά διεύθυνση διαφέρει.
- Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αντιπροσωπευτική τιμή της κάθε υποκλάσης. Δεδομένου ότι οι αντιπρόσωποι των διευθύνσεων έχουν επιλεγεί εξ' αρχής, απομένει ο υπολογισμός των αντιπροσωπευτικών τιμών για τα ύψη και την περίοδο του κύματος. Ο αντιπρόσωπος των υψών

κύματος ισούται με τη μέγιστη τιμή του εύρους και ο αντίστοιχος της περιόδου ισούται με τη μέση τιμή των περιόδων της κάθε κλάσης.

- Ακολουθεί ο υπολογισμός των συχνοτήτων εμφάνισης των αντιπροσωπευτικών τιμών ως το πλήθος των δεδομένων της κάθε ομάδας προς το συνολικό αριθμό των δεδομένων.
- Τέλος, υπολογίζεται ο αριθμός των εμφανίσεων της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής στη τελική χρονοσειρά ως η συχνότητα εμφάνισης επί το επιθυμητό πλήθος των στοιχείων της σχηματοποιημένης χρονοσειράς.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος και το χρονικό βήμα της νέας χρονοσειράς καθορίζεται από τον μελετητή με βάση το βαθμό μείωσης των δεδομένων που απαιτείται.

Οι διευθύνσεις που πλήττουν την περιοχή του όρμου των Καμαρών είναι μεταξύ του εύρους Βορράς-Νότος. Επιλέχθηκαν οι αντιπρόσωποι να αντιστοιχούν στις 5 βασικές διευθύνσεις του συγκεκριμένου εύρους: Νότιος (180°), Νοτιοδυτικός (225°), Δυτικός (270°), Βορειοδυτικός (315°) και Βόρειος (360°). Ακόμη, πραγματοποιήθηκε η επιλογή το πλάτος της κάθε κλάσης κατά διεύθυνση να ισούται με 45°. Για να ικανοποιηθούν και οι δύο προαναφερθείσες ανάγκες, δηλαδή, η διατήρηση των συγκεκριμένων αντιπροσώπων και η αντιστοίχιση, σε αυτούς, στοιχείων που ανήκουν σε εύρος 45°, ήταν απαραίτητη η προσθήκη δεδομένων που αντιστοιχούν σε διευθύνσεις εκατέρωθεν του εύρους Βορράς-Νότος. Πιο αναλυτικά, στον αντιπρόσωπο νότιας διεύθυνσης (180°) αντιστοιχεί το εύρος 45° μεταξύ νότιου/νοτιοανατολικού – νότιου/νοτιοδυτικού (157,5° - 202,5°) και όμοια για όλους τους αντιπροσώπους. Έπειτα από τον διαχωρισμό των διευθύνσεων, υπολογίστηκε το εύρος των υψών κύματος της κάθε κλάσης και χωρίστηκε επιμέρους σε μικρότερες κλάσεις πλάτους 0.5m. Τέλος, υπολογίστηκαν οι αντιπροσωπευτικές τιμές των δεδομένων και τοποθετήθηκαν σε χρονοσειρά εύρους μίας ημέρας. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στα δεδομένα της περιοχής μελέτης περιγράφεται εκτενέστερα στο *Κεφάλαιο 4.3.3*.



Εικόνα 2. 15: Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.



### 2.2.2. Μέθοδος Ροής Ενέργειας (Energy Flux Method)

Η μέθοδος Ροής Ενέργειας βασίζεται στη θεώρηση ότι στις μακροχρόνιες μορφοδυναμικές μεταβολές τον πιο σημαντικό ρόλο έχει η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, η οποία συνδέεται άμεσα με τη ροή ενέργειας των κυμάτων, κάτι που καθιστά τη μέθοδο Energy Flux ιδανική για την αναπαράσταση φαινομένων στερεομεταφοράς (Benedet et al., 2016). Η ροή ενέργειας του κάθε κυματικού γεγονότος υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P = \left( \frac{\rho g H_{mo}^2}{8} \right) C_g \quad (2.1)$$

Όπου:

$\rho$	πυκνότητα θαλασσινού νερού (1025kg/m <sup>3</sup> )
$g$	επιτάχυνση της βαρύτητας (9,81m/s <sup>2</sup> )
$H_{mo}$	ύψος κύματος (m)
$C_g$	ταχύτητα ομάδας κυματισμών

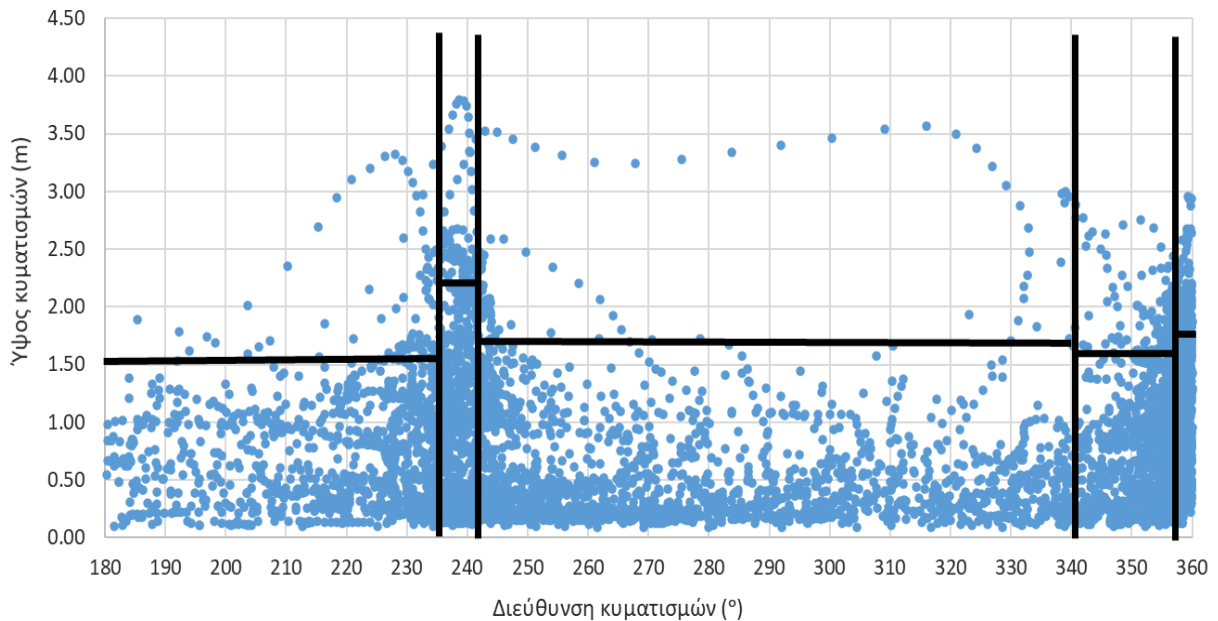
Έναντι της αυθαίρετης επιλογής του πλάτους των κλάσεων που εφαρμόζεται στη μέθοδο που προαναφέρθηκε, η μέθοδος ροής ενέργειας διαχωρίζει τα δεδομένα σε κλάσεις, ώστε να έχουν όλη ισή ροή ενέργειας. Αναλυτικότερα, παρουσιάζεται η διαδικασία που περιέγραψαν οι Benedet et al., (2016):

- Σε πρώτο στάδιο υπολογίζεται η ροή ενέργειας του κάθε κυματικού γεγονότος και η αθροιστική ροή ενέργειας του συνόλου των παρατηρήσεων.
- Οι κλάσεις καθ' ύψος και κατά διεύθυνση κύματος χωρίζονται με τρόπο τέτοιο, ώστε κάθε μια να έχει ροή ενέργειας ίση με τη συνολική, διαιρεμένη με το πλήθος των κλάσεων. Συνεπώς, το άθροισμα των επιμέρους ροών ενέργειας των κλάσεων πρέπει να ισούται με τη συνολική.
- Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αντιπροσωπευτική τιμή της κάθε κλάσης ως ο μέσος όρος των διευθύνσεων, των υψών και των περιόδων που εμπεριέχονται σε κάθε κλάση.
- Ακολουθεί ο υπολογισμός των συχνοτήτων εμφάνισης των αντιπροσωπευτικών τιμών ως το πλήθος των δεδομένων της κάθε ομάδας προς το συνολικό αριθμό των δεδομένων.
- Τέλος, υπολογίζεται ο αριθμός των εμφανίσεων της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής στη τελική χρονοσειρά ως η συχνότητα εμφάνισης επί το επιθυμητό πλήθος των στοιχείων της σχηματοποιημένης χρονοσειράς.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος Energy Flux για τη σχηματοποίηση των κυματικών δεδομένων με 10 και με 30 αντιπροσώπους. Σκοπός των δύο σχηματοποιήσεων είναι η αξιολόγηση της επιρροής του πλήθους των αντιπροσώπων στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Στην περίπτωση της σχηματοποίησης με τους 10 αντιπροσώπους, το κυματικό κλίμα χωρίστηκε σε 10 κλάσεις (5 κατά διεύθυνση, 2 κατά το ύψος των κυματισμών), η κάθε μία εκ των οποίων έχει ροή ενέργειας ίση με το 1/10<sup>ο</sup> της συνολικής. Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι αντιπρόσωποι της κάθε κλάσης ως η μέση τιμή των δεδομένων που βρίσκονται σε αυτή. Ο κάθε αντιπρόσωπος αποτελείται από τις τιμές του ύψους, της περιόδου και της διεύθυνσης κύματος, τα οποία ισούνται με τις μέσες τιμές των αντίστοιχων στοιχείων που βρίσκονται σε κάθε κλάση.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κυματικές κλάσεις που παράγονται με την μέθοδο ροής ενέργειας, συγκρινόμενες με τη μέθοδο διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια, έχουν μεγαλύτερη ανάλυση και μικρότερα πλάτη όπου υπάρχει μεγάλη ροή ενέργειας ( $P$ ). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην

εξίσωση υπολογισμού της ροής ενέργειας ( $P$ ) λαμβάνεται υπόψη το ύψος κύματος, με συνέπεια οι κλάσεις με μεγάλα ύψη κύματος να εμφανίζουν την απαραίτητη ( $P$ ) με λιγότερα στοιχεία. Αντίθετα, οι κλάσεις με μικρά ύψη κύματος χρειάζονται περισσότερα στοιχεία ώστε να εμφανίσουν αθροιστικά την ζητούμενη ( $P$ ).



Εικόνα 2. 16: Παράδειγμα εφαρμογής της μεθόδου Ροής Ενέργειας για τον διαχωρισμό σε 10 κλάσεις.

Η διαφορά μεταξύ των μεθόδων σχηματοποίησης έγκειται στα κριτήρια με τα οποία γίνεται η κατηγοριοποίηση των δεδομένων σε κλάσεις και στον αριθμό των αντιπροσώπων που επιλέγεται. Σε όλες τις μεθόδους παρατηρείται αύξηση του σφάλματος, όσο μικραίνει ο αριθμός των δεδομένων και των αντιπροσώπων. Η μέθοδος Energy Flux παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα για μικρό αριθμό αντιπροσώπων, είναι απλή και είναι αντικειμενική, καθώς τα κυματικά δεδομένα χωρίζονται με βάση την κατανομή της ροής ενέργειας (Benedet et al., 2016).

### 2.3. Αποτίμηση μεθόδων μακροχρόνιας πρόβλεψης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία αξιολόγησης των αποτελεσμάτων των αριθμητικών μοντέλων, τα οποία προσομοιώνουν την εξέλιξη της παράκτιας μορφολογίας, όπως αυτή περιγράφηκε από τους *Sutherland et al. (2004)*. Η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των αριθμητικών μοντέλων από τον μελετητή αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της υπολογιστικής διαδικασίας. Παλαιότερα, τα αποτελέσματα συγκρίνονταν με τις πραγματικές μετρήσεις από την περιοχή μελέτης και η επιλογή των κατάλληλων μοντέλων ήταν αποτέλεσμα της υποκειμενικής κρίσης του κάθε μελετητή. Πλέον, προτείνεται ένα σύνολο κριτηρίων που προσδιορίζουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των στατιστικών μέτρων απόδοσης των παράκτιων μορφολογικών μοντέλων. Πιο συγκεκριμένα, έναντι της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με τις πραγματικές μετρήσεις για κάθε σημείο ενδιαφέροντος, πραγματοποιείται ο υπολογισμός στατιστικών δεικτών από τους οποίους προκύπτει ένα γενικό αποτέλεσμα για όλη την περιοχή.

Η απόδοση κάθε μοντέλου μπορεί να αξιολογηθεί από τον υπολογισμό τριών βασικών χαρακτηριστικών: της αξιοπιστίας (bias), της ακρίβειας (accuracy) και της επίδοσης (skill), τα οποία αναλύονται στη συνέχεια. Σύμφωνα με τους *Sutherland et al. (2004)* είναι επιθυμητό να απαντώνται συγκεκριμένα κριτήρια στις στατιστικές αναλύσεις απόδοσης των μοντέλων, τα σημαντικότερα των οποίων είναι τα εξής:

- Η ύπαρξη απλής και ξεκάθαρης εννοιολογικής βάσης.
- Η ικανότητα του μοντέλου να μην επηρεάζεται από πολύ μικρές αλλαγές.
- Η δυνατότητα εφαρμογής τους σε όλα τα δεδομένα (για τον λόγο αυτό συνήθως προτιμώνται αδιάστατοι συντελεστές)

Σε ότι αφορά τις προβλέψεις, υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες αποτελεσμάτων, οι κατηγοριοποιημένες και οι πιθανοτικές. Μια κατηγοριοποιημένη πρόβλεψη χρησιμοποιείται όταν το μοντέλο εμφανίζει πεπερασμένο αριθμό πιθανών αποτελεσμάτων, όπως σε περίπτωση της εξέλιξης της ακτογραμμής τα αποτελέσματα θα χωρίζονταν στην διάβρωση, την ισορροπία και την πρόοδο. Οι πιθανοτικές προβλέψεις αποτελούν προβλέψεις σε μορφή χρονοσειράς διακριτών ή συνεχών τιμών. Ο αριθμός των πιθανών αποτελεσμάτων σε αυτή την περίπτωση είναι άπειρος και συνεπώς η σύγκρισή τους πραγματοποιείται με χρήση χρονοσειράς τιμών και όχι κατηγορίες. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της παρούσας διπλωματικής αποτελούν διακριτές τιμές και συνεπώς θα χρησιμοποιηθεί η πιθανοτική μέθοδος αξιολόγησής τους. Τα βασικά χαρακτηριστικά της πιθανοτικής αξιολόγησης της απόδοσης κάθε μοντέλου είναι τα εξής:

#### 1. Αξιοπιστία (bias)

Η αξιοπιστία σχετίζεται με την εύρεση των κεντρικών ροπών, όπως ο μέσος όρος, των προβλέψεων και των παρατηρήσεων και η εύρεση της μεταξύ τους διαφοράς. Οι βασικές εξισώσεις της αξιοπιστίας της πιθανοτικής αξιολόγησης είναι :

$$Bias_a = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (y_j - x_j) = \langle Y \rangle - \langle X \rangle \quad (2.2)$$

$$Bias_m = Y_M - X_M \quad (2.3)$$

Όπου:

$Y$	ένα σύνολο $J$ παρατηρήσεων ( $y_1, y_2, \dots, y_J$ )
$X$	ένα σύνολο $J$ προβλέψεων ( $x_1, x_2, \dots, x_J$ )
$Bias_a$	η μέση τιμή του συνόλου των διαφορών των προβλέψεων από τις παρατηρήσεις
$Bias_m$	ο μέσος του συνόλου των διαφορών των προβλέψεων από τις παρατηρήσεις

## 2. Ακρίβεια (accuracy)

Ο υπολογισμός της ακρίβειας έγκειται στην εύρεση του μέσου σφάλματος μεταξύ των προβλέψεων και των παρατηρήσεων. Οι πιο κοινοί δείκτες για την αξιολόγηση της ακρίβειας είναι το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error, MAE) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean square error, MSE). Συχνότερα, του μέσου τετραγωνικού σφάλματος, χρησιμοποιείται η μέση τετραγωνική ρίζα του σφάλματος (root – mean square error, RMSE). Η επιλογή μεταξύ των δύο εξαρτάται από την ποσότητα των ακραίων τιμών, καθώς η ύπαρξη λίγων ακραίων τιμών επηρεάζει περισσότερο τη μέση τετραγωνική ρίζα του σφάλματος RMSE από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα MSE. Συνεπώς, ο δείκτης RMSE είναι πιο συντηρητική έκφραση υπολογισμού του σφάλματος και έχει συνήθως μεγαλύτερη ή ίση τιμή με τον δείκτη MAE. Η διαφορά μεταξύ των δεικτών RMSE και MAE έγκειται στο σχήμα των κατανομών των παρατηρήσεων και των αποτελεσμάτων και μειώνεται όσο οι κατανομές τείνουν προς την συμμετρική. Οι εξισώσεις υπολογισμού των δεικτών που προαναφέρθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω.

$$MAE(Y, X) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J |y_j - x_j| = \langle |Y - X| \rangle \quad (2.4)$$

$$MSE(Y, X) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (y_j - x_j)^2 = \langle (Y - X)^2 \rangle \quad (2.5)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι εκφράσεις μέσο απόλυτο σφάλμα και μέση τετραγωνική ρίζα σφάλματος βασίζονται στη θεώρηση ότι όλα τα σφάλματα βρίσκονται στις προβλέψεις των μοντέλων και όχι στις παρατηρήσεις. Αυτό είναι σχεδόν πάντα αδύνατον και κατά συνέπεια οι εξισώσεις αξιολόγησης της απόδοσης των μοντέλων είναι απαραίτητο να λαμβάνουν υπόψη την πιθανή ύπαρξη σφάλματος στις αρχικές μετρήσεις. Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας οι αρχικές μετρήσεις αντιστοιχούν στην αποτύπωση της αρχικής βαθυμετρίας της περιοχής. Για να ικανοποιηθεί η ανάγκη αυτή, είναι χρήσιμο να απεικονιστεί το σφάλμα των μετρήσεων και των παρατηρήσεων. Το σφάλμα ισούται με τη διαφορά μεταξύ των τελικών μετρήσεων της βαθυμετρίας (ή προβλέψεων) και της αρχικής βαθυμετρίας. Οι μεταβλητές και οι δείκτες που χρησιμοποιούνται δίνονται παρακάτω.

$$Y' = Y - B \quad (2.6)$$

$$X' = X - B \quad (2.7)$$

$$r_{X'Y'} = \frac{\langle Y'X' \rangle}{\sigma_{X'}\sigma_{Y'}} \quad (2.8)$$

Όπου:

$B$	ένα σύνολο $N$ βασικών προβλέψεων ( $b_1, b_2, \dots, b_N$ )
$r_{X'Y'}$	ο συντελεστής συσχέτισης των παρατηρήσεων και των προβλέψεων

### 3. Επίδοση (skill)

Η επίδοση αποτελεί αδιάστατη τιμή της σχέσης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με την βασική πρόβλεψη (η οποία αντιστοιχεί στην αρχική βαθμμετρία της περιοχής). Για την αξιολόγηση της επίδοσης χρησιμοποιούνται οι δείκτες BSS (Brier skill score), RMSSS (Root – mean square skill score) και MASS (Mean absolute skill score), με πιο διαδεδομένο τον δείκτη BSS. Μια θεωρητική απόλυτη ταύτιση των μεταβλητών θα έδινε στο δείκτη την τιμή 1, ενώ αν η πρόβλεψη για την τελική βαθμμετρία με χρήση των μεθόδων σχηματοποίησης έχει μεγαλύτερη απόκλιση από την τελική βαθμμετρία με χρήση της πλήρους χρονοσειράς του ενός έτους από ότι έχει από την αρχική, ο δείκτης παίρνει αρνητικές τιμές. Επομένως, αυτή η μέθοδος μπορεί εμφανίσει σημαντική ευαισθησία σε μικρές μεταβολές όταν η πρόβλεψη του μοντέλου απέχει πολύ από τη αρχική κατάσταση. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της επίδοσης των μοντέλων είναι οι εξής:

$$BSS = 1 - \frac{MSE(Y, X)}{MSE(B, X)} = 1 - \frac{\langle (Y - X)^2 \rangle}{\langle (B - X)^2 \rangle} \quad (2.9)$$

$$RMSS = 1 - \frac{RMSE(Y, X)}{RMSE(B, X)} = 1 - \frac{\langle (Y - X)^2 \rangle^{1/2}}{\langle (B - X)^2 \rangle^{1/2}} \quad (2.10)$$

$$MASS = 1 - \frac{MAE(Y, X)}{MAE(B, X)} = 1 - \frac{\langle |Y - X| \rangle}{\langle |B - X| \rangle} \quad (2.11)$$

Με σκοπό να διαπιστωθεί η καταλληλότητα ή μη του εκάστοτε μοντέλου, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση των δεικτών που προκύπτουν από την επεξεργασία των παραγόμενων δεδομένων. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης BSS. Ο συγκεκριμένος δείκτης παρέχει τη δυνατότητα αποσύνθεσής του σε όρους ακριβείας, υποδεικνύοντας τις περιοχές πιθανής βελτίωσης του μοντέλου και λαμβάνει το σφάλμα ως τη μέση τετραγωνική διαφορά των παρατηρήσεων και των προβλέψεων. Ως εκ τούτου θεωρείται το καλύτερο μέτρο για την αξιολόγηση της απόδοσης των μορφολογικών μοντέλων. Σύμφωνα με τους *Van Rijn et al. (2003)*, η κατηγοριοποίηση των τιμών του δείκτη BSS πραγματοποιείται με βάση τον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2. 1: Κατηγοριοποίηση του δείκτη BSS (*Van Rijn et al., 2003*).

Κατηγοριοποίηση	Εύρος τιμών BSS
Excellent	1.0 – 0.5
Good	0.5 – 0.2
Reasonable/fair	0.2 – 0.1
Poor	0.1 – 0.0
Bad	< 0.0

## 2.4. Περιγραφή του αριθμητικού μοντέλου MIKE 21

### 2.4.1. Γενικά

Το λογισμικό MIKE 21 του DHI (Danish Hydraulic Institute) είναι ένα εργαλείο το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας, ανάλυσης, μοντελοποίησης και προσομοίωσης υδραυλικών συστημάτων και φαινομένων σε θάλασσες, λιμένες, εκβολές και παράκτιες περιοχές. Τα φαινόμενα αυτά αφορούν την ποιότητα του νερού, τη μεταφορά και διασπορά ιζημάτων κ.α. Οι τυπικές εφαρμογές του λογισμικού, όπως αναφέρονται από τον οργανισμό DHI, είναι οι εξής:

- Αξιολόγηση σχεδιασμού παράκτιων και υπεράκτιων δομών.
- Βελτιστοποίηση λιμενικών διατάξεων και μέτρων προστασίας ακτών.
- Ανάλυση αφαλάτωσης και κυκλοφορίας νερού.
- Βελτιστοποίηση των παράκτιων εκβολών.
- Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων των θαλάσσιων υποδομών.
- Οικολογικός σχεδιασμός και βελτιστοποίηση του υδάτινου συστήματος.
- Βελτιστοποίηση συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας.
- Πρόβλεψη νερού για ασφαλείς θαλάσσιες δραστηριότητες και πλοήγηση.
- Προειδοποιήσεις για παράκτιες πλημμύρες και καταιγίδες.
- Μοντελοποίηση ποταμών, πλημμυρών και χερσαίων ροών.

Το MIKE 21 περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα ενότιων οι οποίες επιτρέπουν τη δημιουργία προσαρμοσμένου μοντέλου για διαφορετικούς σκοπούς. Μερικές από τις ενότητες, όπως περιγράφονται από το DHI, είναι:

- Προσομοίωση κυματισμών (Φασματικά μοντέλα και μοντέλα Boussinesq).
- Μελέτη παράκτιων περιοχών (Μοντέλα μεταφοράς και διασποράς, υδροδυναμικά και συνδυασμένα μοντέλα).
- Μεταφορά ιζημάτων και ποιότητα νερού (Μοντέλα στερεομεταφοράς και μορφολογικής εξέλιξης της ακτογραμμής).

Πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε ενότητας του MIKE 21, χρησιμοποιείται το MIKE Zero για την δημιουργία της βαθυμετρίας και του πλέγματος της περιοχής μελέτης. Το MIKE Zero έχει ως δεδομένα εισόδου τις συντεταγμένες των ισοβαθών και της ακτής σε μορφή αρχείου .xyz, τα οποία έπειτα από επεξεργασία δίνουν την βαθυμετρία και το κλειστό όριο της περιοχής, αντίστοιχα.

### 2.4.2. MIKE 21 SW

Το MIKE 21 SW είναι ένα φασματικό μοντέλο κυματισμών νέας γενιάς βασισμένο σε μη δομημένα πλέγματα, το οποίο προσομοιώνει την ανάπτυξη, το μετασχηματισμό και την αποσύνθεση κυματισμών που παράγονται από τον άνεμο. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κυματικού κλίματος σε παράκτιες και υπεράκτιες περιοχές – σε μορφή προσομοίωσης υφιστάμενης (hindcast) ή μελλοντικής (forecast) κατάστασης. Η κύρια περιοχή εφαρμογής είναι οι υπεράκτιες, οι παράκτιες και οι λιμενικές δομές, όπου ο ακριβής προσδιορισμός των κυματικών φορτίων είναι υψίστης σημασίας για την ασφάλεια και τον οικονομικό σχεδιασμό. Στις περισσότερες περιπτώσεις απαιτείται και προσομοίωση των κυματικών συνθηκών του παρελθόντος (hindcast) λόγω περιορισμένων διαθέσιμων δεδομένων. Το μοντέλο SW είναι συνδεδεμένο με μοντέλα υπολογισμού στερεομεταφοράς καθώς σε αυτά απαιτείται ο προσδιορισμός των κυματικών συνθηκών και των ρευμάτων (DHI, 2007).

Το MIKE 21 SW περιλαμβάνει τα εξής φυσικά φαινόμενα:

- Ανάπτυξη κυματισμών από τη δράση του ανέμου
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση ανέμων-κυμάτων
- Μετασχηματισμός λόγω φαινομένου white-capping (ύψος κύματος πολύ μεγάλο συγκριτικά με το μήκος κύματος)
- Μετασχηματισμός οφειλόμενη στην τριβή του πυθμένα
- Μετασχηματισμός λόγω βάθους και θραύση
- Διάθλαση και ρήχωση λόγω διακυμάνσεως του βάθους
- Αλληλεπίδραση κυμάτων και ρευμάτων
- Επίδραση του χρόνου και της διακύμανσης του βάθους.

Το μοντέλο περιλαμβάνει δύο διαφορετικές υπολογιστικές μεθόδους:

- Παραμετρική διεύθυνση
- Πλήρως φασματική

Η μέθοδος παραμετρικής διεύθυνσης βασίζεται στην παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης της κυματικής δράσης. Η παραμετροποίηση δημιουργείται στον τομέα συχνότητας εισάγοντας τη μηδενική και την πρώτη στιγμή του φάσματος δράσης κυμάτων ως εξαρτημένες μεταβλητές, σύμφωνα με τον *Holthuijsen et al.(1989)*. Η πλήρως φασματική μέθοδος βασίζεται στην εξίσωση διατήρησης της κυματικής δράσης, με το φάσμα συχνότητας της δράσης των κυματισμών να είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, όπως αυτή ορίστηκε από τους *Komen et al (1994)* και *Young(1999)*.

Οι βασικές εξισώσεις εφαρμόζονται είτε σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων για μικρού μεγέθους εφαρμογές, είτε σε πολικές σφαιρικές συντεταγμένες για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Η διακριτοποίηση της βασικής εξίσωσης σε γεωγραφικό και φασματικό επίπεδο πραγματοποιείται με χρήση της μεθόδου πεπερασμένων κεντρικών στοιχείων.

Το μοντέλο βασίζεται στην εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης, η οποία μπορεί να διατυπωθεί σε καρτεσιανές και σφαιρικές συντεταγμένες ως εξής:

- Καρτεσιανές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} N) = \frac{S}{\sigma} \quad (2.12)$$

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad (2.13)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (2.14)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (3.15)$$

- Σφαιρικές συντεταγμένες:

$$\hat{N} = NR^2 \cos\varphi = \frac{ER^2 \cos\varphi}{\sigma} \quad (2.16)$$

- Σφαιρικές πολικές συντεταγμένες:

$$\frac{\partial \hat{N}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \varphi} c_{\varphi} \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \lambda} c_{\lambda} \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} \hat{N} + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} \hat{N} = \frac{\hat{S}}{\sigma} \quad (2.17)$$

$$c_{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{c_g \cos \theta + u_{\varphi}}{R} \quad \text{και} \quad c_{\lambda} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{c_g \sin \theta + u_{\lambda}}{R \cos \varphi} \quad (2.18)$$

$$c_{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} \quad \text{και} \quad c_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.19)$$

Όπου:

$N, \hat{N}(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$	πυκνότητα δράσης
$\vec{x} = (x, y)$	καρτεσιανές συντεταγμένες
$\vec{x} = (\varphi, \lambda)$	σφαιρικές συντεταγμένες
$\vec{v} = (c_x, c_y, c_{\sigma}, c_{\theta})$	ταχύτητα διάδοσης κυματικής ομάδας
$R$	ακτίνα γης
$\nabla$	αδιάστατος διαφορικός τελεστής

Επιπλέον η συνολική ενέργεια ( $S$ ) λαμβάνει υπόψη τις ενέργειες που παράγονται από διάφορα φυσικά φαινόμενα όπως φαίνεται παρακάτω:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (2.20)$$

Όπου:

$S_{in}$	ενέργεια λόγω ανέμου
$S_{nl}$	ενέργεια λόγω μη γραμμικής αλληλεπίδρασης ανέμου- κύματος
$S_{ds}$	ενέργεια διάλυσης λόγω white capping
$S_{bot}$	ενέργεια διάλυσης λόγω τριβής πυθμένα
$S_{surf}$	ενέργεια διάλυσης λόγω βάρους και θραύσης

Το μοντέλο δέχεται τα εξής δεδομένα εισόδου:

- Στάθμη νερού
- Βάθος νερού
- Ταχύτητα ρεύματος
- Ταχύτητα ανέμου
- Διεύθυνση ανέμου
- Συγκέντρωση πάγου

Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να τροποποιήσει κάποιες παραμέτρους του μοντέλου όπως:

- Ο συντελεστής τριβής
- Η παράμετρος θραύσης ( $\gamma$ )
- Ο αριθμός CFL



- Η έκταση της περιοχής κ.α.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι τα χαρακτηριστικά κύματος, οι παράμετροι του μοντέλου, τα δεδομένα εισόδου και τα φάσματα διεύθυνσης, συχνότητας και συνδυασμού αυτών. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα εξαγωγής των αποτελεσμάτων σε σημειακή, γραμμική ή επιφανειακή μορφή καθώς και η επιλογή συγκεκριμένων συντεταγμένων.

### 2.4.3. MIKE 21 HD

Το MIKE 21 HD είναι ένα ολοκληρωμένο μοντέλο υπολογισμού για δισδιάστατες ροές με ελεύθερη επιφάνεια. Αποτελεί το πιο σημαντικό εργαλείο του λογισμικού MIKE 21 καθώς παρέχει την υδροδυναμική βάση για άλλα μοντέλα του λογισμικού, όπως αυτό της ποιότητας νερού και της μεταφοράς ιζήματος (DHI, 2016).

Το υδροδυναμικό μοντέλο του MIKE 21 βασίζεται σε εξισώσεις αλατότητας, θερμοκρασίας και διατήρησης μάζας και ορμής. Επιτρέπει τον ορισμό αρχικών και οριακών συνθηκών καθώς και των δυνάμεων που δρουν στην περιοχή. Προσομοιώνει τις χωρικές μεταβολές της στάθμης του νερού, της ροής και των ταχυτήτων σε κάθε περιοχή, λόγω της επίδρασης των δυνάμεων. Οι μεταβολές της στάθμης και των ροών επιλύονται σε ευθύγραμμο, καμπυλόγραμμο ή τριγωνικό κάρναβο, ο οποίος καλύπτει την περιοχή μελέτης. Το μοντέλο λαμβάνει, μεταξύ άλλων, επιδράσεις από:

- Τις πλημμύρες και την παλίρροια
- Τις υδραυλικές κατασκευές
- Τα κυματογενή ρεύματα
- Τις διατμητικές τάσεις στον πυθμένα και στην επιφάνεια λόγω ανέμου
- Τη δύναμη Coriolis
- Την ύπαρξη πάγου
- Την εξάτμιση και τις κατακρημνίσεις
- Τις τάσεις ακτινοβολίας

Το MIKE 21 επιλύει τις δυναμικές εξισώσεις συνέχειας και της ποσότητας κίνησης για να περιγράψει τη ροή και τις διακυμάνσεις της στάθμης.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = \frac{\partial d}{\partial t} \quad (2.21)$$

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά την οριζόντια διεύθυνση:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega q - fVV_x + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) = 0 \quad (2.22)$$

Εξίσωση ποσότητας κίνησης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gq\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 \cdot h^2} - \frac{1}{\rho_w} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (h\tau_{yy}) + \frac{\partial}{\partial x} (h\tau_{xy}) \right] - \Omega p - fV_y + \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) = 0 \quad (2.23)$$

Όπου:

$h(x, y, t)$	βάθος του νερού
$d(x, y, t)$	χρονικά μεταβαλλόμενο βάθος νερού
$\zeta(x, y, t)$	ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας
$p, q(x, y, t)$	ορμή στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα
$C(x, y)$	συντελεστής Chezy
$g$	επιτάχυνση της βαρύτητας
$f(V)$	συντελεστής τριβής του ανέμου
$V, V_x, V_y(x, y, t)$	ταχύτητα του ανέμου και οι συνιστώσες της κατά x και y
$\Omega(x, y)$	συντελεστής Coriolis
$p_a(x, y, t)$	ατμοσφαιρική πίεση
$\rho_w$	πυκνότητα του νερού
$x, y$	χωρικές συντεταγμένες
$t$	χρόνος
$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$	συνιστώσες ενεργών διατμητικών τάσεων.

Στο μοντέλο υπεισέρχονται τα εξής δεδομένα:

- Αρχικές συνθήκες
  - Επιφανειακή στάθμη νερού
  - Ταχύτητα
- Οριακές συνθήκες
  - Στάθμη νερού
  - Χαρακτηριστικά ροής
- Παράμετροι χρόνου και περιοχής
  - Πλέγμα και βαθυμετρία
  - Χρόνος προσομοίωσης (χρονικό βήμα και αριθμός βημάτων)
- Συντελεστές μοντέλου
  - Αντίσταση πυθμένα
  - Συντελεστής διασποράς και τριβής ανέμου
- Δυνάμεις
  - Διεύθυνση και ταχύτητα ανέμου
  - Επίδραση κυματισμών και παλίρροιας

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι η στάθμη του νερού, το πεδίο ταχυτήτων της ροής σε όλη την περιοχή μελέτης, η διακύμανση της πυκνότητας, της θερμοκρασίας και της αλατότητας σε όλη την περιοχή, η διεύθυνση και η ταχύτητα του ρεύματος, η ταχύτητα του ανέμου, η πίεση της ατμόσφαιρας και ο συντελεστής αντίστασης. Ο μελετητής έχει τη δυνατότητα επιλογής ή/και αποκλεισμού κάποιων εκ των αποτελεσμάτων, καθώς και επιλογή της μορφή αυτών σε επίπεδο περιοχής ή σημείου.

#### 2.4.4. MIKE 21 ST

Το MIKE 21 ST αποτελεί ενότητα του λογισμικού MIKE 21 και είναι ένα προηγμένο μοντέλο 2D το οποίο προσομοιώνει τη μεταφορά ιζηματος υπό την επίδραση των ρευμάτων και των κυμάτων. Υπολογίζει το ρυθμό μεταφοράς μη συνεκτικών ιζημάτων και τα ποσοστά μεταβολής του πυθμένα της περιοχής (DHI Software, 2012).

Η λεπτομερής και έγκαιρη γνώση της διάβρωσης, της μεταφοράς και της εναπόθεσης ιζημάτων στη θάλασσα είναι ζωτικής σημασίας για πολλές ανθρώπινες δραστηριότητες. Μεταξύ αυτών είναι τα μέτρα προστασίας από τη διάβρωση των ακτών, η δημιουργία και η διατήρηση των παραλιών, η διατήρηση των βυθών στα λιμάνια ή ο έλεγχος των ιζημάτων που εξαπλώνονται από τις εργασίες βυθοκόρησης. Λόγω της κλιματικής αλλαγής και της εξελικτικής τάσης των ακτογραμμών, υπάρχει επίσης αυξανόμενη ανάγκη πρόβλεψης των επιπτώσεων των παράκτιων δομών στις παράκτιες δραστηριότητες. Οι έγκυρες προβλέψεις για μακροχρόνιες μεταβολές στις ακτογραμμές είναι ζωτικής σημασίας για τον περιορισμό της διάβρωσης και των αλλαγών στην παράκτια σταθερότητα. Επομένως, το μοντέλο MIKE 21 ST μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις, όπως:

- Διαχείριση ακτογραμμών
- Βελτιστοποίηση λιμενικών διατάξεων
- Προστασία ακτών
- Έλεγχος ιζηματοποίησης σε βυθοκορημένα κανάλια και σε εισόδους λιμένων
- Διάβρωση θαμμένων αγωγών

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη τη συνδυασμένη δράση των κυμάτων και των ρευμάτων, την πιθανή θραύση των κυματισμών, την ομοιογένεια ή μη του υλικού του πυθμένα και την επιπεδότητα της επιφάνειας του βυθού.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της στερεομεταφοράς διαφοροποιούνται ανάλογα το φορτίο που δέχεται η περιοχή.

- Σε συνθήκες αμιγούς ρεύματος υπάρχουν τέσσερις θεωρίες υπολογισμού:

##### 1) Θεωρία Engelund and Hansen (1967)

Αποτελεί θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς η οποία ορίζει τη στερεομεταφορά ( $S_{tl}$ ) ως άθροισμα του φορτίου του πυθμένα ( $S_{bl}$ ) και του αιωρούμενου φορτίου ( $S_{sl}$ ).

$$\begin{aligned} S_{bl} &= k_b \cdot S_{tl} \\ S_{sl} &= k_s \cdot S_{tl} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Όπου:

- $k_b$  συντελεστής βαθμονόμησης του φορτίου του πυθμένα
- $k_s$  συντελεστής βαθμονόμησης του αιωρούμενου φορτίου

Το συνολικό φορτίο στερεομεταφοράς και οι παράμετροι που λαμβάνει υπόψη ορίζονται ως:

$$S_{tl} = 0.05 \frac{C^2}{g} \theta^{5/2} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (2.25)$$

$$\theta = \frac{\tau}{\rho g (s-1) d_{50}} \quad (2.26)$$

$$\tau = \frac{\rho g V^2}{C^2} \quad (2.27)$$

Ο αδιάστατος ρυθμός μεταφοράς του φορτίου λαμβάνεται ως:

$$\Phi = 0.05 \frac{C^2}{g} \theta^{5/2} \quad (2.28)$$

ή γενικά:

$$\Phi = \frac{S}{\sqrt{(s-1)gd^3}} \quad (2.29)$$

Όπου:

$\theta$	παράμετρος Shields
$\tau$	διατμητική τάση της ροής
$\rho$	πυκνότητα του νερού
$s$	σχετική πυκνότητα του ιζήματος $\rho/\rho_s$
$V$	ταχύτητα
$C$	αριθμός Chezy
$S$	μεταφερόμενο φορτίο (ολικό, πυθμένα ή αιωρούμενο)
$d$	χαρακτηριστική διάσταση σωματιδίου

## 2) Θεωρία Engelund and Fredsøe (1976)

Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, το φορτίο πυθμένα ορίζεται ως:

$$S_{bl} = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c})\sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (2.30)$$

Όπου:

$p = \left[ 1 + \left( \frac{\pi \mu_\alpha}{\theta' - \theta_c} \right)^4 \right]^{-1/4}$	πιθανότητα όλοι οι κόκκοι να βρίσκονται σε κίνηση
$\mu_\alpha$	δυναμικός συντελεστής τριβής
$\theta'$	αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα
$\theta_c$	κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα.

### 3) Θεωρία Van-Rijn (1984)

Προτείνει τις ακόλουθες εξισώσεις υπολογισμού στερεομεταφοράς:

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2.1}}{D_*^{0.3}} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3}$$
$$S_{sl} = f \cdot c_a \cdot V \cdot h \quad (2.31)$$

Όπου:

$T$	αδιάστατος συντελεστής μεταφοράς
$D_*$	αδιάστατη παράμετρος σωματιδίου
$f$	διορθωτικός συντελεστής αιωρούμενου φορτίου
$c_a$	ογκομετρική συγκέντρωση πυθμένα

### 4) Θεωρία Meyer-Peter and Müller (1948)

Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη θεωρία, το αδιάστατο φορτίο μεταφοράς πυθμένα και ο βαθμός στερεομεταφοράς ορίζονται, αντίστοιχα, ως εξής:

$$\Phi_{bl} = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \quad (2.32)$$

$$S_{bl} = 8(\theta' - \theta_c)^{1.5} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (2.33)$$

- Σε συνθήκες με συνδυασμένη δράση κυμάτων και ρευμάτων ισχύουν τα ακόλουθα.

Η στερεομεταφορά ( $q_t$ ) ορίζεται ως άθροισμα του φορτίου του πυθμένα ( $q_b$ ) και του αιωρούμενου φορτίου ( $q_s$ ). Τα επιμέρους φορτία είναι συναρτήσεις του αδιάστατου φορτίου πυθμένα ( $\Phi_b$ ) και της διεύθυνσης της στιγμιαίας ροής  $\varphi(t)$ .

$$q_b = \Phi_b \cdot \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \quad (2.34)$$

$$q_s = \int_{2d}^D c(t, y) \cdot U_1(t, y) dy \quad (2.35)$$

$$\Phi_b = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_b(t) \cos(\varphi(t)) dt \quad (2.36)$$

#### 2.4.5. MIKE 21/3 Coupled Model

Το μοντέλο MIKE 21/3 CM αποτελεί ένα συνδυασμένο μοντέλο του λογισμικού με εφαρμογή σε παράκτιες περιοχές, εκβολές και ποταμούς (*DHI Guide, 2016*). Αποτελείται από τα ακόλουθα τμήματα:

- Υδροδυναμική (Hydrodynamic)
- Μεταφορά (Transport)
- Οικολογικό (Eco lab/ Oil Spill)
- Στερεομεταφορά (Mud Transport/Sand Transport)

- Σωματιδιακή παρακολούθηση (Particle Tracking)
- Μορφολογία ακτογραμμής (Shoreline Morphology)
- Φασματικά κύματα (Spectral Waves)

Το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη προσομοίωση της αλληλεπίδρασης των κυματισμών και των ρευμάτων, με συνδυασμό του υδροδυναμικού μοντέλου (HD) και των φασματικών κυμάτων (SW), τα οποία αποτελούν τις βασικές συνιστώσες υπολογισμού. Επιπλέον, συνδυάζει το προαναφερόμενα μοντέλα με τα μοντέλα μεταφοράς λάσπης (Mud Transport) και άμμου (Sand Transport). Ο συνδυασμός των βασικών ενοτήτων (HD,SW) με την ενότητα μεταφοράς άμμου (ST), ανοίγει την ενότητα μορφολογίας της ακτογραμμής για επιπλέον υπολογισμούς.

Οι περιοχές εφαρμογής είναι γενικά περιοχές με σημαντικά φαινόμενα ροής και μεταφοράς στερεών, με έμφαση στα ποτάμια, στις θαλάσσιες και παράκτιες περιοχές. Το MIKE 21/3 Coupled Model μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίβλεψη της εξέλιξης της ακτογραμμής και της βαθυμετρίας σε περιοχές που υπάρχουν ή πραγματοποιούνται έργα. Τέτοια έργα μπορεί να είναι οι λιμενικές και παράκτιες δομές, κυματοθραύστες, βυθοκορήσεις κ.α. Είναι το πιο συμβατό μοντέλο για μεσαίας κλίμακας μορφολογικές έρευνες (εβδομάδες ως μήνες) μέσα σε περιορισμένες παράκτιες περιοχές. Οι τυπικές διαστάσεις είναι περίπου 10χλμ στην διεύθυνση παράλληλα στην ακτή και 2χλμ στην υπεράκτια διεύθυνση. Ο υπολογιστικός φόρτος εξαρτάται από το χρονικό όριο της προσομοίωσης και το μέγεθος της περιοχής.

Το υδροδυναμικό μοντέλο (HD) παρέχει τη δυνατότητα επίλυσης δισδιάστατων (2D) και τρισδιάστατων (3D) προβλημάτων. Για την 3D επίλυση βασίζεται στις αριθμητικές μεθόδους ασυμπίεστων ρευστών των Reynolds και Navier-Stokes και στη θεώρηση του Boussinesq για την υδροστατική πίεση. Επομένως, το μοντέλο χαρακτηρίζεται από εξισώσεις συνέχειας, ορμής, θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας. Για την 2D επίλυση, το μοντέλο βασίζεται σε εξισώσεις ρηχών νερών και στις εξισώσεις των Reynolds και Navier-Stokes για ασυμπίεστα ρευστά με ενσωμάτωση του βάθους.

Το φασματικό μοντέλο (SW) είναι βασισμένο σε μη δομημένα πλέγματα και προσομοιώνει την ανάπτυξη, το μετασχηματισμό και την αποσύνθεση κυματισμών που παράγονται από τον άνεμο. Χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του κυματικού κλίματος σε παράκτιες και υπεράκτιες περιοχές – σε μορφή προσομοίωσης υφιστάμενης (hindcast) ή μελλοντικής (forecast) κατάστασης.

Τα υπολογιστικά χαρακτηριστικά του μοντέλου MIKE 21/3 CM είναι τα εξής:

- Η δυναμική αλληλεπίδραση των κυμάτων και των ρευμάτων
- Επαρκή στοιχεία για το επίπεδο του πυθμένα
- Εύκολη εναλλαγή μεταξύ 2D και 3D υπολογισμών
- Σημαντική ευελιξία στην περιγραφή της βαθυμετρίας, της ροής και των κυματικών συνθηκών με χρήση πλέγματος το οποίο προσαρμόζεται στο βάθος και στο όρια της περιοχής.

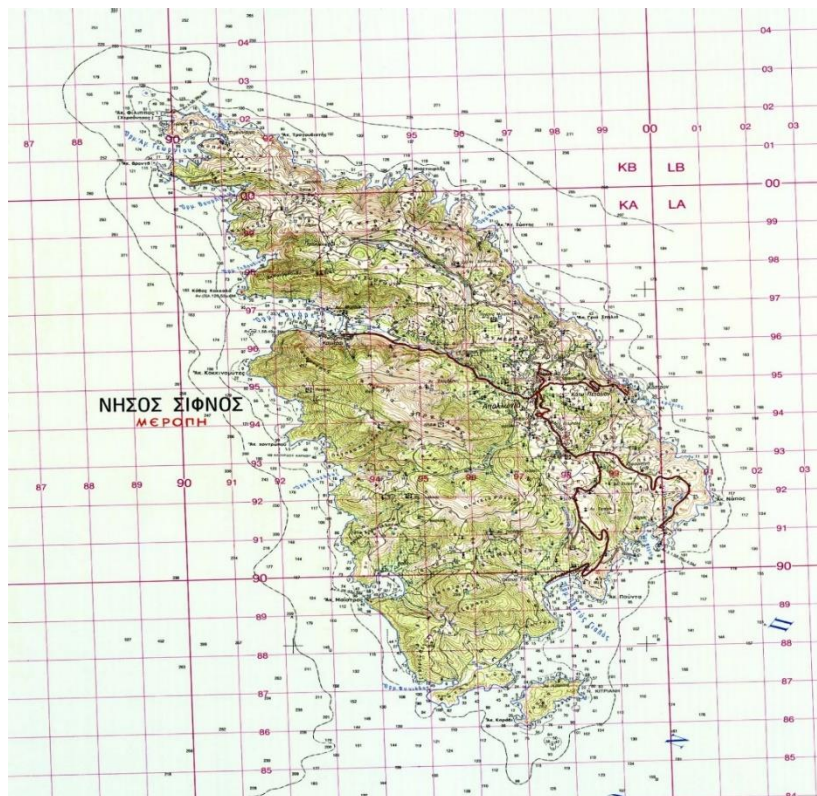
### 3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

#### 3.1. Γεωγραφική θέση – Γενικές πληροφορίες

Η Σίφνος ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων, το οποίο αποτελείται συνολικά από 133 νησιά και βραχονησίδες, τα 35 εκ των οποίων παρουσιάζουν έκταση μεγαλύτερη από ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο και τα 26 οικιστική ανάπτυξη. Το νησί εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα του συμπλέγματος και στο κέντρο του Αιγαίου πελάγους, μεταξύ Σερίφου και Κιμώλου. Απέχει περίπου 130 χιλιόμετρα ή 75 ναυτικά μίλια από το λιμάνι του Πειραιά. Έχει έκταση 74 τετραγωνικά χιλιόμετρα, περίμετρο 52 χιλιομέτρων και ακτογραμμή περίπου 70 χιλιομέτρων. Πρωτεύουσα του νησιού είναι η Απολλωνία που βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της Σίφνου, ενώ το κύριο λιμάνι βρίσκεται στον όρμο Καμάρες, στα βορειοδυτικά του νησιού όπως παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3. 1*.

Το νησί της Σίφνου αποτελεί και τον ομώνυμο Δήμο, ο οποίος μαζί με τους Δήμους Κιμώλου, Σερίφου και Μήλου υπάγονται στην Περιφερειακή Ενότητα Μήλου της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου, σύμφωνα με την Νέα Αρχιτεκτονική της Αυτοδιοίκησης και της Αποκεντρωμένης Διοίκησης – Πρόγραμμα Καλλικράτης (Ν.3852/2010). Ο Δήμος Σίφνου αποτελείται από δύο Δημοτικές Ενότητες, την Απολλωνία και τον Αρτεμώνα. Η Ενότητα της Απολλωνίας περιλαμβάνει 9 οικισμούς, ένας εκ των οποίων είναι αυτός των Καμαρών, ενώ η Ενότητα του Αρτεμώνας περιλαμβάνει 4 οικισμούς.

Στα νότια η περιοχή μελέτης εισέρχεται εντός των ορίων της θεσμοθετημένης περιοχής του δικτύου Natura 2000, ενώ οι ακτές των Καμαρών, Φάρου και Πλατύ Γιαλού χαρακτηρίστηκαν εξαιρετικής ποιότητας κατά την τετραετία 2010 – 2014, σύμφωνα με το μητρώο ταυτοτήτων υδάτων κολύμβησης της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων.



Εικόνα 3. 1: Χάρτης Σίφνου. (Πηγή: Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, gys.gr)

## 3.2. Ανθρωπογενές περιβάλλον

### 3.2.1. Ιστορικά και πολιτιστικά στοιχεία

Σύμφωνα με το μύθο, «Σίφνος» ονομαζόταν ο γιος του αττικού ήρωα Σουνίου του οποίου το όνομα δόθηκε στο νησί. Κατά μίαν άλλη εκδοχή το όνομα Σίφνος προήλθε από το επίθετο «σιφνός» που σημαίνει κενός, που παραπέμπει στο πλήθος των υπόγειων στοών των ορυχείων στο υπέδαφος του νησιού. Αναφέρεται και με τις ονομασίες «Ακίς», «Μερόπη», «Σίφανος», «Σίφανα» ή «Σιφάντο».

Στη Σίφνο λάτρευαν σαν ιδιαίτερες θεότητες τον Απόλλωνα τον Έναργο, την Άρτεμη Εκβατηρία, (η λατρεία αυτών των δύο θεοτήτων διατηρήθηκε στο χρόνο, γι' αυτό και οι δυο βασικοί οικισμοί ήταν ο Αρτεμώνας και η Απολλωνία) τον Δία Επιβήμιο, τον Διόνυσο, τον Πάνα, την Αθηνά και τις Νύμφες.

Ο 6ος αιώνας π.Χ. ήταν η εποχή της μεγάλης ακμής. Ο Ηρόδοτος αναφέρει ότι, οι Σίφνιοι «νησιωτέων μάλιστα επλούτεον», δηλαδή ότι ήταν οι πιο πλούσιοι από τους νησιώτες και αυτό γιατί στο νησί υπήρχαν μεταλλεύματα χρυσού και αργύρου. Ενδεικτικό του ότι η νήσος ήταν πολύ πλούσια είναι ότι στη Σίφνο κόβονταν νομίσματα γύρω στο 600 π.Χ. μετά δηλαδή από την Αίγινα και πριν από την Αθήνα και την Κόρινθο.

Η οικονομική αναβάθμιση των νησιών αρχίζει από τα μέσα του 16ου αιώνα και φαίνεται ότι η Σίφνος αποτελεί, για της Κυκλάδες, σπουδαίο εμπορικό κέντρο από τις αρχές του 17ου αιώνα. Την εποχή αυτή εμφανίζεται στη Σίφνο μια δυναμική προσωπικότητα, ο Βασίλης Λογοθέτης, που επηρεάζει και ανυψώνει την πολιτική, θρησκευτική και πνευματική πορεία του νησιού. Ενισχύει την οικονομική πρόοδο της Σίφνου και χρηματοδοτεί την ανέγερση της μονής της Παναγίας Βρυσιανής.

Στον αγώνα κατά της Τουρκοκρατίας η Σίφνος μπήκε ενεργά από τις 15 Απριλίου 1821. Η προσφορά των Σιφνίων, τόσο σε έμπυχο υλικό, όσο και σε χρήματα για τον αγώνα, κυρίως από τα μοναστήρια του τόπου, ήταν ανεκτίμητη. Το 1821 ο σχολάρχης, Νικόλαος Χρυσόγελος (1780-1857), ύψωσε τη σημαία της Επανάστασης στη σχολή της Σίφνου και αφού τέθηκε επικεφαλής 150 Σιφνίων πολεμιστών αποβιβάστηκε στην Πελοπόννησο, όπου ανέπτυξε πολύμορφη αγωνιστική δράση. Διετέλεσε υπουργός Παιδείας επί Καποδίστρια και υπήρξε ο θεμελιωτής της Δημοτικής Εκπαίδευσης.

Κατά την αντιβασιλεία του Όθωνα το 1833, η Σίφνος διαιρείται σε δύο δήμους, της Απολλωνίας και του Αρτεμώνος – Κάστρου και οι Καμάρες καθιερώθηκαν ως το επίσημο λιμάνι του νησιού. Το 1836 οι δύο δήμοι συγχωνεύονται σε έναν και η πρωτεύουσα μεταφέρεται από το Κάστρο στην Απολλωνία. Το 1914 ο ενιαίος Δήμος Σιφνίων διαιρέθηκε σε δύο Κοινότητες της Απολλωνίας και του Αρτεμώνος. Το 1999 οι δύο Κοινότητες της Σίφνου ενώθηκαν και αποτελούν πλέον τον ενιαίο Δήμο Σίφνου.

### 3.2.2. Πληθυσμός – Δημογραφία

Η πληθυσμιακή εξέλιξη του νησιού μελετώμενη σε επίπεδο εθνικό, Περιφέρειας, Περιφερειακής Ενότητας, Δήμου, Δημοτικής Ενότητας και Τοπικής Ενότητας, παρέχει στοιχεία για τη δημογραφική εξέλιξη του νησιού.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια των εθνικών απογραφών των ετών 1991, 2001, 2011 και αφορούν τον μόνιμο πληθυσμό. Στον ίδιο Πίνακα παρουσιάζονται και οι ποσοστιαίες μεταβολές του πληθυσμού ανά δεκαετία.



Πίνακας 3. 1: Εξέλιξη πληθυσμού κατά τις δεκαετίες 1991-2001, 2001-2011 (Πηγή: ΕΛ.ΣΤΑΤ.).

ΔΗΜΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ								
Επίπεδο διοικητικής διαίρεσης	α/α	Γεωγραφικός κωδικός Καλλικράτη	Περιγραφή	1991	2001	2011	Ποσοστιαία Μεταβολή	
							1991-2001	2001-2011
0	1		ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ	10,259,900	10,934,097	10,816,286	6.57%	-1.08%
4	18033	65	ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ ΜΗΛΟΥ	8,094	9,409	9,932	16.25%	5.56%
5	<b>18109</b>	<b>6504</b>	<b>ΔΗΜΟΣ ΣΙΦΝΟΥ (Έδρα: Απολλωνία,η)</b>	<b>1,960</b>	<b>2,574</b>	<b>2,625</b>	<b>31.33%</b>	<b>1.98%</b>
7	18110	65040001	Δημοτική Κοινότητα Απολλωνίας	1,160	1,721	1,691	48.36%	-1.74%
8	18111	6504000101	Απολλωνία,η	689	1,054	869	52.98%	-17.55%
8	18112	6504000102	Βαθύ,το	45	43	40	-4.44%	-6.98%
8	18113	6504000103	Καμάρα,αι	151	186	245	23.18%	31.72%
8	18114	6504000104	Κάστρον,το	75	100	118	33.33%	18.00%
8	18115	6504000105	Κάτω Πετάλιον,το	82	129	109	57.32%	-15.50%
8	18116	6504000106	Κιτριανή,η (νησίς)	-	-	-	-	-
8	18117	6504000107	Πλατύς Γιαλός,ο	71	111	199	56.34%	79.28%
8	18118	6504000108	Φάρος,ο	45	95	105	111.11%	10.53%
8	18119	6504000109	Χρυσοπηγή,η	2	3	6	50.00%	100.00%
7	18120	65040002	Τοπική Κοινότητα Αρτεμώνος	800	853	934	6.63%	9.50%
8	18121	6504000201	Αρτεμών,ο	669	754	800	12.71%	6.10%
8	18122	6504000202	Αγία Μαρίνα,η	32	47	70	46.88%	48.94%
8	18123	6504000203	Τρουλάκι,το	0	10	27	-	170.00%
8	18124	6504000204	Χερρόνησος,η	99	42	37	-57.58%	-11.90%

Τη δεκαετία 1991-2001 ο μόνιμος πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Μήλου και του Δήμου Σίφνου αυξάνεται με ποσοστά 16.25% και 31.33%, αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ανάπτυξη του νησιωτικού τουρισμού και στην επαγόμενη οικονομική ενίσχυση των νησιωτικών κοινωνιών. Τα προαναφερθέντα ποσοστά είναι σημαντικά μεγαλύτερα από το ποσοστό αύξησης του μόνιμου πληθυσμού σε επίπεδο χώρας (6.57%).

Τη δεκαετία 2001-2011 ο μόνιμος πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Μήλου αυξάνεται κατά 5.56%, σε ποσοστό μεγαλύτερο από τον αντίστοιχη αύξηση του πληθυσμού του Δήμου Σίφνου κατά 1.98%. Σε επίπεδο Δημοτικών Κοινοτήτων, ο πληθυσμός της Απολλωνίας παρουσίασε οριακή πτώση κατά 1.74 ποσοστιαίες μονάδες, ο αντίστοιχος του Αρτεμώνα σημείωσε αύξηση κατά 9.50 ποσοστιαίες μονάδες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση του μόνιμου πληθυσμού κατά τη δεύτερη δεκαετία (2001-2011) είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη της πρώτης δεκαετίας (1991-2001).

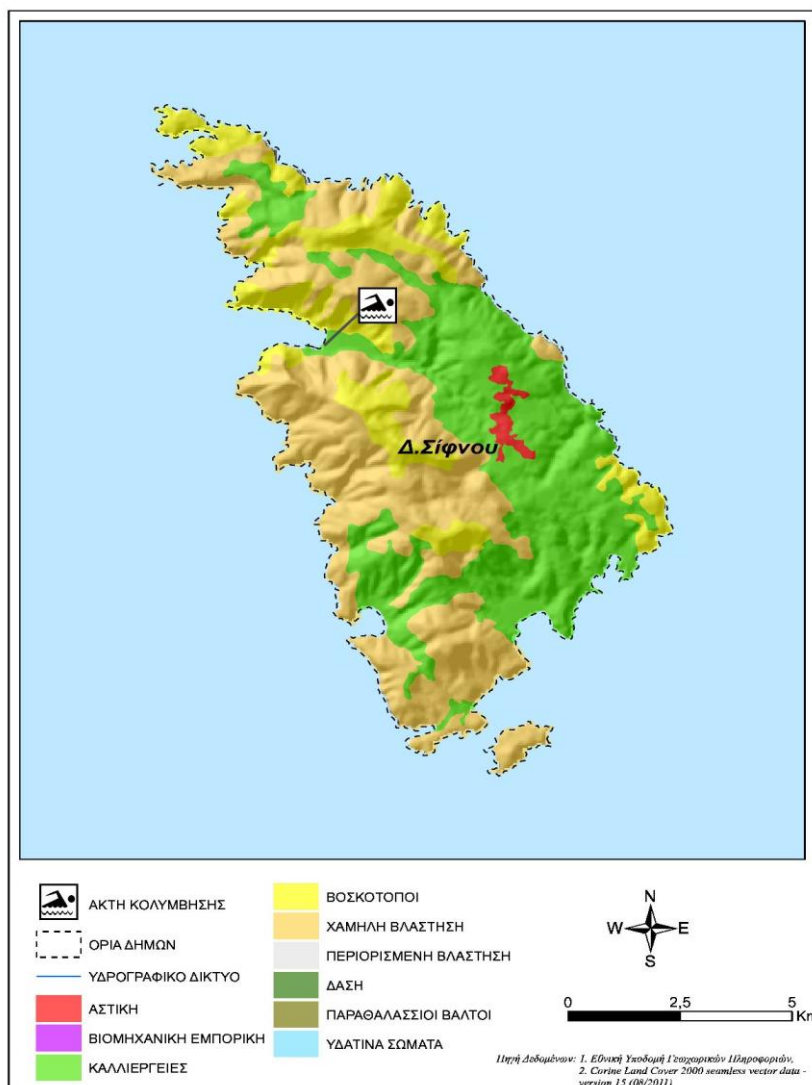
### 3.2.3. Χρήσεις γης

Η κατανομή των χρήσεων γης για το νησί της Σίφνου, σύμφωνα με απογραφή του 2001 παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.2 που ακολουθεί. Το ποσοστό της έκτασης που χαρακτηρίζεται ως γεωργική ανέρχεται σε 50.2%, ενώ οι δασικές/ ημι-φυσικές εκτάσεις καταλαμβάνουν το 49%. Το ποσοστό ημι-φυσικών εκτάσεων είναι συγκριτικά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ποσοστό του νομού Κυκλάδων, το οποίο σύμφωνα με την Απογραφή Γεωργίας – Κτηνοτροφίας 1999 – 2000, ανέρχεται στο 35.5%.

Ιδιαίτερα, στα βορειοανατολικά του οικισμού Καμάρες, κοντά στην περιοχή του έργου εντοπίζεται μια σημαντική περιοχή καλλιεργήσιμων εκτάσεων, το ποσοστό των οποίων ανέρχεται στο 5.2% των συνολικών χρήσεων γης.

Πίνακας 3. 2: Κατανομή χρήσεων γης Νήσου Σίφνου (Απογραφή 2001, ΕΣΥΕ)

Χρήσεις Γης Νήσου/Νομού (Εκτάσεις σε χιλιάδες στρέμματα)	Σύνολο εκτάσεων	ΓΕΩΡΓΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ						ΔΑΣΗ ΗΜΙ-ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ				Αστική οικοδόμηση	Άλλες εκτάσεις (Βιομηχανικές/ Εμπορικές Ζώνες, Δίκτυα Συγκοινωνιών, Ορυχεία, ΧΥΤΑ, Τεχνητές μη γεωργικές ζώνες πρασίνου, Αθλητικές πολιτιστικές εγκαταστάσεις)
		Αρόσιμη γη	Μόνιμες καλλιέργειες	Βοσκότοποι - Μεταβατικές δασώδεις / θαμνώδεις εκτάσεις	Βοσκότοποι - Συνδυασμοί θαμνώδους και / ή ποώδους βλάστησης	Βοσκότοποι - Εκτάσεις με αραιή ή καθόλου βλάστηση	Ετερογενείς γεωργικές περιοχές	Δάση	Μεταβατικές δασώδεις-θαμνώδεις εκτάσεις	Συνδυασμοί θαμνώδους και / ή ποώδους βλάστησης	Εκτάσεις με αραιή ή καθόλου βλάστηση		
ΝΗΣΟΣ ΣΙΦΝΟΣ	78,3	7,8	4,1	0	12,1	1,8	13,5	0	0	38,2	0,2	0,6	0
Έκταση εκφρασμένη σε ποσοστό (%)	100,0	10,0	5,2	0,0	15,5	2,3	17,2	0,0	0,0	48,8	0,3	0,8	0,0
Εκτάσεις Γεωργικές/ Δασικές/ Αστικές	78,3	39,3						38,4				0,6	0,0
Εκτάσεις Γεωργικές / Δασικές / Αστικές σε ποσοστό (%)	100	50,2						49,0				0,8	0



Εικόνα 3. 2: Χάρτης χρήσεων γης Δήμου Σίφνου (Πηγή: [geoportals.gov.gr](http://geoportals.gov.gr))

### 3.3. Φυσικό περιβάλλον

Το φυσικό τοπίο της Σίφνου χαρακτηρίζεται κυρίως από θαμνώδη βλάστηση, καθώς δεν έχει να επιδείξει "ψηλά" δάση. Έτσι, τα δέντρα που κυριαρχούν στο τοπίο είναι σχοίνοι και ένα είδος μικρόσωμου κέδρου, το οποίο είναι προστατευόμενο. Εκτός αυτού όμως, σχεδόν σε όλες τις περιοχές του νησιού, υπάρχει θυμάρι, φασκόμηλο, άγρια μέντα, ρίγανη, κάπαρη κ.α..

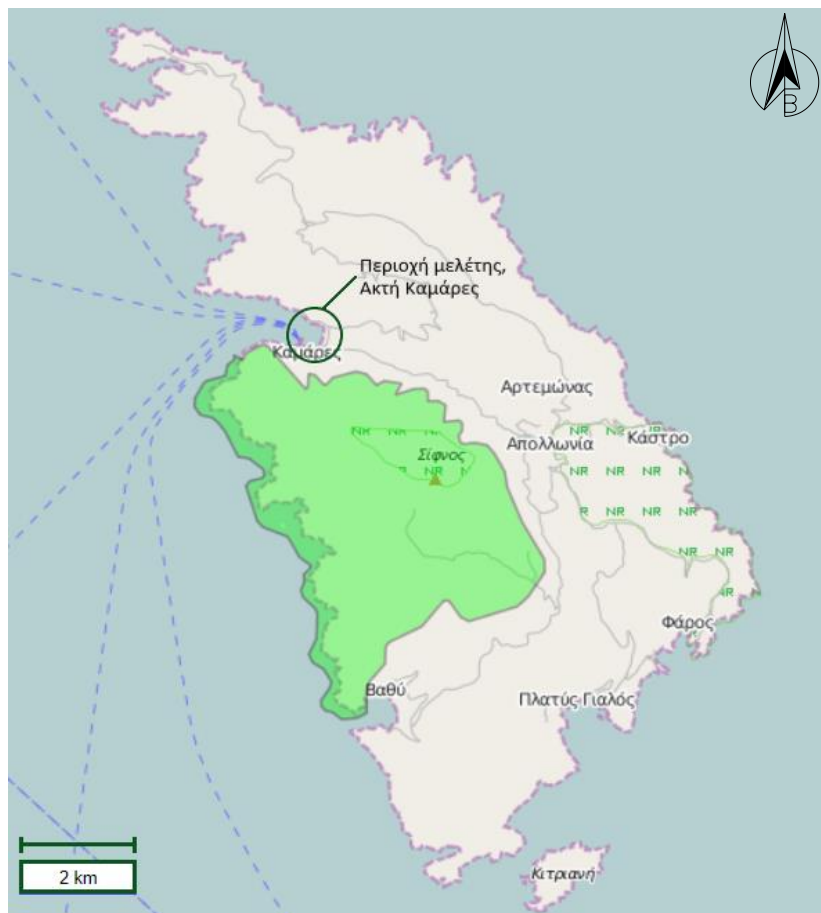
Το έδαφος της Σίφνου προσφέρει αρκετά μάρμαρα κρυσταλλικά έως μακροκρυσταλλικά, και άλλα πετρώματα. Μεταλλεύματα σιδήρου και μαγγανίου εμφανίζονται σήμερα κυρίως στις θέσεις Άγιος Σώστης, Άγιος Σιλίβεστρος, Βορεινή, Κάψαλος.

Το πιο σημαντικό στοιχείο του φυσικού τοπίου της Σίφνου είναι τα μικρά μονοπάτια. Πολλά απ' αυτά, περιμετρικά του νησιού, οδηγούν σε ορμίσκους εξαιρετικής αισθητικής αξίας, για τους επισκέπτες που επιθυμούν να γνωρίσουν το νησί διεξοδικά.

#### 3.3.1. Προστατευόμενες περιοχές

##### Natura2000

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η περιοχή μελέτης δεν βρίσκεται εντός ορίων προστατευόμενων περιοχών (βλ. *Εικόνα 3. 3*), ωστόσο εντός της ευρύτερης περιοχής εντοπίζεται προστατευόμενη περιοχή Natura2000 με κωδικό GR4220008 και ονομάζεται «Σίφνος: Προφήτης Ηλίας μέχρι δυτικές ακτές και θαλάσσια περιοχή». Η συνολική έκταση της περιοχής είναι περίπου 20 τετραγωνικά χιλιόμετρα, και απλώνεται στη δυτική πλευρά της Σίφνου, στην κορυφή του Προφήτη Ηλία και στις πλαγιές του.

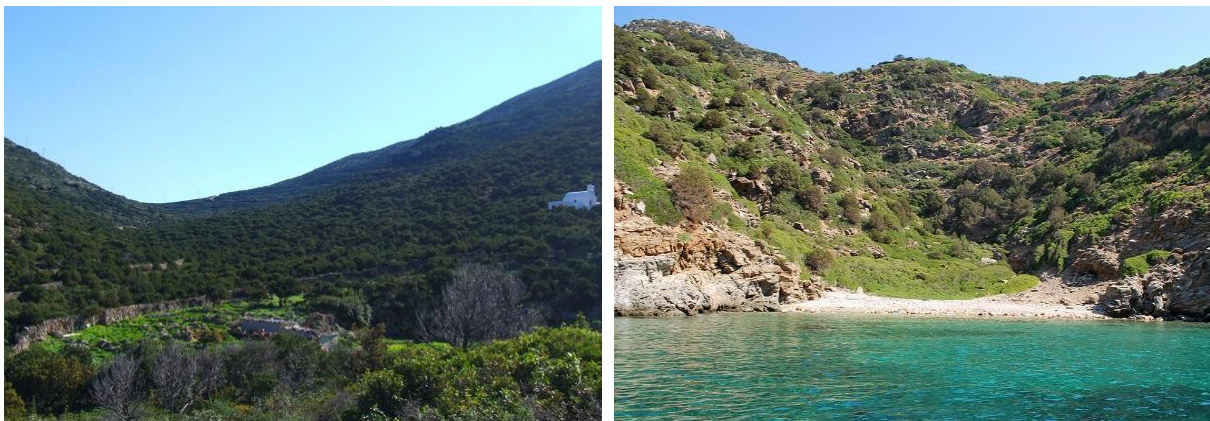


Εικόνα 3. 3: Χάρτης Natura 2000 για το νησί της Σίφνου (Πηγή: [geodata.gov.gr/maps](http://geodata.gov.gr/maps)).

Η περιοχή Natura της Σίφνου, με μέσο υψόμετρο τα 150m, φιλοξενεί αρκετά σπάνια, προστατευόμενα και σημαντικά είδη ζώων με περισσότερα από 35 είδη πτηνών να έχουν καταγραφεί στην περιοχή. Επιπλέον, στην περιοχή αναπτύσσεται ένας απίστευτος πλούτος από διάφορα είδη κέδρων, σχίνων, αρωματικών φυτών και αγριελιών και καταγράφονται σημαντικές για το νησί υδάτινες πηγές. Στο θαλάσσιο τμήμα της προστατευόμενης περιοχής, απλώνεται πλούσια βλάστηση (ποσειδωνία), ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μια εντυπωσιακή εναλλαγή μικρών όρμων και βραχωδών ακτών.

Πιο συγκεκριμένα, ως προς την πανίδα της περιοχής, ορισμένα πτηνά τα οποία σημειώνονται είναι οι Μαυροστρίβακοι Κατσουλιέριδες, Δεκαοχτούρες, Κουρούνες, Νησοπέρδικες, πιο σπάνια Φλώροι και Γαλαζοκότσυφες κ.α.. Σταχτάρες και Σταβλοχελίδονα εμφανίζονται κυρίως την άνοιξη, ενώ σημαντική είναι η παρουσία του Μαυροπετρίτη το καλοκαίρι. Στις βραχώδεις ακτές συναντώνται Θαλασσοκόρακες και Ασημόγλαροι. Εντοπίζονται, ακόμη, ερπετά όπως η Οχιά της Μήλου, το Σιλιβούτι, τον Αβλέφαρο, το Κυρτοδάκτυλο, το Σπιτόφιδο, την Τρανόσαυρα και τη Ποταμοχελώνα. Ειδικότερα, το Σιλιβούτι βρίσκεται στη λίστα του Παραρτήματος II της Οδηγίας 92/43/ΕΟΚ «για τη διατήρηση των φυσικών οικοτόπων καθώς και της άγριας πανίδας και χλωρίδας» και στο Εθνικό Κόκκινο Βιβλίο όπου χαρακτηρίζεται ως τρωτό. Τέλος, περιλαμβάνεται, μαζί με τον Κυρτοδάκτυλο στο ΠΔ 67/1981 της Εθνικής Νομοθεσίας «Περί Προστασίας της αυτοφυούς χλωρίδας και άγριας πανίδας και καθορισμού διαδικασίας συντονισμού και ελέγχου της έρευνας επ' αυτών».

Εκτός από τις φυσικές ομορφιές, η περιοχή Natura αποτελεί χαρακτηριστικό δείγμα της αρμονικής συνύπαρξης φύσης και ανθρώπου. Ανθρώπινες δημιουργίες, άρρηκτα δεμένες με το περιβάλλον, βρίσκονται διάσπαρτες στην περιοχή. Εκατοντάδες μέτρα ξερολιθιάς, έργο πολλών ανθρώπων ανά τους αιώνες, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον περιορισμό της διάβρωσης του εδάφους, στη συγκράτηση του πολύτιμου χώματος και στην οριοθέτηση των ιδιοκτησιών. Επίσης, ιδιαίτερης σημασίας είναι τα μοναστήρια και τα ξωκλήσια, όπως το μοναστήρι του Προφήτη Ηλία, η Παναγιά Τόσο Νερό, ο Αϊ Γιάννης του Μαύρου Χωριού και ο Ταξιάρχης της Σκάφης. Και βέβαια ιστορικά μνημεία της περιοχής είναι η Ακρόπολη στο λόφο του Αγίου Ανδρέα και οι πύργοι (6ου-3ου αιώνα π.Χ.) με ιδιαίτερο αρχαιολογικό και πολιτιστικό ενδιαφέρον.



Εικόνα 3. 4: Τοπία από την προστατευόμενη περιοχή Natura2000. (Πηγή: e-sifnos.com)

### Παράκτιος Υγρότοπος

Κατά μήκος της παραλίας των Καμαρών και για έκταση που κυμαίνεται μεταξύ 3 - 4 στρεμμάτων εντοπίζεται παράκτιος υγρότοπος κύριας αισθητικής και περιβαλλοντικής αξίας με κωδικό SIF01 (Κατσαδωράκης Γ., 2007) και καθεστώς προστασίας που περιγράφεται στο ΦΕΚ 229ΑΑΠ/19-6-2012 (βλ. *Εικόνα 3. 5*). Ο οικότοπος ξεκινά από τα βόρεια της περιοχής μελέτης (της ακτής των Καμαρών) και εκτείνεται έως την τοπική οδό του δικτύου πρόσβασης του οικισμού Αγίας Μαρίνας.

Ο κεντρικός χείμαρρος Απολλωνίας-Καμαρών διασπάται προς τη θάλασσα (Καμάρες) σε μικρά ρέματα τροφοδοτώντας δύο μικρά συνορεύοντα έλη, τα οποία φέρουν γύρω τους πυκνή υγροτοπική και αμμόφιλη βλάστηση. Τα συστήματα των αμμοθινών ή αμμόλοφων του παράκτιου οικότοπου έχουν σχηματιστεί από την άμμο που συσσωρεύεται προοδευτικά εξαιτίας της διαβρωτικής επίδρασης της θάλασσας και του ανέμου καθώς επίσης και από την απόθεση φερτών υλικών του χείμαρρου.



*Εικόνα 3. 5: Τοποθεσία έλους Καμαρών (Πηγή: [oikoskorio.gr/ygrotorio](http://oikoskorio.gr/ygrotorio)).*

Ακόμη ένας παράκτιος υγρότοπος συναντάται στα νοτιοανατολικά του νησιού, στην περιοχή Φάρος. Το έλος στον Φάρο (SIF02) είναι πολύ μικρό, πολύ υποβαθμισμένο και δέχεται συνεχείς πιέσεις. Η συνεχής απόρριψη στερεών απορριμμάτων, η επέκταση των καλλιεργειών και οι εκχερσώσεις/μπαζώσεις στην περιοχή απειλούν το έλος με πλήρη εξαφάνιση από τη δόμηση.



Εικόνα 3. 6: Τοποθεσία έλους Φάρου (Πηγή: [oikoskopio.gr/ygrotorio](http://oikoskopio.gr/ygrotorio)).

Σύμφωνα με το καθεστώς προστασίας των περιοχών των υγροτόπων (άρθρο 2 ΦΕΚ 229 ΑΑΠ/19-06-2012), απαγορεύονται τα ακόλουθα:

- Οι εργασίες δόμησης και ειδικότερα η ανέγερση οποιασδήποτε μόνιμης ή προσωρινής κατασκευής που δεν σχετίζεται άμεσα με την προστασία και διατήρησή τους, την επιστημονική παρακολούθηση της κατάστασης διατήρησής τους και την περιβαλλοντική ενημέρωση των επισκεπτών.
- Η διάνοιξη οδικού δικτύου επί αυτού.
- Οι εκχερσώσεις της φυσικής βλάστησης. Επιτρέπονται κατ' εξαίρεση οι παρεμβάσεις που αποσκοπούν στην αποκατάσταση ή/και στη διαχείριση των υγροτόπων, στο πλαίσιο εφαρμογής εγκεκριμένων διαχειριστικών σχεδίων.
- Οι αποξηράνσεις, τα αποστραγγιστικά έργα, οι επιχωματώσεις και γενικότερα οι παρεμβάσεις που αλλοιώνουν το τοπίο.
- Η απόρριψη στερεών και υγρών αποβλήτων.
- Η εισαγωγή ξενικών ειδών πανίδας και χλωρίδας.
- Οι εξορύξεις αδρανών και άλλων υλικών.
- Η επέκταση των καλλιεργειών.
- Η βόσκηση, εκτός αν από ειδική μελέτη προκύπτει ότι σχετίζεται με τη διατήρηση και οικολογική διαχείριση του υγροτόπου.
- Η αλιεία και οι ιχθυοκαλλιέργειες.

- Οι αμμοληψίες εκτός αν από ειδική μελέτη προκύπτει ότι σχετίζεται με τη διατήρηση και οικολογική διαχείριση του υγροτόπου.
- Η συλλογή αμφιβίων.
- Οι παρεμβάσεις που προκαλούν αλλαγή του υδρολογικού καθεστώτος, συμπεριλαμβανομένων των γεωτρήσεων και της άντλησης υδάτων, εκτός αν αποσκοπούν στη διατήρηση του υγροτόπου.

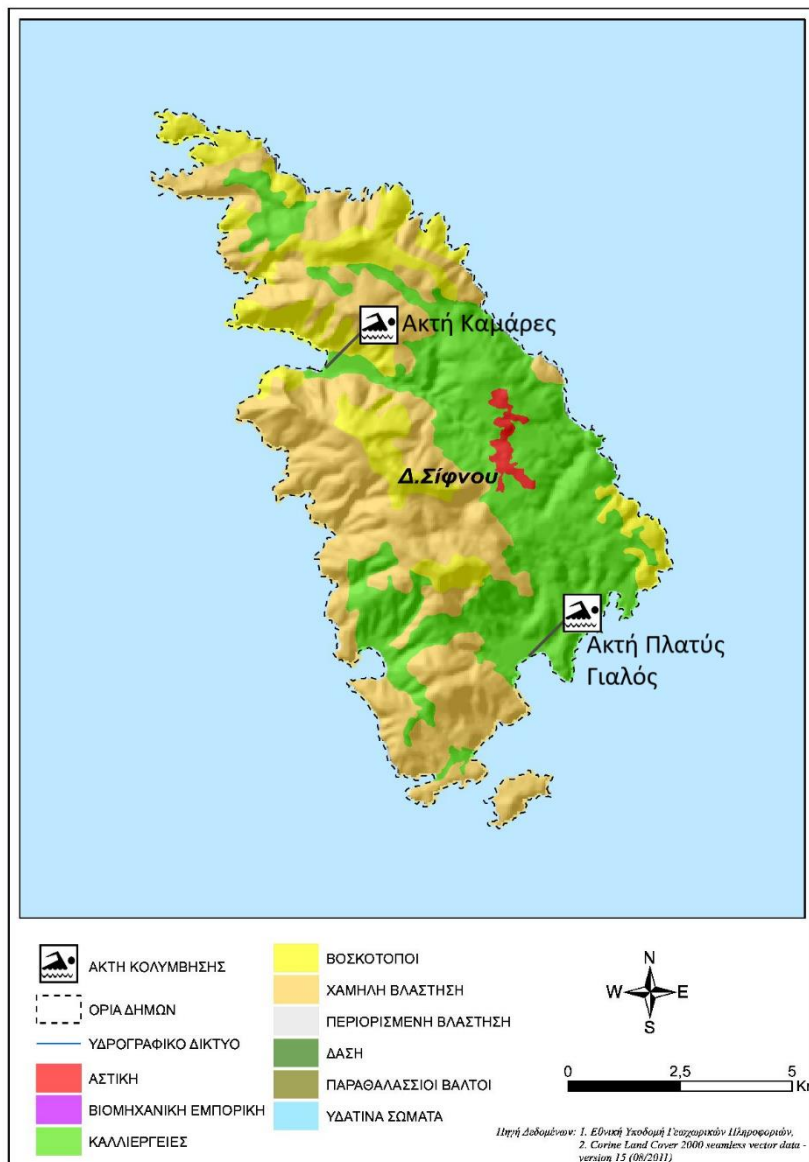


Εικόνα 3. 7: Έλος Φάρου (Πηγή: *oikoskopio.gr*).

### 3.3.2. Παραλίες κολύμβησης

Η διαχείριση της ποιότητας των υδάτων κολύμβησης συνιστά μια καινοτόμο προσέγγιση, με στόχο την ενημέρωση των πολιτών και την παροχή χρήσιμων στοιχείων για τη σύγκριση και την επιλογή ακτών κολύμβησης και αναλύεται στο Μητρώο Ταυτοτήτων Υδάτων Κολύμβησης, το οποίο υπαγορεύεται από την Οδηγία 2006/7/ΕΚ. Η ταυτότητα των υδάτων κολύμβησης παρέχει πληροφορίες για τις φυσικές και γεωγραφικές συνθήκες της περιοχής της ακτής, για τα υδρολογικά χαρακτηριστικά των υδάτων κολύμβησης, καθώς και για την αξιολόγηση των πιθανών κινδύνων ρύπανσης στην περιοχή. Συμπληρωματικώς του Μητρώου Ταυτοτήτων, για την ποιοτική παρακολούθηση και ταξινόμηση των κολυμβητικών υδάτων, διενεργούνται δειγματοληψίες και αναλύσεις μικροβιολογικών φορτίων κατά τη διάρκεια της κολυμβητικής περιόδου κάθε έτους (01/06 – 30/10).

Στο Παράκτιο Υδατικό Σύστημα των Ακτών Σίφνου (GR001400010069N), του οποίου η οικολογική κατάσταση έχει χαρακτηριστεί ως υψηλή, με βάση τον προκαταρκτικό χαρακτηρισμό που πραγματοποιήθηκε από το ΕΛΚΕΘΕ το 2008, αντιστοιχεί σταθμός εποπτικής παρακολούθησης που έχει οριστεί στο πλαίσιο εφαρμογής του Άρθρου 8 της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Η παρακολούθηση γίνεται σύμφωνα με τα οριζόμενα στην ΚΥΑ 140384/2011. Στην περιοχή δεν εντοπίστηκαν άλλα υδάτινα σώματα, αναγνωρισμένα στο πλαίσιο της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ που να επηρεάζουν την κολυμβητική ακτή. Η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται ως περιοχή προστασίας - διατήρησης φυσικού περιβάλλοντος και είναι ενταγμένη στο δίκτυο Natura 2000 (GR4220008, Σίφνος: Προφήτης Ηλίας μέχρι δυτικές ακτές και θαλάσσια περιοχή). Πιο συγκεκριμένα, οι δύο ακτές της Σίφνου οι οποίες έχουν χαρακτηριστεί ως σημαντικές είναι η ακτή Καμάρες και η ακτή Πλατύς Γιαλός (βλ. *Εικόνα 3. 8*).



Εικόνα 3. 8: Ακτές κολύμβησης και χρήσεις γης της ευρύτερης περιοχής. (Πηγή: [bathingwaterprofiles.gr](http://bathingwaterprofiles.gr))

### Ακτή Καμάρες

Η ακτή Καμάρες, ή αλλιώς η περιοχή μελέτης, με κωδικό GRW149289297 (*Ταυτότητα Υδάτων Κολύμβησης, 2011*) αναγνωρίστηκε ως κολυμβητική το 1991 και εντάσσεται στα παρακάτω: στο Υδατικό διαμέρισμα Νήσων Αιγαίου (GR14), στη λεκάνη απορροής των Κυκλάδων (GR37) και στο Παράκτιο Υδατικό Σύστημα των Ακτών Σίφνου. Από το 2010, η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της ποιότητας των υδάτων για τις κολυμβητικές περιόδους πραγματοποιείται σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στην Οδηγία 2006/7/ΕΚ και τα ύδατα έχουν χαρακτηριστεί εξαιρετικής ποιότητας.

Η ακτή βρίσκεται εντός του ομώνυμου όρμου και ενώνει τον οικισμό Καμάρες με τον οικισμό της Αγίας Μαρίνας. Τόσο η παράκτια ζώνη όσο και ο θαλάσσιος πυθμένας είναι αμμώδεις, με λεπτή χρυσαφένια άμμο. Η παράκτια ζώνη της ακτής είναι φυσική, με σποραδική βλάστηση από αλμυρικά (*Tamarix*). Η κολυμβητική ακτή αποτελεί το παράλιο τμήμα ενός κλειστού κόλπου, μήκους 4.500m. Το μήκος της ακτής είναι 600m, το μέσο πλάτος είναι 10m και ο προσανατολισμός είναι βορειοδυτικός. Τα κολυμβητικά ύδατα, στα πρώτα μέτρα έχουν βάθος κανονικό, ο πυθμένας



παρουσιάζει ήπια κλίση και η ισοβαθής των 5m παρατηρείται σε απόσταση περίπου 220m από την ακτή. Η πρόσβαση στην παραλία γίνεται οδικώς μέσω του τοπικού δικτύου Καμαρών – Απολλωνίας.

Η άμεση περιοχή της ακτής είναι οικιστική με έντονη τουριστική δραστηριότητα και περιορισμένη φυσική βλάστηση. Οι δραστηριότητες που αναπτύσσονται περιλαμβάνουν την κύρια λιμενική εγκατάσταση, που βρίσκεται στον όρμο Καμάρες με ιδιότητες μικτού λιμένα, μια σημαντική έκταση γεωργικής αρδευόμενης γης και τους οικισμούς Καμάρες και Αγία Μαρίνα, στο νότιο και βόρειο άκρο της παραλίας, αντίστοιχα. Το μεγαλύτερο μέρος της ευρύτερης λεκάνης απορροής της ακτής καλύπτεται από θάμνους, χορτολίβαδα, πόες, σκληρόφυλλη βλάστηση, ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις και συμπλέγματα καλλιεργειών.

Όσον αφορά τις συστηματικές πιέσεις που δέχεται η περιοχή, σημαντικός επιβαρυντικός παράγοντας είναι ο αδιάκοπος ελλιμενισμός ιδιωτικών πλεούμενων και επιβατικών πλοίων στο λιμάνι του νησιού. Οι πιθανές απορρίψεις αποβλήτων και απορριμμάτων ή διαρροές πετρελαίων αποτελούν δυνητικές πηγές ρύπανσης. Επιπλέον, η διάθεση των αποβλήτων άλμης της περιοχής στη θάλασσα πρέπει να γίνεται σταδιακά και τηρώντας όλους τους κανονισμούς προκειμένου να προστατευτεί η θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα.

Στα κολυμβητικά ύδατα της ακτής δεν έχουν καταγραφεί περιστατικά ραγδαίας ανάπτυξης αλγών ή φυτοπλαγκτόν. Επιπλέον, τα ύδατα της ακτής κολύμβησης δεν επηρεάζονται από την απορροή ρυπαντικών φορτίων των κύριων θρεπτικών συστατικών αζώτου και φωσφόρου, τα οποία συμβάλλουν στην ανάπτυξη αλγών και ευνοούν την εξέλιξη φαινομένων ευτροφισμού. Το βάθος των υδάτων και τα επικρατούντα θαλάσσια ρεύματα στην περιοχή εξασφαλίζουν μεγάλο ρυθμό ανανέωσης των υδάτων, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση δυσμενών συνθηκών για την εμφάνιση του φαινόμενου του ευτροφισμού.

Όσον αφορά τη ρύπανση στην περιοχή, πιθανοί επιβαρυντικοί παράγοντες είναι η συρροή λουόμενων τους καλοκαιρινούς μήνες και η ύπαρξη λιμένα στα 50m από το ανατολικό άκρο της περιοχής κολύμβησης στον οποίο ελλιμενίζονται ιδιωτικά πλεούμενα. Στα κολυμβητικά ύδατα της ακτής δεν έχουν παρουσιαστεί ίχνη ρύπανσης ή περιστατικά ραγδαίας εξέλιξης αλγών και φυτοπλαγκτόν. Επιπλέον, το βάθος των υδάτων και τα επικρατούντα θαλάσσια ρεύματα στην περιοχή εξασφαλίζουν μεγάλο ρυθμό ανανέωσης των υδάτων, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση δυσμενών συνθηκών για την εμφάνιση του φαινόμενου του ευτροφισμού.

#### Ακτή Πλατύς Γιαλός

Η ακτή δεν βρίσκεται κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος, όμως εντάσσεται και εκείνη στο Υδατικό Διαμέρισμα Νήσων Αιγαίου (GR14), στην υδρολογική λεκάνη των Κυκλάδων (GR37) και στο Παράκτιο Υδατικό Σύστημα των Ακτών Σίφνου (GR001400010069N). Από το 2010, η παρακολούθηση και η αξιολόγηση της ποιότητας των υδάτων για τις κολυμβητικές περιόδους πραγματοποιείται σύμφωνα με τα προβλεπόμενα στην Οδηγία 2006/7/ΕΚ και τα ύδατα έχουν χαρακτηριστεί εξαιρετικής ποιότητας (*Ταυτότητα Υδάτων Κολύμβησης, 2011*).

Η παραλία Πλατύς Γιαλός βρίσκεται στον ομώνυμο όρμο, και είναι η μεγαλύτερη παραλία του νησιού. Τόσο η παράκτια ζώνη όσο και ο θαλάσσιος πυθμένας είναι αμμώδεις με λεπτή χρυσαφένια άμμο. Η παράκτια ζώνη της ακτής είναι μερικώς τροποποιημένη λόγω της παρουσίας τσιμεντένιου τοιχίου αντιστήριξης κατά μήκος της παραλιακής ζώνης καθώς επίσης και των δυο κρηπιδωμένων προβλητών που υπάρχουν εντός της κολυμβητικής ακτής. Η παράκτια βλάστηση περιλαμβάνει αλμυρίκια (*Tamarix*) ενώ η θαλάσσια περιλαμβάνει εχινόδερμα (αχινοί). Η κολυμβητική ακτή αποτελεί το παράλιο τμήμα ενός κλειστού κόλπου, μήκους 2800m. Το μήκος της ακτής είναι 1000m, το μέσο

πλάτος είναι 10m και ο προσανατολισμός είναι νοτιοανατολικός. Τα κολυμβητικά ύδατα στα πρώτα μέτρα έχουν βάθος κανονικό, ο πυθμένας παρουσιάζει ήπια κλίση και η ισοβαθής των 5m παρατηρείται σε απόσταση περίπου 120 m από την ακτή. Η πρόσβαση στην παραλία γίνεται οδικώς μέσω του τοπικού οδικού δικτύου.

Στην άμεση περιοχή της ακτής αναπτύσσεται έντονη τουριστική δραστηριότητα. Η περιοχή περιλαμβάνει πλήθος εστιατορίων, παραδοσιακών ταβερνών, αναψυκτηρίων και κέντρων νυχτερινής διασκέδασης. Στο ανατολικό άκρο και σε ελάχιστη απόσταση από την ακτή λειτουργεί πλήρως εξοπλισμένη σύγχρονη μαρίνα για πλεούμενα. Στην ευρύτερη περιοχή εντοπίζεται ο ομώνυμος παραθαλάσσιος οικισμός που αποτελεί τουριστικό πόλο έλξης. Το μεγαλύτερο μέρος της ευρύτερης λεκάνης απορροής της ακτής καλύπτεται από ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις, αγροτικές εκτάσεις με σημαντικό ποσοστό φυσικής βλάστησης, μόνιμες καλλιέργειες και ελαιώνες.

### 3.3.3. Υπουργικές Αποφάσεις - ΦΕΚ

Η Σίφνος είναι από τα ωραιότερα νησιά των Κυκλάδων με ανάγλυφο τοπίο και δομημένο περιβάλλον υψηλής αισθητικής. Έχει χαρακτηριστεί ως «τοπίο ιδιαίτερου κάλλους προς προστασία της παραδοσιακής της αρχιτεκτονικής» σύμφωνα με το ΦΕΚ 917/Β/14-7-1976.

Επιπλέον ορίζονται ειδικοί όροι δόμησης από την οδηγία ΠΔ 16-7-2002 - ΦΕΚ 668/Δ/5-8-2002 με τίτλο «Ειδικοί όροι και περιορισμοί δόμησης στην εκτός ορίων οικισμών προϋφισταμένων του έτους 1923 και στην εκτός σχεδίου περιοχή του Δήμου Σίφνου και της νήσου Κιτριανής (Ν. Κυκλάδων)». Οι βασικοί περιορισμοί που θέτουν οι παραπάνω οδηγίες και που αφορούν στην ευρύτερη περιοχή της παράκτιας ζώνης παρουσιάζονται παρακάτω.

- Απαγορεύεται η διάνοιξη οδών εξυπηρέτησης τροχοφόρων παράλληλων στην ακτή σε απόσταση μικρότερη των 100m από την προκαθορισμένη γραμμή αιγιαλού.
- Η ελάχιστη απόσταση τοποθέτησης των κτισμάτων ανεξαρτήτως χρήσεως από την προκαθορισμένη γραμμή αιγιαλού δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 100m.
- Σε όλο το νησί απαγορεύεται η αλλοίωση και η καταστροφή των μονοπατιών, τα οποία συνδέουν διάφορους οικισμού και τοποθεσίες μεταξύ τους.

Τέλος, τίθενται όροι και περιορισμοί για την προστασία των οικοτόπων σύμφωνα με το ΦΕΚ ΑΑΠ 229/19.06.2012, με τίτλο «Έγκριση καταλόγου μικρών νησιωτικών υγροτόπων και καθορισμός όρων και περιορισμών για την προστασία και ανάδειξη των μικρών παράκτιων υγροτόπων που περιλαμβάνονται σε αυτόν». Στην περιοχή μελέτης υπάρχει ο προστατευόμενος οικότοπος των Καμαρών, επομένως είναι σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικώς ορισμένες απαγορευμένες δραστηριότητες εντός των ορίων των οικοτόπων, οι οποίες είναι οι εξής:

- Οι εργασίες δόμησης και γενικότερα η ανέγερση οποιασδήποτε προσωρινής ή μόνιμης κατασκευής που δεν σχετίζεται άμεσα με την προστασία του οικοτόπου.
- Η διάνοιξη οδικού δικτύου.
- Οι αποξηράνσεις, τα αποστραγγιστικά έργα, οι επιχωματώσεις και οι αμμοληψίες (εκτός αν από ειδική μελέτη προκύπτει ότι σχετίζονται με τη διατήρηση του οικοτόπου).
- Οι παρεμβάσεις που αλλοιώνουν σημαντικά το τοπίο.

### 3.3.4. Αναπτυξιακά σχέδια

#### Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου

Το Νότιο Αιγαίο αποτελεί μία περιφέρεια με διπλό ρόλο, αφενός ως εξωτερικό σύνορο της χώρας και ευρύτερα της Ευρωπαϊκής Ένωσης και αφετέρου ως σημαντική πύλη εισόδου σε αυτές. Η πολυδιάσπαση του χώρου προσδίδει μία μοναδικότητα ως προς τις περιφέρειες της χώρας και της Ευρώπης, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί αυξημένες ανάγκες για ενδο-συνδέσεις και διασυνδέσεις σε διάφορα επίπεδα. Η θέση του συνεπάγεται σειρά μειονεκτημάτων όπως: αυξημένο κόστος ανάπτυξης και θωράκισης, δυσκολία ανάπτυξης συνεργασιών με τις περιβάλλουσες χώρες, μερική αξιοποίηση των δυνατοτήτων του χώρου για έρευνα και τεχνολογία σε ειδικευμένα επίπεδα. Η απόσταση από τα Ευρωπαϊκά κέντρα ανάπτυξης και ο νησιωτικός χαρακτήρας καθιστούν το Νότιο Αιγαίο μια εξαιρετικά απομονωμένη περιφέρεια.

Με βάση κριτήρια, όπως το μέγεθος, ο πληθυσμός, η ακτίνα επιρροής, η περιοχές εξάρτησης, οι επικρατούσες οικονομικές δραστηριότητες των νησιών κ.α., η Σίφνος κατατάσσεται στην Ομάδα II, η οποία αντιπροσωπεύει τα νησιά που αναπτύσσονται τουριστικά, ενώ διαθέτουν άλλες παραγωγικές δραστηριότητες και εκμεταλλεύσιμους πόρους. Στα νησιά της Ομάδας II πρέπει να δοθεί έμφαση σε δράσεις που στοχεύουν στην αντιμετώπιση των συγκρούσεων μεταξύ των δραστηριοτήτων και την αποτροπή της εξάρτησης τους από μονόπλευρη τουριστική ανάπτυξη. (Εθνικό Τυπογραφείο, [www.et.gr](http://www.et.gr))

Η επέκταση του λιμένα της Σίφνου και η πρόβλεψη για επιβατική, εμπορική και αλιευτική χρήση εναρμονίζεται πλήρως προς τα παραπάνω καθώς στοχεύει στην αναβάθμιση τόσο του τουριστικού τομέα όσο και των λοιπών τομέων παραγωγής, μέσω της μεταφοράς επιβατών και αγαθών. Επιπλέον, εναρμονίζεται ως προς το γενικό άξονα που αφορά στην πύκνωση του δικτύου λιμένων προκειμένου να αντιμετωπιστεί η απομόνωση των νησιών, και στους ειδικούς στόχους που αφορούν στις θαλάσσιες μεταφορές όπως:

- Ο ορθολογικός σχεδιασμός και λειτουργία γραμμών εξυπηρέτησης υποσυστημάτων νησιών, ώστε να μειωθεί το πρόβλημα των χρόνο-αποστάσεων και να διασφαλίζεται η προσπελασιμότητα των νησιών για όλο το έτος.
- Η εξασφάλιση λιμενικών υποδομών κατάλληλα χωροθετημένων και ιεραρχημένων, ώστε να ικανοποιούν την επιθυμητή λειτουργία.
- Η μέριμνα για χωροθέτηση και λειτουργία εμπορικών λιμένων.
- Η προώθηση χρήσης κατάλληλων σκαφών για κάθε περίπτωση.

#### Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης Τουρισμού

Σκοπός του Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τον Τουρισμό είναι η παροχή κατευθύνσεων, κανόνων και κριτηρίων για τη χωρική διάρθρωση, οργάνωση και ανάπτυξη του τουρισμού στην Ελλάδα και των αναγκαίων προς τούτο υποδομών. Βασικός άξονας είναι η προστασία και ανάδειξη του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος η οποία αποτελεί προϋπόθεση για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας του τουριστικού τομέα. Επιπλέον, το Ειδικό Πλαίσιο στοχεύει στην αειφόρο ανάπτυξη του τουρισμού της χώρας, την παροχή αναγκαίων κατευθύνσεων για τον χωρικό σχεδιασμό, τη βελτίωση του οικονομικού αποτελέσματος της τουριστικής δραστηριότητας κ.α..

Με βάση την ένταση και το είδος της τουριστικής ανάπτυξης, τη γεωμορφολογία και την ευαισθησία των πόρων, η Σίφνος κατατάσσεται στην Ομάδα II των νησιών και παράκτιων περιοχών. Στην Ομάδα

II περιλαμβάνονται 47 νησιά με σημαντική τουριστική δραστηριότητα ή νησιά που αναπτύσσονται τουριστικά, με ή χωρίς άλλη ιδιαίτερα δυναμική παραγωγική δραστηριότητα και εκμεταλλεύσιμους πόρους. Στα νησιά αυτά έμφαση πρέπει να δοθεί σε δράσεις που σκοπό έχουν την αντιμετώπιση συγκρούσεων μεταξύ των δραστηριοτήτων, τον έλεγχο των περιβαλλοντικών πιέσεων και του είδους της ανάπτυξης και την αποτροπή της μονόπλευρης εξάρτησής τους από τον τουρισμό.

Επιπλέον, πέραν των κατευθύνσεων που δίδονται ανά κατηγορία περιοχής και για τη χωρική οργάνωση των ειδικών μορφών τουρισμού, ο σχεδιασμός των χρήσεων γης πρέπει να διερευνά τη σκοπιμότητα καθορισμού ζωνών τουριστικής ανάπτυξης στις εκτός σχεδίου και εκτός ορίων οικισμών περιοχές και να τις ορίζει κατά περίπτωση και τον προσδιορισμό ζωνών προστασίας της φυσικής και πολιτιστικής κληρονομιάς, των φυσικών πόρων και του τοπίου, στις οποίες θα περιορίζεται ή/και θα απαγορεύεται η δυνατότητα δόμησης. Σε κάθε περίπτωση, λαμβάνεται υπόψη η φέρουσα ικανότητα των περιοχών, με την ιδιαίτερη επισήμανση ότι η ανεπάρκεια και υπέρβαση της αντοχής των πόρων θα πρέπει να αποτελεί απαγορευτικό κριτήριο για τη χωροθέτηση ζωνών ή τουριστικών μονάδων.

Στα νησιά της ομάδας II, διακρίνεται μια ζώνη υψηλής ανταγωνιστικότητας διαφόρων οικονομικών δραστηριοτήτων, η οποία εκτείνεται σε απόσταση 350m από τον αιγιαλό και έχει ιδιαίτερη σημασία για την ανάπτυξη του τουρισμού. Στη ζώνη αυτή που παρατηρείται υψηλός ανταγωνισμός χρήσεων γης και δραστηριοτήτων όλων των ειδών, με άμεση ή έμμεση επίπτωση στον τουρισμό, δίδονται οι παρακάτω κατευθύνσεις:

- Ο περιορισμός της δημιουργίας νέων εγκαταστάσεων μη συμβατών με την τουριστική δραστηριότητα. Κατ' εξαίρεση είναι δυνατή η χωροθέτηση βιομηχανικών δραστηριοτήτων, που έχουν ανάγκη θαλάσσιου μετώπου και εξυπηρετούν άμεσες τοπικές ανάγκες ή είναι σημαντικές για την εθνική οικονομία, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του Ειδικού Πλαισίου για τη Βιομηχανία.
- Η προώθηση δράσεων αποκατάστασης της αισθητικής του τοπίου και αναβάθμισης της λειτουργίας του χώρου.
- Η διατήρηση των φυσικών χαρακτηριστικών της ζώνης υψηλής ανταγωνιστικότητας σε ορισμένα τμήματα της ακτογραμμής.

### 3.4. Μορφολογία

#### 3.4.1. Γενικά στοιχεία

Η Σίφνος χαρακτηρίζεται από ορεινό ανάγλυφο με εξάρσεις σημαντικού ύψους. Διασχίζεται από τέσσερις παράλληλους ορεινούς όγκους με κυριότερες κορυφές του Προφήτη Ηλία στα νοτιοδυτικά και του Αγίου Συμεών στα βορειοδυτικά. Η κορυφή του Προφήτη Ηλία είναι η ψηλότερη του νησιού, με υψόμετρο 682m, ακολουθεί η Απιδιά με 648m και ο Άγιος Συμεών με υψόμετρο 463m.

Στο κεντρικό τμήμα υπάρχει οροπέδιο, στο οποίο συγκεντρώνεται η πλειοψηφία των καλλιεργειών της νήσου. Από το τμήμα αυτό πηγάζει ο χείμαρρος Λειβαδάς, ο οποίος εκβάλλει στον όρμο Καμαρών και έχει μήκος 5.5km. Τέλος η ακτογραμμή της Σίφνου παρουσιάζει έντονο διαμελισμό, σχηματίζοντας πολλούς όρμους και κοιλίσκους. Οι πιο ενδεικτικοί είναι οι Καμάρες, ο Φάρος και ο Πλατύς Γιαλός.

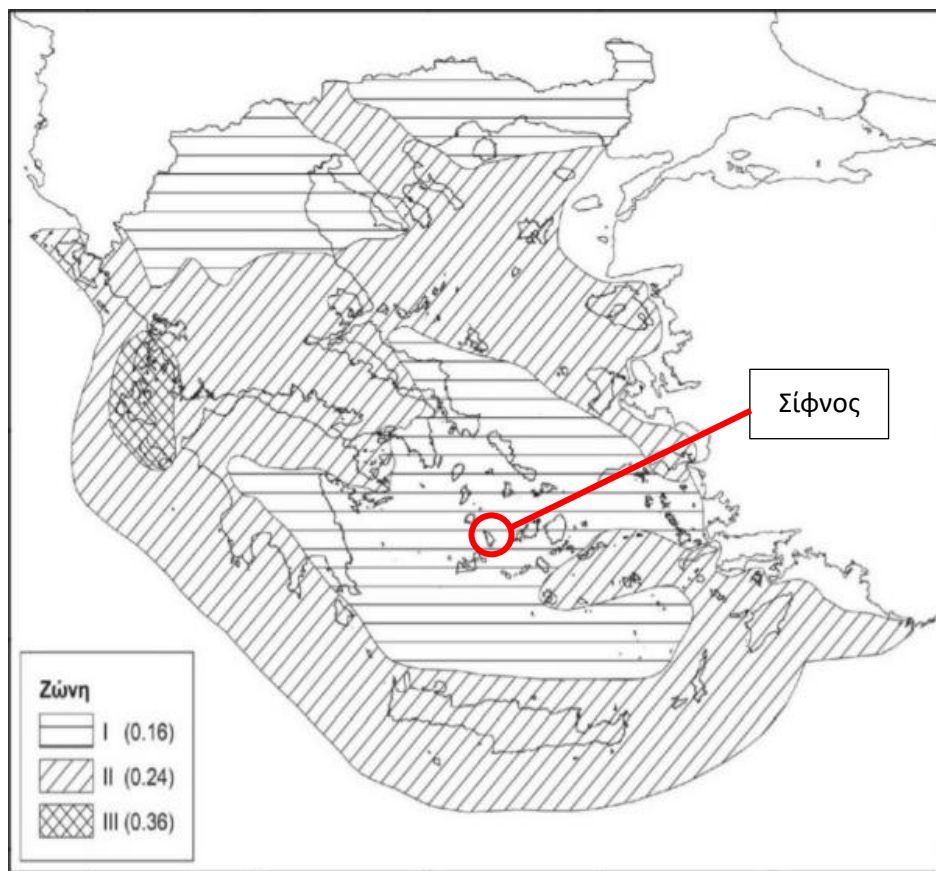
#### 3.4.2. Γεωλογικά και Τεκτονικά στοιχεία

Το νησί της Σίφνου ανήκει στην Αττικοκυκλαδική γεωλογική ζώνη η οποία θεωρείται προέκταση της Πελαγονικής ζώνης. Αποτελείται από μία ακολουθία καλυμμάτων που περιλαμβάνουν κυρίως

μεταμορφωμένα πετρώματα. Η νήσος σχηματίστηκε από μια μεταμορφωμένη ηφαιστειο-ιζηματογενή ακολουθία από σχιστόλιθους και γνευσίους που εναλλάσσονται με παχυπλακώδεις ασβεστόλιθους.

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης καλύπτεται από Ολοκαινικές αποθέσεις οι οποίες συνίστανται από κροκάλες, άμμους, χειμαρρώδεις αποθέσεις και κορήματα, ενώ στο βόρειο και ανατολικό τμήμα της Σίφνου υπάρχουν σχηματισμοί από μάρμαρο και γνευσίους.

Από τεκτονικής άποψης, υπάρχουν ρήγματα γύρω από τη νήσο με διεύθυνση ΝΝΔ–ΒΒΑ (*gredass.unife.it*). Ωστόσο η Σίφνος κατατάσσεται στη ζώνη χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας (Ζώνη I), σύμφωνα με το νέο χάρτη ο οποίος ενσωματώθηκε στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 2000 και δημοσιεύθηκε στο ΦΕΚ Β1154-12/08/2003. Η εδαφική επιτάχυνση στη Ζώνη I ορίζεται 0.16g, όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.



Εικόνα 3. 9: Νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας. (Πηγή: ΦΕΚ Β1154-12/08/2003, ΕΤ)

### 3.4.3. Υδρογεωλογικά στοιχεία

Η Σίφνος παρουσιάζει πυκνό υδρογραφικό δίκτυο με χειμαρρώδη χαρακτηριστικά λόγω των υδατοστεγών πετρωμάτων και του έντονου μορφολογικού αναγλύφου που διαθέτει.

Στη νήσο απαντώνται αρκετές λεκάνες απορροής με σημαντικότερες εκείνες των Καμαρών, του Πλατύ Γιαλού και του Κάστρου. Η μεγαλύτερη λεκάνη είναι των Καμαρών με έκταση περίπου 21 τετραγωνικά χιλιόμετρα η οποία αποστραγγίζεται κυρίως με τον χειμάρρο του Λειβαδά στον ομώνυμο όρμο. Επιπλέον, συγκεντρώνει τις απορροές του μεγαλύτερου μέρους του νησιού αφού καταλαμβάνει και το 30% του συνολικού εμβαδού της Σίφνου. Ο χειμάρρος παρουσιάζει ροή μερικές μέρες το χρόνο

κυρίως μετά από έντονες βροχοπτώσεις ενώ έχει σχεδόν συνεχή ροή κατά τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο.

Στην υπόλοιπη περιοχή σημειώνεται ακτινωτό υδρογραφικό δίκτυο με μικρές λεκάνες απορροής και ρεύματα κάθετα στις ακτές. Στην περιοχή των Εξαμπέλων συναντάται λεκάνη τριγωνικού σχήματος με απορροή του κεντρικού κλάδου του ρέματος Ερκειές στην ανατολική πλευρά του νησιού.

Οι κυριότεροι γεωλογικοί σχηματισμοί της επιφάνειας του νησιού χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατοι, μη επιτρέποντας την κατείσδυση υδάτων στις επιφανειακά αποσαθρωμένες ζώνες και στις θέσεις αλλουβιακών αποθέσεων. Συνεπώς η επικρατέστερη μορφή υδρογραφικής διευθέτησης των φυσικών κατακρημνισμάτων είναι η επιφανειακή απορροή των υδάτων, η ένταση των οποίων εξαρτάται από το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής.

#### 3.4.4. Μορφολογία παράκτιας ζώνης

Η ακτογραμμή της Σίφνου παρουσιάζει πολυσχιδή παράκτια μορφολογία. Με κριτήρια τη μορφολογία και τη λιθολογία του νησιού, οι ακτές διακρίνονται σε δύο ενότητες, στις βραχώδεις και στους όρμους (κολπίσκους).

Οι βραχώδεις ακτές καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της ακτογραμμής και βρίσκονται υπό συνεχή καταπόνηση από τις διαβρωτικές διεργασίες των κυματισμών της θάλασσας. Η ενότητα αυτή χαρακτηρίζεται κυρίως από τις απότομες κλίσεις και το ακανόνιστο σχήμα των όγκων των παράκτιων πετρωμάτων.

Η ενότητα των όρμων και των κολπίσκων αποτελείται από σχηματισμούς που είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με την ύπαρξη και δράση περιστασιακών ρευμάτων. Στις περιοχές αυτές συναντώνται κώνοι προσχώσεως, οι οποίοι λειτουργούν σαν φυσικό «σφουγγάρι» και βρίσκονται στο σημείο εκβολής του καναλιού εκφόρτισης. Η μορφολογία του κόλπου αλλά και τα χαρακτηριστικά των αποθέσεων στην ευρύτερη περιοχή των κώνων, εξαρτώνται από την παροχή, τα φερτά υλικά, τη γεωλογία και την επίδραση των κυματισμών και των ρευμάτων του όρμου.

Επιπλέον, βασικός παράγοντας της ισορροπίας των ιζημάτων στις ακτές είναι η ύπαρξη λιβαδιών Ποσειδωνίας (*Posidonia oceanica*). Οι οργανισμοί αυτοί έχουν την δυνατότητα να αλληλεπιδρούν και να τροποποιούν τα χαρακτηριστικά του σχηματισμού στον οποίο αναπτύσσονται, δημιουργώντας ένα κύκλο «διάβρωσης - ιζηματοποίησης», που μπορεί να επηρεάσει την υδρογραφία των περιοχών, την κοκκομετρία κ.α.

### 3.4.5. Εξέλιξη ακτογραμμής

Από τη μελέτη των αεροφωτογραφιών της περιοχής παρατηρούνται μεταβολές στη τμήμα που επηρεάζεται από τα λιμενικά έργα. Σημειώνεται μια τάση μεταφοράς ιζήματος από το βόρειο τμήμα της ακτής προς το νότιο. Πιο συγκεκριμένα, η εξέλιξη της ακτογραμμής της περιοχής μελέτης εξετάστηκε χρησιμοποιώντας αρχικά τις αεροφωτογραφίες από το Google Earth, όπως παρουσιάζεται στην *Εικόνα 3.10* που ακολουθεί. Το υλικό που συλλέχθηκε καλύπτει χρονική περίοδο 8 ετών από το έτος 2011 ως το 2019. Σύμφωνα με τις φωτογραφίες, στο διάστημα των 8 ετών δεν υπήρξαν επεμβάσεις αναφορικά με τις λιμενικές εγκαταστάσεις. Σε ότι αφορά την πρόοδο της ακτογραμμής στο νότιο τμήμα, οι μεταβολές στο συγκεκριμένο διάστημα δεν είναι αρκετά μεγάλες ώστε να γίνουν διακριτές, ενώ σε ότι αφορά το βόρειο τμήμα παρατηρείται υποχώρηση της ακτογραμμής χωρίς σημαντική αλλαγή της τελικής μορφής της.



*Εικόνα 3. 10: Διαχρονική εξέλιξη της ακτογραμμής των Καμαρών 2011-2019. (Υπόβαθρο: Google Earth Pro)*

Επιπλέον συλλέχθηκαν αεροφωτογραφίες από το Ελληνικό Κτηματολόγιο εντός της περιόδου 1960 – 1999, για την παρακολούθηση της ακτογραμμής πριν και μετά την κατασκευή του δυτικού προβλήτα και παρατίθενται στη συνέχεια. Τα έργα επέκτασης του προσήνεμου προβλήτα προς τα βόρεια πραγματοποιήθηκαν την περίοδο 1987-1999, επομένως κρίθηκε αναγκαίο να βρεθούν φωτογραφίες κοντά σε εκείνη την χρονική περίοδο, για να εξεταστεί η επιρροή των λιμενικών εγκαταστάσεων στην μεταβολή της ακτογραμμής. Σύμφωνα με αεροφωτογραφίες μεγαλύτερης χρονικής περιόδου από το Ελληνικό Κτηματολόγιο, οι μεταβολές της ακτογραμμής που παρατηρούνται είναι σημαντικής κλίμακας.



Εικόνα 3. 11: Διαχρονική εξέλιξη της ακτογραμμής των Καμαρών 1960-2019 με χρήση δεδομένων από το Ελληνικό Κτηματολόγιο (Υπόβαθρο: Google Earth Pro, Πηγές: Google Earth Pro, gis.ktimanet.gr).

Περίοδος 1960 – 1999: Εντός της περιόδου πραγματοποιήθηκαν επεμβάσεις στις λιμενικές εγκαταστάσεις και παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές. Όσον αφορά στο νοτιότερο τμήμα, η πρόοδος που καταγράφηκε είναι σημαντική και αντιστοιχεί περίπου σε 8m, ενώ στο κεντρικό τμήμα της ακτής δεν παρατηρείται μεταβολή. Το βόρειο κομμάτι παρουσιάζει υποχώρηση της τάξης των 8m, αλλάζοντας έτσι και το σχήμα της ακτογραμμής στο σημείο εκείνο. Ωστόσο, η περίοδος αυτή είναι αρκετά μεγάλη για να μπορεί να θεωρηθεί ότι η αλλοίωση στην ισορροπία της παράκτιας μορφολογίας είναι αποτέλεσμα μόνο της κατασκευής του προβλήτα.

Περίοδος 1999 – 2011: Κατά τη διάρκεια αυτών των ετών παρατηρείται ελάχιστη πρόοδος στο νότιο τμήμα της ακτής και σχεδόν μηδενική υποχώρηση στο βόρειο τμήμα.

Σύμφωνα με τα ευρήματα για την εξέλιξη της ακτογραμμής, εύλογα εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

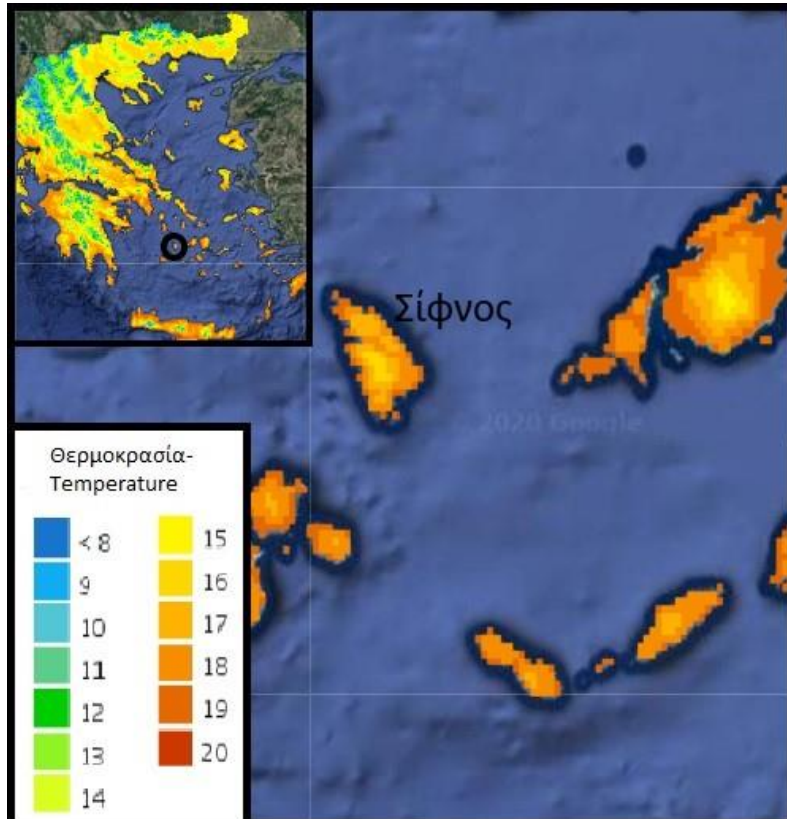
- 1) Η κατασκευή και η επέκταση των λιμενικών εγκαταστάσεων του όρμου των Καμαρών ευνόησε τη μεταφορά ιζήματος από το βόρειο στο νότιο μέρος του λιμένα. Ωστόσο η χρονική περίοδος των διαθέσιμων στοιχείων είναι αρκετά μεγάλη και έτσι η κατασκευή των λιμενικών έργων δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ο μόνος παράγοντας αλλοίωσης της μορφολογίας.
- 2) Από το 1999 έως το 2019 παρατηρείται μικρότερος ρυθμός υποχώρησης/προόδου της ακτογραμμής, η οποία φαίνεται να έχει φτάσει σε νέα ισορροπία.



### 3.5. Ανεμολογικά και κυματικά χαρακτηριστικά

#### 3.5.1. Γενικά κλιματολογικά στοιχεία

Ο Ελλαδικός χώρος σύμφωνα με την κατάταξη της ΕΜΥ διακρίνεται σε 13 κλιματικές ζώνες, οι οποίες παρουσιάζονται στην *Εικόνα 3.12*. Το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων και συνεπώς η νήσος Σίφνος εμφανίζουν μέσες ετήσιες θερμοκρασίες μικρότερες από 19 °C και μεγαλύτερες από 14 °C.



*Εικόνα 3. 12: Κλιματικοί Χάρτες της Ελλάδας και της Σίφνου. (Πηγή: ΕΜΥ, climatlas.hnms.gr)*

Στο νησί της Σίφνου υπάρχει εγκατεστημένος μετεωρολογικός σταθμός της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) ο οποίος ξεκίνησε να παρέχει δεδομένα τον Ιούνιο του 2019. Η περίοδος αυτή είναι πολύ μικρή για να εξαχθούν συμπεράσματα, επομένως τα ανεμολογικά στοιχεία που παρουσιάζονται στη συνέχεια, προέρχονται από τον εγγύτερο σταθμό, ο οποίος βρίσκεται στη Μήλο και παρέχει μετρήσεις για την περίοδο 2012-2020. Στον *Πίνακα 3.3* παρουσιάζονται οι τιμές της θερμοκρασίας (ελάχιστης, μέσης, μέγιστης) σε °C και η μέση μηνιαία σχετική υγρασία.

Η μέση μηνιαία θερμοκρασία που καταγράφηκε από τον σταθμό της Μήλου είναι 18.5 °C. Ο θερμότερος μήνας είναι ο Ιούλιος, με τη μέση θερμοκρασία εικοσιτετράωρου να φτάνει τους 26.2 °C, ενώ ο ψυχρότερος είναι ο Ιανουάριος με 11.17 °C. Η μέγιστη θερμοκρασία του Ιουλίου πλησιάζει τους 30 °C, ενώ η ελάχιστη του Ιανουαρίου, τους 9 °C.

Η μέση ετήσια υγρασία ανέρχεται σε 71.13%. Η ξηρότερη περίοδος εμφανίζεται τον Ιούλιο με υγρασία 63.60%, ενώ η πιο υγρή τον Δεκέμβριο με 75.57% και τον Ιανουάριο με 76.33%.

Πίνακας 3. 3: Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Μήλου 2012-2020. (Πηγή: Meteo, επεξεργασία: συντάκτη)

ΜΗΝΑΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (°C)			ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΥΓΡΑΣΙΑ (%)
	Μέση	Μέση μέγιστη	Μέση Ελάχιστη	
Ιανουάριος	11.17	13.18	8.97	76.33
Φεβρουάριος	12.17	14.46	10.02	77.29
Μάρτιος	13.51	16.21	11.21	74.79
Απρίλιος	16.22	19.82	13.23	69.80
Μάιος	20.04	24.03	16.91	67.65
Ιούνιος	24.05	28.01	20.76	65.98
Ιούλιος	26.20	29.86	23.24	63.60
Αύγουστος	26.11	29.33	23.62	66.59
Σεπτέμβριος	23.62	26.91	20.98	68.75
Οκτώβριος	19.69	22.43	17.54	73.54
Νοέμβριος	16.59	18.81	14.57	73.67
Δεκέμβριος	12.54	14.49	10.52	75.57
<b>Μέσος όρος</b>	18.49	21.46	15.97	71.13

### 3.5.2. Ανεμολογικά στοιχεία

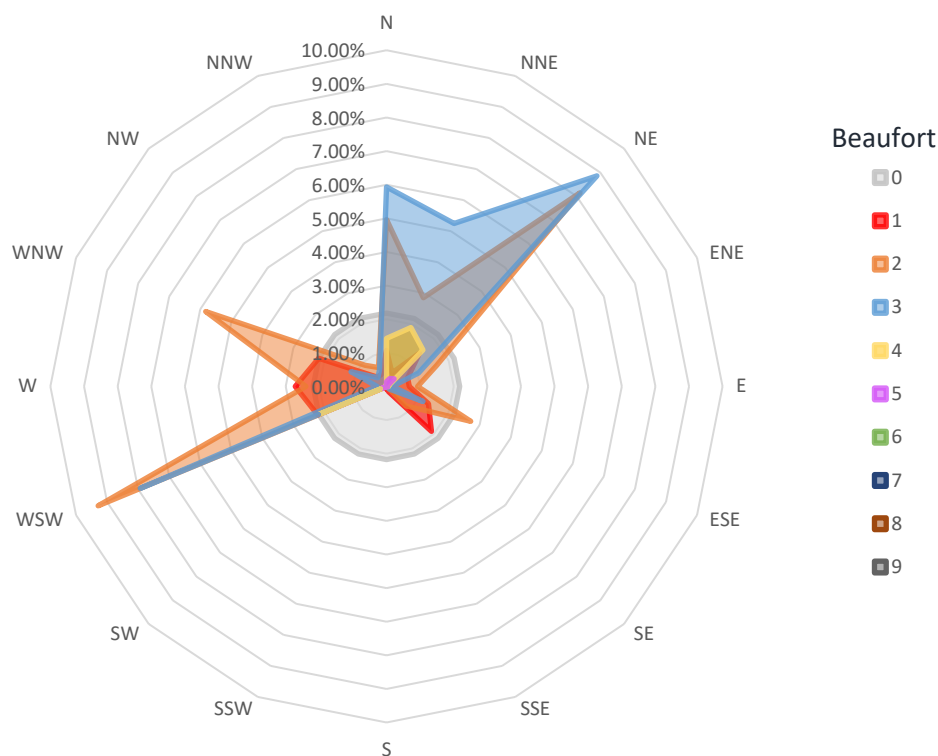
Στον Πίνακα 3.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα ανεμολογικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από το σταθμό Μήλου της ΕΜΥ μεταξύ των ετών 2012-2020. Τα δεδομένα, τοποθετήθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο Excel, επεξεργάστηκαν ώστε να έχουν μέση ετήσια μορφή και παρουσιάζονται ανά κατεύθυνση και ένταση ανέμου, ενώ για την καλύτερη αξιολόγηση τους έχουν εκφραστεί και σε ποσοστά επί τοις εκατό. Η ένταση του ανέμου είναι εκφρασμένη σε κλίμακα Beaufort.

Πίνακας 3. 4: Στοιχεία μέσων εντάσεων και κατευθύνσεων ανέμων του σταθμού της Μήλου (ποσοστά επί τοις εκατό).

ΜΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (BEAUFORT)	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ																	
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	ΝΗΝΕΜΙΑ	ΣΥΝΟΛΟ
0																	2.18	2.18
1	1.07	0.43	1.39	0.68	0.68	1.36	1.89	0.18	0.07	0.07	0.00	2.21	2.71	2.18	0.39	0.39		15.71
2	4.96	2.86	8.14	1.61	0.93	2.71	0.82			0.04	0.04	9.29	2.39	5.82	0.89	0.61		41.11
3	5.93	5.25	8.86	1.04	0.18	1.18	0.11					7.93	0.29	1.14	0.36	0.54		32.79
4	1.43	1.89	1.54	0.07	0.07	0.04						2.18		0.04	0.04			7.29
5	0.14	0.25	0.32			0.04						0.18						0.93
>6	0.00																	0.00
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	13.54	10.68	20.25	3.39	1.86	5.32	2.82	0.18	0.07	0.11	0.04	21.79	5.39	9.18	1.68	1.54		100

Έπειτα από επεξεργασία της μέσης ταχύτητας ανέμου των δεδομένων του σταθμού της Μήλου προκύπτει ότι οι επικρατέστερες διευθύνσεις πνεόντων ανέμων είναι η Βόρεια (N) με ποσοστό 13.54%, η Βορειοανατολική (NE) με ποσοστό 20.25% και η Δυτική-Νοτιοδυτική (WSW) με ποσοστό 21.79%. Το ποσοστό Νηνεμίας αντιστοιχεί στο 2.18% του έτους. Οι επικρατέστερες διευθύνσεις συμπίπτουν με αυτές που προκύπτουν από την ανάλυση της χρονοσειράς του κυματικού κλίματος της περιοχής, το οποίο αναλύεται στο Κεφάλαιο 4.1.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται οι διευθύνσεις των μέσων πνεόντων ανέμων και το ετήσιο ποσοστό εμφάνισής τους σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Μήλου.



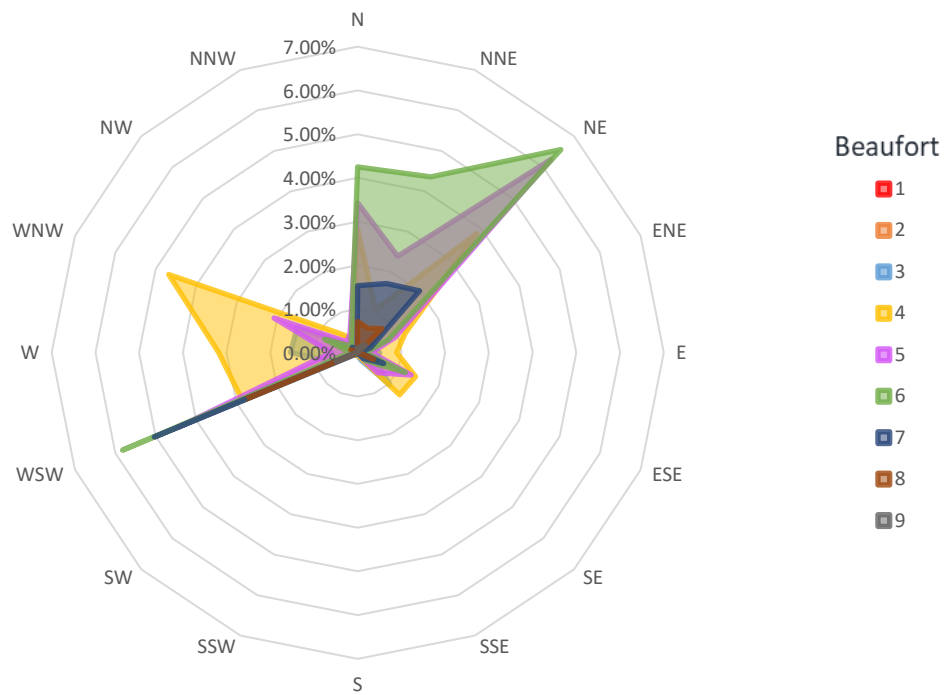
Σχήμα 3. 1: Μέσο ανεμολόγιο Σταθμού Μήλου 2012-2020.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία και των μέγιστων ανέμων που εμφανίζονται στην περιοχή και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 3.5. Οι επικρατέστερες διευθύνσεις ανέμων είναι η Βόρεια (N) με ποσοστό 13.61%, η Βορειοανατολική (NE) με ποσοστό 20.32% και η Δυτική-Νοτιοδυτική (WSW) με ποσοστό 22.04%.

Πίνακας 3. 5: Στοιχεία μέγιστων εντάσεων και κατευθύνσεων ανέμων του σταθμού της Μήλου (ποσοστά επί τοις εκατό).

ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (BEAUFORT)	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ																
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	ΣΥΝΟΛΟ
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07
3	0.75	0.46	0.57	0.36	0.50	0.46	1.04	0.18	0.07	0.00	0.00	0.57	1.54	1.50	0.25	0.39	8.64
4	2.82	1.07	3.86	1.18	0.89	1.43	1.36	0.11	0.00	0.07	0.00	2.86	3.18	4.68	0.64	0.36	24.50
5	3.43	2.39	6.25	0.93	0.32	1.32	0.64	0.04	0.00	0.04	0.00	4.43	0.61	2.07	0.36	0.46	23.29
6	4.25	4.36	6.57	0.75	0.18	1.18	0.25		0.04		0.00	5.82	0.18	0.82	0.21	0.39	25.00
7	1.54	1.71	2.00	0.32	0.07	0.64	0.18				0.04	5.04	0.04	0.11	0.18	0.04	11.89
8	0.71	0.61	0.79		0.04	0.39						2.79	0.00	0.18	0.04		5.54
9	0.11	0.14	0.25									0.54	0.04		0.04		1.11
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>13.61</b>	<b>10.75</b>	<b>20.32</b>	<b>3.54</b>	<b>2.00</b>	<b>5.43</b>	<b>3.50</b>	<b>0.32</b>	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>0.04</b>	<b>22.04</b>	<b>5.57</b>	<b>9.36</b>	<b>1.71</b>	<b>1.64</b>	<b>100</b>

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται οι διευθύνσεις των μέγιστων πνεόντων ανέμων και το ετήσιο ποσοστό εμφάνισής τους σύμφωνα με τα δεδομένα του σταθμού της Μήλου.



Σχήμα 3. 2: Μέγιστο ανεμολόγιο Σταθμού Μήλου 2012-2020.

### 3.5.3. Κυματισμοί στα βαθιά

Ο τομέας ανοιχτού πελάγους που προσβάλλει τον όρμο των Καμαρών είναι από νοτιοδυτικά μέχρι βορειοδυτικά. Τα κυματικά χαρακτηριστικά στο στόμιο του όρμου συλλέχθηκαν από τον ιστότοπο Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS, [marine.copernicus.eu](http://marine.copernicus.eu)). Πιο συγκεκριμένα, έγινε συλλογή δεδομένων για την περίοδο, το ύψος και τη διεύθυνση των κυματισμών σε ένα ορθογώνιο στο οποίο περιέχονται οι συντεταγμένες της εισόδου του κόλπου. Έπειτα από κατάλληλη επεξεργασία, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των στοιχείων στο πρόγραμμα MIKE με τη μορφή δεδομένων εισόδου. Αναλυτικότερη αναφορά των δεδομένων γίνεται στο Κεφάλαιο 4.1.

### 3.5.4. Παλίρροια

Τα στοιχεία για την παλίρροια της περιοχής των Κυκλάδων συλλέχθηκαν από τον παλιρροιογράφο που βρίσκεται εγκατεστημένος στην Σύρο (ο μοναδικός παλιρροιογράφος του νομού Κυκλάδων) και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.6.

Πίνακας 3. 6: Δεδομένα παλίρροιας από τον παλιρροιογράφο στο λιμένα της Σύρου. (Πηγή: Sea level station monitoring facility, [ioc-sealevelmonitoring.org](http://ioc-sealevelmonitoring.org))

Εύρος παλίρροιας (m)	
Μέσο	0.50
Ελάχιστο	0.01
Μέγιστο	0.30

### 3.6. Υφιστάμενη κατάσταση

#### 3.6.1. Λιμενικά έργα

Οι υφιστάμενες λιμενικές εγκαταστάσεις του όρμου Καμαρών συνίστανται από προσήνεμο και υπήνεμο προβλήτα και παραλιακά κρηπιδώματα. Μεταξύ του υπήνεμου και του προσήνεμου προβλήτα σχηματίζεται μικρής έκτασης λιμενολεκάνη με βάθος από 1.5 μέχρι 8m.

##### Προσήνεμος προβλήτας

Ο υφιστάμενος προσήνεμος προβλήτας βρίσκεται στο νότιο - νοτιοδυτικό τμήμα του όρμου με κατεύθυνση Νοτιοδυτική-Βορειοανατολική. Έχει συνολικό μήκος εσωτερικού κρηπιδώματος 106.5m και έχει κυμαινόμενο πλάτος, το οποίο για τα πρώτα 61.5m είναι περίπου 11.0m, ενώ για τα υπόλοιπα 45.0m το πλάτος είναι 24.0m. Η χερσαία έκταση του προβλήτα είναι περίπου 1720m<sup>2</sup> και στο δεξιό του άκρο υπάρχει φάρος για τις ανάγκες της ναυσιπλοΐας.

Το πρώτο τμήμα του προβλήτα, πλάτους 11.0m, είναι μικτής διατομής. Η εξωτερική του πλευρά είναι θωρακισμένη με φυσικούς ογκολίθους και η εσωτερική αποτελείται από κατακόρυφο μέτωπο. Στην προσήνεμη πλευρά υπάρχει στηθαίο από σκυρόδεμα ύψους περίπου 1.5m και μήκους περί τα 20m. Στη συνέχεια του στηθαίου υπάρχει στέγαστρο από σκυρόδεμα μήκους περίπου 30.0m το οποίο χρησιμεύει για την αναμονή των επιβατών μέχρι την επιβίβασή τους στα πλοία. Το δεύτερο τμήμα, πλάτους 24.0m, αποτελείται από κατακόρυφο μέτωπο, τόσο προς την εσωτερική πλευρά (λιμενολεκάνη) όσο και προς την εξωτερική πλευρά.

##### Υπήνεμος προβλήτας

Ο υπήνεμος προβλήτας βρίσκεται σε απόσταση 112.0m από τον προσήνεμο και έχει τον ίδιο προσανατολισμό. Το συνολικό του μήκος ανέρχεται στα 37.6m και το πλάτος του είναι μεταβλητό. Τα πρώτα 19.6m έχουν πλάτος 5.0m, ενώ τα υπόλοιπα 18.0m περίπου 6.5m. Δυτικά του προβλήτα και σε επαφή με αυτόν υπάρχει ράμπα διαστάσεων: 6.0m πλάτους και 10.5m μήκους. Όλο το μήκος της δυτικής πλευράς είναι προστατευμένο με στηθαίο και το υπόλοιπο τμήμα, εκτός της ράμπας, είναι προστατευμένο με τεχνητούς ογκολίθους. Λόγω του μικρού βάθους νερού στο μεγαλύτερο τμήμα της ανατολικής πλευράς, αυτή χρησιμεύει για πρόσδεση περιορισμένου αριθμού αλιευτικών σκαφών.

##### Παραλιακά κρηπιδώματα

Ο λιμένας διαθέτει δύο παραλιακά κρηπιδώματα, το δυτικό και το ανατολικό. Το δυτικό έχει συνολικό μήκος περίπου 103.0m και βρίσκεται ανάμεσα στον προσήνεμο και τον υπήνεμο προβλήτα. Συνήθως χρησιμοποιείται για πρόσδεση μικρών αλιευτικών σκαφών. Ο χερσαίος χώρος των κρηπιδωμάτων είναι περιορισμένος περίπου στα 2.5m από την οριογραμμή του παραλιακού δρόμου και χρησιμοποιείται ως χώρος στάθμευσης τους χειμερινούς μήνες ή ως πεζόδρομος τους θερινούς μήνες.

Τα ανατολικά κρηπιδώματα έχουν συνολικό μήκος περίπου 121.5m και βρίσκονται ανατολικά του υπήνεμου προβλήτα. Το βάθος του νερού στα συγκεκριμένα κρηπιδώματα είναι μικρό, καθιστώντας αδύνατη την πρόσδεση σκαφών. Ο χερσαίος χώρος των κρηπιδωμάτων οριοθετείται από τον παραλιακό δρόμο και χρησιμοποιείται από τους χώρους εστίασης που βρίσκονται στο λιμένα.



Εικόνα 3. 13: Αεροφωτογραφία του λιμένα στις Καμάρες Ν. Σίφνου (Πηγή: Google Earth).

### 3.6.2. Περιγραφή των προβλημάτων της περιοχής

Το σημαντικότερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η περιοχή είναι η έλλειψη χερσαίου χώρου για την εξυπηρέτηση της κίνησης πεζών – επισκεπτών καθώς και της φορτοεκφόρτωσης οχημάτων. Οι ανεπαρκείς χερσαίες υποδομές του υφιστάμενου επιβατικού προβλήτα έχουν ως συνέπεια την επιβάρυνση του παραλιακού μετώπου με πλεονάζοντα οχήματα προκαλώντας σημαντική όχληση στην εύρυθμη λειτουργία του λιμένα. Δημιουργούνται σημαντικές καθυστερήσεις στη διαδικασία φόρτωσης – εκφόρτωσης οχημάτων με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη παραμονή των πλοίων στο λιμάνι. Η συνδυασμένη λειτουργία περισσότερων της μίας δραστηριότητας στα όρια του προβλήτα, όπως η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση οχηματαγωγών πλοίων, ταχύπλων επιβατικών ή κρουαζιερόπλοίων, δημιουργεί συνθήκες κορεσμού στους χερσαίους χώρους του λιμένα, με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης ατυχήματος και επιπλέον το μειωμένο επίπεδο εξυπηρέτησης των χρηστών.

Ακόμη, σημαντική είναι η έλλειψη χώρου κίνησης των πεζών κατά μήκος του παραλιακού μετώπου των κρηπιδωμάτων. Η σημαντική αυτή έλλειψη καθιστά δυσχερή και επικίνδυνη τη διέλευση των πεζών, καθώς για την προσέγγιση του επιβατικού προβλήτα υποχρεώνονται να κινηθούν επί του οδοστρώματος μαζί με τα οχήματα. Την περίοδο όπου η τουριστική κίνηση στο νησί είναι αυξημένη, η κατάσταση αυτή δημιουργεί αισθητά προβλήματα στην λειτουργία του λιμένα αλλά και στην ασφάλεια των ταξιδιωτών.

### 3.6.3. Κίνηση λιμένα

Η υφιστάμενη δυναμικότητα του λιμένα των Καμαρών έχει ως εξής (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου, 2017):

- Ένα (1) συμβατικό ή ταχύπλοο επιβατικό – οχηματαγωγό (Ε/Γ – Ο/Γ) μήκους έως 100m, το οποίο πρυμνοδετεί στη δυτική πλευρά του προσήνεμου προβλήτα.
- Ένα (1) ταχύπλοο επιβατικό πλοίο μήκους έως 60m ή ένα (1) κρουαζιερόπλοιο μήκους έως 90m, τα οποία πλαγιοδετούν στην ανατολική πλευρά του προσήνεμου προβλήτα.
- Ένα (1) φορτηγό πλοίο (χύδην) ή ένα δεξαμενόπλοιο μήκους έως 80m, τα οποία πλαγιοδετούν στην ανατολική πλευρά του προσήνεμου προβλήτα.
- Δύο (2) αλιευτικά σκάφη μήκους έως 20m και οκτώ (8) αλιευτικά σκάφη μήκους έως 15m στην ανατολική πλευρά, όταν δεν καταλαμβάνεται από άλλα πλοία.

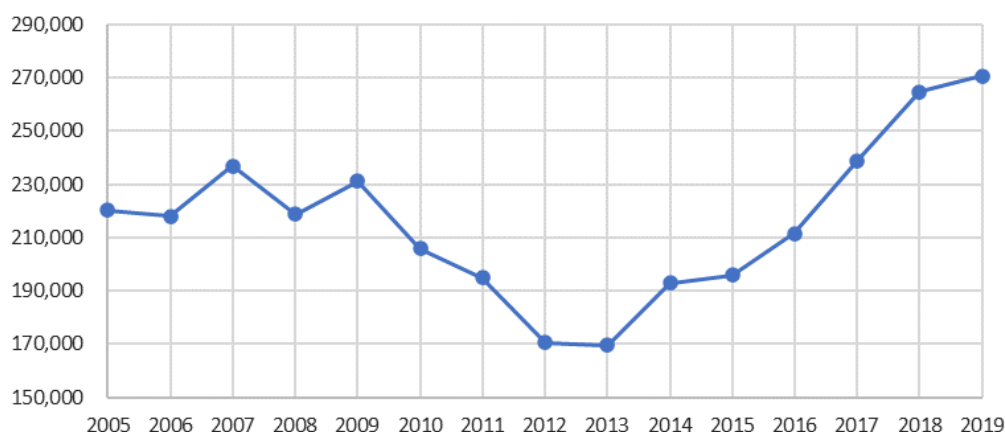
Στον Πίνακα 3.7 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα στοιχεία κίνησης επιβατών του λιμένα των ετών 2005-2019. Η προμήθεια των στοιχείων έγινε από την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία.

Πίνακας 3. 7: Στοιχεία κίνησης επιβατών λιμένα 2005-2019. (Πηγή: ΕΛΣΤΑΤ, επεξεργασία: συντάκτη)

ΕΤΟΣ	ΕΠΙΒΑΤΕΣ		
	ΑΠΟΒΙΒΑΣΘΕΝΤΕΣ	ΕΠΙΒΙΒΑΣΘΕΝΤΕΣ	ΣΥΝΟΛΟ
2005	110708	109624	220332
2006	105816	112200	218016
2007	119687	117282	236969
2008	107927	110929	218856
2009	114735	116466	231201
2010	106500	99315	205815
2011	98198	96750	194948
2012	84696	85843	170539
2013	86104	83545	169649
2014	96854	96183	193037
2015	99187	96697	195884
2016	104814	106680	211494
2017	120084	118721	238805
2018	133064	131665	264729
2019	134923	135681	270604

Στο Σχήμα 3.3 που ακολουθεί παρουσιάζεται η γενική διακίνηση επιβατών του λιμένα μεταξύ των ετών 2005-2019. Παρατηρείται ότι κατά την περίοδο 2009-2013 εμφανίζεται σημαντική μείωση, η οποία αντικατοπτρίζει το οικονομικό περιβάλλον της χώρας την περίοδο εκείνη. Το κλίμα, ωστόσο, φαίνεται να αντιστρέφεται από το 2013 και τα τελευταία έτη ο αριθμός των επιβατών φτάνει στο μέγιστο της περιόδου αναφοράς.

### Συνολική διακίνηση επιβατών



Σχήμα 3. 3: Πλήθος διακινηθέντων επιβατών.

Στον Πίνακα 3.8 που ακολουθεί παρουσιάζονται στοιχεία για την κίνηση οχημάτων και τον αριθμό κατάπλων του λιμένα μεταξύ των ετών 2008 – 2015.

Πίνακας 3. 8: Στοιχεία κίνησης επιβατών λιμένα 2005-2019. (Πηγή: CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου, 2017)

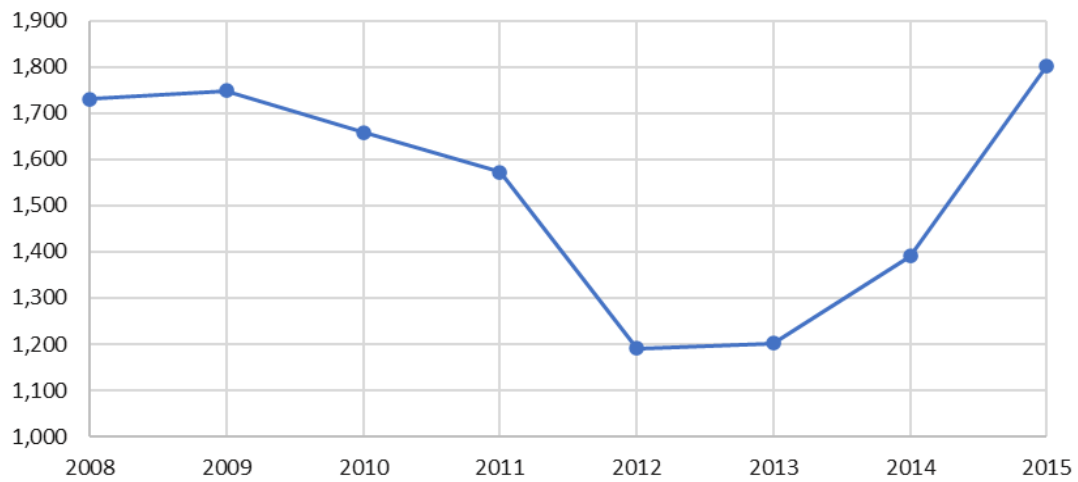
ΕΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΠΛΩΝ			ΔΙΑΚΙΝΗΘΕΝΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ		
	Ε/Γ – Ο/Γ	Φ/Γ	ΣΥΝΟΛΟ	ΦΟΡΤΗΓΑ	Ι.Χ.	ΣΥΝΟΛΟ
2008	1633	97	1730	4180	29685	33865
2009	1640	108	1748	3971	32397	36368
2010	1553	106	1659	3699	26997	30696
2011	1475	98	1573	3522	24564	28086
2012	1106	85	1191	2796	21959	24755
2013	1100	102	1202	2701	21027	23728
2014	1274	117	1391	2975	21637	24612
2015	1683	120	1803	3018	21828	24846

Στα Σχήματα 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται το πλήθος των κατάπλων των επιβατικών και των εμπορικών πλοίων. Σε ότι αφορά τον συνολικό αριθμό των κατάπλων παρατηρείται ότι ακολουθεί παρόμοια πορεία με την κίνηση των επιβατών κατά τα έτη 2011 – 2015. Ωστόσο, η συνολική κίνηση των οχημάτων δεν ακολουθεί το ίδιο μοτίβο κίνησης, καθώς η μείωσή τους ξεκινάει από το έτος 2009 και ανέρχεται ελάχιστα στα επόμενα έτη. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση του αριθμού των κατάπλων των ταχύπλων που μεταφέρουν αποκλειστικά επιβάτες και πλαγιοδετούν στην ανατολική παρειά του προσήνεμου προβλήτα.

Από το 2013 η κίνηση του νησιού δείχνει να αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τα παλαιότερα έτη. Η αυξητική αυτή τάση των κατάπλων και του συνολικού αριθμού των επισκεπτών του νησιού καθιστούν επιτακτική την ανάγκη επίλυσης των προβλημάτων του λιμένα για την ασφαλέστερη και γρηγορότερη εξυπηρέτηση των χρηστών και των οχημάτων.

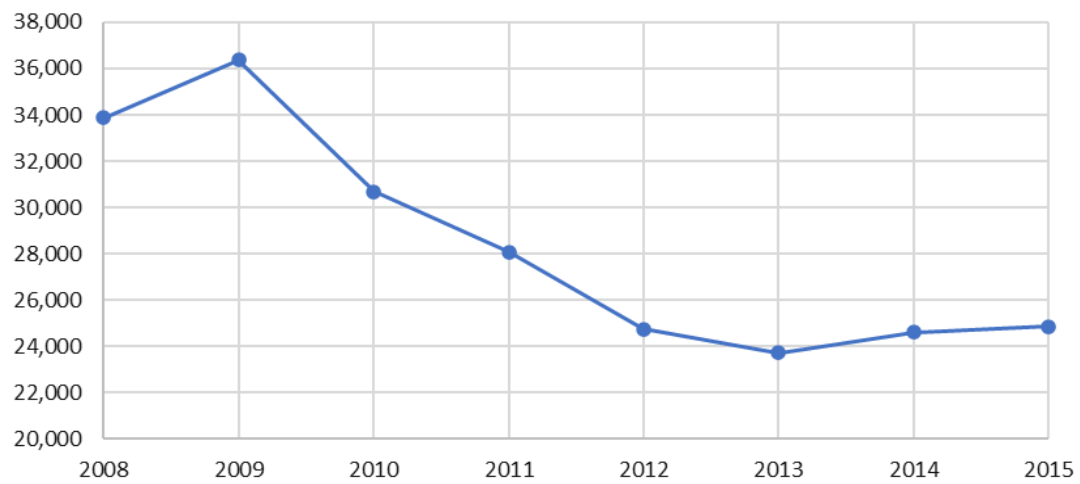


### Συνολικός αριθμός κατάπλων



Σχήμα 3. 4: Πλήθος κατάπλων επιβατικών – οχηματαγωγών και φορτηγών πλοίων.

### Συνολικός αριθμός διακινηθέντων οχημάτων



Σχήμα 3. 5: Πλήθος διακινηθέντων οχημάτων.

## 4. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

### 4.1. Προσδιορισμός κυματικού κλίματος

Για τον προσδιορισμό του κυματικού καθεστώτος έγινε χρήση της βάσης δεδομένων *Copernicus Marine Environmental Monitoring Service (CMEMS, marine.copernicus.eu)* της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συγκεκριμένα, έγινε χρήση του πακέτου *MEDSEA\_HINDCAST\_WAV\_006\_012*, το οποίο εκτείνεται σε 14 έτη ( 31 Ιανουαρίου 2006 – 1 Ιανουαρίου 2019) και αποτελείται από ωριαίες παρατηρήσεις σε οριζόντια ανάλυση  $1/24^\circ$  (~4,6 km), καλύπτοντας τη Μεσόγειο θάλασσα και φτάνοντας μέχρι και  $-18.125W$  στον Ατλαντικό Ωκεανό. Παράγεται από το σύστημα πρόβλεψης κυμάτων της Μεσογείου, που βασίζεται στον κύκλο WAM 4.5.4, ο οποίος έχει αναπτυχθεί ως ένθετο δύο υπολογιστικών κανάβων (αδρομερή και πυκνού) για την ορθή είσοδο της κυματικής διάδοσης από τον Βόρειο Ατλαντικό (North Atlantic) στη Μεσόγειο, μέσω του πορθμού του Γιβραλτάρ. Ο αδρομερής κανάβος καλύπτει τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό από  $75^\circ W$  έως  $10^\circ E$  και από  $75^\circ N$  έως  $10^\circ S$  σε ανάλυση  $1/6^\circ$ , ενώ ο πυκνός κανάβος καλύπτει τη Μεσόγειο από  $18.125^\circ W$  έως  $39.2917^\circ E$  και από  $30.1875^\circ N$  έως  $45.9792^\circ N$  με ανάλυση  $1/24^\circ$ . Το μοντέλο αυτό επιλύει το προγνωστικό μέρος του κυματικού φάσματος με 24 κατευθυντήρια και 32 λογαριθμικά καταναμημένα τμήματα συχνοτήτων (*Korres et al., 2009*).

Τα κυματικά δεδομένα που ελήφθησαν από την *CMEMS* είχαν τη μορφή NC αρχείων, οπότε ήταν απαραίτητη η επεξεργασία τους και η μετατροπή τους σε πίνακα. Αρχικά, έγινε εισαγωγή των δεδομένων στο ArcMap 10.5.1 και με τη χρήση των εργαλείων του προγράμματος πραγματοποιήθηκε μετατροπή των αρχείων NC σε πίνακες - χρονοσειρές με βάση τις συντεταγμένες. Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή των πινάκων - χρονοσειρών που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες του μέσου του ανοικτού ορίου του υπολογιστικού πεδίου. Τέλος, οι χρονοσειρές μετατράπηκαν σε αρχεία excel για περαιτέρω επεξεργασία, η οποία αναπτύσσεται στο *Κεφάλαιο 4.3*.

Για τον σκοπό της παρούσας εργασίας, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα από το τελευταίο έτος του πακέτου των δεκαεσσάρων ετών. Σύμφωνα με τους *de Queiroz et al. (2019)*, η μείωση της χρονικής διάρκειας των κυματικών καταγραφών, τα οποία αποτελούν τα δεδομένα εισόδου ενός μοντέλου, οδηγεί σε βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου. Παρόλο που τα δεδομένα μεγάλης χρονικής διάρκειας (μεγαλύτερη χρονοσειρά) μπορούν να επιφέρουν λεπτομερέστερη μορφολογική μεταβολή, ο υπολογιστικός φόρτος που τα συνοδεύει είναι αναλογικά πολύ μεγαλύτερος από το κέρδος της λεπτομέρειας που παράγεται. Ακόμη, η βελτίωση αυτή επιτυγχάνεται όταν η μείωση της διάρκειας του κυματικού κλίματος έχει ένα κατώτατο χρονικό όριο, το οποίο σύμφωνα με τους *Walstra et al. (2013)* βρίσκεται μεταξύ 10 και 20 ημερών. Για την τήρηση αυτού του κατώτατου χρονικού ορίου, επιλέχθηκε τα διατηρηθεί το κυματικό κλίμα του ενός από τα συνολικά 14 έτη και να αποτελέσει το έτος αναφοράς για την παρούσα εργασία.

Ως έτος αναφοράς νοείται το έτος που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση της πραγματικής κυματικής διαταραχής της περιοχής μελέτης και τα αποτελέσματα της προσομοίωσής της χρονοσειράς του αποτελούν τη βάση για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των σχηματισμένων χρονοσειρών. Για την επιλογή του έτους αναφοράς πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των ελαχίστων, μέσων και μέγιστων κυματικών χαρακτηριστικών του συνολικού δείγματος των 14<sup>ων</sup> ετών καθώς και κάθε μεμονωμένου έτους. Ακόμη, βρέθηκαν οι διευθύνσεις και οι περίοδοι που αντιστοιχούν στο ελάχιστο και στο μέγιστο καταγεγραμμένο ύψος κύματος του συνολικού δείγματος των 14<sup>ων</sup> ετών αλλά και κάθε μεμονωμένου έτους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των προαναφερθέντων στοιχείων κάθε έτους με τα συνολικά, ώστε να βρεθεί το έτος εκείνο που θα έχει

τα περισσότερα κοινά (ή σχετικά κοντινά) χαρακτηριστικά με το συνολικό δείγμα των 14<sup>ων</sup> ετών. Από την σύγκριση προέκυψε ότι το έτος 2018 – 2019, το οποίο είναι και το τελευταίο της συνολικής χρονοσειράς, παρουσιάζει συνολικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά στο αρχικό δείγμα δεδομένων και έτσι επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικό. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικότερα τα χαρακτηριστικά των 14<sup>ων</sup> ετών (Πίνακας 4. 1, Πίνακας 4. 3) και τα χαρακτηριστικά του έτους 2018 – 2019 (Πίνακας 4. 2, Πίνακας 4. 4).

Πίνακας 4. 1: Χαρακτηριστικά των κυματικών δεδομένων της χρονοσειράς των 14 ετών.

	Ύψος κύματος (m)	Διεύθυνση (°)	Περίοδος (s)
Ελάχιστο	0.09	0.00	1.25
Μέσο	0.91	180.50	4.74
Μέγιστο	4.51	359.99	12.29

Πίνακας 4. 2: Χαρακτηριστικά των κυματικών δεδομένων της χρονοσειράς ενός έτους 2018 – 2019.

	Ύψος κύματος (m)	Διεύθυνση (°)	Περίοδος (s)
Ελάχιστο	0.09	0.00	1.31
Μέσο	0.91	182.50	4.76
Μέγιστο	3.80	359.99	12.29

Από τους παραπάνω πίνακες είναι εμφανές ότι τα γενικά χαρακτηριστικά για το ύψος, την περίοδο και τη διεύθυνση των εισερχόμενων κυματισμών που αντιστοιχούν στο συνολικό δείγμα και στο τελευταίο έτος (2018 – 2019) είναι αρκετά κοντά. Πιο συγκεκριμένα οι ελάχιστες, οι μέσες και οι μέγιστες διευθύνσεις και περίοδοι των δύο χρονοσειρών σχεδόν ταυτίζονται. Παρατηρείται διαφορά στο μέγιστο ύψος κύματος των δύο χρονοσειρών, ωστόσο αυτή η διαφορά δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη.

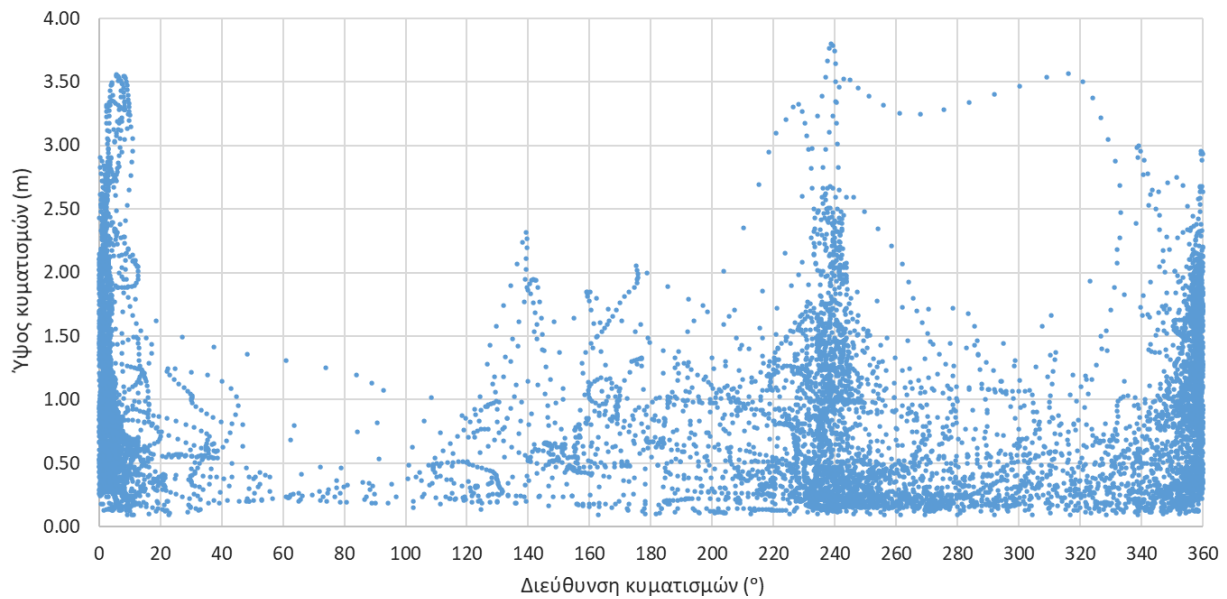
Πίνακας 4. 3: Διεύθυνση και περίοδος κύματος που αντιστοιχούν στο μέγιστο και στο ελάχιστο ύψος κύματος για τη χρονοσειρά των 14 ετών.

	Ύψος κύματος (m)	Διεύθυνση (°)	Περίοδος (s)
Ελάχιστο	0.09	247.90	2.94
Μέγιστο	4.51	231.26	5.23

Πίνακας 4. 4: Διεύθυνση και περίοδος κύματος που αντιστοιχούν στο μέγιστο και στο ελάχιστο ύψος κύματος για τη χρονοσειρά ενός έτους 2018 – 2019.

	Ύψος κύματος (m)	Διεύθυνση (°)	Περίοδος (s)
Ελάχιστο	0.09	259.94	1.83
Μέγιστο	3.80	238.72	4.22

Σε ότι αφορά τα ελάχιστα ύψη κύματος των δύο χρονοσειρών, αυτά εμφανίζονται στη δυτική – νοτιοδυτική διεύθυνση και η περίοδός τους αποκλίνει κατά 1.11s. Τα μέγιστα ύψη κύματος των δύο χρονοσειρών, αντιστοιχούν και αυτά στη δυτική – νοτιοδυτική διεύθυνση και η περίοδός τους παρουσιάζει διαφορά 1.01s. Οι διαφορές που επισημάνθηκαν δεν είναι σημαντικές και έτσι το έτος θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικό του συνολικού δείγματος.



*Εικόνα 4. 1: Χρονοσειρά παρατηρήσεων του έτους 2018 – 2019.*

Στη χρονοσειρά του έτους 2018 – 2019 παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό κυμάτων (76%) είναι βόρειας (180°) και δυτικής – νοτιοδυτικής διεύθυνσης (247.5°) με μεγάλα ύψη κύματος και στις δύο διευθύνσεις. Οι διευθύνσεις που πλήττουν την περιοχή του όρμου των Καμαρών είναι μεταξύ του εύρους Βορράς-Νότος (180° – 360°) και επομένως, για την περαιτέρω επεξεργασία του κυματικού κλίματος, διατηρήθηκαν τα δεδομένα που ανήκουν σε αυτό το εύρος.

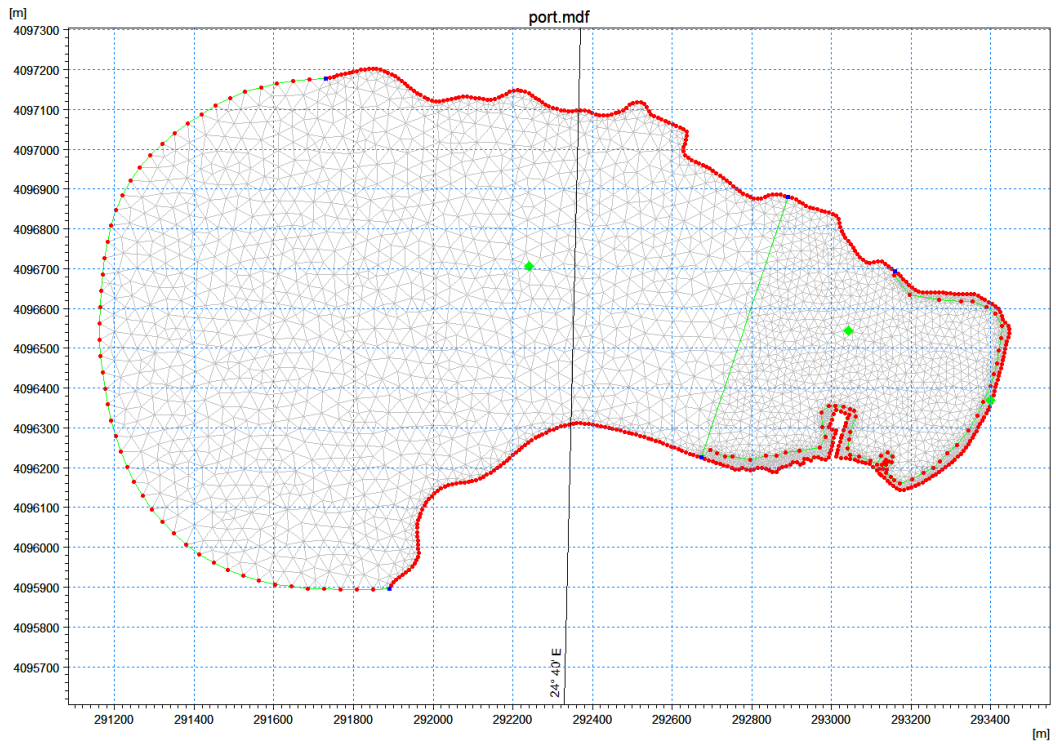
## 4.2. Δημιουργία του υπολογιστικού πεδίου

Η βαθυμετρία της περιοχής αποτυπώθηκε σε περιβάλλον GIS, συνδυάζοντας τα διαθέσιμα στοιχεία. Τα δεδομένα για τα βάθη στην περιοχή συλλέχθηκαν από την Υπηρεσία GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) και πραγματοποιήθηκε η σύγκριση και η διόρθωσή τους με βάση τα δεδομένα που βρίσκονται διαθέσιμα στο NAVIONICS Chart Viewer. Τα όρια της ακτογραμμής, ήταν διαθέσιμα στον ιστότοπο της Ελληνικής Γεωγραφικής Υπηρεσίας και ενημερώθηκαν, έχοντας ως βάση την πιο πρόσφατη αεροφωτογραφία της περιοχής από το Google Earth.

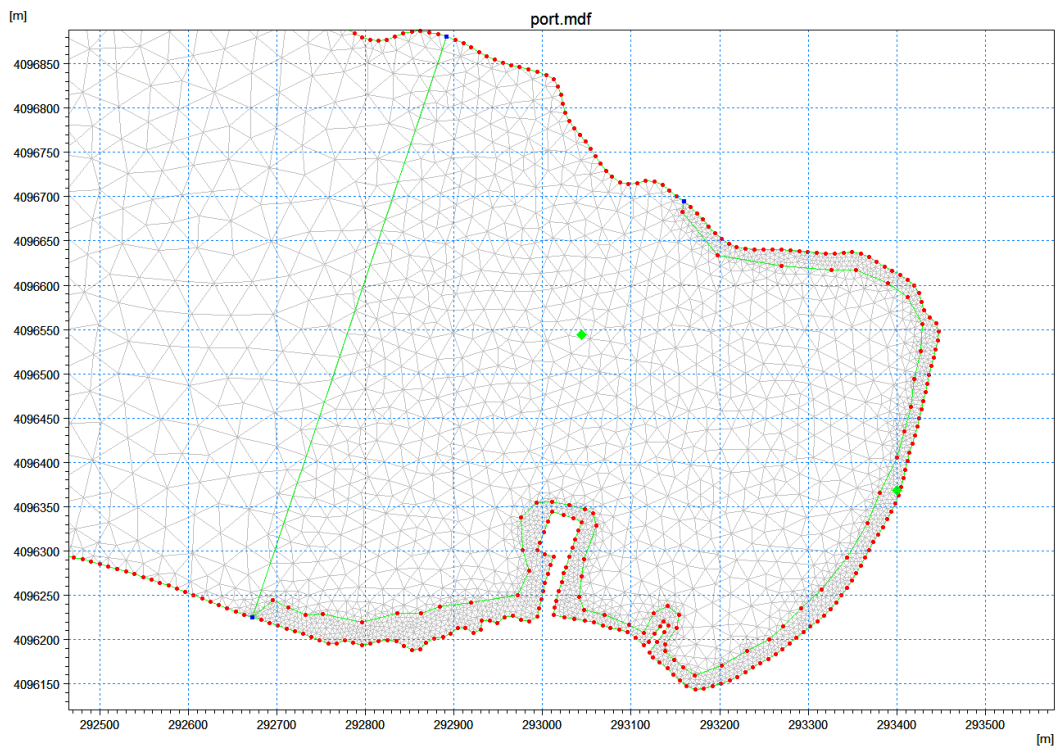
Η επεξεργασία της μορφής της ακτογραμμής πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα AutoCAD 2019 (Autodesk). Αρχικά έγινε η εισαγωγή του σχεδίου της ακτογραμμής και αποκόπηκε η επιθυμητή περιοχή, καθώς το αρχείο περιείχε την ακτογραμμή ολόκληρου του Ελλαδικού χώρου. Η περιοχή μελέτης απαιτούσε άμεση διόρθωση, καθώς η μορφή της ακτογραμμής ήταν χονδροειδώς σχεδιασμένη και οι λιμενικές εγκαταστάσεις είχαν σημαντικές ελλείψεις. Για την επανασχεδίαση της ακτογραμμής και του λιμένα, χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη αεροφωτογραφία της περιοχής (του έτους 2019), η οποία ήταν διαθέσιμη στο Google Earth. Πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή της στο AutoCAD και η προσαρμογή της στο σχέδιο της ακτογραμμής, ώστε να συμπίπτει όσο το δυνατόν καλύτερα η μορφή της ακτογραμμής της εικόνας με τη μορφή της ακτογραμμής τους σχεδίου. Στη συνέχεια, επανασχεδιάστηκε η περιοχή μελέτης με πολλή λεπτομέρεια τόσο στις εναλλαγές της μορφής της ακτής, όσο και στα λιμενικά έργα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των συντεταγμένων των σημείων της ακτογραμμής, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως όριο της περιοχής μελέτης αλλά και στην επεξεργασία της βαθυμετρίας.

Η επεξεργασία της βαθυμετρίας πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα ArcMap 10.5.1. Τα δεδομένα είχαν τη μορφή αρχείου tif (tagged image file), αποτελούσαν δηλαδή, εικόνα με πολύ υψηλή ανάλυση. Με χρήση των εργαλείων του προγράμματος, πραγματοποιήθηκε η μετατροπή των βαθών σε αρχείο με σημειακή πληροφορία. Έγινε η επιλογή τα σημεία να απέχουν λίγα μόνο μέτρα μεταξύ τους ώστε να είναι ακριβέστερη τόσο η μεταφορά από εικόνα σε σημείο, όσο και η παρεμβολή των βαθών μεταξύ των σημείων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή της επανασχεδιασμένης ακτογραμμής με σκοπό να αποτελέσει όριο για την περικοπή και επεξεργασία μόνο των απαραίτητων σημείων. Την εισαγωγή της ακτογραμμής ακολούθησε η εισαγωγή της εικόνας της βαθυμετρίας από το NAVIONICS, η οποία γεωαναφέρθηκε με βάση το σχέδιο της ακτής. Παρατηρήθηκε ότι ορισμένα βάθη από την υπηρεσία GEBCO απείχαν πολύ από τα πραγματικά, με αποτέλεσμα να απαιτείται η διόρθωση των συγκεκριμένων σημείων της βαθυμετρίας. Με χρήση των εργαλείων του προγράμματος ArcMap, πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των συντεταγμένων και των βαθών στο Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα Συντεταγμένων WGS (EPSG: 4326). Με το πέρας αυτής της διαδικασίας, τα αρχεία είχαν την μορφή xyz και περιείχαν σημειακή πληροφορία για τα βάθη και την ακτογραμμή του όρμου των Καμαρών.

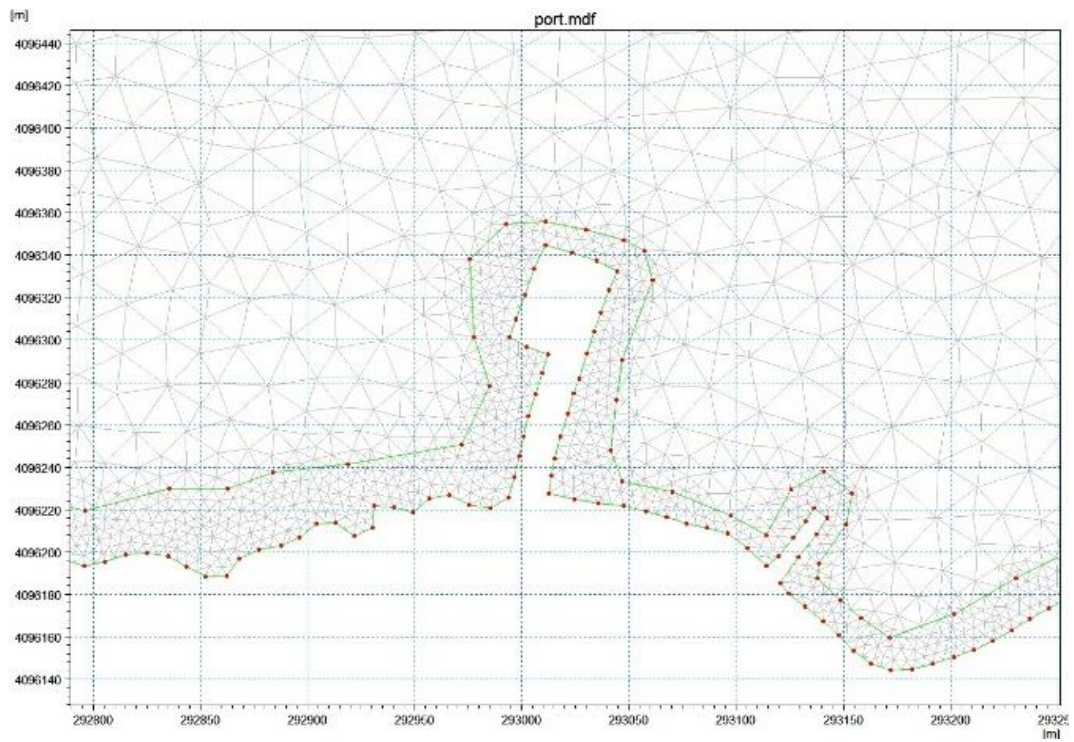
Για τη δημιουργία του τριγωνικού, μη δομημένου πλέγματος (flexible mesh) χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Mesh Generator του MIKE Zero. Ύστερα από επιλογή του επιθυμητού συστήματος συντεταγμένων, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή των σημείων του ορίου της ακτογραμμής (αρχείο xyz), με βάση το οποίο σχεδιάστηκε και αποθηκεύτηκε σε μορφή καμπύλης το κλειστό όριο της περιοχής. Ορίζοντας και την καμπύλη του ανοικτού ορίου της περιοχής μελέτης, δημιουργήθηκε ο τριγωνικός κানাβος της περιοχής (βλ. Σχήμα 4.1), ο οποίος πυκνώθηκε σε διαφορετικό βαθμό σε δύο περιοχές κοντά στο όριο της ακτογραμμής, για περισσότερη λεπτομέρεια (βλ. Σχήμα 4.2, 4.3). Στη συνέχεια, έγινε η εισαγωγή της βαθυμετρίας και πραγματοποιήθηκε παρεμβολή των σημειακών δεδομένων, με τελικό αποτέλεσμα το πλέγμα της περιοχής μελέτης (βλ. Σχήμα 4.4).



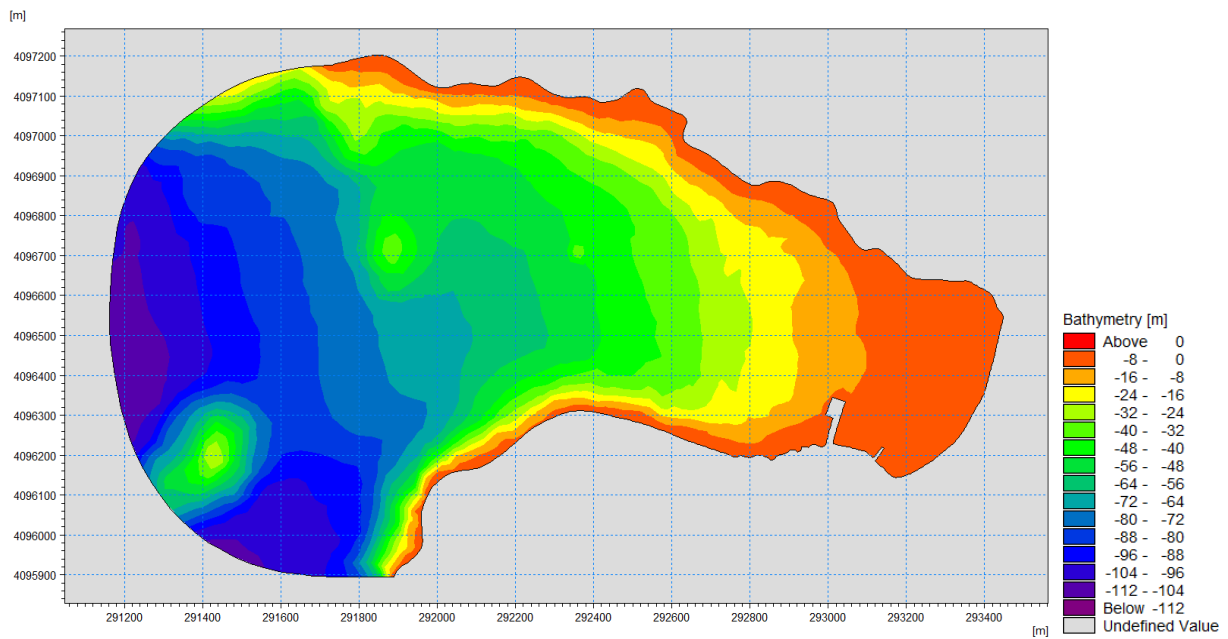
Σχήμα 4. 1: Απεικόνιση του τριγωνικού κανάβου.



Σχήμα 4. 2: Απεικόνιση του πυκνωμένου τριγωνικού κανάβου στην ευρύτερη περιοχή του λιμένα.



Σχήμα 4. 3: Λεπτομέρεια του πυκνωμένου τριγωνικού κανάβου κοντά στα λιμενικά έργα.



Σχήμα 4. 4: Βαθυμετρία υπολογιστικού πεδίου (MIKE21).

#### 4.2.1. Ανεξαρτησία αποτελεσμάτων από το υπολογιστικό πλέγμα

Δημιουργώντας τον παραπάνω κানাβο, προκύπτει ο προβληματισμός που σχετίζεται με την επιρροή του υπολογιστικού πλέγματος στα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτει η ανάγκη αξιολόγησης της επίπτωσης που έχει ο βαθμός πύκνωσης του πλέγματος στα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε κάθε πυκνωμένη περιοχή. Όπως παρουσιάστηκε στο Σχήμα 4. 2, ο κানাβος της περιοχής έχει τρεις διαφορετικές πυκνώσεις. Η πρώτη (επίπεδο 1) αντιστοιχεί στην ευρύτερη περιοχή μελέτης και ξεκινά από το ανοικτό όριο, η δεύτερη (επίπεδο 2) αντιστοιχεί στην ευρύτερη περιοχή των λιμενικών έργων και η τρίτη (επίπεδο 3) αντιστοιχεί στην περιοχή που βρίσκεται σε επαφή με την ακτή και τα λιμενικά έργα. Από το επίπεδο 1 στο επίπεδο 3, ο αριθμός των κόμβων του κανάβου αυξάνεται και άρα η μεταξύ τους έκταση (σε  $m^2$ ) μειώνεται. Για τον λόγο αυτό, εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές διαμορφώσεις του υπολογιστικού πλέγματος και προσομοιώθηκε ένα μέσο κύμα που παρατηρείται στην περιοχή μελέτης (δυτικής διεύθυνσης, με ύψος 2.00m). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της ταχύτητας των ρευμάτων που προέκυψε από τις προσομοιώσεις του αρχικά επιλεγμένου πλέγματος της περιοχής και των δύο εναλλακτικών. Οι πυκνώσεις του πλέγματος που δοκιμάστηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.5. Στην πρώτη εναλλακτική εφαρμόστηκε μεγαλύτερη έκταση μεταξύ των κόμβων σε όλα τα επίπεδα πύκνωσης και άρα αποτελείται από λιγότερους κόμβους, ενώ το αντίθετο εφαρμόστηκε στην δεύτερη εναλλακτική.

Πίνακας 4. 5: Πυκνώσεις του υπολογιστικού πλέγματος σε όρους έκτασης μεταξύ των κόμβων ( $m^2$ ).

	Αρχικό πλέγμα	Εναλλακτική 1	Εναλλακτική 2
Επίπεδο 1	1000	5000	500
Επίπεδο 2	300	500	50
Επίπεδο 3	20	100	10

Για κάθε νέο πλέγμα πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της κυματικής διαταραχής που προκαλείται από ένα μέσο κύμα της περιοχής μελέτης, το οποίο έχει δυτική διεύθυνση και ύψος 2.00m. Στη συνέχεια εξετάστηκε η ακρίβεια της κάθε εναλλακτικής πύκνωσης μέσω της εύρεσης του μέσου σφάλματος μεταξύ των προβλέψεων και των παρατηρήσεων. Στην περίπτωση αυτή, ως παρατηρήσεις θεωρούνται οι ταχύτητες ρευμάτων που προέκυψαν στο αρχικό πλέγμα ενώ ως προβλέψεις θεωρούνται οι ταχύτητες ρευμάτων των δύο εναλλακτικών πλεγμάτων. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των προβλέψεων χρησιμοποιήθηκε ο στατιστικός δείκτης ακριβείας RMSE (root mean square error), η περιγραφή του οποίου πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 2.3. Ο δείκτης RMSE θεωρείται συντηρητική έκφραση υπολογισμού του σφάλματος, καθώς επηρεάζεται πολύ από την ύπαρξη έστω και λίγων ακραίων τιμών. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του δείκτη RMSE, τόσο καλύτερη θεωρείται η ακρίβεια των προβλέψεων. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.6, ο δείκτης RMSE είναι πολύ μικρός και επομένως στα δύο εξεταζόμενα πλέγματα απαντώνται σχεδόν ίδια αποτελέσματα με το αρχικό πλέγμα. Τα πολύ μικρά σφάλματα που παρουσιάζονται πιθανόν να οφείλονται στην παρεμβολή που πραγματοποιήθηκε μεταξύ των κανάβων (προκειμένου να μπορούν να συγκριθούν τα αποτελέσματά τους). Τέλος, για την αναπαράσταση της περιοχής μελέτης επιλέγεται ο αρχικά σχεδιασμένος κানাβος διότι παρουσιάζει την καλύτερη εικόνα και γεωμετρία της ακτογραμμής.

Πίνακας 4. 6: Δείκτης RMSE για την αξιολόγηση της ακριβείας των εναλλακτικών πλεγμάτων.

Δείκτης	Εναλλακτική 1	Εναλλακτική 2
MSE	0.007	0.004
RMSE	0.086	0.063



### 4.3. Εφαρμογή μεθόδων σχηματοποίησης

Σε πρώτο χρόνο, έγινε η τοποθέτηση των δεδομένων, τα οποία αποτελούνται από 113232 ωριαίες παρατηρήσεις – ύψος κύματος, περίοδος κύματος, διεύθυνση κυμάτων – σε υπολογιστικό φύλλο Excel και κρατήθηκαν τα δεδομένα που αντιστοιχούν στο έτος 2018 – 2019 και μόνο στις διευθύνσεις που πλήττουν τον λιμένα (180° - 360°). Επιλέχθηκε το πιο πρόσφατο έτος παρατηρήσεων ως έτος αναφοράς, στο οποίο εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι σχηματοποίησης. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της χρονοσειράς του έτους 2018 – 2019 συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των σχηματοποιημένων χρονοσειρών και σχολιάστηκε η επίδοσή της κάθε μεθόδου.

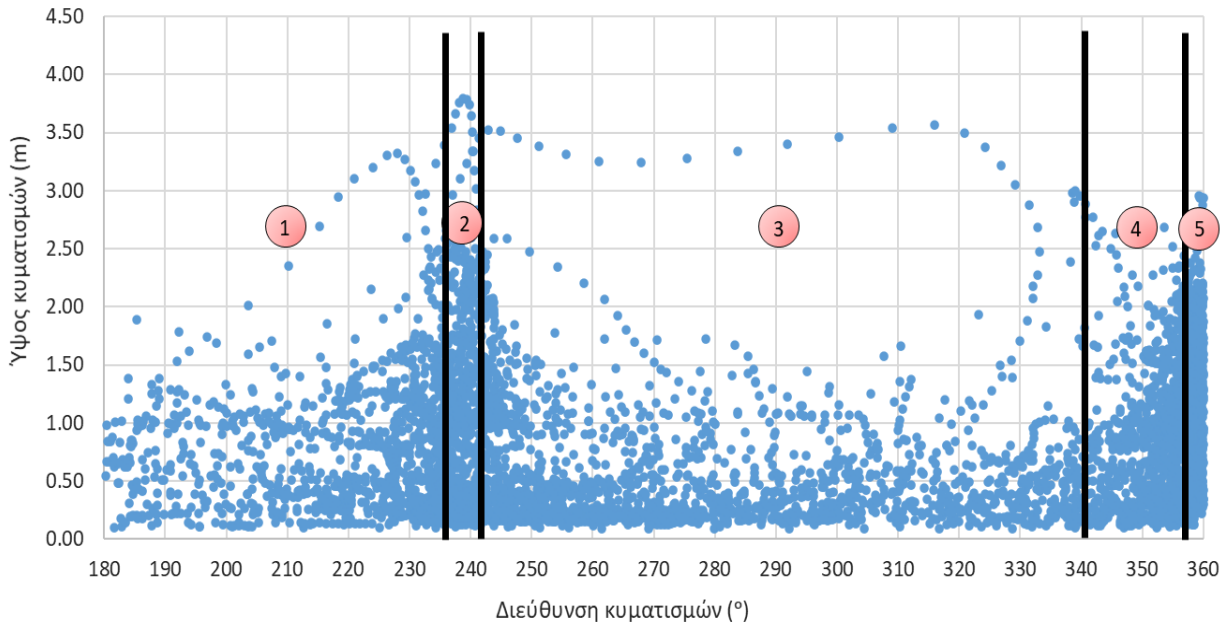
#### 4.3.1. Μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών (Energy Flux Method) – Σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους

Αρχικά, υπολογίστηκε η ροή ενέργειας για τις 8760 ωριαίες παρατηρήσεις διακριτών υψών κυμάτων του έτους αναφοράς και πραγματοποιήθηκε η σχηματοποίησή τους με βάση την μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο *Κεφάλαιο 2.2.2*. Η μέθοδος βασίζεται στη θεώρηση ότι στις μακροχρόνιες μορφοδυναμικές μεταβολές τον πιο σημαντικό ρόλο έχει η κατά μήκος της ακτής στερεομεταφορά, η οποία συνδέεται με τη ροή ενέργειας των κυμάτων. Η διαφορά των συγκρινόμενων μεθόδων σχηματοποίησης έγκειται στα κριτήρια με τα οποία γίνεται η κατηγοριοποίηση των δεδομένων σε κλάσεις και στον αριθμό των αντιπροσώπων που επιλέγεται. Σε όλες τις μεθόδους παρατηρείται αύξηση του σφάλματος, όσο μικραίνει ο αριθμός των δεδομένων και των αντιπροσώπων. Η μέθοδος Energy Flux παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα για μικρό αριθμό αντιπροσώπων, είναι απλή και είναι αντικειμενική, καθώς τα κυματικά δεδομένα χωρίζονται με βάση την κατανομή της ροής ενέργειας (*Benedet et al., 2016*).

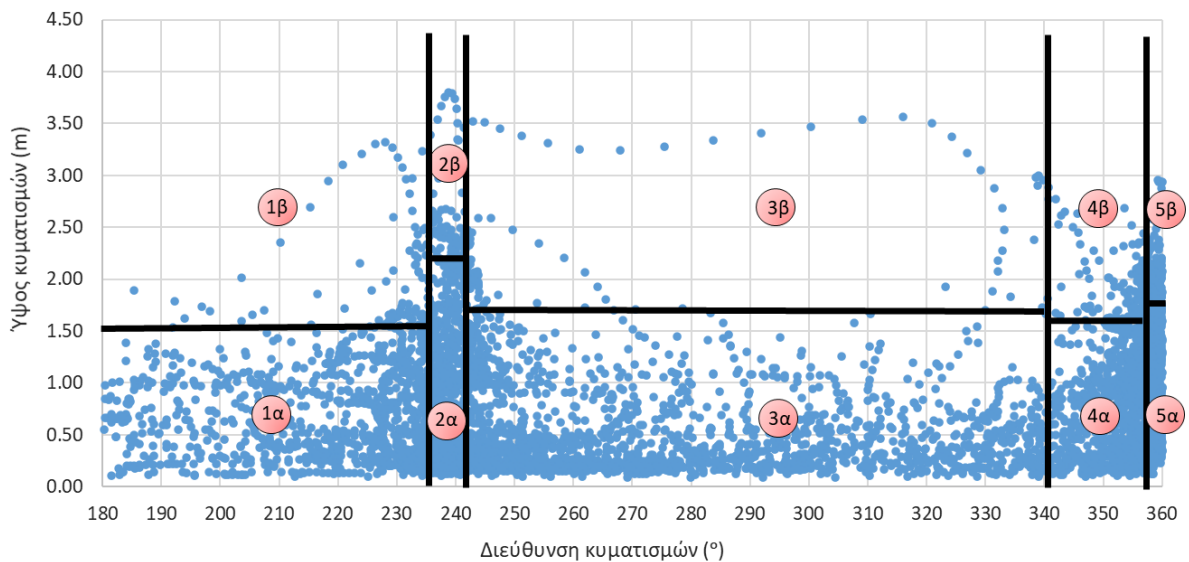
Μεθοδολογία:

- Πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή της χρονοσειράς των κυματικών δεδομένων του έτους αναφοράς σε αρχείο Excel.
- Κατασκευάστηκε η γραφική παράσταση του ύψους κύματος και των διευθύνσεων εισερχόμενων κυματισμών για τις επικρατέστερες διευθύνσεις της περιοχής από 180° - 360°.
- Υπολογίστηκε η συνολική ροή ενέργειας ( $P$ ) του δείγματος με χρήση του τύπου (2.1).
- Η χρονοσειρά των δεδομένων διαχωρίστηκε σε 5 κλάσεις κατά τη διεύθυνση των κυματισμών με βάση τη ροή ενέργειας. Αναλυτικότερα, ο διαχωρισμός έγινε έτσι ώστε κάθε κλάση να έχει ροή ενέργειας ίση με το  $1/5^\circ$  της συνολικής (βλ. *Εικόνα 4.2*). Οι ομάδες ονομάστηκαν από το 1 έως το 5 με φορά από τα αριστερά προς τα δεξιά.
- Η κάθε μία εκ των 5 κλάσεων χωρίστηκε κατά το ύψος κύματος σε δύο επιμέρους κλάσεις, ώστε η κάθε μία να έχει ροή ενέργειας ίση με το  $1/10^\circ$  της συνολικής. Με τον τρόπο αυτό, προέκυψαν στο σύνολο 10 κλάσεις. Οι νέες κλάσεις ονομάστηκαν με τον αριθμό της κατακόρυφης κλάσης στην οποία ανήκουν ακολουθούμενο από τα γράμματα  $\alpha$ ,  $\beta$  με φορά από τα χαμηλότερα ύψη κύματος στα υψηλότερα (βλ. *Εικόνα 4.3*).
- Υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι όλων των στοιχείων που ανήκουν σε κάθε κλάση κατά διεύθυνση, ύψος κύματος και περίοδο, οι οποίοι αποτελούν τους αντιπροσώπους κάθε κλάσης.
- Τοποθετήθηκαν οι αντιπρόσωποι στη γραφική παράσταση διεύθυνσης κυματισμών/ύψους κύματος (βλ. *Εικόνα 4.4*).

- Υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής με βάση τον αριθμό των στοιχείων της κάθε κλάσης ως προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων (βλ. Πίνακα 4.7).
- Τέλος υπολογίστηκε ο αριθμός εμφάνισης του κάθε αντιπροσώπου στην τελική χρονοσειρά ως η συχνότητα εμφάνισης του επί τον αριθμό των βημάτων από τα οποία θα αποτελείται η σχηματοποιημένη χρονοσειρά.



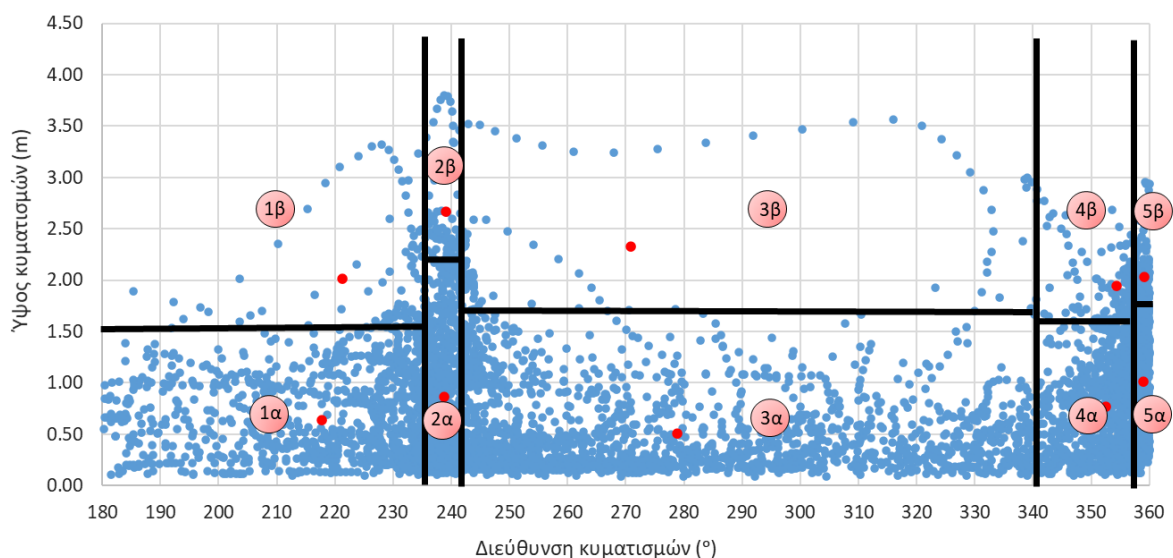
Εικόνα 4. 2: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση σε 5 κλάσεις – Μέθοδος Energy Flux.



Εικόνα 4. 3: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος σε 10 κλάσεις – Μέθοδος Energy Flux.

Πίνακας 4. 7: Αντιπρόσωποι των 10 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Energy Flux.

Κλάση	Αντιπρόσωποι					
	Ύψος κύματος (m)	Διεύθυνση (°)	Περίοδος (s)	Σύνολο	Συχνότητα εμφάνισης (%)	Αριθμός εμφανίσεων
1α	0.6393	217.7672	5.1840	1171	20.93%	603
1β	2.0146	221.3033	6.9255	115	2.06%	59
2α	0.8683	238.8419	5.1161	561	10.03%	289
2β	2.6714	239.0310	7.4159	66	1.18%	34
3α	0.5086	278.7668	4.3885	1726	30.85%	888
3β	2.3289	270.8933	6.8258	91	1.63%	47
4α	0.7709	352.5805	4.1402	968	17.30%	498
4β	1.9488	354.3825	5.9216	159	2.84%	82
5α	1.0086	359.0309	4.6207	591	10.56%	304
5β	2.0315	359.0533	6.0875	147	2.63%	76
<b>Σύνολο</b>				5595	100.00%	2880



Εικόνα 4. 4: Διαχωρισμός των δεδομένων σε 10 κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους – Μέθοδος Energy Flux.

Σε επόμενο στάδιο, δημιουργήθηκε χρονοσειρά συνολικής διάρκειας 1 ημέρας. Στόχος είναι η αναπαραγωγή του κυματικού καθεστώτος, απαρτιζόμενου από τους 10 αντιπροσώπους. Σε ότι αφορά το χρονικό βήμα, αυτό καθορίστηκε από την ανάγκη να εμφανίζεται ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης τουλάχιστον μία φορά, προκειμένου να θεωρηθεί αξιόπιστο το μοντέλο. Για μεγαλύτερη ακρίβεια επιλέχθηκε χρονικό βήμα ίσο με 30 δευτερόλεπτα, θεωρήθηκε η οποία οδηγεί σε χρονοσειρά 2880 παρατηρήσεων. Ο αριθμός εμφάνισης των αντιπροσώπων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης που υπολογίστηκε στο φύλλο Excel. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός εμφανίσεων του κάθε αντιπροσώπου ισούται με τον πολλαπλασιασμό της συχνότητας εμφάνισής του με το συνολικό αριθμό παρατηρήσεων της νέας χρονοσειράς. Για παράδειγμα, ο αντιπρόσωπος της έβδομης κλάσης (4α) που έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, ίση με 14,08%, τοποθετήθηκε

$0,1408 \cdot 2881 = 405,65 \approx 406$  φορές στη χρονοσειρά. Όμοια διαδικασία ακολουθείται σε όλες τις κλάσεις.

Σε ότι αφορά τις στήλες της παραγόμενης χρονοσειράς, αυτές χωρίζονται στο ύψος κύματος (Significant Wave Height), στην περίοδο (Wave period), στη διεύθυνση κύματος (Mean Wave Direction) και στον αδιάστατο συντελεστή διασποράς (Dimensionless Spreading Index), ο οποίος αποτελεί στατιστικό μέγεθος και απαιτείται ως παράμετρος εισόδου για το φάσμα του κύματος από το MIKE 21.

	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless Spreading Index [0]
0	22/06/2020 12:00:00	0.639282	5.18397	217.767	5
1	22/06/2020 12:00:30	0.639282	5.18397	217.767	5
2	22/06/2020 12:01:00	0.639282	5.18397	217.767	5
3	22/06/2020 12:01:30	0.639282	5.18397	217.767	5
4	22/06/2020 12:02:00	0.639282	5.18397	217.767	5
5	22/06/2020 12:02:30	0.639282	5.18397	217.767	5
6	22/06/2020 12:03:00	0.639282	5.18397	217.767	5
7	22/06/2020 12:03:30	0.639282	5.18397	217.767	5
8	22/06/2020 12:04:00	0.639282	5.18397	217.767	5
9	22/06/2020 12:04:30	0.639282	5.18397	217.767	5
10	22/06/2020 12:05:00	0.639282	5.18397	217.767	5

Εικόνα 4. 5: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά του σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος με 10 αντιπροσώπους, διάρκειας 1 ημέρας (MIKE Zero) – Μέθοδος Energy Flux.

Σε ότι αφορά τον χρόνο προσομοίωσης, αυτός καθορίστηκε από την απόφαση να εκτελεστεί το μοντέλο για διάρκεια προσομοίωσης ίσης με 1 ημέρα, με αντίστοιχο χρονικό βήμα 30 δευτερολέπτων.

**Time**

Simulation period

No. of time steps

Time step interval  [sec]

Simulation start date  [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Simulation end date  [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Εικόνα 4. 6: Χρονικό βήμα και συνολικός χρόνος προσομοίωσης – Μέθοδος Energy Flux.

Δεδομένου ότι ο αριθμός των χρονικών βημάτων ισούται με 2880 και το διάστημα μεταξύ των βημάτων είναι 30 δευτερόλεπτα, η προσομοίωση θα αναπαραστήσει 84600 δευτερόλεπτα (2880\*30) ή 1 ημέρα. Η συχνότητα εμφάνισης επιλέχθηκε ίση με 120, το οποίο συνεπάγεται την εκτύπωση 24 εξόδων του μοντέλου ανά 3600 δευτερόλεπτα ή 1 ώρα.

Τέλος, σε ότι αφορά τον συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac, αυτός έχει επιλεγεί ίσος με 365, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει 1 ημέρα, ωστόσο ο στόχος είναι τα αποτελέσματα να αναχθούν σε ετήσια βάση.

#### 4.3.2. Μέθοδος ροής ενέργειας κυματισμών (Energy Flux Method) – Σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους

Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ο αριθμός των αντιπροσώπων επηρεάζει το αποτέλεσμα των προσομοιώσεων, αναπτύσσεται η μέθοδος Ροής Ενέργειας και για τη σχηματοποίηση της χρονοσειράς με 30 αντιπροσώπους, αντί των 10 που υπολογίστηκαν στο *Κεφάλαιο 4.3.1*.

Μεθοδολογία:

- Κατασκευάστηκε η γραφική παράσταση του ύψους κύματος και των διευθύνσεων εισερχόμενων κυματισμών για τις επικρατέστερες διευθύνσεις της περιοχής από 180° - 360°.
- Υπολογίστηκε η συνολική ροή ενέργειας ( $P$ ) του δείγματος.
- Η χρονοσειρά των δεδομένων διαχωρίστηκε σε 15 κλάσεις κατά τη διεύθυνση των κυματισμών με βάση τη ροή ενέργειας. Αναλυτικότερα, ο διαχωρισμός έγινε έτσι ώστε κάθε κλάση να έχει ροή ενέργειας ίση με το 1/15° της συνολικής. Οι ομάδες ονομάστηκαν από το 1 έως το 15 με φορά από τα αριστερά προς τα δεξιά.
- Η κάθε μία εκ των 15 κλάσεων χωρίστηκε κατά το ύψος κύματος σε δύο επιμέρους κλάσεις, ώστε η κάθε μία να έχει ροή ενέργειας ίση με το 1/30° της συνολικής. Με τον τρόπο αυτό, προέκυψαν 30 κλάσεις. Οι νέες κλάσεις ονομάστηκαν με τον αριθμό της κατακόρυφης κλάσης στην οποία ανήκουν ακολουθούμενο από τα γράμματα  $\alpha$ ,  $\beta$  με φορά από τα χαμηλότερα ύψη κύματος στα υψηλότερα.
- Υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι όλων των στοιχείων που ανήκουν σε κάθε κλάση κατά διεύθυνση, ύψος κύματος και περίοδο, οι οποίοι αποτελούν τους αντιπροσώπους κάθε κλάσης.
- Τοποθετήθηκαν οι αντιπρόσωποι στη γραφική παράσταση διεύθυνσης κυματισμών/ύψους κύματος.
- Υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής με βάση των αριθμό των στοιχείων της κάθε κλάσης ως προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων (βλ. *Πίνακα 4.8*)
- Τέλος υπολογίστηκε ο αριθμός εμφάνισης του κάθε αντιπρόσωπου στην τελική χρονοσειρά ως η συχνότητα εμφάνισής του επί τον αριθμό των βημάτων από τα οποία θα αποτελείται η σχηματοποιημένη χρονοσειρά.

Η σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους έχει ως συνέπεια οι κλάσεις να έχουν μικρότερο πλάτος κατά διεύθυνση, συγκριτικά με τις κλάσεις της σχηματοποίησης των 10 αντιπροσώπων, με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται ο οπτικός διαχωρισμός τους. Συνεπώς, οι γραφικές παραστάσεις των δεδομένων της χρονοσειράς στις οποίες αναπαρίστανται οι κλάσεις και οι αντιπρόσωποί τους, δεν παρατίθενται.

Σε επόμενο στάδιο, δημιουργήθηκε χρονοσειρά συνολικής διάρκειας 1 ημέρας. Στόχος είναι η αναπαραγωγή του κυματικού καθεστώτος, απαρτιζόμενου από τους 30 αντιπροσώπους. Σε ότι αφορά το χρονικό βήμα, αυτό καθορίστηκε από την ανάγκη να εμφανίζεται ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης τουλάχιστον μία φορά, προκειμένου να θεωρηθεί αξιόπιστο το μοντέλο. Για μεγαλύτερη ακρίβεια επιλέχθηκε χρονικό βήμα ίσο με 30 δευτερόλεπτα, θεώρηση η οποία οδηγεί σε χρονοσειρά 2880 παρατηρήσεων. Ο αριθμός εμφάνισης των αντιπροσώπων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης, η οποία υπολογίστηκε στο φύλλο Excel. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός εμφανίσεων του κάθε αντιπρόσωπου ισούται με τον πολλαπλασιασμό της συχνότητας εμφάνισής του με το συνολικό αριθμό παρατηρήσεων της νέας χρονοσειράς. Για παράδειγμα, ο αντιπρόσωπος της δέκατης πέμπτης κλάσης (8α) που έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, ίση με 13,39%, τοποθετήθηκε  $0,1339 * 2881 = 385,77 \approx 386$  φορές στη χρονοσειρά. Όμοια διαδικασία ακολουθείται σε όλες τις κλάσεις.

Πίνακας 4. 8: Αντιπρόσωποι των 30 κλάσεων και συχνότητες εμφάνισής τους – Μέθοδος Energy Flux.

Κλάση	Αντιπρόσωποι					
	Ύψος κύματος (m)	Διεύθυνση (°)	Περίοδος (s)	Σύνολο	Συχνότητα εμφάνισης (%)	Αριθμός εμφανίσεων
1α	0.5933	200.4198	5.1853	472	8.44%	243
1β	1.6037	193.6729	6.7944	60	1.07%	31
2α	0.6816	227.8382	5.2934	347	6.20%	179
2β	2.1199	228.4605	7.0394	31	0.55%	16
3α	0.6692	234.2193	5.0135	329	5.88%	169
3β	2.3310	234.2236	7.0098	31	0.55%	16
4α	0.7978	237.1068	5.1503	235	4.20%	121
4β	2.6427	237.0840	7.4702	23	0.41%	12
5α	0.8973	239.0313	5.1301	172	3.07%	89
5β	2.6149	239.1295	7.2712	23	0.41%	12
6α	0.9019	240.7755	5.0822	160	2.86%	82
6β	2.7319	240.7856	7.5248	21	0.38%	11
7α	0.7974	243.3287	4.9848	243	4.34%	125
7β	2.1898	242.8388	6.8837	36	0.64%	19
8α	0.4370	258.9602	4.5293	749	13.39%	386
8β	1.9350	256.7517	7.2190	40	0.71%	21
9α	0.4858	310.5182	4.0206	730	13.05%	376
9β	2.9132	324.4803	6.6148	21	0.38%	11
10α	0.6431	348.6682	3.8875	460	8.22%	237
10β	2.0646	347.6474	5.9446	46	0.82%	24
11α	0.8012	355.2228	4.2086	310	5.54%	160
11β	1.8496	355.4736	5.8622	60	1.07%	31
12α	1.0057	357.3648	4.5809	198	3.54%	102
12β	1.9375	357.3253	5.9643	54	0.97%	28
13α	0.9772	358.3268	4.5808	211	3.77%	109
13β	1.9163	358.3122	5.9355	56	1.00%	29
14α	1.0548	359.0921	4.6952	182	3.25%	94
14β	2.0877	359.0590	6.1739	45	0.80%	23
15α	0.9883	359.7217	4.5814	199	3.56%	102
15β	2.0730	359.7254	6.1320	51	0.91%	26
<b>Σύνολο</b>				5595	100.00%	2880

Σε ότι αφορά τις στήλες της παραγόμενης χρονοσειράς, αυτές χωρίζονται στο ύψος κύματος (Significant Wave Height), στην περίοδο (Wave period), στη διεύθυνση κύματος (Mean Wave Direction) και στον αδιάστατο συντελεστή διασποράς (Dimensionless Spreading Index), ο οποίος αποτελεί στατιστικό μέγεθος και απαιτείται ως παράμετρος εισόδου για το φάσμα του κύματος από το MIKE 21.

	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless Spreading Index [0]
0	22/06/2020 12:00:00	0.593312	5.18534	200.42	5
1	22/06/2020 12:00:30	0.593312	5.18534	200.42	5
2	22/06/2020 12:01:00	0.593312	5.18534	200.42	5
3	22/06/2020 12:01:30	0.593312	5.18534	200.42	5
4	22/06/2020 12:02:00	0.593312	5.18534	200.42	5
5	22/06/2020 12:02:30	0.593312	5.18534	200.42	5
6	22/06/2020 12:03:00	0.593312	5.18534	200.42	5
7	22/06/2020 12:03:30	0.593312	5.18534	200.42	5
8	22/06/2020 12:04:00	0.593312	5.18534	200.42	5
9	22/06/2020 12:04:30	0.593312	5.18534	200.42	5
10	22/06/2020 12:05:00	0.593312	5.18534	200.42	5

Εικόνα 4. 7: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά του σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος με 30 αντιπροσώπους, διάρκειας 1 ημέρας (MIKE Zero) – Μέθοδος Energy Flux.

Σε ότι αφορά τον χρόνο προσομοίωσης, αυτός καθορίστηκε από την απόφαση να εκτελεστεί το μοντέλο για διάρκεια προσομοίωσης ίσης με 1 ημέρα, με αντίστοιχο χρονικό βήμα 30 δευτερολέπτων.

**Time**

Simulation period

No. of time steps

Time step interval  [sec]

Simulation start date  [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Simulation end date  [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Εικόνα 4. 8: Χρονικό βήμα και συνολικός χρόνος προσομοίωσης – Μέθοδος Energy Flux.

Δεδομένου ότι ο αριθμός των χρονικών βημάτων ισούται με 2880 και το διάστημα μεταξύ των βημάτων είναι 30 δευτερόλεπτα, η προσομοίωση θα αναπαραστήσει 84600 δευτερόλεπτα (2880\*30) ή 1 ημέρα. Η συχνότητα εμφάνισης επιλέχθηκε ίση με 120, το οποίο συνεπάγεται την εκτύπωση 24 εξόδων του μοντέλου ανά 3600 δευτερόλεπτα ή 1 ώρα.

Τέλος, σε ότι αφορά τον συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac, αυτός έχει επιλεγεί ίσος με 365, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει 1 ημέρα, ωστόσο ο στόχος είναι τα αποτελέσματα να αναχθούν σε ετήσια βάση.

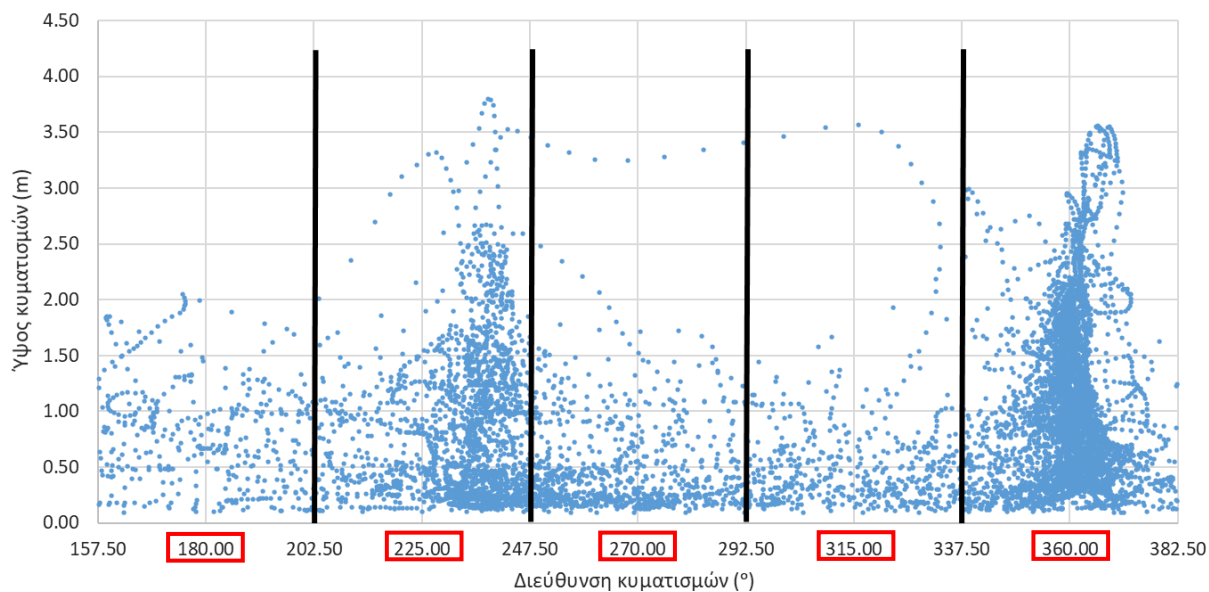
#### 4.3.3. Μέθοδος διαχωρισμού κυματικών χαρακτηριστικών σε διακριτά σενάρια

Σε αυτή τη μέθοδο καθορίστηκε αυθαίρετα ο αριθμός των κλάσεων τόσο κατά διεύθυνση όσο και κατά το ύψος κύματος. Οι οριζόντιες κλάσεις (κατά διεύθυνση) είναι πέντε, ενώ οι κατακόρυφες (καθ' ύψος) διαφέρουν ανάλογα το εύρος των υψών κύματος που αντιστοιχούν σε κάθε κλάση.

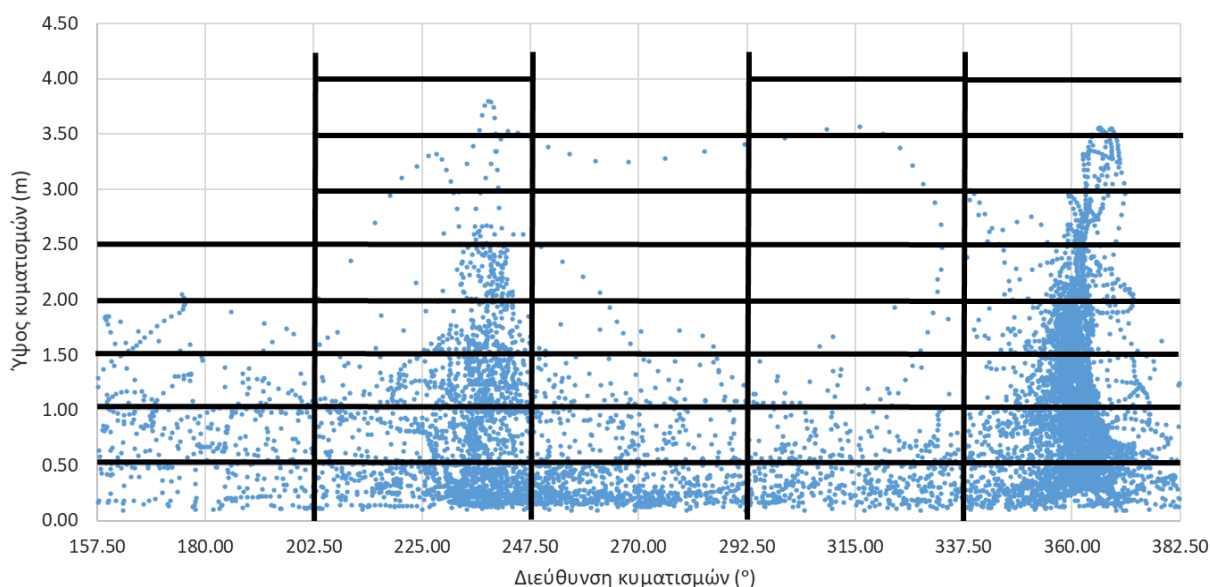
Μεθοδολογία:

- Έπειτα από την τοποθέτηση των κυματικών δεδομένων σε αρχείο Excel, έγινε η επιλογή να πραγματοποιηθεί επεξεργασία μόνο στα δεδομένα που αντιστοιχούν στις διευθύνσεις που πλήττουν τον λιμένα ( $180^{\circ}$ - $360^{\circ}$ ) και οι αντιπρόσωποι να αποτελούνται από τις πέντε κύριες διευθύνσεις  $180^{\circ}$ (Νότιος),  $225^{\circ}$ (Νοτιοδυτικός),  $270^{\circ}$ (Δυτικός),  $315^{\circ}$ (Βορειοδυτικός),  $360^{\circ}$ (Βόρειος).
- Καθορίστηκε αυθαίρετα πλάτος κλάσεων ίσο με  $45^{\circ}$ .
- Με δεδομένο ότι η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί ίσο πλάτος κλάσεων, ήταν απαραίτητη η εισαγωγή διευθύνσεων επιπλέον της αρχικής επιλογής, ώστε να τηρείται σε όλες τις κλάσεις το επιλεγμένο πλάτος. Πιο συγκεκριμένα, προστέθηκαν ακόμα τα δεδομένα που αντιστοιχούν στις διευθύνσεις μεταξύ  $157.5^{\circ} - 180^{\circ}$  και  $360^{\circ} - 382.5^{\circ}$  (ή αλλιώς  $0^{\circ} - 22.5^{\circ}$ ).
- Σύμφωνα με τα παραπάνω, χωρίστηκαν οι διευθύνσεις σε 5 κλάσεις.
- Η κάθε μια εκ των 5 κλάσεων χωρίστηκε περαιτέρω σε κλάσεις ανάλογα με το εύρος των υψών κύματος που της αντιστοιχούν, με δεδομένο ότι οι κλάσεις των υψών θα έχουν σταθερό πλάτος, ίσο με 0.5 m. Επομένως, οι κατακόρυφες κλάσεις διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον αριθμό των οριζόντιων κλάσεων που τους αντιστοιχούν, καθώς σε κάθε διεύθυνση το εύρος των υψών κύματος διαφέρει (βλ. *Εικόνα 4. 9*).
- Όπως επιλέχθηκε αρχικά, οι αντιπρόσωποι των διευθύνσεων είναι οι πέντε βασικές διευθύνσεις του εύρους Βορράς – Νότος. Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ  $157.5^{\circ}$  και  $202.5^{\circ}$ , ο αντιπρόσωπος είναι  $180^{\circ}$ , μεταξύ  $202.5^{\circ}$  και  $247.5^{\circ}$ , ο αντιπρόσωπος είναι  $225^{\circ}$ , κ.ο.κ.
- Οι αντιπρόσωποι των κλάσεων καθ' ύψος επιλέχθηκαν αυθαίρετα ως η μέγιστη τιμή της κάθε κλάσης.
- Οι αντιπροσωπευτικές τιμές της περιόδου του κύματος υπολογίζονται ως η μέση τιμή των στοιχείων που αντιστοιχούν στην κάθε κλάση.
- Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής τιμής ως ο αριθμός των στοιχείων της κλάσης προς το συνολικό αριθμό των παρατηρήσεων (βλ. *Πίνακα 4.9*)
- Τέλος υπολογίστηκε ο αριθμός εμφάνισης του κάθε αντιπροσώπου στην τελική χρονοσειρά ως η συχνότητα εμφάνισής του επί τον αριθμό των βημάτων από τα οποία θα αποτελείται η σχηματοποιημένη χρονοσειρά.





Εικόνα 4. 9: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διευθύνσεις σε 5 κλάσεις ίσου πλάτους 45° και οι αντιπρόσωποι.



Εικόνα 4. 10: Διαχωρισμός των κυμάτων κατά διευθύνσεις και καθ' ύψος σε 36 κλάσεις.

Σε επόμενο στάδιο, δημιουργήθηκε χρονοσειρά συνολικής διάρκειας 1 ημέρας. Στόχος είναι η αναπαραγωγή του κυματικού καθεστώτος, απαρτιζόμενο από τους 36 αντιπροσώπους που υπολογίστηκαν. Σε ότι αφορά το χρονικό βήμα, αυτό καθορίστηκε από την ανάγκη να εμφανίζεται ο αντιπρόσωπος της κάθε κλάσης τουλάχιστον μία φορά, προκειμένου να θεωρηθεί αξιόπιστο το μοντέλο. Για μεγαλύτερη ακρίβεια επιλέχθηκε χρονικό βήμα ίσο με 30 δευτερόλεπτα, θεωρήση η οποία οδηγεί σε χρονοσειρά 2880 παρατηρήσεων. Ο αριθμός εμφάνισης των αντιπροσώπων στη χρονοσειρά καθορίζεται από τη συχνότητα εμφάνισης, η οποία υπολογίστηκε στο φύλλο Excel. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός εμφανίσεων του κάθε αντιπροσώπου ισούται με τον πολλαπλασιασμό της συχνότητας εμφάνισής του με το συνολικό αριθμό παρατηρήσεων της νέας χρονοσειράς. Για παράδειγμα, αντιπρόσωπος της κλάσης με διεύθυνση 360° και ύψος κύματος 1.0m έχει τη

μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, ίση με 16,12% και τοποθετήθηκε  $0,1612 * 2881 = 464,42 \approx 464$  φορές στη χρονοσειρά. Όμοια διαδικασία ακολουθείται σε όλες τις κλάσεις.

Πίνακας 4. 9: Αντιπρόσωποι διευθύνσεων και υψών και συχνότητες εμφάνισής τους.

Αντιπρόσωπος					
Ύψος κύματος (m)	Διεύθυνση (°)	T (s)	Σύνολο	Συχνότητα εμφάνισης (%)	Αριθμός εμφανίσεων
0.50	180.00	4.90	120	1.46%	42
1.00	180.00	4.68	157	1.91%	55
1.50	180.00	5.75	82	1.00%	29
2.00	180.00	6.85	35	0.43%	12
2.50	180.00	6.93	2	0.02%	1
0.50	225.00	4.41	830	10.10%	291
1.00	225.00	5.56	447	5.44%	157
1.50	225.00	5.65	416	5.06%	146
2.00	225.00	6.20	172	2.09%	60
2.50	225.00	6.95	102	1.24%	36
3.00	225.00	7.79	27	0.33%	9
3.50	225.00	8.96	16	0.19%	6
4.00	225.00	8.64	10	0.12%	4
0.50	270.00	4.08	580	7.06%	203
1.00	270.00	5.45	161	1.96%	56
1.50	270.00	6.08	82	1.00%	29
2.00	270.00	7.29	16	0.19%	6
2.50	270.00	7.63	4	0.05%	1
3.00	270.00	0.00	0	0.00%	0
3.50	270.00	7.47	8	0.10%	3
0.50	315.00	3.43	311	3.78%	109
1.00	315.00	4.71	144	1.75%	50
1.50	315.00	4.93	38	0.46%	13
2.00	315.00	5.19	8	0.10%	3
2.50	315.00	6.16	4	0.05%	1
3.00	315.00	6.93	2	0.02%	1
3.50	315.00	6.93	5	0.06%	2
4.00	315.00	6.93	2	0.02%	1
0.50	360.00	3.28	1067	12.98%	374
1.00	360.00	4.15	1325	16.12%	464
1.50	360.00	5.04	862	10.49%	302
2.00	360.00	5.70	669	8.14%	234
2.50	360.00	6.23	294	3.58%	103
3.00	360.00	6.79	135	1.64%	47
3.50	360.00	7.56390	76	0.92%	27
4.00	360.00	7.62777	11	0.13%	4
<b>Σύνολο</b>			8220	100.00%	2880

Σε ότι αφορά τις στήλες της παραγόμενης χρονοσειράς, αυτές χωρίζονται στο ύψος κύματος (Significant Wave Height), στην περίοδο (Wave period), στη διεύθυνση κύματος (Mean Wave Direction) και στον αδιάστατο συντελεστή διασποράς (Dimensionless Spreading Index), ο οποίος αποτελεί στατιστικό μέγεθος και απαιτείται ως παράμετρος εισόδου για το φάσμα του κύματος από το MIKE 21.

	Time	1:Wave Height [meter]	2:Wave Period [second]	3:Wave Direction [degree]	4:Dimensionless Spreading Index [0]
0	22/06/2020 12:00:00	0.5	4.90147	180	5
1	22/06/2020 12:00:30	0.5	4.90147	180	5
2	22/06/2020 12:01:00	0.5	4.90147	180	5
3	22/06/2020 12:01:30	0.5	4.90147	180	5
4	22/06/2020 12:02:00	0.5	4.90147	180	5
5	22/06/2020 12:02:30	0.5	4.90147	180	5
6	22/06/2020 12:03:00	0.5	4.90147	180	5
7	22/06/2020 12:03:30	0.5	4.90147	180	5
8	22/06/2020 12:04:00	0.5	4.90147	180	5
9	22/06/2020 12:04:30	0.5	4.90147	180	5
10	22/06/2020 12:05:00	0.5	4.90147	180	5

Εικόνα 4. 11: Απόσπασμα από τη χρονοσειρά του σχηματοποιημένου κυματικού καθεστώτος με 36 αντιπροσώπους, διάρκειας 1 ημέρας (MIKE Zero).

Σε ότι αφορά τον χρόνο προσομοίωσης, αυτός καθορίστηκε από την απόφαση να εκτελεστεί το μοντέλο για διάρκεια προσομοίωσης ίσης με 1 ημέρα, με αντίστοιχο χρονικό βήμα 30 δευτερολέπτων.

**Time**

Simulation period

No. of time steps

Time step interval  [sec]

Simulation start date  [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Simulation end date  [dd/mm/yyyy hh:mm:ss]

Εικόνα 4. 12: Χρονικό βήμα και συνολικός χρόνος προσομοίωσης.

Δεδομένου ότι ο αριθμός των χρονικών βημάτων ισούται με 2880 και το διάστημα μεταξύ των βημάτων είναι 30 δευτερόλεπτα, η προσομοίωση θα αναπαραστήσει 84600 δευτερόλεπτα (2880\*30) ή 1 ημέρα. Η συχνότητα εμφάνισης επιλέχθηκε ίση με 120, το οποίο συνεπάγεται την εκτύπωση 24 εξόδων του μοντέλου ανά 3600 δευτερόλεπτα ή 1 ώρα.

Τέλος, σε ότι αφορά τον συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac, αυτός έχει επιλεγεί ίσος με 365, καθώς το μοντέλο προσομοιώνει 1 ημέρα, ωστόσο ο στόχος είναι τα αποτελέσματα να αναχθούν σε ετήσια βάση.

#### 4.3.4. Σύγκριση μεθόδων σχηματοποίησης

Πριν την έναρξη των προσομοιώσεων, είναι σημαντικό να τονιστούν οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των παραπάνω μεθόδων κατά τη διαδικασία χωρισμού σε κλάσεις και του υπολογισμού των αντιπροσώπων, καθώς οι εκάστοτε αντιπρόσωποι των σχηματοποιημένων χρονοσειρών επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

Πίνακας 4. 10: Μέσα ύψη κύματος ανά κατακόρυφη κλάση της σχηματοποίησης με 10 αντιπρόσωπους – Μέθοδος Energy Flux.

Κλάση	Μέθοδος Energy Flux – 10 αντιπρόσωποι	
	Μέσο ύψος κύματος (m)	Εύρος διευθύνσεων (°)
1	0.76	180.00 – 236.10
2	1.06	236.00 – 241.70
3	0.60	241.70 – 340.60
4	0.94	340.60 – 357.90
5	1.21	357.90 – 360.00

Πίνακας 4. 11: Μέσα ύψη κύματος ανά κατακόρυφη κλάση της σχηματοποίησης με 30 αντιπρόσωπους – Μέθοδος Energy Flux.

Κλάση	Μέθοδος Energy Flux – 30 αντιπρόσωποι	
	Μέσο ύψος κύματος (m)	Εύρος διευθύνσεων (°)
1	0.71	180.00 – 220.82
2	0.80	220.82 – 232.06
3	0.81	232.06 – 235.91
4	0.96	235.91 – 238.20
5	1.10	238.20 – 239.94
6	1.11	239.94 – 241.62
7	0.98	241.62 – 245.27
8	0.51	245.27 – 278.27
9	0.55	278.27 – 340.27
10	0.77	340.27 – 353.49
11	0.97	353.49 – 356.73
12	1.21	356.73 – 357.88
13	1.17	357.88 – 358.72
14	1.26	358.72 – 359.39
15	1.21	359.39 – 360.00

Πίνακας 4. 12: Μέσα ύψη κύματος ανά κατακόρυφη κλάση – Διαχωρισμός σε διακριτά σενάρια.

Κλάση	Διαχωρισμός σε διακριτά σενάρια	
	Μέσο ύψος κύματος (m)	Εύρος διευθύνσεων (°)
1	0.80	157.50 – 202.50
2	0.88	202.50 – 247.50
3	0.50	247.50 – 292.50
4	0.55	292.50 – 337.50
5	1.03	337.50 – 382.50 (ή 22.50)

Σε ότι αφορά το διαχωρισμό κατά διεύθυνση παρατηρούνται τα εξής:

- Στη μέθοδο Ροής Ενέργειας για την απεικόνιση της χρονοσειράς με 10 αντιπροσωπευτικές τιμές, η 1<sup>η</sup> κλάση εμφανίζει μέσο ύψος κύματος ίσο με 0.76m, το οποίο με βάση την εξίσωση (2.1) για τον υπολογισμό της ροής ενέργειας, συνεπάγεται τη συσσώρευση πολλών στοιχείων στην 1<sup>η</sup> κλάση, ώστε να φτάσει την αθροιστική ροή ενέργειας  $(P)/5$ . Ομοίως, η 3<sup>η</sup> κλάση με μέσο ύψος κύματος 0.60m, παρουσιάζει μεγάλο πλάτος καθώς απαιτεί μεγάλο πλήθος στοιχείων, ώστε η αθροιστική ροή ενέργειας των γεγονότων που εμπεριέχει να ισούται με  $(P)/5$ . Σε ότι αφορά τις υπόλοιπες κλάσεις, παρατηρείται ότι έχουν μικρό πλάτος κατά διεύθυνση και συνεπώς λιγότερα στοιχεία, καθώς αποτελούνται από γεγονότα με μεγάλο ύψος κύματος. Επομένως, όταν εμφανίζεται κλάση διευθύνσεων με πολλά στοιχεία, συνεπάγεται ότι τα στοιχεία αυτά έχουν μικρό ύψος κύματος και άρα μικρή αντιπροσωπευτική τιμή για το ύψος κύματος. Ακόμη, η ύπαρξη πολλών στοιχείων συνεπάγεται τη μεγάλη συχνότητα εμφάνισης του αντιπροσώπου στην τελική χρονοσειρά και άρα την αντιστοίχιση σε αυτόν, μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων. Επομένως, είναι αναμενόμενο τα περισσότερα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να μην εμφανίζουν έντονα κυματικά φαινόμενα, καθώς θα προκαλούνται από αντιπροσώπους μικρού μέτρου.
- Στη μέθοδο Ροής Ενέργειας για την απεικόνιση της χρονοσειράς με 30 αντιπροσωπευτικές τιμές, η κατανομή των υψών κύματος στις διευθύνσεις είναι παρόμοια με την προηγούμενη περιγραφή, με μόνη διαφορά τον διαχωρισμό σε κλάσεις μικρότερου πλάτους κατά διεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, οι κλάσεις με μεγαλύτερο πλάτος εμφανίζουν σχετικά μικρό μέσο ύψος κύματος. Οι κλάσεις στις οποίες αντιστοιχούν μεγάλα ύψη κύματος, εμφανίζουν μικρά πλάτη και ανήκουν στις δυτικές – νοτιοδυτικές και βόρειας διευθύνσεις.
- Στον διαχωρισμό των κυματικών δεδομένων σε διακριτά σενάρια, οι κλάσεις κατά διεύθυνση είναι εξ' ορισμού ισοπλατείς (45° η κάθεμία), συνεπώς ο διαχωρισμός τους δεν επηρεάζεται από τα ύψη κυμάτων. Ωστόσο, η συχνότητα εμφάνισης της κάθε αντιπροσωπευτικής διεύθυνσης καθορίζεται από το πλήθος των στοιχείων που περιέχει. Οπότε η ύπαρξη περισσότερων στοιχείων στην κλάση συνεπάγεται τον μεγαλύτερο αριθμό εμφανίσεων της συγκεκριμένης διεύθυνσης στην τελική χρονοσειρά.

Σε ότι αφορά το διαχωρισμό κατά το ύψος κύματος:

- Στη μέθοδο Ροής Ενέργειας η κλάση α περιέχει σε όλες τις περιπτώσεις περισσότερα στοιχεία και μικρότερο μέσο ύψος κύματος σε σχέση με την κλάση β. Η παρατήρηση αυτή είναι αναμενόμενη, καθώς η πρώτη συγκεντρώνει στοιχεία με μικρότερο ύψος κύματος από τα αντίστοιχα της δεύτερης. Δεδομένου ότι ο καθ' ύψος διαχωρισμός εξαρτάται από τη ροή ενέργειας  $(P)/5$ , η οποία χωρίζεται ισόποσα στις δύο κλάσεις, είναι επόμενο η κλάση α να απαιτεί περισσότερα δεδομένα σε σχέση με τη β, ώστε να συγκεντρώσει ροή ενέργειας ίση με  $(P)/10$ . Με το ίδιο σκεπτικό που αναλύθηκε κατά τον διαχωρισμό σε διευθύνσεις, η ύπαρξη περισσότερων στοιχείων (εδώ στις κλάσεις α) συνεπάγεται μεγαλύτερο αριθμό εμφανίσεων του αντιπροσώπου της κλάσης στην τελική χρονοσειρά και άρα την αντιστοίχιση σε αυτόν, μεγάλου αριθμού αποτελεσμάτων. Επομένως, είναι αναμενόμενο τα περισσότερα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να μην εμφανίζουν έντονα κυματικά φαινόμενα, καθώς θα προκαλούνται από αντιπροσώπους μικρού μέτρου.
- Στη μέθοδο διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια, ο διαχωρισμός καθ' ύψος εξαρτάται από το εύρος υψών της κάθε κατακόρυφης κλάσης και από το επιλεγμένο πλάτος διαχωρισμού. Όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των υψών κύματος, τόσες περισσότερες θα είναι και οι κλάσεις στις οποίες θα επιμεριστεί.

Σε ότι αφορά τον υπολογισμό των αντιπροσώπων:

- Στη μέθοδο διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια προκύπτουν κλάσεις μεγάλου εύρους συγκριτικά με τις κλάσεις που προκύπτουν από την μέθοδο Energy Flux, με συνέπεια τη μεγάλη διαφορά μεταξύ των αντιπροσώπων κατά διεύθυνση και καθ' ύψος κύματος. Λόγω της αυθαίρετης επιλογής του πλάτους των κλάσεων στη μέθοδο διακριτών σεναρίων, εμφανίζονται σε αυτήν αντιπρόσωποι με μεγάλη απόκλιση από τους αντιπροσώπους της Energy Flux. Πιο συγκεκριμένα εμφανίζονται αντιπρόσωποι με διεύθυνση  $180^\circ$  και ύψη κύματος μεγαλύτερα των 3.00m, ενώ οι αντιπρόσωποι που προέκυψαν από τη μέθοδο ροής ενέργειας κυμαίνονται μεταξύ των διευθύνσεων  $190^\circ - 360^\circ$  και των υψών 0.50 – 2.90m. Συνεπώς, τα κύματα που θα δεχτεί το πρόγραμμα ως δεδομένα εισόδου θα έχουν σημαντική διαφορά στις διευθύνσεις και στα ύψη κύματος.

Αξίζει να σχολιασθεί ότι και στην πλήρη χρονοσειρά εμφανίζονται μεμονωμένα ύψη κύματος εκτός του εύρους 0.50 – 2.90m. Ωστόσο, η σχηματοποίηση σε διακριτά κυματικά σενάρια χωρίζει το ύψος κύματος σε κλάσεις ανά 0.50m και θέτει για αυτές ως αντιπρόσωπο το μέγιστο ύψος της κάθε κλάσης. Επομένως, αν για παράδειγμα η κλάση υψών μεταξύ 2.50m – 3.00m εμπεριέχει πολλά ύψη κύματος κοντά στα 2.50m και μόνο ένα αγγίζει τα 3.00m, ο αντιπρόσωπος της κλάσης θα ισούται με 3.00m και θα τοποθετηθεί στη νέα χρονοσειρά τόσες φορές, όσο αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης όλων των τιμών της κλάσης. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι αυτή η ακραία τιμή θα εμφανιστεί πολλές φορές στη νέα χρονοσειρά, προκαλώντας σημαντικές μορφολογικές μεταβολές, ενώ στην πλήρη χρονοσειρά θα εμφανιζόταν μόνο μία και ενδεχομένως να μην επηρέαζε σημαντικά τη κυματική διαταραχή της περιοχής.

- Η μέθοδος Energy Flux για τη σχηματοποίηση του κυματικού κλίματος με 30 αντιπροσώπους παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά αλλά με περισσότερη λεπτομέρεια διαχωρισμού σε σχέση με τη σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους. Αυτό συνεπάγεται λεπτομερέστερη χρονοσειρά δεδομένων εισόδου στο MIKE 21 και άρα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τα αποτελέσματα της χρονοσειράς με 10 αντιπροσώπους.
- Τέλος, σημειώνεται ότι οι δυτικοί – νοτιοδυτικοί και οι βόρειοι άνεμοι που είναι οι πιο ισχυροί του κυματικού κλίματος (διότι έχουν μεγάλα ύψη κύματος) ανήκουν στις ενδιάμεσες και τελευταίες κλάσεις των σχηματοποιήσεων, αντίστοιχα. Ωστόσο, ο προσανατολισμός της περιοχής μελέτης την καθιστά ευαίσθητη στις επιρροές των δυτικών – νοτιοδυτικών ανέμων, με αποτέλεσμα να αναμένεται η εμφάνιση έντονων φαινομένων στα ενδιάμεσα βήματα της προσομοίωσης. Επομένως, εκτός της ανάλυσης του τελευταίου χρονικού βήματος, το οποίο αντιστοιχεί στο πέρας του ενός έτους, θα ήταν σκόπιμο να αναλυθούν και τα ενδιάμεσα βήματα της προσομοίωσης στα οποία εμφανίζονται έντονα κυματικά φαινόμενα (υψηλές ταχύτητες ρευμάτων και μεγάλα ύψη κύματος).

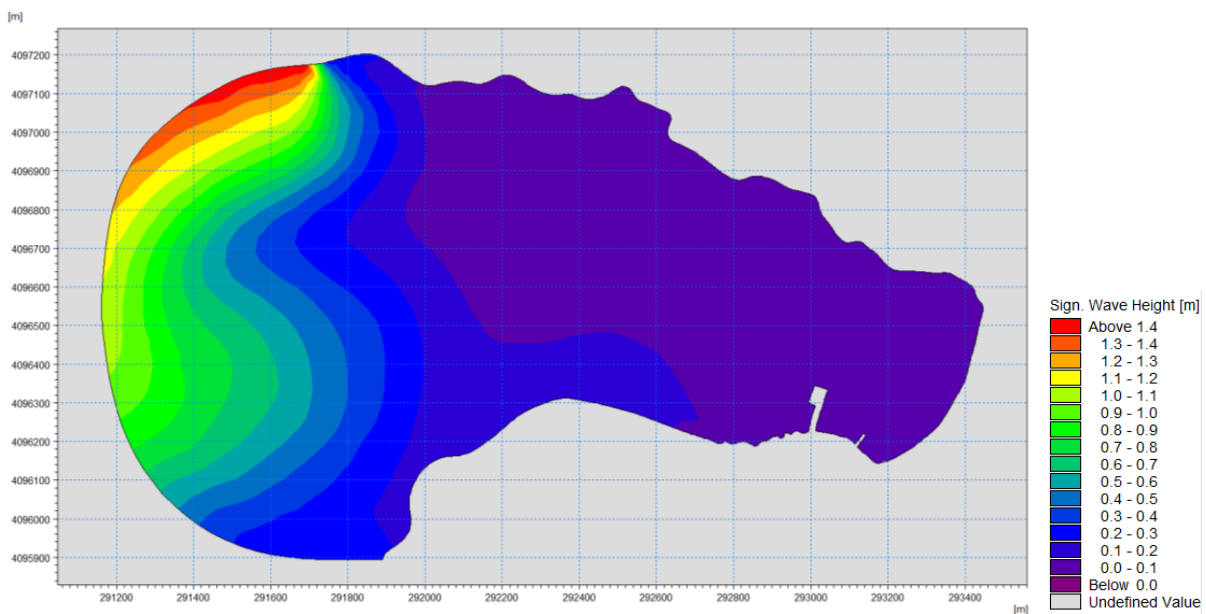
## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά αποτελέσματα της προσομοίωσης για το εκάστοτε σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κάθε μοντέλου και γίνεται σύγκριση αυτών ως προς τη μεταβολή της στάθμης του πυθμένα στο πέρας της προσομοίωσης, το ύψος κύματος και την ταχύτητα των ρευμάτων. Παράλληλα, γίνεται μια πρώτη εκτίμηση της εγκυρότητας της κάθε μεθόδου σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2.2.

Εφαρμόζοντας τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, προκύπτει ο προβληματισμός που σχετίζεται με τη μείωση των δεδομένων εισόδου και κατά πόσο ένας μικρός αριθμός στοιχείων μπορεί να δώσει αποτελέσματα αντιπροσωπευτικά των ετών στα οποία εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι σχηματοποίησης. Αν προκύψουν παρόμοια αποτελέσματα της πλήρους χρονοσειράς του ενός έτους με τις σχηματοποιημένες χρονοσειρές, μπορεί να θεωρηθεί, με ένα περιθώριο σφάλματος λόγω αλλαγής στη χρονική κλίμακα, ότι η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε είναι έγκυρη και το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα θα δώσει αποτελέσματα που θα μπορούν να αναχθούν σε υπερετήσια βάση.

### 5.1. Αποτελέσματα για την πλήρη χρονοσειρά του ενός έτους

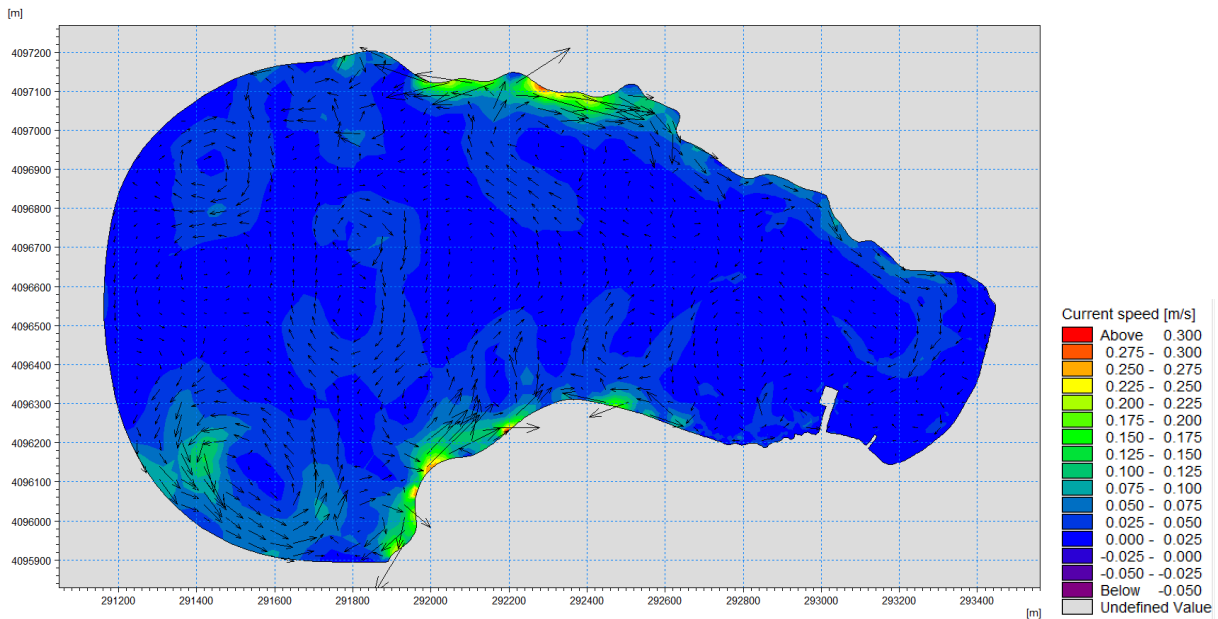
#### 5.1.1. SW (Spectral Waves Model)



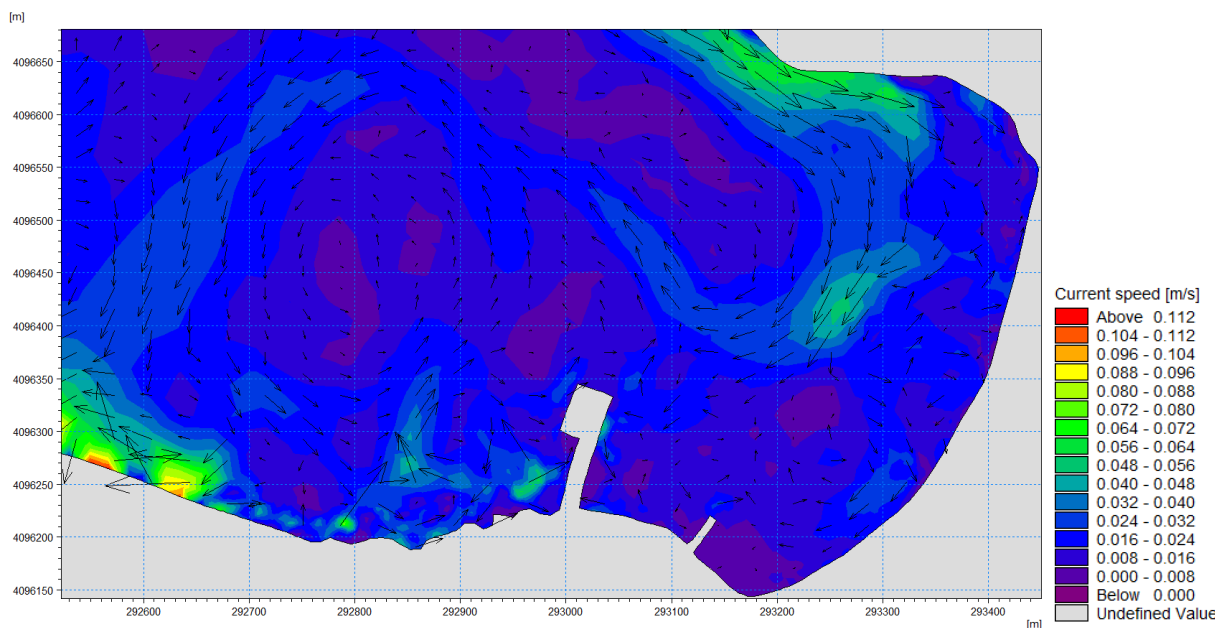
Σχήμα 5. 1: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.

Το παραπάνω σχήμα αντιστοιχεί στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 24/24). Απεικονίζει το τελευταίο κυματικό γεγονός της χρονοσειράς με βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος ίσο με 1.55m και περίοδο 6.93s κατά τη δημιουργία του στο ανοικτό όριο της περιοχής. Παρατηρείται ότι ο άνεμος της συγκεκριμένης διεύθυνσης προκαλεί ασήμαντες διαταραχές εντός της λιμενολεκάνης, με το ύψος κύματος να ανέρχεται στα 0.10m κοντά στα λιμενικά έργα και στην ακτή.

### 5.1.2. HD (Hydrodynamic Model)



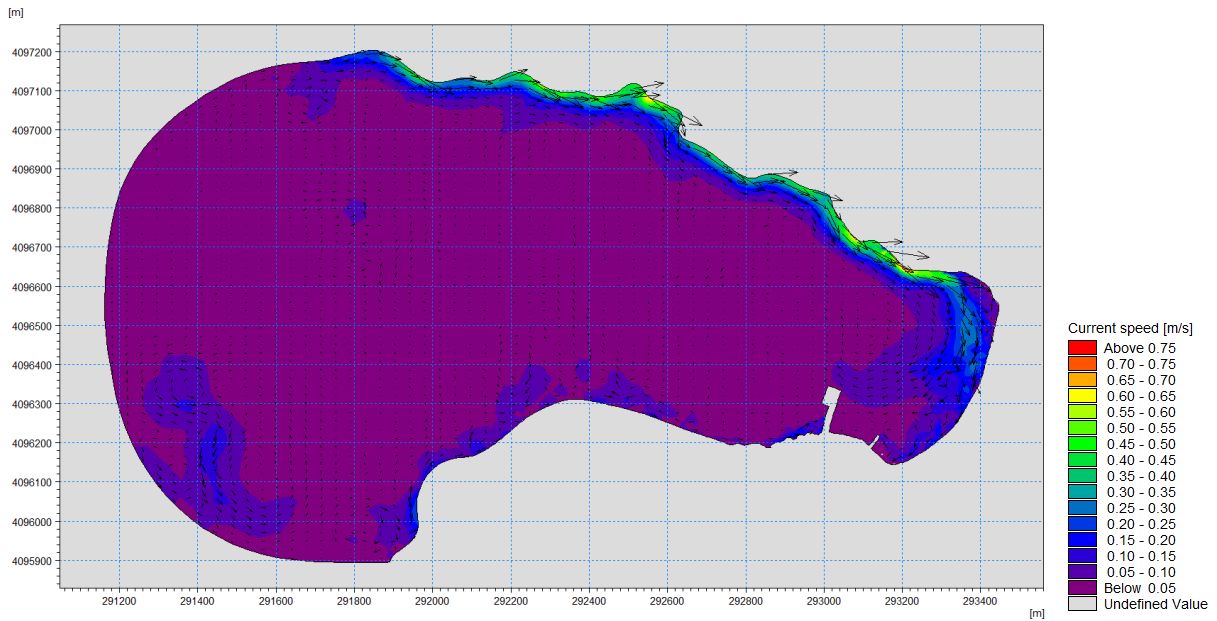
Σχήμα 5. 2: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.



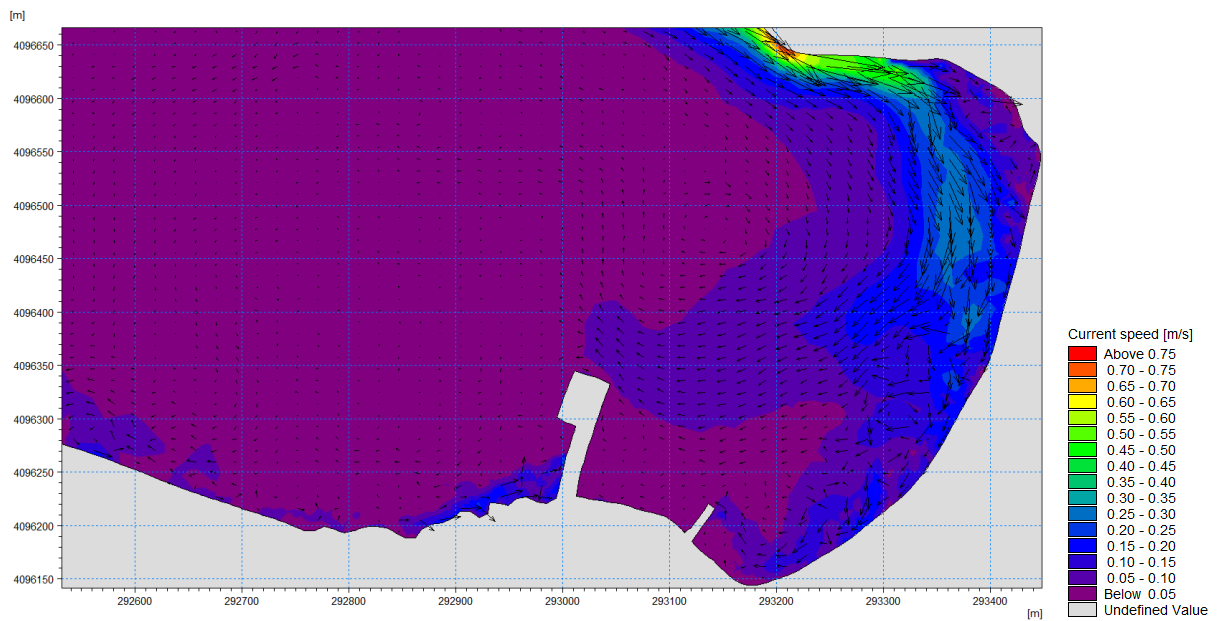
Σχήμα 5. 3: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Τα παραπάνω σχήματα αντιστοιχούν στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 24/24). Ωστόσο, το συγκεκριμένο κυματικό γεγονός δεν δημιουργεί σημαντικά ρεύματα στην περιοχή, κάτι που ήταν αναμενόμενο έχοντας παρατηρήσει ότι το ύψος κύματος του ίδιου χρονικού βήματος στην περιοχή των έργων είναι εξαιρετικά μικρό. Τα γεγονότα που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες κατά μέτρο ταχύτητες ρευμάτων είναι αυτά των χρονικών βημάτων 3 και 18, τα οποία αντιστοιχούν σε κυματισμούς δυτικής – νοτιοδυτικής διεύθυνσης και έχουν ύψος κύματος μεταξύ του εύρους 0.20m – 1.00m.



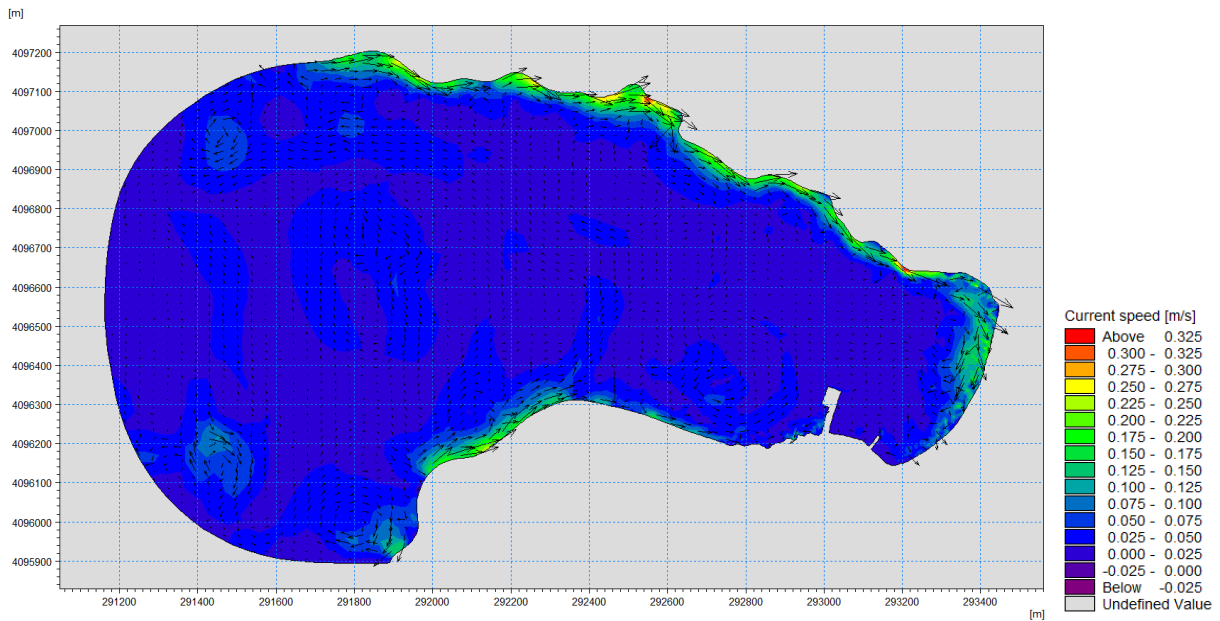


Σχήμα 5. 4: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 3/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.

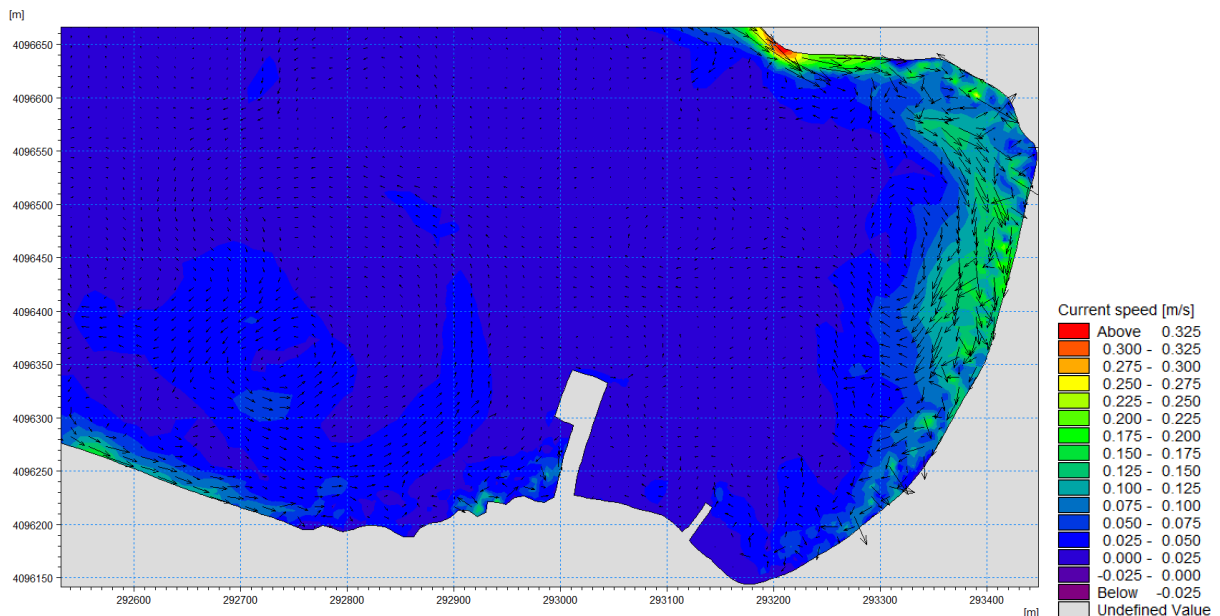


Σχήμα 5. 5: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 3/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Το κυματικό γεγονός του συγκεκριμένου βήματος έχει διεύθυνση  $206^\circ$  (νότια-νοτιοδυτική), ύψος κύματος  $0.88\text{m}$  και περίοδο  $11.20\text{s}$ . Στα παραπάνω σχήματα είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων παράλληλα στο βόρειο τμήμα της περιοχής με κατεύθυνση προς την παραλία. Επιπλέον, παρατηρείται συσσώρευση έντονων ρευμάτων με μέγιστη ταχύτητα  $0.75\text{m/s}$  σε μια περιοχή που απέχει περίπου  $100\text{m}$  από την ακτή. Κατά μήκος της ακτής και περίπου στο κέντρο της, τα ρεύματα αλλάζουν διεύθυνση και στροβιλίζονται σε μια περιοχή μπροστά από τον δυτικό προβλήτα.



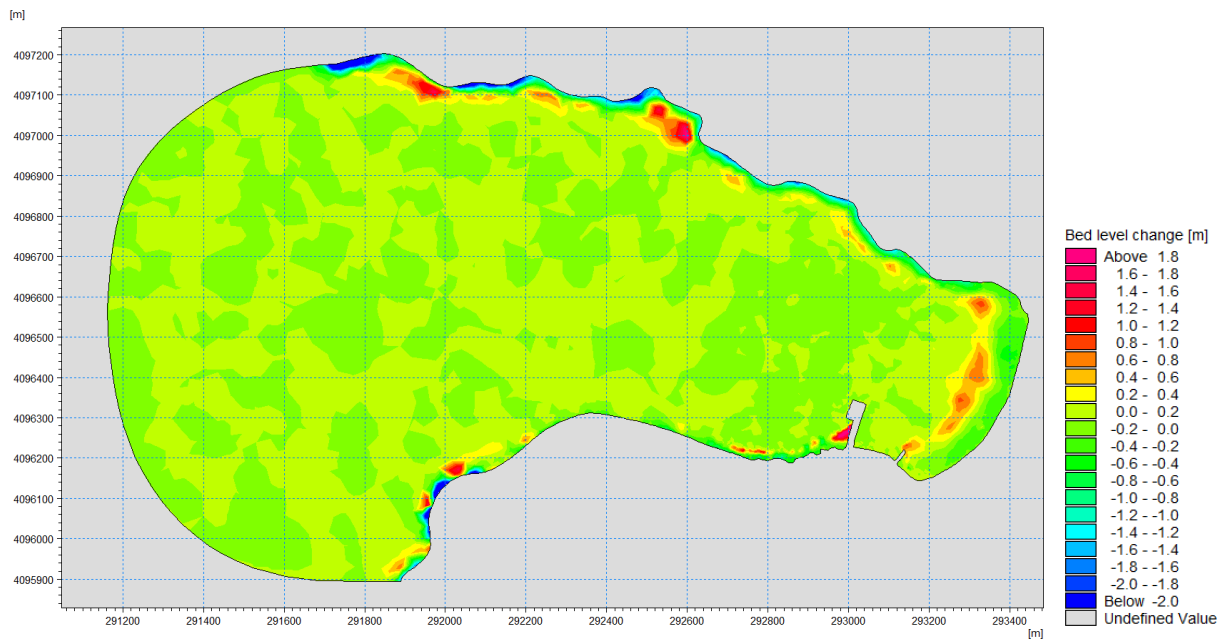
Σχήμα 5. 6: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 18/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.



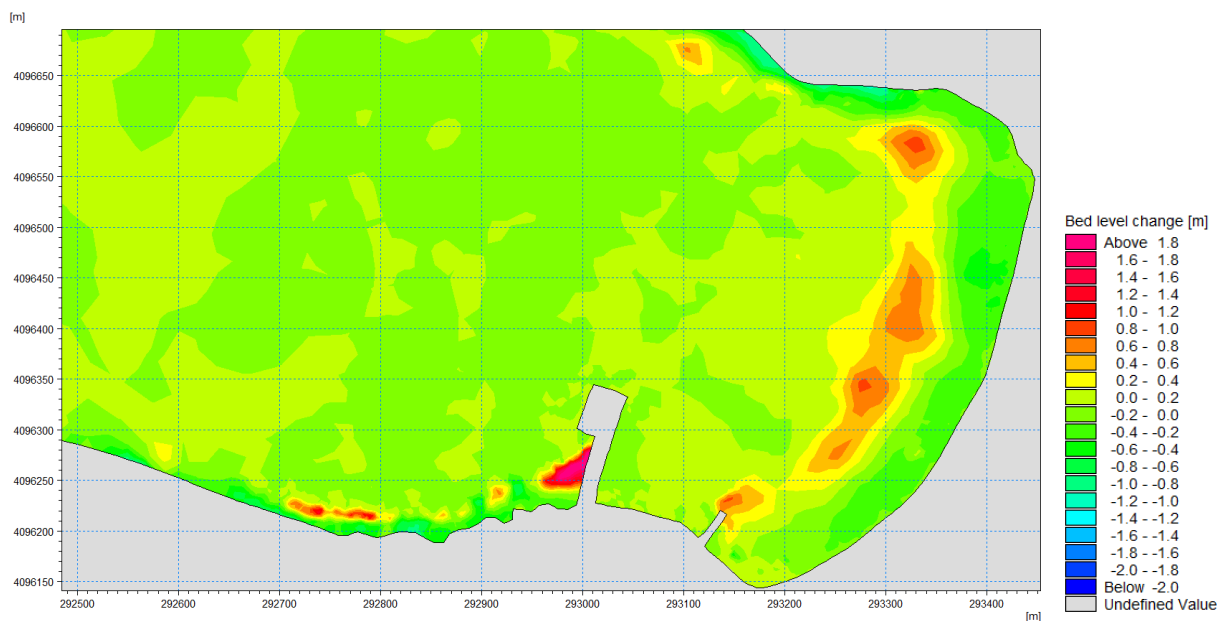
Σχήμα 5. 7: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 18/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Τα σχήματα του 18<sup>ου</sup> χρονικού βήματος αντιστοιχούν σε κυματισμό ύψους 0.40m, περιόδου 5.20s και διεύθυνσης 240° (~δυτικής-νοτιοδυτικής). Η ευρύτερη περιοχή εμφανίζει σχεδόν μηδενικά ρεύματα, ενώ κοντά στην ακτογραμμή παρατηρείται ανάπτυξη ρευμάτων με μέγιστη ταχύτητα 0.325m/s, τα οποία στροβιλίζονται. Λαμβάνοντας υπόψη αυτήν την κίνηση των ρευμάτων κοντά στην ακτή, αναμένεται να σημειωθεί μικρή (κατ' αναλογία με το μέτρο των ρευμάτων που εμφανίζονται) εναπόθεση ιζήματος σε απόσταση μερικών μέτρων από την ακτογραμμή. Σε όλα τα παραπάνω σχήματα διακρίνονται διανύσματα κοντά στην ακτή, τα οποία έχουν μεγάλο μέτρο συγκριτικά με τα υπόλοιπα και διαφορετική κατεύθυνση. Τα διανύσματα αυτά δεν έχουν φυσική σημασία, ενώ οφείλονται στο γεγονός ότι σε εκείνα τα σημεία υπάρχει μεταβολή του βάρους το οποίο οδηγεί σε μεγάλες ταχύτητες τοπικά.

### 5.1.3. ST (Sand Transport Model)



Σχήμα 5. 8: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους.

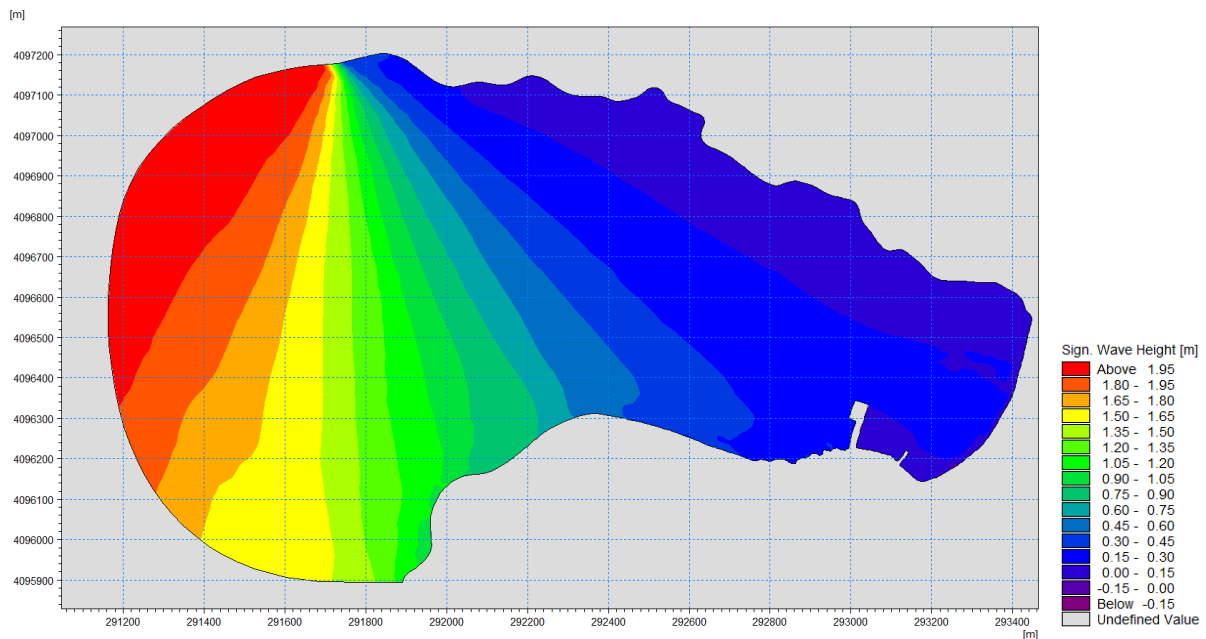


Σχήμα 5. 9: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πλήρης χρονοσειρά ενός έτους - Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στο παραπάνω σχήμα που απεικονίζει το τελευταίο κυματικό γεγονός, σημειώνεται εναπόθεση σε μία ζώνη σε απόσταση λιγότερη των 50m από την ακτή με μέγιστη τιμή 0.80m, γεγονός το οποίο πιθανόν να είναι αποτέλεσμα των στροβιλισμών που σημειώνονται σε αυτήν την περιοχή. Σε μια ζώνη ανάμεσα στην προαναφερθείσα και στην ακτογραμμή σημειώνεται υποχώρηση με τη μέγιστη τιμή των 0.40m να εμφανίζεται στο βόρειο τμήμα της ακτογραμμής. Στο τέλος της ζώνης της διάβρωσης (στο νότιο τμήμα) παρατηρείται εναπόθεση 0.2m. Παράλληλα παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος ακριβώς ανάντη του προσήνεμου προβλήτα έως 2.40m.

## 5.2. Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής με τη μέθοδο Ροής Ενέργειας – 10 αντιπρόσωποι

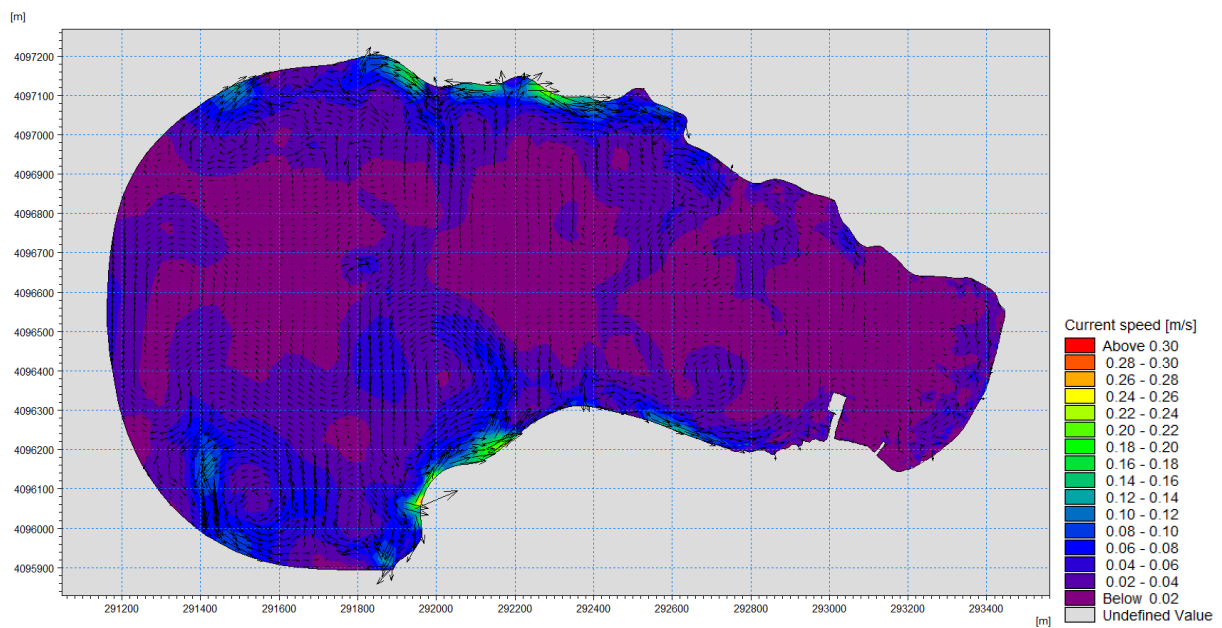
### 5.2.1. SW (Spectral Waves Model)



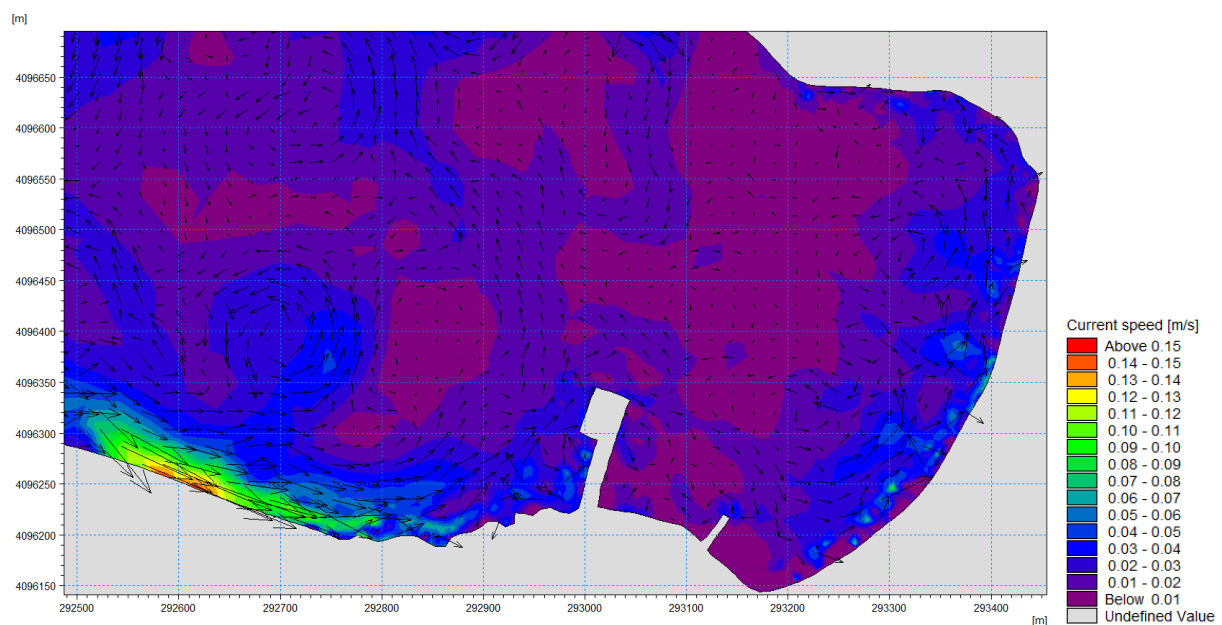
Σχήμα 5. 10: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπρόσωπους.

Το παραπάνω σχήμα αντιστοιχεί στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 24/24). Απεικονίζει το τελευταίο κυματικό γεγονός της χρονοσειράς με βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος ίσο με 2.03m και περίοδο 6.09s κατά τη δημιουργία του στο ανοικτό όριο της περιοχής. Το μέγιστο ύψος κύματος κοντά στα λιμενικά έργα και στην ακτή είναι 0.30m, το οποίο δεν είναι κοντά στο ύψος κύματος που παρουσίασε η πλήρης χρονοσειρά στην ίδια περιοχή (0.10m). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο κύμα έχει ύψος μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της πλήρους χρονοσειράς το οποίο είχε βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος 1.55m και περίοδο 6.93s.

## 5.2.2. HD (Hydrodynamic Model)



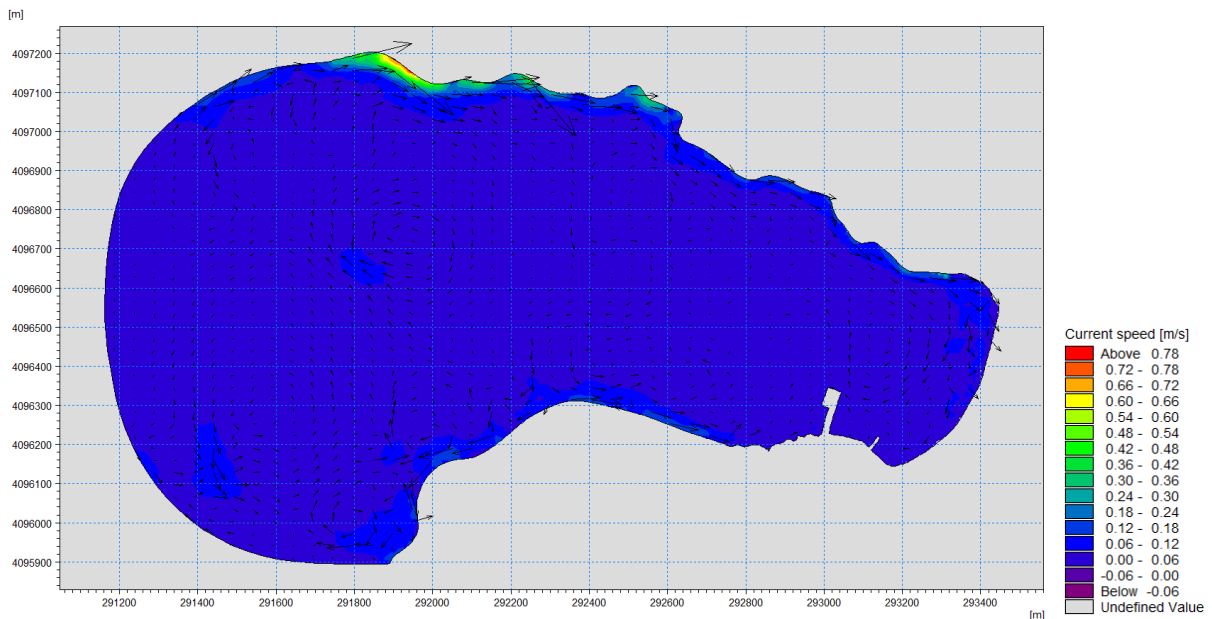
Σχήμα 5. 11: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.



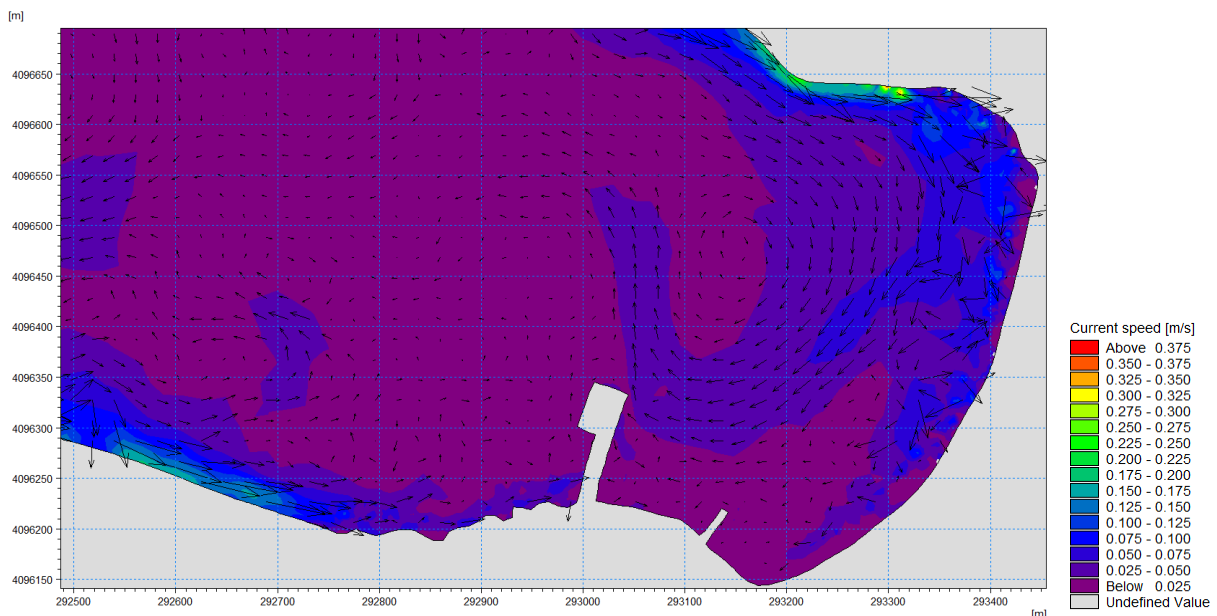
Σχήμα 5. 12: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα εμφανίζεται σχεδόν μηδενική κυματική κυκλοφορία στην ευρύτερη περιοχή με μέγιστη ταχύτητα 0.05m/s. Η μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων που σημειώνεται κοντά στην ακτή αγγίζει τα 0.10m/s. Ωστόσο, το συγκεκριμένο κυματικό γεγονός δεν δημιουργεί σημαντικά ρεύματα στην περιοχή σε σχέση με τα γεγονότα των χρονικών βημάτων 8 και 16 (Time step 8/24 και 16/24). Η μη ταύτιση των χρονικών βημάτων που προκαλούν τη μεγαλύτερη κατά μέτρο κυματική κυκλοφορία στη μέθοδο Energy Flux και στην πλήρη χρονοσειρά είναι αναμενόμενη, καθώς τα κυματικά γεγονότα της πλήρους χρονοσειράς προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις, ενώ τα γεγονότα της Energy Flux

προκύπτουν από την επεξεργασία αυτών των πραγματικών μετρήσεων. Συνεπώς, στην πλήρη χρονοσειρά του ενός έτους (με μετρήσεις που έχουν προκύψει από την περιοχή) κάθε χρονικό βήμα μπορεί να αποτελείται από κυματικό γεγονός με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα προηγούμενα σε ό,τι αφορά τη διεύθυνση, το ύψος και την περίοδο κύματος. Αντιθέτως, τα στοιχεία της χρονοσειράς που προέκυψε από τη μέθοδο Energy Flux ανήκουν κυρίως στις διευθύνσεις που πλήττουν το λιμένα (δυτική – νοτιοδυτική). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να προσομοιώνονται μόνο κυματικά γεγονότα που πλήττουν άμεσα την περιοχή και έτσι αναμένεται να δώσουν μεγαλύτερα κατά μέτρο αποτελέσματα.

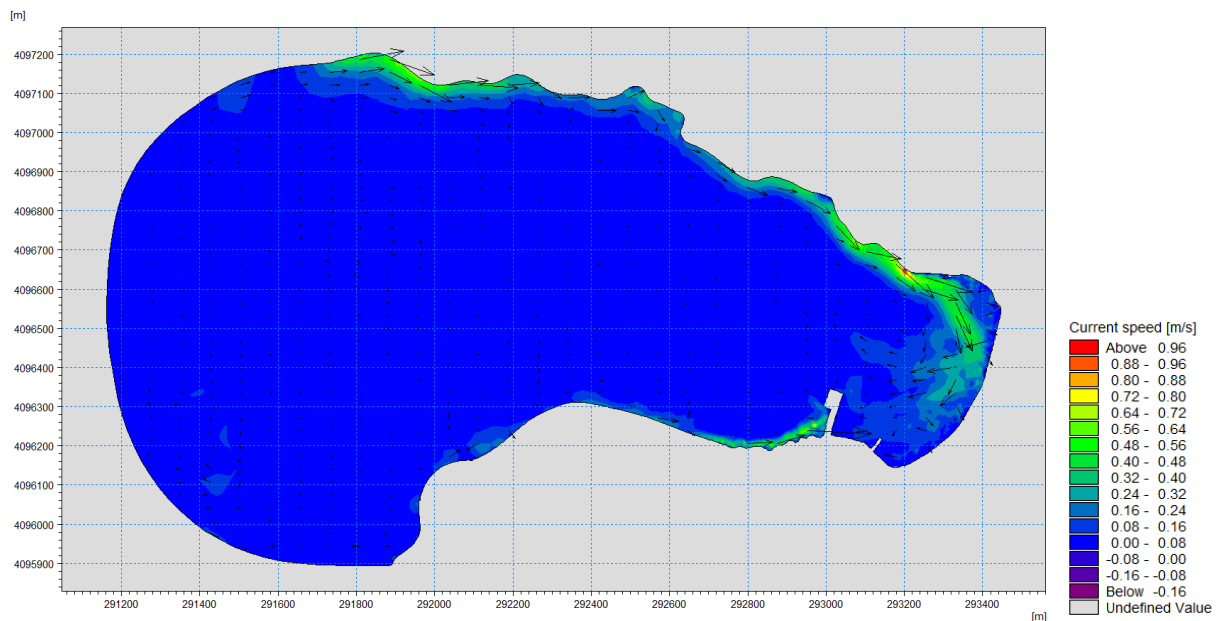


Σχήμα 5. 13: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 8/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.

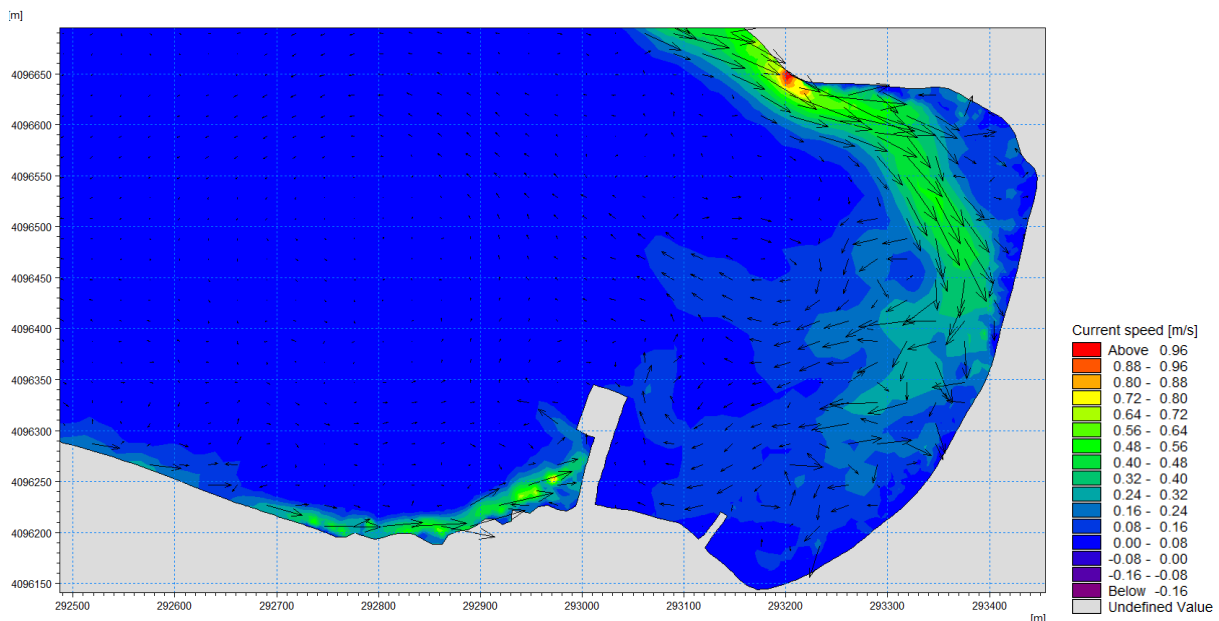


Σχήμα 5. 14: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 8/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Το κυματικό γεγονός του 8<sup>ου</sup> χρονικού βήματος έχει διεύθυνση περίπου 240° (~δυτική-νοτιοδυτική), ύψος κύματος 2.67m και περίοδο 7.41s. Στα παραπάνω σχήματα παρατηρείται συσσώρευση ρευμάτων με μέγιστη ταχύτητα 0.30m/s σε μια περιοχή που απέχει περίπου 150m από το βόρειο τμήμα της ακτής.



Σχήμα 5. 15: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.

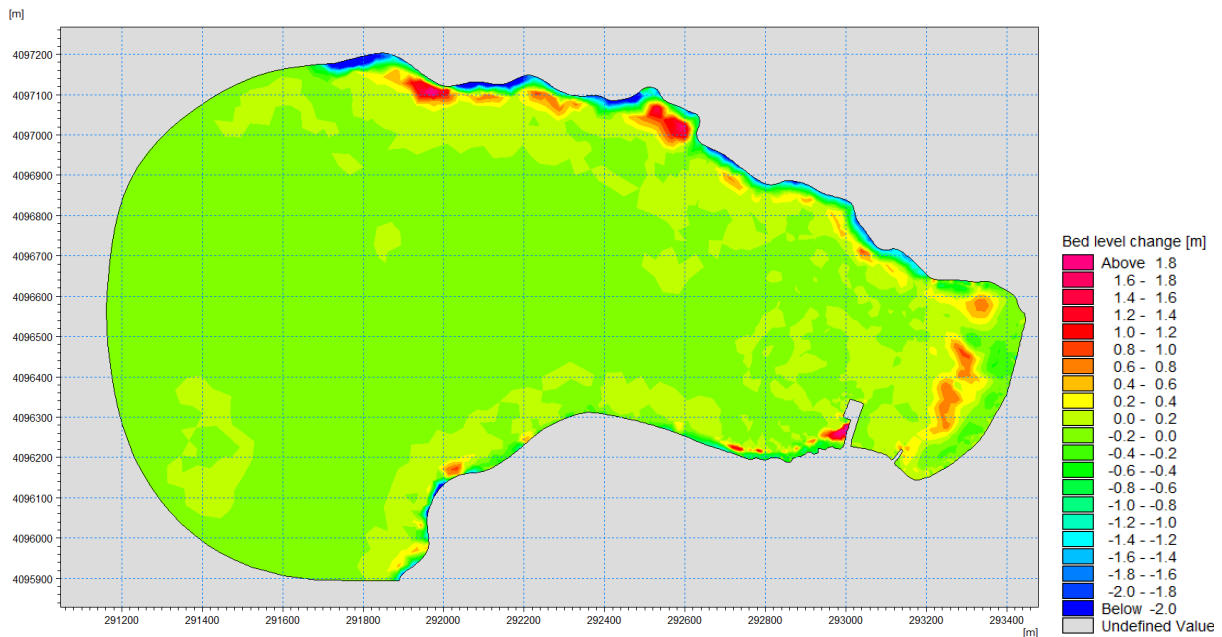


Σχήμα 5. 16: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

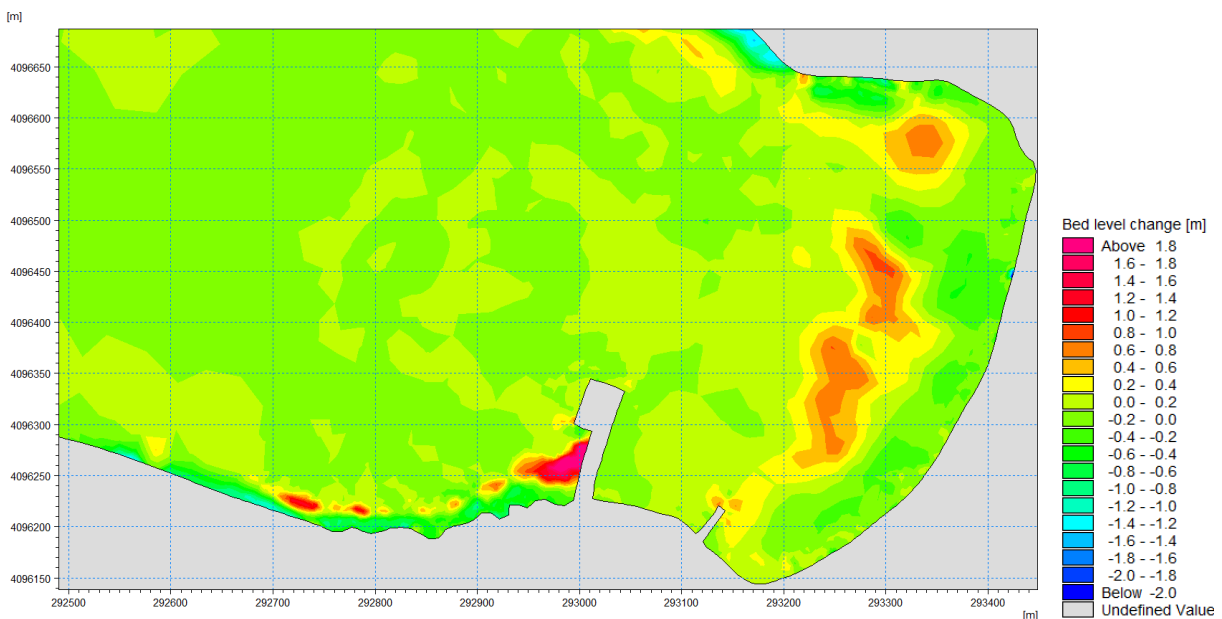
Στα παραπάνω σχήματα αντιστοιχεί κυματικό γεγονός έχει διεύθυνση 270° (δυτική), ύψος κύματος 2.34m και περίοδο 6.83s. Στην περιοχή ανάντη του προσήνεμου προβλήτα σημειώνονται έντονα ρεύματα με μέγιστη ταχύτητα 0.90m/s. Παρατηρείται ότι το μοτίβο των ρευμάτων που δημιουργούνται με τη χρονοσειρά των κυματισμών με τους 10 αντιπροσώπους είναι σχετικά ίδιο με αυτό που δημιουργείται από την πλήρη χρονοσειρά. Αυτό το γεγονός είναι αναμενόμενο, καθώς οι κυματισμοί που δημιουργούν μεγαλύτερα κατά μέτρο ρεύματα και αναλύθηκαν και για τις δύο

χρονοσειρές αντιστοιχούν στο ίδιο εύρος διευθύνσεων (δυτική – δυτική/νοτιοδυτική) και έχουν ύψος κύματος εντός του ίδιου εύρους 1.50m – 2.50m.

### 5.2.3. ST (Sand Transport Model)



Σχήμα 5. 17: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους.



Σχήμα 5. 18: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 10 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Σε ένα τμήμα πλάτους 50 – 150m, το οποίο εκτείνεται από το βόρειο έως μερικά μέτρα πριν το νότιο τμήμα της ακτογραμμής και βρίσκεται σε επαφή με αυτήν, σημειώνεται υποχώρηση της τάξης των 0.10 – 0.50m, ενώ στο νότιο τμήμα παρατηρείται εναπόθεση έως 0.28m. Σε μια ζώνη που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 100m από την ακτογραμμή και σε επαφή με το προαναφερθέν τμήμα που

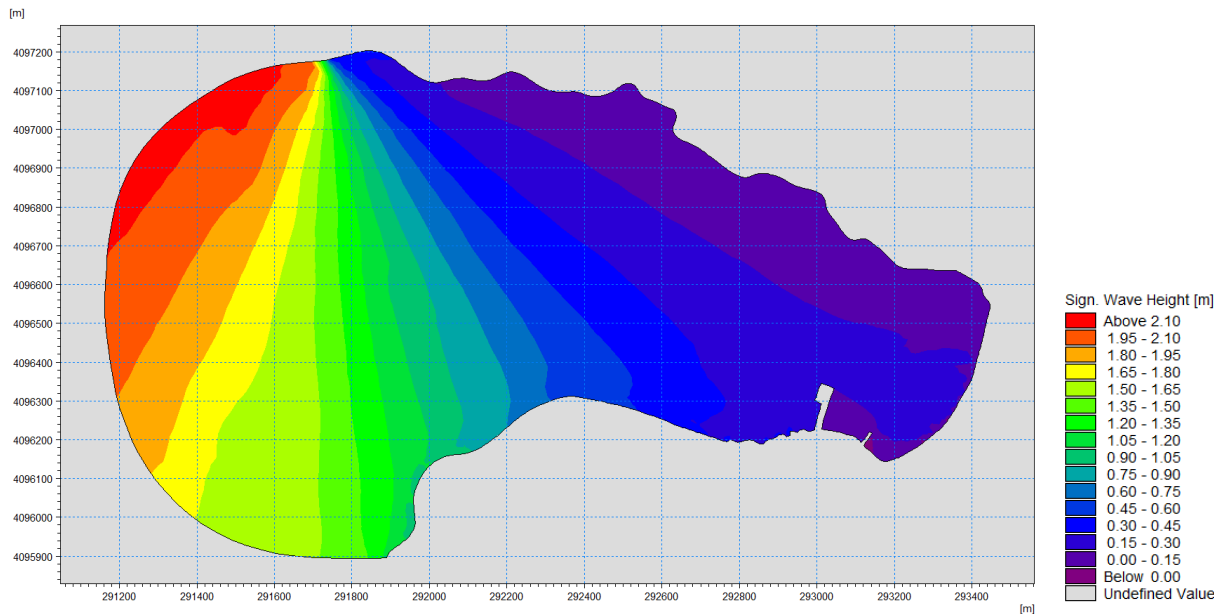


διαβρώνεται, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος με μέγιστη τιμή 0.90m. Παράλληλα παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος ακριβώς ανάντη του προσήνεμου προβλήτα έως 2.50m.

Το συγκεκριμένο μοτίβο στερεομεταφοράς προσομοιάζει το μοτίβο που αναλύθηκε στο *Κεφάλαιο 5.1.3* το οποίο προκαλεί η πλήρης χρονοσειρά. Ακόμη, οι μέγιστες τιμές των ταχυτήτων των ρευμάτων και των μεταβολών του πυθμένα είναι κατά απόλυτη τιμή (διότι πρόκειται και για αρνητικές και για θετικές τιμές, στην περίπτωση υποχώρησης και προόδου) μεγαλύτερες στην περίπτωση των αποτελεσμάτων της χρονοσειράς με 10 αντιπροσωπευτικές τιμές σε σχέση τα αποτελέσματα της πλήρους χρονοσειράς. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στο γεγονός ότι η σχηματοποιημένη χρονοσειρά είναι πιο χονδροειδής καθώς μόνο 10 τιμές επιλέχθηκαν να αντιπροσωπεύσουν όλο το κυματικό κλίμα. Ορισμένες από αυτές τις τιμές αντιστοιχούν σε κυματισμούς μεγάλης έντασης και ενδέχεται να εμφανίζονται αρκετές φορές στην νέα χρονοσειρά (αυτό προκύπτει από τη συχνότητα εμφάνισης των στοιχείων τα οποία αντιπροσωπεύει κάθε τιμή). Αυτό έχει ως συνέπεια, η νέα χρονοσειρά να εμφανίζει πιο συχνά έντονα κυματικά γεγονότα από την αρχική πλήρη χρονοσειρά, δημιουργώντας έτσι μεταβολές μεγαλύτερου μέτρου.

### 5.3. Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής με τη μέθοδο Ροής Ενέργειας – 30 αντιπρόσωποι

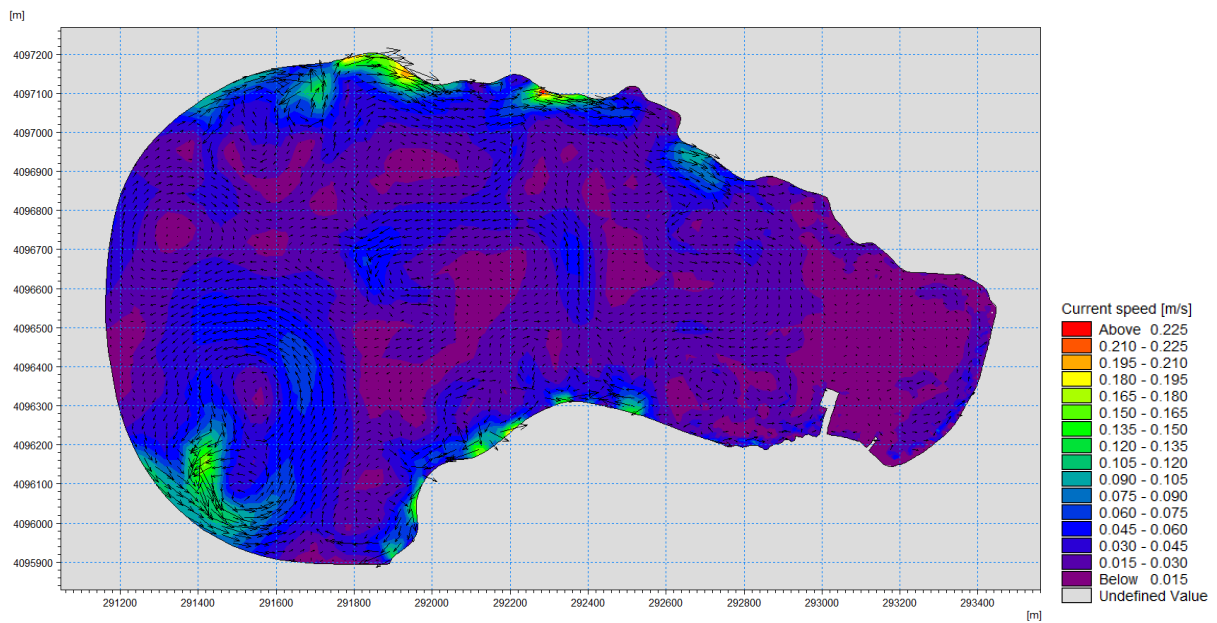
#### 5.3.1. SW (Spectral Waves Model)



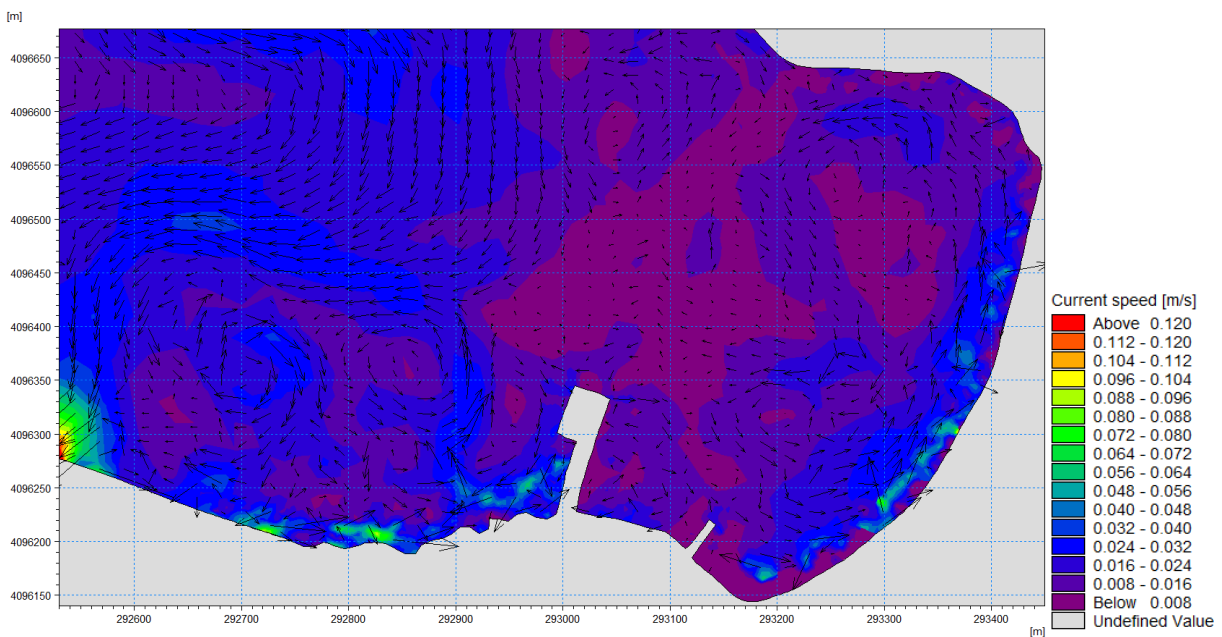
Σχήμα 5. 19: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.

Το παραπάνω σχήμα αντιστοιχεί στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 24/24). Απεικονίζει το τελευταίο κυματικό γεγονός της χρονοσειράς με βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος ίσο με 2.07m και περίοδο 6.13s κατά τη δημιουργία του στο ανοικτό όριο της περιοχής. Το μέγιστο ύψος κύματος κοντά στα λιμενικά έργα και στην ακτή είναι 0.28m, το οποίο δεν είναι κοντά στο ύψος κύματος που παρουσίασε η πλήρης χρονοσειρά στην ίδια περιοχή (0.10m). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο κύμα έχει ύψος μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της πλήρους χρονοσειράς το οποίο είχε βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος 1.55m και περίοδο 6.93s. Ακόμη, η κυματική διαταραχή που προκαλεί η χρονοσειρά των 30 αντιπροσώπων είναι σχεδόν ίδια με τη διαταραχή που προκαλεί η χρονοσειρά των 10 αντιπροσώπων και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά του τελευταίου κύματος και στις δύο χρονοσειρές είναι σχεδόν ίδια (βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος 2.03m και περίοδος 6.09s).

### 5.3.2. HD (Hydrodynamic Model)



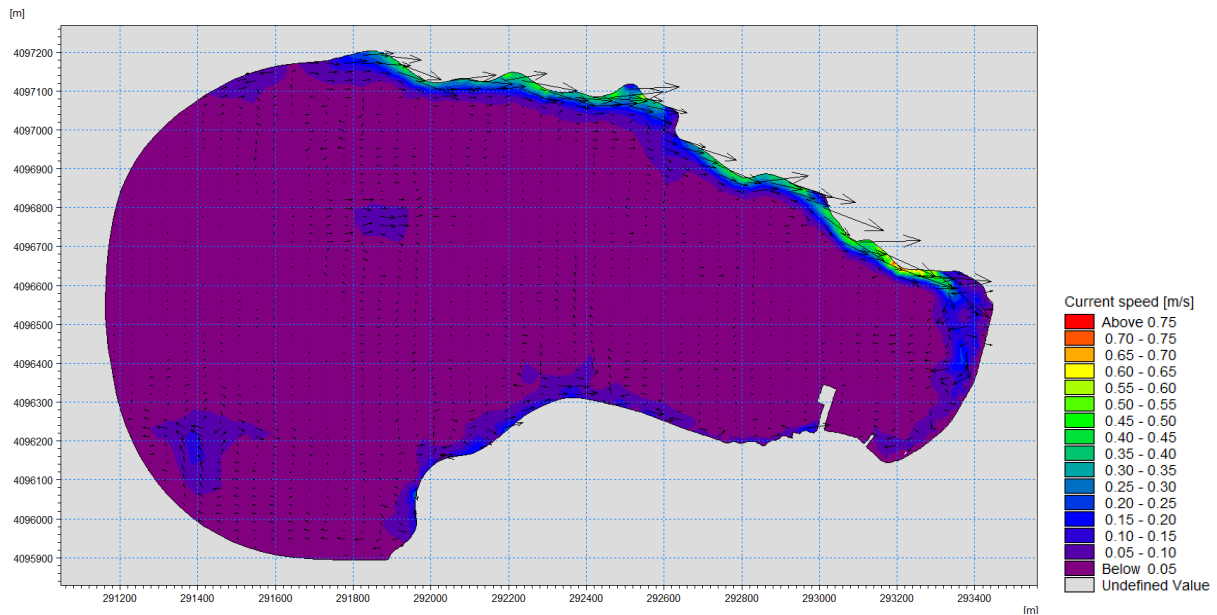
Σχήμα 5. 20: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.



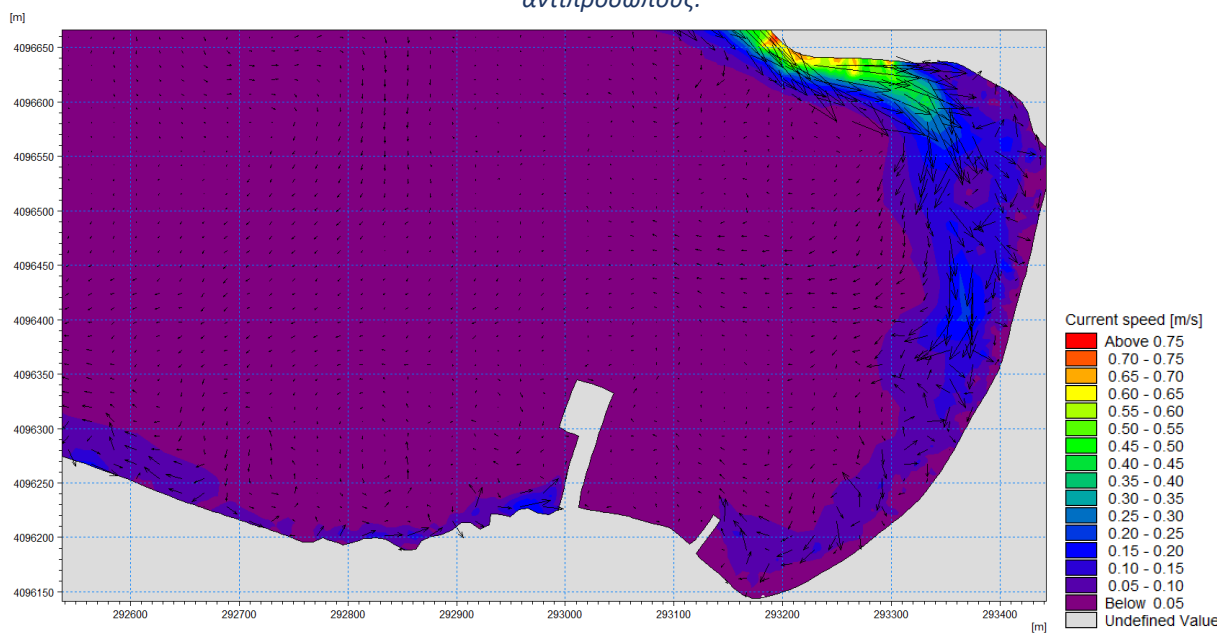
Σχήμα 5. 21: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα εμφανίζεται σχεδόν μηδενική κυματική κυκλοφορία στην ευρύτερη περιοχή με μέγιστη ταχύτητα 0.05m/s. Η μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων που σημειώνεται κοντά στην ακτή αγγίζει τα 0.09m/s, ενώ στην είσοδο της περιοχής μελέτης τα 0.25m/s. Ωστόσο, το συγκεκριμένο κυματικό γεγονός δεν δημιουργεί σημαντικά ρεύματα στην περιοχή σε σχέση με τα γεγονότα των χρονικών βημάτων 4 και 16 (Time step 4/24 και 16/24). Η μη ταύτιση των χρονικών βημάτων που προκαλούν τη μεγαλύτερη κατά μέτρο κυματική κυκλοφορία στη μέθοδο Energy Flux και στην πλήρη χρονοσειρά είναι αναμενόμενη, καθώς τα κυματικά γεγονότα της πλήρους χρονοσειράς προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις, ενώ τα γεγονότα της Energy Flux προκύπτουν από την επεξεργασία

αυτών των πραγματικών μετρήσεων. Συνεπώς, στην πλήρη χρονοσειρά του ενός έτους (με μετρήσεις που έχουν προκύψει από την περιοχή) κάθε χρονικό βήμα μπορεί να αποτελείται από κυματικό γεγονός με τελείως διαφορετικά χαρακτηριστικά από τα προηγούμενα σε ότι αφορά τη διεύθυνση, το ύψος και την περίοδο κύματος. Αντιθέτως, τα στοιχεία της χρονοσειράς που προέκυψε από τη μέθοδο Energy Flux ανήκουν κυρίως στις διευθύνσεις που πλήττουν το λιμένα (δυτική – νοτιοδυτική). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να προσομοιώνονται μόνο κυματικά γεγονότα που πλήττουν άμεσα την περιοχή και έτσι αναμένεται να δώσουν μεγαλύτερα κατά μέτρο αποτελέσματα. Επιπλέον, οι προσομοιώσεις με τις χρονοσειρές διαφορετικού αριθμού αντιπροσώπου είναι επόμενο να μην εμφανίζουν τα μέγιστα στα ίδια χρονικά βήματα, καθώς για το ίδιο μέγεθος δεδομένων, η χρονοσειρά με τους περισσότερους αντιπροσώπους θα παρουσιάζει μεγαλύτερη λεπτομέρεια αποτελεσμάτων.

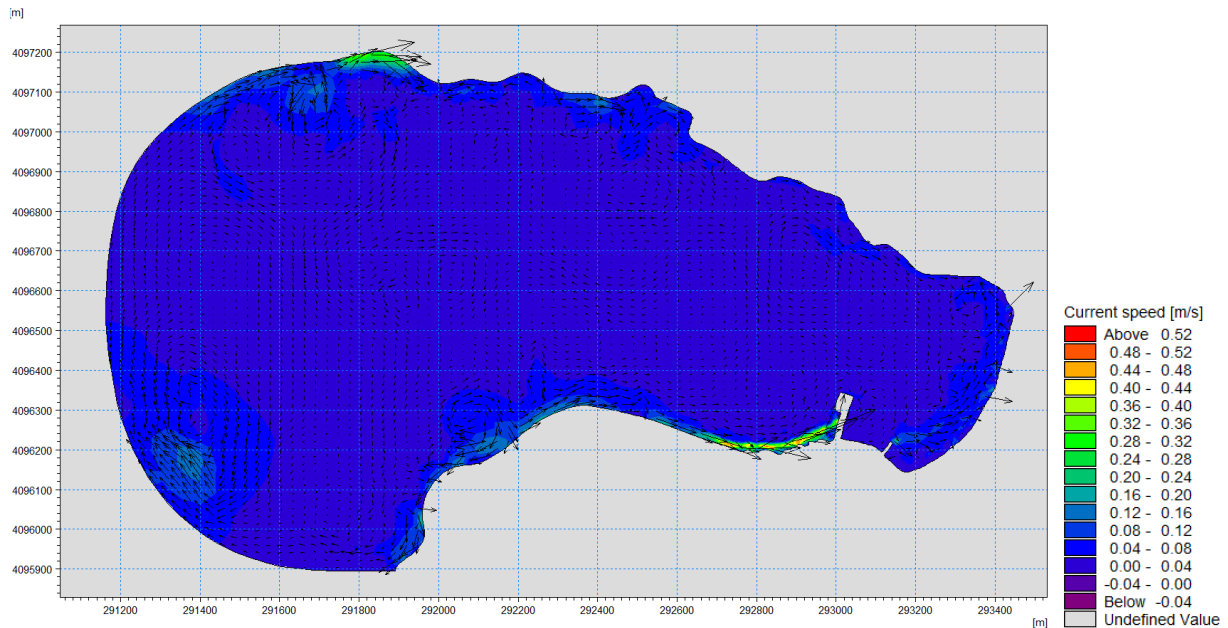


Σχήμα 5. 22: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.

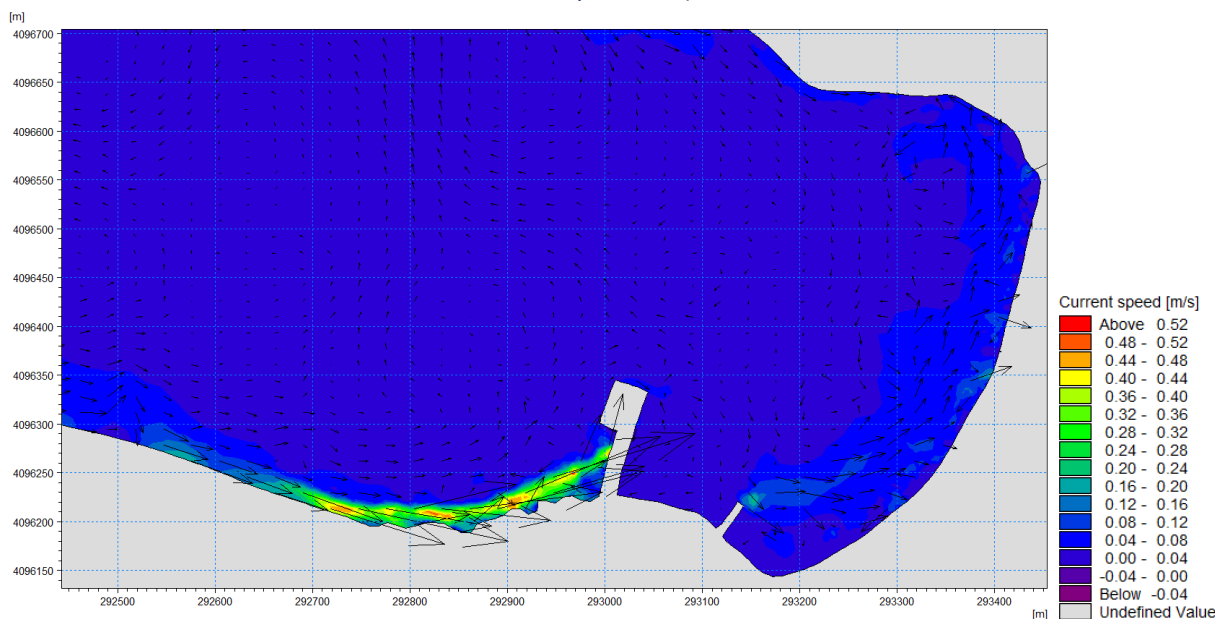


Σχήμα 5. 23: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Το κυματικό γεγονός του 4<sup>ου</sup> χρονικού βήματος έχει διεύθυνση περίπου 230° (~νοτιοδυτική), ύψος κύματος 2.19m και περίοδο 7.04s. Στα παραπάνω σχήματα είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων παράλληλα στο βόρειο τμήμα της περιοχής με κατεύθυνση προς την παραλία και μέγιστη ταχύτητα 0.75m/s. Επιπλέον, τα ρεύματα που σημειώνονται κοντά στην ακτή έχουν μέγιστη τιμή 0.20m/s.



Σχήμα 5. 24: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.

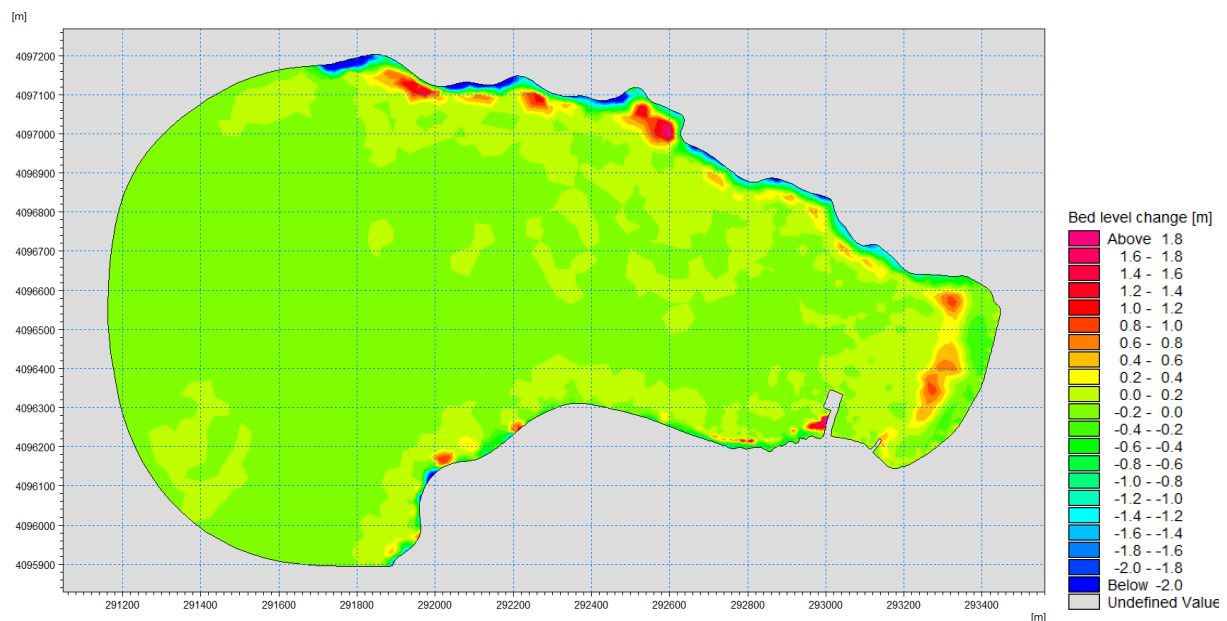


Σχήμα 5. 25: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

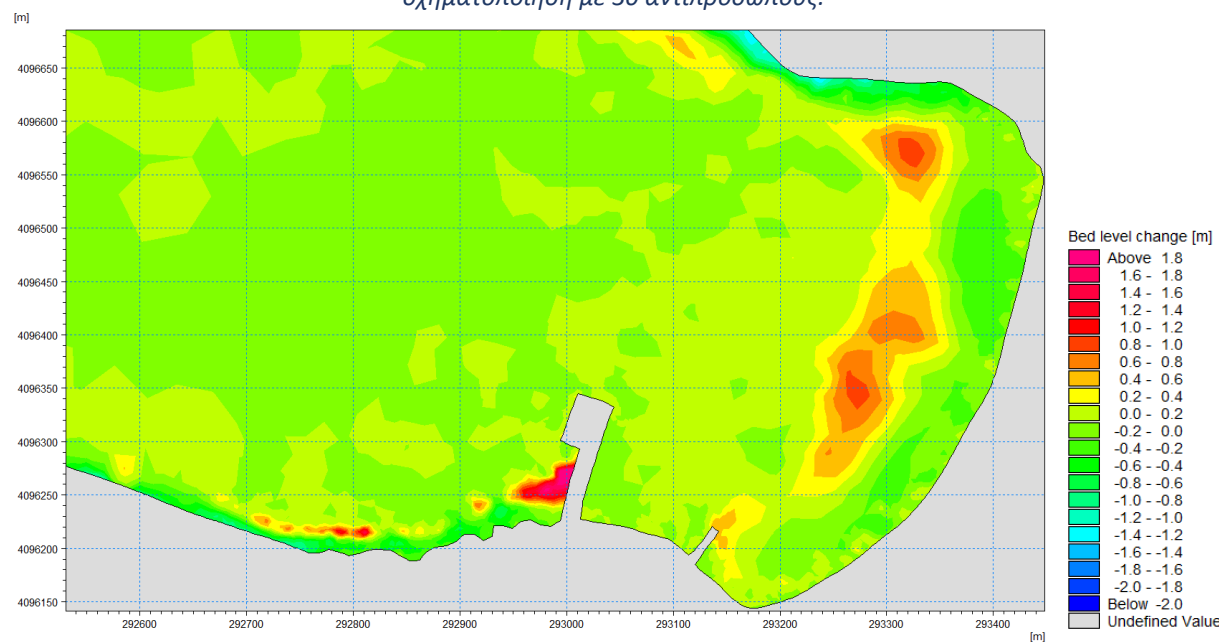
Στα παραπάνω σχήματα αντιστοιχεί κυματικό γεγονός με διεύθυνση 320° (~βορειοδυτική), ύψος κύματος 2.90m και περίοδο 6.62s. Είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων στο νότιο τμήμα της περιοχής σε μήκος περίπου 300m με κατεύθυνση προς τον προσήνεμο προβλήτα και μέγιστη τιμή 0.53m/s. Επιπλέον, σημειώνονται ότι το συγκεκριμένο χρονικό βήμα δημιουργεί ρεύματα βορειοανατολικής διεύθυνσης (αντίθετα από τα προηγούμενα βήματα) και με μέγιστη ταχύτητα 0.20m/s, τα οποία στροβιλίζονται με μικρό μέτρο.

Παρατηρείται ότι γενικώς το μοτίβο των ρευμάτων που δημιουργούνται με τη χρονοσειρά των κυματισμών με τους 30 αντιπροσώπους είναι παρόμοιο με αυτό που δημιουργείται από την πλήρη χρονοσειρά και τη χρονοσειρά με τους 10 αντιπροσώπους, με μόνη απόκλιση στο 16<sup>ο</sup> χρονικό βήμα της χρονοσειράς με τους 30 αντιπροσώπους (βλ. Σχήμα 5.15). Αυτό το γεγονός είναι αναμενόμενο, καθώς στα χρονικά βήματα όπου παρουσιάζονται παρόμοιες κυματικές διαταραχές, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων είναι αρκετά κοντά, δηλαδή αντιστοιχούν στο ίδιο εύρος διευθύνσεων (δυτική – δυτική/νοτιοδυτική) και έχουν ύψος κύματος εντός του ίδιου εύρους 1.50m – 2.50m. Η διαφορά στο 16<sup>ο</sup> χρονικό βήμα της τελευταίας μεθόδου έγκειται στο ότι ο κυματισμός στο ανοικτό όριο είναι βορειοδυτικής διεύθυνσης και το ύψος κύματος είναι 2.90m.

### 5.3.3. ST (Sand Transport Model)



Σχήμα 5. 26: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους.



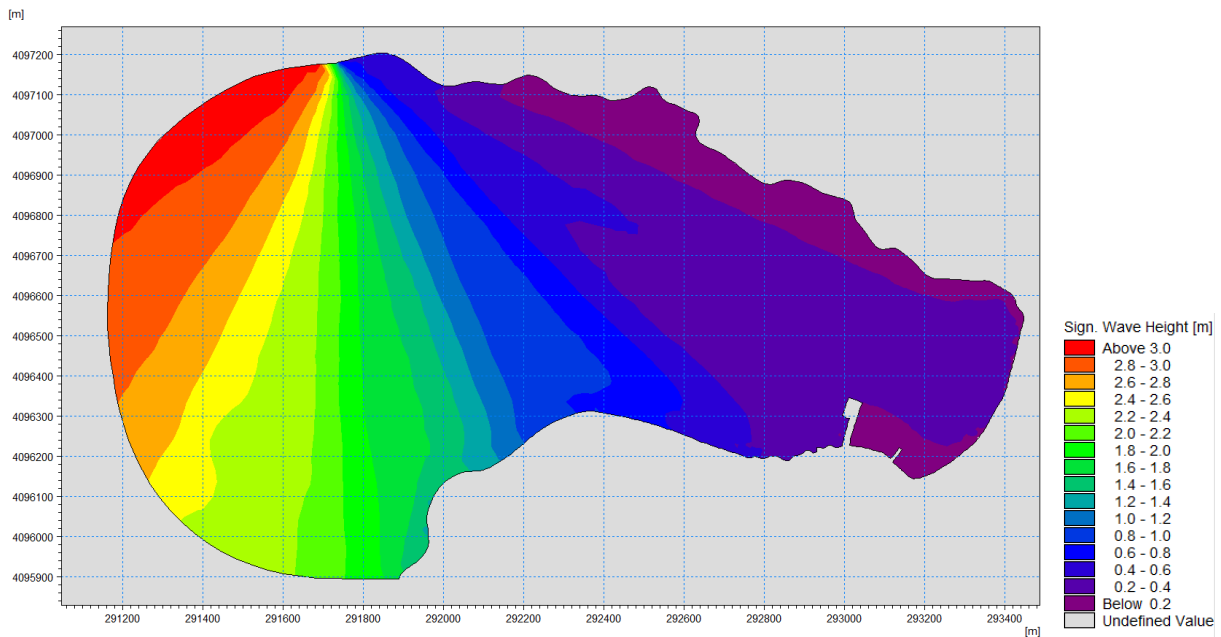
Σχήμα 5. 27: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος Energy Flux για σχηματοποίηση με 30 αντιπροσώπους – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα, σημειώνεται υποχώρηση της τάξης των 0.10 – 0.39m σε ένα τμήμα πλάτους 50 – 100m, το οποίο εκτείνεται από το βόρειο έως μερικά μέτρα πριν το νότιο τμήμα της ακτογραμμής, ενώ στο νότιο τμήμα παρατηρείται πρόοδος έως 0.25m. Σε μια ζώνη που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 100m από την ακτογραμμή και σε επαφή με το προαναφερθέν τμήμα που διαβρώνεται, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος με μέγιστη τιμή 0.86m. Παράλληλα, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος ακριβώς ανάντη του προσήνεμου προβλήτα έως 2.40m.

Το συγκεκριμένο μοτίβο στερεομεταφοράς προσομοιάζει τα μοτίβα που αναλύθηκαν στα *Κεφάλαια 5.1.3 και 5.2.3*, τα οποία προκαλούνται από την πλήρη χρονοσειρά και τη χρονοσειρά με τους 10 αντιπροσώπους, αντίστοιχα. Ακόμη, οι μέγιστες τιμές των ταχυτήτων των ρευμάτων και των μεταβολών του πυθμένα βρίσκονται κατά απόλυτη τιμή (διότι πρόκειται και για αρνητικές και για θετικές τιμές, στην περίπτωση υποχώρησης και προόδου) ενδιάμεσα στις αντίστοιχες τιμές των αποτελεσμάτων της πλήρους χρονοσειράς και της χρονοσειράς με 10 αντιπροσωπευτικές τιμές. Δηλαδή, οι μεταβολές που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο είναι μεγαλύτερες (κατά απόλυτη τιμή) από τις μεταβολές που προκαλεί η πλήρη χρονοσειρά του κυματικού κλίματος και μικρότερες (κατά απόλυτη τιμή) από τις μεταβολές που προκαλεί η χρονοσειρά με τους 10 αντιπροσώπους. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο διότι η νέα σχηματοποιημένη χρονοσειρά είναι πιο χονδροειδής καθώς μόνο 30 τιμές επιλέχθηκαν να αντιπροσωπεύσουν όλο το κυματικό κλίμα και επομένως είναι πιθανό σε αυτή να εμφανίζονται πιο συχνά έντονα κυματικά γεγονότα από την αρχική πλήρη χρονοσειρά, δημιουργώντας έτσι μεταβολές μεγαλύτερου μέτρου. Αντιθέτως, η χρονοσειρά με τους 30 αντιπροσώπους είναι λεπτομερέστερη σε σύγκριση με τη χρονοσειρά των 10 αντιπροσώπων και επομένως καθίσταται αναμενόμενη η δημιουργία λεπτομερέστερων αποτελεσμάτων τα οποία να είναι πιο κοντά στην πραγματική κατάσταση (στην περίπτωση της παρούσας εργασίας, η πραγματική κατάσταση αναπαρίσταται από την πλήρη χρονοσειρά του ενός έτους).

## 5.4. Αποτελέσματα για το σχηματοποιημένο κυματικό κλίμα της περιοχής με τη μέθοδο διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια

### 5.4.1. SW (Spectral Waves Model)

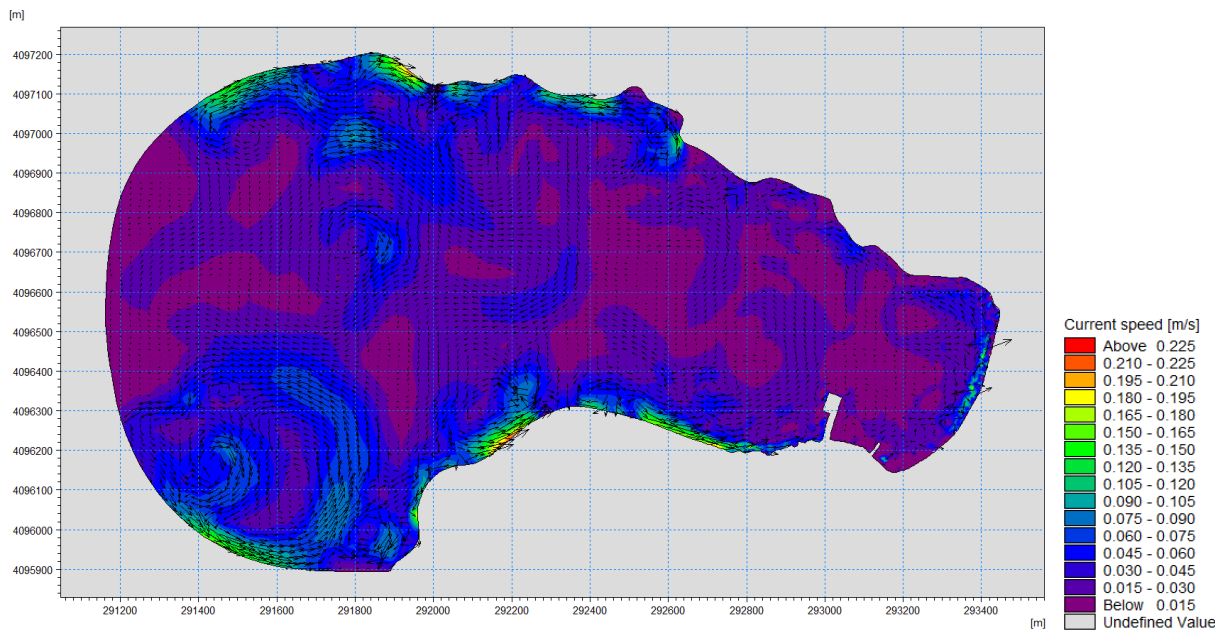


Σχήμα 5. 28: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.

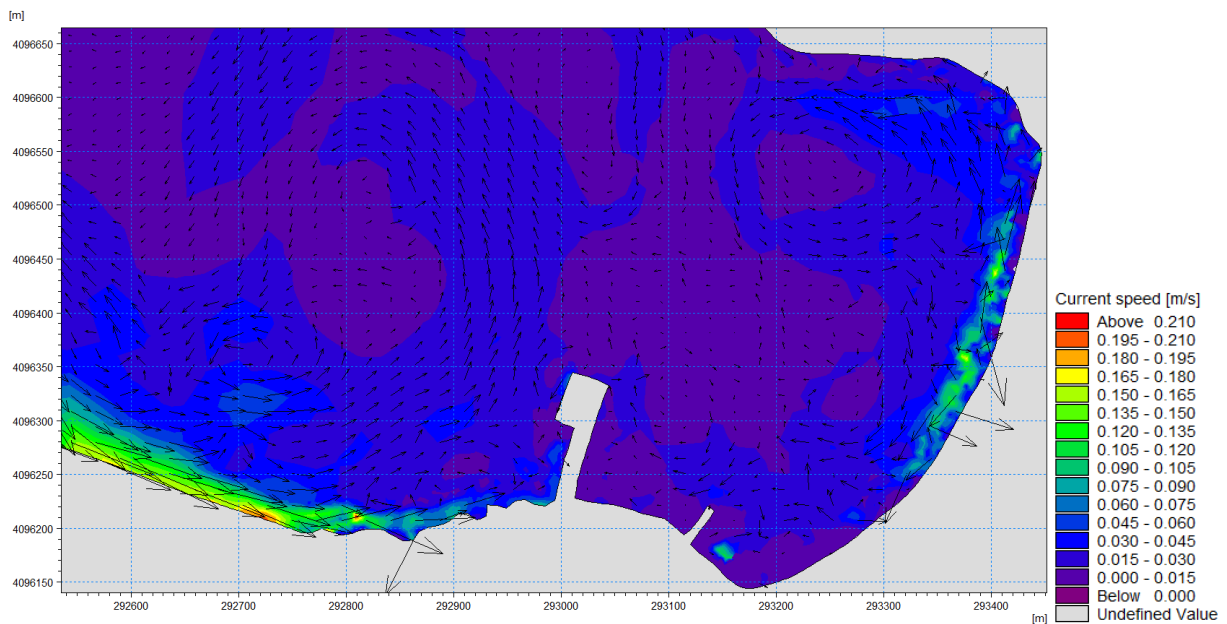
Το παραπάνω σχήμα αντιστοιχεί στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 24/24). Απεικονίζει το τελευταίο κυματικό γεγονός της χρονοσειράς με βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος ίσο με 3.00m και περίοδο 6.79s κατά τη δημιουργία του στο ανοικτό όριο της περιοχής. Το μέγιστο ύψος κύματος κοντά στα λιμενικά έργα και στην ακτή είναι 0.35m, το οποίο είναι μεγαλύτερο από τα μέγιστα ύψη που παρουσίασαν όλες οι προηγούμενες χρονοσειρές στην ίδια περιοχή (0.10m για την πλήρη, 0.30m για τη σχηματοποιημένη με τους 10 αντιπροσώπους και 0.28m για τη σχηματοποιημένη με τους 30 αντιπροσώπους). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο κύμα στο ανοικτό όριο έχει ύψος μεγαλύτερο από αυτό των προηγούμενων χρονοσειρών (1.55m για την πλήρη, 2.03m για τη σχηματοποιημένη με τους 10 αντιπροσώπους και 2.07m για τη σχηματοποιημένη με τους 30 αντιπροσώπους). Παρόλα αυτά, η διαφορά του μέγιστου ύψους κύματος των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης χρονοσειράς και της χρονοσειράς με τους 10 αντιπροσώπους παρουσιάζουν μια μικρή διαφορά της τάξης των 0.05m, το οποίο μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι και οι δύο αυτές χρονοσειρές είναι αρκετά χονδροειδείς σχηματοποιήσεις της αρχικής χρονοσειράς του ενός έτους.



### 5.4.2. HD (Hydrodynamic Model)

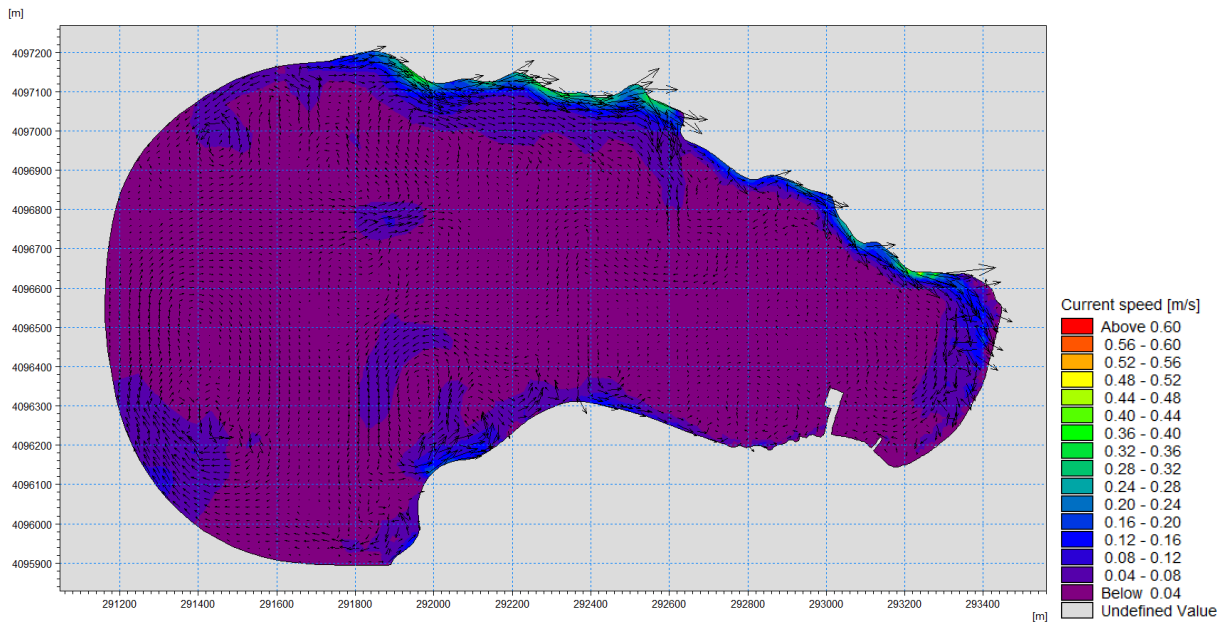


Σχήμα 5. 29: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.

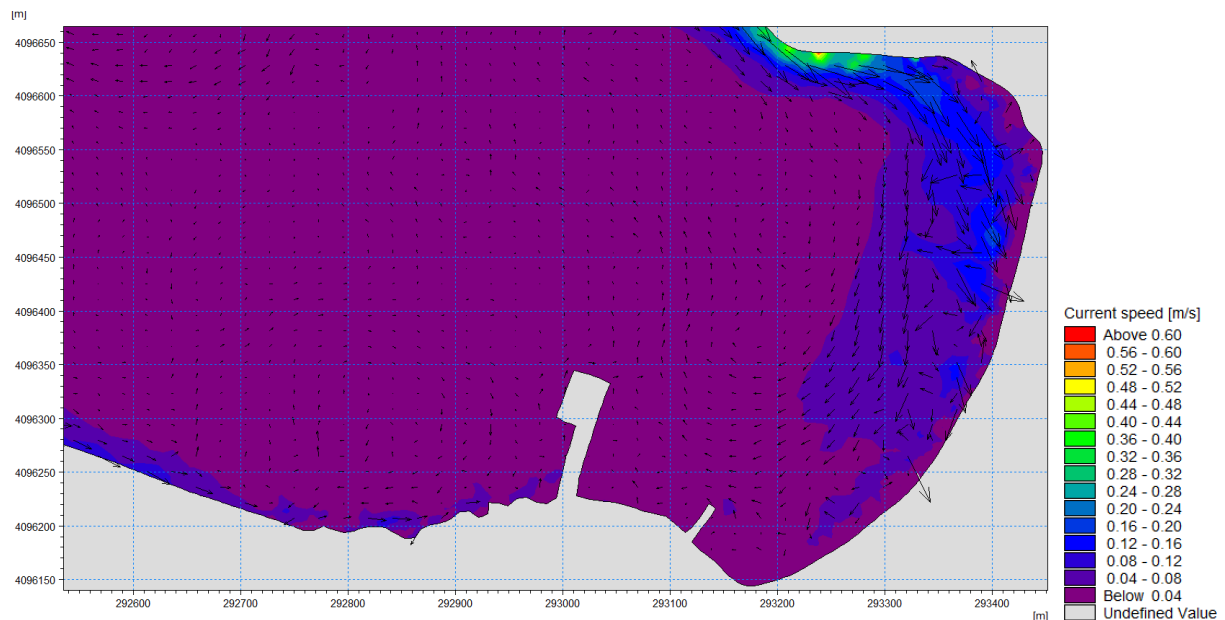


Σχήμα 5. 30: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα εμφανίζεται σχεδόν μηδενική κυματική κυκλοφορία στην ευρύτερη περιοχή με μέγιστη τιμή 0.05m/s. Η μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων που σημειώνεται κοντά στην ακτή αγγίζει τα 0.10m/s, ενώ στην είσοδο της περιοχής μελέτης τα 0.23m/s. Ωστόσο, το συγκεκριμένο κυματικό γεγονός δεν δημιουργεί σημαντικά ρεύματα στην περιοχή σε σχέση με τα γεγονότα των χρονικών βημάτων 8 και 10 (Time step 8/24 και 10/24). Η μη ταύτιση των χρονικών βημάτων που προκαλούν τη μεγαλύτερη κατά μέτρο κυματική κυκλοφορία στη μέθοδο διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια και στις υπόλοιπες μεθόδους είναι αναμενόμενη και εξηγήθηκε εκτενώς στα Κεφάλαια 5.2 και 5.3.

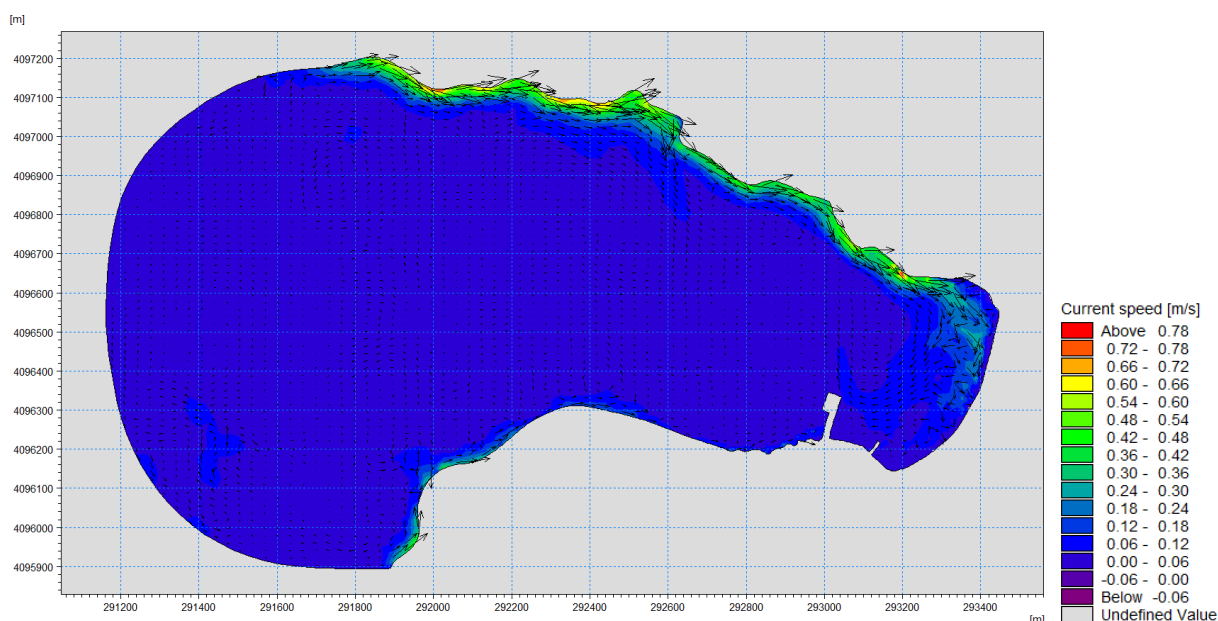


Σχήμα 5. 31: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 8/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.

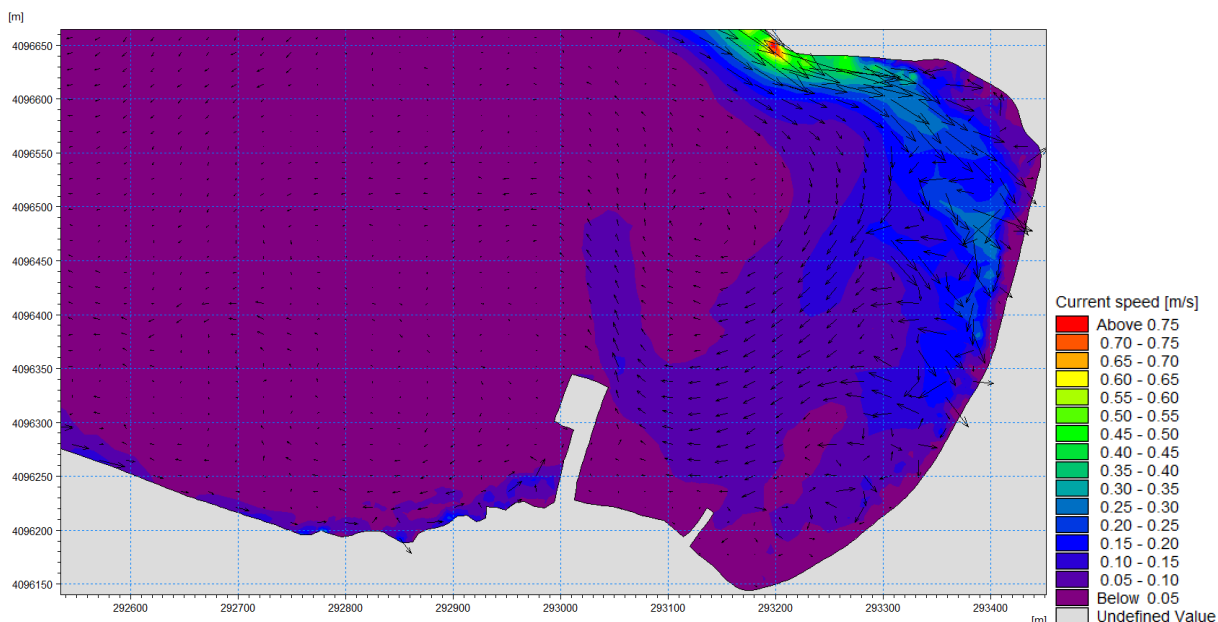


Σχήμα 5. 32: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 8/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Το κυματικό γεγονός του συγκεκριμένου βήματος έχει διεύθυνση περίπου  $225^\circ$  (νοτιοδυτική), ύψος κύματος 1.50m και περίοδο 5.65s. Στα παραπάνω σχήματα είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων παράλληλα στο βόρειο τμήμα της περιοχής με κατεύθυνση προς την παραλία και μέγιστη ταχύτητα 0.60m/s. Επιπλέον, τα ρεύματα που σημειώνονται κοντά στην ακτή έχουν μέγιστη τιμή 0.15m/s.



Σχήμα 5. 33: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 10/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.



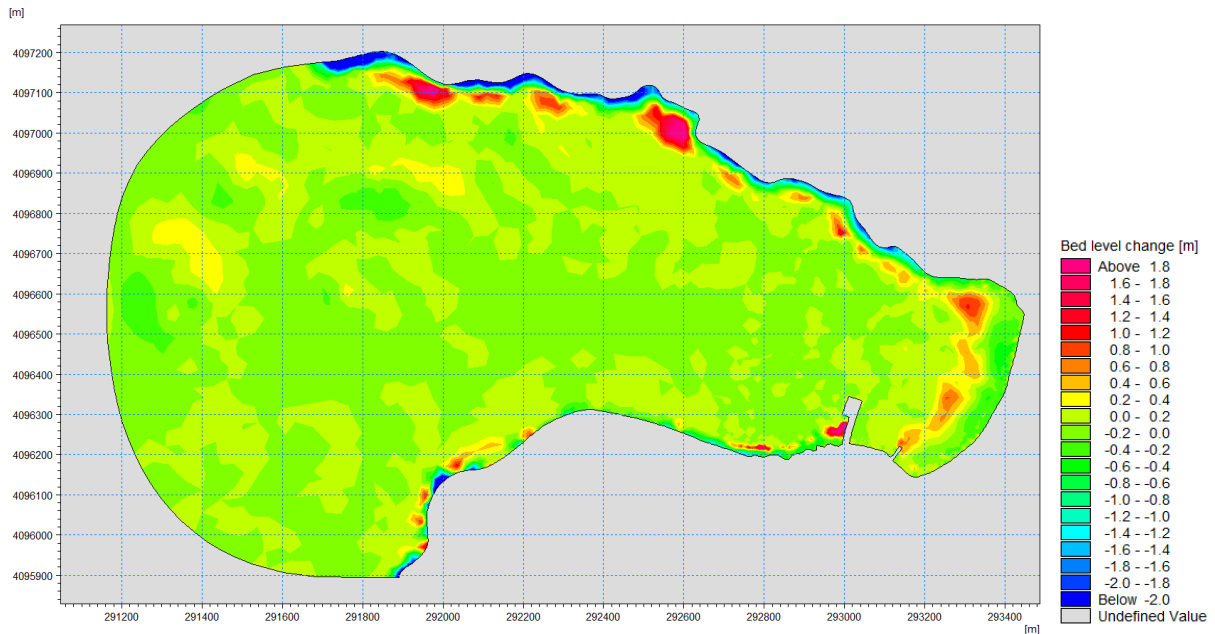
Σχήμα 5. 34: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 10/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα αντιστοιχεί κυματικό γεγονός με διεύθυνση 228° (~νοτιοδυτική), ύψος κύματος 3.00m και περίοδο 7.79s. Παρατηρείται έντονο ρεύμα παράλληλα στο βόρειο κλειστό όριο με μέγιστη ταχύτητα 0.80m/s. Επιπλέον, σημειώνονται στην περιοχή της ακτής ρεύματα με μέγιστη ταχύτητα 0.28m/s τα οποία στροβιλίζονται με μικρό μέτρο σε μία περιοχή μπροστά από τον δυτικό προβλήτα.

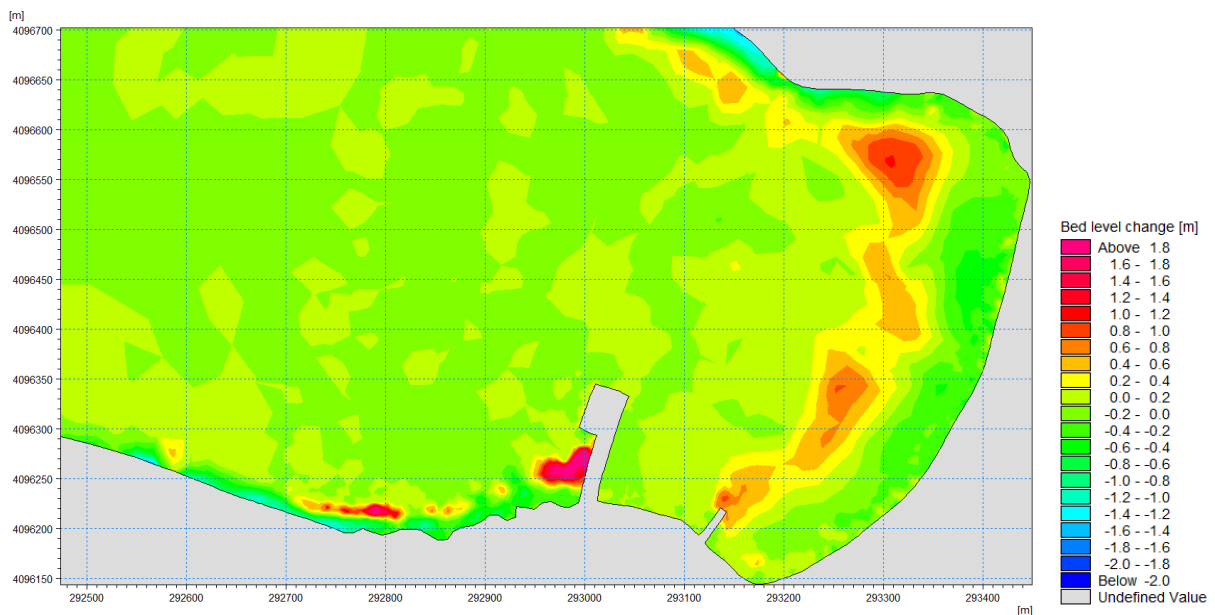
Παρατηρείται ότι γενικώς το μοτίβο των ρευμάτων που δημιουργούνται από τη συγκεκριμένη χρονοσειρά είναι παρόμοιο με των προηγούμενων μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, τα ρεύματα στο τελευταίο (βλ. Σχήμα 5.30) και στο 8<sup>ο</sup> χρονικό βήμα (βλ. Σχήμα 5.32) προσομοιάζουν την κίνηση των ρευμάτων του τελευταίου (βλ. Σχήμα 5.21) και του 4<sup>ου</sup> χρονικού βήματος (βλ. Σχήμα 5.23) της χρονοσειράς με τους 30 αντιπροσώπους, αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι κυματισμοί

των παρόμοιων βημάτων έχουν την ίδια διεύθυνση και το ίδιο μέτρο παραγόμενων ρευμάτων. Το 10<sup>ο</sup> χρονικό βήμα (βλ. Σχήμα 5.34) της παρούσας εξεταζόμενης χρονοσειράς προσομοιάζει την κίνηση των ρευμάτων του 16<sup>ου</sup> χρονικού βήματος (βλ. Σχήμα 5.16) της χρονοσειράς με τους 10 αντιπροσώπους, γεγονός που οφείλεται στους κυματισμούς ίδια διεύθυνσης και παρόμοιου ύψους κύματος.

#### 5.4.3. ST (Sand Transport Model)



Σχήμα 5. 35: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια.



Σχήμα 5. 36: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια - Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα που απεικονίζουν το τελευταίο κυματικό γεγονός, σημειώνεται υποχώρηση της τάξης των 0.10 – 0.50m σε ένα τμήμα πλάτους 50 – 100m, το οποίο εκτείνεται από το βόρειο έως μερικά μέτρα πριν το νότιο τμήμα της ακτογραμμής, ενώ παρατηρείται πρόοδος έως 0.30m στο νότιο

τμήμα. Σε μια ζώνη που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 100m από την ακτογραμμή και σε επαφή με το προαναφερθέν τμήμα που διαβρώνεται, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος με μέγιστη τιμή 0.94m. Παράλληλα, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος ακριβώς ανάντη του προσήνεμου προβλήτα έως 2.60m.

Το συγκεκριμένο μοτίβο στερεομεταφοράς προσομοιάζει τα μοτίβα που αναλύθηκαν στα *Κεφάλαια 5.1.3, 5.2.3 και 5.3.3* τα οποία προκαλούνται από την πλήρη χρονοσειρά, τη χρονοσειρά με τους 10 αντιπροσώπους και τη χρονοσειρά με τους 30 αντιπροσώπους, αντίστοιχα. Οι μέγιστες τιμές των ταχυτήτων των ρευμάτων και των μεταβολών του πυθμένα είναι κατά απόλυτη τιμή (διότι πρόκειται και για αρνητικές και για θετικές τιμές, στην περίπτωση υποχώρησης και προόδου) μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των αποτελεσμάτων όλων των προηγούμενων χρονοσειρών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η χρονοσειρά των διακριτών κυματικών σεναρίων λαμβάνει ως αντιπροσώπους των υψών κύματος τα ακραία ύψη που εμφανίζονται και έτσι εμπεριέχει ύψη μεγαλύτερα των 3.00m, ξεπερνώντας το εύρος υψών 0.50 – 2.90m που παρατηρείται στις προηγούμενες σχηματοποιημένες χρονοσειρές.

Στην πλήρη χρονοσειρά εμφανίζονται μεμονωμένα ύψη κύματος εκτός του εύρους 0.50 – 2.90m, ωστόσο, δεν εμφανίζει τόσο μεγάλη ποσότητα στερεομεταφοράς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σχηματοποίηση με διακριτά κυματικά σεναρία χωρίζει το ύψος κύματος σε κλάσεις ανά 0.50m και θέτει για αυτές ως αντιπρόσωπο το μέγιστο ύψος της κάθε κλάσης. Επομένως, αν για παράδειγμα η κλάση υψών μεταξύ 2.50m – 3.00m εμπεριέχει πολλά ύψη κύματος κοντά στα 2.50m και μόνο ένα αγγίζει τα 3.00m, ο αντιπρόσωπος της κλάσης θα ισούται με 3.00m και θα τοποθετηθεί στη νέα χρονοσειρά τόσες φορές όσο αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης όλων των τιμών της κλάσης. Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι αυτή η ακραία τιμή θα εμφανιστεί πολλές φορές στη νέα χρονοσειρά, προκαλώντας σημαντικές μορφολογικές μεταβολές, ενώ στην πλήρη χρονοσειρά θα εμφανιζόταν μόνο μία και ενδεχομένως να μην επηρέαζε σημαντικά τη κυματική διαταραχή της περιοχής.

## 5.5. Αξιολόγηση επίδοσης των αποτελεσμάτων των μοντέλων

Στο παρόν κεφάλαιο, πραγματοποιείται η αξιολόγηση των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις, ως προς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων που δίνουν και την απόκλισή τους από την πραγματική κατάσταση. Για την εξακρίβωση της εγκυρότητας των μοντέλων έγινε χρήση των στατιστικών μεγεθών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.3. Το βασικό κριτήριο αξιολόγησης αποτελεί η μεταβολή του πυθμένα στο πέρας της εκάστοτε προσομοίωσης. Τα δεδομένα που αντιστοιχούν στο τελευταίο χρονικό βήμα ελήφθησαν από τα αρχεία MIKE Zero ST και τοποθετήθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο Excel. Οι δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση είναι οι MSE, RMSE, RMSS, BSS και περιγράφονται από τις εξισώσεις:

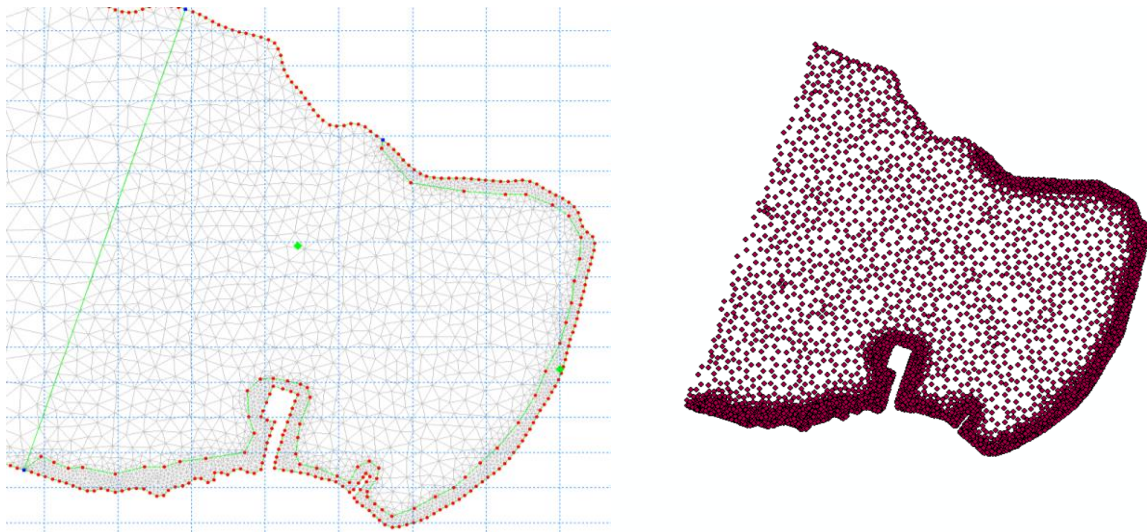
$$MSE(Y, X) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J (y_j - x_j)^2 = \langle (Y - X)^2 \rangle \quad (5.1)$$

$$BSS = 1 - \frac{MSE(Y, X)}{MSE(B, X)} = 1 - \frac{\langle (Y - X)^2 \rangle}{\langle (B - X)^2 \rangle} \quad (5.2)$$

$$RMSS = 1 - \frac{RMSE(Y, X)}{RMSE(B, X)} = 1 - \frac{\langle (Y - X)^2 \rangle^{1/2}}{\langle (B - X)^2 \rangle^{1/2}} \quad (5.3)$$

Όπου η μεταβλητή X αντιστοιχεί στην τελική βαθυμετρία της προσομοίωσης της εκάστοτε μεθόδου, η Y αντιστοιχεί στην τελική βαθυμετρία της προσομοίωσης με την πλήρη χρονοσειρά του ενός έτους και η B αντιπροσωπεύει την αρχική βαθυμετρία της περιοχής.

Η αξιολόγηση των μεθόδων πραγματοποιήθηκε στα αποτελέσματα της βαθυμετρίας στην περιοχή όπου έγινε η πύκνωση του τριγωνικού κανάβου (βλ. Εικόνα 5.1, 5.2) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.



Εικόνα 5. 1: Περιοχή πύκνωσης τριγωνικού κανάβου στα δεδομένα της οποίας πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση των μεθόδων (Αριστερά: MIKE 21, Δεξιά: ArcMap 10.5.1).

Πίνακας 5. 1: Δείκτες αξιολόγησης της εγκυρότητας της κάθε μεθόδου σχηματοποίησης.

Δείκτες	Μέθοδος ροής ενέργειας – 10 αντιπρόσωποι	Μέθοδος ροής ενέργειας – 30 αντιπρόσωποι	Μέθοδος διαχωρισμού σε διακριτά σενάρια
<i>MSE</i> ( <i>Y, X</i> )	0.08	0.05	0.08
<i>RMSE</i> ( <i>Y, X</i> )	0.29	0.22	0.29
<i>MSE</i> ( <i>B, X</i> )	0.22	0.17	0.24
<i>RMSE</i> ( <i>B, X</i> )	0.47	0.42	0.49
<b><i>BSS</i></b>	<b>0.62</b>	<b>0.73</b>	<b>0.65</b>
<i>RMSS</i>	0.38	0.48	0.41

Οι δείκτες BSS όλων των μεθόδων τις καθιστούν, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, εξαιρετικές («Excellent») για την αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης. Ως πιο αποδοτική κρίθηκε η μέθοδος ροής ενέργειας για την αναπαράσταση του κυματικού κλίματος με 30 αντιπρόσωπους, καθώς παρουσιάζει τον μεγαλύτερο δείκτη BSS ίσο με 0.73. Επομένως, η σχηματοποιημένη χρονοσειρά με την μέθοδο ροής ενέργειας με 30 αντιπρόσωπους θα χρησιμοποιηθεί για την αναπαράσταση της κυματικής διαταραχής στην περιοχή μετά την τοποθέτηση των προτεινόμενων έργων στο υπολογιστικό πεδίο.

Πίνακας 5. 2: Κατηγοριοποίηση του δείκτη BSS (Van Rijn et al., 2003).

Κατηγοριοποίηση	Εύρος τιμών BSS
Excellent	1.0 – 0.5
Good	0.5 – 0.2
Reasonable/fair	0.2 – 0.1
Poor	0.1 – 0.0
Bad	< 0.0

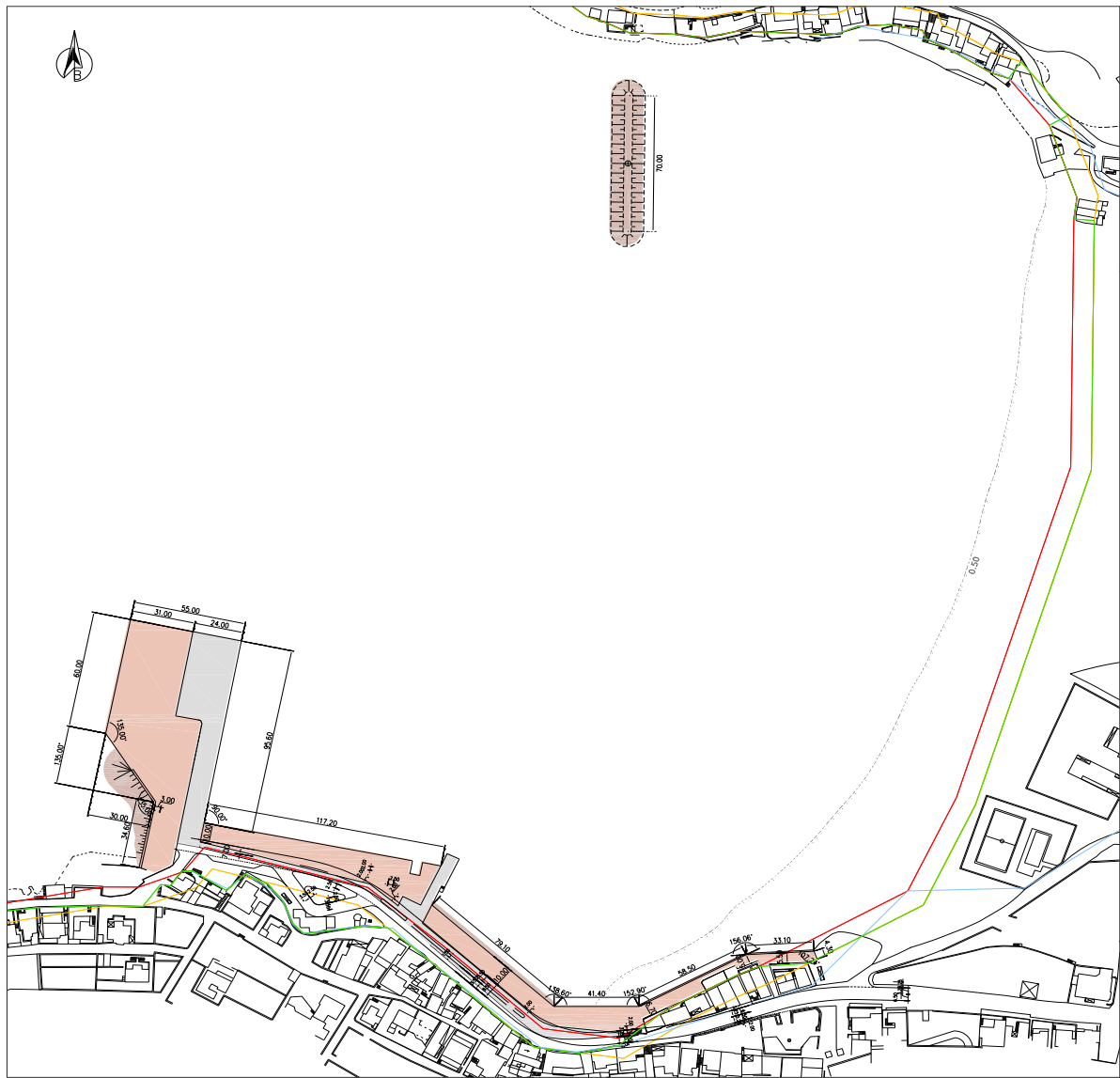
## 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΣΤΗ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΠΥΘΜΕΝΑ

Η κατασκευή του προσήνεμου προβλήτα στις Καμάρες κατά τα τέλη της δεκαετίας του 70' και η επέκτασή του στα τέλη της δεκαετίας του 80' είχε ως αποτέλεσμα την αλλοίωση της ακτομηχανικής ισορροπίας της περιοχής. Όπως φαίνεται στις αεροφωτογραφίες που παρατίθενται και αναλύονται στην παράγραφο 3.4.5 της παρούσας, παρατηρείται σημαντική υποχώρηση της ακτογραμμής στο βόρειο της παραλίας με ταυτόχρονη πρόοδο στο νότιο. Ωστόσο, τα τελευταία 20 χρόνια, το παραπάνω φαινόμενο έχει μειωθεί σημαντικά, καθώς η ακτογραμμή φαίνεται να έχει φτάσει σε νέα ισορροπία.

Το σημαντικότερο πρόβλημα της περιοχής είναι η ανεπάρκεια των χερσαίων υποδομών του υφιστάμενου προσήνεμου επιβατικού προβλήτα, με συνέπεια την επιβάρυνση του παραλιακού μετώπου με οχήματα προκαλώντας σημαντική όχληση στην εύρυθμη λειτουργία του κεντρικού δρόμου του οικισμού. Επιπλέον, δημιουργούνται σημαντικές καθυστερήσεις στην διαδικασία φόρτωσης των οχημάτων με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη παραμονή των πλοίων στο λιμάνι. Η συνδυασμένη λειτουργία περισσότερων της μίας δραστηριότητας στα όρια του προβλήτα, όπως η ταυτόχρονη εξυπηρέτηση οχηματαγωγών πλοίων, ταχύπλων επιβατικών ή κρουαζιερόπλοιων, δημιουργεί συνθήκες κορεσμού στους χερσαίους χώρους του λιμένα με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης ατυχήματος και επιπλέον το μειωμένο επίπεδο εξυπηρέτησης των χρηστών.

Σύμφωνα με μελέτη που εκπονήθηκε το 2017 (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου) για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της περιοχής, η κύρια πρόταση εμπεριείχε την επέκταση του υφιστάμενου προσήνεμου προβλήτα, τη διαπλάτυνση των κρηπιδωμάτων και την κατασκευή ύφαλου κυματοθραύστη παράλληλα στην ακτογραμμή. Η πρόσθετη επιφάνεια εκτείνεται περίπου σε 7000m<sup>2</sup> ενώ η συνολική έκταση των λιμενικών έργων (νέα και υφιστάμενα) ανέρχεται στα 10085m<sup>2</sup>. Πιο αναλυτικά, προτείνεται η προσθήκη 3500m<sup>2</sup> δυτικά του προσήνεμου προβλήτα και η αλλαγή της γεωμετρίας του. Ακόμη προβλέπεται η διαπλάτυνση των δυτικών και ανατολικών κρηπιδωμάτων κατά 4370m<sup>2</sup> (βλ. *Εικόνα 6. 1*). Ωστόσο, όπως προαναφέρθηκε, η μορφολογία της ακτογραμμής, από το 1999 έως το 2019, έχει φτάσει σε μία νέα ισορροπία, επομένως δεν κρίνεται σκόπιμη η προσθήκη ακτομηχανικού έργου στην περιοχή. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκε μόνο η επέκταση του προσήνεμου προβλήτα και η διαπλάτυνση των κρηπιδωμάτων για την ασφαλέστερη εξυπηρέτηση των πεζών και των οχημάτων. Στόχος είναι η διερεύνηση της επίδρασης της επέκτασης των λιμενικών έργων στην ισορροπημένη πλέον μορφολογία της ακτής, λόγω της ανάκλασης των κυματισμών πάνω στα νέα έργα.





ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΕΡΓΑ
- ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ
- ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟΥΣ ΟΓΚΟΛΙΘΟΥΣ
- ΟΡΙΟ ΛΙΓΑΛΟΥ [ΦΕΚ 731Δ/29-08-2002]
- ΟΡΙΟ ΠΑΡΑΛΙΑΣ [ΦΕΚ 731Δ/29-08-2002]
- ΟΡΙΟ ΧΩΡΩΝ ΕΞΟΜΟΙΟΥΜΕΝΩΝ ΜΕ ΖΩΝΗ ΛΙΜΕΝΑ [ΦΕΚ 94ΑΑΠ/5-3-2009]

Εικόνα 6. 1: Προτεινόμενα έργα από τη μελέτη Διαμόρφωσης λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου, 2017.

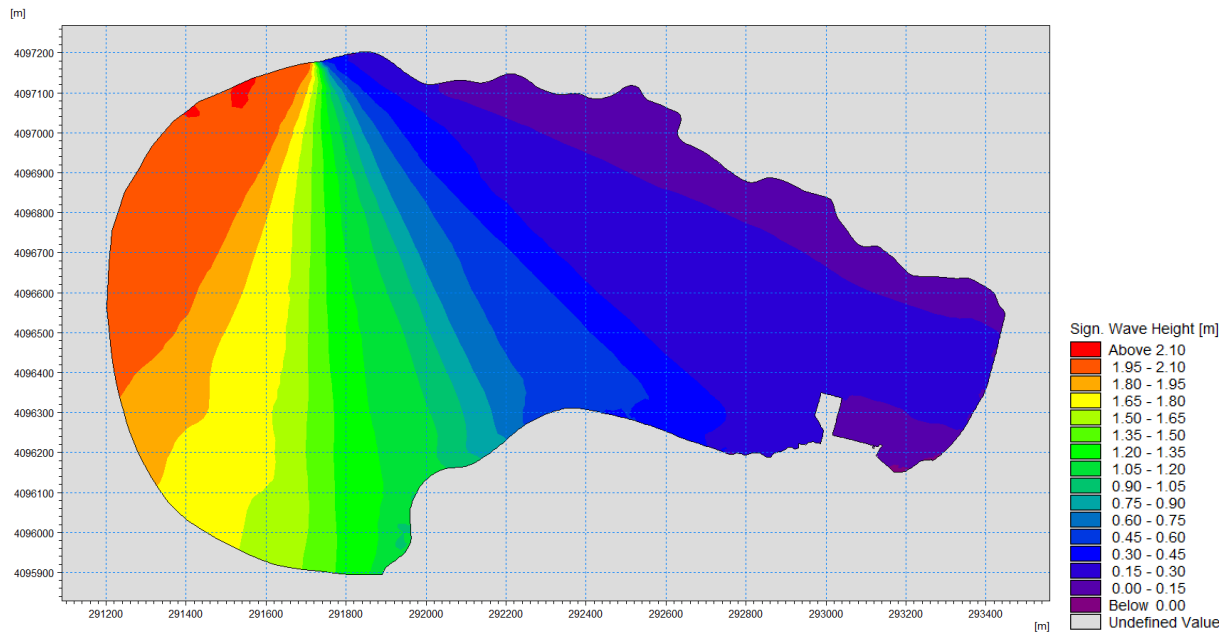
### 6.1. Πρόταση 1 – Επέκταση προσήνεμου προβλήτα και κρηπιδωμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επέκταση του προσήνεμου προβλήτα και η διαπλάτυνση των κρηπιδωμάτων (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου, 2017). Στόχος είναι η διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής της ανακλαστικότητας των λιμενικών έργων στη μορφολογική εξέλιξη της ακτογραμμής.



Εικόνα 6. 2: Επέκταση προσήνεμου προβλήτα και διαπλάτυνση κρηπιδωμάτων (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου 2017) – Πρόταση 1.

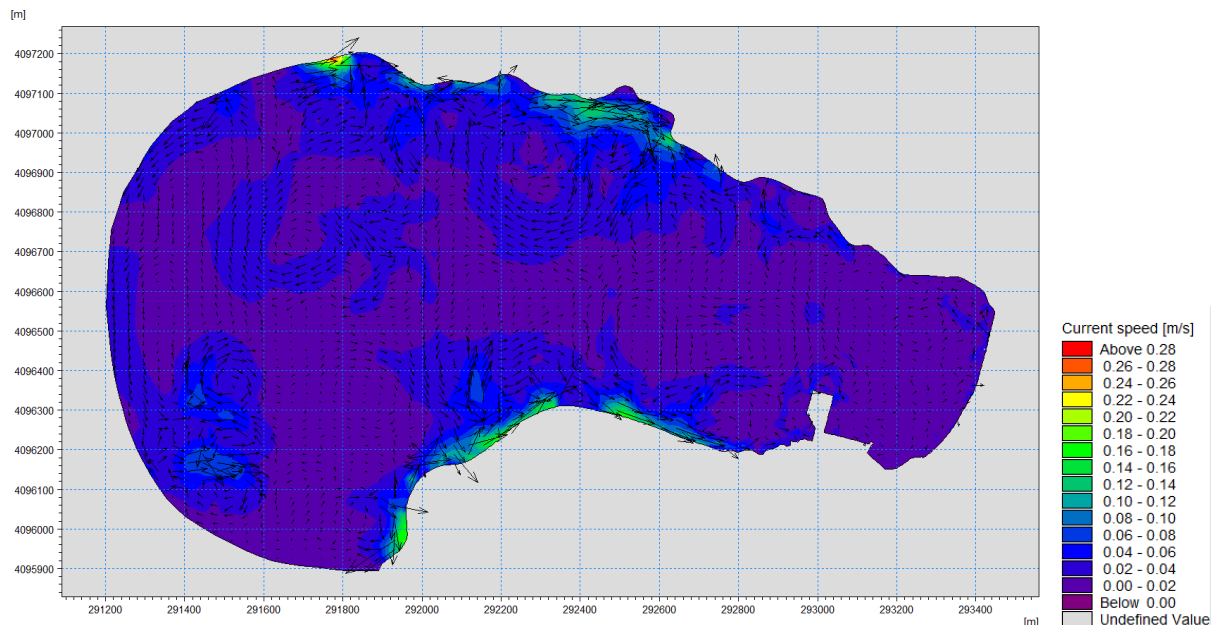
### 6.1.1. SW (Spectral Waves Model)



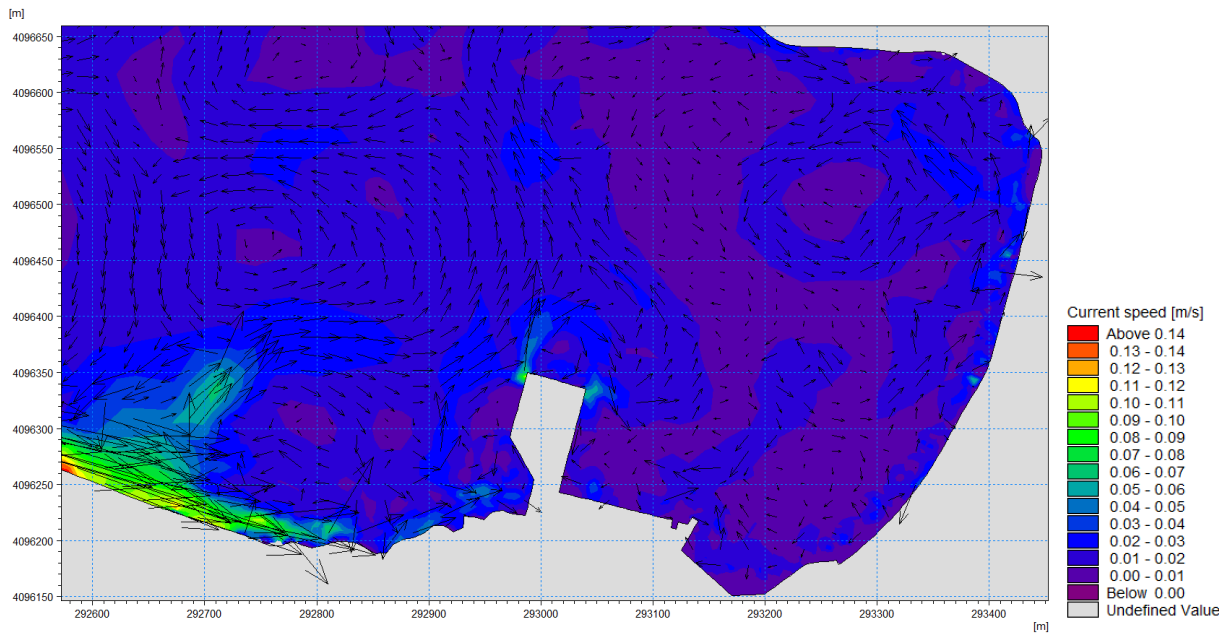
Σχήμα 6. 1: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Πρόταση 1.

Το παραπάνω σχήμα αντιστοιχεί στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 24/24). Απεικονίζει το τελευταίο κυματικό γεγονός της χρονοσειράς με βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος ίσο με 2.07m και περίοδο 6.13s κατά τη δημιουργία του στο ανοικτό όριο της περιοχής. Το μέγιστο ύψος κύματος κοντά στα λιμενικά έργα είναι 0.24m.

### 6.1.2. HD (Hydrodynamic Model)

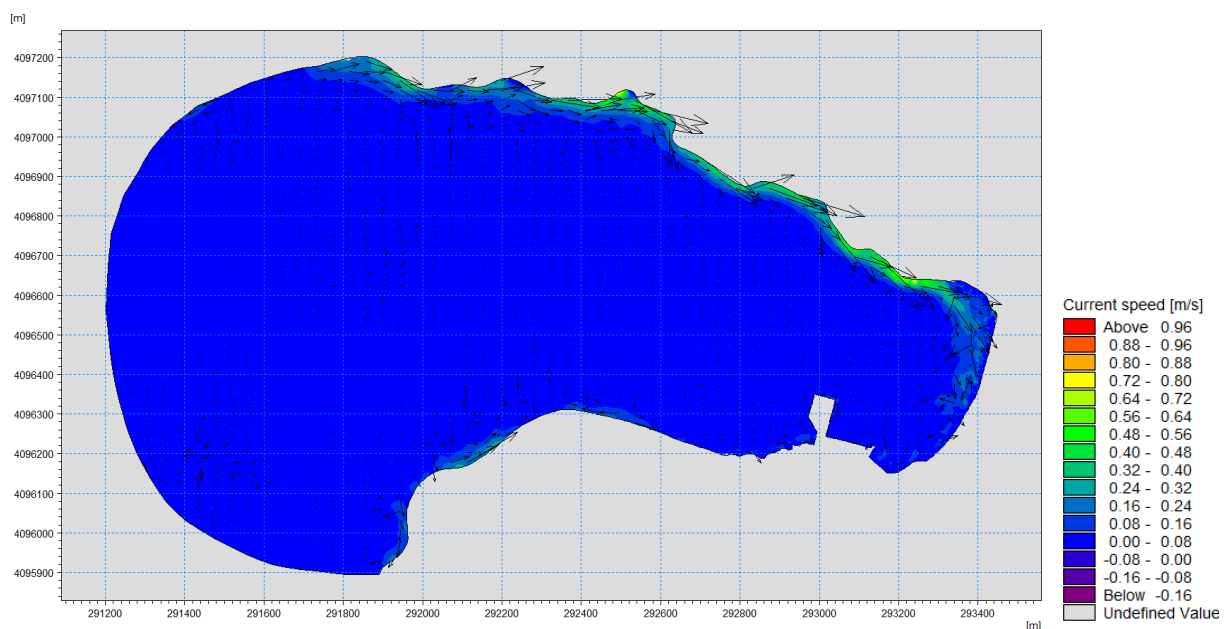


Σχήμα 6. 2: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Πρόταση 1.

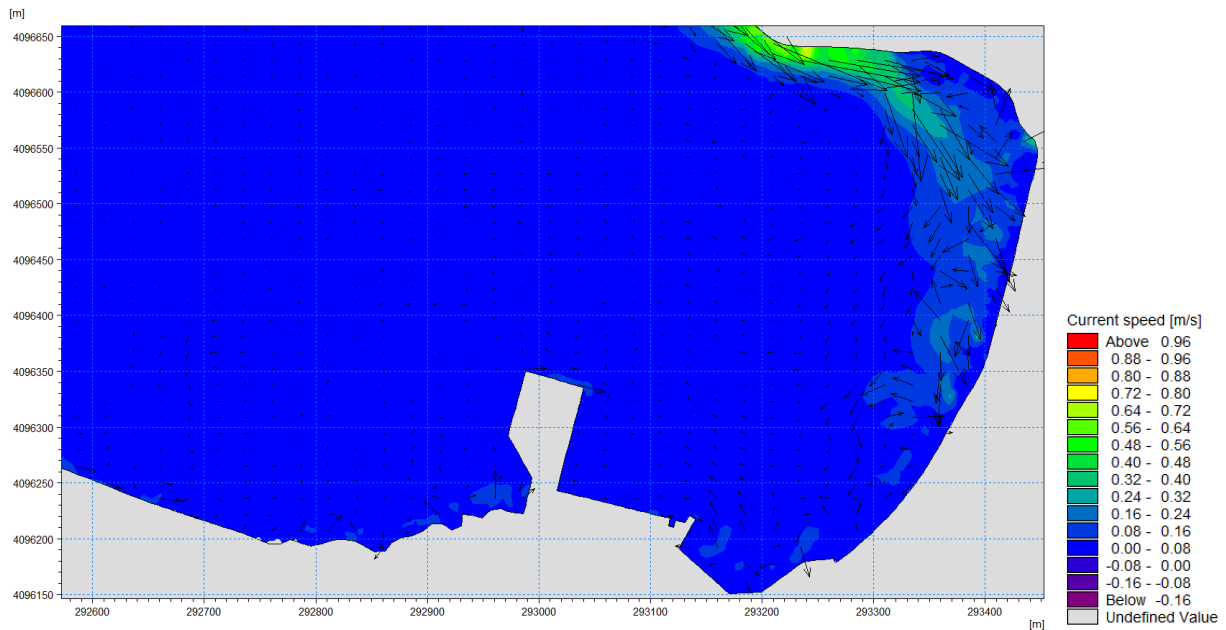


Σχήμα 6. 3: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 24/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα εμφανίζεται σχεδόν μηδενική κυματική κυκλοφορία στην ευρύτερη περιοχή με μέγιστη τιμή 0.03m/s. Η μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων που σημειώνεται κοντά στην ακτή αγγίζει τα 0.05m/s, ενώ στην είσοδο της περιοχής μελέτης τα 0.28m/s. Στις δύο κορυφές του προσήνεμου προβλήτα παρατηρείται μικρή αύξηση της ταχύτητας των ρευμάτων με μέγιστη τιμή 0.10m/s και επομένως αναμένεται στο σημείο να εμφανιστεί μικρή πρόοδος του πυθμένα. Το συγκεκριμένο κυματικό γεγονός δεν δημιουργεί σημαντικά ρεύματα στην περιοχή σε σχέση με τα γεγονότα των χρονικών βημάτων 4 και 16 (Time step 4/24 και 16/24).

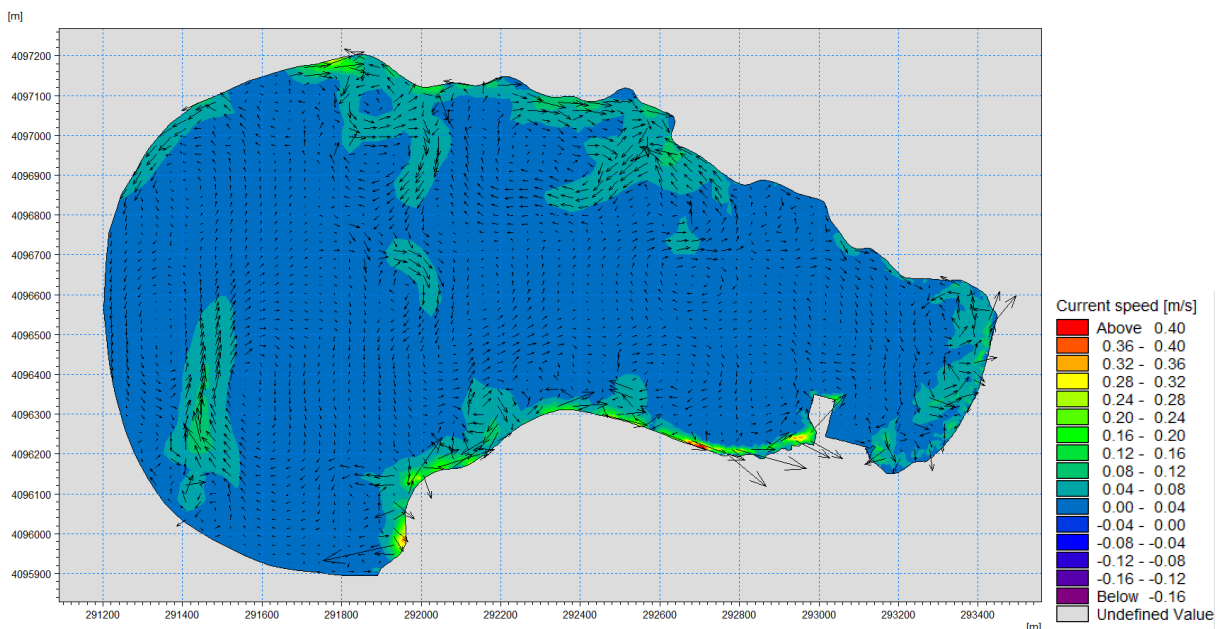


Σχήμα 6. 4: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 4/24)– Πρόταση 1.

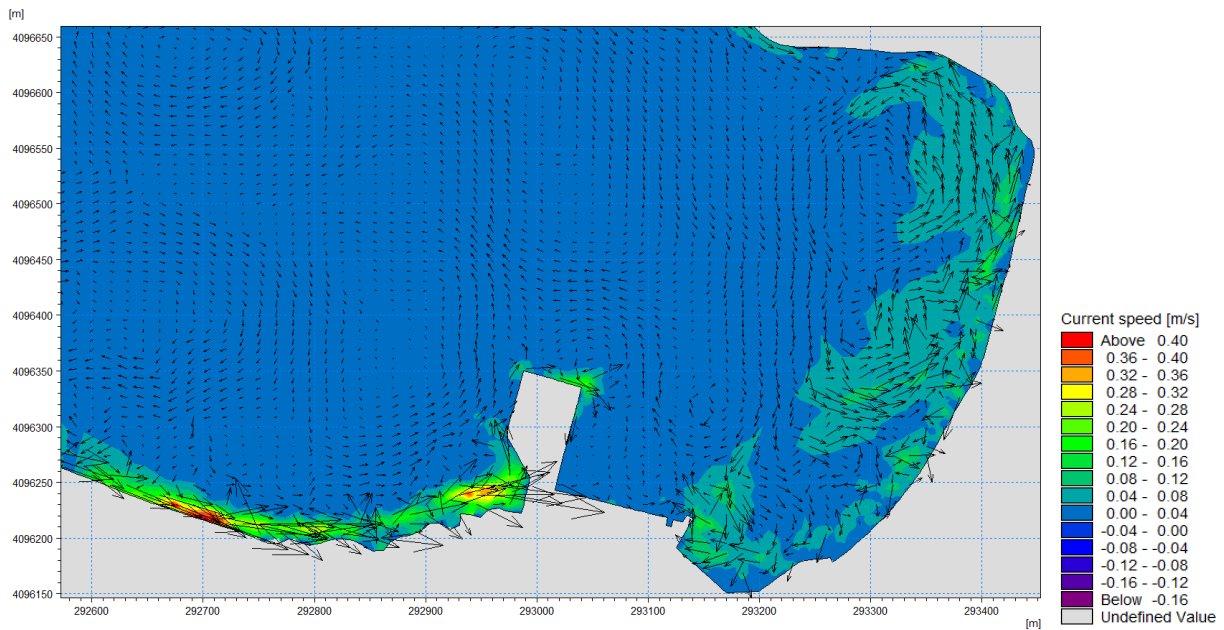


Σχήμα 6. 5: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Το κυματικό γεγονός του συγκεκριμένου βήματος έχει διεύθυνση περίπου  $230^\circ$  (~νοτιοδυτική), ύψος κύματος 2.19m και περίοδο 7.04s. Οι δράσεις των ρευμάτων στο συγκεκριμένο βήμα είναι πιο έντονες από τις δράσεις του κυματισμού του τελευταίου χρονικού βήματος, γεγονός αναμενόμενο καθώς ο κυματισμός του 4<sup>ου</sup> βήματος είναι νοτιοδυτικής διεύθυνσης, η οποία σύμφωνα με τον προσανατολισμό του όρμου, καθίσταται πιο κρίσιμη σε σύγκριση με τη βόρεια διεύθυνση. Στα παραπάνω σχήματα είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων παράλληλα στο βόρειο τμήμα της περιοχής με κατεύθυνση προς την παραλία και μέγιστη ταχύτητα 0.90m/s. Επιπλέον, τα ρεύματα που σημειώνονται κοντά στην ακτή έχουν μέγιστη ταχύτητα 0.18m/s.



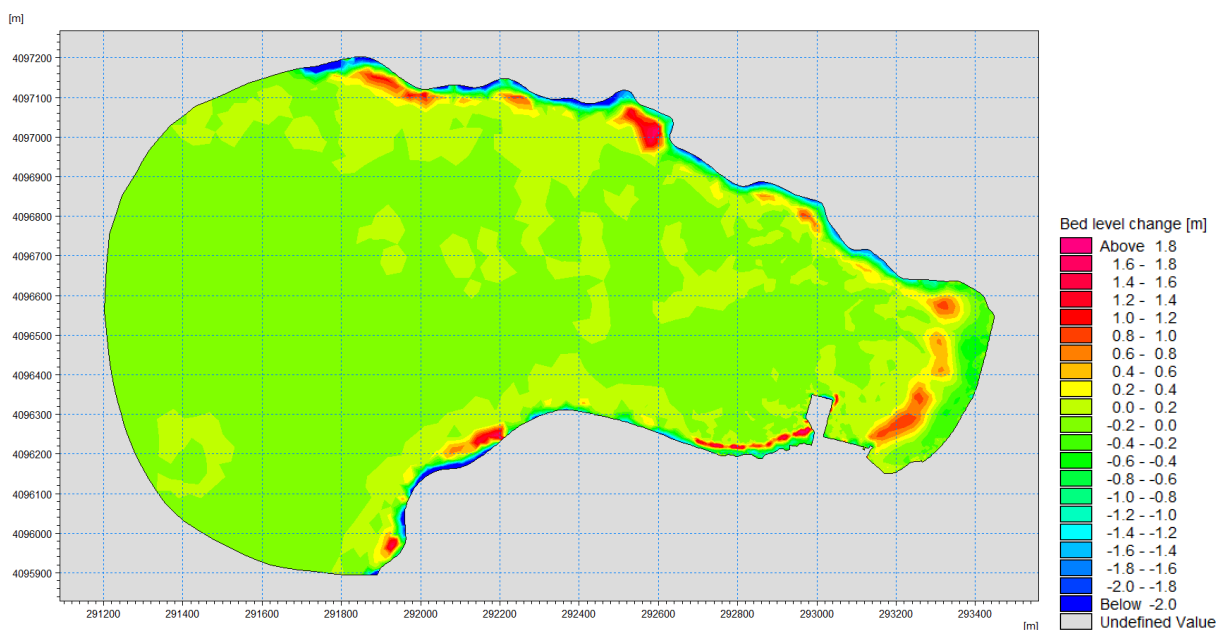
Σχήμα 6. 6: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 16/24)– Πρόταση 1.



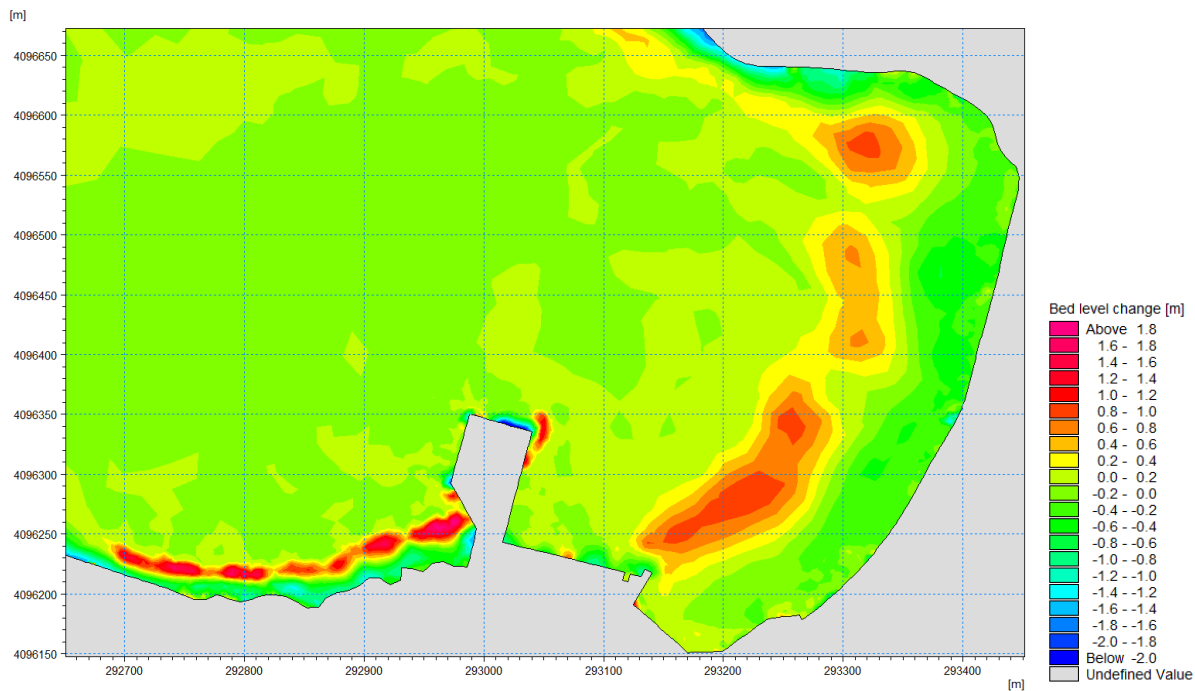
Σχήμα 6. 7: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα αντιστοιχεί κυματικό γεγονός με διεύθυνση  $320^\circ$  ( $\sim$ βορειοδυτική), ύψος κύματος 2.90m και περίοδο 6.62s. Είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων στο νότιο τμήμα της περιοχής, ανάντη του προσήνεμου προβλήτα και με κατεύθυνση προς αυτόν, με μέγιστη τιμή 0.40m/s. Γενικώς, οι ταχύτητες των ρευμάτων κοντά στην ακτή παρουσιάζουν μικρό μέτρο ( $\sim$ 0.15m) και επομένως οι μεταβολές της μορφολογίας του πυθμένα δεν αναμένεται να είναι σημαντικού μεγέθους στη συγκεκριμένη περιοχή. Τέλος, να σημειωθεί ότι ταχύτητες και οι διευθύνσεις των ρευμάτων που παρατηρούνται στην 1<sup>η</sup> πρόταση είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες ταχύτητες των ρευμάτων της υφιστάμενης κατάστασης.

### 6.1.3. ST (Sand Transport Model)



Σχήμα 6. 8: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 1.



Σχήμα 6. 9: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 1 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα που απεικονίζουν το τελευταίο κυματικό γεγονός, παρατηρείται ότι το γενικό μοτίβο και μέγεθος των μεταβολών του πυθμένα στην ευρύτερη περιοχή είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα της υφιστάμενης κατάστασης (βλ. Σχήμα 5.9).

Πιο αναλυτικά, ανάντη του νέου προσήνεμου προβλήτα και σε επαφή με αυτόν παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος έως 1.80m, η οποία συνεχίζεται και σε μία μικρού πλάτους ζώνη προς τα δυτικά και παράλληλα στην ακτογραμμή. Η εμφάνιση αυτής της ζώνης, οφείλεται στη διαπλάτυνση του προσήνεμου προβλήτα και ενδεχομένως στην αλλαγή της κλίσης στη δυτική παρειά του, η οποία μειώνει τον διαθέσιμο χώρο εναπόθεσης ιζήματος που υπάρχει σήμερα, ανάντη του υφιστάμενου προβλήτα. Ακόμη, στις δύο κορυφές του προβλήτα παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος περίπου 1.00m, γεγονός που ήταν αναμενόμενο καθώς στα εν λόγω σημεία είχε παρατηρηθεί συσσώρευση ρευμάτων. Ενδιάμεσα στις δύο κορυφές και σε επαφή με το βόρειο μέτωπο του προβλήτα παρατηρείται μέγιστη διάβρωση 1.80m, το οποίο είναι αποτέλεσμα της ανάκλασης των κυματισμών στο νέο μέτωπο. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στο μέτωπο των ενδιάμεσων κρηπιδωμάτων με τη μέγιστη υποχώρηση να φτάνει περίπου στο 1.00m. Τέλος, στο μέτωπο των ανατολικών κρηπιδωμάτων σημειώνεται μικρή διάβρωση της τάξης των 0.30m.

Σε ότι αφορά την περιοχή κοντά στην ακτογραμμή, σε μία ζώνη πλάτους 50 – 150m από το βόρειο μέχρι μερικά μέτρα πριν το νότιο τμήμα της ακτής και σε επαφή με αυτήν σημειώνεται διάβρωση, με μέγιστη υποχώρηση 0.40m στο βόρειο τμήμα της ζώνης. Δυτικά της εν λόγω ζώνης και σε επαφή με αυτήν, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος, η οποία σημειώνει μέγιστη πρόοδο στο βόρειο και στο νότιο τμήμα 0.80m. Η εναπόθεση ιζήματος στη σκιά του νέου προσήνεμου προβλήτα είναι αναμενόμενη, καθώς η διαπλάτυνσή του επηρέασε την κυματική κυκλοφορία. Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, το γενικό μοτίβο στερεομεταφοράς της παρούσας πρότασης και της υφιστάμενης κατάστασης είναι παρόμοιο.

## 6.2. Πρόταση 2 – Επέκταση προσήνεμου προβλήτα

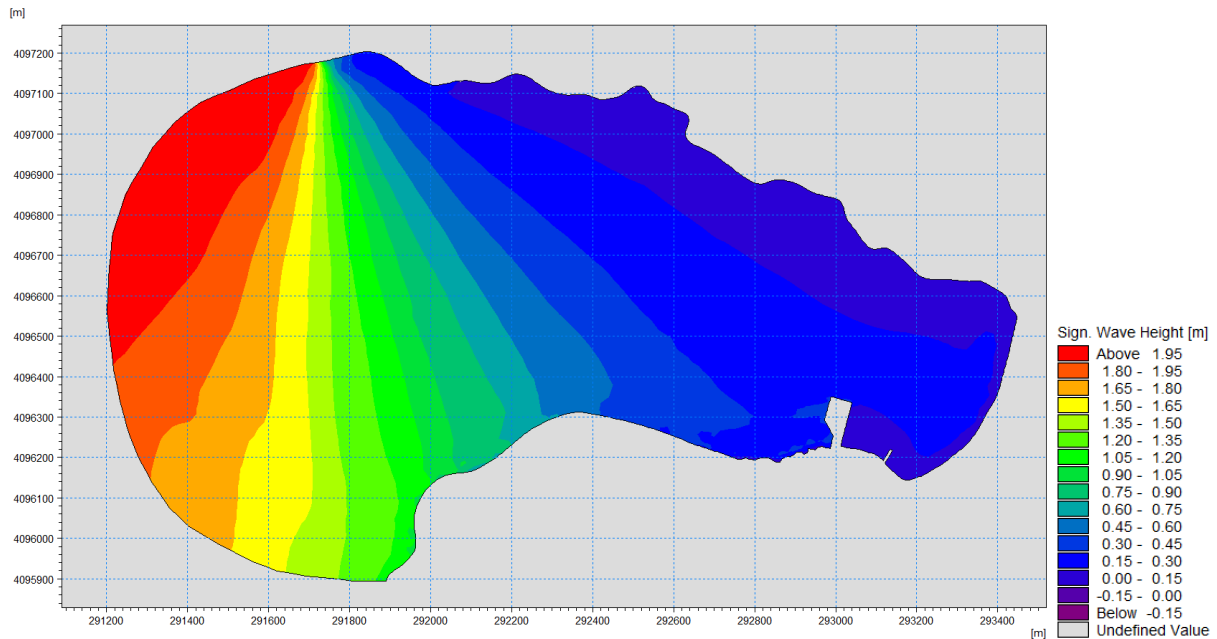
Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζεται η επέκταση του προσήνεμου προβλήτα χωρίς διαπλάτυνση των κρηπιδωμάτων (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου, 2017). Στόχος είναι η διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής της ανακλαστικότητας μόνο του προσήνεμου προβλήτα, με διατήρηση των υφιστάμενων κρηπιδωμάτων, στη μορφολογία της ακτής. Δηλαδή, η μελέτη της επιρροής, στην ακτογραμμή, του έργου που έχει στόχο την επίλυση μόνο του βασικού προβλήματος της περιοχής, το οποίο αφορά στην δημιουργία μεγαλύτερου και ασφαλέστερου χώρου συνύπαρξης πεζών και οχημάτων στον προσήνεμο προβλήτα.



Εικόνα 6. 3: Επέκταση προσήνεμου προβλήτα (CNWAY, Διαμόρφωση λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου 2017) – Πρόταση 2.



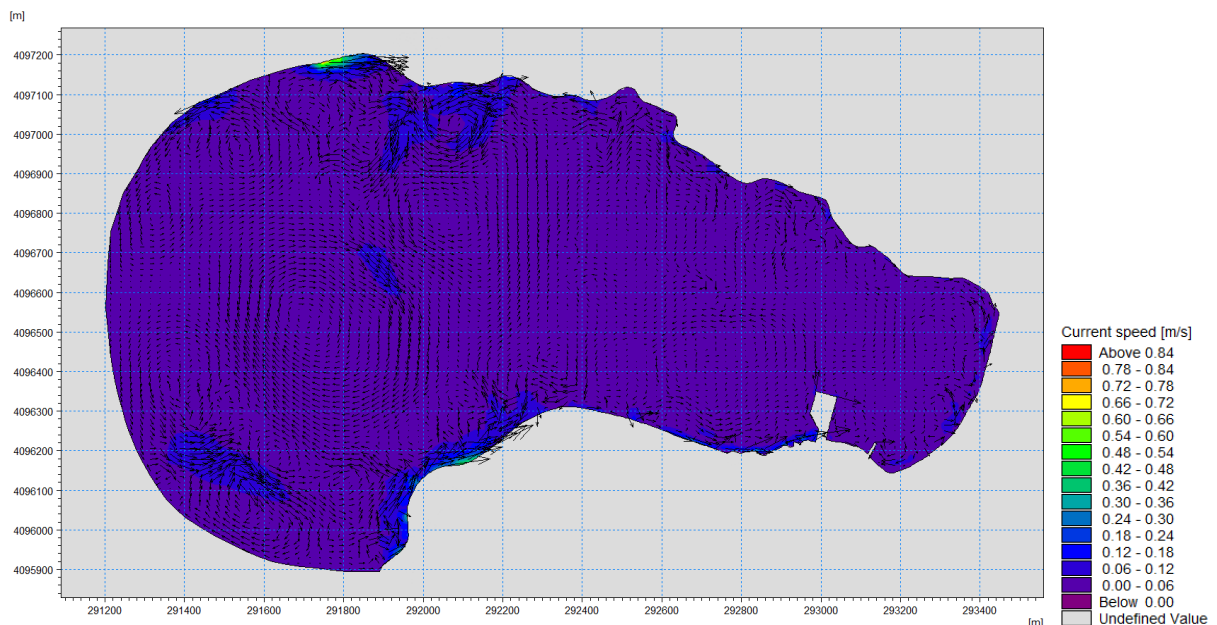
### 6.2.1. SW (Spectral Waves Model)



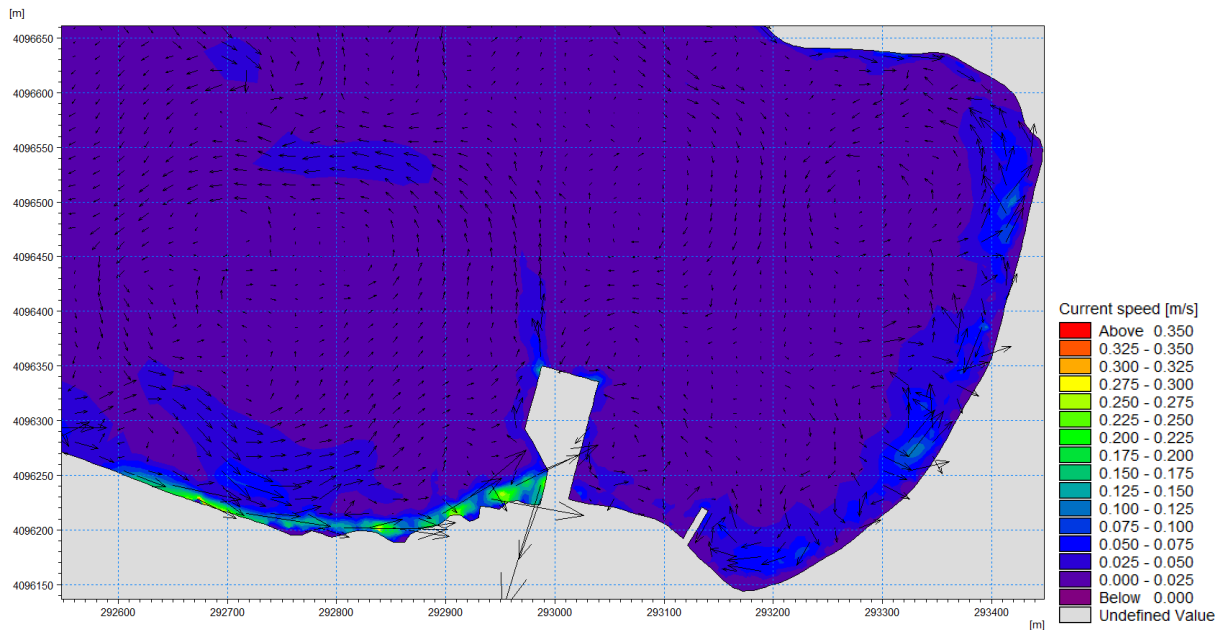
Σχήμα 6. 10: Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Πρόταση 2.

Το παραπάνω σχήμα αντιστοιχεί στο πέρας της προσομοίωσης (Time Step 24/24). Απεικονίζει το τελευταίο κυματικό γεγονός της χρονοσειράς με βόρεια διεύθυνση, ύψος κύματος ίσο με 2.07m και περίοδο 6.13s κατά τη δημιουργία του στο ανοικτό όριο της περιοχής. Το μέγιστο ύψος κύματος κοντά στα λιμενικά έργα είναι 0.25m.

### 6.2.2. HD (Hydrodynamic Model)

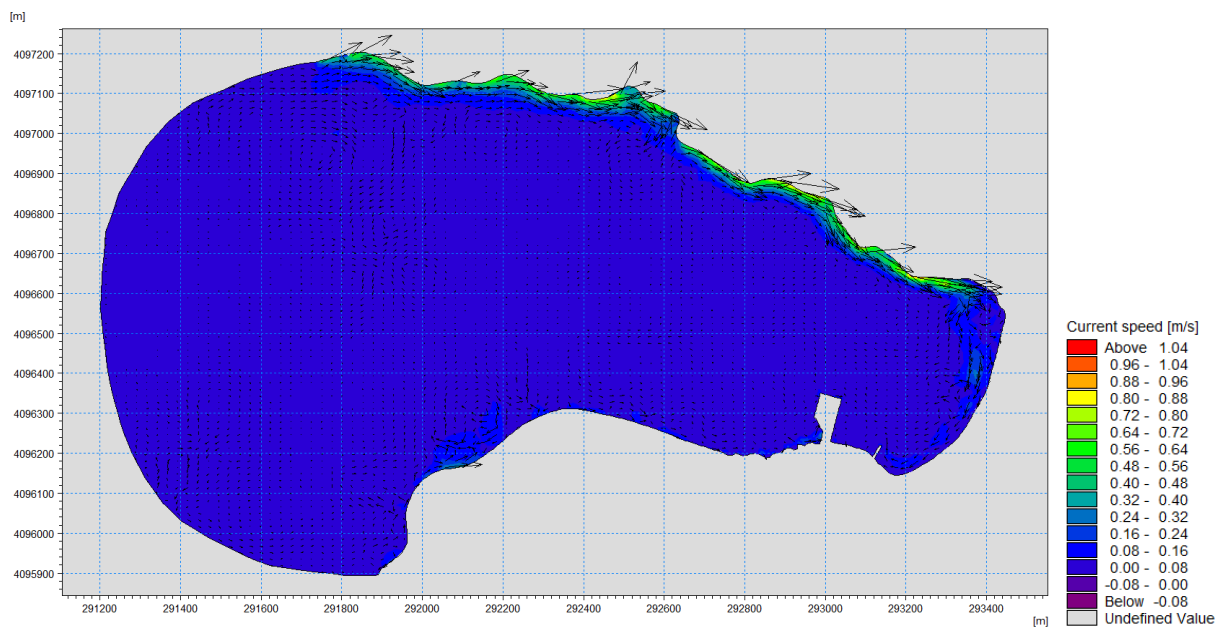


Σχήμα 6. 11: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 24/24)– Πρόταση 2.

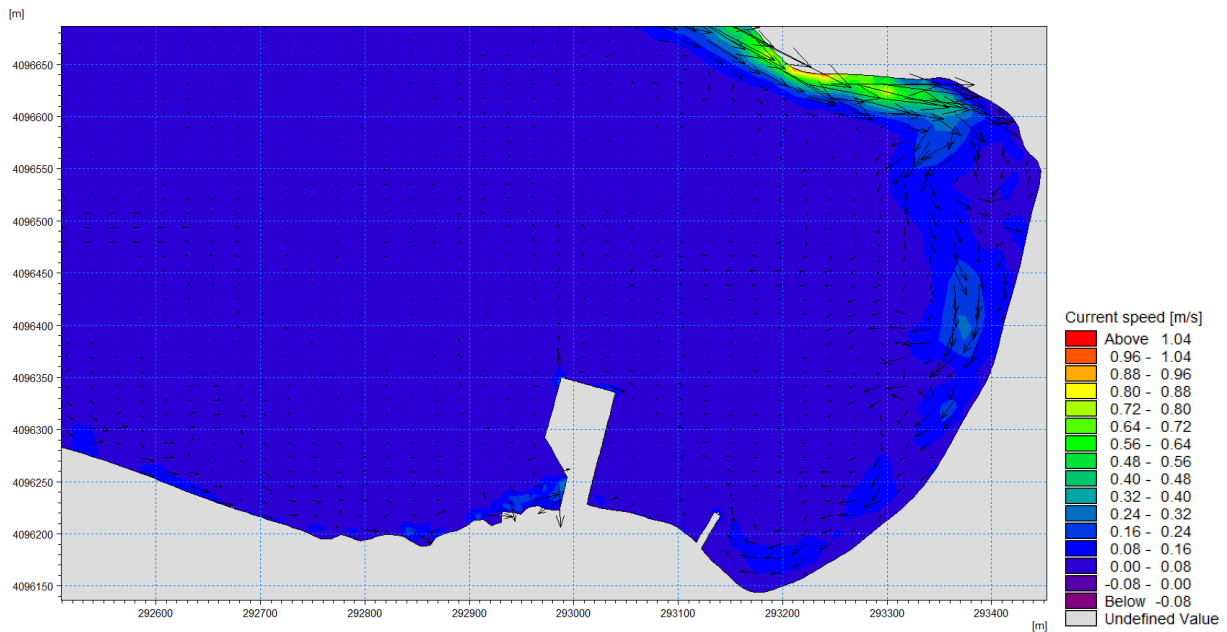


Σχήμα 6. 12: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 24/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα εμφανίζεται σχεδόν μηδενική κυματική κυκλοφορία στην ευρύτερη περιοχή με μέγιστη τιμή 0.03m/s. Η μέγιστη ταχύτητα ρευμάτων που σημειώνεται κοντά στην ακτή αγγίζει τα 0.10m/s, ενώ στην είσοδο της περιοχής μελέτης τα 0.80m/s. Στις δύο κορυφές του προσήνεμου προβλήτα παρατηρείται μικρή αύξηση της ταχύτητας των ρευμάτων με μέγιστη τιμή 0.15m/s και επομένως αναμένεται στο σημείο να εμφανιστεί μικρή πρόοδος του πυθμένα. Το συγκεκριμένο κυματικό γεγονός δεν δημιουργεί σημαντικά ρεύματα στην περιοχή σε σχέση με τα γεγονότα των χρονικών βημάτων 4 και 16 (Time step 4/24 και 16/24).

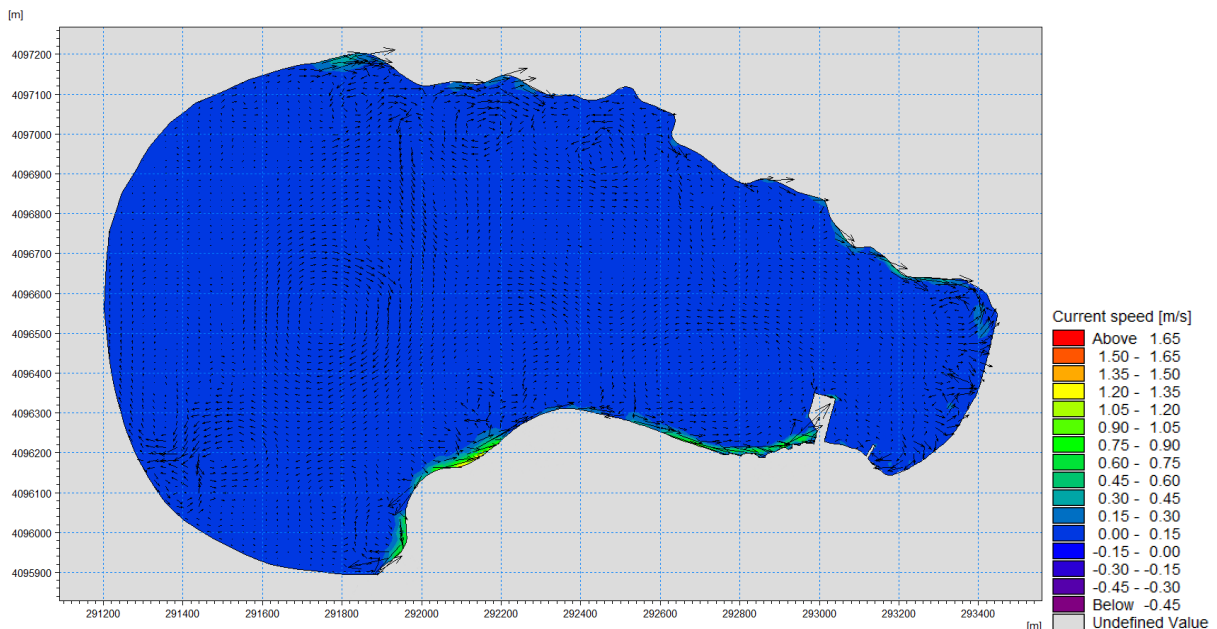


Σχήμα 6. 13: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 4/24)– Πρόταση 2.

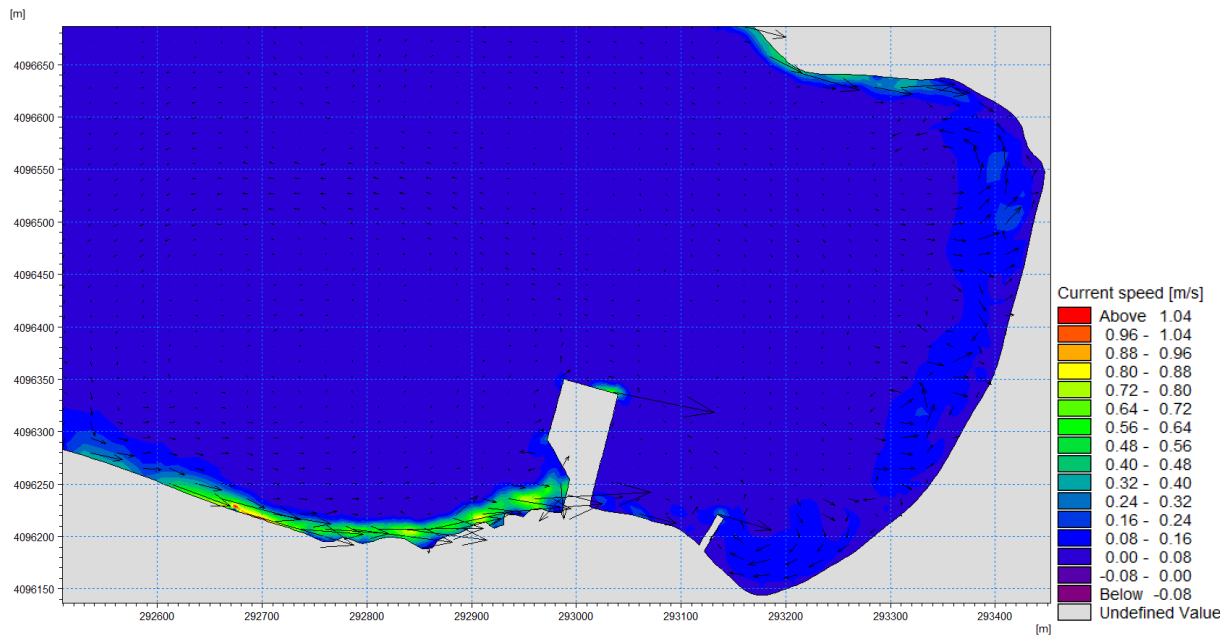


Σχήμα 6. 14: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 4/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Το κυματικό γεγονός του συγκεκριμένου βήματος έχει διεύθυνση περίπου  $230^\circ$  (~νοτιοδυτική), ύψος κύματος 2.19m και περίοδο 7.04s. Οι δράσεις των ρευμάτων στο συγκεκριμένο βήμα είναι πιο έντονες από τις δράσεις του κυματισμού του τελευταίου χρονικού βήματος, γεγονός αναμενόμενο καθώς ο κυματισμός του 4<sup>ου</sup> βήματος είναι νοτιοδυτικής διεύθυνσης, η οποία σύμφωνα με τον προσανατολισμό του όρμου, καθίσταται πιο κρίσιμη σε σύγκριση με τη βόρεια διεύθυνση. Στα παραπάνω σχήματα είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων παράλληλα στο βόρειο τμήμα της περιοχής με κατεύθυνση προς την παραλία και μέγιστη ταχύτητα 1.00m/s. Επιπλέον, τα ρεύματα που σημειώνονται κοντά στην ακτή έχουν μέγιστη ταχύτητα 0.23m/s.



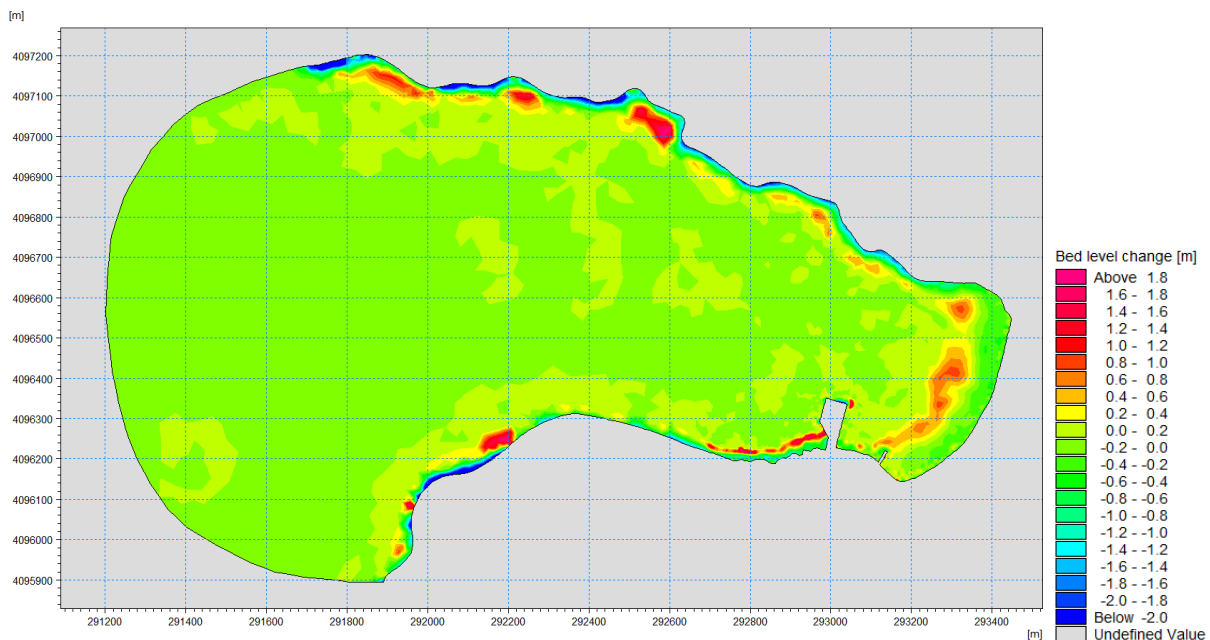
Σχήμα 6. 15: Ταχύτητα ρευμάτων (Time step 16/24)– Πρόταση 2.



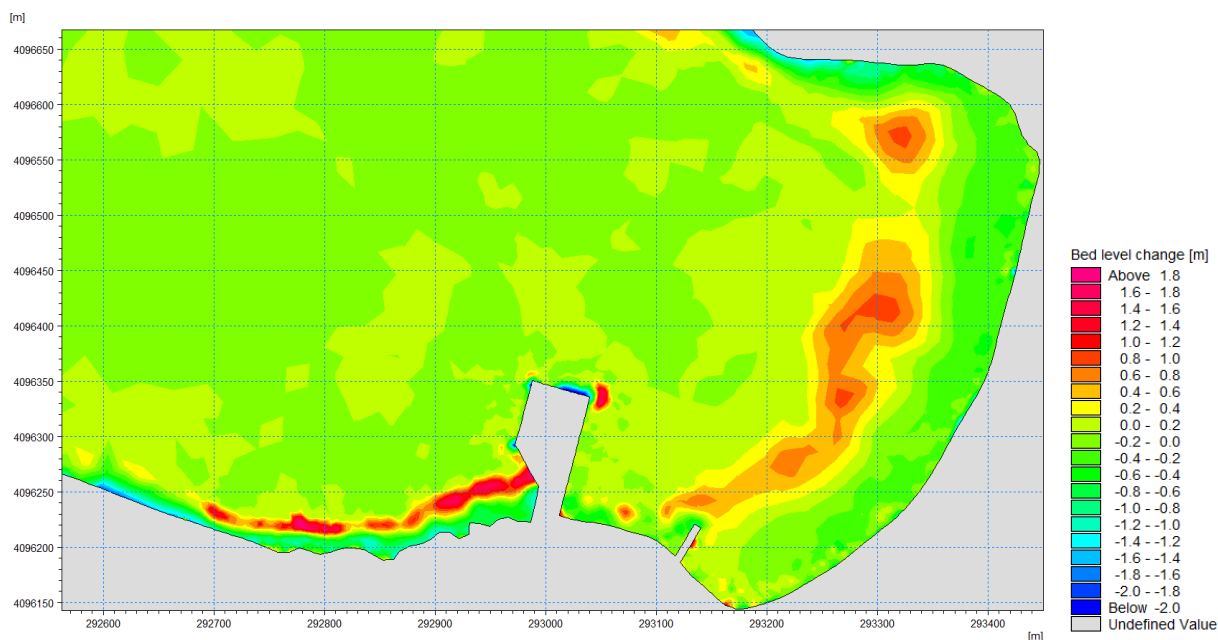
Σχήμα 6. 16: Ταχύτητα ρευμάτων (Time Step 16/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα αντιστοιχεί κυματικό γεγονός με διεύθυνση  $320^\circ$  (~βορειοδυτική), ύψος κύματος 2.90m και περίοδο 6.62s. Είναι εμφανής η δημιουργία ρευμάτων στο νότιο τμήμα της περιοχής, ανάντη του προσήνεμου προβλήτα και με κατεύθυνση προς αυτόν, με μέγιστη τιμή 0.65m/s. Γενικώς, οι ταχύτητες των ρευμάτων κοντά στην ακτή παρουσιάζουν μικρό μέτρο (~0.10 - 0.23m) και επομένως οι μεταβολές της μορφολογίας του πυθμένα δεν αναμένεται να είναι σημαντικού μεγέθους στη συγκεκριμένη περιοχή.

### 6.2.3. ST (Sand Transport Model)



Σχήμα 6. 17: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 2.



Σχήμα 6. 18: Μεταβολή της στάθμης του πυθμένα (Time Step 24/24) – Πρόταση 2 – Λεπτομέρεια στην περιοχή του λιμένα.

Στα παραπάνω σχήματα που απεικονίζουν το τελευταίο κυματικό γεγονός, παρατηρείται ότι το γενικό μοτίβο και μέγεθος των μεταβολών του πυθμένα στην ευρύτερη περιοχή είναι παρόμοια με τα αντίστοιχα της υφιστάμενης κατάστασης (βλ. Σχήμα 5.9) και της 1<sup>ης</sup> πρότασης (βλ. Σχήμα 6.9).

Πιο αναλυτικά, ανάντη του νέου προσήνεμου προβλήτα και σε επαφή με αυτόν παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος έως 1.70m, η οποία συνεχίζεται και σε μία μικρού πλάτους ζώνη προς τα δυτικά και παράλληλα στην ακτογραμμή. Η εμφάνιση αυτής της ζώνης, οφείλεται στη διαπλάτυνση του προσήνεμου προβλήτα και ενδεχομένως στην αλλαγή της κλίσης στη δυτική παρειά του, η οποία μειώνει τον διαθέσιμο χώρο εναπόθεσης ιζήματος που υπάρχει σήμερα, ανάντη του υφιστάμενου προβλήτα. Ακόμη, στις δύο κορυφές του προβλήτα παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος περίπου 1.00m, γεγονός που ήταν αναμενόμενο καθώς στα εν λόγω σημεία είχε παρατηρηθεί συσσώρευση ρευμάτων. Ενδιάμεσα στις δύο κορυφές και σε επαφή με το βόρειο μέτωπο του προβλήτα παρατηρείται μέγιστη διάβρωση 1.10m, το οποίο είναι αποτέλεσμα της ανάκλασης των κυματισμών στο νέο μέτωπο. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται με την ίδια ένταση στο μέτωπο των ενδιάμεσων κρηπιδωμάτων, στο οποίο η μέγιστη υποχώρηση φτάνει τα 0.40m. Στη συγκεκριμένη πρόταση δεν εφαρμόστηκε διαπλάτυνση στα ενδιάμεσα κρηπιδώματα, ωστόσο, η αλλαγή της γεωμετρίας του προσήνεμου προβλήτα μετέβαλε την κυματική κυκλοφορία της περιοχής επηρεάζοντας και το μέτωπο των υφιστάμενων κρηπιδωμάτων που βρίσκεται ακριβώς κατάντη. Τέλος, το μέτωπο των κρηπιδωμάτων της παρούσας πρότασης αποτελεί μικρότερο ανακλαστικό όριο σε σύγκριση με το όριο που δημιουργείται από την 1<sup>η</sup> πρόταση και επομένως είναι αναμενόμενη η μικρότερη υποχώρηση της στάθμης του πυθμένα στο σημείο.

Σε ότι αφορά την περιοχή κοντά στην ακτογραμμή, σε μία ζώνη πλάτους 50 – 150m από το βόρειο μέχρι μερικά μέτρα πριν το νότιο τμήμα της ακτής και σε επαφή με αυτήν σημειώνεται διάβρωση, με μέγιστη υποχώρηση 0.40m στο βόρειο τμήμα της ζώνης. Στο νότιο τμήμα της σημειώνεται εναπόθεση ιζήματος της τάξης των 0.20m. Δυτικά της εν λόγω ζώνης και σε επαφή με αυτήν, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος, η οποία σημειώνει τη μέγιστη πρόοδο στο βόρειο και στο νότιο τμήμα κατά 0.87m. Η μικρότερη εναπόθεση στο βόρειο μέρος, συγκριτικά με την εναπόθεση που παρουσιάστηκε στην 1<sup>η</sup> πρόταση είναι αναμενόμενη καθώς αφαιρέθηκε από το προσομοίωμα ο ύφαλος

κυματοθραύστης. Η εναπόθεση ιζήματος στη σκιά του νέου προσήνεμου προβλήτα είναι αναμενόμενη, καθώς η διαπλάτυνσή του επηρέασε την κυματική κυκλοφορία.

Όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, το γενικό μοτίβο στερεομεταφοράς της παρούσας πρότασης, με το αντίστοιχο μοτίβο της πρότασης 1 και της υφιστάμενης κατάστασης είναι πανομοιότυπα. Πιο αναλυτικά, η 2<sup>η</sup> πρόταση εμφανίζει σχεδόν τα ίδια χαρακτηριστικά στερεομεταφοράς με την 1<sup>η</sup> πρόταση στην περιοχή γύρω από τον νέο προσήνεμο προβλήτα. Σε ότι αφορά την περιοχή μπροστά από τα δυτικά κρηπιδώματα (ενδιάμεσα του προσήνεμου και του υπήνεμου προβλήτα), η παρούσα πρόταση εμφανίζει πολύ μικρή διάβρωση που οφείλεται στην επέκταση του ανάντη προβλήτα. Αντίθετα, η 1<sup>η</sup> πρόταση, που περιλαμβάνει και τη διαπλάτυνση των κρηπιδωμάτων εμφανίζει μεγαλύτερη διάβρωση μπροστά από το μέτωπο, της τάξης του 1.00m. Σε ότι αφορά την περιοχή μπροστά από τα ανατολικά κρηπιδώματα, η παρούσα πρόταση φαίνεται να μην επηρεάζει τη στάθμη του πυθμένα ακριβώς μπροστά από το μέτωπο, καθώς στο σημείο εμφανίζεται ανύψωση της στάθμης του πυθμένα κατά 0.20m, φαινόμενο που εμφανίζεται στο ίδιο σημείο, στην υφιστάμενη κατάσταση. Αντίθετα, στα αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> πρότασης σημειώνεται μικρή διάβρωση της τάξης των 0.30m στο μέτωπο των ανατολικών κρηπιδωμάτων. Επομένως, έστω και μικρές, διαφαίνονται διαβρώσεις μπροστά από όλα τα ανακλαστικά μέτωπα ύστερα από την εφαρμογή των προτεινόμενων λύσεων.

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

### 7.1. Σύνοψη συμπερασμάτων

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ένα από τα πιο ευαίσθητα συστήματα του φυσικού περιβάλλοντος και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συγκεντρώνει πλήθος ανθρωπίνων δραστηριοτήτων και τεχνικών έργων. Οι φυσικές διεργασίες και οι ανθρώπινες παρεμβάσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταφορά ιζήματος, που αποτελεί βασική παράμετρο για τη μελέτη των παράκτιων έργων, ο σχεδιασμός των οποίων επιτυγχάνεται με τη χρήση μοντέλων παράκτιας μορφολογίας. Τα εν λόγω μοντέλα είναι πολύπλοκα και υπολογιστικά απαιτητικά λόγω των σύνθετων φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν υπόψη και του μεγάλου πλήθους δεδομένων που απαιτούν για την ορθή αναπαράσταση της πραγματικότητας. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά τους μπορεί να αντιμετωπιστεί με την κατάλληλη σχηματοποίηση των δεδομένων εισόδου του μοντέλου. Ως σχηματοποίηση νοείται η διαδικασία μείωσης των δεδομένων της πλήρους χρονοσειράς του κυματικού κλίματος σε ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών κυματισμών, οι οποίοι θα επιφέρουν παρόμοια μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα με την πλήρη χρονοσειρά, εξασφαλίζοντας τη μείωση του υπολογιστικού φόρτου εκτέλεσης του μοντέλου.

Αξιολογήθηκαν δύο μέθοδοι σχηματοποίησης, η μέθοδος ροής ενέργειας για σχηματοποίηση με 10 και 30 αντιπροσώπους και η μέθοδος διαχωρισμού του κυματικού κλίματος σε διακριτά κυματικά σενάρια. Η σχηματοποίηση εφαρμόστηκε στα δεδομένα ενός έτους, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την αναπαράσταση της πραγματικής κυματικής διαταραχής της περιοχής μελέτης και τα αποτελέσματα της προσομοίωσής της χρονοσειράς του αποτέλεσαν τη βάση για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των σχηματοποιημένων χρονοσειρών. Ως βασική παράμετρος σύγκρισης των αποτελεσμάτων επιλέχθηκε η μεταβολή της στάθμης του πυθμένα μετά από το πέρας ενός έτους (μία ημέρα στο μοντέλο, η οποία ανήχθη σε 365 μέρες μέσω του συντελεστή μορφολογικής επιτάχυνσης Morfac). Η αξιολόγηση των μεθόδων σχηματοποίησης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση στατιστικής μεθόδου και πιο συγκεκριμένα του στατιστικού δείκτη BSS (Brier Skill Score). Για όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πακέτο MIKE 21 DHI και ειδικότερα το πακέτο MIKE 21/3 Coupled Model FM.

Οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων των σχηματοποιημένων χρονοσειρών με την πραγματική κατάσταση, η οποία αντιστοιχεί στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης της πλήρους χρονοσειράς του ενός έτους, προέκυψαν μικρές και κρίθηκαν αποδεκτές. Με τη σύγκριση των μεθόδων σχηματοποίησης προέκυψε ότι η μέθοδος ροής ενέργειας για τη σχηματοποίηση με 30 αντιπροσωπευτικές τιμές έδωσε ακριβέστερα αποτελέσματα για την τελική διαμόρφωση της στάθμης του πυθμένα μετά το πέρας της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης BSS της μεθόδου προέκυψε 0.73 και κρίθηκε εξαιρετικός.

Στην περίπτωση της ακτής Καμάρες της Σίφνου, το σημαντικότερο πρόβλημα είναι η έλλειψη χερσαίου χώρου για την εξυπηρέτηση της κίνησης πεζών και οχημάτων στον προσήνεμο προβλήτα αλλά και κατά μήκος του παραλιακού μετώπου. Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων της περιοχής αξιολογείται η λύση της μελέτης Διαμόρφωσης λιμένος στις Καμάρες Ν. Σίφνου (CNWAY, 2017) και μελετώνται δύο εναλλακτικές αυτής. Στόχος είναι η διερεύνηση της επίδρασης της επέκτασης των λιμενικών έργων στην ισορροπημένη πλέον μορφολογία της ακτής, λόγω της ανάκλασης των κυματισμών πάνω στα νέα έργα. Για την αναπαράσταση της κυματικής διαταραχής χρησιμοποιήθηκε η χρονοσειρά του κυματικού κλίματος που προέκυψε από τη σχηματοποίηση και έδωσε τα ακριβέστερα αποτελέσματα (μέθοδος ροής ενέργειας με 30 αντιπροσώπους).

Τέλος, σχολιάζονται τα αποτελέσματα των προτάσεων ως προς τον βαθμό μεταβολής της στάθμης του πυθμένα μετά το πέρας της προσομοίωσης. Πιο αναλυτικά, η 1<sup>η</sup> πρόταση περιλαμβάνει την επέκταση του προσήνεμου προβλήτα και την διαπλάτυνση των κρηπιδωμάτων. Αναφορικά με την περιοχή γύρω από τον νέο προσήνεμο προβλήτα, παρατηρείται εναπόθεση ιζήματος ακριβώς ανάντη, σε μία μικρή περιοχή κατάντη (κοντά στην ακτή) και στις δύο βόρειες κορυφές του. Ενδιάμεσα στις δύο βόρειες κορυφές και σε επαφή με το μέτωπο του προβλήτα παρατηρείται μερική διάβρωση. Το ίδιο παρατηρείται και μπροστά από τα μέτωπα των ενδιάμεσων και των ανατολικών κρηπιδωμάτων. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της μεταβολής του ανακλαστικού ορίου της περιοχής. Σε ότι αφορά την ευρύτερη περιοχή της ακτογραμμής, το συνολικό μοτίβο και τα μεγέθη στερεομεταφοράς μετά την προέκταση των έργων δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τα αντίστοιχα που παρατηρούνται σήμερα (μετά την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης). Γενικώς, οι μεταβολές της στάθμης του πυθμένα είναι μικρές, γεγονός που οφείλεται στις μικρές ταχύτητες ρευμάτων που σημειώνονται στην περιοχή, οι οποίες είναι της τάξης των 0.30 – 1.00m/s.

Η 2<sup>η</sup> πρόταση περιλαμβάνει μόνο την επέκταση του προσήνεμου προβλήτα χωρίς τη διαπλάτυνση των κρηπιδωμάτων. Αναφορικά με την περιοχή γύρω από τον νέο προσήνεμο προβλήτα, η μορφή της τελικής στάθμης του πυθμένα είναι παρόμοια με την μορφή που προέκυψε από την εφαρμογή της 1<sup>ης</sup> πρότασης, ως προς τα μεγέθη στερεομεταφοράς. Στο μέτωπο των υφιστάμενων κρηπιδωμάτων παρατηρήθηκε διάβρωση πολύ μικρότερου μέτρου από τη διάβρωση που παρατηρήθηκε μπροστά από τα νέα προτεινόμενα κρηπιδώματα της 1<sup>ης</sup> πρότασης. Η εμφάνιση αυτού του φαινομένου είναι αναμενόμενη, καθώς ενώ η γεωμετρία και το πλάτος των κρηπιδωμάτων διατηρήθηκε ως έχει, η μεταβολή της γεωμετρίας του προσήνεμου προβλήτα προκάλεσε μεταβολή στην κυματική κυκλοφορία όλης της περιοχής μελέτης. Επομένως, έστω και μικρές, διαφαίνονται διαβρώσεις μπροστά από όλα τα ανακλαστικά μέτωπα ύστερα από την εφαρμογή των προτεινόμενων λύσεων. Σε ότι αφορά την ευρύτερη περιοχή της ακτογραμμής, το συνολικό μοτίβο και τα μεγέθη στερεομεταφοράς μετά την προέκταση των έργων δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τα αντίστοιχα που παρατηρούνται σήμερα (μετά την προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης) και μετά την προσομοίωση της 1<sup>ης</sup> πρότασης.



## 7.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Όσον αφορά μελλοντικές έρευνες και περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος γίνονται οι εξής προτάσεις:

- Η προσομοίωση της κυματικής διαταραχής της περιοχής με το κυματικό μοντέλο Boussinesq (MIKE 21 Boussinesq Waves) το οποίο έχει τη δυνατότητα καλύτερης ανάλυσης των φαινομένων της ανάκλασης και της περίθλασης, σε σχέση με το φασματικό κυματικό μοντέλο (MIKE 21 Spectral Waves). Δεδομένου ότι ενδιαφέρουν οι επιπτώσεις της μεταβολής της ανακλαστικότητας των λιμενικών έργων στη μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα, θα ήταν σκόπιμο να ερευνηθεί η περίπτωση του λιμένα της Σίφνου με τη χρήση του συγκεκριμένου μοντέλου, το οποίο αναλύει σε βάθος το φαινόμενο της ανάκλασης.
- Η διερεύνηση της μεταβολής της στάθμης του πυθμένα για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, όπως τα 5 χρόνια. Στην παρούσα εργασία, αξιολογήθηκε η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα της ακτής Καμάρες, μετά την προσθήκη των προτεινόμενων έργων, σε βάθος ενός έτους. Ωστόσο, θα ήταν χρήσιμη η διερεύνηση της επιρροής των έργων στη στάθμη του πυθμένα σε βάθος περισσότερων ετών, για την πιο ολοκληρωμένη εικόνα των επιπτώσεων της κατασκευής των εν λόγω έργων.
- Η διερεύνηση της επίδρασης της αλληλουχίας των κυματισμών στα αποτελέσματα. Κατά τη σχηματοποίηση του κυματικού κλίματος, οι αντιπρόσωποι που προέκυψαν τοποθετήθηκαν στις νέες χρονοσειρές τόσες φορές όσες αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισής τους, ωστόσο, η σειρά τοποθέτησής τους ήταν τυχαία. Αξίζει, λοιπόν, να εξεταστεί κατά πόσο επηρεάζεται η τελική μορφολογία του πυθμένα από την αλληλουχία εμφάνισης των κυματισμών.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Benedet, L., Dobrochinski, J. P. F., Walstra, D. J. R., Klein, A. H. F., & Ranasinghe, R. (2016). A morphological modeling study to compare different methods of wave climate schematization and evaluate strategies to reduce erosion losses from a beach nourishment project. *Coastal Engineering*, 112, 69–86. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.02.005>
- Cox, R., Coghlan, I., & Kerry, C. (2009). *Floating Breakwater Performance in Irregular Waves With Particular Emphasis on Wave Transmission and Reflection, Energy Dissipation, Motions and Restraining Forces*. *March*, 351–362. [https://doi.org/10.1142/9789814282024\\_0032](https://doi.org/10.1142/9789814282024_0032)
- de Queiroz, B., Scheel, F., Caires, S., Walstra, D. J., Olij, D., Yoo, J., Reniers, A., & de Boer, W. (2019). Performance evaluation of wave input reduction techniques for modeling inter-annual sandbar dynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/jmse7050148>
- DHI. (2007). *MIKE 21 - Spectral Wave Module - Scientific Document*. 42.
- DHI. (2016a). *MIKE 21 / 3 Coupled Model FM*.
- DHI. (2016b). *MIKE 21 Flow Model & MIKE 21 Flood Screening Tool - Hydrodynamic Module*. 68.
- DHI Software. (2012). *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Mud Transport Module Scientific Documentation*. 46.
- Korres, G., Ravdas, M., & Zacharioudaki, A. (2009). *Mediterranean Sea Wave Hindcast (CMEMS MED-Waves)*. Copernicus Monitoring Environment Marine Service (CMEMS). [https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA\\_HINDCAST\\_WAV\\_006\\_012](https://doi.org/10.25423/CMCC/MEDSEA_HINDCAST_WAV_006_012)
- Lesser, G. R. (2009). *An Approach to Medium-term Coastal Morphological Modelling*. UNESCO-IHE & Delft Technical University, Delft.
- Loukogeorgaki, E., & Angelides, D. C. (n.d.). *Stiffness and effectiveness of a floating breakwater*.
- Pilarczyk, K. (2008). Alternatives for coastal protection. *Journal of Water Resource Environmental Engineering*, 23, 181–188.
- Sutherland, J., Peet, A. H., & Soulsby, R. L. (2004). Evaluating the performance of morphological models. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 917–939. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.015>
- Van Rijn, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J. P. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47(3), 295–327. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5)
- Walstra, D. J. R., Hoekstra, R., Tonnon, P. K., & Ruessink, B. G. (2013). Input reduction for long-term morphodynamic simulations in wave-dominated coastal settings. *Coastal Engineering*, 77, 57–70. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.02.001>
- Ιωαννίδης, Δ., Καραμπάς, Θ., & Καραθανάση, Α. (2006). Ήπιες Μέθοδοι Προστασίας Ακτών: Ύφαλοι Πρόβολοι. 8ο Πανελλήνιο Συμπόσιο Ωκεανογραφίας Και Αλιείας, ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε, Θεσσαλονίκη 2006.
- Καραμπάς, Θ., Κρεστενίτης, Ι., & Κουτίτας, Χ. (2016). *Ακτομηχανική - Έργα Προστασίας Ακτών*. <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2095>
- Κατσαδωράκης Γ., Π. Κ. (2007). *Απογραφή Των Υγροτόπων Των Νησιών Του Αιγαίου: Ταυτότητα, Οικολογική Κατάσταση Και Απειλές*.
- Κρητικός, Κ. (2015). *Διπλωματική Έργασία: “Αντιμετώπιση της διάβρωσης ακτογραμμής κοντά σε μαρίνα.”* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Μουτζούρης, Κ. Ι. (2005). Εισαγωγή στην Ακτομηχανική. *Σχολή Πολιτικών Μηχανικών. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.*

Νικολάου, Ε. (2014). *Διπλωματική Έργασία: “Αριθμητική διερεύνηση απόδοσης συστήματος κυματοθραυστώ.”* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Νοτίου Αιγαίου, Π., & Περιβάλλοντος και Ενέργειας, Υ. (n.d.). *Ποιότητα κολυμβητικών υδάτων - Ταυτότητα Υδάτων Κολύμβησης. Καμάρες, Σίφνος.*

Παναγόπουλος, Λ. Ε. (2019). *Διπλωματική Έργασία: “Στερεομεταφορά και Παράκτιες Διεργασίες με μεθόδους σχηματοποίησης κυματικού κλίματος – Περίπτωση Λιμένα Ρεθύμνου.”* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Λίστα ιστοτόπων:

- Φωτογραφία εξωφύλλου

<https://www.mileikanea.gr/>

- Δεδομένα κύματος, βαθυμετρίας και ανέμου

<https://marine.copernicus.eu/>

<https://download.gebco.net/>

<http://meteosearch.meteo.gr/default.asp>

- Στοιχεία για το νησί της Σίφνου

[https://www.sifnos.gr/our\\_island/natura](https://www.sifnos.gr/our_island/natura)

<http://natura2000.eea.europa.eu/Natura2000/SDF.aspx?site=GR4220008>

<http://e-sifnos.com/sifnos-information/sifnos-natura.php>

[http://www.topoguide.gr/islands/southern\\_aegeo/advs\\_sifnos/sifnos\\_fauna.php](http://www.topoguide.gr/islands/southern_aegeo/advs_sifnos/sifnos_fauna.php)

<http://www.bathingwaterprofiles.gr/bathingprofiles/GRBW149289297>

[http://www.bathingwaterprofiles.gr/sites/all/themes/danland/docs/pdf\\_profiles/GRBW149289296.pdf](http://www.bathingwaterprofiles.gr/sites/all/themes/danland/docs/pdf_profiles/GRBW149289296.pdf)

<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>

- ΦΕΚ και Υπουργικές Αποφάσεις

[http://listedmonuments.culture.gr/fek.php?ID\\_FEKYA=19740](http://listedmonuments.culture.gr/fek.php?ID_FEKYA=19740)

<http://www.et.gr/>

<http://www.nomoskopio.gr/>