



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διερεύνηση Παράκτιας Διάβρωσης με χρήση μαθηματικών μοντέλων



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ναταλία Ε. Παπαδοπούλου

Επιβλέπουσα : Β.Κ. Τσουκαλά , Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Διερεύνηση παράκτιας διάβρωσης με χρήση μαθηματικών μοντέλων

Λέξεις-Κλειδιά: παράκτια ζώνη, χαρακτηριστικά κυμάτων, στερεομεταφορά, εξέλιξη πυθμένα, εξέλιξη ακτογραμμής, κυματοθραύστες, MIKE 21, Μεθώνη

Analysis of coastal erosion using mathematical models

Keywords: coastal zone, wave characteristics sediment transport, bed level change, coastline evolution, wavebreakers, MIKE 21, Methoni

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ναταλία Ε. Παπαδοπούλου

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Β. Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

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

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Ευχαριστίες

Με την ευκαιρία της περάτωσης της παρούσας εργασίας, που σηματοδοτεί και την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές και ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς όλους όσους βοήθησαν στην προσπάθειά μου αυτή. Πρώτη από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας κα. Βίκυ Τσουκαλά, για την καθοδήγηση και την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον υποψήφιο διδάκτορα Ανδρέα Παπαδημητρίου για τις πολύτιμες συμβουλές του, την ευχάριστη ατμόσφαιρα και την υπομονή του.

Τέλος, θα ήθελα να απευθύνω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου, που όλα αυτά τα χρόνια πιστεύει στις δυνατότητές μου και στηρίζει κάθε προσπάθειά μου και στους φίλους μου για τη στήριξη και την ενθάρρυνση τους.

Με εκτίμηση ,
Ναταλία Παπαδοπούλου
Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Πίνακας περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1.	Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2.	Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	2
2.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	4
2.1	Γενικά Στοιχεία	4
2.2.	Πολιτιστικό Περιβάλλον.....	6
2.3.	Κλιματικά Δεδομένα	9
2.4.	Βαθυμετρία Περιοχής	11
2.5.	Διάβρωση της Ακτής.....	13
3.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	17
3.1.	Παράκτια Διάβρωση	17
3.2.	Αίτια διάβρωσης.....	20
3.2.1.	Φυσικά αίτια διάβρωσης ακτών.....	20
3.2.2.	Ανθρωπογενή αίτια διάβρωσης ακτών.....	21
3.3.	Μέθοδοι αντιμετώπισης της διάβρωσης.....	23
3.3.1.	Έργα προστασίας ακτών βαρέας μορφής	23
3.3.2.	Έργα προστασίας ακτών ήπιας μορφής.....	28
4.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ	32
4.1.	Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Κυμάτων.....	32
4.1.1.	Μέθοδος CEM.....	32
4.1.2.	Μέθοδος SMB.....	36
4.2.	Ισοδύναμος Κυματισμός.....	40
4.3.	Αριθμητική Προσομοίωση με το Πρόγραμμα MIKE 21 DHI.....	43
4.3.1.	Πρόγραμμα MIKE 21 - Spectral Waves.....	43

4.3.1.1.	Γενικά στοιχεία.....	43
4.3.1.2.	Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου	45
4.3.1.3.	Βασικές παράμετροι εισόδου	47
4.3.1.4.	Εφαρμογή Μοντέλου.....	48
4.3.2.	Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Hydrodynamic Module	50
4.3.2.1.	Γενικά στοιχεία του μοντέλου.....	50
4.3.2.2.	Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου	51
4.3.2.3.	Βασικές παράμετροι εισόδου	53
4.3.2.4.	Εφαρμογή Μοντέλου.....	54
4.3.3.	Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Sand Transport Module	56
4.3.3.1.	Γενικά στοιχεία του μοντέλου.....	56
4.3.3.2.	Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου	57
4.3.3.3.	Βασικές παράμετροι εισόδου	62
4.3.3.4.	Εφαρμογή Μοντέλου.....	64
5.	ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ.....	66
5.1.	Ιστορική εξέλιξη ακτογραμμής.....	66
5.1.1.	ΠΕΡΙΟΧΗ Ι.....	67
5.1.2.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΙΙ.....	67
5.1.3.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΙΙΙ.....	69
5.2.	Διερεύνηση υφιστάμενης κατάστασης με χρήση μαθηματικού μοντέλου.....	71
5.2.1.	Βαθυμετρία.....	71
5.2.2.	Υπολογιστικό πλέγμα	73
5.2.3.	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	74
5.3.	Συζήτηση Αποτελεσμάτων	78
6.	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ.....	79
6.1.	Εναλλακτική λύση Ι.....	80
6.1.1.	Σχεδιασμός έξαλου κυματοθραύστη πριν τη ζώνη θραύσης.....	81

6.1.2.	Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης.....	87
6.2.	Εναλλακτική λύση II.....	90
6.2.1.	Σχεδιασμός ύφαλου κυματοθραύστη πριν την ζώνη θραύσης.....	91
6.2.2.	Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης.....	96
6.3.	Εναλλακτική λύση III.....	99
6.3.1.	Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης.....	99
6.4.	Συγκριτική αξιολόγηση Εναλλακτικών λύσεων.....	103
7.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	108
7.1.	Σύνοψη Συμπερασμάτων.....	108
7.2.	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	109
	Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	111

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Το κάστρο της Μεθώνης (www.kastra.eu)	7
Εικόνα 2. Το Μπούρτζι (www.travelstyle.gr).....	7
Εικόνα 3. Πρόσφατες καταστροφές στην περιοχή της Μεθώνης (www.foninews.gr).....	15
Εικόνα 4. Το παραλιακό μέτωπο του New Jersey το 2009 και το 2012 έπειτα από τη διαβρωτική επίδραση των κυματικών καταιγίδων και των κυμάτων.(www.usgs.gov)	18
Εικόνα 5. Διαδικασία αμμοληψίας (www.ilialive.gr).....	21
Εικόνα 6. Παράδειγμα ανάπτυξης πάνω στην ενεργή ζώνη της παραλίας σε περιοχή του Ηρακλείου (www.ert.gr).....	22
Εικόνα 7. Σύστημα διαδοχικών προβόλων για τη διατήρηση επαρκούς πλάτους σε ακτή της Ολλανδίας (www.earthmagazine.org).....	24
Εικόνα 8. Παράκτιος Τοίχος (www.climatetechwiki.org).....	27
Εικόνα 9. Πλωτός κυματοθραύστης (http://www.ingemar.it).....	30
Εικόνα 10. Πυθμενικοί τεχνητοί ύφαλοι (www.reefball.org).....	31
Εικόνα 11. Βυθοκόρος σε διαδικασία απόρριψης ιζήματος για αναπλήρωση ακτής (www.escp.org.uk)	31

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Κλιματικά Δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας (Ε.Μ.Υ)	9
Πίνακας 2. Ανεμολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης. (Ε.Μ.Υ.).....	10
Πίνακας 3. Βροχομετρικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης. (Ε.Μ.Υ.)	10
Πίνακας 4. . Δεδομένα υγρασίας μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης. (Ε.Μ.Υ.)	10
<i>Πίνακας 5. Ποσοστό της ακτογραμμής που έχει υποστεί διάβρωση ανά χώρα (EUROSION,2004).....</i>	<i>18</i>
Πίνακας 6. Ανάπτυγμα Πελάγους με τη μέθοδο CEM	33
Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά των κυματισμών για τους επικρατέστερους ανέμους με τη μέθοδο CEM.	35
Πίνακας 8. Ανάπτυγμα Πελάγους.....	37
Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά των κυματισμών για τους επικρατέστερους ανέμους με τη μέθοδο SMB.	38
Πίνακας 10. Ισοδύναμο κυματικό κλίμα με τη μέθοδο CEM.	41
Πίνακας 11. Ισοδύναμο κυματικό κλίμα με τη μέθοδο SMB.	42
Πίνακας 12. Κυματικά χαρακτηριστικά για τους επικρατέστερους ανέμους	73
Πίνακας 13. Συντελεστής μείωσης κυματογενούς αναρρίχησης	83
Πίνακας 14. Τιμές σταθερών A και c.....	83
Πίνακας 15. Συντελεστής ΚΔ.....	84
Πίνακας 16. Συντελεστής κΔ.....	85

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1. Περιοχή Μελέτης Μεθώνης, Μεσσηνία (Google Earth).....	4
Σχήμα 2. Ακτή μελέτης (Google Earth).....	5
Σχήμα 3. Χρήσεις γης στην περιοχή της Μεθώνης (www.bathingwaterprofiles.gr)	5
Σχήμα 4. Δίκτυο NATURA 2000 (www.filotis.itia.ntua.gr).....	6
Σχήμα 5. Υποθαλάσσιος οικισμός Μεθώνης (www.aristomenismessinios.blogspot.com) 	8
Σχήμα 6. Μέση μηνιαία θερμοκρασία	9
Σχήμα 7. Δεδομένα υγρασίας μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης.	11
Σχήμα 8. Μηνιαία ποσοστά υγρασίας	11
Σχήμα 9. Ισοβαθείς καμπύλες της ακτής Μεθώνης (www.navionics.com)	12
Σχήμα 10. Το ίζημα της ακτής (krylos.blogspot.com).....	12
Σχήμα 11. Περιοχή πρόσφατων καταστροφών στην παράκτια ζώνη της Μεθώνης.....	13
Σχήμα 12. Αύξηση της μέσης στάθμης θάλασσας σε βάθος χρόνου (www.epa.gov).....	18
Σχήμα 13. . Κατάταξη των ελληνικών ακτών σύμφωνα με την διάβρωση που έχουν υποστεί (Alexandrakis et al. 2013).....	19
Σχήμα 14. Μηχανισμός λειτουργίας προβόλου (www.pixgood.com).....	25
Σχήμα 15. Χαρακτηριστικοί σχηματισμοί salient και tombolo (www.usace.army.mil).....	25
Σχήμα 16. Εξέλιξη ακτογραμμής 6 χρόνια μετά την κατασκευή έξαλων κυματοθραυστών (Shoreline Studies Program).....	26
Σχήμα 17. Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθράυση (Arnouil, 2006).....	29
Σχήμα 18. Ακτίνες για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους στη μέθοδο CEM (www.navionics.com).....	33
Σχήμα 19. Ακτίνες για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους στη μέθοδο SMB (www.navionics.com).....	36
Σχήμα 20. Υποδιαίρεση Περιοχής μελέτης.....	66
Σχήμα 21. ΠΕΡΙΟΧΗ I (Google Earth).....	67

Σχήμα 22. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της ΠΕΡΙΟΧΗΣ II : (α) Ιούλιος 2009, (β) Απρίλιος 2017 (Google Earth).....	68
Σχήμα 23. Εξέλιξη ακτογραμμής στην Περιοχή II : Ιούλιος 2009, Απρίλιος 2017 (Google Earth)	68
Σχήμα 24 ΠΕΡΙΟΧΗ III (Google Earth).....	69
Σχήμα 25. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της ΠΕΡΙΟΧΗΣ III : (α) Ιούλιος 2009, (β) Απρίλιος 2017 (Google Earth).....	70
Σχήμα 26. Εξέλιξη ακτογραμμής στην Περιοχή III : Ιούλιος 2009, Απρίλιος 2017 (Google Earth)	70
Σχήμα 27. Πυθμενικός κάρναβος flexible mesh με την κωδικοποίηση των ορίων της περιοχής	72
Σχήμα 28. Βαθυμετρία περιοχής	72
Σχήμα 29. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος - Υφιστάμενη κατάσταση	74
Σχήμα 30. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων - Υφιστάμενη κατάσταση	76
Σχήμα 31. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων – ΠΕΡΙΟΧΗ I.....	76
Σχήμα 32. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς - Υφιστάμενη κατάσταση	77
Σχήμα 33. Χωρική αποτύπωση των περιοχών διάβρωσης και απόθεσης ιζήματος	78
Σχήμα 34. . Διάταξη εναλλακτικής λύσης I (Google Earth)	80
Σχήμα 35. Διάταξη κυματοθραυστών	81
Σχήμα 36. Γραφική απεικόνιση της αναρρίχησης R	82
Σχήμα 37. Προτεινόμενη τυπική διατομή για μη θραυόμενο κυματισμό (Μέμος, 2008).....	83
Σχήμα 38. Διατομή εξέτασης κυματοθραύστη στην περιοχή της Μεθώνης	86
Σχήμα 39. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Εναλλακτική λύση I.....	87
Σχήμα 40. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων – Εναλλακτική λύση I	88
Σχήμα 41. Κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων κοντά στους εξέτασης κυματοθραύστες – Εναλλακτική λύση I	89
Σχήμα 42. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς – Εναλλακτική λύση I.....	90
Σχήμα 43. Διάταξη εναλλακτικής λύσης II (Google Earth)	91

Σχήμα 44. Χωρική διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών	92
Σχήμα 45. Προτεινόμενη τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη	93
Σχήμα 46. Μετάδοση κυματισμού πάνω από βυθισμένο κυματοθραύστη με εκτεταμένη θωράκιση (Μέμος, 2008).	93
Σχήμα 47. Διατομή ύφαλου κυματοθραύστη στην περιοχή της Μεθώνης	95
Σχήμα 48. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Εναλλακτική λύση II	96
Σχήμα 49. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων – Εναλλακτική λύση II	97
Σχήμα 50. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς - Εναλλακτική λύση II	98
Σχήμα 51. Διάταξη εναλλακτικής λύσης III (Google Earth)	99
Σχήμα 52. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος -Εναλλακτική λύση III.....	100
Σχήμα 53. Χωρική κατανομή της ταχύτητας ρευμάτων - ΠΕΡΙΟΧΗ I.....	101
Σχήμα 54. Χωρική κατανομή της ταχύτητας ρευμάτων - Εναλλακτική λύση III.....	101
Σχήμα 55. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς -Εναλλακτική λύση III.....	102
Σχήμα 56. Συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των Εναλλακτικών διατάξεων ως προς το ύψος κύματος.....	105
Σχήμα 57. Συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των Εναλλακτικών διατάξεων ως προς τα κυματογενή ρεύματα.....	106
Σχήμα 58. Συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των Εναλλακτικών διατάξεων ως προς τη στερεομεταφορά	107

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παράκτια ζώνη αποτελεί μια ιδιαίτερη γεωγραφική ενότητα, γύρω από την οποία κινείται το μεγαλύτερο μέρος των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, αλλά και της οικονομίας. Ωστόσο, αποτελεί ένα πολύπλοκο και εύθραυστο σύστημα φυσικών μεταβλητών. Για το λόγο αυτό, οι επεμβάσεις στην παράκτια ζώνη χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα, τόσο λόγω των φυσικών διεργασιών, όσο και λόγω των ανθρώπινων επεμβάσεων, κεντρίζουν το ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς σχετίζονται σε βάθος χρόνου με την εξέλιξη της ακτογραμμής.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της παράκτιας διάβρωσης, καθώς επίσης και ο σχεδιασμός έργων προστασίας, με σκοπό τον περιορισμό αυτού του φαινομένου. Ως περιοχή μελέτης έχει επιλεγεί η παράκτια ζώνη της Μεθώνης.

Το κυριότερο συμπέρασμα που προκύπτει, έπειτα από την συναξιολόγηση των δεδομένων της αυτοψίας, της ανάλυσης των ιστορικών αεροφωτογραφιών και των αποτελεσμάτων της μαθηματικής προσομοίωσης, είναι ότι η ακτή της Μεθώνης επηρεάζεται δυσμενώς από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, ενώ, πιθανότατα, σε αυτό συμβάλλουν ορισμένα παράκτια έργα και υποδομές. Κατά συνέπεια, μεταβάλλεται η μορφολογία του παραλιακού μετώπου και κατ' επέκταση διαβρώνεται η ακτή.

Στη συνέχεια, εξετάζονται τρεις εναλλακτικές διατάξεις έργων παράκτιας προστασίας, βαριάς και ήπιας μορφής, για τις οποίες πραγματοποιείται εκ νέου μαθηματική προσομοίωση. Συγκεκριμένα, προτείνεται η Εναλλακτική λύση I, η οποία περιλαμβάνει την κατασκευή συστήματος έξαλων κυματοθραυστών στην περιοχή της ακτής όπου εντοπίζεται σημαντική διάβρωση. Στην Εναλλακτική λύση II διερευνάται η κατασκευή συστήματος ύφαλων κυματοθραυστών στην ίδια περιοχή, ενώ στην Εναλλακτική λύση III προτείνεται, επίσης, η αντικατάσταση του υφιστάμενου λιμενοβραχίονα, μέσω της ανακατασκευής του αρχαίου λιμένα της Μεθώνης. Τέλος, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων ώστε να καταγραφούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε περίπτωσης. Συμπέρασμα της παραπάνω σύγκρισης είναι ότι η Εναλλακτική λύση III κρίνεται καταλληλότερη καθώς περιλαμβάνει έργα ήπιας μορφής που εναρμονίζονται με το φυσικό περιβάλλον της περιοχής και παρέχει επαρκή προστασία έναντι της παρατηρούμενης διάβρωσης.

ABSTRACT

Coastal zone is a particular geographical entity, where a wide range of human activities and economics are carried out. However, it appears to be a complex as well as fragile system of natural variable. For this reason, interference in coastal zone requires special attention. Processes that take place, due to natural procedures and human interventions, are an important subject of study, as they are associated with the long-term evolution of the coastline.

The intention of the present diplomatic assignment is to investigate coastal erosion, as well as to present protection methods, in order to eliminate this phenomenon. In particular, an attempt is made to simulate natural processes, which take place in the coastal area of Methoni city.

The main conclusion that was emerged, after evaluating autopsy data, historical aerial photos and mathematical simulation results, is that the coastal zone of Methoni faces erosion problem, while some coastal projects and infrastructure are likely to contribute to this situation. Consequently, the morphology of the coastal zone is altered and therefore the coast erodes.

Furthermore, three alternative coastal protection methods are proposed and implemented. In particular, Alternative solution I involves the construction of a system of breakwaters in the coastal area where significant erosion is detected. Alternative solution II is investigating the construction of a reef breakwater system in the same area, while Alternative solution III also proposes the replacement of the existing jetty by reconstructing the ancient port of Methoni. Finally, a comparative assessment of the three alternatives evaluates the advantages and disadvantages of each method. The conclusion of this comparison is that Alternative solution III is more appropriate as it includes mild forms that are in harmony with the natural environment of the area and provide adequate protection against observed erosion.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο και σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παράκτια ζώνη αποτελεί ελκυστικό περιβάλλον για τη διεξαγωγή αρκετών ανθρωπίνων δραστηριοτήτων. Τα παράκτια ύδατα προσέφεραν πάντοτε ποιοτική τροφή, δυνατότητες ανάπτυξης του εμπορίου και της ναυτιλίας, στρατιωτικό πλεονέκτημα και, πιο πρόσφατα, τη δυνατότητα βιομηχανικής ανάπτυξης και δραστηριοτήτων αναψυχής. Σήμερα, σημαντικό ποσοστό του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε παράκτιες περιοχές, όπου συγκεντρώνεται και η πλειοψηφία των μεγαλουπόλεων. Η υπερσυγκέντρωση πληθυσμών στις ευαίσθητες αυτές ζώνες συνεπάγεται υπερβολικές πιέσεις τόσο στη στεριά, όσο και στη θάλασσα. Οι πιο κρίσιμες ανάμεσά τους αφορούν την υπερεκμετάλλευση της γης, όσο το δυνατόν εγγύτερα στη θάλασσα, για λόγους στέγασης και βιομηχανικής ή τουριστικής ανάπτυξης. Συνεπώς, οι πιέσεις αυτές μεταφράζονται στην ανάγκη για διατήρηση μιας σταθερής ακτογραμμής.

Αυτή η απαίτηση βρίσκεται συχνά σε σύγκρουση με τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στις παράκτιες περιοχές και μεταβάλλουν διαρκώς την ακτογραμμή. Το αποτέλεσμα αυτής της διαμάχης πολύ συχνά είναι η εκτεταμένη διάβρωση των ακτών. Το πρόβλημα εντείνεται από την κλιματική αλλαγή με τη σχετιζόμενη άνοδο της στάθμης της θάλασσας και τις συχνές καταστροφικές πλημμύρες.

Για την καλύτερη κατανόηση και αντιμετώπιση των επιπτώσεων αυτών των φαινομένων στην παράκτια ζώνη, κρίνεται αναγκαία η διερεύνηση της δυνατότητας των υπαρχόντων αριθμητικών μοντέλων να προσομοιώσουν τις συνθήκες των κυματικών συνθηκών μειώνοντας στο ελάχιστο δυνατό τις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις και αυξάνοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα των παράκτιων περιοχών (Μακροπούλος et al., 2015).

Αντικείμενο, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η διερεύνηση της δυνατότητας προσομοίωσης των ακτομηχανικών διεργασιών και η πρόταση έργων προστασίας, με σκοπό την αντιμετώπιση της διάβρωσης στις παράκτια περιοχές της Μεθώνης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα προσομοίωσης του MIKE 21 για την εκτίμηση των κυματικών και υδροδυναμικών συνθηκών της περιοχής, καθώς και των συνθηκών στερεομεταφοράς, για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα της περιοχής μελέτης.

1.2. Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

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

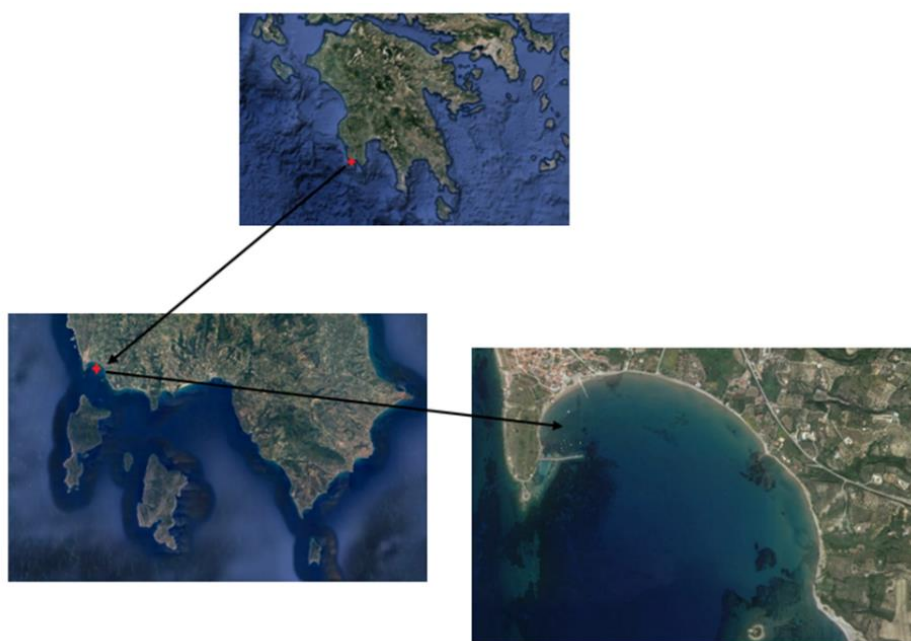
- Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η περιοχή της Μεθώνης. Αρχικά, περιγράφονται κάποια γενικά στοιχεία της περιοχής ,όπως η τοποθεσία , οι χρήσεις γης, κ.α.. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στο ιδιαίτερο πολιτιστικό περιβάλλον με έμφαση στο κάστρο της Μεθώνης. Επιπλέον, παρατίθενται τα κλιματικά δεδομένα, όπως θερμοκρασία, υγρασία, ανεμολογικά και βροχομετρικά δεδομένα, τα οποία προκύπτουν από μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας. Γίνεται, ακόμη, μια σύντομη αναφορά στη βαθυμετρία της περιοχής και τέλος παρουσιάζεται το πρόβλημα της διάβρωσης της ακτογραμμής.
- Το Κεφάλαιο 3 περιλαμβάνει μια σύντομη αναφορά στην παράκτια διάβρωση και στις αιτίες που την προκαλούν. Στο κεφάλαιο, παρουσιάζονται επίσης μέτρα αντιμετώπισης της διάβρωσης , βαριάς και ήπιας μορφής , δύο εκ των οποίων θα διερευνηθούν στη συνέχεια ως εναλλακτικές λύσεις για την προστασία της ακτής μελέτης.
- Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι διαδικασίες υπολογισμού των κυματικών χαρακτηριστικών με τις μεθόδους CEM και SMB και γίνεται αναφορά στο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα μοντέλα του MIKE 21, όπως το φασματικό Spectral waves FM και το υδροδυναμικό Flow Model FM Hydrodynamic Module, καθώς και το μοντέλο στερεομεταφοράς Flow Model FM Sand Transport Module, που έχουν αναπτυχθεί από τον οργανισμό DHI (Danish Hydraulic Institute). Έτσι, παρουσιάζονται κάποιες βασικές παράμετροι των μοντέλων και αναφέρεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εφαρμογή τους.
- Το Κεφάλαιο 5 αφορά στην ιστορική εξέλιξη της ακτογραμμής έπειτα από σύγκριση ιστορικών αεροφωτογραφιών και παρατηρήσεων στο πεδίο, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη διάβρωση της. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σχετικά με το κυματικό κλίμα, τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά και την στερεομεταφορά στην υφιστάμενη κατάσταση της ακτής, ερευνώνται με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου, για να καταλήξουμε στη αξιολόγηση τους.

- Στο Κεφάλαιο 6 αναλύονται οι τρεις εναλλακτικές λύσεις για την προστασία της διαβρωμένης ακτής. Συγκεκριμένα, μελετάται η κατασκευή ομάδας έξαλων και ύφαλων κυματοθραυστών και έπειτα το σενάριο αντικατάστασης του υφιστάμενου λιμενοβραχίονα, μέσω της ανακατασκευής του αρχαίου λιμένα της Μεθώνης. Εν συνεχεία, γίνεται διαστασιολόγηση της τυπικής διατομής των παραπάνω έργων και ακολουθούν τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου για κάθε εναλλακτική λύση. Τέλος, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για τις τρεις εναλλακτικές λύσεις.
- Στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας και διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γενικά Στοιχεία

Η ακτή μελέτης (Σχήμα 1) βρίσκεται στην περιοχή της Μεθώνης, η οποία είναι κωμόπολη του νομού Μεσσηνίας και αποτελεί Δημοτική Ενότητα του Δήμου Πύλου-Νέστορος. Κατά την απογραφή του 2011 είχε 1.223 κατοίκους, ενώ ως Δημοτική Ενότητα έχει 2585 κατοίκους και περιλαμβάνει 6 τοπικές κοινότητες. Η ρυμοτομία της Μεθώνης χαρακτηρίζεται από δύο κύριους δρόμους, το κάστρο και την παραλιακή ζώνη. Ο κύριος δρόμος που οδηγεί στην είσοδο του χωριού, διαχωρίζεται σε δύο δρόμους. Ο ένας οδηγεί στην αγορά του χωριού και ο δεύτερος οδηγεί στην παραλία και το κάστρο. Έχει χαρακτηριστεί ως παραδοσιακός οικισμός σύμφωνα με απόφαση που δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ. 1289/τ.Β/20-10-76. Ο εν λόγω χαρακτηρισμός έγινε σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στο σχετικό ΦΕΚ αφενός διότι αποτελεί ένα εκ των πρώτων μετεπεναστατικών συγκροτημάτων επί τη βάση σχεδίου οικισμού και αφετέρου διότι διασώζει τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά των οικοδομών της νότιας Πελοποννήσου. Η Μεθώνη διαθέτει ξενοδοχεία, ενοικιαζόμενα δωμάτια, καθώς και ένα κάμπινγκ. Επίσης διαθέτει καφετέριες, εστιατόρια, ιατρείο, Κέντρο Εξυπηρέτησης Πολιτών, τράπεζες, εμπορικά καταστήματα , κ.λπ.. Η περιοχή λειτουργεί σαν χώρος αναψυχής και δέχεται ένα μεγάλο αριθμό τουριστών. Υπάρχουν πολλοί θαλάσσιοι δρόμοι για τα εμπορικά σκάφη και επίσης είναι εκμεταλλεύσιμη από διεθνείς και τοπικούς επαγγελματίες αλλά και ερασιτέχνες αλιείς.



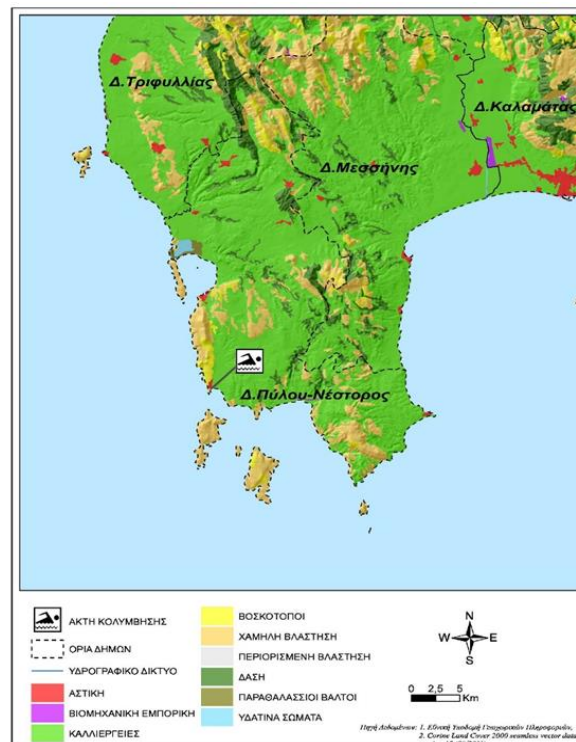
Σχήμα 1. Περιοχή Μελέτης Μεθώνης, Μεσσηνία (Google Earth)

Η ακτή μελέτης (Σχήμα 2) περιλαμβάνει το θαλάσσιο χώρο μεταξύ του βόρειου άκρου της νήσου Σαπιέντζας και της παράλιας περιοχής της Μεθώνης (από τη θέση Λίμνη «Παπά», βορειοδυτικά, έως τη νοτιοδυτική πλευρά του Ακρωτηρίου Κολυβρί) , συνολικού εμβαδού 973 εκταρίων.



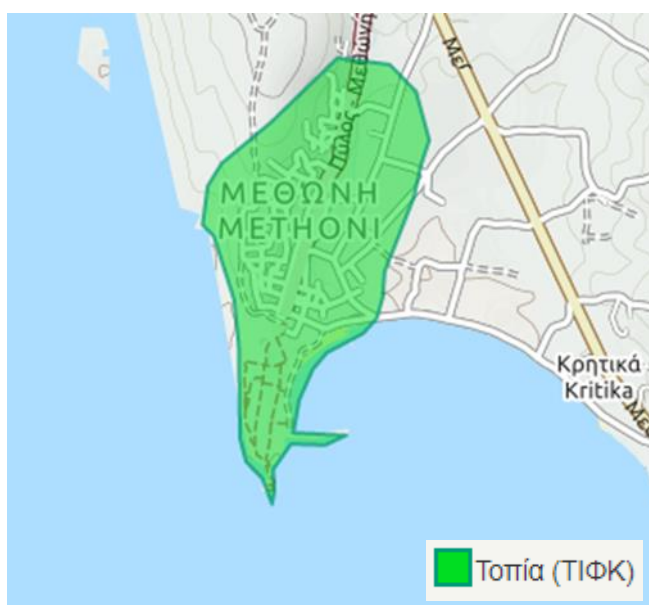
Σχήμα 2. Ακτή μελέτης (Google Earth)

Στην ευρύτερη περιοχή της ακτής κυριαρχούν η αστική χρήση, οι εκτάσεις με καλλιέργειες, οι βοσκότοποι και οι περιοχές με χαμηλή βλάστηση. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται ο χάρτης χρήσεων γης της ευρύτερης περιοχής.



Σχήμα 3. Χρήσεις γης στην περιοχή της Μεθώνης
(www.bathingwaterprofiles.gr)

Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή της Μεθώνης έχει χαρακτηριστεί ως Τοπία Ιδιαίτερου Φυσικού Κάλλους (Τ.Ι.Φ.Κ.) (Σχήμα 4) και είναι ενταγμένη στο δίκτυο NATURA 2000.



Σχήμα 4. Δίκτυο NATURA 2000 (www.filotis.itia.ntua.gr)

2.2. Πολιτιστικό Περιβάλλον

Το περίφημο ενετικό κάστρο της Μεθώνης (Εικόνα 1) είναι το κυριότερο αξιοθέατο της περιοχής. Άλλωστε αποτελεί σημείο αναφοράς και θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα κάστρα του Ελλαδικού χώρου, καθ' ότι είναι το μεγαλύτερο σε έκταση (83 στρέμματα). Είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα καστροπολιτείας. Χτίστηκε από τους Βενετούς όταν έγιναν κύριοι της πόλης το 1209 μ.Χ. . Βεβαίως, στη θέση του κάστρου, προϋπήρχαν κατασκευές από παλιότερα χρόνια. Η είσοδος του κάστρου βρίσκεται στην βόρεια πλευρά του, ενώ μία μεγάλη τάφος την χωρίζει από την ξηρά. Αξίζει να σημειωθεί πως δύο μεγάλοι προμαχώνες βρίσκονται δεξιά και αριστερά της εισόδου, η επικοινωνία των οποίων γίνεται με ένα σκεπαστό πέρασμα, ενώ στη δυτική άκρη βρίσκεται ο προμαχώνας Bembo, που χτίστηκε στη διάρκεια του 15ου αιώνα. Η πύλη του Κάστρου της Μεθώνης είναι εξίσου εντυπωσιακή και διακοσμημένη με ανάγλυφα. Χαρακτηριστικό αρχιτεκτόνημα του κάστρου της Μεθώνης είναι το Μπούρτζι (Εικόνα 2), μικρό επιθαλάσσιο οχυρό, κτισμένο σε μικρή νησίδα στα νότια του κάστρου. Ο ρόλος του κάστρου ήταν καθαρά αμυντικός ενώ χρησιμοποιήθηκε ως φυλακή και καταφύγιο σε καιρούς πολιορκίας, έδρα φρουράς, φάρος και σαν χώρος ανακρίσεων και βασανιστηρίων.



Εικόνα 1. Το κάστρο της Μεθώνης (www.kastra.eu)



Εικόνα 2. Το Μπούρτζι (www.travelstyle.gr)

Ακόμη ένα ορόσημο της περιοχής αποτελεί ο Υποθαλάσσιος οικισμός (Σχήμα 5), που βρίσκεται στα νοτιοανατολικά του όρμου της Μεθώνης. Εκεί υπάρχουν πολλά αξιοσημείωτα υποθαλάσσια αρχαιολογικά ευρήματα, τα οποία χρονολογούνται στην προμυκηναϊκή εποχή. Πρόκειται για τα ερείπια ενός αρχαίου οικισμού, που καταλαμβάνουν έκταση 100 στρεμμάτων και βρίσκονται σε βάθος 3,5 έως 5,5 μέτρων. Εικάζεται, ότι μετά από μια ξαφνική κατολίσθηση, λόγω της γνωστής σεισμικής δραστηριότητας της περιοχής, ο οικισμός βυθίστηκε. Ο καταποντισμένος προμυκηναϊκός οικισμός, μαζί με τα ανάλογα ευρήματα στο Νησακούλι, στα βορειοδυτικά του κάστρου στην πλευρά του Ιονίου, αλλά και τα ναυάγια στο Στενό της Μεθώνης, λόγω του σχετικά μικρού βάθους που βρίσκονται, αποτελούν έναν καλό πυρήνα για τη λειτουργία υποθαλάσσιου αρχαιολογικού πάρκου στη Μεθώνη.



Σχήμα 5. Υποθαλάσσιος οικισμός Μεθώνης (www.aristomenismessinios.blogspot.com/)

Επιπλέον, στην περιοχή, βρίσκονται 2 ναυάγια. Το πρώτο ναυάγιο, είναι γνωστό ως το ναυάγιο της γαλέρας με τους κίονες. Πρόκειται για μία βυθισμένη γαλέρα που μετέφερε κίονες. Οι περισσότεροι κίονες έχουν διασπαστεί σε κομμάτια. Το ναυάγιο, χρονολογείται περίπου στο 1100 μ.Χ. . Βρίσκεται σε βάθος 7-8 μέτρων στην περιοχή του «Στενού» της Μεθώνης, περίπου 50 μέτρα από το ακρωτήριο Καρσί της Σαπιέντζας. Το δεύτερο ναυάγιο της περιοχής, είναι του 2ου ή 3ου μ.Χ. αιώνα. Πρόκειται για τουλάχιστον τέσσερις ρωμαϊκές σαρκοφάγους από τιτανιούχο

λίθο, που βρίσκονται κι αυτές στο βυθό του Στενού της Μεθώνης. Το ναυάγιο αυτό εντοπίστηκε από ντόπιους ψαράδες το 1920.

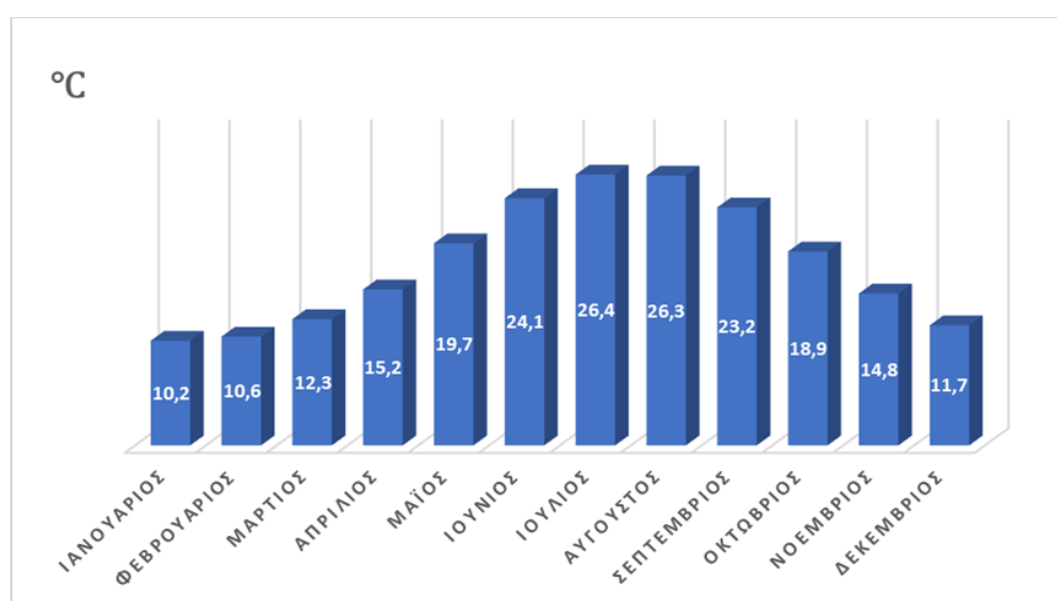
Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στην κομώπολη της Μεθώνης κυριαρχεί έντονα το θρησκευτικό στοιχείο καθώς υπάρχουν τέσσερις ορθόδοξοι ναοί και πληθώρα από εξωκκλήσια.

2.3. Κλιματικά Δεδομένα

Το κλίμα της περιοχής χαρακτηρίζεται ως Μεσογειακό. Κατά τους θερινούς μήνες επικρατεί περίοδος ξηρασίας, ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα παρατηρούνται αρκετές βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με θερμοκρασίες οι οποίες δεν θεωρούνται πολύ χαμηλές. Σύμφωνα με τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Καλαμάτας (Πίνακας 1) η μέση μηνιαία θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 10.2 και 26.4 °C ενώ η μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία είναι 22.8 °C και η μέση ελάχιστη μηνιαία 11.5 °C.

Πίνακας 1. Κλιματικά Δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Καλαμάτας (Ε.Μ.Υ)

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	5.7	5.7	6.8	8.9	12.4	16.0	18.1	18.4	16.2	13.2	9.9	7.2
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	10.2	10.6	12.3	15.2	19.7	24.1	26.4	26.3	23.2	18.9	14.8	11.7
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	15.3	15.5	17.1	19.9	24.3	28.8	31.1	31.3	28.7	24.7	20.5	16.7



Σχήμα 6. Μέση μηνιαία θερμοκρασία

Η κατεύθυνση των επικρατούντων ανέμων είναι δυτική από τους μήνες Μάρτιο έως Σεπτέμβριο , ενώ τους χειμερινούς μήνες πνέουν κυρίως βορειοανατολικοί άνεμοι. Η μέση ένταση των ανέμων κυμαίνεται από 4,7 ως 5,7 Beaufort κατά τη διάρκεια του έτους. Ο πίνακας των ανεμολογικών δεδομένων ,όπως προέκυψε από την επεξεργασία των πληροφοριών που μας παρείχε η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.), παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 2. Ανεμολογικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης. (Ε.Μ.Υ.)

Ένταση Ανέμου Beaufort	Διεύθυνση Ανέμου								ΆΘΡΟΙΣΜΑ	
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,60
1	0,99	0,60	0,30	0,06	0,13	0,12	0,49	0,20	0,20	4,06
2	6,97	7,72	3,10	0,90	1,14	1,07	5,78	2,80	2,80	30,60
3	4,51	3,80	2,84	0,99	0,90	0,96	9,14	4,44	4,44	27,57
4	1,46	0,55	2,37	0,70	0,64	0,70	9,90	4,75	4,75	21,06
5	0,23	0,05	1,02	0,23	0,22	0,36	4,04	1,51	1,51	7,67
6	0,05	0,01	0,57	0,09	0,10	0,21	1,76	0,54	0,54	3,33
7	0,01	0,00	0,14	0,02	0,02	0,07	0,48	0,09	0,09	0,83
8	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,03	0,17	0,02	0,02	0,26
>=9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,03
ΆΘΡΟΙΣΜΑ	14,22	12,73	10,37	2,99	3,16	3,52	31,79	14,34	14,34	100,00

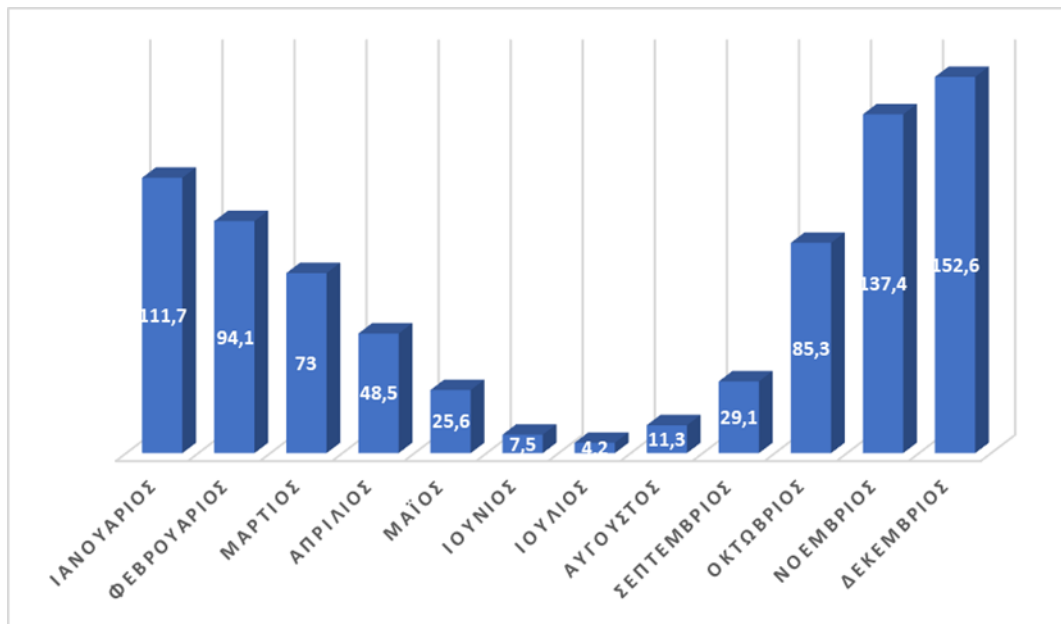
Η μέση μηνιαία βροχόπτωση κυμαίνεται μεταξύ 4,2 και 152,6 mm και οι συνολικές μέρες βροχής ανά μήνα μεταξύ 1,3 και 11,6 mm (Πίνακας 3). Υγρότερη περίοδος εμφανίζεται μεταξύ Νοεμβρίου και Απριλίου με σχετική υγρασία 70,4 – 74,8% . Ως ξηρότεροι εμφανίζονται οι μήνες Ιούνιος και Ιούλιος με σχετική υγρασία 58 – 58,6 % (Πίνακας 4).

Πίνακας 3. Βροχομετρικά δεδομένα μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης. (Ε.Μ.Υ.)

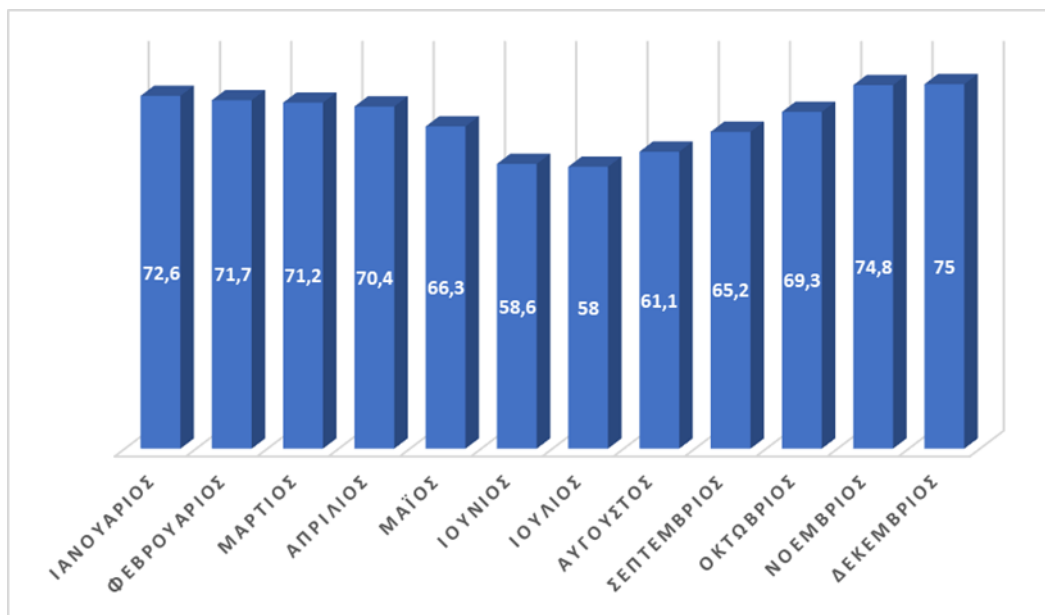
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση	111.7	94.1	73.0	48.5	25.6	7.5	4.2	11.3	29.1	85.3	137.4	152.6
Συνολικές Μέρες Βροχής	9.3	10.9	13.3	6.1	5.1	1.9	1.3	1.4	1.9	6.9	10.0	11.6

Πίνακας 4. . Δεδομένα υγρασίας μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης. (Ε.Μ.Υ.)

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
Μέση Μηνιαία Υγρασία	72.6	71.7	71.2	70.4	66.3	58.6	58.0	61.1	65.2	69.3	74.8	75.0



Σχήμα 7. Δεδομένα υγρασίας μετεωρολογικού σταθμού Μεθώνης.

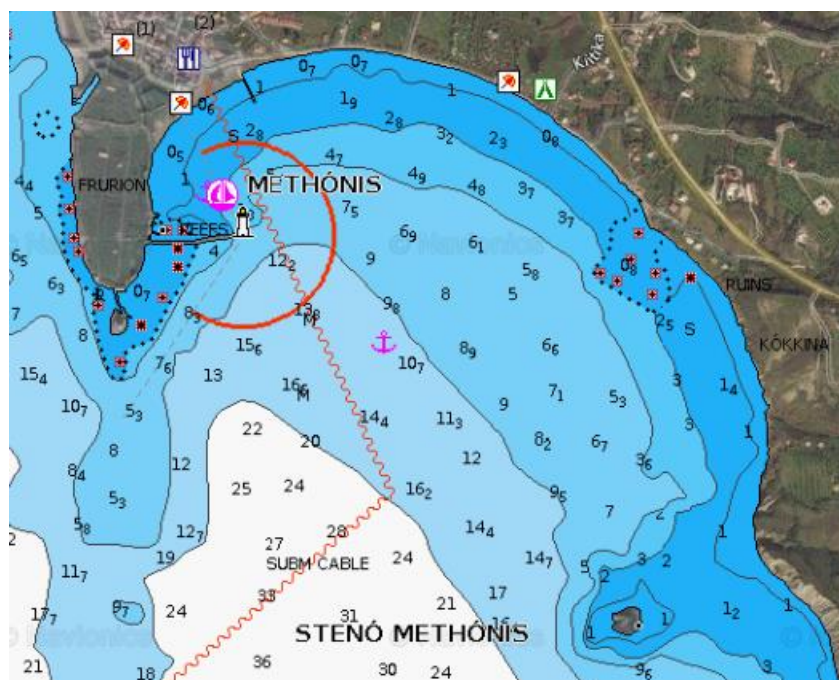


Σχήμα 8. Μηνιαία ποσοστά υγρασίας

2.4. Βαθυμετρία Περιοχής

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από βάθη τα οποία δεν υπερβαίνουν τα 40 μέτρα. Ωστόσο, νοτιοδυτικά από τη νήσο Σαπιέντζα βρίσκεται το φρέαρ των Οινουσσών το οποίο αποτελεί υποθαλάσσια τάφρο βάθους 5121 μέτρων και θεωρείται το μεγαλύτερο βάθος της Μεσογείου.

Οι βαθυμετρικές καμπύλες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή του μαθηματικού μοντέλου, προήλθαν έπειτα από ψηφιοποίηση στο Autocad του χάρτη ο οποίος παρουσιάζεται στο Σχήμα 9.



Σχήμα 9. Ισοβαθείς καμπύλες της ακτής Μεθώνης (www.navionics.com)

Ο θαλάσσιος πυθμένας και η παράκτια ζώνη αποτελούνται από άμμο, ενώ ένα τμήμα είναι πετρώδες (Σχήμα 10). Η παράκτια ζώνη είναι μερικώς τροποποιημένη, λόγω ύπαρξης οικοδομικού υλικού και πεζοδρομίου στο όριό της. Ακόμα, έχει τοποθετηθεί βότσαλο σε τμήματα της ακτής.



Σχήμα 10. Το ίζημα της ακτής (krylos.blogspot.com)

2.5. Διάβρωση της Ακτής

Μια σειρά από ανθρωπογενείς παρεμβάσεις, σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή και την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, οδήγησαν σε φαινόμενα απομείωσης της παραλιακής ζώνης, εις βάρος τόσο της ασφάλειας του ποδός του τείχους του Κάστρου όσο και της χρήσης της παραλιακής ζώνης από λουόμενους. Επίσης, κάθε χρόνο σημειώνονται ζημιές στην παραλιακή οδοποιία με υποσκαφές του ποδός ή και τμηματική κατάρρευση του δρόμου. Οι αιτίες του φαινομένου της διάβρωσης αποδίδονται στη συνδυασμένη δράση του λιμενοβραχίονα του καταφυγίου σκαφών στη σκιά του Κάστρου που εντοπίζεται στο δυτικό όριο του κόλπου, του μόλου από-επιβίβασης σκαφών και του παράκτιου δρόμου.

Στο Σχήμα 11 απεικονίζεται το τμήμα της περιοχής όπου εντοπίστηκαν πρόσφατα σημαντικές καταστροφές στον παράκτιο δρόμο (Εικόνα 3).



Σχήμα 11. Περιοχή πρόσφατων καταστροφών στην παράκτια ζώνη της Μεθώνης





Εικόνα 3. Πρόσφατες καταστροφές στην περιοχή της Μεθώνης (www.foninews.gr)

Με την πάροδο των ετών, απομακρύνθηκε το ίζημα της παραλίας και τα τοιχία υποσκάφτηκαν πλήρως, με αποτέλεσμα οι παραλιακοί οικισμοί να παρουσιάσουν βλάβες αντίστοιχες των σεισμικών καταπονήσεων (ρωγμές κ.τ.λ.) και η κατάσταση να γίνεται δραματική για τους κατοίκους της περιοχής.

Ως επακόλουθο κρίνεται σκόπιμη η λήψη δράσεων για την αναστροφή του φαινομένου της διάβρωσης και την προστασία της ακτής, ιδιαίτερα στην περιοχή του ποδός του Κάστρου που ήδη βρίσκεται σε κίνδυνο υποσκαφών του τείχους. Στο ίδιο πλαίσιο απαιτείται η διερεύνηση, η αξιολόγηση και η προδιαγραφή ενός δικτύου παρεμβάσεων που θα συμβάλλουν στην προστασία και τη βελτίωση του παράκτιου περιβάλλοντος, ενισχύοντας τις υφιστάμενες υποδομές των χρήσεων αναψυχής και ελλιμενισμού.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1. Παράκτια Διάβρωση

Ο σχηματισμός των ακτών είναι το δυναμικό συνδυαστικό αποτέλεσμα των εξής δράσεων:

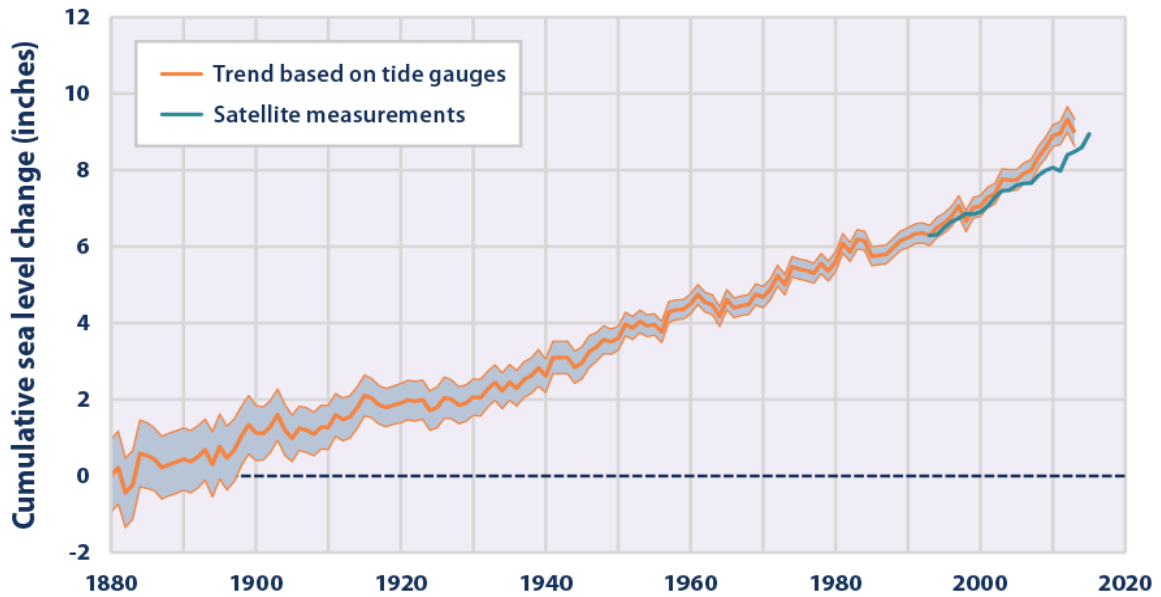
- γεωλογικές διεργασίες (σεισμοί, ρήγματα, καθίζηση-υπερύψωση εδάφους)
- τροφοδοσία των ακτών με φερτά (που έχουν προέλευση κυρίως τις υδρολογικές λεκάνες και σε μικρότερο ποσοστό τη διάβρωση των παράκτιων πετρωμάτων)
- κυματισμοί και ρεύματα (διάβρωση ακτών, αναδιανομή ιζημάτων, μεταφορά ιζημάτων κατά μήκος της ακτής, μεταφορά ιζημάτων προς τα βαθιά)

Ο συνδυασμός αυτών των παραμέτρων οδηγεί σε μία δυναμική ισορροπία. Όταν αλλάζει μία παράμετρος χάνεται αυτή η ισορροπία και το παράκτιο σύστημα αλλάζει σχήμα μέχρι να επιτευχθεί μία νέα δυναμική ισορροπία.

Ως παράκτια διάβρωση ορίζεται η σταδιακή οπισθοχώρηση της ακτογραμμής μετρούμενη σε χρονικό ορίζοντα ικανό να απομονώσει μια μέτρηση από τις επιδράσεις του καιρού, των κυματικών καταγίδων και της δυναμικής των ιζημάτων (Doody et al, 2004). Η διάβρωση είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο εκδηλώνεται σε βάθος χρόνου, μη αποτελώντας φυσική καταστροφή, και επομένως είναι δυνατή η πρόληψη και η αντιμετώπιση της, με σκοπό την ελαχιστοποίησή ή ακόμα και εξάλειψη των αποτελεσμάτων της. Ως φυσικό φαινόμενο θεωρείται αναμενόμενη, καθώς η γη βρίσκεται σε μεσοπαγετώδη περίοδο, δηλαδή μεταξύ δύο διαδοχικών παγετωδών περιόδων. Κατά την περίοδο του προηγούμενου αιώνα η ετήσια άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας (ΜΣΘ) ήταν $1,7\text{mm} \pm 0,3\text{mm}$ (Church and White, 2006), με αυξητική τάση του ρυθμού αυτού λόγω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της γης ως αποτέλεσμα του φαινομένου του θερμοκηπίου. (IPCC,2007),(Church and White,2011).

Πίνακας 5. Ποσοστό της ακτογραμμής που έχει υποστεί διάβρωση ανά χώρα (EUROSION, 2004)

Χώρα	Ποσοστό (%) της ακτογραμμής που έχει υποστεί διάβρωση	Χώρα	Ποσοστό (%) της ακτογραμμής που έχει υποστεί διάβρωση
Βέλγιο	25,5	Δανία	13,2
Κύπρος	37,8	Φινλανδία	0,04
Γαλλία	24,9	Λετονία	32,8
Ελλάδα	28,6	Ισπανία	11,5
Ιταλία	22,8	Εσθονία	2,0



Σχήμα 12. Αύξηση της μέσης στάθμης θάλασσας σε βάθος χρόνου (www.era.gov)

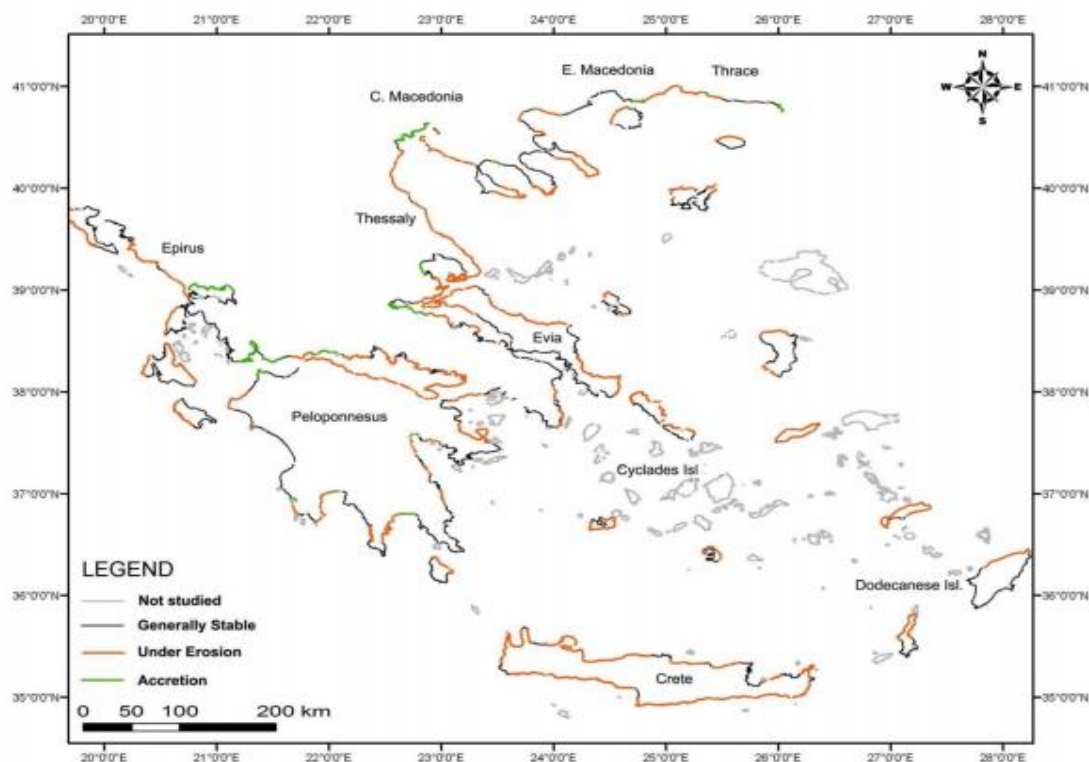


Εικόνα 4. Το παραλιακό μέτωπο του New Jersey το 2009 και το 2012 έπειτα από τη διαβρωτική επίδραση των κυματικών καταιγίδων και των κυμάτων. (www.usgs.gov)

Επίσης, ορίζεται ως η αέναη επίδραση της θάλασσας στο χερσαίο έδαφος. Τα ποτάμια, τα υπόγεια νερά, οι βροχοπτώσεις και σε μικρότερο βαθμό ο άνεμος και η θερμοκρασία, διαβρώνουν σε βάθος χρόνου το έδαφος, τείνοντας να εξαλείψουν το ανάγλυφο της γης. Παράλληλα, η θάλασσα και τα ποτάμια με τη συνεχή κίνησή τους αποθέτουν ιζήματα ενισχύοντας τα ήδη υπάρχοντα εδάφη ή δημιουργούν νέα.

Η επίδραση της παράκτιας διάβρωσης συνήθως αντισταθμίζεται από άλλες φυσικές διεργασίες, όπως την έμπληση, η οποία είναι η αντίθετη διαδικασία της διάβρωσης, και την ιζηματομεταφορά. Οι ιζηματογενείς κόκκοι παραμένουν σπάνια στην περιοχή δημιουργίας τους και μέσω διαφόρων οδών καταλήγουν σε άλλες περιοχές. Οι κόκκοι, στις περισσότερες περιπτώσεις, παρασύρονται και μεταφέρονται, σε μικρές ή μεγάλες αποστάσεις, από ρευστά έως ότου εναποτεθούν σε ένα χώρο ιζηματογένεσης.

Όσον αφορά τις παραλίες και τον τρόπο με τον οποίο το ίζημα καταλήγει σε αυτές, ισχύει ότι το ίζημα συνήθως καταλήγει μέσω των βροχοπτώσεων και άλλων κατακρημνισμάτων στην κοίτη των ποταμών και άλλων πλημμυρικών οδών, με τελική κατάληξη την θάλασσα. Έπειτα το ίζημα αυτό, σε συνδυασμό με το ίζημα που προέρχεται από τη διάβρωση της ακτογραμμής, παρέχει το υλικό που χρειάζεται για την ανάπτυξη των παράκτιων υφάλων, υγροτόπων, αμμωδών παραλιών και αμμόλοφων.



Σχήμα 13. . Κατάταξη των ελληνικών ακτών σύμφωνα με την διάβρωση που έχουν υποστεί (Alexandrakis et al. 2013)

3.2. Αίτια διάβρωσης

Η παράκτια διάβρωση είναι συνήθως αποτέλεσμα ενός συνδυασμού παραγόντων, φυσικών και ανθρωπογενών, που αναπτύσσονται σε διαφορετικές κλίμακες.

Στους φυσικούς παράγοντες συμπεριλαμβάνονται οι θαλάσσιες καταιγίδες (αύξηση συχνότητα εμφάνισης, έντασης, αλλαγή διεύθυνσης), τα ρεύματα κοντά στην ακτή και η σχετική άνοδος της στάθμης της θάλασσας.

Στους ανθρωπογενείς παράγοντες που επηρεάζουν την παράκτια διάβρωση περιλαμβάνονται: οι παράκτιες κατασκευές, οι αμμοληψίες από παραλίες και ποτάμια, οι διευθετήσεις κοίτης ποταμών (ιδιαίτερα η κατασκευή φραγμάτων), οι βυθοκορήσεις, το καθάρισμα και οι επιδράσεις στην παράκτια βλάστηση, καθώς επίσης και η ανάπτυξη πάνω στην ενεργή ζώνη της παραλίας.

Παρακάτω περιγράφονται μερικοί από αυτούς τους παράγοντες διάβρωσης.

3.2.1. Φυσικά αίτια διάβρωσης ακτών

Κυματικές καταιγίδες

Το μεγαλύτερο μέρος των εκτεθειμένων ακτών χάνουν μέρος των ιζημάτων τους, ως αποτέλεσμα της διάβρωσης, της φθοράς ή της απομάκρυνσής του από μηχανικούς, χημικούς και βιολογικούς παράγοντες. Όταν μία ακτή οπισθοχωρεί, είναι συνήθως αποτέλεσμα της διάβρωσης. Η παράκτια διάβρωση προκαλείται κυρίως από την κίνηση του νερού υπό μορφή υψηλών κυμάτων και ισχυρών ρευμάτων. Τα κύματα θραύσης διαβρώνουν την ακτή αφαιρώντας και απομακρύνοντας κόκκους του ιζήματος ή αποκόπτοντας κομμάτια βραχωδών σχηματισμών. Ο πάγος, η χημική διάβρωση και η μηχανική τριβή βοηθούν επίσης στην διάβρωση μερικών βραχωδών χερσονήσων και απόκρημνων ακτών. Τα βότσαλα και η άμμος λειτουργούν ως εργαλεία που χτυπούν επανειλημμένα τους βράχους και τους φθείρουν σταδιακά. Λόγω των ισχυρών καταιγίδων τα επίπεδα του νερού ανυψώνονται γρήγορα, επιταχύνοντας τα παράκτια ρεύματα, που έχει ως αποτέλεσμα την επίσπευση απώλειας εδαφών.

Η απώλεια ιζημάτων κατά τη διάρκεια των καταιγίδων εξαρτάται από μία σειρά παραγόντων, όπως :

- Την απόσταση από το κέντρο της καταιγίδας
- Τα ύψη των κυμάτων της καταιγίδας
- Τα χαρακτηριστικά των κυμάτων
- Την κατεύθυνση μετακίνησης της καταιγίδας
- Τη γωνία προσέγγισης των κυμάτων στην ακτή
- Την ταχύτητα μετακίνησης και τη διάρκεια της καταιγίδας
- Το στάδιο της παλίρροιας στις παράκτιες περιοχές κατά τη στιγμή της καταιγίδας

3.2.2. Ανθρωπογενή αίτια διάβρωσης ακτών

Αμμοληψίες από παραλίες

Αν και οι αμμοληψίες κρίθηκαν παράνομες το 1986, σήμερα αυτός ο νόμος βρίσκεται ισχύ σε λίγες παραλίες της χώρας μας. Το γεγονός ότι οι κατασκευές στην Ελλάδα αποτελούνται κυρίως από οπλισμένο σκυρόδεμα ,του οποίου τα κύρια δομικά υλικά είναι το τσιμέντο και η άμμος , οδήγησε στην εξόρυξη και μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων άμμου από πλειάδα παραλίων.



Εικόνα 5. Διαδικασία αμμοληψίας (www.ilialive.gr)

Ανάπτυξη πάνω στην ενεργή ζώνη της παραλίας

Σε αρκετές περιπτώσεις παρατηρείται κατοικίες, ξενοδοχεία, επαγγελματικοί χώροι, και άλλες κατασκευές να κτίζονται μέσα στην ενεργή ζώνη μιας παραλίας. Αυτό έχει ιδιαίτερα αρνητικές συνέπειες στη λειτουργία της παραλίας. Μία υγιής παραλία έχει πλάτος που μεταβάλλεται εποχικά και ανταλλάσσει μάζα με το όλο οίκο-μηχανικό σύστημα της παραλίας. Στην περίπτωση που το πλάτος της παραλίας μειωθεί αρκετά εξαιτίας κάποιας κατασκευής, τότε στο συγκεκριμένο σημείο, αλλά και γύρω από αυτό παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της διάβρωσης. Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η κατασκευή αλλάζει τις τοπικές συνθήκες του ανέμου και κατ' επέκταση του κυματισμού, αλλά επίσης εγκλωβίζει όγκο ιζήματος, ο οποίος υπό φυσιολογικές συνθήκες θα ήταν ελεύθερος να μεταφερθεί στην ενεργή ζώνη της παραλίας.



Εικόνα 6. Παράδειγμα ανάπτυξης πάνω στην ενεργή ζώνη της παραλίας σε περιοχή του Ηρακλείου (www.ert.gr)

Διάβρωση προκαλούμενη από κατασκευή φραγμάτων

Τα φράγματα κατασκευάζονται με σκοπό την κάλυψη διάφορων ανθρώπινων αναγκών, όπως η προστασία από πλημμύρες, η συγκέντρωση νερού προκειμένου να χρησιμοποιηθεί για ύδρευση και άρδευση κ.α. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συγκράτηση σημαντικών ποσοτήτων φερτών υλών, που υπό φυσιολογικές συνθήκες θα κατέληγαν στην παράκτια ζώνη, αποτελώντας υλικό απόθεσης, οδηγώντας στην οπισθοχώρηση της ακτής και την αύξηση της τρωτότητας της στη διάβρωση (Κουτίτας, 1994).

3.3. Μέθοδοι αντιμετώπισης της διάβρωσης

Τα έργα προστασίας ακτών μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με τη λειτουργία τους: στα έργα θωράκισης της ακτής και στα έργα ανάπλασης της ακτής. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει έργα τα οποία αποσκοπούν στην προστασία της ακτής από απότομη διάβρωση, η οποία οφείλεται στην απομάκρυνση φερτών υλών εγκάρσια στην ακτή, εξ' αιτίας ισχυρών κυματισμών (θυελλωδών ή/και παλιρροϊκών). Στη δεύτερη κατηγορία κατατάσσονται τα έργα που ως σκοπό έχουν την αλλαγή ισορροπίας στο ισοζύγιο των φερτών υλών και την δημιουργία περίσσειας στερεοπαροχής με στόχο την προσάμμωση της ακτής. Λειτουργούν δηλαδή ως τεχνητές παγίδες φερτών υλών με σκοπό να “εξαναγκάσουν” τη στερεομεταφορά σε συγκεκριμένη πορεία και απόθεση στα σημεία όπου απαιτείται. Τα έργα ανάπλασης της ακτής βρίσκουν εφαρμογές σε ακτές όπου εμφανίζεται το φαινόμενο της μόνιμης διάβρωσης λόγω μειωμένης στερεοπαροχής παράλληλα στην ακτή. Όπως είναι κατανοητό, οι περισσότερες ακτές αποτελούν περιοχές αξιοθαύμαστης φυσικής ομορφιάς και πόλους έλξης επισκεπτών, επομένως τουριστική ανάπτυξη μιας περιοχής. Έτσι ακόμα και τα έργα προστασίας θα πρέπει αφενός να είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να συμβαδίζουν με την αρμονία του τοπίου και αφετέρου να εξασφαλίζουν την ποιότητα του θαλασσινού νερού. Με βάση το σκεπτικό αυτό, τα έργα που παρουσιάζονται στη παρούσα εργασία διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με την επίδραση που έχουν στο παράκτιο περιβάλλον: α) έργα βαρέας μορφής, β) έργα ήπιας μορφής, τα οποία δεν αλλοιώνουν το φυσικό τοπίο και επιτρέπουν την κυκλοφορία των θαλασσιών μαζών και την ανανέωσή τους, άρα οδηγούν στη αναβάθμιση της ποιότητας του νερού.

3.3.1. Έργα προστασίας ακτών βαρέας μορφής

Βραχίονες

Οι βραχίονες (groins) κατασκευάζονται εγκάρσια ή υπό γωνία ως προς την ακτογραμμή και βρίσκονται σε επαφή με την ακτή. Κατασκευάζονται σε ακτές που διαβρώνονται ή όταν επιθυμούμε αύξηση του πλάτους μιας αμμώδους παραλίας. Έχουν σκοπό τη συγκράτηση της παράκτιας στερεοπαροχής που απομακρύνεται από την ακτή, ώστε να ελεγχθεί η διάβρωση και τελικά να σταθεροποιηθεί η ακτή.

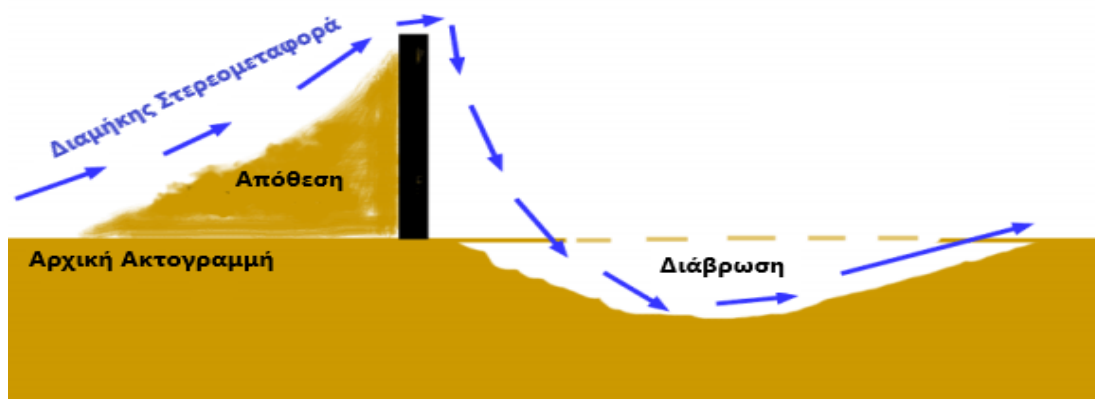
Ανάλογα με το μήκος της ακτής μπορεί να κατασκευαστεί ένας μόνο βραχίονας ή ένα σύστημα πολλών βραχιόνων. Η κατασκευή τους μπορεί επίσης να συνοδευτεί μετεχνητή τροφοδότηση της ακτής, που γίνεται στο εσωτερικό των ανοιγμάτων τους.

Οι σημαντικότεροι παράμετροι σχεδιασμού είναι το μήκος τους L_g και η απόσταση των ανοιγμάτων S_g . Εάν οι βραχίονες κατασκευαστούν με μήκος μικρότερο του πλάτους θραύσης τότε η παρουσία τους δεν διακόπτει το σύνολο της παράκτιας στερεοπαροχής, αλλά επιτρέπει μέρος της να περνάει κατάντη, καθιστώντας το σύστημα διαπερατό.

Το κύριο μειονέκτημα των βραχιόνων είναι η διάβρωση που επιφέρουν στα ανοίγματα αλλά κυρίως στην κατάντη περιοχή, στερώντας την από σημαντικές ποσότητες ιζήματος που κατακρατούνται ανάντη. Γεγονός αποτελεί, επίσης, ότι η παρουσία έξαλων προβόλων αλλοιώνει οπτικά το παράκτιο τοπίο, επιφέροντας οπτική όχληση. Επιπροσθέτως, λόγω της διακοπής της παράκτιας κυκλοφορίας και της μη ικανοποιητικής ανανέωσης των υδάτων ανάμεσα στους προβόλους, σε περιοχές σχετικά επιβαρημένες περιβαλλοντικά και με μικρό εύρος παλίρροιας, μπορεί να προκληθεί σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας των νερών, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, η οποία θα συνοδεύεται από δυσοσμία, θολότητα και ευτροφισμό.



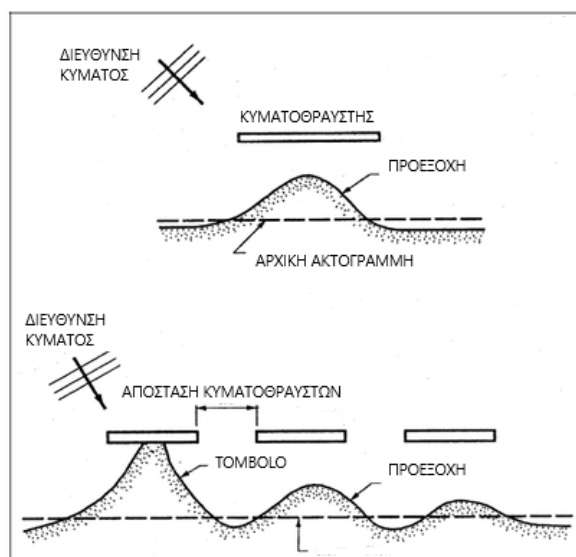
Εικόνα 7. Σύστημα διαδοχικών προβόλων για τη διατήρηση επαρκούς πλάτους σε ακτή της Ολλανδίας (www.earthmagazine.org)



Σχήμα 14. Μηχανισμός λειτουργίας προβόλου (www.pixgood.com)

Έξαλοι κυματοθραύστες

Οι κυματοθραύστες παράλληλα στην ακτή και αποσπασμένοι από αυτήν (δηλαδή χωρίς σημείο επαφής με αυτήν), είναι το πλέον σύνηθες μέτρο προστασίας μια ακτής από διάβρωση. Εξαιτίας της παρουσίας τους η κυματική δράση μειώνεται σημαντικά πίσω από αυτούς και έτσι προστατεύεται η ακτή από τη διαβρωτική δράση τους. Ταυτόχρονα οι νέες κυματογενείς διεργασίες που συνεπάγονται (λόγω του φαινομένου της περίθλασης) οδηγούν στη μεταφορά και παγίδευση της άμμου ανάμεσα στους κυματοθραύστες και στην ακτή, με αποτέλεσμα την ελεγχόμενη προσάμωση, δηλαδή τη δημιουργία προεξοχής (salient) ή tombolo.



Σχήμα 15. Χαρακτηριστικοί σχηματισμοί salient και tombolo (www.usace.army.mil)

Συνήθως κατασκευάζεται ένας μεμονωμένος κυματοθραύστης ή ένα σύστημα κυματοθραυστών με κάποια απόσταση μεταξύ τους με σκοπό να προστατευτούν μεγάλα μήκη ακτών.

Όταν η απόστασή τους από την ακτή είναι σχετικά μικρή και δημιουργείται tombolo που λειτουργεί πλέον σαν βραχίονας, η στερεοπαροχή παράλληλα στην ακτή διακόπτεται, με αποτέλεσμα την κατάντη διάβρωση. Για μεγαλύτερες αποστάσεις από την ακτή, μέρος της παράκτιας στερεοπαροχής διαπερνά κατάντη, και έτσι η διάβρωση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Οι κυματοθραύστες κατασκευάζονται συνήθως με πρανή από λιθορριπή (παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιείται και στα λιμενικά έργα), αλλά και με ογκόλιθους άοπλου σκυροδέματος. Οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού είναι το μήκος τους, η απόστασή τους από την ακτή, η απόσταση μεταξύ τους και ο συντελεστής διάδοσης των κυματισμών σχεδιασμού.

Οι έξαλοι κυματοθραύστες κατασκευάζονται με ύψος στέψης πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας μεγαλύτερο των 2 m περίπου. Σχεδιάζονται έτσι ώστε, κάτω από συνήθεις κυματικές συνθήκες, να τους διαπερνά ένα μικρό μέρος της κυματικής ενέργειας, είτε με την υπερπήδηση των κυματισμών είτε με τη μετάδοσή τους μέσα από το πορώδες της κατασκευής. Κάτω, όμως, από συνθήκες έντονων κυματικών επεισοδίων, με μικρές βέβαια ετήσιες συχνότητες εμφάνισης, σχετικά μεγάλη ενέργεια των κυματισμών μπορεί μεταδοθεί κατάντη.



Σχήμα 16. Εξέλιξη ακτογραμμής 6 χρόνια μετά την κατασκευή έξαλων κυματοθραυστών (Shoreline Studies Program)

Θωρακίσεις ακτών - παράκτιοι τοίχοι

Οι θωρακίσεις των ακτών και οι παράκτιοι τοίχοι αντιστήριξης πρανών κατασκευάζονται πάνω στην ακτή με σκοπό να αποφευχθεί η διάβρωση της ακτής αλλά και να προστατευτούν οι υποδομές (δρόμοι, δίκτυα κ.λπ.) καθώς και οι παράκτιοι οικισμοί από τις πλημμύρες, κάτω από συνθήκες ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων συνδυασμένης αναρρίχησης κυματισμών και ανόδου της στάθμης της θάλασσας.

Οι θωρακίσεις ακτών κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπές από φυσικούς ή τεχνητούς ογκόλιθους. Οι τραχείς επιφάνειες εμποδίζουν την αναρρίχηση των κυματισμών. Ταυτόχρονα, η διατομή διαμορφώνεται με κατάλληλη διαβάθμιση (ενδιάμεση στρώση-φίλτρο) και γεώφασμα, ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση του φυσικού πρανούς της ακτής, εξασφαλίζοντας έτσι τη σταθερότητά της.



Εικόνα 8. Παράκτιος Τοίχος (www.climatetechwiki.org)

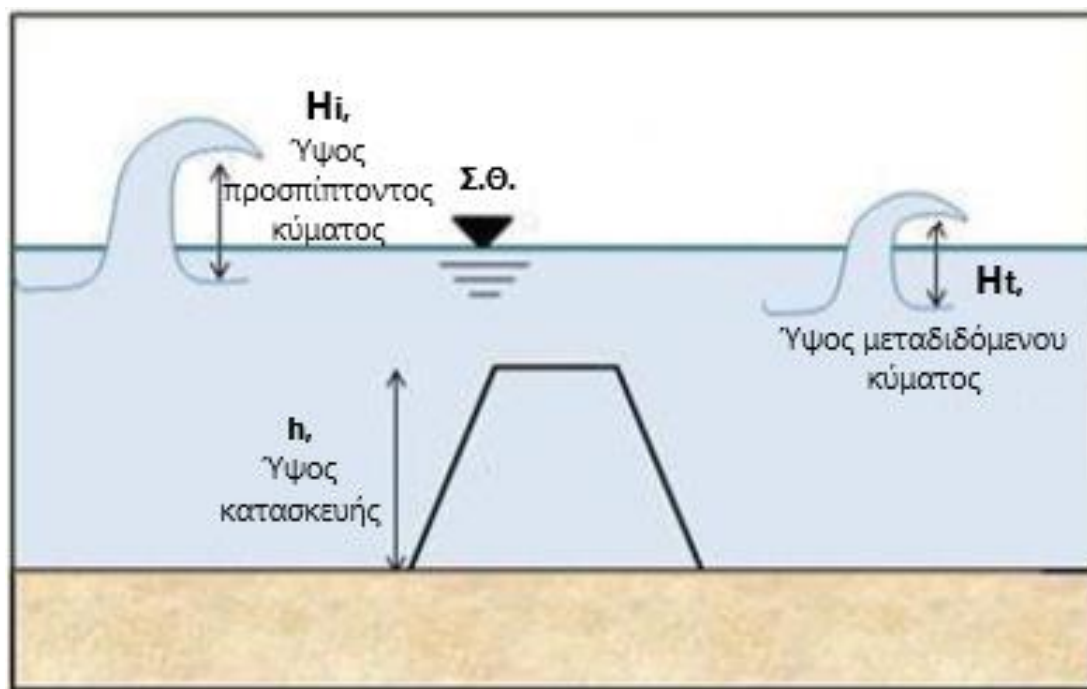
3.3.2. Έργα προστασίας ακτών ήπιας μορφής

Χαμηλής στέψης και ύφαλοι κυματοθραύστες

Οι κυματοθραύστες χαμηλής στέψης και οι ύφαλοι κυματοθραύστες κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή και ογκόλιθους, αλλά και από σκυρόδεμα, όπως και οι έξαλοι. Κατασκευάζονται επίσης από σωλήνες γεωφάσματος που είναι πληρωμένοι με άμμο, για να μειωθεί ο κίνδυνος για τους λουόμενους και τα σκάφη. Η στέψη τους βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας ή και πλησίον της ίσαλης γραμμής, επιτρέποντας τον κυματισμό να τους υπερπηδά και να διαδίδεται κατάντη. Λόγω της παρουσίας τους, ένα μέρος της κυματικής ενέργειας ανακλάται προς τα ανοιχτά, ένα μέρος αποσβένεται και ένα μέρος της μεταδίδεται προς την ακτή. Η απόσβεση της κυματικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω της θραύσης πάνω στην κατασκευή ή/και μέσω των τυρβωδών ροών στην επιφάνεια (τριβή) και της ροής στο. Ο συντελεστής ανάκλασης είναι της τάξης του 20%, ενώ ο συντελεστής μετάδοσης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με την απώλεια ενέργειας.

Η παρουσία τους παράλληλα στην ακτή δημιουργεί μια προστατευόμενη περιοχή όπου μειώνεται η διαβρωτική εγκάρσια δράση των κυματισμών. Κατασκευάζονται μεμονωμένοι ή ως σύστημα κυματοθραυστών με κενά ανάμεσά τους.

Όσον αφορά τις επιπτώσεις στο περιβάλλον, η ποιότητα νερού δεν επηρεάζεται σημαντικά, εφόσον η κυκλοφορία του νερού πάνω από αυτούς βοηθά στην ανανέωση των νερών της λεκάνης που δημιουργείται, ενώ ταυτόχρονα δεν επιφέρουν οπτική όχληση. Επιπλέον η θραύση των κυματισμών αυξάνει την οξυγόνωση των υδάτων. Βασικό μειονέκτημα είναι η δημιουργία των ρευμάτων επαναφοράς στα ανοίγματα, που μπορεί να απομακρύνουν τον λουόμενο από την ακτή προς τα ανοιχτά. Επίσης η παρουσία τους μπορεί να μη γίνει αντιληπτή και να δημιουργήσει προβλήματα στη ναυσιπλοΐα.



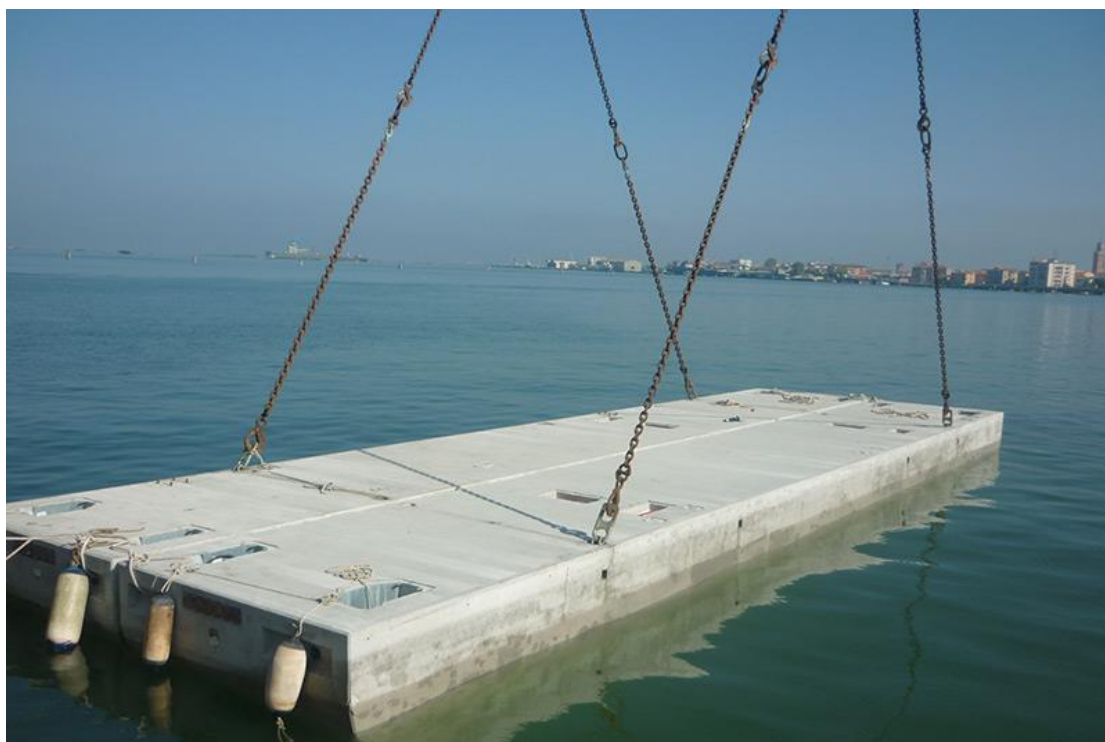
Σχήμα 17. Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθράυστη (Αρνούι, 2006)

Πλωτοί κυματοθραύστες

Οι πλωτοί κυματοθραύστες αποτελούν βιομηχανικά παραγόμενες κατασκευές από πλαστικό ή οπλισμένο σκυρόδεμα υπό μορφή λεπτότοιχου κιβωτίου, οι οποίες συνήθως χρησιμοποιούνται για την κυματική προστασία ημιπροστατευμένων παράκτιων ζωνών. Η κυματική προστασία την οποία προσφέρουν ποικίλλει ανάλογα με τα κυματικά χαρακτηριστικά και το βάθος.

Κύρια πλεονεκτήματα των πλωτών κυματοθραυστών αποτελούν το χαμηλό κόστος κατασκευής, η ταχύτητα τοποθέτησης και η δυνατότητα μετακίνησής τους. Επίσης έχουν ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς λόγω του μικρού τους βυθίσματος (της τάξης του 1 m) δεν παρεμποδίζεται η κυκλοφορία και η ανανέωση των νερών.

Ωστόσο, λόγω κυρίως του γεγονότος ότι όταν προσπίπτουν ύψη κύματος μεγαλύτερα από 2-3 m, οι πλωτοί κυματοθραύστες παρασύρονται και αστοχούν, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μη ημιπροστατευόμενες ή προστατευόμενες περιοχές.



Εικόνα 9. Πλωτός κυματοθραύστης (<http://www.ingemar.it>)

Πυθμενικοί τεχνητοί ύφαλοι

Οι πυθμενικοί τεχνητοί ύφαλοι προκατασκευάζονται από σκυρόδεμα και έχουν διάφορες μορφές. Συνήθως χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση των ενδαιτημάτων (φυσικό περιβάλλον στο οποίο ζει και αναπαράγεται ένα είδος) και συνεπώς τον εμπλουτισμό της θαλάσσιας πανίδας. Συνήθως οι μονάδες τοποθετούνται σχετικά κοντά η μία στην άλλη, σε αρκετές σειρές παράλληλα στην ακτή, σε μικρά βάθη, καλύπτοντας όλο το μήκος της ακτής που πρέπει να προστατευτεί. Η λειτουργία τους είναι απλή: όταν μειώνουν την κυματική ενέργεια που προσπίπτει, μειώνεται και η διαβρωτική ικανότητα των κυματισμών αλλά και η ικανότητα στερεομετοφοράς του παράκτιου κυματογενούς ρεύματος, με αποτέλεσμα τον έλεγχο της διάβρωσης. Σε σύγκριση με τους ύφαλους κυματοθραύστες, έχουν το σημαντικό πλεονέκτημα ότι είναι προκατασκευασμένοι και ανατάξιμοι. Βέβαια, ο συντελεστής διάδοσης των κυματισμών είναι μεγαλύτερος και, συνεπώς, είναι λιγότερο αποτελεσματικοί.



Εικόνα 10. Πυθμενικοί τεχνητοί ύφαλοι (www.reefball.org)

Τεχνητή τροφοδότηση/αναπλήρωση ακτών

Η τεχνητή τροφοδοσία με άμμο, είναι η διεργασία κατά την οποία πραγματοποιείτε τεχνητή αύξηση του όγκου της άμμου με την εισαγωγή εξωγενούς υλικού, όσο το δυνατόν ίδιο με το ενδογενές. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, είτε με απευθείας μεταφορά από τα βαθιά νερά σε ένα σημείο στην παραλία ή με συνεχή παροχή. Υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής της, απευθείας στην επιφάνεια της παραλίας ή υποθαλάσσια. Είναι δημοφιλής στην Αμερική και σταδιακά και στην Ευρώπη, ωστόσο δεν συνιστάται στην περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμες πηγές ιζημάτων στην περιοχή. Τέλος σημαντικό ρυθμιστικό παράγοντα αποτελούν και τα χαρακτηριστικά της άμμου που εισάγεται σε σχέση με τη σύσταση της υπάρχουσας παραλίας.



Εικόνα 11. Βυθοκόρος σε διαδικασία απόρριψης ιζήματος για αναπλήρωση ακτής (www.escp.org.uk)

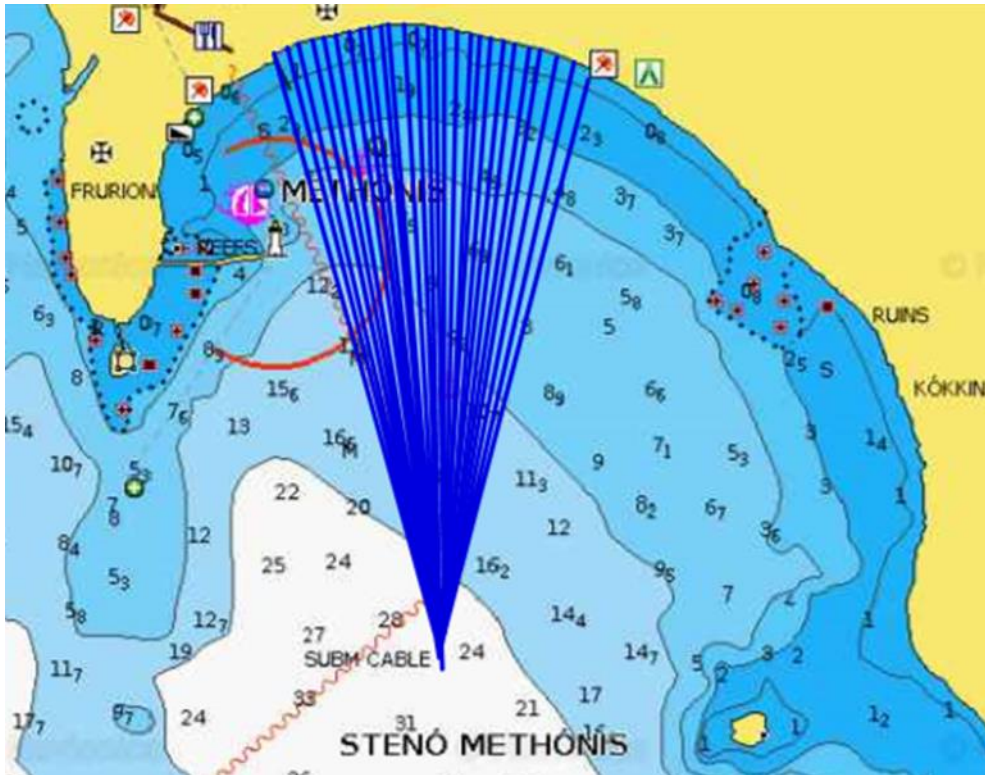
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

4.1. Υπολογισμός Χαρακτηριστικών Κυμάτων

Η γνώση των χαρακτηριστικών των κυμάτων ανά διεύθυνση ανέμου αποτελεί μείζον θέμα για σχεδόν οποιαδήποτε ερευνητική δραστηριότητα στα παράκτια ύδατα. Σε πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητη η χρήση μακροχρόνιων δεδομένων, τα οποία ωστόσο δεν είναι διαθέσιμα σε αρκετές περιοχές μελέτης. Έτσι κρίνεται αναγκαία η χρήση προτύπων πρόβλεψης κυματικών χαρακτηριστικών. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί ορισμένα εμπειρικά και αριθμητικά μοντέλα για το σκοπό αυτό. Τα αριθμητικά μοντέλα επιλύονται με τη χρήση του ενεργειακού ισοζυγίου σε όλα τα σημεία του δικτύου στη στάθμη της θάλασσας, όπου λαμβάνει χώρα η γένεση των ενεργών κυματισμών (Etemad Shahidi et al, 2009). Τα μοντέλα αυτά απαιτούν άφθονα βαθυμετρικά, μετεωρολογικά και ωκεανογραφικά δεδομένα ,γεγονός που τα καθιστά δύσκολα στη χρήση. Επομένως σε αυτές τις περιπτώσεις συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε πιο απλοποιημένες μεθόδους, οι οποίες βασίζονται στην αλληλεξάρτηση μεταξύ αδιάστατων αναλύσεων. Μερικές αντίστοιχες μέθοδοι πρόβλεψης κυματικών χαρακτηριστικών είναι η SMB , Wilson , JONSWAP , Donelan , CEM και SPM. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα κάνουμε χρήση των μεθόδων CEM και SMB.

4.1.1. Μέθοδος CEM

Στη μέθοδο CEM (U.S. Army, 2006) το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους (fetch), για μια συγκεκριμένη διεύθυνση ανέμου, υπολογίζεται σχεδιάζοντας 30 ακτίνες, με βήμα 1° . Η αρχή τους είναι ένα σημείο στα βαθιά ύδατα και προεκτείνονται ώσπου να τμήσουν την ακτογραμμή. Το ενεργό ανάπτυγμα πελάγους X υπολογίζεται ως ο μέσος όρος του μήκους των παραπάνω ακτινών. Στο Σχήμα 18 φαίνονται οι ακτίνες για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους για τον βόρειο άνεμο.



Σχήμα 18. Ακτίνες για τον υπολογισμό του αναπτύγματος πελάγους στη μέθοδο CEM (www.navionics.com)

Στον Πίνακα 6 συνοψίζονται τα αναπτύγματα πελάγους για κάθε διεύθυνση ανέμου.

Πίνακας 6. Ανάπτυγμα Πελάγους με τη μέθοδο CEM

Διεύθυνση ανέμου	Fetch CEM (km)
B	1,11
BA	1,04
A	1,08
NA	51,53
N	2,08
NΔ	795,06
Δ	732,52
ΒΔ	45,84

Η ελάχιστη διάρκεια πνοής του ανέμου ώστε οι συνθήκες να θεωρηθούν ορισμένες από το ανάπτυγμα πελάγους (fetch limited conditions) είναι :

$$t_{\min} = 77.23 \frac{X^{0.67}}{U^{0.34} g^{0.33}} \quad (4.1)$$

Όπου, U (m/s) είναι η ταχύτητα του ανέμου 10 μέτρα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Υπό αυτές τις συνθήκες, η εξίσωση που περιγράφει το ύψος του κύματος είναι :

$$\frac{gH_s}{u_*^2} = 4.13 \times 10^{-2} \left(\frac{gX}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Όπου, u_* (m/s) είναι η ταχύτητα τριβής και υπολογίζεται ως:

$$u_* = U(C_D)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

Όπου C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035U) \quad (4.4)$$

Στην περίπτωση όπου οι συνθήκες είναι ορισμένες από την διάρκεια πνοής του ανέμου (duration limited conditions), το ισοδύναμο ανάπτυγμα πελάγους υπολογίζεται ως :

$$\frac{gX}{u_*^2} = 5.23 \times 10^{-3} \left(\frac{gt}{u_*} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.5)$$

Σε αυτή την εξίσωση t είναι η διάρκεια πνοής του ανέμου (s). Το ανάπτυγμα πελάγους X όπως υπολογίστηκε από την εξίσωση (4.5) θα πρέπει να αντικατασταθεί στην εξίσωση (4.2) ώστε να προκύψει το ύψος κύματος.

Σε κάθε περίπτωση η περίοδος του κύματος υπολογίζεται ως εξής :

$$\frac{gT}{u_*} = 0.71345 \left(\frac{gX}{u_*^2} \right)^{0.33} \quad (4.6)$$

Το μήκος κύματος L υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (4.7)$$

Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες με τα χαρακτηριστικά των κυματισμών για τους επικρατέστερους ανέμους της περιοχής με τη μέθοδο CEM.

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά των κυματισμών για τους επικρατέστερους ανέμους με τη μέθοδο CEM.

ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,03	0,88	1,22
2	0,25	2,39	8,94
3	0,47	2,95	13,57
4	0,73	3,44	18,45
5	1,06	3,89	23,67
6	1,44	4,32	29,21
7	0,61	2,25	7,91
8	0	0	0
9	0	0	0

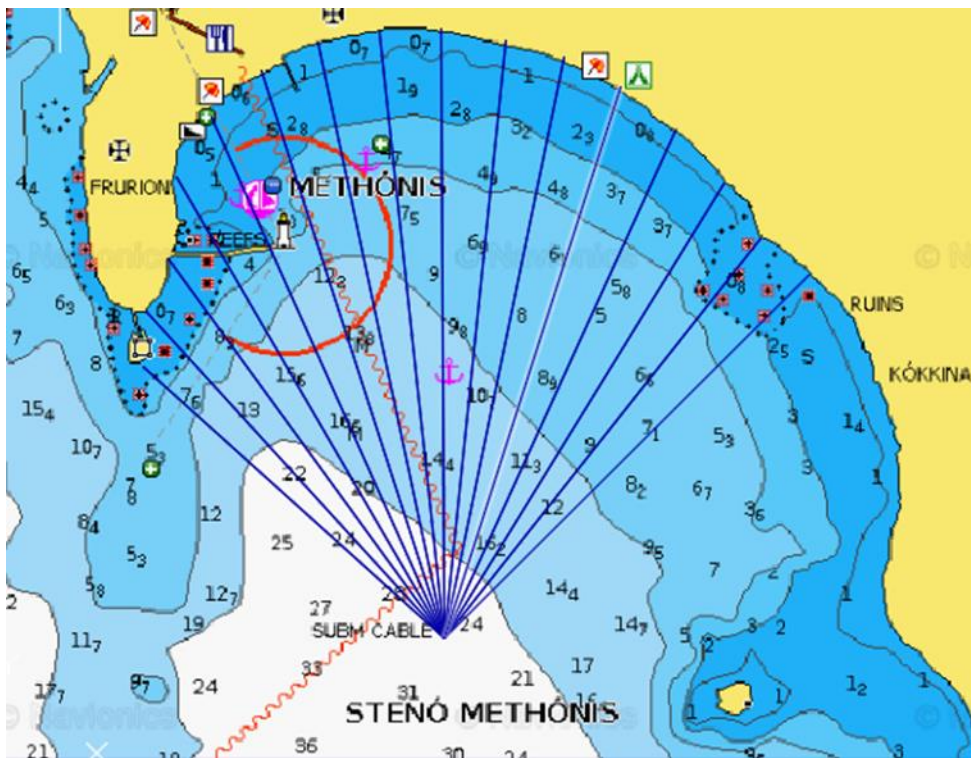
ΝΟΤΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,02	0,59	0,54
2	0,05	0,83	1,07
3	0,09	1,02	1,63
4	0,15	1,19	2,22
5	0,21	1,35	2,85
6	0,29	1,5	3,51
7	0,38	1,64	4,21
8	0,48	1,78	4,94
9	0	0	0

ΝΟΤΙΟΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,06	1,25	2,43
2	0,99	5,9	54,41
3	1,83	7,27	82,57
4	2,88	8,48	112,25
5	2,86	7,51	88,1
6	2,76	6,64	68,8
7	1,72	4,46	31,05
8	1,29	3,43	18,36
9	0,44	1,58	3,91

ΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,17	2,53	9,98
2	0,95	5,74	51,54
3	1,76	7,08	78,23
4	2,76	8,25	106,35
5	3,99	9,35	136,48
6	5,43	10,38	168,41
7	7,09	11,37	201,87
8	4,42	7,71	92,94
9	1,1	2,88	12,97

4.1.2. Μέθοδος SMB

Για να καθορίσουμε το ανάπνγμα πελάγους στη μέθοδο SMB χρειάζεται να χαραχθούν 15 ακτίνες με εύρος ± 45 μοιρών γύρω από τη διεύθυνση του εκάστοτε ανέμου. Η διαδικασία για τον βόρειο άνεμο απεικονίζεται στο Σχήμα 19.



Σχήμα 19. Ακτίνες για τον υπολογισμό του αναπύγματος πελάγους στη μέθοδο SMB (www.navionics.com)

Σε αυτή την περίπτωση το ανάπτυγμα πελάγους υπολογίζεται ως εξής :

$$X = \frac{\sum_{k=1}^{15} X_k \cos \theta_k}{\sum_{k=1}^{15} \cos \theta_k} \quad (4.8)$$

Στον Πίνακα 8 συνοψίζονται τα αναπτύγματα πελάγους για κάθε διεύθυνση ανέμου.

Πίνακας 8. Ανάπτυγμα Πελάγους

Διεύθυνση ανέμου	Fetch SMB (km)
B	1,00
BA	1,04
A	23,33
NA	27,78
N	126,69
NΔ	545,15
Δ	707,60
BΔ	187,50

Στην μέθοδο SMB για να θεωρήσουμε ότι μια κατάσταση είναι ορισμένη από το ανάπτυγμα πελάγους (fetch limited condition) πρέπει η διάρκεια πνοής του ανέμου να είναι μεγαλύτερη από μια τιμή t_{min} .

Όπου:

$$\frac{gt_{min}}{U} = 6.5882 \exp \left\{ \left[0.0161 \left(\ln \left(\frac{gX}{U^2} \right) \right)^2 - 0.03692 \left(\ln \left(\frac{gX}{U^2} \right) \right) + 2.2024 \right]^{0.5} + 0.8798 \left(\ln \left(\frac{gX}{U^2} \right) \right) \right\} \quad (4.9)$$

Το ύψος κύματος υπολογίζεται από την εξίσωση :

$$\frac{gH_s}{U^2} = 0.083 \tanh \left[0.0125 \left(\frac{gX}{U^2} \right)^{0.42} \right] \quad (4.10)$$

Αν η διάρκεια πνοής του ανέμου είναι μικρότερη από την τιμή t_{\min} , οι συνθήκες θεωρούνται καθορισμένες από την διάρκεια πνοής (duration limited conditions). Σε αυτή την περίπτωση για να υπολογισθεί το ισοδύναμο ανάπτυγμα πελάγους θα πρέπει να εισάγουμε την διάρκεια πνοής του ανέμου στην εξίσωση (4.9). Έπειτα το ισοδύναμο ανάπτυγμα πελάγους εισάγεται στην εξίσωση (4.10), ώστε να υπολογισθεί το ύψος κύματος.

Η περίοδος του κύματος υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\frac{gt}{U} = 7.54 \tanh(0.077 \Phi^{0.25}) \quad (4.11)$$

$$\text{Όπου: } \Phi = \frac{gX}{U^2} \quad (4.12)$$

Το μήκος κύματος υπολογίζεται όπως και στη μέθοδο CEM :

$$L = \frac{gT}{2\pi} \quad (4.13)$$

Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες με τα χαρακτηριστικά των κυματισμών για τους επικρατέστερους ανέμους της περιοχής με τη μέθοδο SMB.

Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά των κυματισμών για τους επικρατέστερους ανέμους με τη μέθοδο SMB.

ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,02	0,60	0,57
2	0,14	1,52	3,62
3	0,33	2,32	8,39
4	0,58	3,04	14,48
5	0,89	3,73	21,75
6	1,24	4,38	29,98
7	1,22	4,27	28,43
8	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00

NOTIA ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,02	0,64	0,65
2	0,17	1,75	4,77
3	0,48	2,85	12,65
4	0,94	3,91	23,85
5	1,51	4,93	37,99
6	2,10	5,79	52,38
7	1,28	4,37	29,90
8	1,01	3,72	21,66
9	0,00	0,00	0,00

ΝΟΤΙΟΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,02	0,64	0,64
2	0,17	1,84	5,29
3	0,55	3,19	15,89
4	1,21	4,59	32,94
5	2,08	5,87	53,78
6	2,80	6,72	70,50
7	2,51	6,29	61,75
8	2,27	5,88	54,03
9	1,12	3,85	23,18

ΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ			
Beaufort	Hs (m)	T (s)	L (m)
1	0,02	0,68	0,72
2	0,17	1,86	5,40
3	0,55	3,23	16,29
4	1,24	4,69	34,30
5	2,25	6,18	59,64
6	3,55	7,66	91,59
7	5,08	9,09	129,15
8	5,13	9,04	127,72
9	2,17	5,62	49,41

4.2. Ισοδύναμος Κυματισμός

Η προσομοίωση των κυματισμών για την παράκτια περιοχή της Μεθώνης πραγματοποιήθηκε με αναγωγή σε χρονική διάρκεια 24 ωρών χρησιμοποιώντας το μέσο ετήσιο ισοδύναμο κυματισμό ανά διεύθυνση πνοής ανέμου για τις κρίσιμες διευθύνσεις. Ο ισοδύναμος αυτός κυματισμός αντιπροσωπεύει την κυματική κατάσταση σε ετήσια βάση. Η μεθοδολογία υπολογισμού των χαρακτηριστικών του γίνεται ως εξής: Αρχικά υπολογίζεται η αντιπροσωπευτική περίοδος T_e του ισοδύναμου κυματισμού για κάθε διεύθυνση πνοής μέσω της εξίσωσης:

$$T_e = \frac{\sum T_i f_i}{\sum f_i} \quad (4.14)$$

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

$$H^2 T = \frac{\sum H_i^2 T_i f_i}{\sum f_i} \quad (4.15)$$

όπου H_i , T_i , f_i τα ύψη, οι περίοδοι και οι συχνότητες εμφάνισης των κυμάτων που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα έντασης του ανέμου από την σχετική διεύθυνση. Ο ισοδύναμος κυματισμός είναι ο κυματισμός που εμφανίζεται με συχνότητα $f = \sum f_i$ και έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με το σύνολο των κυματισμών των διαφόρων εντάσεων του σχετικού τομέα.

Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκαν το σημαντικό ύψος κύματος H_e , η περίοδος T_e και η συχνότητα εμφάνισης f των ισοδύναμων κυματισμών ανοιχτού πελάγους για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 4 Beaufort. Στους παρακάτω πίνακες συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τις μεθόδους CEM και SMB.

Πίνακας 10. Ισοδύναμο κυματικό κλίμα με τη μέθοδο CEM.

ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Beaufort	Συχνότητα				
	εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	0,70	0,73	3,44		
5	0,23	1,06	3,89	0,92	3,60
6	0,09	1,44	4,32		
7	0,02	0,61	2,25		
Σύνολο	1,04				

ΝΟΤΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Beaufort	Συχνότητα				
	εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	0,64	0,15	1,19		
5	0,22	0,21	1,35		
6	0,10	0,29	1,50	0,20	1,27
7	0,02	0,38	1,64		
8	0,01	0,48	1,78		
Σύνολο	0,99				

ΝΟΤΙΟΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Beaufort	Συχνότητα				
	εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	0,70	2,88	8,48		
5	0,36	2,86	7,51		
6	0,21	2,76	6,64	2,82	7,59
7	0,07	1,72	4,46		
8	0,03	1,29	3,43		
9	0,01	0,44	1,58		
Σύνολο	1,38				

ΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ

Beaufort	Συχνότητα				
	εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	9,90	2,76	8,25		
5	4,04	3,99	9,35		
6	1,76	5,43	10,38	3,78	8,83
7	0,48	7,09	11,37		
8	0,17	4,42	7,71		
9	0,02	1,10	2,88		
Σύνολο	16,37				

Πίνακας 11. Ισοδύναμο κυματικό κλίμα με τη μέθοδο SMB.

ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ					
Beaufort	Συχνότητα εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	0,70	0,73	3,44		
5	0,23	1,06	3,89	0,78	3,34
6	0,09	1,44	4,32		
7	0,02	0,61	2,25		
Σύνολο	1,04				

ΝΟΤΙΑ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ					
Beaufort	Συχνότητα εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	0,64	0,94	3,91		
5	0,22	1,51	4,93		
6	0,10	2,10	5,79	1,32	4,34
7	0,02	1,28	4,37		
8	0,01	1,01	3,72		
Σύνολο	0,99				

ΝΟΤΙΟΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ					
Beaufort	Συχνότητα εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	0,70	1,21	4,59		
5	0,36	2,08	5,87		
6	0,21	2,80	6,72	1,97	5,36
7	0,07	2,51	6,29		
8	0,03	2,27	5,88		
9	0,01	1,12	3,85		
Σύνολο	1,38				

ΔΥΤΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΑΝΕΜΟΥ					
Beaufort	Συχνότητα εμφάνισης f (%)	Hs(m)	Tp(s)	He(m)	Te(s)
4	9,90	1,24	4,69		
5	4,04	2,25	6,18		
6	1,76	3,55	7,66	2,39	5,55
7	0,48	5,08	9,09		
8	0,17	5,13	9,04		
9	0,02	2,17	5,62		
Σύνολο	16,37				

4.3. Αριθμητική Προσομοίωση με το Πρόγραμμα MIKE 21 DHI

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MIKE 21 DHI (Danish Hydraulic Institute) με το οποίο έγινε προσομοίωση του κυματικού και υδροδυναμικού πεδίου καθώς και της παράκτιας στερεομεταφοράς, τα οποία αναπτύσσεται στην ακτή της Μεθώνης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν το μοντέλο MIKE 21 Spectral Waves FM για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών και των τάσεων ακτινοβολίας στην περιοχή μελέτης, το υδροδυναμικό μοντέλο Flow Model FM Hydrodynamic για τον υπολογισμό του κυματογενούς ρεύματος, καθώς και το μοντέλο στερεομεταφοράς Flow Model FM Sand Transport για την εκτίμηση του φορτίου στερεομεταφοράς και της διάβρωσης του πυθμένα. Τα συγκεκριμένα μοντέλα με την κατάληξη FM (flexible mesh) επιλέχθηκαν αντί των MIKE 21 PMS και MIKE 21 HD διότι επιτρέπουν την εισαγωγή της βαθυμετρίας σε τριγωνικό κάναβο Flexible Mesh. Η προσομοίωση των κυματικών και υδροδυναμικών συνθηκών πραγματοποιήθηκε για τις αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου ισοδύναμου κυματικού κλίματος.

4.3.1. Πρόγραμμα MIKE 21 - Spectral Waves

4.3.1.1. Γενικά στοιχεία

Το MIKE 21 Spectral Waves (SW) είναι ένα τρίτης γενιάς φασματικό μοντέλο κυμάτων και ανέμων, το οποίο προσομοιώνει την ανάπτυξη, την απόσβεση και τον μετασχηματισμό των ανεμογενών κυμάτων και των Swell στη ζώνη των βαθέων νερών και τις παράκτιες περιοχές .

Το μοντέλο περιλαμβάνει δυο διαφορετικά είδη σύνθεσης:

- Πλήρως φασματική ανάπτυξη
- Κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων

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

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

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

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

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

4.3.1.2. Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

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

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

Όπου: g η επιτάχυνση της βαρύτητας

d το βάθος του νερού

\bar{U} το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος

\bar{k} το διάνυσμα του κύματος με μέτρο k και διεύθυνση θ

Η πυκνότητα δράσης $N(\sigma, \theta)$ σχετίζεται με την πυκνότητα της ενέργειας $E(\sigma, \theta)$ μέσω της σχέσης:

$$N = \frac{E}{\sigma}$$

Πλήρως Φασματική Ανάπτυξη

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

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

Όπου: $N = (x, y, \sigma, \theta, t)$ η πυκνότητα δράσης

t ο χρόνος

$\bar{x} = (x, y)$ οι καρτεσιανές συντεταγμένες

$\bar{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ η ταχύτητα διάδοσης ομάδας κυμάτων σε τεσσάρων

διαστάσεων χώρο

S η πηγή για την εξίσωση ισορροπίας της κυματικής ενέργειας

∇ ο τεσσάρων διαστάσεων διαφορικός τελεστής στο χώρο \bar{x}, σ, θ

Οι συνιστώσες των ταχυτήτων διάδοσης δίνονται από τις γραμμικές κινηματικές σχέσεις:

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

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d\sigma}{dd} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \bar{U} \cdot \nabla \bar{x} \right) - c_g \bar{k} \cdot \frac{d\bar{U}}{ds}$$

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

Όπου: s η χωρική συντεταγμένη της διεύθυνσης θ του κυματισμού

m η συντεταγμένη κάθετη στο s

$\nabla \bar{x}$ είναι ο δισδιάστατος διαφορικός τελεστής στο χώρο \bar{x}

Εξίσωση πηγής

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

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$

Όπου: S_{in} αναπαριστά της στιγμιαία μετάδοση της ενέργειας του ανέμου για τη γένεση των κυμάτων

S_{nl} η μεταφορά ενέργειας λόγω της μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των κυμάτων

S_{sd} η διασπορά της κυματικής ενέργειας λόγω της θραύσης της κορυφής των κυμάτων στα βαθιά

S_{bot} η διασπορά λόγω της τριβής στον πυθμένα

S_{surf} η διασπορά της κυματικής ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών

Κατευθυντική ανάλυση μεμονωμένων παραμέτρων

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

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

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

Όπου: $m_0(x,y,\theta)$ η μηδενική στιγμή του φάσματος δράσης

$m_1(x,y,\theta)$ η αρχική στιγμή του φάσματος δράσης

$N(x,y,\sigma,\theta)$, $T_0(x,y,\theta)$ και $T_1(x,y,\theta)$ οι συναρτήσεις πηγής στο φάσμα δράσης

Τα στιγμιότυπα $m_n(x,y,\theta)$ ορίζονται με τη σχέση:

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

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

4.3.1.3. Βασικές παράμετροι εισόδου

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

Πεδίο Μελέτης και χρονικές παράμετροι

- Κάναβος περιοχής μελέτης
- Τύπος συντεταγμένων (καρτεσιανές ή σφαιρικές)
- Χρόνος προσομοίωσης και χρονικό βήμα

Εξισώσεις, διακριτοποίηση και μέθοδος επίλυσης

- Μέθοδος σύνθεσης
- Συχνότητα και κατευθυντική διακριτοποίηση
- Αριθμός ομάδων χρονικών βημάτων

Κινητήριες Παράμετροι

- Δεδομένα στάθμης θαλάσσιας επιφάνειας
- Δεδομένα ρευμάτων
- Δεδομένα ανέμων
- Δεδομένα κάλυψης πάγου

Παράμετροι Συναρτήσεων Πηγής

- Μη γραμμική μετάδοση ενέργειας
- Θραύση κυματισμών (ρηγά νερά)
- Τριβή πυθμένα

Αρχικές συνθήκες

Οριακές συνθήκες

- Κλειστά όρια
- Ανοιχτά όρια (περιγραφή συνθηκών και δεδομένα κυματικών χαρακτηριστικών στο ανοιχτό όριο)

4.3.1.4. Εφαρμογή Μοντέλου

Η εισαγωγή των διαφόρων παραμέτρων στο μοντέλο γίνεται σε τρεις βασικές καρτέλες.

1. Τομέας μελέτης (Domain)

Στο πρώτο βήμα εισάγεται η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης σε αρχείο mesh με γεωαναφορά το οποίο κατασκευάστηκε μέσω του εργαλείου MIKE Zero Mesh Generator. Στο αρχείο αυτό αναπαρίσταται η βαθυμετρία σε τριγωνικό κάναβο με

μεγαλύτερη πύκνωση κοντά στην ακτογραμμή καθώς επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπλέον, στο στάδιο αυτό μπορούν να οριστούν κάποια στοιχεία του mesh όπως ο επανυπολογισμός των στοιχείων και των κόμβων του κανάβου, η αλλαγή σημείου γεωαναφοράς και το ελάχιστο βάθος στο οποίο περιορίζεται ο καναβός μας. Στην προσομοίωση μας λήφθηκε υπόψιν ο επανυπολογισμός και χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του προγράμματος για τα υπόλοιπα καθώς εισήχθησαν τα απαραίτητα στοιχεία για την περιοχή μελέτης κατά την δημιουργία του mesh.

2. Χρόνος (Time)

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

3. Ενότητα φασματικού κύματος (Spectral wave module)

Το τρίτο βήμα αποτελείται από 16 ενότητες όπου εισάγονται οι βασικές παράμετροι, καθώς και η μέθοδος ανάλυσης της προσομοίωσης που εξεξηγήθηκαν προηγουμένως. Στη παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε ο τύπος της κατευθυντικής ανάλυσης μεμονωμένων παραμέτρων και επειδή το κυματικό κλίμα θεωρήθηκε ως αλληλουχία κυματικών γεγονότων επιλέχθηκε ο τύπος των σχεδόν στατικών κυματισμών (quasi-stationary formulation). Για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα εισήχθει ο αριθμός των διαφορετικών γωνιών πρόσπτωσης των κυματισμών. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε έγινε με την επιλογή low order, fast algorithm όπου ελέγξαμε τον αριθμό των επαναλήψεων και του συντελεστή relaxation factor σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια του οδηγού του μοντέλου. Αναφορικά με τις ενότητες για τη στάθμη της θαλάσσιας επιφάνειας και των ρευμάτων δόθηκε η εντολή να ληφθούν από το υδροδυναμικό μοντέλο ενώ για τους ανέμους εισήχθη η επαλληλία των ανεμολογικών χαρακτηριστικών που προσομοιάζουν τα ετήσια χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Για την κάλυψη πάγου δεν προστέθηκαν αρχεία. Σε ό,τι αφορά τις κατασκευές στη περιοχή μελέτης προστέθηκαν κάθε φορά τα χαρακτηριστικά της εκάστοτε λύσεις που προτάθηκε. Για τις ενότητες της περίθλασης, της μετάδοσης της ενέργειας, της θραύσης των κυματισμών, της τριβής στον πυθμένα και της θραύσης της κορυφής των κυμάτων στα βαθιά χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του προγράμματος.

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

4.3.2. Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Hydrodynamic Module

4.3.2.1. Γενικά στοιχεία του μοντέλου

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

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

Στους υπολογισμούς αυτού του μοντέλου λαμβάνονται υπόψη:

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

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

4.3.2.2. Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

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

Η εξίσωση συνέχειας περιγράφεται ως εξής:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

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

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^n \frac{\partial \rho}{\partial x} dz - \frac{1}{\rho_0 h} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(V_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

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

Όπου :

t: ο χρόνος (σε s)

x,y,z: οι καρτεσιανές συντεταγμένες

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

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

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

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

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

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

ρ_w : η πυκνότητα του νερού (σε kg/m^3)

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

ν_T : κινηματικό ιξώδες (m^2/s)

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

ρ_0 : η πυκνότητα του νερού

S : το μέγεθος φόρτισης λόγω των σημειακών πηγών

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

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

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

Όπου A είναι η οριζόντια τυρβώδης συνεκτικότητα.

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

Στη στάθμη $z=\eta$:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} - w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{sx}, \tau_{sy})$$

Στη στάθμη $z=-d$:

$$u \frac{\partial d}{\partial x} + v \frac{\partial d}{\partial y} + w = 0, \quad \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{1}{\rho_0 \nu_t} (\tau_{bx}, \tau_{by})$$

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

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

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

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

Όπου :

D_v ο συντελεστής κάθετης τυρβώδους διάχυσης

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

T_s και s_s : η θερμοκρασία και η αλατότητα της πηγής

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

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

Όπου D_h είναι ο συντελεστής οριζόντιας διάχυσης.

4.3.2.3. Βασικές παράμετροι εισόδου

Για την καλύτερη δυνατή προσέγγιση των πραγματικών συνθηκών και για την ορθότητα των αποτελεσμάτων πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις παραμέτρους του στις εξής ομάδες:

Πεδίο μελέτης και χρονικές παράμετροι

- Υπολογιστικό πλέγμα και βαθυμετρία
- Διάρκεια προσομοίωσης και χρονικό βήμα

Συντελεστές βαθμονόμησης

- Αντίσταση πυθμένα
- Συντελεστής διασποράς ορμής

- Συντελεστής τριβής ανέμου

Αρχικές Συνθήκες

- Επίπεδο θαλάσσιας στάθμης
- Συνιστώσες ταχύτητας

Οριακές Συνθήκες

- Κλειστές/Ανοιχτές
- Στάθμη ύδατος

Άλλες κινητήριες δυνάμεις

- Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου
- Παλίρροια
- Πηγές
- Τάσεις ακτινοβολίας κυμάτων

4.3.2.4. *Εφαρμογή Μοντέλου*

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

1. Πεδίο Μελέτης (Domain)

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

2. Χρόνος (Time)

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

3. Επιλογή Μοντέλου (Module Selection)

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

4. Υδροδυναμικό μοντέλο

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

Στη πρώτη υποενότητα που αναφέρεται στη μέθοδο επίλυσης επιλέγουμε low order ως προς τον χρόνο και το χώρο. Η ολοκλήρωση του χρόνου για τις εξισώσεις στα ρηγά νερά επιτυγχάνεται μέσω ενός ρητού συστήματος.

Ωστόσο λόγω των περιορισμών σταθερότητας ο αδιάστατος παράγοντας CFL

πρέπει να είναι κάτω από 1. Ο αριθμός Courant-Friedrich-Levy (CFL) για τις εξισώσεις στα ρηγά νερά με καρτεσιανές συντεταγμένες ορίζεται ως:

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

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

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

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

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

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

4.3.3. Πρόγραμμα MIKE 21 Flow Model FM – Sand Transport Module

4.3.3.1. Γενικά στοιχεία του μοντέλου

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

ρυθμού μεταβολής της στάθμης του πυθμένα, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα.

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

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

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

4.3.3.2. Θεωρητικές εξισώσεις μοντέλου

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

Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Hansen

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

$$S_{bl} = k_b \cdot S_{tl}$$

$$S_{sl} = k_s \cdot S_{tl}$$

Όπου το ολικό φορτίο στερεομεταφοράς προκύπτει από τη σχέση:

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

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

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

Θεωρία ολικού φορτίου μεταφοράς των Engelund & Fredsøe

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

$$q_b = 5p (\sqrt{\theta'} - 0,07\sqrt{\theta_c}) \sqrt{(s-1)gD}$$

Όπου: p η πιθανότητα όλοι οι κόκκοι σε κάποιο στρώμα να βρίσκονται σε κίνηση

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

θ_c η κρίσιμη διατμητική τάση πυθμένα για την έναρξη της κίνησης

Η αδιάστατη διατμητική τάση στον πυθμένα σε σχέση με την τριβή της διεπιφάνειας ρευστού-στερεού (skin friction) θ' και η πιθανότητα p δίνονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\theta' = \frac{U'_f{}^2}{(s-1)gD}$$

$$p = \left[1 + \left(\frac{\pi\beta f}{6(\theta' - \theta_c)} \right)^4 \right]^{-0.25}$$

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

$$q_s = 11,6 U_f'^2 c_{ba} [I_1 \ln(\frac{30d}{k_N}) + I_2]$$

Όπου: c_b η συγκέντρωση στον πυθμένα του αιωρούμενου ιζήματος

$a=2d$ το επίπεδο αναφοράς για το c_b

I_1 και I_2 τα ολοκληρώματα του Einstein

d το βάθος του νερού

$k_N=2,5D$ η ισοδύναμη τραχύτητα του Nikuradse

Τα ολοκληρώματα I_1 και I_2 αποτελούν μια συνάρτηση του αδιάστατου επιπέδου αναφοράς $A=r/d$ και του αριθμού Rouse $z^*=W_f/kU_{f,wr}$, με W_f να απεικονίζει την ταχύτητα καθίζησης του αιρούμενου ιζήματος, $\kappa=0,4$ η σταθερά του Von Karman και $U_{f,wr}$ η διατμητική ταχύτητα υπό τη συνδυασμένη δράση ρεύματος και κύματος και έχουν όρια το διάστημα (a,d) , όπου το y μετράται πάνω από το σταθερό επίπεδο του πυθμένα. Στο επίπεδο αναφοράς $a=2d$ η συγκέντρωση c_b υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

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

Όπου λ παράμετρος που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \frac{\pi r \beta}{6}}{0,027 s \theta'}} , \text{ για } \theta' > \theta_c + \pi r \beta / 6$$

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

Θεώρημα ολικού φορτίου μεταφοράς του Van-Rijn

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

$$S_{bl} = 0.053 \frac{T^{2,1}}{D_*^{0,3}} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3}$$

Όπου T είναι η αδιάστατη παράμετρος του βαθμού στερεομεταφοράς που υπολογίζεται από τον τύπο:

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

Όπου: $U_{f'}$ η διατμητική ταχύτητα πυθμένα που σχετίζεται με την κοκκομετρία του υλικού του

$U_{f,c}$ η κρίσιμη διατμητική ταχύτητα πυθμένα

Ο όρος D^* στην εξίσωση του φορτίου πυθμένα του Van-Rijn ορίζεται ως:

$$D^* = d_{50} \left(\frac{(s-1)g}{v^2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Όπου v είναι η κινηματική συνεκτικότητα.

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

$$a = \max(0,01 h ; 2d_{50})$$

Η ογκομετρική συγκέντρωση πυθμένα υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c_a = 0.015 \cdot \frac{d_{50} T^{1,5}}{\alpha D_*^{0,3}}$$

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

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

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

$$\varphi = \frac{5}{2} \left(\frac{w_s}{u_f}\right)^{0,8} \left(\frac{c_a}{c_0}\right)^{0,4}$$

Το c_0 είναι η μέγιστη συγκέντρωση ιζήματος, η οποία είναι ίση με 0,65.

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

$$Z = w_s / \beta \kappa_{u_f} + \varphi$$

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

$$S_{sl} = f \cdot c_a \cdot V \cdot h$$

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

$$f = \frac{\left(\frac{a}{h}\right)^Z - \left(\frac{a}{h}\right)^{1,2}}{\left(1 - \frac{a}{h}\right)^Z (1,2 - Z)}$$

Θεωρία μεταφοράς φορτίου πυθμένα των Meyer-Peter & Müller

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

$$\Phi_b = 8(\theta' - \theta_c)^{1,5}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Όπου : n το πορώδες του πυθμένα

z η στάθμη του πυθμένα

t ο χρόνος

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

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

ΔS το φορτίο πηγής ιζήματος

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

$$z_{\text{new}} = z_{\text{old}} + \frac{1}{1-n} \frac{\partial z}{\partial t} \Delta t_{\text{HD}}$$

4.3.3.3. Βασικές παράμετροι εισόδου

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

Πεδίο μελέτης

- Βαθμετρικά δεδομένα (flexible mesh)
- Έκταση περιοχής μελέτης

Υδροδυναμικά δεδομένα

- Βάθος νερού και πεδία ροής (που παρέχονται από το HD)

Κυματικά Δεδομένα (εφόσον απαιτούνται)

- Ύψος κύματος, περίοδος και διεύθυνση (που παρέχονται από το SW)

Ιδιότητες Ιζήματος

- Μέγεθος και διαβάθμιση του υλικού του πυθμένα

Παράμετροι μορφολογίας

- Συχνότητα συγχρονισμού

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

- Της γωνίας διάδοσης των κυματισμών σε σχέση με την διεύθυνση ροής
- Η απώλεια ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών
- Οι ιδιότητες του ιζήματος
- Η δημιουργία αμμοκυμάτων στο θαλάσσιο πυθμένα
- Η κλίση του πυθμένα
- Τα υπόγεια ρεύματα
- Η κυματική ασυμμετρία
- Τα ρεύματα

4.3.3.4. Εφαρμογή Μοντέλου

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

Ορισμός του μοντέλου (Model Definition)

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

είναι σε κάθε βήμα υπολογισμού του μοντέλου στερεομεταφοράς μεγαλύτερα από τα δεδομένα της μελέτης.

Χρονικές Παράμετροι (Time parameters)

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

Ιδιότητες ιζήματος (Sediment Properties)

Στο σημείο αυτό εισάγονται τα δεδομένα για το ίζημα της περιοχής μελέτης, όπως το πορώδες με την τιμή 0,4, η διάμετρος ιζήματος που είναι 0,2mm και ο συντελεστής διαβάθμισης ο οποίος είναι ίσος με 1,1.

Δράσεις (Forcings)

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

Μορφολογία (Morphology)

Στον ορισμό του μοντέλου επιλέγεται ως μέγιστη μεταβολή πυθμένα τα 2m/day και ως παράγοντας επιτάχυνσης το 1. Καθοριστικό σημείο είναι η επιλογή της ανάδρασης μεταξύ του υδροδυναμικού, του κυματικού καθώς και του μοντέλου στερεομεταφοράς. Ως χρόνος έναρξης επιλέγεται και πάλι το μηδέν για την μελέτη της μορφολογικής εξέλιξης. Επειδή η ακτή του Ρεθύμνου χαρακτηρίζεται ως ήπιας κλίσης δεν επιλέχθηκε το στοιχείο της κατακρήμνισης λόγω απότομης κλίσης. Επιπρόσθετα, στις οριακές συνθήκες της περιοχής μελέτης ορίστηκε ως επιλογή η zero sediment flux gradient δηλαδή μηδενική μεταφορά ιζήματος.

Δεδομένα εξόδου (Outputs)

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

5. ΕΞΕΛΙΞΗ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΗΣ

5.1. Ιστορική εξέλιξη ακτογραμμής

Η ακτή της Μεθώνης λαμβάνεται υπόψιν ως ένα ενιαίο σύνολο όσον αφορά τις φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν σε αυτό. Ωστόσο, για λόγους διευκόλυνσης της παρουσίασης των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την ιστορική εξέλιξη της, η περιγραφή της ακτής πραγματοποιείται ύστερα από υποδιαίρεση της σε τρία διαδοχικά τμήματα. Η ΠΕΡΙΟΧΗ I εκτείνεται από το Μπούρτζι του κάστρου της Μεθώνης έως τον λιμενοβραχίονα. Η ΠΕΡΙΟΧΗ II ορίζεται μεταξύ του λιμενοβραχίονα και του προβλήτα και η ΠΕΡΙΟΧΗ III εκτείνεται από τον προβλήτα έως το ανατολικότερο σημείο της ακτής μελέτης. Η υποδιαίρεση της ακτής σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν παρουσιάζεται στο Σχήμα 20.



Σχήμα 20. Υποδιαίρεση Περιοχής μελέτης

5.1.1. ΠΕΡΙΟΧΗ I

Πρόκειται για το δυτικότερο τμήμα της περιοχής μελέτης. Το τμήμα αυτό οριοθετείται από το Μπούρτζι του κάστρου και από τον υφιστάμενο λιμενοβραχίονα. Η ύπαρξη του λιμενοβραχίονα στο συγκεκριμένο σημείο παρεμποδίζει τη ροή της στερεομεταφοράς με αποτέλεσμα τη δημιουργία σημαντικής εναπόθεσης ιζήματος.



Σχήμα 21. ΠΕΡΙΟΧΗ I (Google Earth)

Στην περιοχή αυτή ήταν κατασκευασμένο ο αρχαίος λιμένας της Μεθώνης, τα ερείπια του οποίου φαίνονται στο Σχήμα 21. Στο επόμενο κεφάλαιο θα διερευνηθεί η απομάκρυνση του υπάρχοντος λιμενοβραχίονα και η ανακατασκευή του αρχαίου λιμένα.

5.1.2. ΠΕΡΙΟΧΗ II

Η ΠΕΡΙΟΧΗ II οριοθετείται από τον λιμενοβραχίονα ενώ το βορειοανατολικό τμήμα της από τον προβλήτα. Στο θαλάσσιο χώρο προσδένουν σκάφη αναψυχής, ιστιοφόρα και ταχύπλοα. Το βόρειο τμήμα της περιοχής είναι οργανωμένο και διαθέτει υποδομές εξυπηρέτησης των λουόμενων. Σε αυτό το τμήμα παρατηρείται απόθεση ιζήματος στις παρειές του προβλήτα. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της περιοχής παρουσιάζονται στη συνέχεια (Σχήμα 22).



(α)

(β)

Σχήμα 22. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της ΠΕΡΙΟΧΗΣ II : (α) Ιούλιος 2009, (β) Απρίλιος 2017 (Google Earth)



Σχήμα 23. Εξέλιξη ακτογραμμής στην Περιοχή II : Ιούλιος 2009, Απρίλιος 2017 (Google Earth)

5.1.3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΙΙΙ

Στην ΠΕΡΙΟΧΗ ΙΙΙ (Σχήμα 24) βρίσκεται το μεγαλύτερο τμήμα της κολυμβητικής ακτής, η οποία επίσης διαθέτει υποδομές εξυπηρέτησης των λουόμενων. Από τις συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της περιοχής δεν διαφαίνεται σημαντική διαφοροποίηση στην ακτογραμμή, ωστόσο από επί τόπου έρευνα και μαρτυρίες των κατοίκων συμπεραίνουμε ότι το δυτικό άκρο της ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΙΙΙ πλήττεται από σοβαρά φαινόμενα διάβρωσης, προκαλώντας καταστροφές στις υποδομές. Η ύπαρξη του παράκτιου δρόμου στο συγκεκριμένο τμήμα δημιουργεί μια ζώνη απότομης κλίσης και πιθανότατα αποτελεί βασική αιτία διάβρωσης. Το φαινόμενο της διάβρωσης ελαττώνεται στο ανατολικό άκρο της ακτής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της περιοχής (Σχήμα 25).



Σχήμα 24 ΠΕΡΙΟΧΗ ΙΙΙ (Google Earth).



(α)

(β)

Σχήμα 25. Συγκριτικές ιστορικές αεροφωτογραφίες της ΠΕΡΙΟΧΗΣ III : (α) Ιούλιος 2009, (β) Απρίλιος 2017 (Google Earth)



Σχήμα 26. Εξέλιξη ακτογραμμής στην Περιοχή III : Ιούλιος 2009, Απρίλιος 2017 (Google Earth)

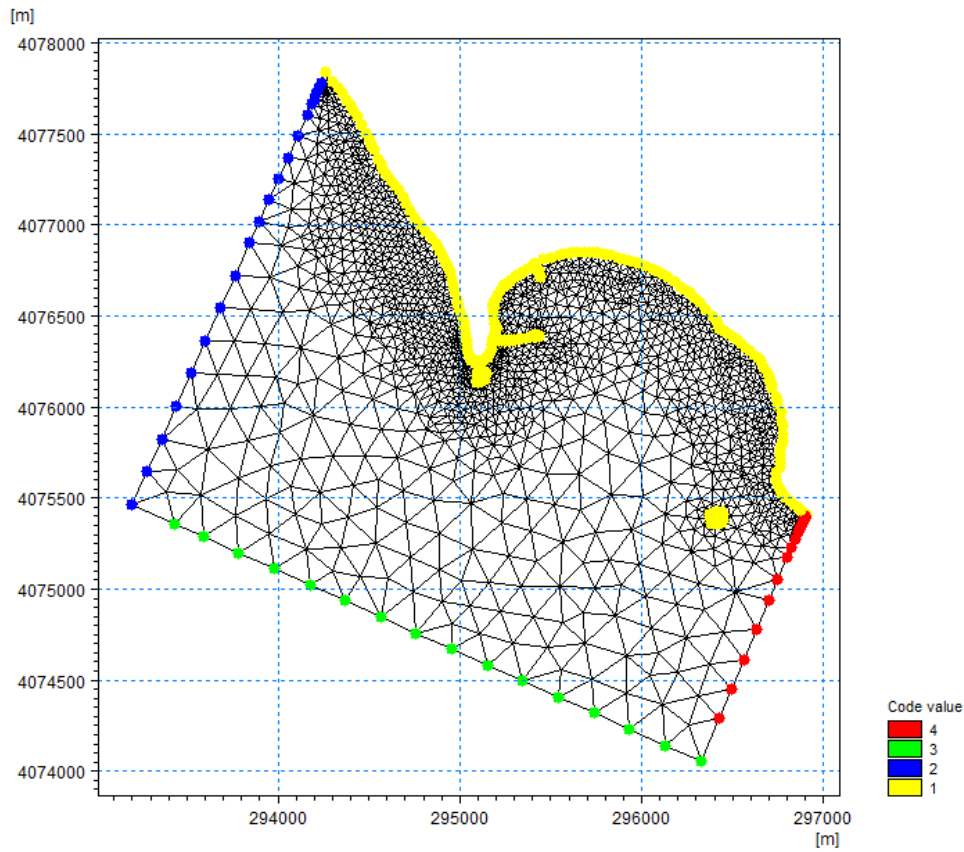
5.2. Διερεύνηση υφιστάμενης κατάστασης με χρήση μαθηματικού μοντέλου

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία με την οποία επιτεύχθηκε η προσομοίωση του κυματικού κλίματος στην περιοχή μελέτης. Αρχικά, γίνεται αναφορά στην αποτύπωση της βαθυμετρίας και στη συνέχεια αναλύονται συνοπτικά τα επί μέρους μοντέλα του υπολογιστικού πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος, γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου.

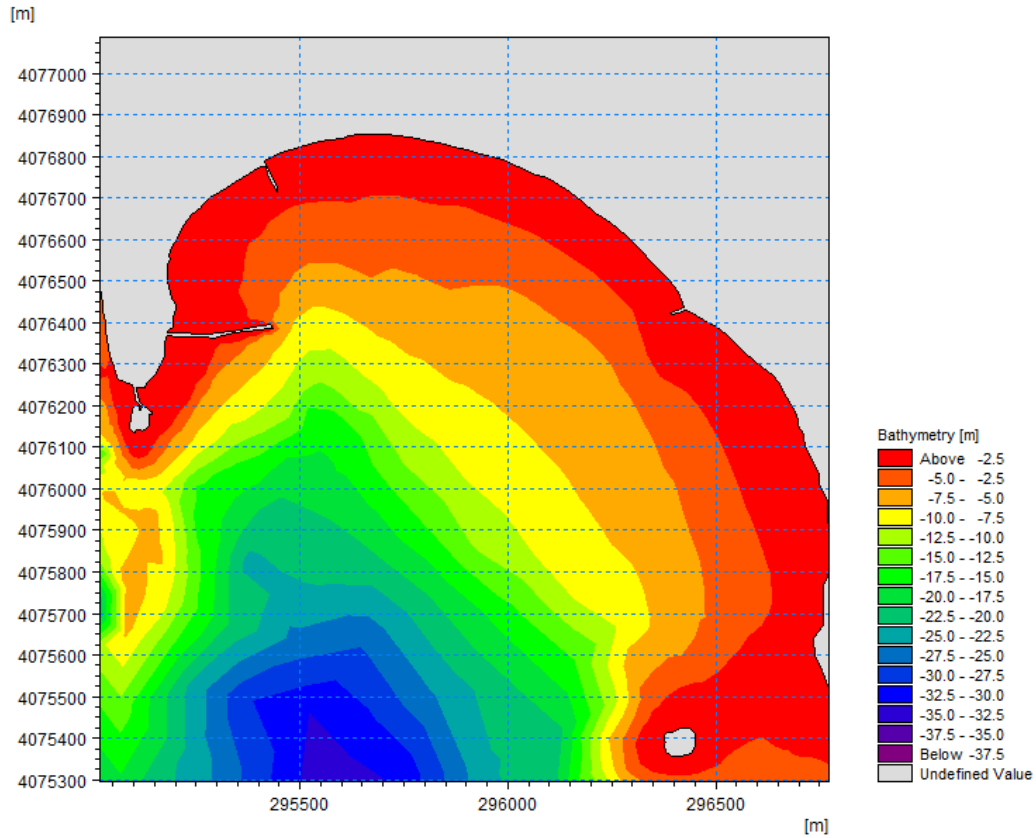
5.2.1. Βαθυμετρία

Η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης επιλέχθηκε να ενσωματωθεί στο πρόγραμμα με τη μορφή τριγωνικού κανάβου flexible mesh. Αυτός ο τύπος πλέγματος επιτρέπει την πύκνωση του ανάλογα με τις ανάγκες ακριβείας στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Επιπλέον, με τη χρησιμοποίηση του κανάβου flexible mesh υπάρχει η δυνατότητα της εισαγωγής διαφόρων λιμενικών και παράκτιων έργων στο μοντέλο χωρίς να απαιτείται κάποια αλλαγή στον πυθμένα. Στην περίπτωση αυτή η χρησιμοποίηση τετραγωνικού κανάβου με σταθερό χρονικό βήμα θα ήταν δυσχερής καθώς αυτός δεν προσαρμόζεται εύκολα στα βαθυμετρικά δεδομένα. Συνεπώς, κρίθηκε σκόπιμη η χρήση του τριγωνικού κανάβου στην παρούσα εργασία.

Πρώτο βήμα για τη δημιουργία του τριγωνικού κανάβου flexible mesh αποτελεί η ψηφιοποίηση σε Autocad των βαθυμετρικών καμπυλών και της ακτογραμμής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ο βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής από το Navionics. Στη συνέχεια εξάγεται ένα αρχείο X,Y,Z με τις συντεταγμένες των καμπυλών και αυτό εισάγεται στο εργαλείο Mesh Generator του Mike Zero. Ακολούθως σχεδιάστηκαν τα όρια της περιοχής μελέτης και έγινε ο διαχωρισμός τους σε ανοιχτά και κλειστά (Σχήμα 27). Στην περίπτωση των ανοιχτών ορίων, δηλαδή στην κατεύθυνση αυτή απ' όπου μπορεί να εισέλθει κυματισμός, εισάγεται η κωδικοποίηση 2,3,4 ενώ στο κλειστό όριο γίνεται η κωδικοποίηση 1. Ορίζοντας έτσι τα όρια της περιοχής μελέτης δημιουργήθηκε ο κানাβος που είναι ανεξάρτητος της βαθυμετρίας. Έπειτα σχεδιάστηκαν τέσσερα πολύγωνα , στο καθένα από τα οποία επιλέχθηκε διαφορετική πύκνωση. Κοντά στην ακτογραμμή η πύκνωση είναι αυξημένη για λόγους ακρίβειας ενώ πλησιάζοντας προς τα βαθειά ύδατα η πύκνωση μειώνεται για να περιοριστεί το υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα 27. Πυθμενικός κάναθος flexible mesh με την κωδικοποίηση των ορίων της περιοχής



Σχήμα 28. Βαθυμετρία περιοχής

5.2.2. Υπολογιστικό πλέγμα

Η προσομοίωση της συνολικής επίδρασης των κυματισμών στην ακτογραμμή έγινε με επαλληλία των τεσσάρων κυματικών καταστάσεων, για τις επικρατέστερες διευθύνσεις ανέμου (Νοτιοανατολική, Νότια, Νοτιοδυτική και Δυτική), όπως αυτές υπολογίστηκαν από τον ισοδύναμο κυματισμό (βλέπε Υποκεφάλαιο 4.2.). Χρησιμοποιήθηκαν τα κυματικά χαρακτηριστικά από τη μέθοδο CEM (Πίνακας 12) και έγινε αναγωγή σε 24 ώρες ανάλογα με την ετήσια συχνότητα κάθε ανέμου.

Πίνακας 12. Κυματικά χαρακτηριστικά για τους επικρατέστερους ανέμους

Διεύθυνση Κυματισμού	He (m)	Te (sec)	Συχνότητα Εμφάνισης f(%)
Νοτιοανατολικός	0,92	3,60	1,04
Νότιος	0,20	1,27	0,99
Νοτιοδυτικός	2,82	7,59	1,38
Δυτικός	3,78	8,83	16,37

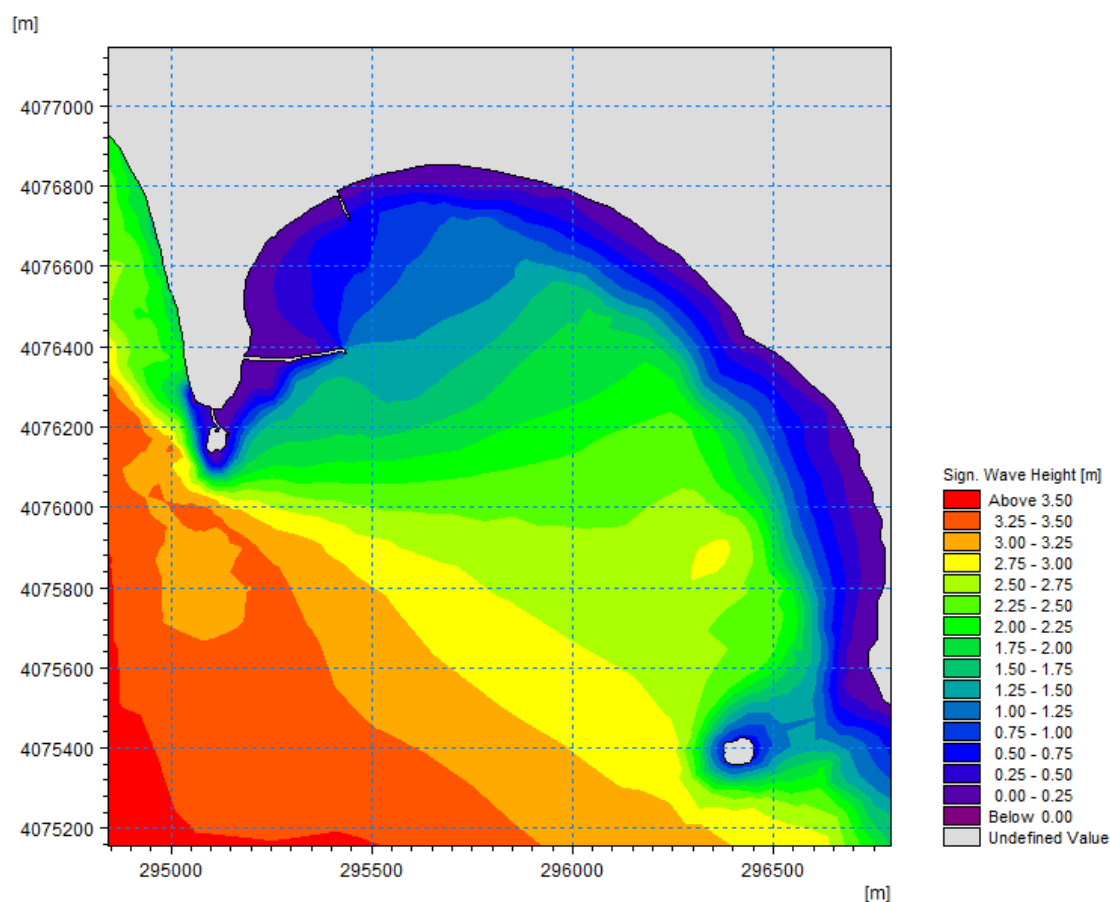
Αρχικά χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Spectral Waves FM για τον προσδιορισμό του σημαντικού ύψους κύματος H_s που αναπτύσσεται στην περιοχή μελέτης για το ισοδύναμο κυματικό κλίμα. Από το μοντέλο αυτό επίσης εξάγεται το αρχείο των τάσεων ακτινοβολίας S_{xx} , S_{xy} , S_{yy} , το οποίο εισάγεται στο υδροδυναμικό μοντέλο HD του MIKE 21 Flow Model FM για να προσδιοριστεί το διάνυσμα της ταχύτητας του κυματογενούς ρεύματος. Παράλληλα, προσδιορίστηκαν οι συνθήκες στερεομεταφοράς μέσω του μοντέλου ST του MIKE 21 Flow Model FM. Πιο συγκεκριμένα υπολογίστηκαν οι συνθήκες στερεομεταφοράς κατά τους άξονες x και y καθώς και ο ρυθμός αλλαγής του πυθμένα και οι μεταβολές του καθ' όλη τη διάρκεια των προσομοιώσεων.

Η επαλληλία των τριών μοντέλων που αναφέρθηκαν έγινε μέσω του MIKE 21/3 Coupled Model FM. Αναλυτικότερα, έγινε προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ κυμάτων (SW) και ρευμάτων (HD) και δυναμική σύζευξη μεταξύ του μοντέλου στερεομεταφοράς (ST) και Hydrodynamic και Spectral Waves μοντέλων. Η χρήση του Coupled Model FM συμβάλει στην ορθότερη αναπαράσταση της πραγματικής κατάστασης όπου τα προαναφερθέντα δυναμικά φαινόμενα χαρακτηρίζονται από συνεχή αλληλεπίδραση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται χωρικές απεικονίσεις των κυματικών και υδροδυναμικών χαρακτηριστικών καθώς και των διανυσμάτων στερεομεταφοράς για το ισοδύναμο κλίμα στο σύνολο της περιοχής μελέτης.

5.2.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο Σχήμα 29 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή του ύψους κύματος. Παρατηρείται, αρχικά, ομαλή μείωση καθώς το κύμα προσεγγίζει το μεγαλύτερο τμήμα της ακτής. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο διότι η ακτογραμμή παρουσιάζει πολύ ήπια κλίση. Η ζώνη θραύσης του κυματισμού εντοπίζεται σε απόσταση μικρότερη των 100 μέτρων από την ακτογραμμή και σε βάθος 2m περίπου. Στην περιοχή του λιμενοβραχίονα γίνεται απότομη εκτόνωση της κυματικής ενέργειας, ενώ εντός της λιμενολεκάνης παρατηρούνται συνθήκες σχετικής ηρεμίας.

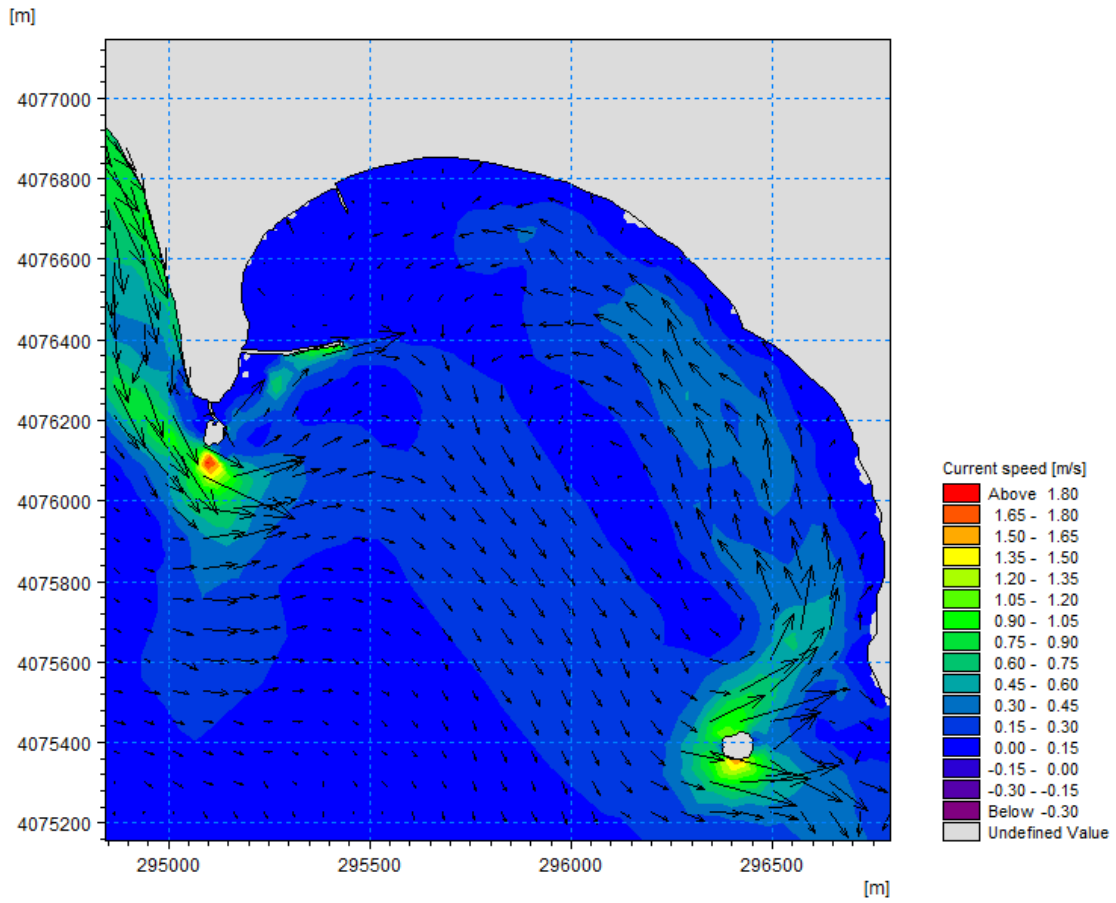
Οι τιμές που λαμβάνει το σημαντικό ύψος κύματος ποικίλουν ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα στο δυτικότερο τμήμα της ακτής μελέτης, όπου βρίσκεται ο λιμενοβραχίονας, οι τιμές του ύψους κύματος είναι της τάξης των 0,5-1,1m. Στη συνέχεια, εντός της λιμενολεκάνης το ύψος δεν ξεπέρα τα 0,4m, ενώ στην περιοχή δεξιά του προβλήτα έως και το ανατολικότερο άκρο της ακτής μελέτης οι τιμές του ύψους κύματος είναι μικρότερες από 0,25m.



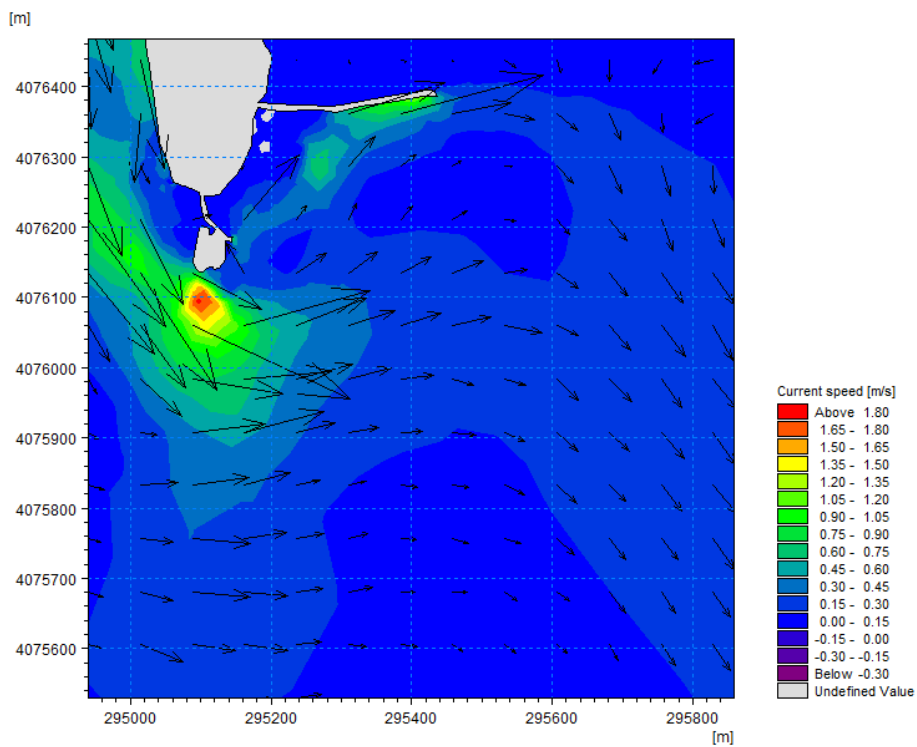
Σχήμα 29. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος - Υφιστάμενη κατάσταση

Για την προσομοίωση των συνθηκών κίνησης ιζήματος έχουν ληφθεί δύο βασικές παραδοχές: θεωρείται ότι υπάρχει απεριόριστη ποσότητα λεπτόκοκκου ιζήματος για μεταφορά και το πάχος στρώματος του ιζήματος είναι επίσης άπειρο (Repousis et al, 2015). Επομένως, η ερμηνεία του προκύπτοντος υδροδυναμικού πεδίου και της προσομοίωσης της στερεομεταφοράς είναι σκόπιμο να οριστεί κυρίως με ποιοτική αξιολόγηση.

Τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου (Σχήμα 30) συνάδουν με το κυματικό κλίμα της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται σημαντική αύξηση στην ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος κατάντη του λιμενοβραχίονα και στην ΠΕΡΙΟΧΗ Ι (Σχήμα 31). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο διότι στην συγκεκριμένη περιοχή γίνεται απότομη εκτόνωση της κυματικής ενέργειας. Παράλληλα, σε αυτό το τμήμα, ένα μέρος των κυματογενών ρευμάτων που προσπίπτουν στον προσήνεμο βραχίονα αλλάζει κατεύθυνση προς τα βαθιά. Όσον αφορά το κύριο τμήμα της ακτής, παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας των ρευμάτων πάνω στη ζώνη θραύσης και εν' συνεχεία μείωση των ταχυτήτων καθώς το κυματογενές ρεύμα προσεγγίζει την ακτή. Στην περιοχή εντός της λιμενολεκάνης τα διανύσματα των ταχυτήτων παρουσιάζονται ιδιαίτερα μειωμένα, διότι στο τμήμα αυτό γίνεται συμβολή ρευμάτων αντίθετης φοράς.

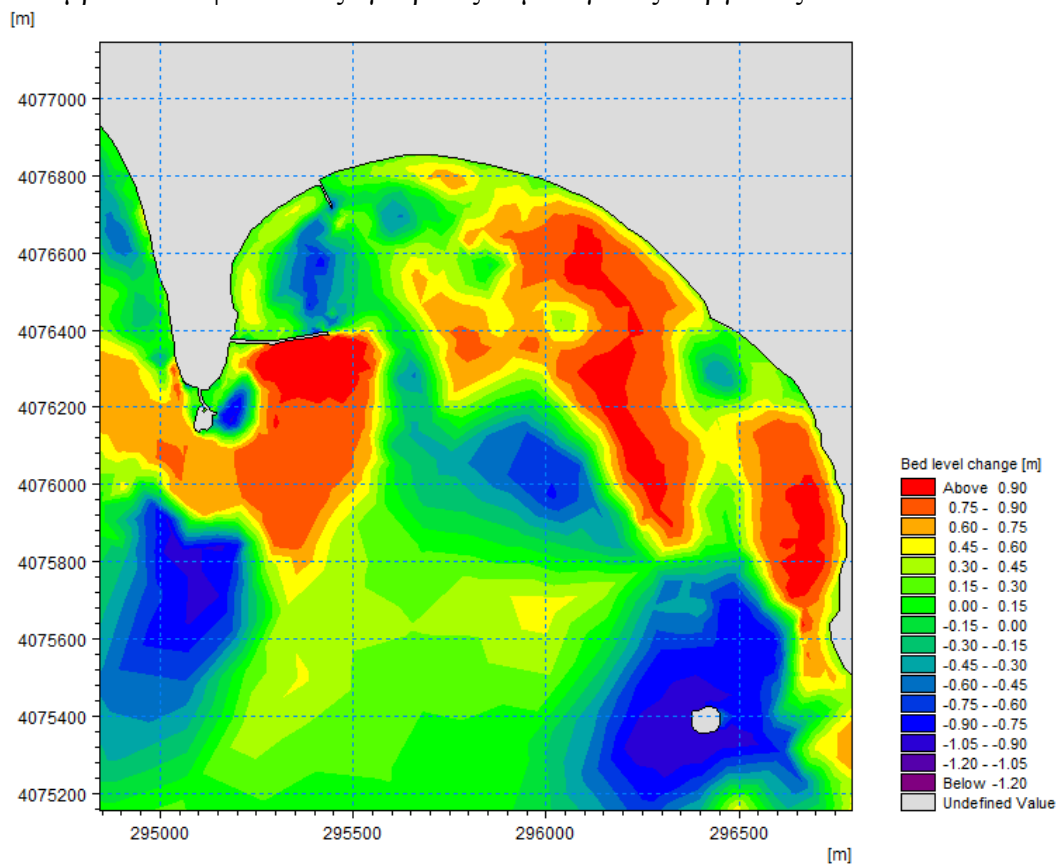


Σχήμα 30. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων - Υφιστάμενη κατάσταση



Σχήμα 31. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων – ΠΕΡΙΟΧΗ Ι.

Τέλος, στο Σχήμα 32 μια συνολική εκτίμηση του μοντέλου στερεομεταφοράς δείχνει ότι η επαλληλία των κυματικών καταστάσεων δημιουργεί ρεύματα μεταφοράς ιζημάτων από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Η εξέλιξη του πυθμένα κατά τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης διαφοροποιείται ανάλογα με το τμήμα της ακτογραμμής που μελετάται. Συγκεκριμένα, κατάντη του λιμενοβραχίονα παρατηρείται έντονη απόθεση ιζήματος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ύπαρξη του λιμενοβραχίονα παρεμποδίζει την κίνηση του ιζήματος με αποτέλεσμα να δημιουργείται σημαντική εναπόθεση. Ακολούθως, στο τμήμα μεταξύ του λιμενοβραχίονα και του προβλήτα παρατηρούνται αποθέσεις μικρότερης έντασης κοντά στην ακτογραμμή, ενώ εντοπίζεται ζώνη διάβρωσης σε μεγαλύτερο βάθος. Όσον αφορά το τμήμα μεταξύ του προβλήτα και του ανατολικότερου σημείου της ακτής, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καταδεικνύουν ότι υπάρχει σημαντική στερεομεταφορά. Το γεγονός αυτό δεν συνάδει με την υφιστάμενη κατάσταση της ακτής, διότι σε αυτό το τμήμα είναι γνωστό ότι υπάρχει σημαντικό πρόβλημα διάβρωσης. Η αδυναμία του μοντέλου στερεομεταφοράς να αποτυπώσει τις πραγματικές συνθήκες του πεδίου πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψιν του τις εγκάρσιες κυματογενείς διεργασίες.



Σχήμα 32. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς - Υφιστάμενη κατάσταση

5.3. Συζήτηση Αποτελεσμάτων

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αναγνώριση και η αντιμετώπιση των συνεπειών της διάβρωσης στο παράκτιο τμήμα της περιοχής της Μεθώνης. Η διερεύνηση έγινε με χρήση μαθηματικού μοντέλου, ωστόσο δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στον εντοπισμό των τμημάτων της ακτής, μέσω ιστορικών αεροφωτογραφιών και έρευνας στο πεδίο, τα οποία υφίστανται διάβρωση ή εναπόθεση.

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης έδειξαν ότι η επαλληλία των τεσσάρων κυματικών καταστάσεων (NA, N, ΝΔ, Δ) καθώς και τα παραγόμενα από αυτούς κυματογενή ρεύματα προκαλούν στερεομεταφορά ως εξής:

- Συσσωρεύουν το ιζήμα κανάντη του υφιστάμενου λιμενοβραχίονα, προκαλώντας προβλήματα προσάμμωσης εντός της λιμενολεκάνης.
- Δημιουργούν διάβρωση στον πόδα του κάστρου.
- Προκαλούν σημαντική διάβρωση στο κεντρικό τμήμα της ακτής.

Στο Σχήμα 33 γίνεται σήμανση των περιοχών οι οποίες έχουν υποστεί διάβρωση και απόθεση ιζήματος, όπως αυτές προέκυψαν έπειτα από την συναξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μαθηματικού μοντέλου, των ιστορικών αεροφωτογραφιών και των παρατηρήσεων στο πεδίο.



Σχήμα 33. Χωρική αποτύπωση των περιοχών διάβρωσης και απόθεσης ιζήματος

6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΡΓΩΝ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

Ύστερα από τη μελέτη και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των παράκτιων διεργασιών στην παραλία της Μεθώνης, σε συνδυασμό με την επιτόπια αυτοψία και τη σύγκριση ιστορικών αεροφωτογραφιών, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, προκύπτει ως συμπέρασμα η ανάγκη σχεδιασμού έργων παράκτιας προστασίας. Τα σημεία της ακτογραμμής που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη τρωτότητα και είναι ουσιαστικά πιο ευάλωτα σε διάβρωση εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της ακτής και στο δυτικότερο τμήμα της, όπου βρίσκεται το Μπούρτζι του κάστρου.

Τα έργα παράκτιας προστασίας που προτείνονται για το κεντρικό τμήμα της ακτής έχουν στόχο την θωράκιση του παραλιακού μετώπου ώστε να αποφευχθούν νέες διαβρώσεις στο μέτωπο του οδοστρώματος του παραλιακού δρόμου. Επίσης, στην ΠΕΡΙΟΧΗ I προτείνεται η απομάκρυνση του υφιστάμενου λιμενοβραχίονα και η ανακατασκευή του αρχαίου λιμένα της Μεθώνης, ώστε να περιοριστούν τα προβλήματα υποσκαφής του κάστρου και να διευκολυνθεί η πρόσβαση στο θαλάσσιο χώρο.

Διερευνήθηκαν συνολικά τρεις εναλλακτικές λύσεις για την προστασία του παράκτιου συστήματος, οι οποίες παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Εναλλακτική λύση I : Τοποθέτηση συστήματος έξι έξαλων κυματοθραυστών στο κεντρικό τμήμα της ακτής μελέτης.
- Εναλλακτική λύση II : Τοποθέτηση συστήματος έξι ύφαλων κυματοθραυστών στο κεντρικό τμήμα της ακτής μελέτης.
- Εναλλακτική λύση III : Τοποθέτηση συστήματος έξι έξαλων κυματοθραυστών στο κεντρικό τμήμα της ακτής μελέτης, απομάκρυνση του υφιστάμενου λιμενοβραχίονα και ανακατασκευή του αρχαίου λιμένα της Μεθώνης.

6.1. Εναλλακτική λύση I

Η πρώτη εναλλακτική λύση (Σχήμα 34) περιλαμβάνει παρεμβάσεις βαρέας μορφής κατά μήκος της περιοχής μελέτης. Σκοπός είναι να αποφευχθεί η διάβρωση της ακτής αλλά και να προστατευθούν οι υποδομές (δρόμοι, δίκτυα κ.λπ.) καθώς και οι παράκτιοι οικισμοί από τις πλημμύρες, κάτω από συνθήκες ακραίων ή έντονων καιρικών φαινομένων συνδυασμένης αναρρίχησης κυματισμών και ανόδου της στάθμης της θάλασσας (Καραμπάς, 2010). Συγκεκριμένα προτείνεται η κατασκευή συστήματος έξι έξαλων κυματοθραυστών, σε βάθος 2,5 περίπου μέτρων, στο τμήμα της περιοχής, το οποίο υπόκειται σε σημαντική διάβρωση. Για λόγους ολοκλήρωσης του συστήματος των κυματοθραυστών προτείνεται η κατασκευή προβλήτα.



Στη συνέχεια παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός της τυπικής διατομής του έξαλου κυματοθραύστη.

6.1.1. Σχεδιασμός έξαλου κυματοθραύστη πριν τη ζώνη θραύσης

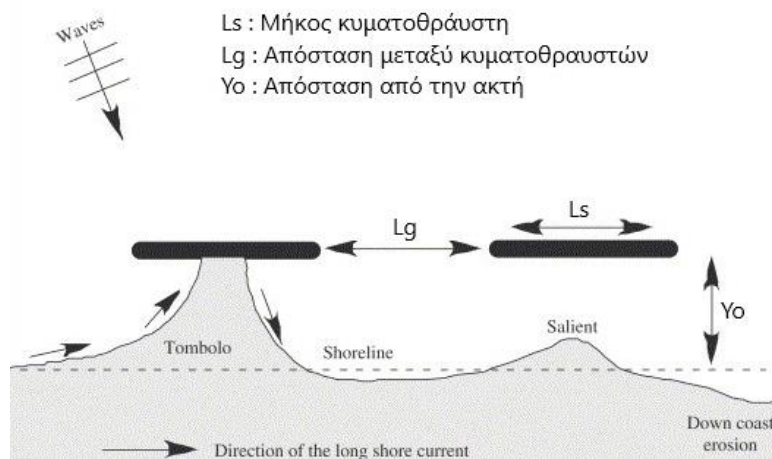
Σημαντικοί παράγοντες για το σχεδιασμό του συστήματος κυματοθραυστών αποτελούν το μήκος τους L_s , η απόσταση των ανοιγμάτων L_g και η απόσταση τους από την ακτή Y_o .

Διάφοροι γενικοί κανόνες σχεδιασμού, οι οποίοι εξήχθησαν με βάση δεδομένα πεδίου και εργαστηρίου, παρουσιάζονται παρακάτω (Rosati, 1990· US Army Corps of Engineers, 1992, 2002):

- Το μήκος του κυματοθραύστη θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές το μήκος κύματος για το οποίο σχεδιάζεται.
- Εάν επιθυμείται σχηματισμός tombolo, ο κυματοθραύστης θα πρέπει να κατασκευαστεί σχετικά πλησίον της ακτής. Συγκεκριμένα, ο λόγος του μήκους του κυματοθραύστη L_s προς την απόστασή του από την ακτή Y_o , θα πρέπει να είναι σχετικά μεγάλος, $L_s/Y_o > 2 \sim 3$. Για μικρότερες τιμές του λόγου L_s/Y_o σχηματίζεται προεξοχή, L_s/Y_o .
- Σε ένα σύστημα κυματοθραυστών, εάν η απόσταση μεταξύ των κυματοθραυστών L_g είναι μικρότερη του 80% της απόστασης από την ακτή Y_o , $L_g/Y_o > 0,8-1,3$ θα έχουμε μικρή διάβρωση, ενώ για μεγαλύτερες τιμές $L_g/Y_o > 1,3$, η διάβρωση θα είναι σημαντική.

Με βάση τους παραπάνω εμπειρικούς κανόνες, τα μεγέθη σχεδιασμού του συστήματος των έξαλων κυματοθραυστών ορίστηκαν ως εξής :

- Μήκος κυματοθραυστών $L_s = 120$ m
- Απόσταση ανοιγμάτων $L_g = 40$ m
- Απόσταση από την ακτή $Y_o \approx 100$ m



Σχήμα 35. Διάταξη κυματοθραυστών

Υπολογισμός κυματογενούς αναρρίχησης R

Για τον υπολογισμό της αναρρίχησης R (Σχήμα 36) απαιτείται η εύρεση του αριθμού Iribaren (ξ), ο οποίος προκύπτει από την εξής σχέση :

$$\xi = \tan a \sqrt{\frac{1,11 \times g \times T^2}{2 \times \pi \times H}} \quad (6.1)$$

Όπου :

$\tan a = 0,6667$: Η κλίση πρανούς

$g = 9,81 \text{ m/sec}^2$: Η επιτάχυνση της βαρύτητας

$T = 8,8 \text{ sec}^{-1}$: Η περίοδος κύματος σχεδιασμού

$H = 1,1 \text{ m}$: Το ύψος κύματος σχεδιασμού

Επομένως ο αριθμός Iribaren υπολογίστηκε : $\xi = 7,4 \text{ m}$

Η αναρρίχηση του κύματος R (Σχήμα) υπολογίζεται από την εξίσωση:

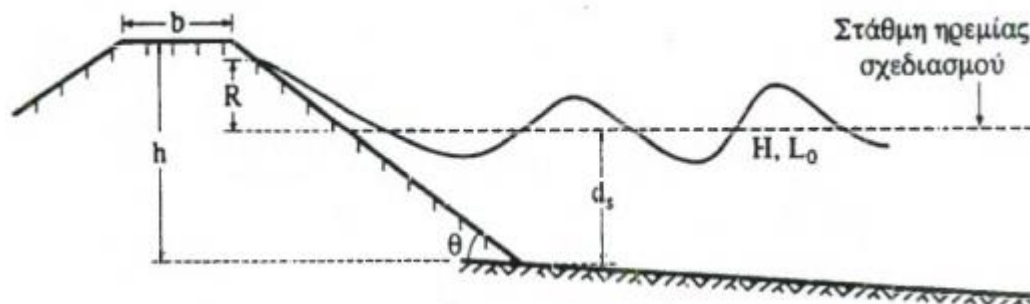
$$\frac{R}{H} = \gamma_r [(A \times \xi_s) + c] \quad (6.2)$$

Όπου :

$H = 1,1 \text{ m}$: Το ύψος κύματος σχεδιασμού

$\gamma_r = 0,55$: Ο συντελεστής μείωσης κυματογενούς αναρρίχησης λόγω ταχύτητας επιφάνειας πρανούς για 2 ή περισσότερες στρώσεις (Πίνακας 13)

$A = -0,25$ και $c = 3$: Οι σταθερές υπολογισμού κυματογενούς αναρρίχησης για $\xi_s > 2$ και $\frac{1}{4} < \tan a < 1$ (Πίνακας 14)



Σχήμα 36. Γραφική απεικόνιση της αναρρίχησης R

Πίνακας 13. Συντελεστής μείωσης κυματογενούς αναρρίχησης

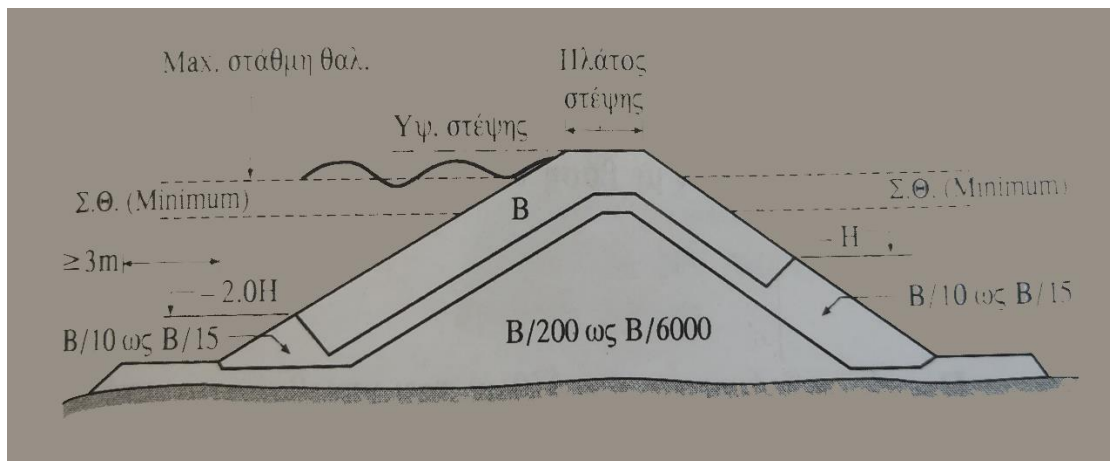
Επιφάνεια Πρανούς	γ_r
Λεία	1,00
Επικάλυψη με φύκια	0,90
Μία στρώση ογκολίθων διαμέτρου D ($H_s/D=1,5-3,0$)	0,55-0,60
Δύο ή περισσότερες στρώσεις ογκολίθων ($H_s/D=1,5-6$)	0,50-0,55
Τεχνητά στοιχεία τραχύτητας	0,60-0,90

Πίνακας 14. Τιμές σταθερών A και c

Αριθμός Irribarren	Κλίση Πρανούς	A	C
$\xi_s \leq 2$	$1/8 \leq \tan a \leq$	1,60	0,00
$2 < \xi_s < 4$	$1/3$	0,00	3,20
$\xi_s \leq 2,5$	$1/4 \leq \tan a \leq 1$	1,60	0,00
$2,5 < \xi_s < 9$		-0,20	4,50
$\xi_s \leq 2$	$1/4 \leq \tan a \leq 1$	1,35	0,00
$2 < \xi_s < 9$		-0,25	3,00

Επομένως η κυματογενής αναρρίχηση υπολογίστηκε : $R=1,5 \text{ m}$

Ακολουθεί ο υπολογισμός των στρώσεων του κυματοθραύστη, ο οποίος βασίστηκε στην προτεινόμενη τυπική διατομή (Σχήμα 37).



Σχήμα 37. Προτεινόμενη τυπική διατομή για μη θραυόμενο κυματισμό (Μέμος, 2008)

Βάρος ογκολίθων θωράκισης

Για τον υπολογισμό του μέσου βάρους ογκολίθων θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο του Hudson :

$$B = \frac{\gamma H^3}{K_D (\delta - 1)^3 \sigma_{\phi\theta}} \quad (6.3)$$

Όπου :

$\gamma = 25,9 \text{ kN/m}^3$: Το ειδικό βάρος του πετρώματος των ογκολίθων

$H = 1,1 \text{ m}$: Το ύψος κύματος σχεδιασμού

$K_D = 4$: Συντελεστής για μη θραυόμενο κυματισμό, μηδενικό ποσοστό αστοχίας, ακανόνιστο σχήμα και τυχαία τοποθέτηση (Πίνακας 15)

$\delta = 2,59$: Ο λόγος ειδικών βαρών $\gamma/\gamma_v = \frac{25,9}{10}$, γ_v ειδικό βάρος νερού στην περιοχή του έργου

$\theta = 33^\circ$: Η γωνία του πρανούς ως προς την οριζόντιο

Πίνακας 15. Συντελεστής K_d

Σχήμα Ογκολίθου	Τοποθέτηση Ογκολίθου	Ποσοστό Αστοχίας 0-5%		Ποσοστό Αστοχίας 5-10%
		Θραυόμενος Κυματισμός	Μη Θραυόμενος Κυματισμός	Μη Θραυόμενος Κυματισμός
Λείο	Τυχαία	2,10	2,40	3,00
Ακανόνιστο	Τυχαία	3,50	4,00	4,90
Ακανόνιστο	Ειδική	4,80	5,50	-
Λείο	Τυχαία	1,20	2,40	-
Ακανόνιστο	Τυχαία	2,00	4,00	-
Ακανόνιστο	Ειδική	5,80	7,00	-

Επομένως το μέσο βάρος φυσικών ογκολίθων υπολογίστηκε : $B = 1,43 \text{ kN}$

Πλάτος στέψης

$$b = n k_{\Delta} \left(\frac{B}{\gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.4)$$

Όπου:

$n = 3$: Το πλήθος των ογκολίθων

$k_{\Delta} = 1$: Ο συντελεστής υπολογισμού πλάτους στρωμάτων ογκολίθων. που προκύπτει από τον Πίνακα 16

Η θωράκιση θα γίνει με φυσικούς ογκολίθους καλής ποιότητας και ορθής διαβάθμισης

Πίνακας 16. Συντελεστής k_{Δ}

Ογκόλιθος	k_{Δ}
Φυσικός	1,00
TETRAPOD	1,04
CORE-LOC	1,51
ACCROPOD	1,51

Επομένως το πλάτος στέψης υπολογίστηκε : $b=1.14$ m

Πάχος θωράκισης

$$r_1 = n k_{\Delta} \left(\frac{B_{\theta\omega\rho}}{\gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.5)$$

Όπου:

$n=3$: Το πλήθος των ογκολίθων

$k_{\Delta}=1$: Ο συντελεστής υπολογισμού πλάτους στρωμάτων ογκολίθων. που προκύπτει από τον Πίνακα 16

$B_{\theta\omega\rho}$ Το βάρος των ογκολίθων της θωράκισης που λαμβάνεται ίσο με το 75% ~125% του μέσου βάρους ογκολίθων B

Επομένως το πλάτος της θωράκισης υπολογίστηκε: $r_1=0.76$ m

Πάχος υπόστρωσης

$$r_2 = n k_{\Delta} \left(\frac{B_{\text{υποστ}}}{\gamma} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.6)$$

Όπου:

$n=2$: Το πλήθος των ογκολίθων

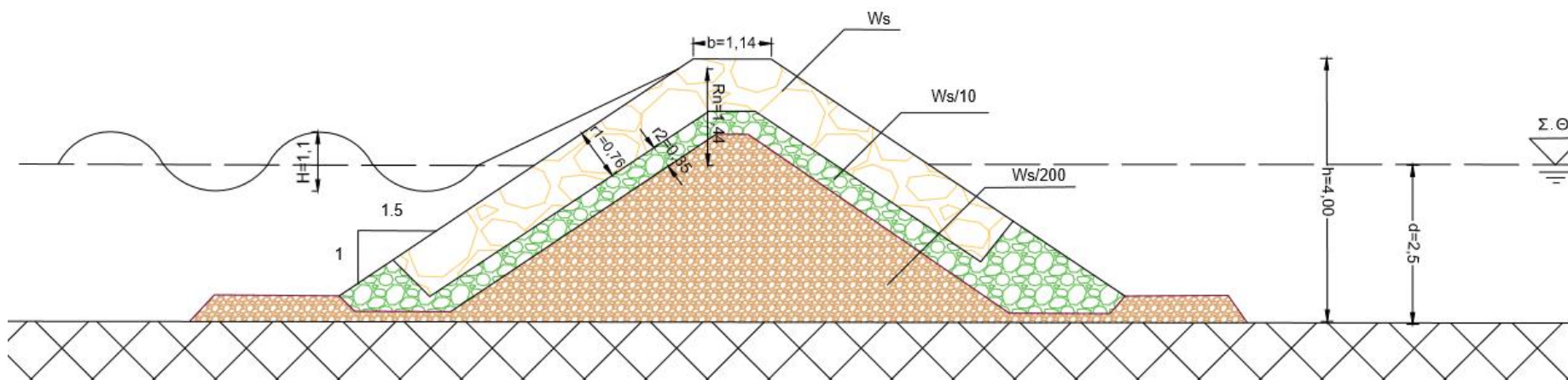
$k_{\Delta}=1$: Ο συντελεστής υπολογισμού πλάτους στρωμάτων ογκολίθων. που προκύπτει από τον Πίνακα 16

$B_{\text{υποστ}}$ Το βάρος των ογκολίθων της υπόστρωσης που λαμβάνεται ίσο με το 5% ~13% του μέσου βάρους ογκολίθων B

Επομένως το πλάτος της υπόστρωσης υπολογίστηκε: $r_2=0.35$ m

Στη συνέχεια ακολουθεί η τυπική διατομή του έξαλου κυματοθραύστη.

ΔΙΑΤΟΜΗ ΕΞΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΩΝΗΣ



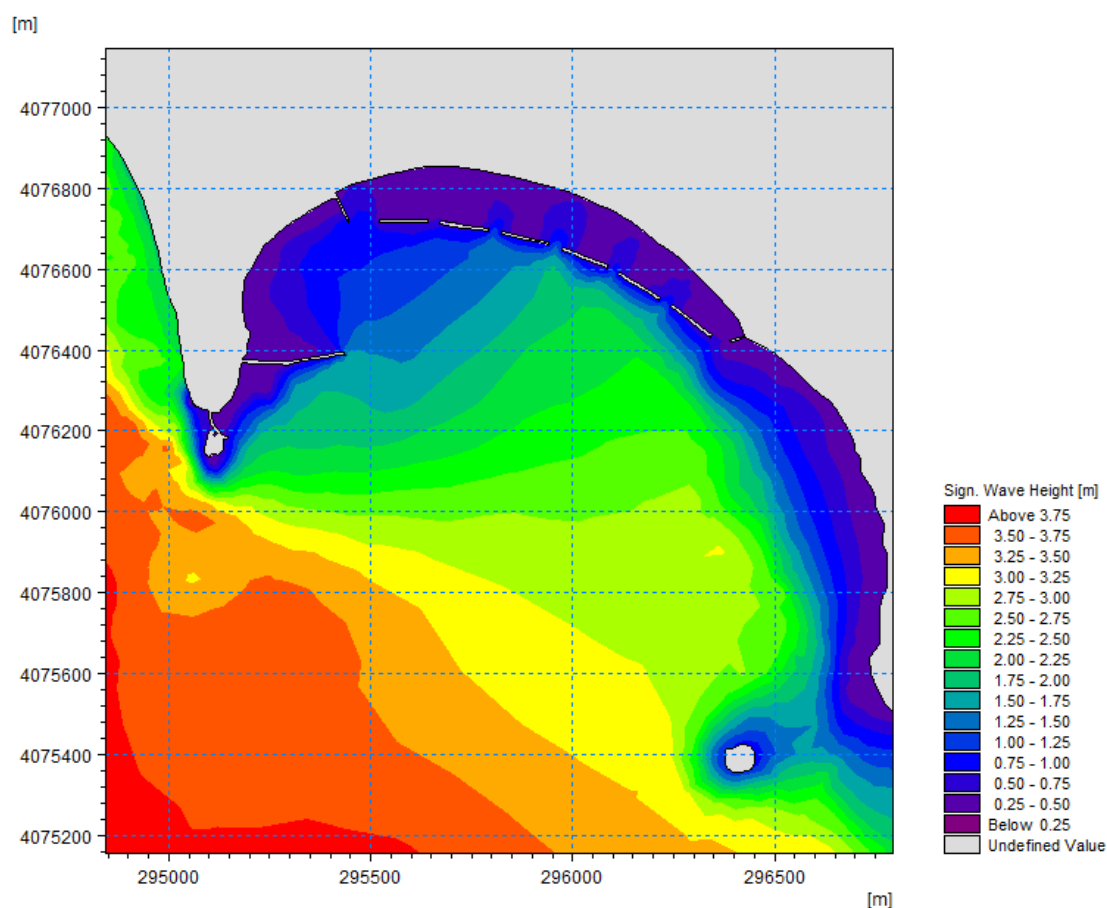
Σχήμα 38. Διατομή εξάλου κυματοθραύστη στην περιοχή της Μεθώνης

6.1.2. Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος (Σχήμα 39), παρατηρούνται μειωμένα κυματικά χαρακτηριστικά, συγκριτικά με εκείνα της υφιστάμενης κατάστασης, στο τμήμα της περιοχής όπου τοποθετήθηκαν οι έξαλοι κυματοθραύστες. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το σύστημα των κυματοθραυστών απορροφά μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος κυματισμού και η θραύση του εντοπίζεται σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτογραμμή.

Ειδικότερα, το ύψος κύματος στην προσήνεμη πλευρά των κυματοθραυστών είναι της τάξης του 0,7- 1,0 m, ενώ κοντά στην ακτογραμμή τα ύψη που παρατηρούνται κυμαίνονται από 0,05 έως 0,2 m.

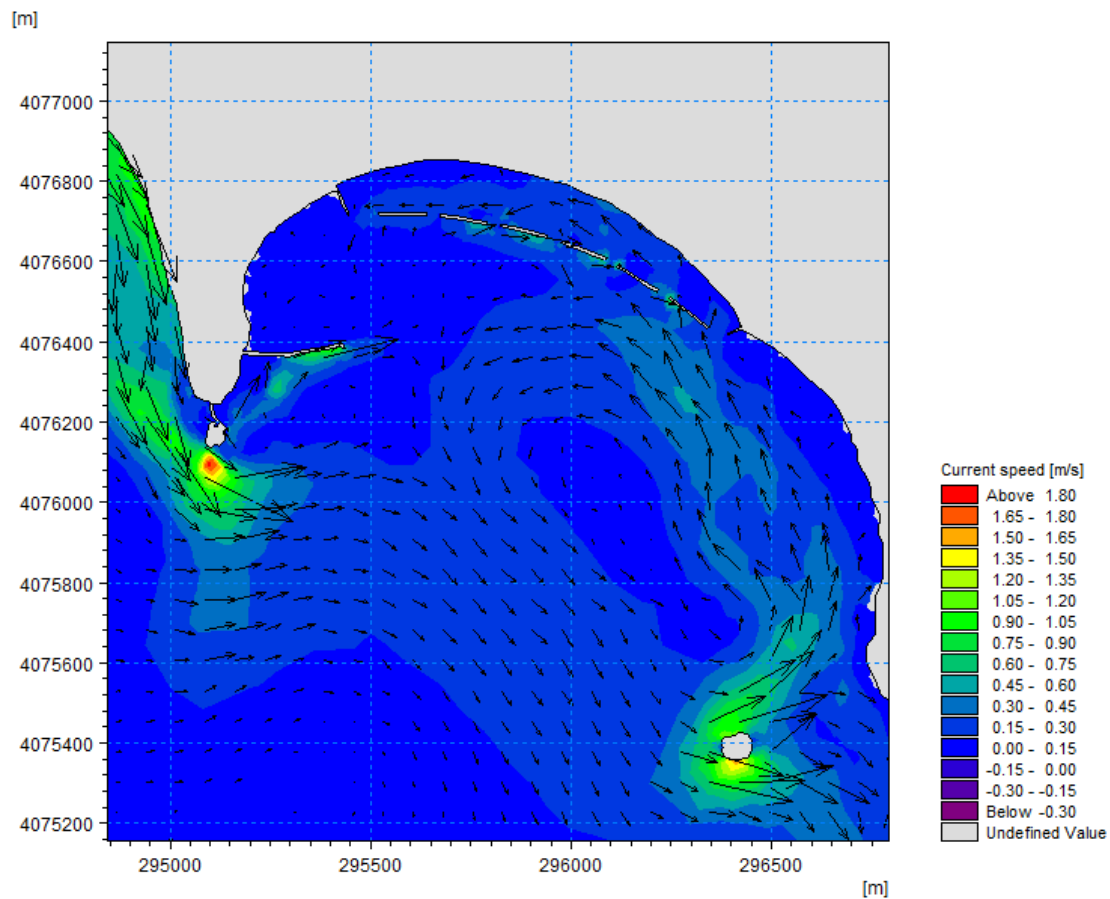
Όσον αφορά την περιοχή της ακτής αριστερά του προβλήτα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στην τιμή του σημαντικού ύψους κύματος, καθώς στην συγκεκριμένη εναλλακτική λύση δεν προβλέπεται κάποια παρέμβαση σε αυτό το τμήμα.



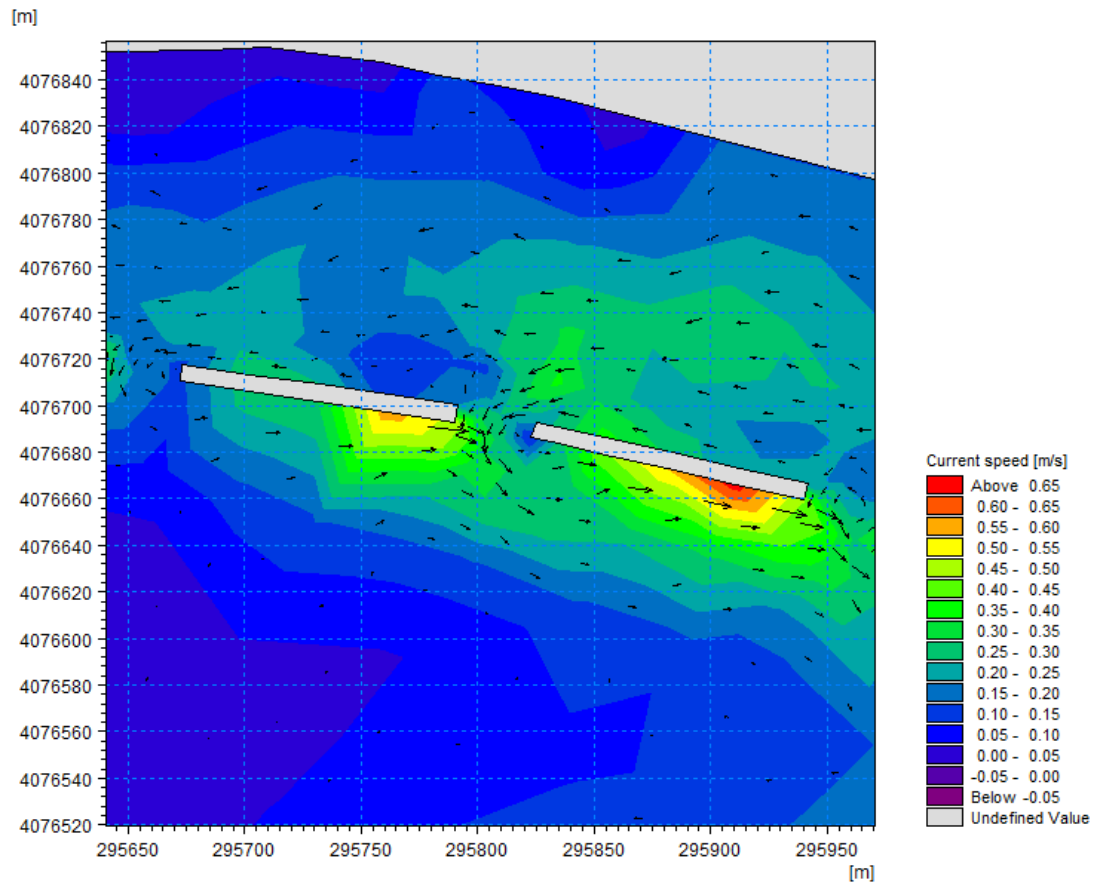
Σχήμα 39. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Εναλλακτική λύση I

Στο Σχήμα 40 γίνεται φανερό ότι στην περιοχή όπου προτείνεται η κατασκευή των κυματοθραυστών τα διανύσματα των ρευμάτων παρουσιάζονται αυξημένα λόγω της θραύσης των κυματισμών στα σημεία αυτά. Παράλληλα, εξαιτίας των κυματοθραυστών παρατηρούνται κάποιοι στροβιλισμοί που εκτρέπουν τη ροή προς τα βαθιά (Σχήμα 41). Στην περιοχή κοντά στην ακτογραμμή παρόλο που η κινητική ενέργεια είναι μειωμένη, το πεδίο της κυματογενούς κυκλοφορίας να παρουσιάζει σχετική αύξηση.

Όσον αφορά το τμήμα της ακτής αριστερά του προβλήτα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στην ταχύτητα των κυματογενών ρευμάτων συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση, καθώς στη συγκεκριμένη εναλλακτική λύση δεν προβλέπεται κάποια παρέμβαση σε αυτό το τμήμα.

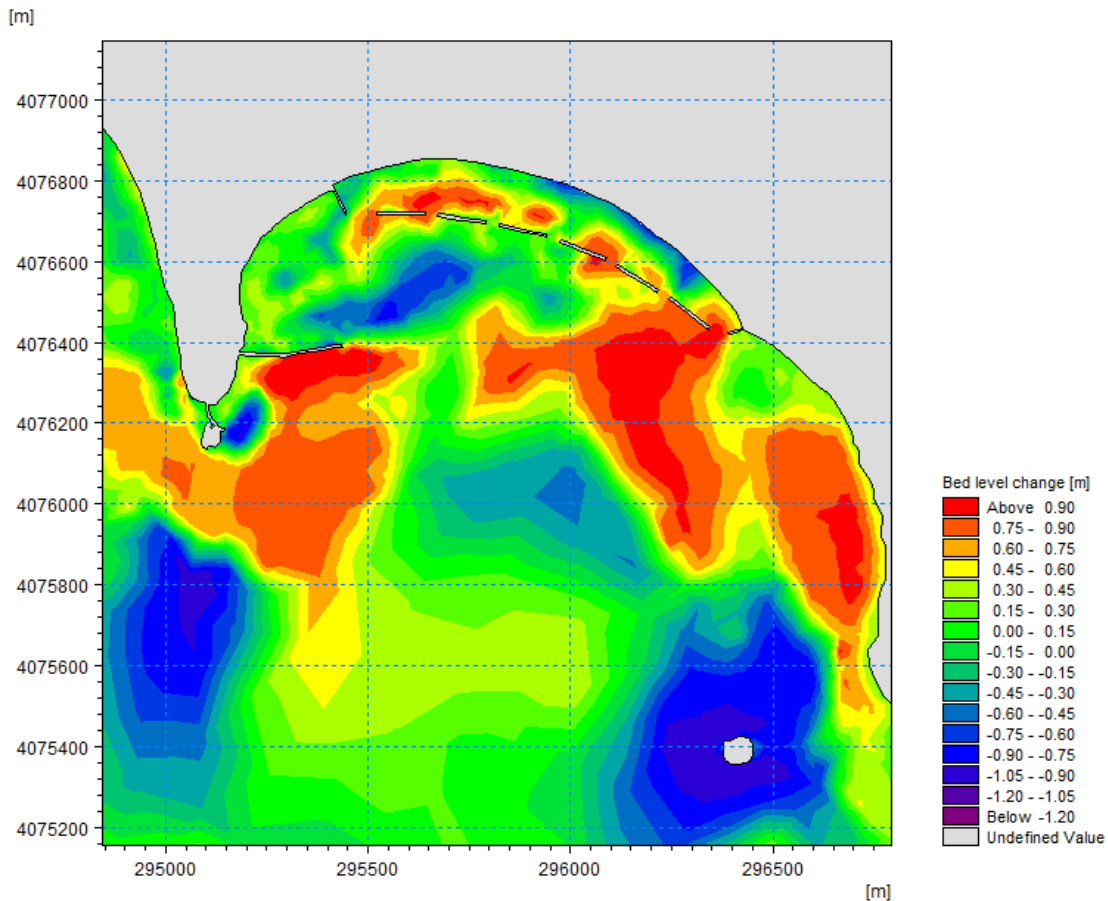


Σχήμα 40. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων – Εναλλακτική λύση I



Σχήμα 41. Κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων κοντά στους έξαλους κυματοθραύστες – Εναλλακτική λύση I

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων για την εξέλιξη του πυθμένα, έπειτα από την κατασκευή του συστήματος των κυματοθραυστών (Σχήμα 42), συμπεραίνουμε ότι στο τμήμα της ακτής μεταξύ του λιμενοβραχίονα και του προβλήτα η διαβρώσιμη ζώνη μετατοπίζεται σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή. Επιπρόσθετα, στο τμήμα της ακτογραμμής όπου τοποθετήθηκαν οι κυματοθραύστες παρατηρείται καλύτερη κατανομή, όσον αφορά την εναπόθεση ιζήματος, συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση. Ωστόσο δημιουργείται μια ζώνη διάβρωσης στα ανατολικά του συγκεκριμένου τμήματος, η οποία δεν παρουσιάστηκε στην προσομοίωση της υφιστάμενης κατάστασης.



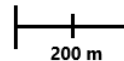
Σχήμα 42. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς – Εναλλακτική λύση I

6.2. Εναλλακτική λύση II

Η δεύτερη εναλλακτική λύση περιλαμβάνει παρεμβάσεις ήπιας μορφής κατά μήκος της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα προτείνεται η κατασκευή συστήματος έξι ύφαλων κυματοθραυστών, με διάταξη αντίστοιχη της εναλλακτικής λύσης I. Η διάταξη αυτή επιλέχθηκε ώστε να πραγματοποιηθεί σύγκριση μεταξύ των έξαλων και ύφαλων κυματοθραυστών, σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους στην προστασία της ακτής. Ακολούθως παρουσιάζεται η απεικόνιση της Εναλλακτικής λύσης II.



Σχήμα 43. Διάταξη εναλλακτικής λύσης II (Google Earth)



6.2.1. Σχεδιασμός ύφαλου κυματοθραύστη πριν την ζώνη θραύσης

Η επίδραση του ύφαλου κυματοθραύστη στην ακτή και επομένως η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από πάρα πολλές παραμέτρους. Οι κυριότερες από αυτές είναι (Pilarczyk, 2003):

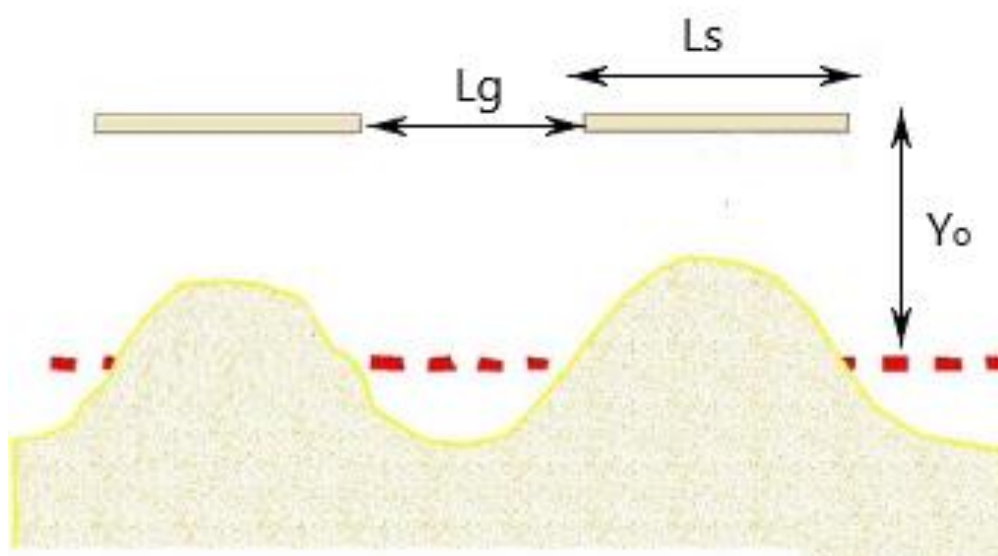
- Απόσταση από την ακτή Y_0
- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά (μήκος της κατασκευής LS , βύθισμα, πλάτος στέψης, κλίση των πρανών)
- Συντελεστής διάδοσης K_t
- Κλίση του πυθμένα και βάθος στο σημείο, όπου βρίσκεται η κατασκευή (έχει να κάνει κυρίως με τη διαβάθμιση των κόκκων του ιζήματος της περιοχής)
- Μέσο ύψος κύματος
- Μέση περίοδος των κυμάτων που προσπίπτουν στην κατασκευή
- Προσανατολισμός της κατασκευής
- Κυρίαρχη διεύθυνση των κυματισμών
- Χαρακτηριστικά του ιζήματος

Συγκεκριμένοι κανόνες για το σχεδιασμό ύφαλων κυματοθραυστών παρουσιάζονται παρακάτω :

- Οι τιμές του συντελεστή διάδοσης θα πρέπει να είναι περίπου $K_t = 0,4-0,5$,
- Για τον σχηματισμό προεξοχής ο λόγος του μήκους του κυματοθραύστη L_s προς την απόστασή του από την ακτή Y_0 , θα πρέπει να είναι, $L_s/Y_0 < (1 \div 1,5)/(1-K_t)$. Ο λόγος αυτός θα πρέπει να παίρνει τιμές κοντά στο $(1 \div 1,5)/(1-K_t)$
- Σε ένα σύστημα κυματοθραυστών θα πρέπει $L_g Y_0/L_s^2 > 0,5 (1-K_t)$, ενώ η απόσταση μεταξύ των κυματοθραυστών L_g θα πρέπει να είναι μικρότερη του 80% της απόστασης από την ακτή Y_0 και μεγαλύτερη του μήκους κύματος L , $L < L_g < 0,8 Y_0$.

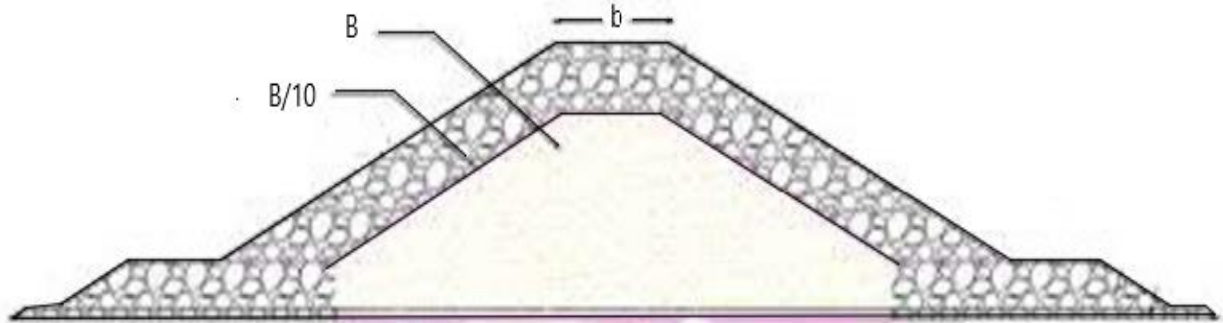
Με βάση τους παραπάνω εμπειρικούς κανόνες, τα μεγέθη σχεδιασμού του συστήματος των ύφαλων κυματοθραυστών ορίστηκαν ως εξής :

- Μήκος κυματοθραυστών $L_s = 120$ m
- Απόσταση ανοιγμάτων $L_g = 40$ m
- Απόσταση από την ακτή $Y_0 \approx 100$ m
- Συντελεστής διάδοσης $K_t = 0,55$



Σχήμα 44. Χωρική διάταξη ύφαλων κυματοθραυστών

Ακολουθεί ο υπολογισμός των στρώσεων του ύφαλου κυματοθραύστη, ο οποίος βασίστηκε στην προτεινόμενη τυπική διατομή (Σχήμα 45).



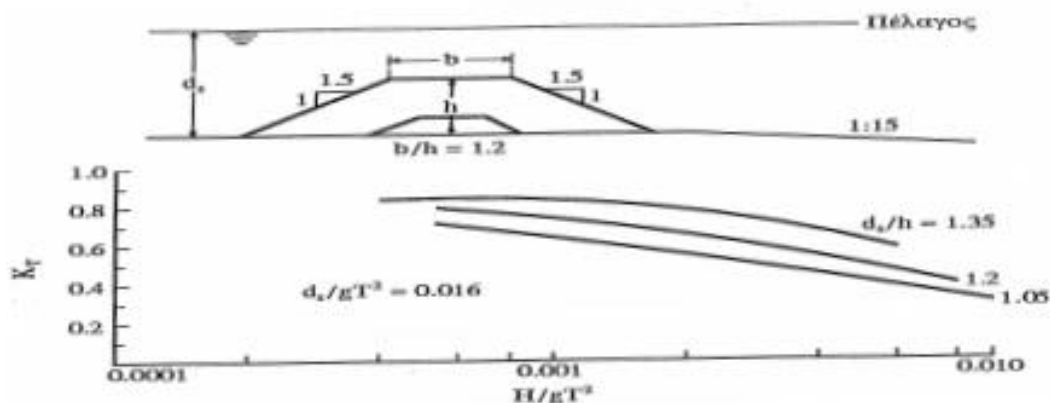
Σχήμα 45. Προτεινόμενη τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη

Υπολογισμός ύψους κυματοθραύστη και πλάτους στέψης

Για την εκτίμηση του ύψους των ύφαλων κυματοθραυστών και του πλάτους της στέψης χρησιμοποιείται το εμπειρικό διάγραμμα του Σχήματος 46.

Υποθέτοντας ότι ο συντελεστής διάδοσης του κυματισμού είναι $K_t = 0,55$ και το βάθος στο σημείο έρδασης $d = 2,5$ m, προκύπτει ότι ύψος των κυματοθραυστών είναι $h = 2$ m.

Επίσης γίνεται παραδοχή ότι ο λόγος του πλάτους στέψης προς το ύψος των κυματοθραυστών είναι $b/h = 1,2$. Επομένως το πλάτος στέψης ανέρχεται στα 2,4 m.



Σχήμα 46. Μετάδοση κυματισμού πάνω από βυθισμένο κυματοθραύστη με εκτεταμένη θωράκιση (Μέμος, 2008).

Διάμετρος των λίθων θωράκισης

Η εκτίμηση των απαιτούμενων διαστάσεων των λίθων θωράκισης D_{n50} γίνεται με την παρακάτω έκφραση (Van der Meer) για μηδενικό ποσοστό ζημιών :

$$\frac{h}{d} = 2,1 \exp(-0,14 N_s) \quad (6.7)$$

Όπου :

$h=1,9\text{m}$, το ύψος κατασκευής

$d=2,5\text{m}$, το βάθος νερού

N_s ο φασματικός αριθμός ευαστάθειας που υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$N_s = H/\Delta D_{n50} s^{1/3}$$

Προκύπτει ότι η διάμετρος των λίθων θωράκισης είναι $D_{n50} = 0,3 \text{ m}$

Υπολογισμός βάρους ογκολίθων

Για τον υπολογισμό του βάρους των ογκολίθων B χρησιμοποιείται η εξής σχέση :

$$D_{n50} = 1,15 \left(\frac{B}{\gamma}\right)^{1/3} \quad (6.8)$$

Όπου :

$\gamma = 2,6 \text{ t/m}^3$, το ειδικό βάρος του πετρώματος

Επομένως το μέσο βάρος ογκολίθων υπολογίστηκε : $B=0,05 \text{ tn}$

Πλάτος θωράκισης

$$r_1 = n k_{\Delta} (B_{\theta\omega\rho}/\gamma)^{1/3} \quad (6.9)$$

Όπου:

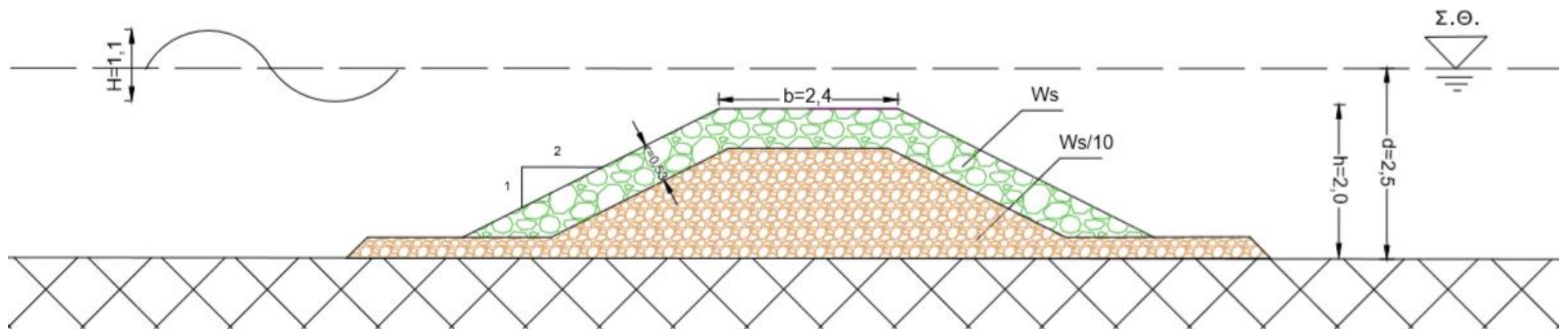
$n=2$, το πλήθος των επάλληλων λίθων σε κάθε στρώση (λαμβάνεται ίσο με 2, ώστε να υπάρχει εξασφάλιση από τη δράση των κυματισμών)

$k_{\Delta}=1$, ο συντελεστής υπολογισμού πλάτους στρωμάτων ογκολίθων.

$B_{\theta\omega\rho}=75\%\sim 125\%$ του μέσου βάρους ογκολίθων B

Επομένως το πλάτος της θωράκισης υπολογίστηκε: $r_1 = 0,53 \text{ m}$

ΔΙΑΤΟΜΗ ΥΦΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΜΕΘΩΝΗΣ



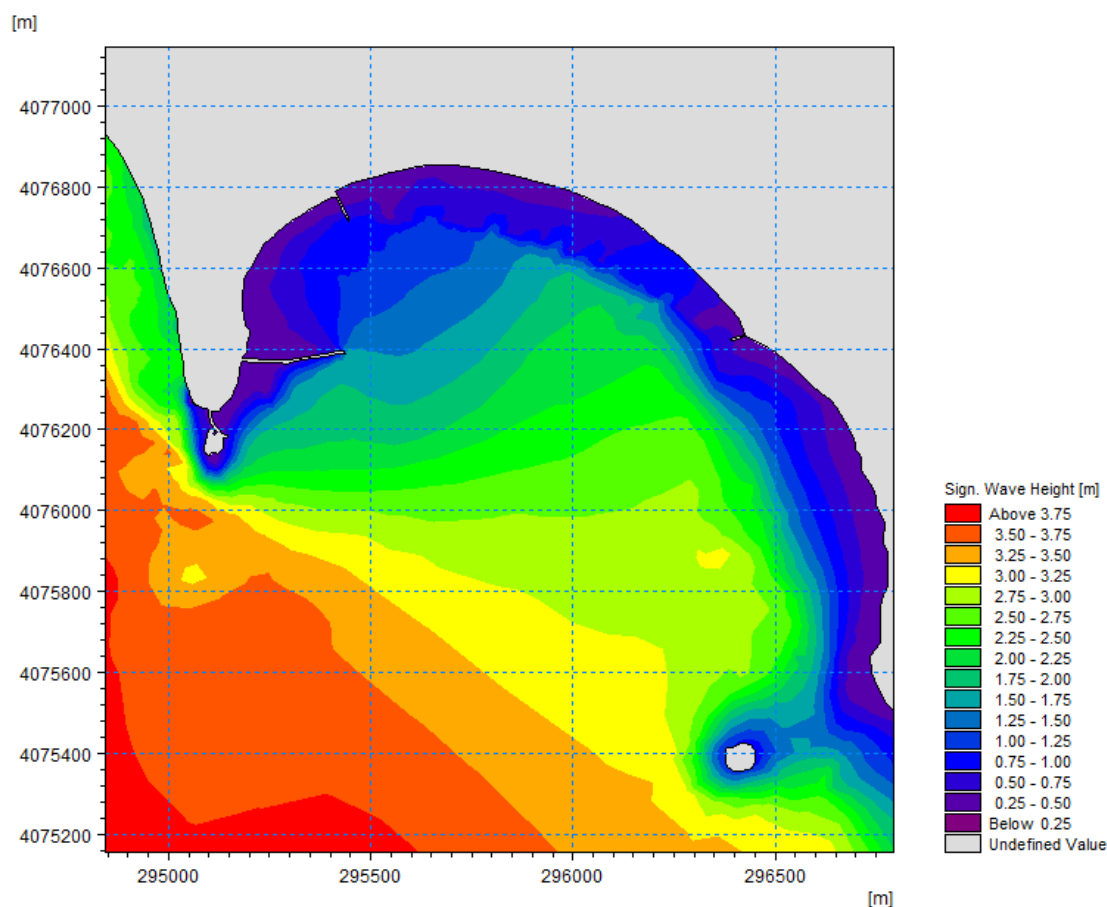
Σχήμα 47. Διατομή ύφαλου κυματοθραύστη στην περιοχή της Μεθώνης

6.2.2. Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος (Σχήμα 48), παρατηρούνται μειωμένα κυματικά χαρακτηριστικά, συγκριτικά με εκείνα της υφιστάμενης κατάστασης, στο τμήμα της περιοχής όπου τοποθετήθηκε το σύστημα των ύφαλων κυματοθραυστών. Η διάταξη αυτή μετατοπίζει τη ζώνη θραύσης του κύματος σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτογραμμή.

Ειδικότερα, το ύψος κύματος μπροστά από τους κυματοθράυστες είναι της τάξης του 0,7- 0,9 m, ενώ κοντά στην ακτογραμμή τα ύψη που παρατηρούνται κυμαίνονται από 0,08 έως 0,4 m.

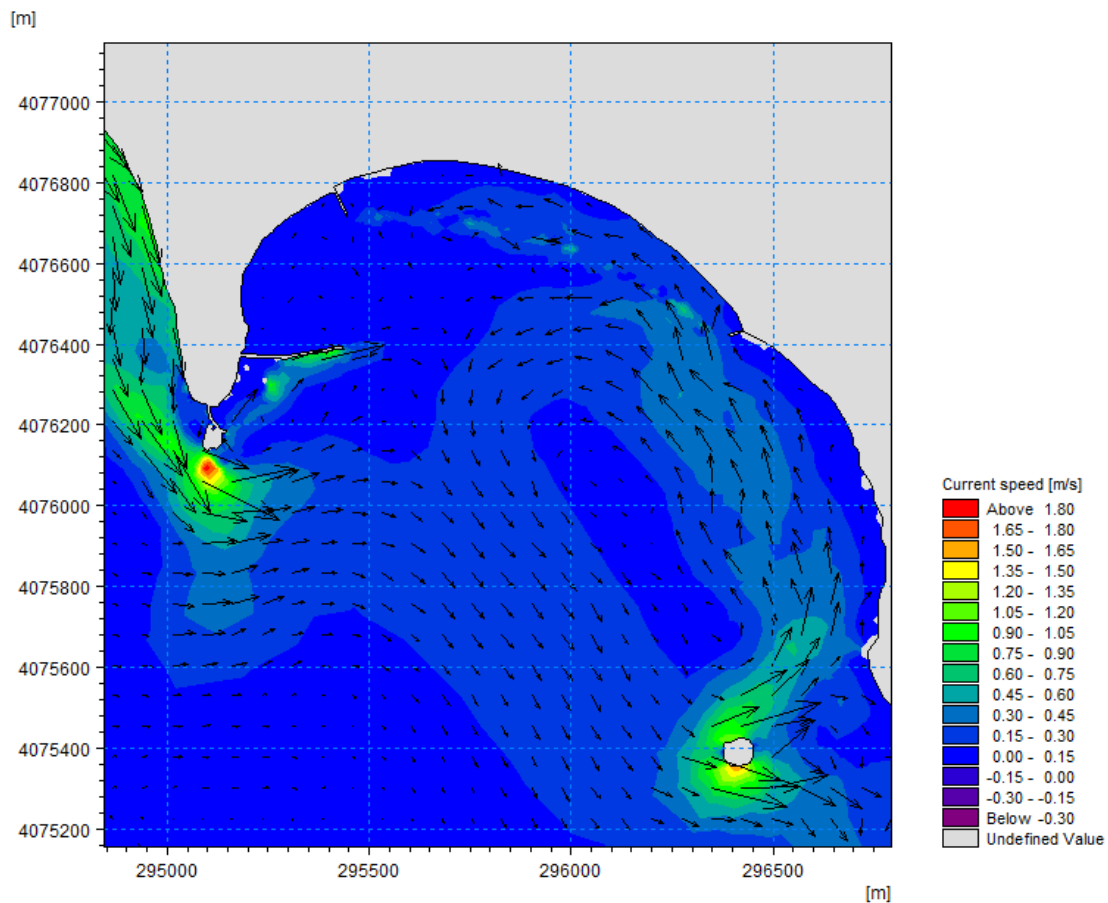
Όσον αφορά το τμήμα της ακτής αριστερά του προβλήτα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στην τιμή του σημαντικού ύψους κύματος, καθώς στην συγκεκριμένη εναλλακτική λύση δεν προβλέπεται κάποια παρέμβαση σε αυτό το τμήμα.



Σχήμα 48. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος – Εναλλακτική λύση II

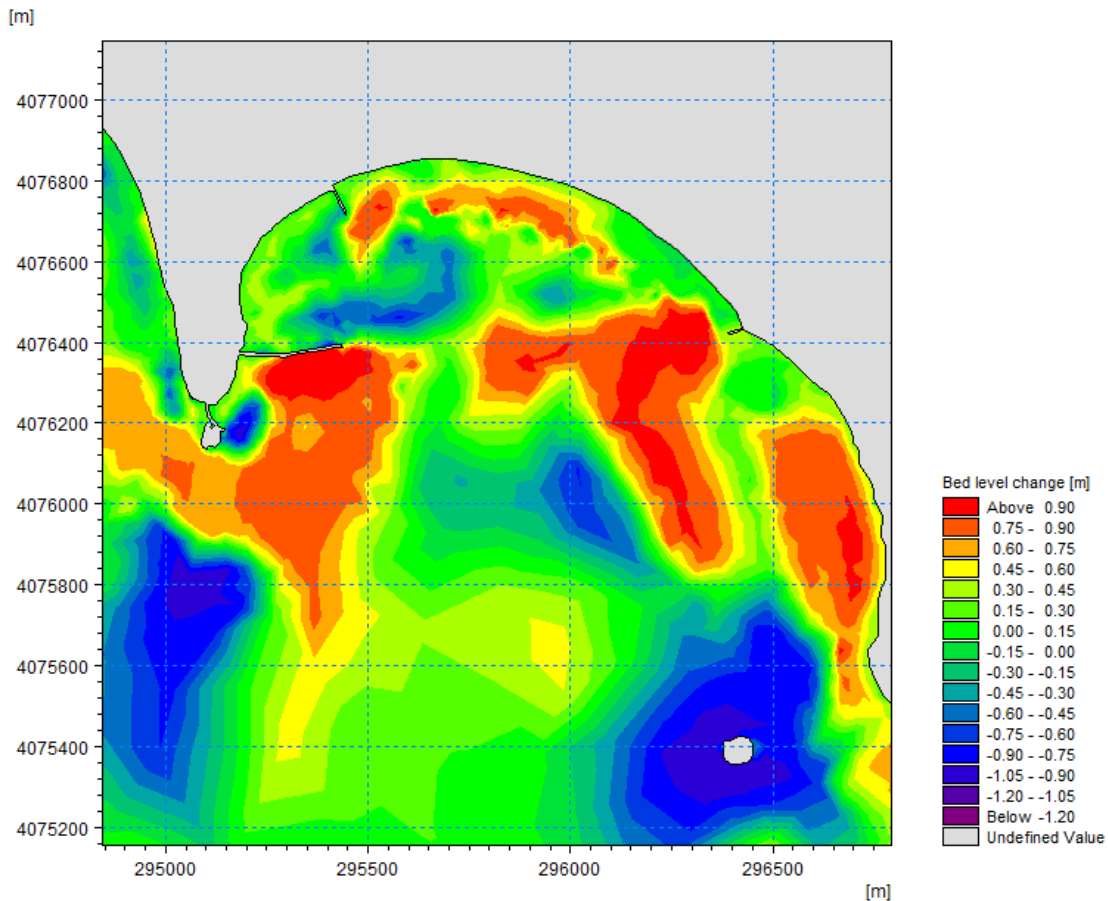
Αξιολογώντας τα αποτελέσματα, στο τμήμα όπου προτείνεται η κατασκευή των ύφαλων κυματοθραυστών τα διανύσματα των ρευμάτων παρουσιάζονται αυξημένα λόγω της θραύσης των κυματισμών στα σημεία αυτά. Στην περιοχή κοντά στην ακτογραμμή παρόλο που η κινητική ενέργεια είναι μειωμένη, το πεδίο της κυματογενούς κυκλοφορίας να παρουσιάζει σχετική αύξηση. Ωστόσο στην ευρύτερη περιοχή της λιμενολεκάνης η ταχύτητα του κυματογενούς ρεύματος παρουσιάζεται ιδιαίτερα μειωμένη.

Όσον αφορά το τμήμα της ακτής αριστερά του προβλήτα δεν παρατηρείται ιδιαίτερη μεταβολή στην ταχύτητα των κυματογενών ρευμάτων συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση, καθώς στην συγκεκριμένη εναλλακτική λύση δεν προβλέπεται κάποια παρέμβαση σε αυτό το τμήμα.



Σχήμα 49. Χωρική κατανομή της ταχύτητας των ρευμάτων – Εναλλακτική λύση II

Στο Σχήμα 50 παρατηρείται ότι έπειτα από την κατασκευή του συστήματος των ύφαλων κυματοθραυστών στο τμήμα της ακτής, μεταξύ του λιμενοβραχίονα και του προβλήτα, η διαβρώσιμη ζώνη μειώνεται σημαντικά, συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση. Επιπρόσθετα, στο τμήμα της ακτογραμμής όπου τοποθετήθηκαν οι κυματοθραύστες παρατηρείται καλύτερη κατανομή, όσον αφορά την εναπόθεση ιζήματος.



Σχήμα 50. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς - Εναλλακτική λύση II

6.3. Εναλλακτική λύση III

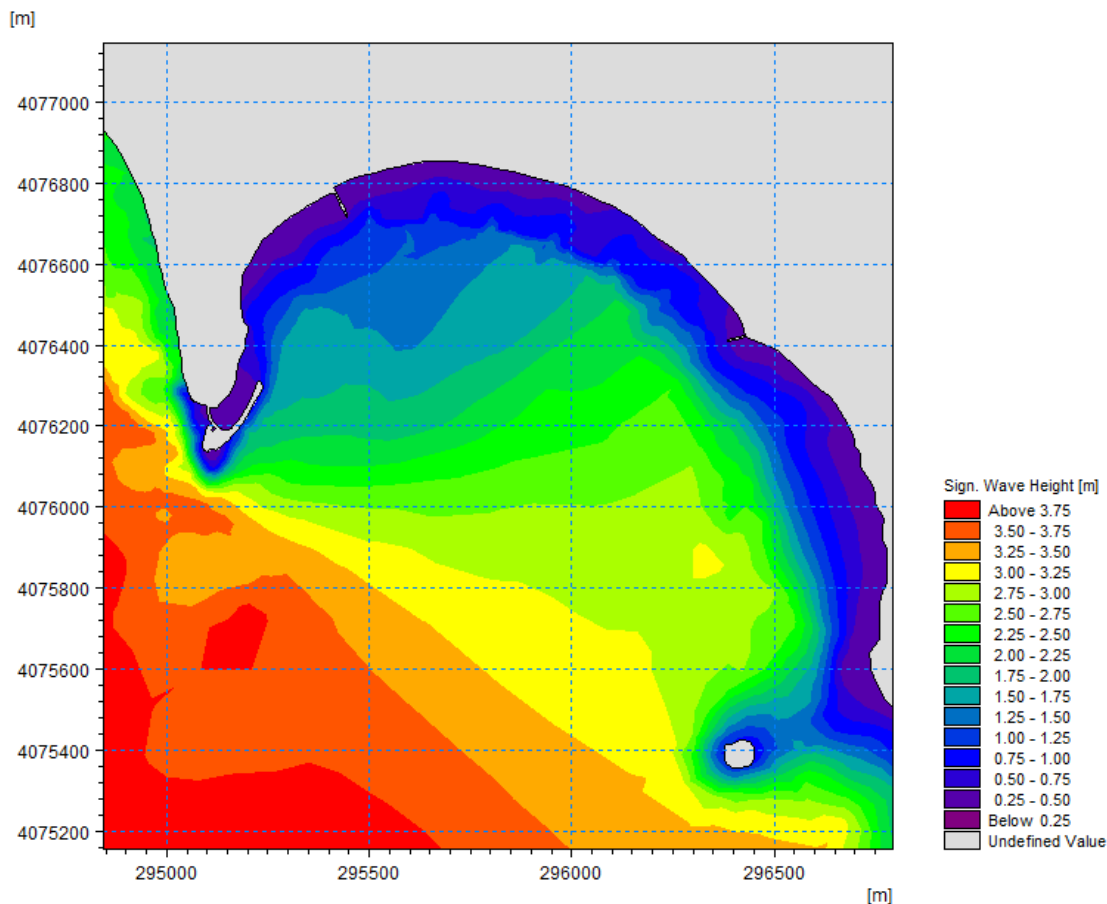
Η τρίτη εναλλακτική λύση περιλαμβάνει ήπιες παρεμβάσεις στο κεντρικό τμήμα της ακτής, το οποίο υπόκειται σε σημαντική διάβρωση. Συγκεκριμένα προτείνεται η κατασκευή συστήματος έξι ύφαλων κυματοθραυστών, σε βάθος 2,5 περίπου μέτρων. Για λόγους ολοκλήρωσης του έργου προστασίας προτείνεται η κατασκευή προβλήτα. Επιπλέον, θα διερευνηθεί η αφαίρεση του υφιστάμενου μώλου, η ύπαρξη του οποίου, σε συνδυασμό με το κυματικό κλίμα της περιοχής, προκαλεί συσσώρευση ιζήματος στον υπάρχοντα λιμένα και υποσκαφές στον πόδα του κάστρου. Ως αντικατάσταση του υφιστάμενου μώλου, θα διερευνηθεί η ανακατασκευή του αρχαίου λιμένα. Ακολούθως παρουσιάζεται η απεικόνιση της εναλλακτικής λύσης III.



Σχήμα 51. Διάταξη εναλλακτικής λύσης III (Google Earth)

6.3.1. Αποτελέσματα αριθμητικής προσομοίωσης

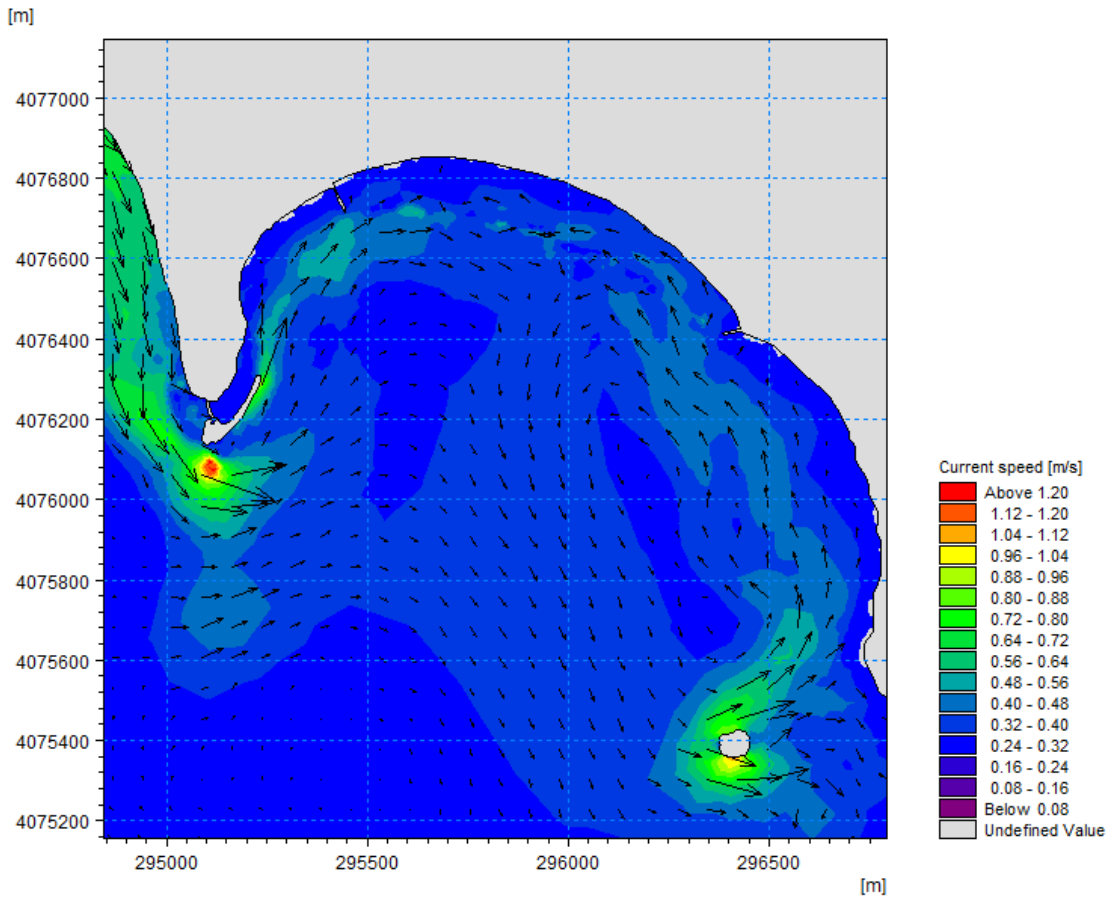
Από την μελέτη των αποτελεσμάτων για την εξέλιξη του σημαντικού ύψους κύματος (Σχήμα 52), παρατηρείται μείωση των κυματικών χαρακτηριστικών στο σύνολο της ακτής μελέτης. Τόσο στο τμήμα όπου τοποθετήθηκαν οι ύφαλοι κυματοθραύστες, όσο και στο δυτικότερο άκρο της ακτής, όπου εξετάστηκε η ανακατασκευή του αρχαίου λιμένα, το σημαντικό ύψος κύματος δεν ξεπερνάει τα 0,2 m. Ωστόσο στην περιοχή βόρεια του αρχαίου λιμένα το ύψος κύματος, τοπικά, προσεγγίζει τα 0,5 m.



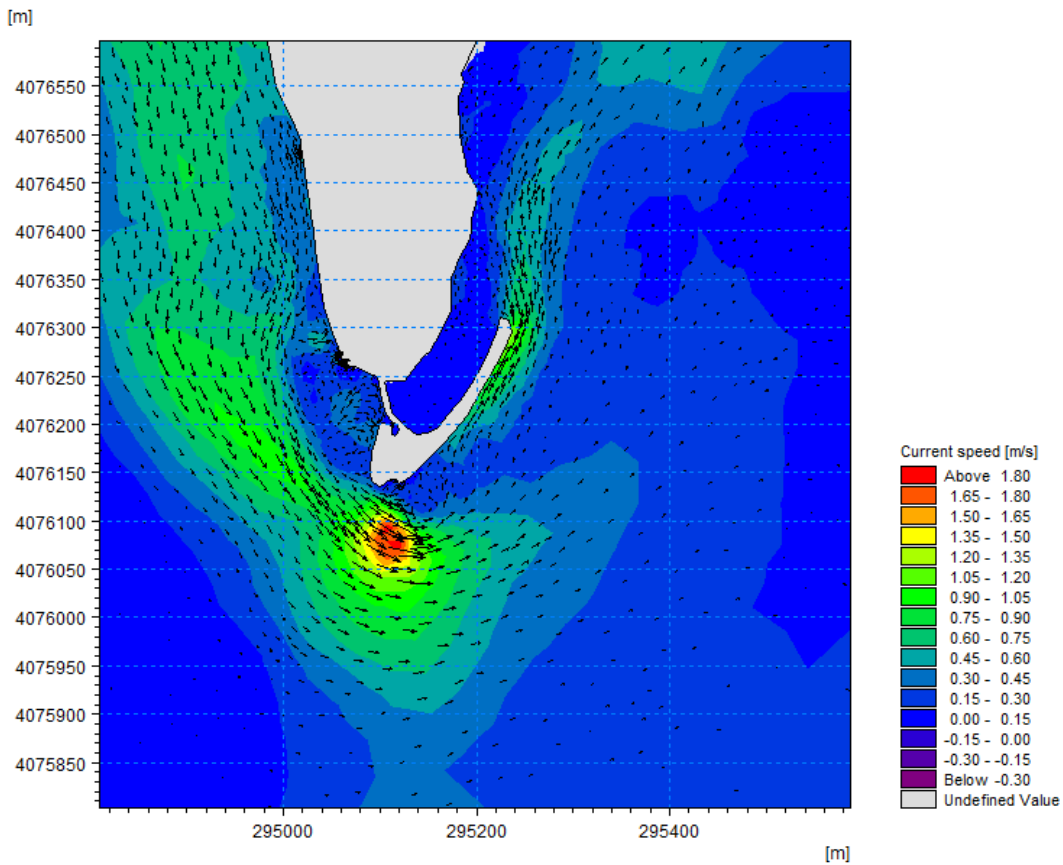
Σχήμα 52. Χωρική κατανομή του ύψους κύματος -Εναλλακτική λύση III

Στο Σχήμα 53 γίνεται φανερό ότι στην περιοχή όπου προτείνεται η κατασκευή των ύφαλων κυματοθραυστών τα διανύσματα των ρευμάτων παρουσιάζονται αυξημένα λόγω της θραύσης των κυματισμών στα σημεία αυτά. Στην περιοχή κοντά στην ακτογραμμή παράλο που η κινητική ενέργεια είναι μειωμένη, το πεδίο της κυματογενούς κυκλοφορίας να παρουσιάζει σχετική αύξηση.

Στο τμήμα όπου προσομοιώνεται η κατασκευή του αρχαίου λιμένα (Σχήμα 54) παρατηρείται σημαντική μείωση της ταχύτητας των ρευμάτων εντός της λιμενολεκάνης, ενώ τα διανύσματα των ταχυτήτων παρουσιάζουν σημαντική αύξηση εξωτερικά του βραχίονα. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στο συγκεκριμένο τμήμα γίνεται απότομη μείωση της κυματικής ενέργειας.

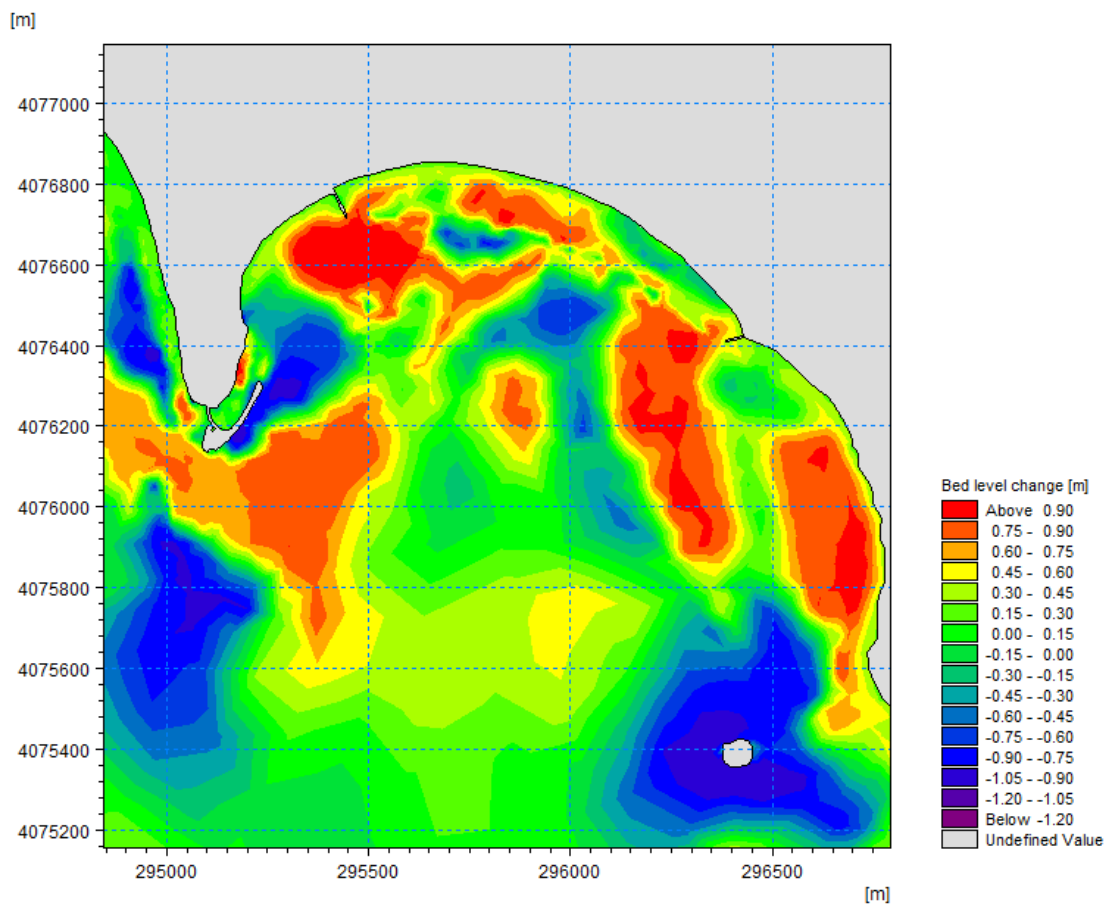


Σχήμα 54. Χωρική κατανομή της ταχύτητας ρευμάτων - Εναλλακτική λύση III



Σχήμα 53. Χωρική κατανομή της ταχύτητας ρευμάτων - ΠΕΡΙΟΧΗ I

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων του μοντέλου στερεομεταφοράς (Σχήμα 55) συμπεραίνουμε ότι κατάντη του συστήματος των ύφαλών κυματοθραυστών υπάρχει καλύτερη κατανομή, όσον αφορά την εναπόθεση ιζήματος, συγκριτικά με την υφιστάμενη κατάσταση. Στην περιοχή όπου προσομοιώθηκε η ανακατασκευή του αρχαίου λιμένα παρατηρείται ευρεία ζώνη διάβρωσης. Ωστόσο στο συγκεκριμένο τμήμα γνωρίζουμε ότι υπάρχει βραχώδες υπόστρωμα, επομένως δεν υπάρχει σημαντικός κίνδυνος διάβρωσης εξωτερικά του αρχαίου λιμένα.



Σχήμα 55. Χωρική κατανομή της στερεομεταφοράς -Εναλλακτική λύση III

6.4. Συγκριτική αξιολόγηση Εναλλακτικών λύσεων

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ευστάθεια της παράκτιας ζώνης της Μεθώνης έναντι διάβρωσης υπό συνήθεις κυματικές συνθήκες και η δυνατότητα απομείωσης της παρατηρούμενης διάβρωσης με την κατασκευή παράκτιων έργων.

Πιο συγκεκριμένα, στο υποκεφάλαιο 6.3 εξετάστηκαν τρεις εναλλακτικές λύσεις, εκ των οποίων οι δύο πρώτες αφορούν την κατασκευή έξαλων (Εναλλακτική λύση I) και ύφαλων (Εναλλακτική λύση II) κυματοθραυστών αντίστοιχα. Η Εναλλακτική λύση III περιλαμβάνει την ανακατασκευή του αρχαίου λιμένα της Μεθώνης, σε συνδυασμό με την κατασκευή του συστήματος των ύφαλων κυματοθραυστών.

Αρχικά, η συγκριτική αξιολόγηση θα πραγματοποιηθεί μεταξύ των Εναλλακτικών λύσεων I και II, ώστε να διαπιστωθεί ο καταλληλότερος τύπος κυματοθραυστών. Σχετικά με τα κυματικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένα με το ύψος κύματος και οι δύο διατάξεις φαίνονται να είναι αποδοτικές, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 56. Με την ύπαρξη των κυματοθραυστών οι οποίοι λειτουργούν, ουσιαστικά, ως εμπόδιο στη διάδοση των κυματισμών, τα ύψη κύματος κατάντη των έργων παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Κατά συνέπεια και στις δύο περιπτώσεις τα έργα συμβάλουν στην απόσβεση των υψηλών τιμών του σημαντικού ύψους κύματος κοντά στην ακτογραμμή. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως η κατασκευή παράλληλων κυματοθραυστών διαταράσσει έντονα το κυματικό πεδίο και όλες τις παράκτιες διεργασίες καθώς προκαλεί το φαινόμενο της περίθλασης και της θραύσης των επερχόμενων κυματισμών σε μεγαλύτερο βάθος και με μεγαλύτερο ύψος θραύσης από αυτούς που μεταδίδονται πίσω από τον κυματοθραύστη. (Καραμπάς, 2015)

Συγκριτικά, οι έξαλοι κυματοθραύστες είναι εκείνοι που αποδίδουν περισσότερο καθώς απορροφούν μεγαλύτερο ποσοστό της κυματικής ενέργειας. Ωστόσο και στην περίπτωση των ύφαλων κυματοθραυστών παρέχεται επαρκής μείωση του ύψους κύματος κοντά στην ακτογραμμή.

Σχετικά με τα κυματογενή ρεύματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 57, τα αποτελέσματα των δύο εναλλακτικών λύσεων παρουσιάζουν παρόμοια χωρική κατανομή. Εντούτοις, η ταχύτητα των ρευμάτων παρουσιάζει μεγαλύτερη μείωση κοντά στην ακτογραμμή με τη διάταξη των ύφαλων κυματοθραυστών.

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα για εξέλιξη του πυθμένα, εμφανώς η Εναλλακτική λύση II κρίνεται αποδοτικότερη. Στην περίπτωση των έξαλων κυματοθραυστών

αναπτύσσεται μια διαβρωτική τάση κοντά στην ακτογραμμή, η οποία δεν παρατηρείται στην διάταξη των ύφαλων κυματοθραυστών. Πιο συγκεκριμένα, στην εναλλακτική λύση II υπάρχει καλύτερη κατανομή της απόθεσης ιζήματος κατά μήκος της ακτής και οι περιοχές διάβρωσης περιορίζονται αισθητά.

Επιπρόσθετα, δεν μπορεί να αγνοηθεί το γεγονός ότι οι ύφαλοι κυματοθραύστες εναρμονίζονται αισθητικά με το περιβάλλον, καλύτερα σε σύγκριση με του έξαλους. Αυτό έχει ιδιαίτερη βαρύτητα σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους και ιστορικής παράδοσης, όπως είναι η περιοχή της Μεθώνης. Άλλα πλεονεκτήματα είναι βέβαια η μείωση των απαιτούμενων υλικών κατασκευής έναντι των αντίστοιχων ορατών έργων και η χαμηλή ανάκλαση των κυματισμών (Μέμος, 2009).

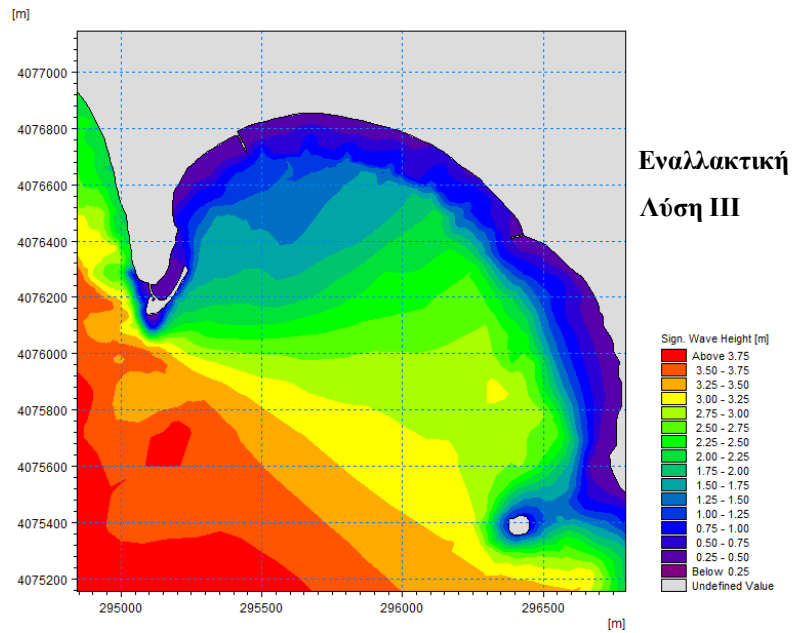
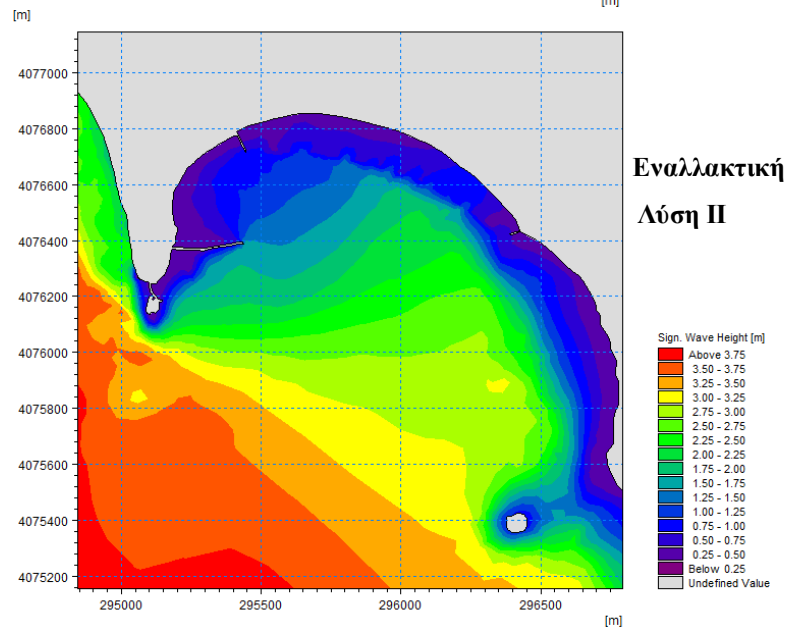
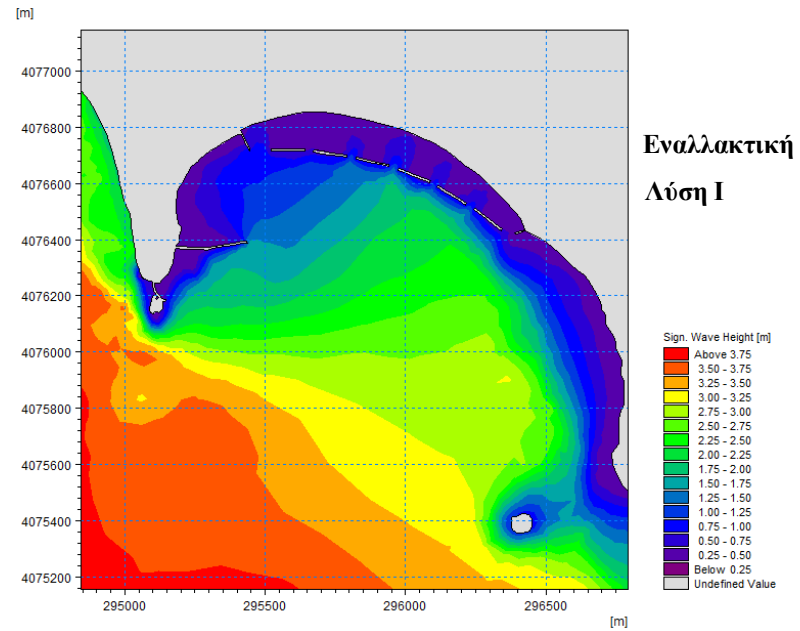
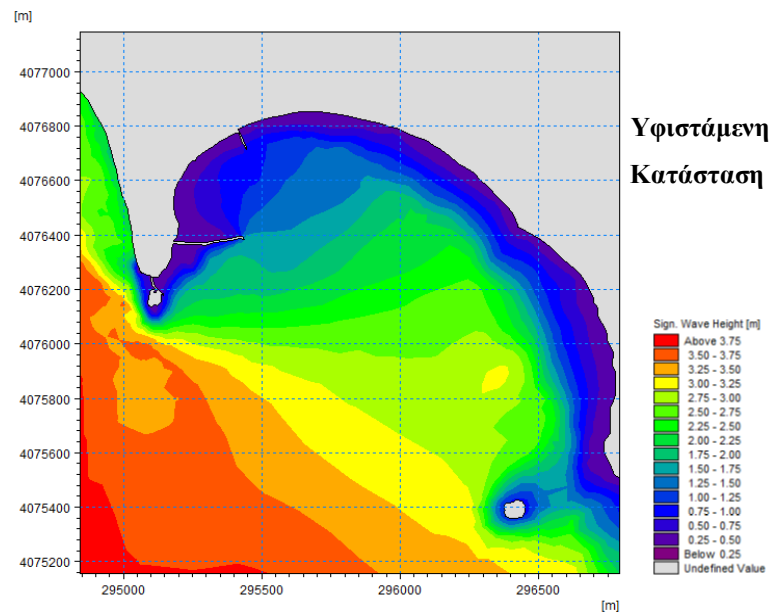
Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων II και III, με στόχο να γίνει επισήμανση της αποτελεσματικότερης διάταξης του λιμενοβραχίονα (υφιστάμενος, αρχαίος λιμενοβραχίονας).

Αναφορικά με το κυματικό μοντέλο, η εναλλακτική λύση III παρουσιάζει καλύτερη διαβάθμιση στη μείωση της κυματικής ενέργειας καθώς ο κυματισμός προσεγγίζει την ακτή. Το γεγονός αυτό καθιστά πιο εύκολο και ασφαλή τον ελλιμενισμό των σκαφών.

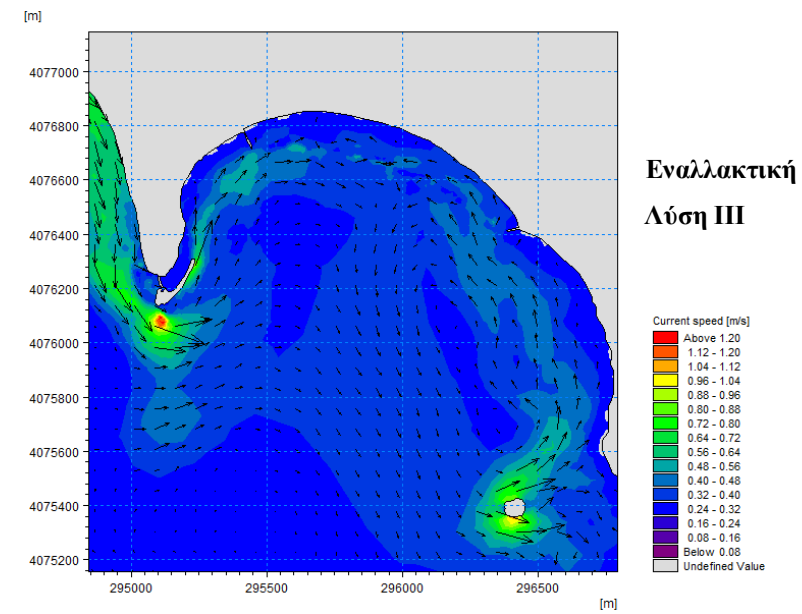
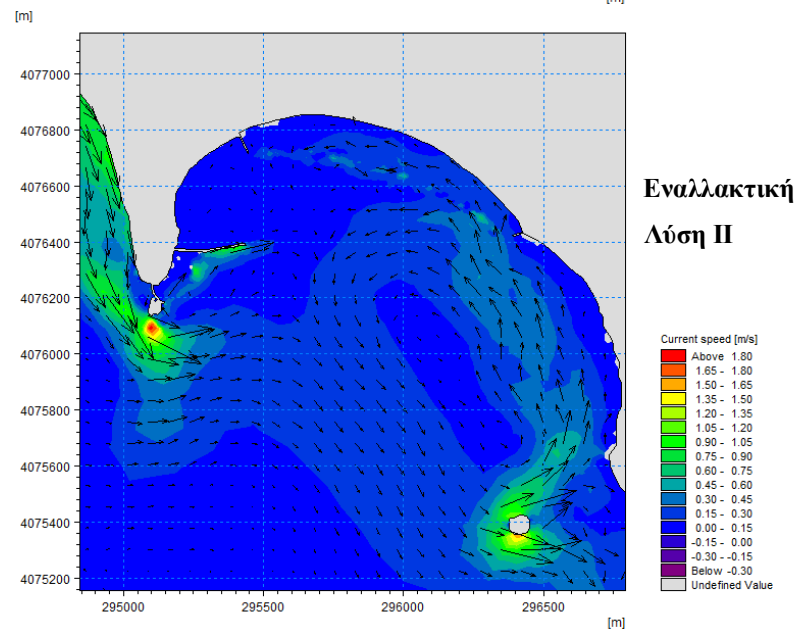
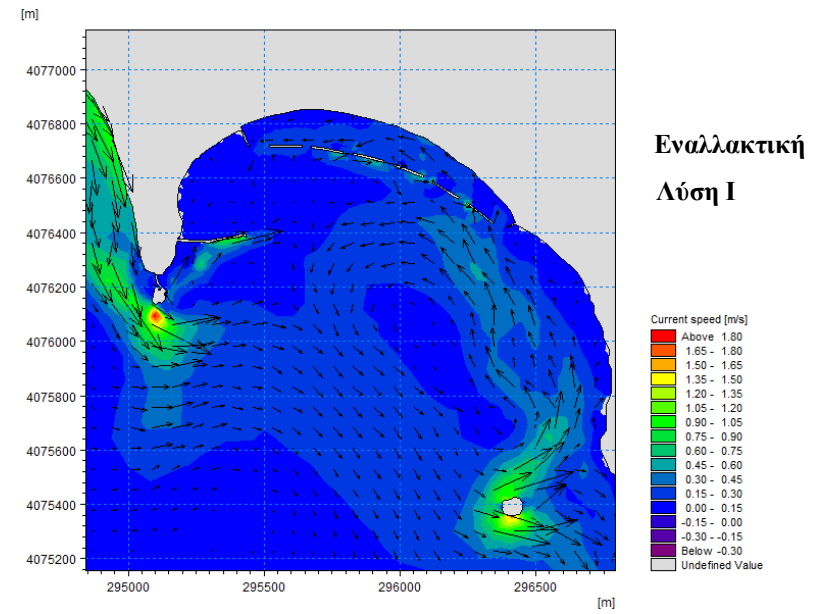
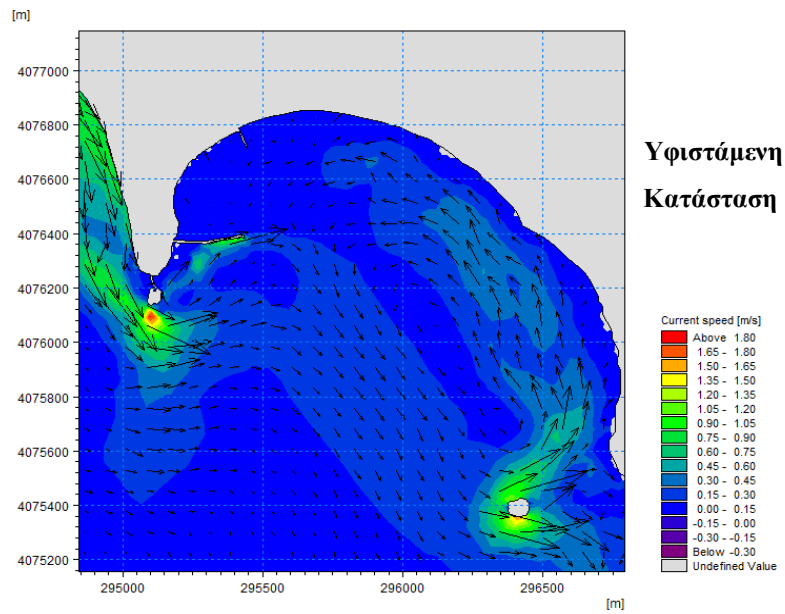
Στη συνέχεια, και στις δύο εναλλακτικές διατάξεις οι τιμές των ταχυτήτων ήταν αυξημένες, όπως ήταν αναμενόμενο, στους προσήνεμους λιμενοβραχίονες.

Ως προς την εξέλιξη του πυθμένα, η προσομοίωση της εναλλακτικής λύσης III παρουσιάζει σημαντική μείωση των διαβρώσεων εντός της λιμενολεκάνης, συγκριτικά με την λύση II. Επιπλέον, με την αφαίρεση του υπάρχοντος βραχίονα αντιμετωπίζεται σε ικανοποιητικό βαθμό το πρόβλημα της πρόσχωσης του λιμένα.

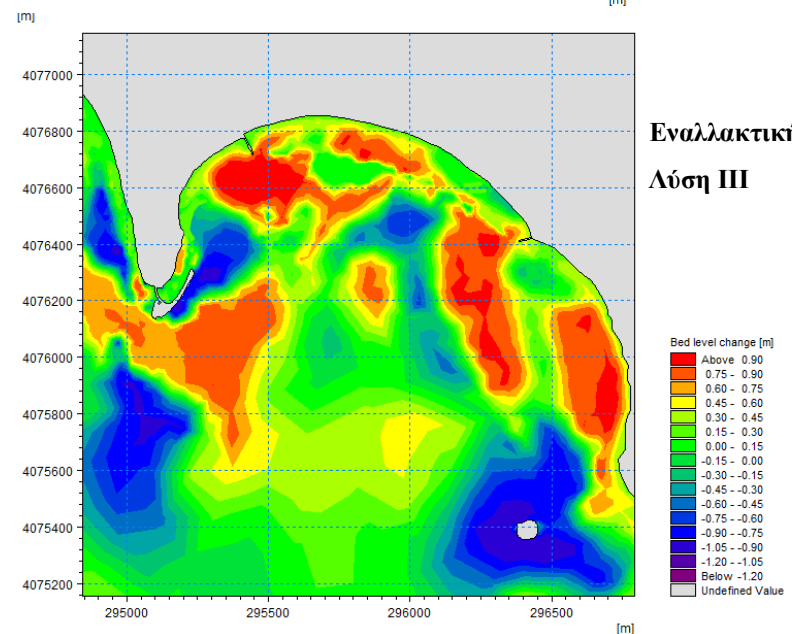
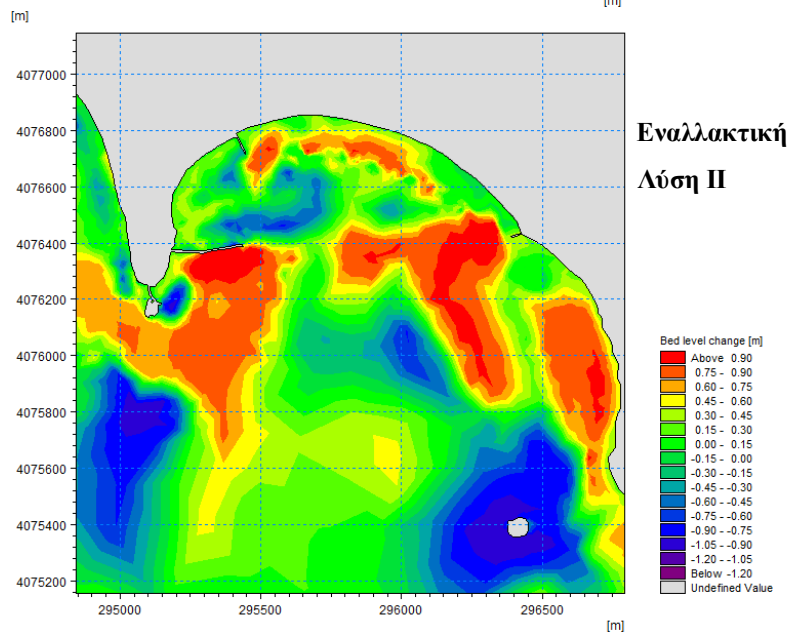
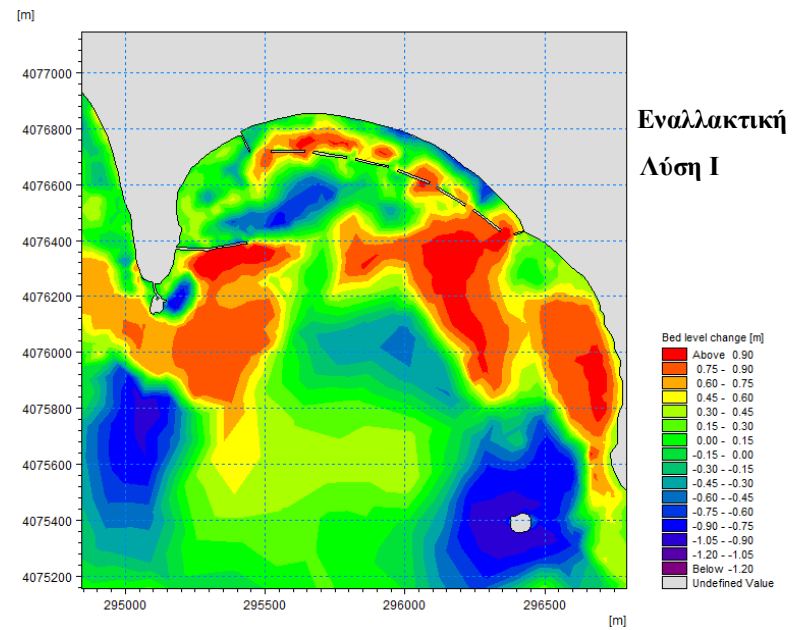
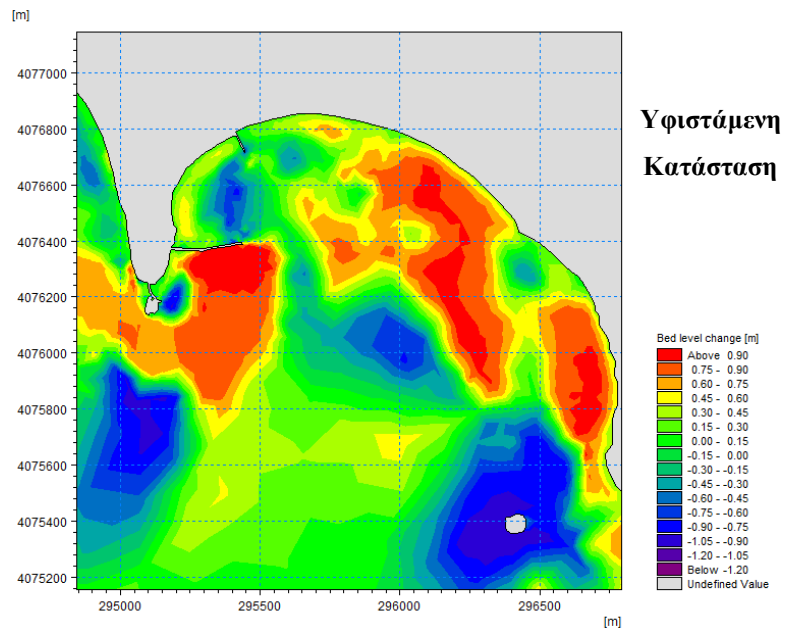
Με βάση τη συγκριτική αξιολόγηση των τριών εναλλακτικών διατάξεων, προτείνεται η υιοθέτηση της εναλλακτικής λύσης III, με την κατασκευή συστήματος έξι ύφαλων κυματοθραυστών, μήκους 120m ο καθένας, και την αντικατάσταση του υφιστάμενου λιμενοβραχίονα. Τέλος, πρόσθετα μέτρα για την αντιμετώπιση της διάβρωσης αποτελούν η τεχνητή αναπλήρωση της ακτής και η δημιουργία μια ζώνης με ήπια κλίση μεταξύ της ακτογραμμής και του παράκτιου δρόμου της Μεθώνης.



Σχήμα 56. Συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των Εναλλακτικών διατάξεων ως προς το ύψος κύματος



Σχήμα 57. Συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των Εναλλακτικών διατάξεων ως προς τα κυματογενή ρεύματα



Σχήμα 58. Συγκριτική αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης και των Εναλλακτικών διατάξεων ως προς τη στερεομεταφορά

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

7.1. Σύνοψη Συμπερασμάτων

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

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ευστάθεια της παράκτιας περιοχής της Μεθώνης, υπό συνθήκες ισοδύναμου κυματικού κλίματος. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του μοντέλου MIKE 21 και εφαρμόστηκαν για την ευρύτερη περιοχή μελέτης, η οποία εισήχθη στο μοντέλο με τη μορφή τριγωνικού κανάβου flexible mesh. Με την εφαρμογή του μοντέλου MIKE 21 λοιπόν, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί ύψους κύματος, ταχυτήτων ρευμάτων, πυκνοτήτων ροής και στερεομεταφοράς.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα για το ετήσιο ισοδύναμο κυματικό κλίμα, το κυματικό και υδροδυναμικό μοντέλο φαίνεται να προσομοιώνει ορθά την ανταπόκριση της ακτής, με το ύψος κύματος να μην ξεπερνάει τα 0,5 m στα 100 m από την ακτογραμμή. Ωστόσο, το μοντέλο στερεομεταφοράς φαίνεται να μην ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες της περιοχής, όπως αυτές προκύπτουν έπειτα από την ανάλυση ιστορικών αεροφωτογραφιών και των παρατηρήσεων στο πεδίο. Το κύριο συμπέρασμα της παραπάνω διερεύνησης είναι ότι η ακτή της Μεθώνης αντιμετωπίζει πρόβλημα διάβρωσης στο κεντρικό τμήμα της, ενώ εντοπίζονται προβλήματα προσάμμιωσης εντός της λιμενολεκάνης.

Συνολικά προσομοιώθηκαν τρεις Εναλλακτικές λύσεις για την προστασία της ακτής, οι οποίες σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τα πραγματικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η συγκεκριμένη περιοχή. Συγκεκριμένα, η Εναλλακτική λύση I περιλαμβάνει την κατασκευή συστήματος έξαλων κυματοθραυστών στην περιοχή της ακτής όπου εντοπίζεται σημαντική διάβρωση. Στην Εναλλακτική λύση II διερευνάται η κατασκευή συστήματος ύφαλων κυματοθραυστών στην ίδια περιοχή, ενώ στην Εναλλακτική λύση

III προτείνεται, επίσης, η αντικατάσταση του υφιστάμενου λιμενοβραχίονα, μέσω της ανακατασκευής του αρχαίου λιμένα της Μεθώνης. Ως καταλληλότερη κρίνεται η Εναλλακτική λύση III καθώς περιλαμβάνει έργα ήπιας μορφής που εναρμονίζονται με το φυσικό περιβάλλον της περιοχής και παρέχει επαρκή προστασία έναντι της παρατηρούμενης διάβρωσης. Συμπληρωματικά με την Εναλλακτική λύση III προτείνεται η τεχνητή αναπλήρωση της ακτής και η δημιουργία μια ζώνης με ήπια κλίση μεταξύ της ακτογραμμής και του παράκτιου δρόμου της Μεθώνης.

Ωστόσο, κρίνεται ορθό να αναφερθεί ότι η διάβρωση του πυθμένα, που επισημάνθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία ως πρόβλημα, είναι δύσκολο να διαπιστωθεί γενικότερα καθώς απαιτείται (α) η χρήση καταλληλότερου μοντέλου, το οποίο να προσομοιώνει την εγκάρσια στερεομεταφορά, (β) η χρήση δεδομένων μεγαλύτερης ανάλυσης και (γ) η ύπαρξη δεδομένων ακριβείας του πραγματικού πεδίου.

7.2. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

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

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

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

Τέλος, αξίζει να διερευνηθεί η προσομοίωση της δράσης των κυματισμών με παράλληλη ροή εισερχόμενου ύδατος και ιζήματος από τους εφήμερους χειμάρρους λόγω βροχόπτωσης στο πρόγραμμα Flow Model FM. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατό να μελετηθεί πιο αντιπροσωπευτικά και ολοκληρωμένα η ανταπόκριση της παράκτιας περιοχής σε τέτοια συνδυασμένα φαινόμενα.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Δήμας Α.Α., 2011, *Εισαγωγή στην Μελέτη Λιμενικών Έργων, Διδακτικές Σημειώσεις, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα*
- Καραμπάς Θ., Καμπάνης Ν., 2010, *Ερευνητικό Έργο για την επίλυση του προβλήματος διάβρωσης, τη προστασία και ανάπλαση της ακτογραμμής και τη μείωση του προσπίπτοντος κυματισμού, ανατολικά της μαρίνας Ρεθύμνου, Ακτομηχανική Μελέτη, Ηράκλειο*
- Καραμπάς Θ., Κρεστενίτης Ι. και Κουτίτας Χ., 2015, *Ακτομηχανική-Έργα Προστασίας Ακτών, κεφ. Παράκτια Στερεομεταφορά, Μορφοδυναμική των ακτών, Διάβρωση ακτών, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2092>*
- Κουτίτας Χ., 1994, *Εισαγωγή στην Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα, Θεσσαλονίκη*
- Μέμος Κ., 2008, *Εισαγωγή στα λιμενικά έργα, Αθήνα*
- Μουτζούρης Κ., 2005, *Εισαγωγή στην ακτομηχανική, Σημειώσεις Πολυτεχνείου για το μάθημα «Ακτομηχανική», Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ, Αθήνα*
- Arnouil D.S., 2006, *Shoreline Response for a Reef Ball™ Submerged Breakwater System Offshore of Grand Cayman Island. Paper of Master Thesis, Florida Institute of Technology*
- Borah K. and Balloffet A., 1985, *Beach evolution caused by littoral drift barrier, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, vol 111, no4, 645-660*
- Church J., White N., January, 2006, *A 20th century acceleration in global sea-level rise, Australia*
- Doody P., Ferreira M., Lombardo S., Lusius I., Misdore R., Niesing H., Salman A., Smallegange M., (2004), *Living with coastal erosion in Europe: Sediment and space for sustainability, Luxembourg*
- D.H.I., 2013, *MIKE 21 SW FM User Guide and Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute.*
- D.H.I., 2014, *MIKE Littoral Processes FM User Guide and Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute*
- D.H.I., 2015, *MIKE 21 HD FM User Guide and Scientific Documentation. Danish Hydraulic Institute*

Etemad-Shahidi A., Kazeminezhad M.H., and Mousavi S.J., 2009, *On the prediction of wave parameters using simplified methods*, *Journal of Coastal Research, Special Issue*, 56, 5005-509

IPCC (2007a) *Climate Change, 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press

Markopoulos A.P., Fragkou A., Kasidiaris P.D, Davim J P., 2015, *Gamification in engineering education and professional training*. *International Journal of Mechanical Engineering Education*, Vol. 43, Issue 2, pp. 118 - 131

Repousis E., Ziros A., Chondros M., Memos C., 2015, *Efficient sediment management at the entrance of an ancient harbor*. *IAHR World Congress, The Netherlands*

U.S. Army, 2006, *Coastal Engineering Manual. Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate*, Washington, DC: *Engineer Manual 1110-2-1100*, U.S. Army Corps of Engineers

Ιστοσελίδες

https://aristomenismessinios.blogspot.com/2014/01/blog-post_12.html (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<http://www.bathingwaterprofiles.gr/en/bathingprofiles/GRBW019257026>
(τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://www.climatetechwiki.org/content/seawalls> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://earth.google.com/web/> (τελευταία πρόσβαση στις 15/10/2019)

<https://www.earthmagazine.org/article/dutch-masters-netherlands-exports-flood-control-expertise> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-sea-level>
(τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://www.ert.gr> (τελευταία πρόσβαση στις 12/8/2019)

<http://www.escp.org.uk> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://filotis.itia.ntua.gr/biotopes/?category=1> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://foninews.gr/φωτογραφιες-τεράστια-προβλήματα-από/> (τελευταία πρόσβαση στις 30/10/2019)

http://www.hnms.gr/emy/el/climatology/climatology_city?perifereia=Peloponnese&poli=Kalamata (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://www.ilialive.gr/επικαιρότητα/item/ηλεία-νέες-συλλήψεις-για-παράνομη-αμμοληψία-στον-ποταμό-αλφειό.html> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<http://www.ingemar.it/en/products-services/product/Floating-breakwaters-9> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://www.kastra.eu/castlegr.php?kastro=methoni> (τελευταία πρόσβαση στις 10/10/2019)

<http://www.reefball.org/album/oman/procreatorproject/monitoring/index.html> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://www.travelstyle.gr/periigisi-sta-kastra-tis-methwnis-kai-tis-korwnis/> (τελευταία πρόσβαση στις 10/10/2019)

<https://www.usgs.gov/centers/nj-water> (τελευταία πρόσβαση στις 29/10/2019)

<https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@6&key=gxyfFsxzoC> (τελευταία πρόσβαση στις 30/10/2019)