



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
ΓΙΑ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ**

Γεώργιος Παπαδόπουλος

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

**ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ**

Επιβλέπουσα: Αν. Καθηγήτρια Β. Τσουκαλά

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ την καθηγήτριά μου και επιβλέπουσα αυτής της εργασίας Βασιλική Τσουκαλά για την εξαιρετική ευκαιρία και την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε. Τον Μιχάλη Χονδρό για την αδιάκοπη συμβολή του και τις συμβουλές του για την συγγραφή αυτής της εργασίας. Την οικογένεια και τους φίλους μου που με στήριξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε μια μελέτη λιμενικών έργων, ο υπολογισμός των στοιχείων της κατασκευής γίνεται κατά κανόνα με βάση κύμα σχεδιασμού που έχει προκύψει από κάποια μαθηματική εξίσωση κυματικής γένεσης. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα τέτοιων εξισώσεων που προσφέρουν ταχύτητα και ευκολία στον υπολογισμό έναντι αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης που απαιτούν χρόνο και μεγάλα ποσά υπολογιστικής ισχύος. Η έλλειψη προδιαγραφών ωστόσο για το ποια μαθηματική εξίσωση είναι κατάλληλη σε κάθε κατηγορία γεωμετρίας της περιοχής μελέτης έχει οδηγήσει τους μηχανικούς στο να κάνουν αυθαίρετες επιλογές και να καταλήγουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα, είτε υπερδιαστασιολογώντας και άρα ξοδεύοντας περιττούς πόρους για την κατασκευή έργων, είτε υποεκτιμώντας τα κυματικά μεγέθη και τελικά η κατασκευή να κινδυνεύει με ζημιές ή κατάρρευση.

Από προηγούμενη εργασία έχει φανεί πως για κάθε είδος γεωμετρίας της περιοχής μελέτης αντιστοιχεί και διαφορετική μαθηματική εξίσωση υπολογισμού του κυματικού κλίματος. Το συμπέρασμα αυτό προχωράει ένα βήμα παραπέρα και εξετάζεται σε επίπεδο σχεδιασμού έργων, ευστάθειας της κατασκευής, κόστους των υλικών και λειτουργικότητας του έργου. Για να επιτευχθεί αυτό, γίνεται μια σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων λαμβάνοντας κυματικά δεδομένα στα βαθιά ύδατα τα οποία έχουν προκύψει από μαθηματικές εξισώσεις της βιβλιογραφίας και εξετάζονται οι διαφορές τους στο κύμα σχεδιασμού των λιμενικών και ακτομηχανικών έργων.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν έχουν μεγάλη σημασία, αφού ξεκαθαρίζουν τις διαφορές που παρατηρούνται από τη χρήση διαφορετικών μαθηματικών εξισώσεων, επιβεβαιώνουν προηγούμενες παρατηρήσεις για την υπεροχή κάποιων εξισώσεων έναντι άλλων σε συγκεκριμένες περιοχές μελέτης και τονίζουν την αναγκαιότητα της ορθής εφαρμογής τους από τους μηχανικούς.

ABSTRACT

During a harbor works study, the design of the construction is usually achieved via a design wave that has been calculated using a wave-generation mathematical equations. In the bibliography there exists a multitude of such equations that offer fast and easy calculation as opposed to numerical simulations that require time and large amounts of computational power. However, the lack of standards for which mathematical equation is suitable on each type of area has driven the engineers into making arbitrary choices and being led to incorrect results, either by over-engineering and therefore wasting resources in the construction, or by underestimating the wave parameters and endangering the construction by damage or collapse.

From a previous study it has been shown that for each type of geometry of an area of study corresponds a different wave-generation mathematical equation. This conclusion is taken one step further and is being examined on a design, stability, material cost and overall function aspect of the works. To this end, a series of numerical simulations is being conducted by using deep water wave parameters calculated by mathematical models as inputs and the differences on the design wave of port and coastal constructions that arise are being examined.

The resulting conclusions are crucial, as they clear up any differences that emerge from the use of various mathematical equations, they confirm previous remarks on the predominance of some equations over others when applied on specific areas of study and highlight the need for proper application from the engineers.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Harbor and coastal works can be designed by using a mathematical expression/equation to calculate wave climate (i.e. wave height and period). The nature of these expressions is simple and fast-to-use compared with numerical simulations that require significant amounts of time for set-up and computation. However, the mathematical equations come with the cost of accuracy as they are derived from empirical observations. The fact that there are no standards or guidelines for the use of the mathematical equations, leads the engineers into choosing them arbitrarily and often result in over-engineered constructions that waste resources, or under-engineered ones that are vulnerable to damage or collapse.

In a previous study conducted by A. Stamatiadis (2019), it has been shown that for each type of geometry of the study area corresponds one suitable mathematical equation to better predict the design wave. The present study takes these conclusions one step further and applies them on harbor and coastal works to effectively review the differences that arise from each mathematical equation with regards to stability design, cost and overall functionality.

The comparison is conducted using the numerical modelling tools MIKE 21 SW for the wave transformations simulation and MIKE 21/3 Coupled Model for the sediment transport simulation. MIKE 21 SW is mainly used for the design of harbor protecting breakwaters and the stability design of their armor, and MIKE 21/3 Coupled Model for the design and positioning of breakwaters for the purpose of coastal protection against erosion.

Wind Generated Waves

The generating factor for this type of waves is -as the name suggests- the wind. These are waves with periods between 1-30 seconds which are classified as gravity waves. The term “wind-generated” is being used to separate them from other types of waves, generated by earthquakes, landslides, or tides. The key characteristics of a wind generated wave are its height and period. The wind transfers energy on the sea surface via friction or atmospheric pressure gradient. The energy losses result from turbulent movement of the water molecules usually during wave break and this is the main reason that wind waves can carry their energy over large distances. The wave height is dependent on the wind speed, duration and fetch.

Fetch

Fetch is an area of ocean or lake surface over which the wind blows in an essentially constant direction, thus generating waves. The term also is used as a synonym for fetch length, which is the horizontal distance over which wave-generating winds blow. Together with wind speed and duration, it determines the wave height and period of the generated waves; by increasing the fetch distance, the energy that transfers to the wave is increased and this results in a

larger wave. The wind duration is also essential to determine whether the conditions of the wave are fetch-limited (where the critical component in wave generation is the fetch) or duration-limited (where the critical component in wave generation is the duration of the wind).

For every different mathematical equation for wave generation, corresponds a way to calculate the fetch of a study area, usually by extending radii from the point of interest up to the next coast for a given compass direction. As stated before, for every fetch geometry (Narrow Fetch, Restricted Fetch, Open Sea) there is a suitable mathematical equation that calculates the design wave with accuracy.

Wave Transformations

When the bottom bed has a non-constant depth, the direction of wave propagation is not perpendicular to the shore, or when man-made or natural obstacles come in the way, then the wave is subjected to transformations that change its height, length or direction of propagation. These phenomena are described by the effects of shoaling, refraction, diffraction and reflection.

Shoaling is the change of wave height as an effect of transitioning from deep waters to intermediate and shallow waters. It is caused by the fact that the group velocity, which is also the wave-energy transport velocity, changes with water depth. Under stationary conditions, a decrease in transport speed must be compensated by an increase in energy density in order to maintain a constant energy flux.

Refraction is the bending of a wave-front as it travels at different speeds over water of different depths. When different parts of the same wave-front travel at different speeds, the wave bends towards the slower part. The shallower the water, the slower the wave; therefore, the wave bends towards the shallower water

Diffraction of water waves is observed in a harbor as waves bend around the breakwaters and are found to disturb the water behind them.

Reflection involves a change in direction of waves when they bounce off a barrier like a vertical breakwater or a bottom bed step-up.

Sediment Transport

Sediment transport is divided in two categories: bed load and suspended load. The first is defined as the transport of material on the bottom bed and the latter as the material that stays suspended for a certain amount of time due to turbulence.

The direction of sediment transport consists of a long-shore and a cross-shore component. Long-shore sediment transport is observed when a wave propagates at a non-perpendicular angle to the shore. This in turn creates a long-shore current with maximum speed on the

break line and a linear gradient up to the coastline. The cross-shore component is usually a subject of tidal motions.

Harbor Construction Design

The most frequent construction method of harbor and coastal works in Greece is rubble-mound breakwaters, by creating a trapezoid cross section using natural or concrete boulders. This method has the advantage of inherently creating stable constructions as opposed to vertical front breakwaters, even after suffering partial failure. Furthermore, the sloped sides can absorb the incident wave energy and reduce the reflection coefficient almost to 0. However, due to their large dimensions, they require large quantities of construction materials.

Hydraulic Stability of Armor

The design of the breakwater armor is conducted using the Hudson formula:

$$W_{50} = \frac{\gamma H^3}{K_D \Delta^3 \cot \theta} \quad (1)$$

Where W_{50} is the median weight of the boulders, γ is the specific weight of the stone used, H the design wave, K_D is the stability coefficient, Δ is the specific density of the stone used and θ is the slope angle.

The weight of the boulders can be converted into a typical diameter using the following formula:

$$D = 1.15 \left(\frac{W}{\gamma} \right)^{1/3} \quad (2)$$

The basic advantages of the Hudson formula are its simplicity and wide range of application. However, as a downside, it only considers monochromatic waves, does not take in account the wave period, the duration of the storm or the allowed level of damage and can only be used in permeable constructions with no overtopping.

Numerical Simulation Using MIKE 21 SW & MIKE 21/3 Coupled Models

In his study, A. Stamatiadis (2019) used a multitude of mathematical equations to calculate the deep-water wave climate in three key areas (Patras bay, Syros and Chrysi Isle). Using the results of A. Stamatiadis as inputs for the numerical models, we conduct the simulations in the coastal areas of Patras, Ermoupoli and Ierapetra ports. From these simulations, the incident waves on the breakwaters are derived and used in the design of the armor, according to the Hudson equation. The following table summarizes these results:

Table 1: The stability design of the breakwater armor classified by area and wave calculation method.

H (m)	Weight (tn)	Diameter (m)	Area	Method
3.166	2.843	1.185	Ermoupoli	SMB
2.482	1.370	0.929		Wilson
1.506	0.306	0.564		JONSWAP
2.968	2.342	1.111		Donelan
1.665	0.413	0.623		CERC
1.558	0.339	0.583		ACES
1.660	0.410	0.621		CEM
3.468	3.736	1.298	Ierapetra	SMB
3.156	2.816	1.181		Wilson
3.468	3.736	1.298		JONSWAP
2.090	0.818	0.782		Donelan
3.418	3.577	1.279		CERC
2.867	2.111	1.073		ACES
3.468	3.736	1.298		CEM
2.542	1.471	0.951	Patra	SMB
2.079	0.805	0.778		Wilson
2.458	1.330	0.920		JONSWAP
3.190	2.908	1.194		Donelan
3.285	3.176	1.229		CERC
3.117	2.713	1.166		ACES
2.496	1.393	0.934		CEM

Considering Table 1, it is apparent that there are significant differences in the resulting boulder size between each method of wave calculation.

The boulder sizes above are used for the design of a breakwater with a typical trapezoid cross section in place of the existing constructions, in order to determine the cost of materials that would be needed. As Figure 1 shows, the final cost of the breakwater, varies significantly with each method used.

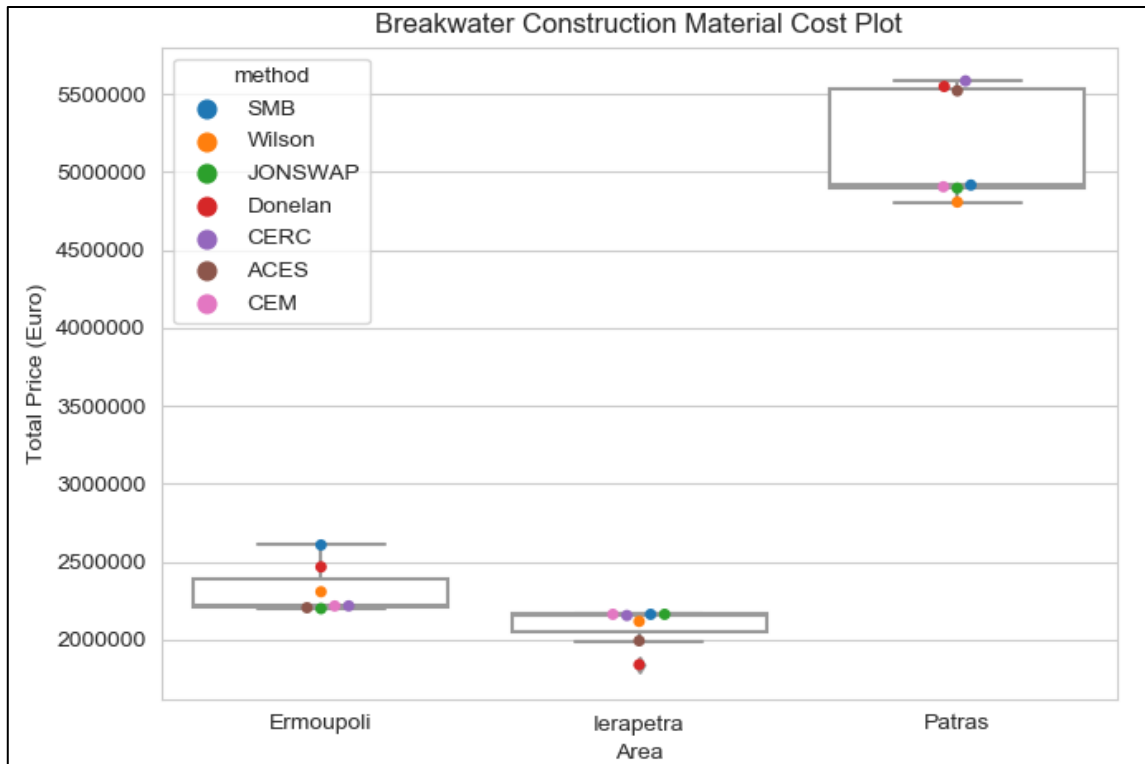


Figure 1: Boxplot of the material cost of the breakwaters, categorized by area. The colored points denote the mathematical methods used for the wave calculation.

The coastal protection application is conducted to determine the differences of each mathematical equation on the functionality of coastal works against erosion. Using the results of the MIKE 21 SW and the instructions of Karambas et al. (2015) for coastal protection breakwater design and placement, we end up with the following figures:

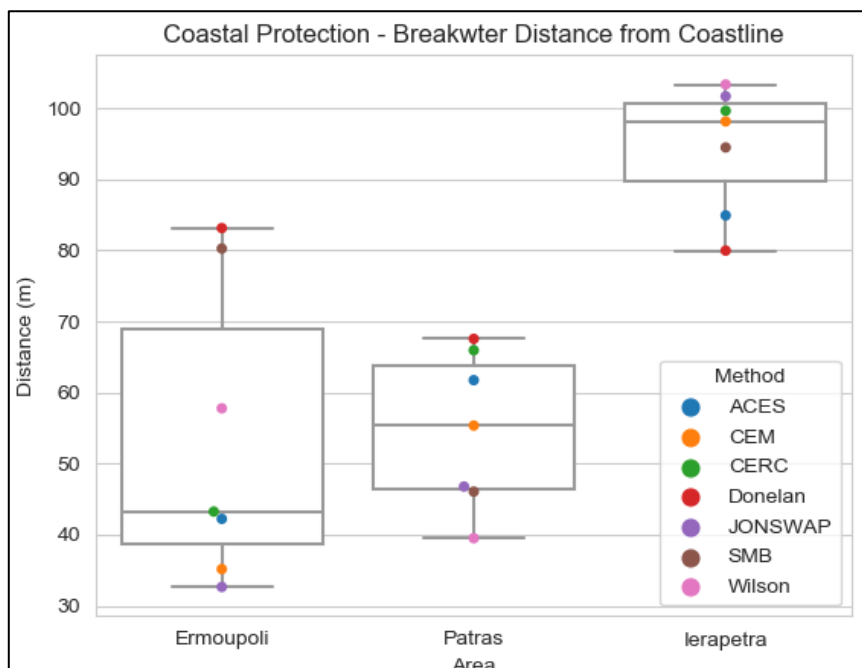


Figure 2: Boxplot of the breakwater distance from the shore, categorized by area. The colored points denote the mathematical methods used for the wave calculation.

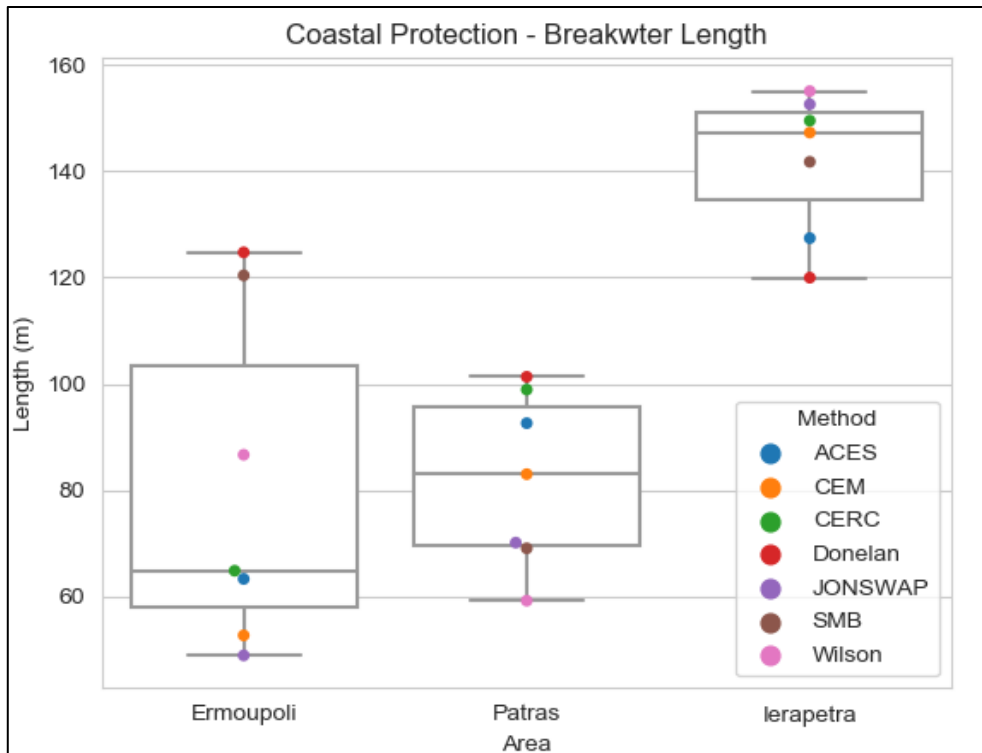


Figure 3: Boxplot of the breakwater length, categorized by area. The colored points denote the mathematical methods used for the wave calculation.

The coastal area of Ermoupoli is then chosen as a study area and is tested using the Donelan and JONSWAP methods of wave calculation (which produced the largest and smallest wave height on the previous simulation in that area respectively). The scenarios that are considered are summarized in the following Table and are conducted using the MIKE 21/3 Coupled Model.

Table 2: The scenarios categorized by intervention type and wave calculation method.

	Non-intervention Scenarios	Scenarios 1: Breakwater construction using Donelan equations	Scenarios 2: Breakwater construction using JONSWAP equations
A: Incident wave calculated with Donelan equations	Scenario 0A	Scenario 1A	Scenario 2A
B: Incident wave calculated with JONSWAP equations	Scenario 0B	Scenario 1B	Scenario 2B

Conclusions

In a previous study it was shown that there is not a mathematical equation for wave generation that can be applied globally on every area -as determined by A. Stamatiadis; instead, for each fetch geometry corresponds a suitable mathematical equation.

The simulations in the present study show that using different mathematical equations to determine a design wave, result in varying boulder sizes of the breakwater armor, and cost of materials. The correspondence of a best fitting mathematical equation for every fetch geometry still applies on the small-scale level of these simulations. Furthermore, the mathematical equations that produce the most conservative (largest) deep-water wave height for each study area are the ones that result in the largest boulder sizes. The mathematical equations from which occur more conservative wave heights, can lead to designs in favor of safety, however it is not practical, in that it can lead to over-engineering constructions with greater financial and environmental cost. The use of mathematical equations is an effective alternative -in the absence of wave datasets in the study areas- that must be performed within a broad framework of instructions and rules about their application.

The material cost of the harbor constructions seems to be proportional to the design wave. It is therefore tempting for the engineer to take the cost into consideration and calculate the design wave using a mathematical equation that will result in the best technical and economical design.

Finally, the functionality of coastal protection works is achieved by the correct design and placement of the breakwater according to the design wave. The situation here is more complex than the stability design as it was shown in the example of Ermoupoli where the breakwater did not function as intended when used against a larger and a smaller wave.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	i
ABSTRACT.....	ii
EXTENDED ABSTRACT	iii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	xix
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Στόχος – Μεθοδολογία	1
2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ.....	3
2.1 Εισαγωγικοί Ορισμοί.....	3
2.1.1 Λιμενικά Έργα	3
2.1.2 Ανεμογενείς Κυματισμοί.....	3
2.1.3 Γραμμικά Κύματα.....	4
2.1.4 Ανάπτυγμα Πελάγους.....	7
2.2 Ενέργεια και Ισχύς Κυματισμού	9
2.3 Στατιστική Ανάλυση Κυματισμών	10
2.3.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου	10
2.3.2 Ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων	12
2.4 Μετασηματισμοί Κυμάτων στα Ρηγά Ύδατα	16
2.4.1 Ρήγωση.....	16
2.4.2 Διάθλαση	18
2.4.3 Περίθλαση.....	20
2.4.4 Ανάκλαση	22
2.5 Στερεομεταφορά.....	24
2.5.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής	24
2.5.2 Εγκάρσια στερεομεταφορά.....	25
3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ.....	27
3.1 Γενικά	27
3.2 Σχεδιασμός Λιμενικών Έργων - Κυματοθραυστών.....	28
3.2.1 Κυματογενής Αναρρίχηση – Μετάδοση	28
3.2.2 Υδραυλική Ευστάθεια Θωράκισης	34

4	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.....	36
4.1	SMB	36
4.2	Wilson.....	37
4.3	JONSWAP.....	38
4.4	CERC	39
4.5	Donelan	40
4.6	ACES.....	42
4.7	CEM	44
5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21 SW	46
5.1	Εισαγωγή.....	46
5.2	Σύντομη Περιγραφή του MIKE 21 SW.....	46
5.3	Πεδίο Εφαρμογής.....	47
5.4	Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου	47
5.5	Δεδομένα Εισόδου	49
5.5.1	Υπολογιστικό πλέγμα και βαθυμετρία	49
5.5.2	Οριακές συνθήκες.....	49
5.5.3	Συντελεστές τριβής πυθμένα.....	49
5.5.4	Πεδίο ανέμου.....	50
6	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21/3 COUPLED MODEL 51	
6.1	Εισαγωγή.....	51
6.2	Σύντομη Περιγραφή του MIKE 21/3 Coupled Model	51
6.3	Πεδίο Εφαρμογής.....	51
6.4	Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου	52
6.4.1	Υδροδυναμικό μοντέλο & Μοντέλο Μεταφοράς – Αριθμητική Διακριτοποίηση 52	
6.4.2	Χρονική Ολοκλήρωση	53
6.4.3	Μοντέλο Μεταφοράς Άμμου	53
7	ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ MIKE 21 SW ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	55
7.1	Περιοχές Μελέτης	55
7.1.1	Πατραϊκός Κόλπος – Νέο Λιμάνι Πατρών.....	55
7.1.2	Σύρος – Λιμένας Ερμούπολης	57

7.1.3	Ιεράπετρα.....	59
7.2	Μεθοδολογία.....	60
8	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	64
8.1	Νέο Λιμάνι Πατρών.....	64
8.2	Λιμένας Ερμούπολης.....	68
8.3	Ιεράπετρα.....	73
8.4	Συνοπτική Παρουσίαση.....	77
8.5	Σχεδιασμός Θωράκισης Κυματοθραυστών.....	80
8.5.1	Ευστάθεια Θωράκισης.....	80
8.5.2	Κοστολόγηση κατασκευών.....	82
8.6	Ακτομηχανική Μελέτη – Προστασία Ακτογραμμής.....	84
8.6.1	Επιλογή ακτών μελέτης.....	85
8.6.2	Σχεδιασμός κυματοθραυστών.....	86
8.6.3	Αριθμητική επαλήθευση μέσω MIKE 21/3.....	89
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	105
9.1	Συνοπτικά Συμπεράσματα.....	105
9.2	Περεταίρω Έρευνα.....	106
10	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	108

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 Το προφίλ ταχυτήτων των υγρών σωματιδίων σε οδεύον κύμα (Μέμος, Θαλάσσια Υδροδυναμική, 2016).....	6
Εικόνα 2.2 Η ελλειπτική τροχιά των υγρών σωματιδίων (Μέμος, Θαλάσσια Υδροδυναμική, 2016).	7
Εικόνα 2.3 Η τυχαία κατάσταση της ελεύθερης επιφάνειας (πηγή: https://www.shutterstock.com).....	7
Εικόνα 2.4 Παράδειγμα έκθεσης των ακτών του Ηνωμένου Βασιλείου (πηγή: https://slideplayer.com/slide/11348347).	8
Εικόνα 2.5 Χρονοσειρά ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας - Wave Elevation (πηγή: Ashkan Rafiee et al., 2016).	10
Εικόνα 2.6 Γραφική παράσταση τυπικής κατανομής Rayleigh $\sigma=1$, $\gamma=0$ (αριστερά) και η αντίστοιχη αθροιστική κατανομή (δεξιά) (πηγή: OpenTURNS 1.17dev documentation).	11
Εικόνα 2.7 Από την υπέρθεση μονοχρωματικών κυματισμών προκύπτει η τυχαία καταγραφή της ελεύθερης επιφάνειας (πηγή: "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", 1991).	13
Εικόνα 2.8 Απεικόνιση φασμάτων κυματισμών για διάφορες ταχύτητες ανέμου (Moskowitz, 1964).	15
Εικόνα 2.9 Σκαρίφημα διατομής μοντέλου παράκτιας ζώνης με επίπεδο πυθμένα σταθερής κλίσης (Δήμας, 2016).	17
Εικόνα 2.10 Μεταβολή ύψους κύματος ως προς το σχετικό βάθος λόγω ρήξης (Δήμας, 2016).	17
Εικόνα 2.11 Παράδειγμα διάθλασης κυματισμού (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)	18
Εικόνα 2.12 Μεταβολή ύψους κύματος κατά μήκος της ακτίνας διάδοσης (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).	19
Εικόνα 2.13 Σχηματική απεικόνιση περίθλασης από κυματοθραύστη ημιαπείρου μήκους (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).	21
Εικόνα 2.14 Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή K' για περίθλαση από κυματοθραύστη ημιαπείρου μήκους και γωνία πρόσπτωσης $\gamma=90^\circ$ (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).	21
Εικόνα 2.15 Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και τροχιές σωματιδίων ρευστού κατά την ολική (άνω) και μερική (κάτω) ανάκλαση μονοδιάστατου κύματος σε κατακόρυφο τοίχο (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)	22
Εικόνα 2.16 Κατανομή της αδιάστατης μέσης ταχύτητας κυματογενούς ρεύματος κατά μήκος ακτογραμμής. Με διακεκομμένες φαίνεται το μοντέλο που συμπεριλαμβάνει και διάχυση της ορμής (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)	25

Εικόνα 3.1 Τύποι έργων προστασίας με πρανή (Μέμος, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, 2013).	27
Εικόνα 3.2 Διάφορες μορφές τεχνητών ογκόλιθων (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).	28
Εικόνα 3.3 Ορισμός μεγεθών για την κυματογενή αναρρίχηση (USACE, Shore Protection Manual, 1984).	29
Εικόνα 3.4 Αναρρίχηση σε διαπερατά πρανή κυματοθραυστών (Μέμος, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, 2013).	29
Εικόνα 3.5 Τομές εξωτερικών έργων προστασίας και αντίστοιχοι συντελεστές διαπερατότητας P (van der Meer & Stam, 1992)	31
Εικόνα 3.6 Συντελεστής υπερπήδησης K_{T0} για μονοχρωματικό κυματισμό (USACE, Shore Protection Manual, 1984).	32
Εικόνα 3.7 Συντελεστής υπερπήδησης K_{T0} για σύνθετους κυματισμούς (USACE, Shore Protection Manual, 1984).	32
Εικόνα 3.8 Ύψος κύματος λόγω υπερπήδησης ως συνάρτηση του ποσοστού υπέρβασης (USACE, Shore Protection Manual, 1984).	33
Εικόνα 3.9 Οι ορισμοί των παραμέτρων που επηρεάζουν το συντελεστή μετάδοσης.	34
Εικόνα 4.1 Διαγραμματική επεξήγηση και συσχέτιση μεταξύ της κύριας διεύθυνσης κυματικής ενέργειας και διεύθυνσης ανέμου σε ελλειπτική λίμνη (Bishop & Donelan, 1983).	40
Εικόνα 4.2 Διάγραμμα διακριτοποίησης μεταξύ fetch-limited και πλήρως ανεπτυγμένων κυματισμούς (Bishop & Donelan, 1983).	42
Εικόνα 4.3 Οι κανόνες υπολογισμού για την περίπτωση περιορισμένου μήκους αναπτύγματος (Leenknecht, Szuwalski, & Sherlock, 1992).	43
Εικόνα 7.1 Οι τρεις περιοχές μελέτης (Πάτρα, Ερμούπολη, Ιεράπετρα) στον χάρτη της Ελλάδας (πηγή: Google Earth).	55
Εικόνα 7.2 Αεροφωτογραφία του νέου λιμένα Πατρών (πηγή: https://www.patrasport.gr/photo-gallery).	57
Εικόνα 7.3 Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης του νέου λιμένα Πατρών (πηγή: Google Earth).	57
Εικόνα 7.4 Αεροφωτογραφία του λιμανιού της Ερμούπολης (πηγή: https://cyclades24.gr).	58
Εικόνα 7.5 Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης του λιμένα της Ερμούπολης (πηγή: Google Earth).	59
Εικόνα 7.6 Φωτογραφία του λιμανιού της Ιεράπετρας (πηγή: https://www.ierapetra.gr).	60
Εικόνα 7.7 Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης (Ιεράπετρα & Ν. Χρυσή) με μεγέθυνση του αλιευτικού καταφυγίου (πηγή: Google Earth).	60
Εικόνα 7.8 Η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής στο λιμάνι Πατρών.	62

Εικόνα 7.9 Η βαθυμετρία του λιμένα Ερμούπολης και της παράκτιας περιοχής.	62
Εικόνα 7.10 Η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής της Ιεράπετρας και της ν. Χρυσής.....	63
Εικόνα 8.1 Η απεικόνιση της θέσης της τομής AB στο υπολογιστικό πεδίο (αριστερά), η τομή του πυθμένα στον άξονα AB (δεξιά πάνω) και η κλίση κατά τον άξονα AB (δεξιά κάτω) για τον Πατραϊκό Κόλπο.....	64
Εικόνα 8.2 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο ACES στον Πατραϊκό Κόλπο.	65
Εικόνα 8.3 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CEM στον Πατραϊκό Κόλπο.....	65
Εικόνα 8.4 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CERC στον Πατραϊκό Κόλπο.	66
Εικόνα 8.5 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Donelan στον Πατραϊκό Κόλπο.....	66
Εικόνα 8.6 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο JONSWAP στον Πατραϊκό Κόλπο.	67
Εικόνα 8.7 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο SMB στον Πατραϊκό Κόλπο.....	67
Εικόνα 8.8 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Wilson στον Πατραϊκό Κόλπο.	68
Εικόνα 8.9 Η απεικόνιση της θέσης της τομής AB στο υπολογιστικό πεδίο (αριστερά), η τομή του πυθμένα στον άξονα AB (δεξιά πάνω) και η κλίση κατά τον άξονα AB (δεξιά κάτω) για την παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.	69
Εικόνα 8.10 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο ACES στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.....	69
Εικόνα 8.11 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CEM στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.	70
Εικόνα 8.12 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CERC στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.....	70
Εικόνα 8.13 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Donelan στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.	71
Εικόνα 8.14 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο JONSWAP στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.....	71
Εικόνα 8.15 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο SMB στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.....	72
Εικόνα 8.16 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Wilson στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.....	72

Εικόνα 8.17 Η απεικόνιση της θέσης της τομής AB στο υπολογιστικό πεδίο (αριστερά), η τομή του πυθμένα στον άξονα AB (δεξιά πάνω) και η κλίση κατά τον άξονα AB (δεξιά κάτω) για την παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	73
Εικόνα 8.18 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο ACES στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	74
Εικόνα 8.19 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CEM στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	74
Εικόνα 8.20 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CERC στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	75
Εικόνα 8.21 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Donelan στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	75
Εικόνα 8.22 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο JONSWAP στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	76
Εικόνα 8.23 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο SMB στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	76
Εικόνα 8.24 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Wilson στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.	77
Εικόνα 8.25 Γράφημα κατανομής των κυματισμών που έρχονται από τα βαθιά, χωρισμένοι ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού του κύματος.	79
Εικόνα 8.26 Γράφημα κατανομής των κυματισμών που καταλήγουν στους κυματοθραύστες, χωρισμένοι ανά περιοχή μελέτης του κύματος και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.	79
Εικόνα 8.27 Τυπική υποθετική διατομή κυματοθραύστη για την κοστολόγηση των λιμενικών έργων.	82
Εικόνα 8.28 Γράφημα κατανομής του συνολικού κόστους των υλικών κατασκευής κυματοθραύστη (θωράκιση και πυρήνας) για κάθε μέθοδο υπολογισμού, χωρισμένα ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.	84
Εικόνα 8.29 Ακτή μελέτης στην Ερμούπολη Σύρου (πηγή: Google Earth).	85
Εικόνα 8.30 Ακτή μελέτης στην εκβολή του ποταμού Γλαύκου στην Πάτρα (πηγή: Google Earth).	86
Εικόνα 8.31 Ακτή μελέτης «Παραλία Αποβάθρων» στην Ιεράπετρα (πηγή: Google Earth). ...	86
Εικόνα 8.32 Γράφημα κατανομής της απόστασης του κυματοθραύστη από την ακτή ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.	88
Εικόνα 8.33 Γράφημα κατανομής του μήκους του κυματοθραύστη ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.	88
Εικόνα 8.34 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 0Α.	91
Εικόνα 8.35 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 0Β.	91
Εικόνα 8.36 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 0Α.	92

Εικόνα 8.37 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 0B.....	92
Εικόνα 8.38 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 0A.	93
Εικόνα 8.39 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 0B.....	93
Εικόνα 8.40 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 1A.	95
Εικόνα 8.41 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 2B.	95
Εικόνα 8.42 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 1A.....	96
Εικόνα 8.43 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 2B.....	96
Εικόνα 8.44 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 1A.	97
Εικόνα 8.45 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 2B.....	97
Εικόνα 8.46 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 1B.	99
Εικόνα 8.47 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 2A.	99
Εικόνα 8.48 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 1B.....	100
Εικόνα 8.49 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 2A.....	100
Εικόνα 8.50 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 1B.....	101
Εικόνα 8.51 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 2A.	101

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Παράμετροι εμπειρικού υπολογισμού συντελεστή ανάκλασης κυμάτων από παράκτια κατασκευή (Δήμας, 2016).	24
Πίνακας 8.1 Τα δεδομένα εισόδου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, σε κατάταξη ανά μέθοδο υπολογισμού κύματος στα βαθιά και περιοχή μελέτης.	78
Πίνακας 8.2 Συνοπτική ομαδοποίηση των κυματικών δεδομένων ανά περιοχή μελέτης.	80
Πίνακας 8.3 Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού ευστάθειας των κυματοθραυστών για κάθε περιοχή μελέτης και μέθοδο υπολογισμού κύματος.	81
Πίνακας 8.4 Τα μήκη των προσήνεμων κυματοθραυστών στις περιοχές μελέτης.	83
Πίνακας 8.5 Τμήμα του τιμολογίου του Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών.	83
Πίνακας 8.6 Τα αποτελέσματα της ακτομηχανικής μελέτης για την προστασία της ακτογραμμής, για κάθε περιοχή μελέτης και εμπειρική μέθοδο.	87
Πίνακας 8.7 Τα εξεταζόμενα σενάρια ομαδοποιημένα ανά είδος παρέμβασης και μέθοδο υπολογισμού του κυματισμού στα βαθιά.....	90
Πίνακας 8.8 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων υδροδυναμικού πεδίου	102
Πίνακας 8.9 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσπίπτοντος κυματισμού	103
Πίνακας 8.10 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ρυθμού μεταβολής πυθμένα.....	104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΚΥΡΙΟΤΕΡΩΝ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

γ	Ειδικό βάρος πετρώματος
Δ	Ειδική πυκνότητα πετρώματος
ϵ	Γωνία φάσης κυματισμού
ζ, ξ	Συντεταγμένες τροχιών υγρών σωματιδίων
η	Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας υδάτων
θ	Γωνία διάδοσης κυματισμού
λ	Μήκος κύματος
M	Αριθμός κυμάτων σε μία καταιγίδα
ξ_0	Αριθμός Iribarren
ρ	Πυκνότητα νερού
τ	Διατμητική τάση
Φ	Συνάρτηση δυναμικού ταχύτητας
ω	Γωνιακή συχνότητα, $2\pi/T$
C	Ταχύτητα διάδοσης κυματομορφής
c_g	Ταχύτητα ομάδας
$\cot \theta$	Κλίση πρανούς
C_r	Συντελεστής ανάκλασης
d	Βάθος πυθμένα
D	Ονομαστική διάμετρος ογκόλιθου θωράκισης
\bar{E}	Ειδική ενέργεια
E_f	Ροή ενέργειας
E_w	Ενέργεια κυματισμού
f	Συχνότητα, $1/T$
F_{eff}	Ενεργό ανάπτυσμα πελάγους
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
H	Ύψος κύματος
H_{max}	Μέγιστο ύψος κύματος
H_{rms}	Τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των υψών κύματος
H_S	Χαρακτηριστικό ύψος κύματος
I_l	Παροχή ξηρού βάρους στερεών
I_r	Αριθμός Iribarren

k	Αριθμός κύματος, $2\pi/\lambda$
K'	Συντελεστής περίθλασης
K_D	Συντελεστής ευστάθειας
K_r	Συντελεστής διάθλασης
K_s	Συντελεστής ρήχωσης
m_n	Ροπή φάσματος κυματισμού n-οστής τάξης
$N(\sigma, \theta)$	Κυματική πυκνότητα
p	Πίεση
p_{atm}	Ατμοσφαιρική πίεση
P_w	Ισχύς κύματος
$\overline{q(x)}$	Καθαρή εγκάρσια στερεομεταφορά
q_b	Φορτίο πυθμένα
q_s	Φορτίο σε αιώρηση
Q_l	Παροχή μικτού όγκου ιζήματος
S	Όρος πηγής
$S(f, \theta)$	Κατευθυντικό φάσμα ενέργειας κυματισμού
$S(f)$	Φάσμα συχνότητας κυματισμού
t	Χρόνος
t_{min}	Οριακή διάρκεια πνοής ανέμου
T	Περίοδος, $1/f$
T_p	Περίοδος αιχμής φάσματος
u, v, w	Συνιστώσες ταχύτητας
\mathbf{U}	Διάνυσμα μεταβλητών ταχύτητας
U_{10}	Ταχύτητα πνοής ανέμου 10 m από την επιφάνεια
V_b	Ταχύτητα παρακτίου ρεύματος
W	Ταχύτητα πνοής ανέμου
W_{50}	Μέσο βάρος ογκόλιθων θωράκισης
x, y, z	Χωρικές συντεταγμένες

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) διερευνάται η εφαρμογή διαφορετικών μαθηματικών εξισώσεων για τον υπολογισμό του κυματικού κλίματος στα ανοιχτά, στον τελικό σχεδιασμό ευστάθειας και λειτουργικότητας των λιμενικών και παράκτιων έργων. Στην πρόσφατη έρευνα του (Σταματιάδης, 2019) παρουσιάζεται μια πληθώρα μαθηματικών εξισώσεων, τις οποίες οι μελετητές μηχανικοί μπορούν να αξιοποιήσουν για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών στα βαθιά νερά, οδηγώντας η κάθε μια σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα για τα ίδια δεδομένα. Το γεγονός ότι στην Ελληνική και διεθνή βιβλιογραφία δεν υπάρχουν προδιαγραφές για την επιλογή κάποιας μεθόδου έναντι άλλων, έχει οδηγήσει πολλούς μελετητές να επιλέγουν αυθαίρετα και τελικά να οδηγούνται είτε σε υπερδιαστασιολόγηση των έργων, είτε σε ανεπαρκή σχεδιασμό. Εναλλακτικά των μαθηματικών εξισώσεων οι μελετητές τα τελευταία χρόνια κυρίως, έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν και αποτελέσματα αριθμητικών προσομοιώσεων. Η ορθή εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών στα βαθιά ύδατα είναι κρίσιμης σημασίας για τα επόμενα βήματα σχεδιασμού, δηλαδή την χωροθέτηση των έργων και τη διαστασιολόγηση των βασικών γεωμετρικών τους μεγεθών, για την αποδοτική λειτουργία καθώς και τη διαστασιολόγηση των υλικών κατασκευής για την ευστάθειά τους. Συνεπώς, οι σημαντικές διαφορές που προκύπτουν από την εφαρμογή των διαφορετικών μαθηματικών εξισώσεων μπορούν να οδηγήσουν τελικά είτε σε υπερεκτίμηση του κύματος και υπερδιαστασιολόγηση του έργου, είτε σε υποεκτίμησή του και κίνδυνο υπέρβασής του, με τελική συνέπεια την πρόκληση ζημιών ή κατάρρευση του έργου.

1.2 Στόχος – Μεθοδολογία

Η παρούσα διπλωματική αποτελεί συνέχεια προηγούμενης έρευνας, και συγκεκριμένα της διπλωματικής εργασίας του Αχιλλέα Σταματιάδη (2019) με τίτλο «Αριθμητική Προσομοίωση Ανεμογενών Κυματισμών και Σύγκριση με Μαθηματικές Εξισώσεις», όπου μελετήθηκαν διαφορετικές εμπειρικές μέθοδοι υπολογισμού κυματικών χαρακτηριστικών (ύψος χαρακτηριστικού κύματος H_s και περίοδος αιχμής T_p), με εφαρμογή σε τρεις περιοχές, η καθεμία με ξεχωριστή μορφολογία, με στόχο να διαπιστωθεί αν υπάρχουν διαφορές στα αποτελέσματα που δίνει η κάθε μέθοδος, αλλά και αν πρέπει να εφαρμόζεται συγκεκριμένη μέθοδος για κάθε είδος μορφολογίας που εξετάζεται.

Τα κυματικά χαρακτηριστικά που υπολογίζονται με τις εμπειρικές μεθόδους χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον ως δεδομένα για το σχεδιασμό λιμενικών ή ακτομηχανικών έργων. Για το σκοπό αυτό είναι πολύ χρήσιμο να εξετασθεί αν οι παραπάνω μέθοδοι έχουν τελικά αντίκτυπο στο σχεδιασμό των έργων τόσο από πλευράς ευστάθειας, όσο και από πλευράς κόστους.

Στόχος της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας επομένως, είναι ο έλεγχος των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών και η

επίπτωση που έχουν στον σχεδιασμό των λιμενικών έργων, ήτοι στο μέγεθος και το κόστος τους.

Η δομή που ακολουθεί η παρούσα εργασία έχει ως εξής:

- Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται συνοπτικά η μεθοδολογία της εργασίας.
- Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι βασικές έννοιες και τα κυματικά φαινόμενα που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, σε επίπεδο θεωρίας.
- Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται αναφορά στα λιμενικά έργα, τον τρόπο και τα υλικά κατασκευής τους και τον σχεδιασμό ευστάθειας έργων προστασίας.
- Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται οι επτά βασικότερες από τη βιβλιογραφία μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό κύματος στα βαθιά ύδατα.
- Στα Κεφάλαια 5 και 6 γίνεται μια σύντομη περιγραφή των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες των προσομοιώσεων.
- Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται η διαδικασία διακριτοποίησης των περιοχών μελέτης και η προσομοίωση διάδοσης φασματικού κυματισμού από τα βαθιά ύδατα.
- Στο Κεφάλαιο 8, τα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης και μέσω αυτών πραγματοποιείται ο σχεδιασμός θωράκισης λιμενικών έργων, και ο σχεδιασμός και η χωροθέτηση ακτομηχανικών έργων. Επιπλέον, πραγματοποιούνται περεταίρω αριθμητικές προσομοιώσεις για τον έλεγχο της λειτουργίας των ακτομηχανικών έργων έναντι συγκεκριμένων κυματισμών.
- Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 εξάγονται τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας όσον αφορά το σχεδιασμό θωράκισης και το κόστος των λιμενικών έργων αλλά και τη λειτουργία των ακτομηχανικών έργων, ενώ γίνονται και προτάσεις για περεταίρω έρευνα.

2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1 Εισαγωγικοί Ορισμοί

2.1.1 Λιμενικά Έργα

Με τον όρο λιμενικά έργα αναφερόμαστε στα έργα του Πολιτικού Μηχανικού που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση της υποδομής των λιμενικών εγκαταστάσεων. Οι λιμένες προσφέρουν διαφόρων ειδών παροχές στα σκάφη και τα άτομα ή αγαθά που μεταφέρονται μέσω αυτών, με σημαντικότερη την παροχή ασφαλούς αγκυροβολίου και την προστασία από τους ανέμους και τους κυματισμούς. Τα λιμενικά έργα χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα εσωτερικά και εξωτερικά. Τα πρώτα είναι απαραίτητα για την πρόσδεση και τη φορτοεκφόρτωση των σκαφών στο λιμάνι. Τα εξωτερικά λιμενικά έργα έχουν ως στόχο την προστασία των σκαφών από τους κυματισμούς και τα ρεύματα ώστε να γίνει η πρόσδεσή τους με ασφάλεια (Μέμος, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, 2013).

Η παρούσα ΔΕ εστιάζει στα εξωτερικά λιμενικά έργα και στο πώς οι παράμετροι σχεδιασμού τους επηρεάζουν το τελικό τους μέγεθος και κόστος.

Τα εξωτερικά λιμενικά έργα ή αλλιώς έργα προστασίας λιμένων μπορεί να είναι:

- α. Κυματοθραύστες: κατασκευές μεγάλου μήκους, συνήθως παράλληλες προς την ακτογραμμή, χωρίς να επικοινωνούν με αυτή.
- β. Μόλοι: τα έργα αυτά επικοινωνούν με την ακτή και διακρίνονται σε προσήνεμους οι οποίοι προστατεύουν το λιμένα από τους κύριους κυματισμούς, και υπήνεμους που προστατεύουν από δευτερεύοντες κυματισμούς.
- γ. Βραχίονες: συναντώνται κυρίως σε λιμάνια που βρίσκονται στο εσωτερικό της ακτής ή σε ποτάμια. Διαμορφώνονται σε παράλληλα ζεύγη αυξάνοντας την ταχύτητα της ροής και εμποδίζοντας έτσι τις αποθέσεις φερτών

2.1.2 Ανεμογενείς Κυματισμοί

Όπως προκύπτει από τον όρο, είναι οι κυματισμοί αυτοί που ως γενεσιουργό αίτιο έχουν τον άνεμο, με περιόδους 1-30 δευτερολέπτων και οι οποίοι κατατάσσονται στην κατηγορία των κυμάτων βαρύτητας. Ο όρος «ανεμογενής» χρησιμοποιείται για να διαχωρίσει τους κυματισμούς που προκαλούνται από σεισμούς, κατολισθήσεις ή παλίρροιας μεταξύ άλλων. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά ενός κυματισμού είναι το ύψος του H , η περίοδός του T και το μήκος του L .

Ο μηχανισμός με τον οποίο η ενέργεια του ανέμου μεταφέρεται στον κυματισμό είναι μέσω άμεσης ώθησης (ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη του κυματισμού), μέσω τριβής στη διεπιφάνεια ή μέσω μεταβολών ατμοσφαιρικής πίεσης. Αντίθετα, απώλεια ενέργειας από τον κυματισμό προκύπτει λόγω της τυρβώδους κίνησης των μορίων (κυρίως κατά τη θραύση) και σε μικρότερο ποσοστό μέσω της συνεκτικότητας. Το μέγεθος των ανεμογενών κυματισμών εξαρτάται από την ένταση του ανέμου, τη διάρκεια πνοής και το ανάπτυσμά του.

Στις περισσότερες περιπτώσεις η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας λόγω ανεμογενών κυματισμών προσεγγίζεται με ένα απλό ημίτονο σταθερού ύψους, περιόδου και διεύθυνσης (μονοχρωματικοί κυματισμοί). Στη φύση η αποθάλασσα (swell), δηλαδή κυματισμοί που δημιουργήθηκαν από μακρινά καιρικά φαινόμενα και πλέον δεν επηρεάζονται (ή επηρεάζονται ελάχιστα) από αυτόν, είναι η πιο κοντινή περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού.

2.1.3 Γραμμικά Κύματα

Μαθηματικά, η παραπάνω προσέγγιση προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος της διδιάστατης ιδεατής ροής με ελεύθερη επιφάνεια, που περιγράφεται με τις εξισώσεις Laplace και Bernoulli αντίστοιχα:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{p}{\rho} = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2.2)$$

Όπου Φ η συνάρτηση δυναμικού της ταχύτητας, p η πίεση και ρ η πυκνότητα του νερού.

Οι οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια ($z = \eta$) την κινηματική συνθήκη:

$$w = \frac{d\eta}{dt} \quad (2.3)$$

και τη δυναμική:

$$p_T = p_{atm} \Rightarrow p - \rho g \eta = p_{atm} \quad (2.4)$$

όπου η η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και p_{atm} η ατμοσφαιρική πίεση που συνήθως τίθεται ίση με μηδέν ως τιμή αναφοράς της σχετικής πίεσης.

Το πρόβλημα είναι μη γραμμικό ως προς το δυναμικό της ταχύτητας, επομένως επιδέχεται μόνο αριθμητική επίλυση. Με επιπλέον προσεγγίσεις και παραδοχές που αφορούν το ύψος H και το μήκος λ των κυμάτων, καθώς και το βάθος d του πυθμένα, μπορούν να προκύψουν αναλυτικές λύσεις.

Αμελώντας επομένως τους μη γραμμικούς όρους προκύπτει:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

και θεωρώντας επίπεδο αδιαπέρατο πυθμένα βάθους d :

$$w = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Τέλος, θεωρώντας περιοδικές συνοριακές συνθήκες ανά μήκος ίσο με λ , η αναλυτική επίλυση του γραμμικού προβλήματος έχει τη μορφή του μονοχρωματικού κυματισμού:

$$\Phi = \pm \frac{H g}{2 \omega} \cosh \frac{(k(d+z))}{\cosh(kd)} \sin(kx \pm \omega t) \quad (2.7)$$

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx \pm \omega t) \quad (2.8)$$

όπου H το ύψος κύματος, $\omega = 2\pi/T$ η γωνιακή συχνότητα, T η περίοδος, $k = 2\pi/\lambda$ ο αριθμός κύματος και λ το μήκος κύματος. Η λύση με το θετικό πρόσημο προκύπτει για κύμα που διαδίδεται προς το $-\infty$ ενώ το αρνητικό για κύμα που διαδίδεται προς το $+\infty$.

Η παράμετρος $C = \frac{\lambda}{T} = \omega/k$ ονομάζεται ταχύτητα κύματος και περιγράφει την ταχύτητα με την οποία κινείται η κυματομορφή. Από τον ορισμό φαίνεται πως σε διάστημα μιας περιόδου το κύμα διανύει απόσταση ίση με ένα μήκος κύματος.

Από την αντικατάσταση της (2.7) στην (2.5) προκύπτει η εξίσωση διασποράς:

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (2.9)$$

Από την παραπάνω εξίσωση φαίνεται πως το μήκος κύματος και η περίοδός του δεν είναι ανεξάρτητες παράμετροι. Συγκεκριμένα, για σταθερή περίοδο, το μήκος κύματος μειώνεται καθώς μειώνεται το βάθος.

Εισάγοντας την εξίσωση διασποράς (2.9) στο δυναμικό της ταχύτητας (2.7) και θεωρώντας για λόγους απλοποίησης κύμα που διαδίδεται στο $+\infty$, προκύπτει ότι:

$$\Phi = -\frac{H}{2} C \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (2.10)$$

Η οριζόντια ταχύτητα των υγρών σωματιδίων λόγω οδεύοντος κυματισμού δίνεται εξ ορισμού από την παρακάτω εξίσωση:

$$u = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

Ενώ η οριζόντια επιτάχυνση είναι:

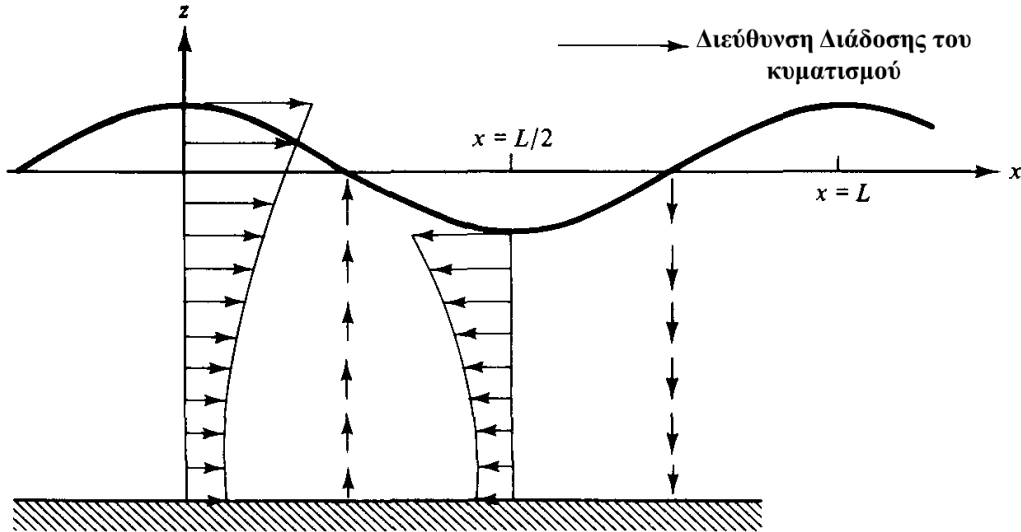
$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

Η κατακόρυφη ταχύτητα και επιτάχυνση αντιστοίχως είναι:

$$w = -\frac{\partial\Phi}{\partial z} = \frac{H}{2}\omega \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{H}{2}\omega^2 \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \quad (2.14)$$

Στον πυθμένα, οι ταχύτητες u και w είναι στο ελάχιστό τους και όσο οδεύουμε προς την επιφάνεια, το μέτρο τους αυξάνεται εκθετικά. Το προφίλ τους κατά το βάθος φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:

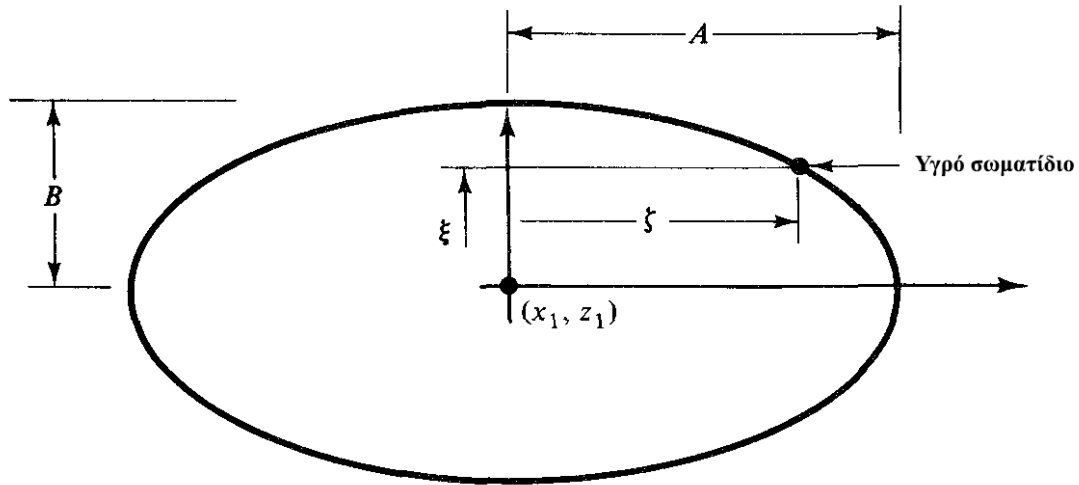


Εικόνα 2.1 Το προφίλ ταχυτήτων των υγρών σωματιδίων σε οδεύον κύμα (Μέμος, Θαλάσσια Υδροδυναμική, 2016).

Οι τροχιές των υγρών σωματιδίων είναι ελλειπτικές και ορίζονται ως εξής:

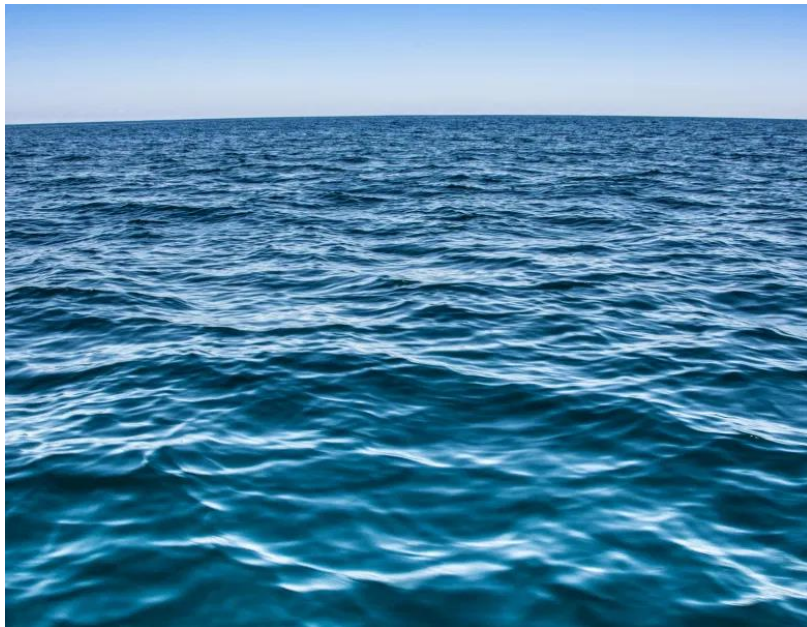
$$\zeta = -\frac{H \cosh k(d+z_1)}{2 \sinh kd} \sin(kx_1 - \omega t) \quad (2.15)$$

$$\xi = \frac{H \sinh k(d+z_1)}{2 \sinh kd} \cos(kx_1 - \omega t) \quad (2.16)$$



Εικόνα 2.2 Η ελλειπτική τροχιά των υγρών σωματιδίων (Μέμος, Θαλάσσια Υδροδυναμική, 2016).

Η πραγματική εικόνα της ταλάντωσης της ελεύθερης επιφάνειας, ωστόσο αποτελεί μια πιο σύνθετη κίνηση, λόγω της υπέρθεσης κυματισμών με διαφορετικά ύψη, περιόδους και κατευθύνσεις. Επομένως κατά την μέτρηση της ταλάντωσης αυτής προκύπτει μια φαινομενικά τυχαία καταγραφή της ελεύθερης επιφάνειας ως προς το χρόνο.



Εικόνα 2.3 Η τυχαία κατάσταση της ελεύθερης επιφάνειας (πηγή: <https://www.shutterstock.com>).

2.1.4 Ανάπτυγμα Πελάγους

Το ανάπτυγμα πελάγους, ή αλλιώς μήκος αναπτύγματος είναι το μήκος στο οποίο πνέει ο άνεμος πάνω από ένα υδάτινο σώμα με όρια τις ακτογραμμές στη διεύθυνση της πνοής. Μαζί με την ταχύτητα του ανέμου, καθορίζει το ύψος των κυματισμών που δημιουργούνται – αυξάνοντας το μήκος αναπτύγματος, τόσο περισσότερη ενέργεια μεταφέρεται στον κυματισμό και τελικώς το ύψος κύματος μεγαλώνει. Εκτός από το μήκος αναπτύγματος,

αναγκαίος είναι και ο καθορισμός της διάρκειας πνοής του ανέμου προκειμένου να γίνει η πρόγνωση του κυματισμού, καθώς αυτή είναι που καθορίζει την κρίσιμη ποσότητα στον υπολογισμό του κυματικού κλίματος. Αν η διάρκεια πνοής είναι αρκετά μεγάλη ώστε ο κυματισμός μπορεί να αναπτυχθεί και να επέλθει μόνιμη κατάσταση, τότε επικρατούν συνθήκες περιορισμένες από το μήκος αναπτύγματος (fetch-limited conditions) το οποίο είναι το κρίσιμο μέγεθος στον υπολογισμό του κυματικού κλίματος. Αν η διάρκεια πνοής δεν είναι επαρκής, τότε επικρατούν συνθήκες περιορισμένες από τη διάρκεια πνοής (duration-limited conditions) η οποία είναι το κρίσιμο μέγεθος στον υπολογισμό του κυματικού κλίματος.

Μεγάλη σημασία επίσης, έχει και η διεύθυνση του ανέμου καθώς υπάρχει περίπτωση στην ίδια περιοχή μελέτης υπό διαφορετικές διευθύνσεις ανέμου να αντιστοιχεί διαφορετικό μήκος αναπτύγματος, όπως φαίνεται για παράδειγμα στην Εικόνα 2.4, στην κυκλωμένη παραλία της νότιας Αγγλίας όπου ο άνεμος από τα νότια έχει μήκος αναπτύγματος 165 km, ενώ από τα νοτιοανατολικά 6500 km.



Εικόνα 2.4 Παράδειγμα έκθεσης των ακτών του Ηνωμένου Βασιλείου (πηγή: <https://slideplayer.com/slide/11348347>).

Σε πρακτικές εφαρμογές πρόβλεψης κυματισμών, ο υπολογισμός του μήκους αναπτύγματος γίνεται γύρω από την κύρια διεύθυνση πνοής του ανέμου, σε έναν τομέα που καθορίζεται ανάλογα με την εκάστοτε μέθοδο που επιλέγεται. Από τα πολλαπλά μήκη που προκύπτουν, συνήθως υπολογίζεται ο μέσος όρος τους, που αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό μέτρο για την έκθεση της περιοχής μελέτης στον άνεμο. Από προηγούμενη εργασία (Σταματιάδης, 2019) έχει φανεί πως για κάθε είδος γεωμετρίας ακτογραμμής, απαιτείται και κατάλληλη

μέθοδος για τον υπολογισμό του μήκους αναπτύγματος, η οποία καθορίζει και την αξιοπιστία των μετέπειτα αποτελεσμάτων (ύψος και περίοδος κυματισμού).

2.2 Ενέργεια και Ισχύς Κυματισμού

Καθώς το ρευστό κινείται κατά τη διάδοση κύματος βαρύτητας, η μηχανική του ενέργεια αυξάνεται σε σχέση με την αδιατάρακτη κατάστασή του. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ενέργεια κύματος και είναι ίση με το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής ενέργειας του ρευστού υπό την παρουσία κυμάτων, μείον την δυναμική ενέργεια σε αδιατάρακτη κατάσταση. Στην περίπτωση δισδιάστατης ροής, η ενέργεια κύματος E_w , η οποία προσδίδεται σε όγκο ρευστού μήκους ενός κύματος κατά τον άξονα x , ορίζεται ως:

$$E_w = \int_0^\lambda \int_{-d}^\eta \frac{1}{2} \rho (u^2 + w^2) dz dx + \int_0^\lambda \int_{-d}^\eta \rho g z dz dx - \int_0^\lambda \int_{-d}^0 \rho g z dz dx \quad (2.17)$$

όπου:

λ το μήκος κύματος

ρ η πυκνότητα του ρευστού

u, w η οριζόντια και κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας του ρευστού

d το βάθος του πυθμένα

η η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

Εφαρμόζοντας την παραπάνω εξίσωση για γραμμικό κυματισμό προκύπτει τελικά:

$$E_w = \frac{\rho g H^2 \lambda}{8} \quad (2.18)$$

όπου η ολοκλήρωση ως προς z γίνεται έως την μέση στάθμη $z = 0$ καθώς θεωρείται αμελητέα η συνεισφορά της ολοκλήρωσης από $z = 0$ έως $z = \eta$. Η ενέργεια κύματος ανά μονάδα επιφάνειας ύδατος καλείται ειδική ενέργεια:

$$\bar{E} = \frac{E_w}{\lambda} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2.19)$$

Η ροή ενέργειας κύματος μέσα από επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος ισούται με το έργο της δυναμικής πίεσης, δηλαδή το ολοκλήρωμα ως προς το βάθος του γινομένου της δυναμικής πίεσης επί την οριζόντια ταχύτητα ροής:

$$E_f = \int_{-d}^\eta p u dz \quad (2.20)$$

Θεωρώντας γραμμικό κυματισμό, και αμελώντας όρους τάξης μεγέθους μεγαλύτερης του H^2 προκύπτει ότι:

$$E_f = \frac{\rho g H^2 \omega}{8} \frac{1}{k} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \cos^2(kx - \omega t) \quad (2.21)$$

Η ισχύς κύματος P_w ορίζεται ως ο μέσος ρυθμός μεταβολής της ενέργειας του κύματος στη διεύθυνση διάδοσής του και ισούται με τη μέση τιμή της ροής ενέργειας του κύματος στη μονάδα του χρόνου:

$$P_w = \frac{1}{T} \int_0^T E_f dt = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) C \bar{E} = n C \bar{E} \quad (2.22)$$

όπου ο συντελεστής n παίρνει τιμές από 0.5 για κύματα στα βαθιά έως 1 για κύματα στα ρηχά.

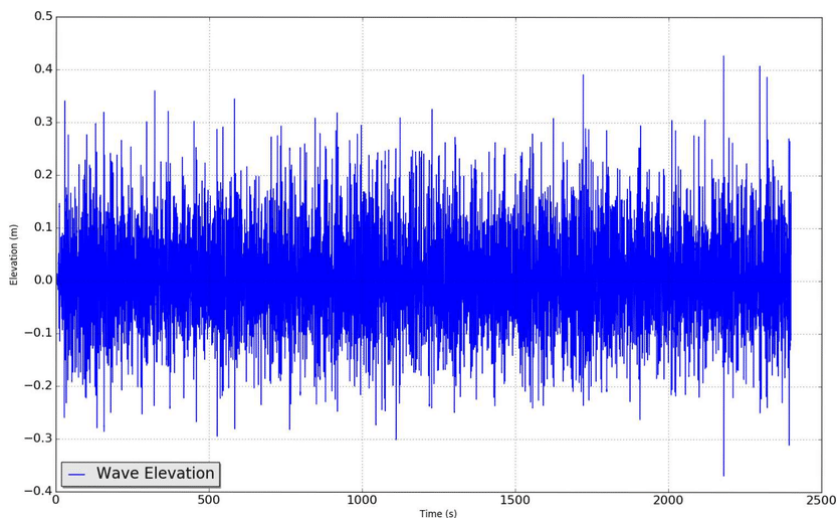
Η ποσότητα $C_g = nC$ ονομάζεται ταχύτητα ομάδας και είναι η ταχύτητα με την οποία μεταδίδεται η ενέργεια του κύματος.

2.3 Στατιστική Ανάλυση Κυματισμών

Η στατιστική ανάλυση ανεμογενών κυματισμών γίνεται είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε στο πεδίο των συχνοτήτων.

2.3.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Η χρονική ανάλυση βασίζεται στις χρονοσειρές των κυματικών καταγραφών. Το πρώτο βήμα είναι ο προσδιορισμός των «κυμάτων» N που περιέχονται σε κάθε χρονοσειρά. Κάθε «κύμα» ορίζεται με διάφορες μεθόδους, με πιο συνήθεις εκείνες της ανοδικού ή καθοδικού μηδενισμού (zero up-crossing και zero down-crossing αντίστοιχα) της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας ως προς τη μέση στάθμη θάλασσας (ΜΣΘ). Έτσι, εξάγονται τα ύψη H_i και οι περίοδοι T_i οι οποίες ποσότητες κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά (H_1, T_1 οι μεγαλύτερες και H_N, T_N οι μικρότερες τιμές).



Εικόνα 2.5 Χρονοσειρά ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας - Wave Elevation (πηγή: Ashkan Rafiee et al., 2016).

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_S προκύπτει από τον παρακάτω ορισμό:

$$H_S = H_{1/3} = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad (2.23)$$

Το χαρακτηριστικό (ή σημαντικό) ύψος κύματος είναι μια βασική παράμετρος για την στατιστική ανάλυση των κυματισμών. Από παρατηρήσεις, τα πιο συχνά κύματα έχουν ύψος μικρότερο του H_S , το οποίο σημαίνει πως το χαρακτηριστικό κύμα δεν συναντάται συχνά. Ωστόσο στατιστικά, είναι πιθανό να εμφανιστούν κύματα μεγαλύτερα του H_S .

Γενικότερα τα ύψη των ανεμογενών κυματισμών κατά τη διάρκεια καταιγίδων ακολουθεί την κατανομή Rayleigh ως μοντέλο για την πυκνότητα πιθανότητας (Longuet-Higgins, 1952) και γενικά προτείνεται η χρήση αυτής, όταν ο αριθμός των δεδομένων των χρονοσειρών είναι περιορισμένος. Η εξίσωση της κατανομής Rayleigh περιγράφεται ως:

$$p(H) = \frac{2H}{(H_{rms})^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{rms}}\right)^2} \quad (2.24)$$

όπου

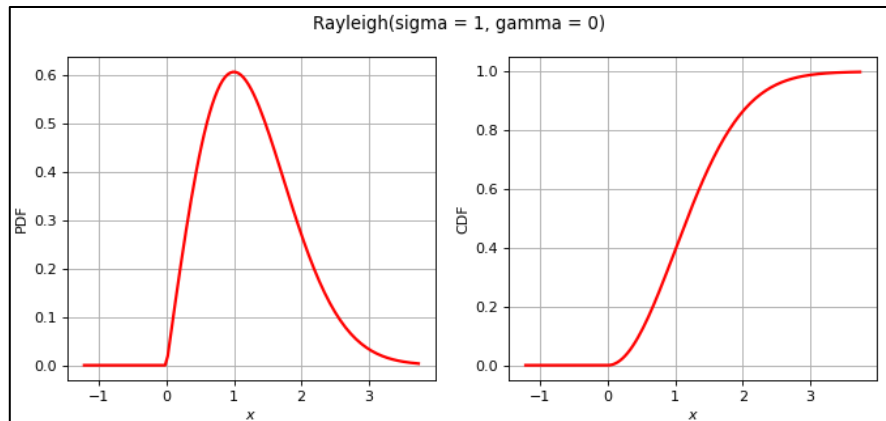
$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad (2.25)$$

είναι η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων H_i . Αυτό συνεπάγεται:

$$H_S = H_{1/3} = \sqrt{2} H_{rms} \quad (2.26)$$

$$H_{10} = 1.8 H_{rms} = 1.27 H_S \quad (2.27)$$

$$\bar{H} = H_{100\%} = 0.886 H_{rms} \quad (2.28)$$



Εικόνα 2.6 Γραφική παράσταση τυπικής κατανομής Rayleigh $\sigma=1, \gamma=0$ (αριστερά) και η αντίστοιχη αθροιστική κατανομή (δεξιά) (πηγή: OpenTURNS 1.17dev documentation).

Η κατανομή Rayleigh δεν προβλέπει τιμή για το μέγιστο ύψος κύματος, ωστόσο προτείνεται η εξίσωση:

$$H_{max} = 0.707 H_S \sqrt{\ln M} \quad (2.29)$$

όπου M είναι ο αριθμός των κυμάτων σε μια καταιγίδα.

2.3.2 Ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων

Λόγω της τυχαιότητας που παρουσιάζουν οι κυματικές καταγραφές, γίνεται η υπόθεση πως για κάθε χρονική στιγμή η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας προκύπτει ως άθροισμα πολλών μονοχρωματικών κυματισμών απειροστού μήκους και ποικίλων κατευθύνσεων. Έτσι, η υπερύψωση μπορεί να γραφεί ως:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(k_n x \cos \theta_n + k_n y \sin \theta_n - 2\pi f_n t + \epsilon_n) \quad (2.30)$$

όπου

k_n : κυματαριθμοί

θ_n : κατευθύνσεις

f_n : συχνότητες

ϵ_n : γωνίες φάσεως για κάθε συνιστώσα n .

Υποθέτοντας πως κάθε συνιστώσα έχει αυτόνομη φυσική οντότητα, θα υπακούει στην εξίσωση διασποράς:

$$(2\pi f_n)^2 = g k_n \tanh k_n h \quad (2.31)$$

Το άθροισμα των a_n^2 για απειροστά διαστήματα δf και $\delta \theta$ έχει πεπερασμένη και μοναδική τιμή:

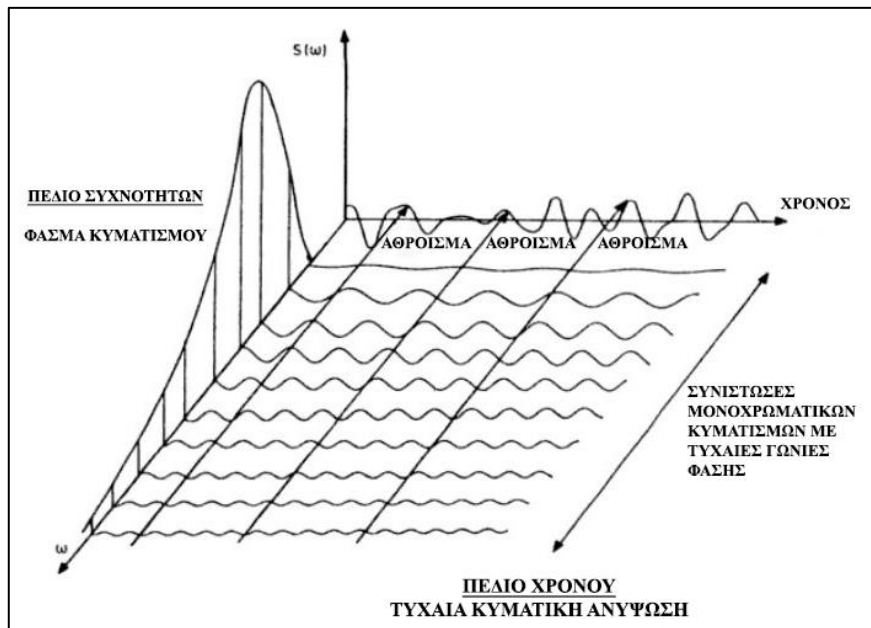
$$\sum_f^{\delta f} \sum_\theta^{\delta \theta} \frac{1}{2} a_n^2 = S(f, \theta) \delta f \delta \theta \quad (2.32)$$

Η συνάρτηση $S(f, \theta)$ είναι το κατευθυντικό φάσμα, το οποίο απεικονίζει την κατανομή της ενέργειας του κύματος στο πεδίο των συχνοτήτων, συναρτήσεως της συχνότητας και της διεύθυνσης. Αν αγνοηθεί η χωρική εξάρτηση (κατευθυντικότητα) στην παραπάνω εξίσωση ($\theta_n = 0, x = 0$) τότε η (2.30) απλοποιείται ως εξής:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t + \epsilon_n) \quad (2.33)$$

ενώ η (2.32) δίνει το φάσμα συχνότητας $S(f)$:

$$\sum_f^{f+\delta f} \frac{1}{2} a_n^2 = S(f) \delta f \quad (2.34)$$



Εικόνα 2.7 Από την υπέρθεση μονοχρωματικών κυματισμών προκύπτει η τυχαία καταγραφή της ελεύθερης επιφάνειας (πηγή: "Sea Loads on Ships and Offshore Structures", 1991).

Το φάσμα $S(f)$ προκύπτει συνήθως με τη χρήση της τεχνικής του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform). Με αυτήν την τεχνική, η συνάρτηση της ελεύθερης επιφάνειας «μεταφέρεται» από το πεδίο του χρόνου (χρονοσειρά) στο πεδίο των συχνοτήτων (φάσμα).

Ο μετασχηματισμός Fourier συνάρτησης $x(t)$ στο πεδίο του χρόνου είναι η συνάρτηση $X(f)$ στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-2\pi i f t} dt \quad (2.35)$$

ενώ ο αντίστοιχος αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier είναι:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{2\pi i f t} df \quad (2.36)$$

όπου $f = \omega/2\pi$ είναι η συχνότητα.

Ο καθορισμός του χαρακτηριστικού ύψους H_s γίνεται μέσω ανάλυσης του φάσματος στο πεδίο των συχνοτήτων. Ειδικότερα, δεδομένης της κατανομής Rayleigh προκύπτει:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} = \sqrt{2} H_{rms} \quad (2.37)$$

Όπου m_0 η ροπή μηδενικής τάξης του φάσματος που ορίζεται ως:

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(f) df \quad (2.38)$$

Γενικά για τις ροπές του φάσματος τάξης n ισχύει:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (2.39)$$

Το επικρατέστερο μοντέλο όσον αφορά την κατανομή της ενέργειας του κυματισμού γύρω από την κύρια διεύθυνση του κυματισμού περιγράφεται σύμφωνα με τους Pierson et al. (1952) με την εξής μορφή:

$$D(\theta) = \frac{S(f, \theta)}{S(f)} = \begin{cases} (2/\pi) \cos^2 \theta & \text{για } |\theta| \leq \pi/2 \\ 0 & \text{για } |\theta| > \pi/2 \end{cases} \quad (2.40)$$

Από αναλύσεις μετρήσεων πραγματικών κυματισμών έχει προκύψει ότι το φάσμα θαλασσίων ανεμογενών κυματισμών περιγράφεται επαρκώς με την εξίσωση της παρακάτω μορφής:

$$S(f) = \frac{Ag^2}{f^5} e^{\left(-\frac{B}{f^4}\right)} \quad (2.41)$$

όπου A και B παράμετροι. Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένα από τα πιο αντιπροσωπευτικά μοντέλα φασμάτων:

Φάσμα PM (Pierson – Moskowitch)

$$S(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-0.74 \left(\frac{g}{2\pi W f}\right)^4\right) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-1.25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \quad (2.42)$$

όπου

$$a = 0.0081$$

f_p : η συχνότητα κορυφής του φάσματος (peak frequency)

W : η ταχύτητα ανέμου σε ύψος 19.5 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Η ταχύτητα αυτή είναι περίπου 7.5% μεγαλύτερη από εκείνη σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας, $W = 1.075 U_{10}$

Το φάσμα PM αντιπροσωπεύει πλήρως αναπτυγμένους κυματισμούς και αποτελεί ίσως μια από τις πιο απλές εκφράσεις κατανομής της ενέργειας ανεμογενών κυματισμών.

Φάσμα JONSWAP

$$S(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-1.25 \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right) \gamma \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{f - f_p}{\sigma f_p}\right)^2\right) \quad (2.43)$$

όπου:

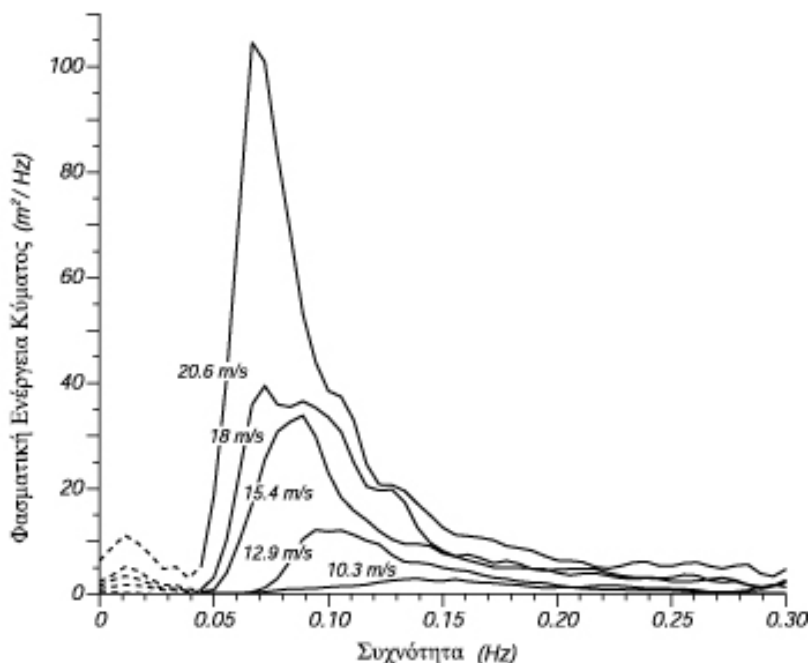
$$a = 0.0081(1 - 0.287 \ln \gamma)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{για } f \leq f_p \\ 0.09 & \text{για } f > f_p \end{cases}$$

$$\gamma = \begin{cases} 5 & \text{για } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6 \\ \exp\left(5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}\right) & \text{για } 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 5 \\ 1 & \text{για } 5 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \end{cases}$$

όπου $T_p = 1/f_p$ η περίοδος κορυφής (peak period) και H_s το χαρακτηριστικό κύμα.

Το φάσμα JONSWAP αντιπροσωπεύει αναπτυγμένους κυματισμούς περιορισμένους από το μήκος αναπτύγματος (fetch-limited), ενώ για $\gamma = 1$ προκύπτει το φάσμα PM. Για γενική χρήση προτείνεται η μέση τιμή της παραμέτρου $\gamma = 3.3$.



Εικόνα 2.8 Απεικόνιση φασμάτων κυματισμών για διάφορες ταχύτητες ανέμου (Moskowitz, 1964).

Φάσμα TMA

$$S(f)_{TMA} = S(f)_{JONSWAP} \Phi(f, d) \quad (2.44)$$

$$\text{όπου } \Phi(f, d) = \begin{cases} (1/2)\omega_d^2 & \text{για } 0 < \omega_d \leq 1 \\ 1 - (1/2)(2 - \omega_d)^2 & \text{για } 1 < \omega_d \leq 2 \end{cases} \text{ και } \omega_d = 2\pi f \sqrt{\frac{d}{g}}$$

Το φάσμα TMA αποτελεί μετατροπή του φάσματος JONSWAP σε μεταβατικά και ρηχά ύδατα. Για το φάσμα αυτό προκύπτει:

$$\alpha = 0.0078 \left(\frac{2\pi U_{10}^2}{g\lambda_p} \right)^{0.49} \quad \gamma = 2.47 \left(\frac{2\pi U_{10}^2}{g\lambda_p} \right)^{0.39} \quad (2.45)$$

όπου λ_p είναι το μήκος κύματος για βάθος πυθμένα d και συχνότητα κύματος f_p .

Σύνθετοι κυματισμοί μπορεί να έχουν φάσμα δύο κορυφών, το οποίο προκύπτει αθροίζοντας τα φάσματα ανεμογενών κυματισμών και αποθάλασσας (Μέμος, Θαλάσσια Υδροδυναμική, 2016). Πέρα από τα τρία αναφερθέντα, υπάρχουν και άλλοι τύποι φασμάτων, πχ Bretschneider-Mitsuyasu, ISSC, τροποποιημένο JONSWAP, τροποποιημένο Wallops, κ.λπ.

2.4 Μετασηματισμοί Κυμάτων στα Ρηχά Ύδατα

Όταν ο πυθμένας της παράκτιας ζώνης δεν είναι επίπεδος, η διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών δεν είναι κάθετη στην ακτογραμμή, ή όταν παρεμβάλλονται λιμενικές κατασκευές, τότε τα μονοδιάστατα κύματα (δισδιάστατη ροή) στα βαθιά μετασηματίζονται σε δισδιάστατα κύματα (τρισδιάστατη ροή) καθώς προελαύνουν προς τα ρηχά. Οι μετασηματισμοί των κυματισμών έχουν ως αποτέλεσμα την μεταβολή του ύψους του κυματισμού, την μείωση του μήκους του ή την αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσής του. Τα παραπάνω φαινόμενα περιγράφονται με τους μηχανισμούς της ρήχωσης, της διάθλασης, της περίθλασης και της ανάκλασης.

2.4.1 Ρήχωση

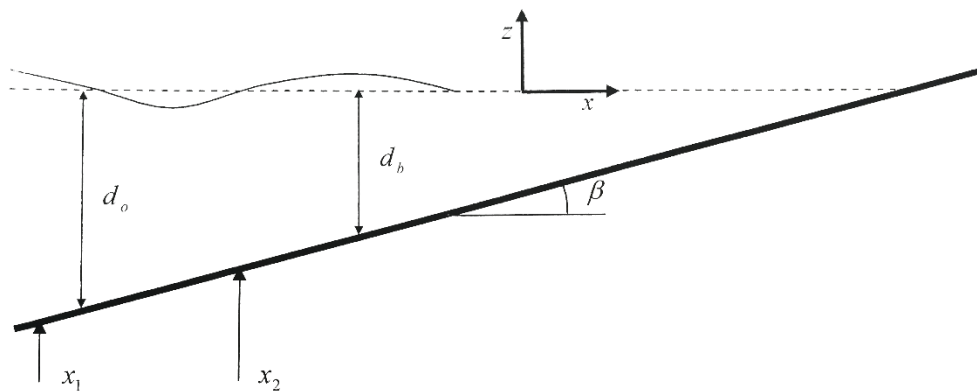
Θεωρείται παράκτια ζώνη με ευθεία ακτογραμμή, επίπεδο πυθμένα και παράλληλες ισοβαθείς. Κατά τη διάδοση κυματισμού σε αυτήν την τυπική περιοχή, αμελώντας τυχών ανακλάσεις και απώλειες ενέργειας μεταξύ δύο τυχαίων σημείων (1) και (2), η ισχύς του κυματισμού παραμένει σταθερή, άρα ισχύει:

$$P_w = (nC\bar{E})_1 = (nC\bar{E})_2 \Rightarrow \frac{H_2}{H_1} = \sqrt{\frac{n_1\lambda_1}{n_2\lambda_2}} \quad (2.46)$$

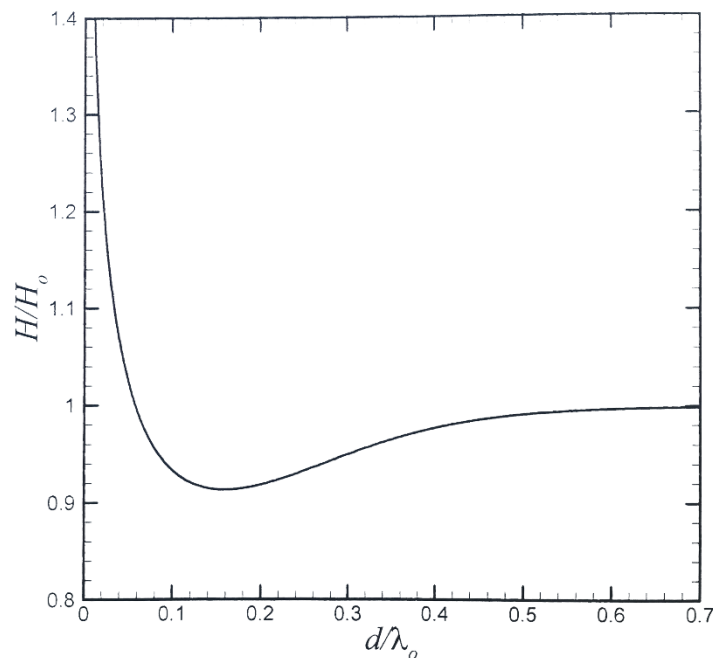
Εάν το σημείο (1) βρίσκεται σε βαθιά ύδατα και το (2) σε ενδιάμεσα με βάθος d τότε η παραπάνω εξίσωση δίνει:

$$\frac{H}{H_o} = \sqrt{\frac{\lambda_o}{2n\lambda}} = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) \tanh(kd)}} = K_s \quad (2.47)$$

Ο συντελεστής ρήγωσης K_S συνδέει τη μεταβολή του ύψους κύματος με τη μεταβολή του μήκους κύματος και του βάθους του πυθμένα. Καθώς το κύμα πλησιάζει την ακτή, το ύψος του σε σχέση με το μήκος του μειώνεται αρχικά μέχρι βάθους $d/\lambda = 0.157$. Στο σημείο αυτό το ύψος αρχίζει να αυξάνεται όσο το βάθος μειώνεται, ενώ σε πολύ ρηχά βάθη το ύψος μεγαλώνει δραματικά μέχρι η κυματομορφή να γίνει ασταθής και να προκληθεί θραύση (βλ. Εικόνα 2.10).



Εικόνα 2.9 Σκαρίφημα διατομής μοντέλου παράκτιας ζώνης με επίπεδο πυθμένα σταθερής κλίσης (Δήμας, 2016).



Εικόνα 2.10 Μεταβολή ύψους κύματος ως προς το σχετικό βάθος λόγω ρήγωσης (Δήμας, 2016).

Προϋπόθεση για τον υπολογισμό του συντελεστή ρήγωσης μέσω της (2.47) είναι ο υπολογισμός του αριθμού κύματος k μέσω της εξίσωσης διασποράς (2.9), η οποία επιλύεται με επαναληπτική διαδικασία. Εναλλακτικά μπορεί να γίνει χρήση της προσεγγιστικής έκφρασης:

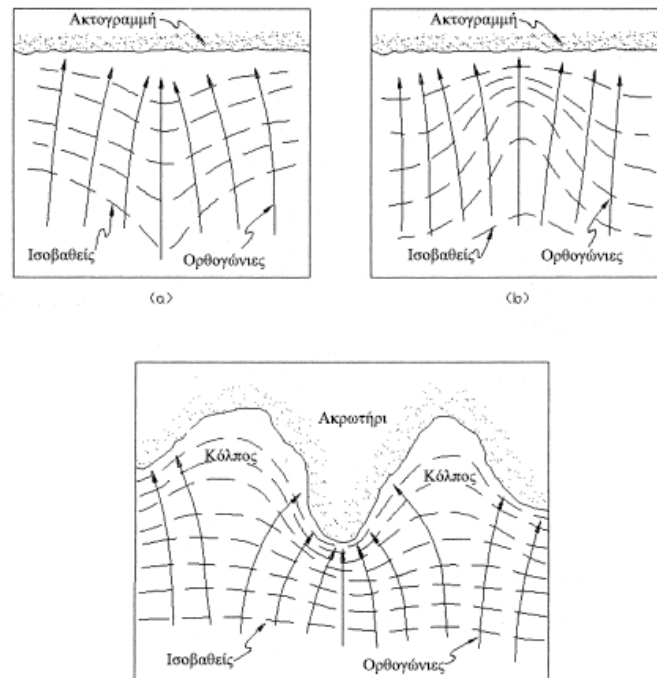
$$\frac{H}{H_0} = (4k_0 d)^{-\frac{1}{4}} \left(1 + \frac{1}{4} k_0 d + \frac{13}{228} (k_0 d)^2 \right) \left(1 + \frac{3}{8} \left(\frac{H_0}{\lambda_0} \right)^2 (k_0 d)^{-3} \right) \quad (2.48)$$

η οποία δίνει τον συντελεστή ρήξης με σφάλμα μικρότερο του 1% ως προς την (2.47) για μικρά βάθη ($d/\lambda_0 \leq 0.05$) σε σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα (Nielsen, 2009).

2.4.2 Διάθλαση

Στο φαινόμενο της διάθλασης η ταχύτητα του κύματος είναι μεταβλητή στο μέτωπο του κυματισμού, με αποτέλεσμα τμήμα του να επιβραδύνει και τελικά η κορυφογραμμή να κάμπτεται και το κύμα να αποκτά δισδιάστατη μορφή. Η μεταβολή της ταχύτητας παρατηρείται όταν το βάθος του πυθμένα μεταβάλλεται εγκάρσια της διεύθυνσης του κύματος. Γνωρίζοντας ότι η ταχύτητα του κυματισμού αυξάνει με το βάθος του πυθμένα, το τμήμα της κορυφογραμμής που βρίσκεται σε βαθύτερα ύδατα, κινείται ταχύτερα προς την ακτή, με αποτέλεσμα η κορυφογραμμή να τείνει να γίνει παράλληλη προς τις ισοβαθείς του πυθμένα.

Τα πιο κλασικά παραδείγματα διάθλασης κύματος αποτελούν η διάδοση μονοδιάστατου κύματος σε παράκτια ζώνη με ευθείες και παράλληλες ισοβαθείς υπό γωνία (όχι κάθετη) προς την ακτογραμμή και η διάδοση κύματος σε παράκτια περιοχή με ισοβαθείς που δεν είναι ευθείες.

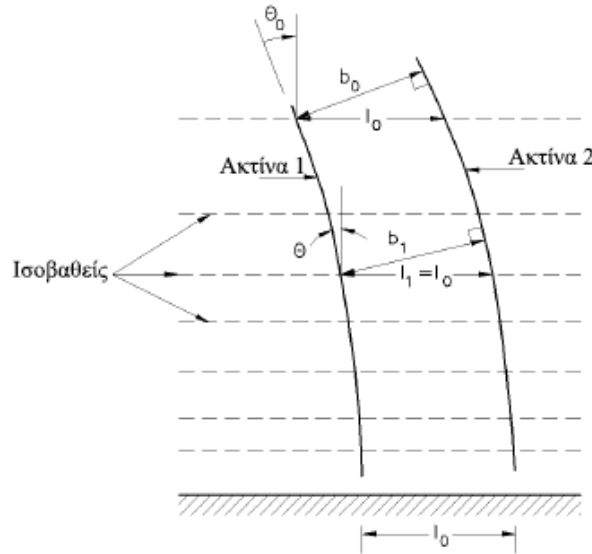


Εικόνα 2.11 Παράδειγμα διάθλασης κυματισμού (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)

Για τη μελέτη της δισδιάστατης μορφής που αποκτά ο κυματισμός λόγω διάθλασης σε παράκτια ζώνη με επίπεδο πυθμένα και ευθεία ακτογραμμή γίνεται χρήση του νόμου του Snell, κατ' αντιστοιχία με τη διάθλαση ακτίνας φωτός όταν αυτή αλλάζει μέσο διάδοσης:

$$\frac{\sin \theta}{\lambda} = \text{σταθερό} \Leftrightarrow \frac{\sin \theta}{C} = \text{σταθερό} \quad (2.49)$$

όπου θ η γωνία μεταξύ κορυφογραμμής κύματος και ακτογραμμής και C η ταχύτητα του κύματος.



Εικόνα 2.12 Μεταβολή ύψους κύματος κατά μήκος της ακτίνας διάδοσης (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).

Θεωρώντας τμήμα πλάτους B_0 της κορυφογραμμής μονοδιάστατου κύματος στα βαθιά (βλ. Εικόνα 2.12), καθώς αυτός υφίσταται διάθλαση, οι γεωμετρικοί τόποι των δύο άκρων του τμήματος σχηματίζουν καμπύλες οι οποίες παραμένουν ορθογώνιες στην κορυφογραμμή και ονομάζονται ακτίνες διάδοσης κύματος (wave rays). Η κάμψη των ακτινών λόγω διάθλασης έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή του πλάτους του τμήματος της κορυφογραμμής από B_0 σε B . Εφαρμόζοντας τον νόμο του Snell προκύπτει:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \sin \theta_0 \right) = \sin^{-1} \left(\frac{C}{C_0} \sin \theta_0 \right) \quad (2.50)$$

Οι προβολές παράλληλα στην ακτογραμμή των τμημάτων B_0 και B έχουν ίσο μήκος καθώς το μήκος της προβολής παράλληλα στην ακτογραμμή κάθε κορυφογραμμής κύματος ισούται με το μήκος της ακτογραμμής. Έτσι προκύπτει:

$$Y = Y_0 \Rightarrow \frac{B}{\cos \theta} = \frac{B_0}{\cos \theta_0} \quad (2.51)$$

Θεωρώντας εκ νέου την αρχή διατήρησης ισχύος κύματος για μεταβλητό μήκος κορυφογραμμής έχουμε:

$$(nC\bar{E}B)_1 = (nC\bar{E}B)_2 \quad (2.52)$$

και με αντικατάσταση της ειδικής ενέργειας (2.19):

$$\frac{H_1}{H_2} = \sqrt{\frac{n_2 \lambda_2}{n_1 \lambda_1}} \sqrt{\frac{B_2}{B_1}} \quad (2.53)$$

Αν θεωρηθεί ότι τα κύματα δεν αλλάζουν περίοδο με το βάθος (σταθερή περίοδος) τότε:

$$\frac{H}{H_o} = \sqrt{\frac{\lambda_o}{2n\lambda}} \sqrt{\frac{B_o}{B}} = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)}\right) \tanh(kd)}} \sqrt{\frac{\cos \theta_o}{\cos \theta}} = K_s K_r \quad (2.54)$$

Όπου K_s, K_r οι συντελεστές ρήξης και διάθλασης αντίστοιχα. Η παραπάνω ανάλυση ισχύει για κύματα Stokes 1^{ης} και 2^{ης} τάξης στην εξωτερική παράκτια ζώνη και δεν ισχύει στη ζώνη απόσβεσης όπου θεωρείται ότι η ακτίνα διάδοσης είναι πρακτικά κάθετη στην ακτογραμμή. Ο συντελεστής διάθλασης μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από την εξίσωση:

$$K_r = \sqrt{\cos \theta_o} \left(1 - k_o d \left(1 - \frac{1}{6} k_o d\right)^2 \sin^2 \theta_o\right)^{-\frac{1}{4}} \quad (2.55)$$

Με σφάλμα μικρότερο του 1% για $\frac{d}{\lambda_o} \leq 0.2$ και $\theta_o \leq 60^\circ$ (Nielsen, 2009).

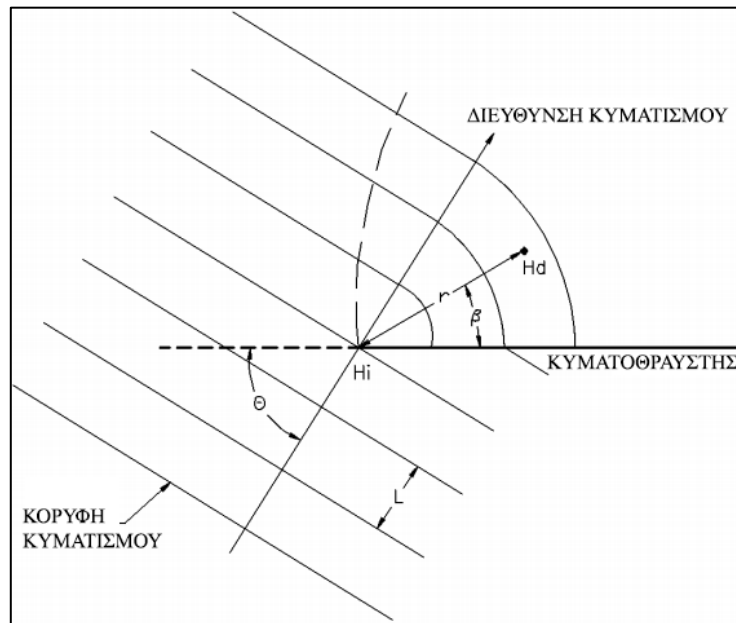
2.4.3 Περίθλαση

Η περίθλαση κύματος είναι το φαινόμενο όπου το ύψος του κύματος δεν είναι σταθερό, αλλά μεταβάλλεται κατά μήκος της εγκάρσιας διάστασής του, με αποτέλεσμα την εγκάρσια μεταφορά ενέργειας από σημεία με μεγαλύτερο σε σημεία με μικρότερο ύψος κύματος. Το φαινόμενο έχει ιδιαίτερη σημασία στη μελέτη συμπεριφοράς κυματισμών σε λιμένες και κόλπους, και άρα στο σχεδιασμό λιμενικών έργων. Τα βασικά παραδείγματα περίθλασης είναι η πρόσπτωση κυματισμού σε κυματοθραύστη ημιαπείρου μήκους, σε άνοιγμα μεταξύ δύο κυματοθραυστών ημιαπείρου μήκους ή σε μεμονωμένο κυματοθραύστη πεπερασμένου μήκους.

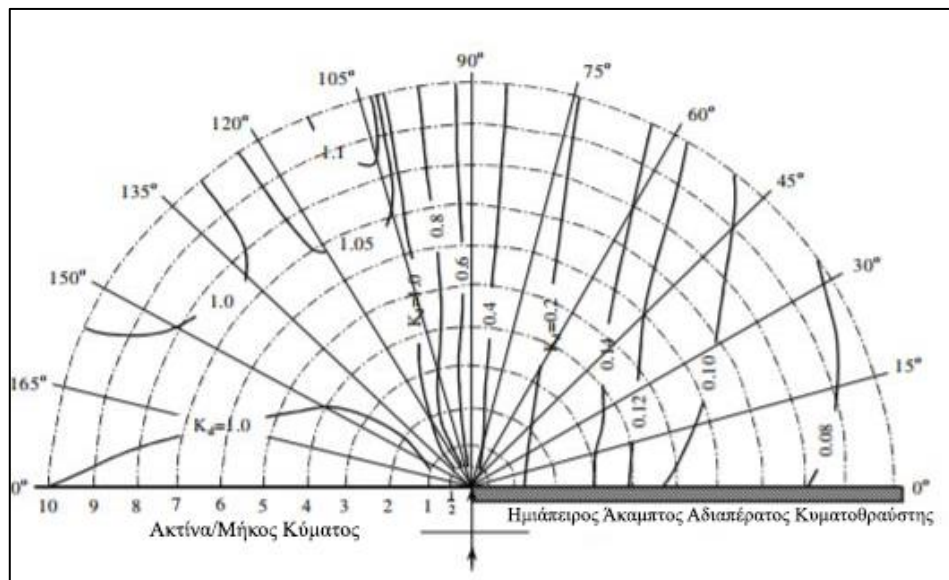
Στο παράδειγμα περίθλασης από κυματοθραύστη ημιαπείρου μήκους, το τμήμα του κυματισμού που προσπίπτει στην κατασκευή υφίσταται μερική ανάκλαση και μερική απόσβεση, ενώ το τμήμα που περνά κοντά στο άκρο του κυματοθραύστη θα υποστεί περίθλαση στην υπήνεμη ζώνη. Προκαλείται κάμψη των κορυφογραμμών γύρω από το ακρομόλιο και το ύψος του κυματισμού μειώνεται κατά μήκος αυτών. Η μεταβολή αυτή (H_d) σε μια απόσταση r και γωνία β από το άκρο εξαρτάται από το μήκος του κυματισμού (λ), τη γωνία πρόσπτωσής του (φ) και το ύψος του (H_i). Ο συντελεστής περίθλασης ορίζεται ως:

$$K' = \frac{H_d}{H_i} \quad (2.56)$$

και για τον υπολογισμό του γίνεται χρήση διαγραμμάτων που αποτελούνται από ισογραμμές του συντελεστή περίθλασης για διάφορες γωνίες πρόσπτωσης.



Εικόνα 2.13 Σχηματική απεικόνιση περίθλασης από κυματοθραύστη ημιαπείρου μήκους (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).



Εικόνα 2.14 Διάγραμμα υπολογισμού συντελεστή K' για περίθλαση από κυματοθραύστη ημιαπείρου μήκους και γωνία πρόσπτωσης $\gamma=90^\circ$ (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).

Στην περίπτωση περίθλασης κυματισμού από άνοιγμα μεταξύ δύο κυματοθραυστών ημιαπείρου μήκους γίνεται πάλι χρήση ειδικών διαγραμμάτων, αντιστοιχων με προηγουμένως. Θεωρώντας κάθετη πρόσπτωση στους κυματοθραύστες, δηλαδή $\varphi = 90^\circ$, και λόγο πλάτους ανοίγματος προς μήκος κύματος $B/\lambda = 0.5$ ή $B/\lambda = 1$ ο συντελεστής περίθλασης δίνεται από διαγράμματα στα οποία λόγω συμμετρίας παρουσιάζεται το μισό πεδίο. Αν η γωνία πρόσπτωσης δεν είναι κάθετη, τότε υπολογίζεται το ισοδύναμο άνοιγμα πλάτους B' κάθετο στην ακτίνα του κύματος και ακολουθείται η ανάλυση για $\varphi = 90^\circ$ κατά

μήκος της ακτίνας του κύματος. Αν $B/\lambda > 5$ τότε ο συντελεστής περίθλασης K' υπολογίζεται από το γινόμενο των δύο συντελεστών περίθλασης όπως προκύπτουν από τη θεώρηση κάθε κυματοθραύστη ανεξάρτητα από τον άλλο.

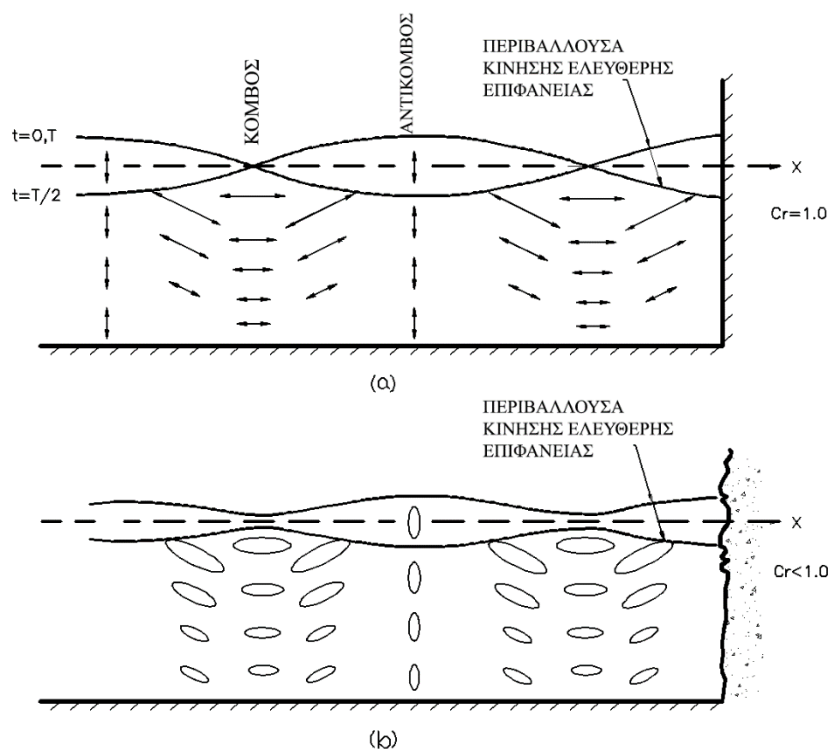
Τέλος στην περίπτωση περίθλασης κυμάτων από μεμονωμένους κυματοθραύστες πεπερασμένου μήκους, ο συντελεστής περίθλασης K' υπολογίζεται από το άθροισμα των δύο συντελεστών περίθλασης οι οποίοι προκύπτουν από την εφαρμογή των αντίστοιχων διαγραμμάτων για περίθλαση κυματοθραύστη ημιαπείρου μήκους.

2.4.4 Ανάκλαση

Κατά την πρόσπτωση κυματισμού σε κατακόρυφο (ή μη) εμπόδιο π.χ. σε έναν κυματοθραύστη, ή σε περίπτωση ασυνέχειας στη βαθυμετρία του πυθμένα π.χ. λόγω αναβαθμού, προκαλείται ανάκλαση του κυματισμού. Ο ανακλώμενος κυματισμός συμβάλλει με τον προσπίπτοντα και έτσι προκαλείται στάσιμο κύμα. Η γενική περίπτωση στάσιμου κύματος οφείλεται στην υπέρθεση δύο κυματισμών με ίδιο ύψος, μήκος και αντίθετη φορά κίνησης και περιγράφεται μέσω της:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H}{2} \cos(kx + \omega t) = H \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (2.57)$$

Το στάσιμο κύμα φαίνεται σαν να μην έχει ταχύτητα κυματομορφής, εξ ου και ο όρος «στάσιμο». Αντί αυτού κάθε σημείο εκτελεί ταλάντωση με συγκεκριμένο ύψος, ενώ παρουσιάζονται αντικόμβοι και κόμβοι, σημεία δηλαδή με μέγιστο ύψος ταλάντωσης και μηδενικό αντίστοιχα.



Εικόνα 2.15 Ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και τροχιές σωματιδίων ρευστού κατά την ολική (άνω) και μερική (κάτω) ανάκλαση μονοδιάστατου κύματος σε κατακόρυφο τοίχο (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)

Στην πραγματικότητα, λόγω απωλειών το ανακλώμενο κύμα έχει μικρότερο ύψος από το επερχόμενο, οπότε η ανάκλαση καλείται μερική, ενώ η υπέρθεση των δύο κυμάτων δεν δημιουργεί στάσιμο κύμα. Ο λόγος του ύψους H_r του ανακλώμενου κύματος ως προς το ύψος H_i του προσπίπτοντος καλείται συντελεστής ανάκλασης:

$$C_r = \frac{H_r}{H_i} \quad (2.58)$$

Στην περίπτωση παράκτιων κατασκευών ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίζεται μέσω της εμπειρικής εξίσωσης:

$$C_r = \frac{a}{1 + \frac{b}{I_r^2}} \quad (2.59)$$

Όπου a , b παράμετροι που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής και του κυματισμού, και I_r ο αριθμός Iribarren:

$$I_r = \tan a \sqrt{\frac{\lambda_o}{H_i}} \quad (2.60)$$

Όπου $\tan a$ η κλίση της προσήνεμης επιφάνειας της κατασκευής ως προς την οριζόντια και H_i το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού στη βάση της.

Για την περίπτωση ανάκλασης κυματισμού σε ακτή με επίπεδο πυθμένα, ο συντελεστής ανάκλασης υπολογίζεται μέσω της εμπειρικής εξίσωσης:

$$C_r = \frac{0.5}{1 + \frac{5.5}{\xi_o^2}} \quad (2.61)$$

Όπου ξ_o ο αριθμός Iribarren που σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ως:

$$\xi_o = \tan \beta \sqrt{\frac{\lambda_o}{H_o}} \quad (2.62)$$

Όπου $\tan \beta$ η κλίση του πυθμένα ως προς την οριζόντια. Σημειώνεται πως η παραπάνω έκφραση του αριθμού Iribarren χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της μορφής θραύσης κυματισμού. Παρακάτω ακολουθούν ορισμένες τυπικές τιμές των παραμέτρων a και b για τον υπολογισμό του C_r .

Πίνακας 2.1. Παράμετροι εμπειρικού υπολογισμού συντελεστή ανάκλασης κυμάτων από παράκτια κατασκευή (Δήμας, 2016).

Χαρακτηριστικά παράκτια κατασκευής και επερχόμενου κυματισμού	a	b
Επίπεδη επιφάνεια – Μονοχρωματικό κύμα	1.0	5.5
Επίπεδη επιφάνεια – Πραγματικό κύμα	1.1	5.7
Κυματοθραύστης φυσικών ογκολίθων	0.6	6.6
Κυματοθραύστης τεχνητών ογκολίθων	0.5	9.6

2.5 Στερεομεταφορά

Η στερεομεταφορά εν γένει χωρίζεται σε τρία είδη: φορτίο πυθμένα, φορτίο σε αιώρηση και φορτίο έκπλυσης. Το πρώτο ορίζεται ως η μετακίνηση υλικού του πυθμένα που γλιστράει και κυλάει πάνω σε αυτόν. Το φορτίο σε αιώρηση ορίζεται ως η μεταφορά ιζήματος που αιωρείται στο νερό για κάποιο χρονικό διάστημα και ανάλογα με τον μηχανισμό αιώρησης μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει στο φορτίο πυθμένα και το φορτίο έκπλυσης. Το φορτίο έκπλυσης ορίζεται ως η μεταφορά πιο λεπτόκοκκων υλικών από το υλικό του πυθμένα. Συνήθως η διάμετρος υλικών περίπου 0.06 mm είναι το όριο μεταξύ του φορτίου έκπλυσης και φορτίου πυθμένα.

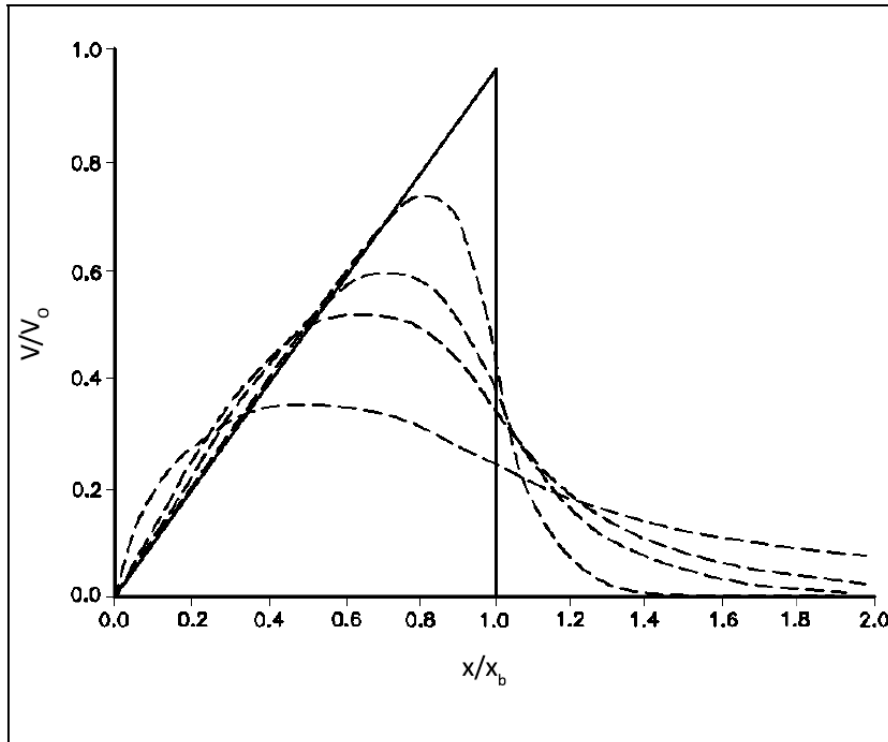
Η στερεομεταφορά λαμβάνει χώρο κυρίως κοντά στον πυθμένα, ακόμη και για την περίπτωση φορτίου σε αιώρηση. Η ζώνη θραύσης είναι η περιοχή με την μεγαλύτερη μετακίνηση υλικού λόγω των έντονων ρευμάτων και της τύρβης που δημιουργείται.

2.5.1 Στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής

Λόγω της πρόσπτωσης κυματισμού σε ευθεία ακτογραμμή υπό γωνία θ δημιουργείται παράκτιο ρεύμα παράλληλα στην ακτογραμμή, η ταχύτητα του οποίου μεταβάλλεται γραμμικά σε σχέση με το βάθος. Στη γραμμή θραύσης του κυματισμού, η ταχύτητα λαμβάνει τη μέγιστη τιμή:

$$V_b = \frac{5\pi \tan \beta^* \sin \theta_o}{16 C_f C_o} g H_b \quad (2.63)$$

Όπου $\tan \beta^* = \frac{\tan \beta}{1 + \frac{3}{8} \left(\frac{H_b}{db}\right)^2}$ η κλίση του πυθμένα λαμβάνοντας υπόψη την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, C_f είναι ο συντελεστής τριβής και εξαρτάται από την τραχύτητα του πυθμένα, C_o είναι η ταχύτητα διάδοσης στα βαθιά, θ_o η γωνία διάδοσης του κυματισμού στα βαθιά και H_b το ύψος του κυματισμού στη θέση θραύσης.



Εικόνα 2.16 Κατανομή της αδιάστατης μέσης ταχύτητας κυματογενούς ρεύματος κατά μήκος ακτογραμμής. Με διακεκομμένες φαίνεται το μοντέλο που συμπεριλαμβάνει και διάχυση της ορμής (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006)

Η συνολική παροχή ρευστού κατά μήκος της ακτογραμμής είναι:

$$Q = \int_{x_b}^{x_s} V d dx = \frac{5\pi}{48C_f} \frac{\sin \theta_o}{C_o} g H_b d_b^2 \quad (2.64)$$

Όπου x_s αντιστοιχεί στην ακτογραμμή ($d = 0$) και x_b στη θραύση ($d = d_b$).

Η παράκτια στερεομεταφορά εκφράζεται είτε ως παροχή ξηρού βάρους στερεών I_l είτε ως παροχή μεικτού όγκου Q_l ιζήματος. Αυτά τα δυο μεγέθη συσχετίζονται μέσω της εξίσωσης:

$$I_l = \rho g (S - 1) (1 - n) Q_l \quad (2.65)$$

Όπου S το ειδικό βάρος του ιζήματος, και n το πορώδες του.

Οι παραπάνω ποσότητες υπολογίζονται μέσω των εξισώσεων:

$$I_l = \frac{K}{16} \rho g^{3/2} H_b^2 d_b^{1/2} \sin 2\theta_b \quad (2.66)$$

$$Q_l = \frac{K}{16 (S - 1) (1 - n)} H_b^2 \sqrt{g d_b}$$

2.5.2 Εγκάρσια στερεομεταφορά

Η εγκάρσια στερεομεταφορά ορίζεται ως η κίνηση του ιζήματος κάθετα στην ακτογραμμή και οφείλεται κυρίως στη δράση της παλίρροιας, του ανέμου και των κυματισμών. Η κίνηση

των σωματιδίων χωρίζεται σε χειμερινή και θερινή. Έχει παρατηρηθεί πως τους χειμερινούς μήνες λόγω των πιο έντονων κυματικών φαινομένων λαμβάνει χώρα και μεγαλύτερη μετακίνηση ιζήματος προς τα ανοιχτά, και έτσι η ακτή να διαβρώνεται. Αντίθετα, τους καλοκαιρινούς μήνες, η δράση των κυματισμών είναι ηπιότερη, η κίνηση των ιζημάτων γίνεται από τα ανοικτά προς την ακτή και έτσι το πλάτος της αυξάνεται.

Η καθαρή εγκάρσια στερεομεταφορά υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (Stive & Battjes, 1984)

$$\overline{q(x)} = \overline{\int_a u(x, z, t) c(x, z, t) dz}$$

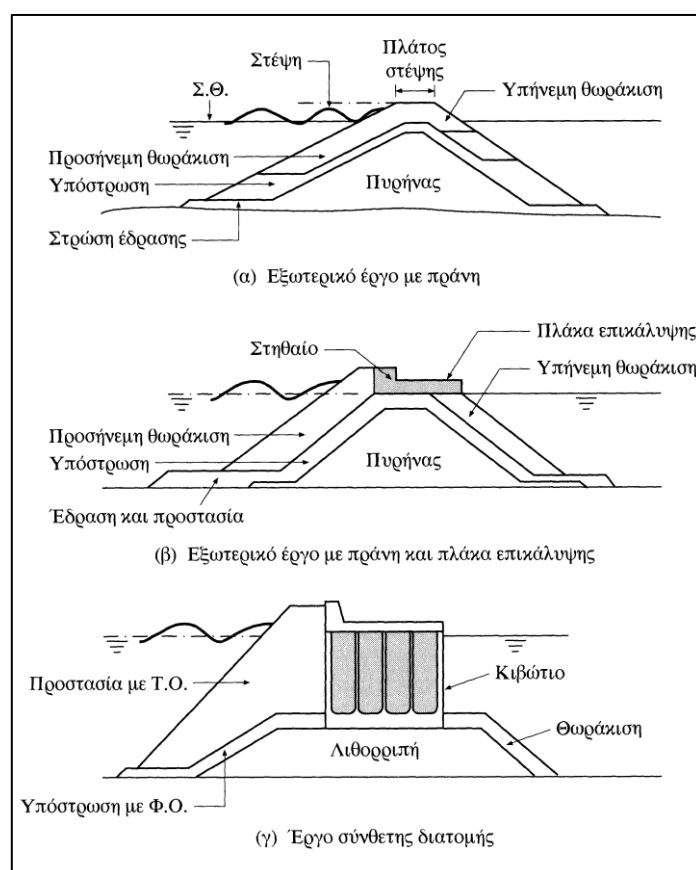
Όπου $u(x, z, t)$ το πεδίο των οριζόντιων ταχυτήτων και $c(x, z, t)$ η συγκέντρωση του ιζήματος.

3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

3.1 Γενικά

Στην Ελλάδα η πλέον συνήθης μέθοδος κατασκευής των εξωτερικών λιμενικών έργων είναι με λιθορριπές, σχηματίζοντας τραπεζοειδείς πρισματικές μορφές με πρηνή χρησιμοποιώντας φυσικούς ογκόλιθους, συνήθως προερχόμενους από λατομείο. Όταν το μέγεθος ή οι ανάγκες του έργου το απαιτούν, χρησιμοποιούνται τεχνητοί ογκόλιθοι προκατασκευασμένοι από σκυρόδεμα σε τυποποιημένες μορφές που εξασφαλίζουν καλή αλληλοεμπλοκή και απόσβεση της κυματικής ενέργειας.

Οι κατασκευές αυτής της διάταξης έχουν ως βασικό πλεονέκτημα την εγγενή σταθερότητα της τραπεζοειδούς τους διατομής έναντι αντίστοιχων έργων προστασίας με κατακόρυφο μέτωπο, ενώ ταυτόχρονα παραμένουν ευσταθείς ακόμα και έπειτα από μερική αστοχία του πρηνούς τους. Επιπλέον, το κεκλιμένο προσήνεμο επίπεδο επιτρέπει μεγαλύτερη απορρόφηση της κυματικής ενέργειας σε σχέση με το κατακόρυφο μέτωπο που προκαλεί σχεδόν ολική ανάκλαση. Τέλος, τα έργα με λιθορριπές κατασκευάζονται και επισκευάζονται με μεγαλύτερη ευκολία. Βασικότερο μειονέκτημά τους είναι ο μεγάλος όγκος υλικών που απαιτείται για την κατασκευή τους, λόγω των μεγάλων διαστάσεων αυτών των έργων (η βάση των τραπεζοειδών διατομών μπορεί εύκολα να ξεπεράσει τα 100 m).

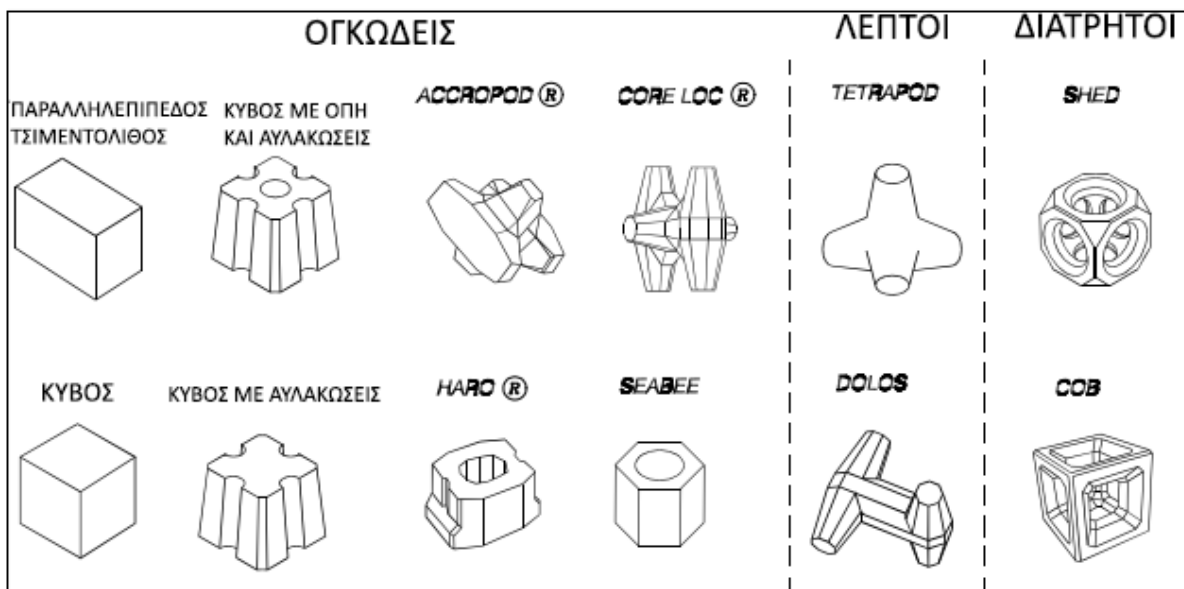


Εικόνα 3.1 Τύποι έργων προστασίας με πρηνή (Μέμος, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, 2013).

Ός προς την μορφή της διατομής των έργων με πρηνή διακρίνουμε τους ακόλουθους τύπους:

- συμβατικής μορφής, στην οποία οι ογκόλιθοι τοποθετούνται σε επάλληλες στρώσεις που διαμορφώνουν και την στέψη του έργου
- με στηθαίο και πλάκα επικάλυψης για διαμόρφωση της στέψης
- σύνθετης μορφής, όπου το έργο αποτελείται από πρηνή στην προσήνεμη πλευρά και κατακόρυφο μέτωπο στην υπήνεμη. Το κατακόρυφο μέτωπο μπορεί να διαμορφωθεί από προκατασκευασμένο κιβώτιο για να εξυπηρετεί τις ανάγκες πρόσδεσης σκαφών.

Όσον αφορά τη στέψη του έργου, αυτή συχνά διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπει την προσπέλαση σε μηχανήματα για την συντήρηση και την επισκευή του έργου. Το σώμα της διατομής κατασκευάζεται από διαβαθμισμένες λιθορριπές με τον πυρήνα να αποτελείται από το πιο λεπτόκοκκο υλικό. Η εξωτερική θωράκιση από φυσικούς ή τεχνητούς ογκόλιθους ανάλογα με την διαθεσιμότητα των πρώτων υλών – συνήθως στην Ελλάδα λόγω της αφθονίας τους, χρησιμοποιούνται φυσικοί λαξευτοί ασβεστόλιθοι. Σε περίπτωση μη διαθεσιμότητας φυσικών ογκόλιθων κατάλληλου βάρους επιλέγονται τεχνητοί (προκατασκευασμένοι από σκυρόδεμα) σε τυποποιημένες μορφές που εξασφαλίζουν αλληλοεμπλοκή και ικανοποιητική απόσβεση της κυματικής ενέργειας (Μέμος, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, 2013).



Εικόνα 3.2 Διάφορες μορφές τεχνητών ογκόλιθων (USACE, Coastal Engineering Manual, 2006).

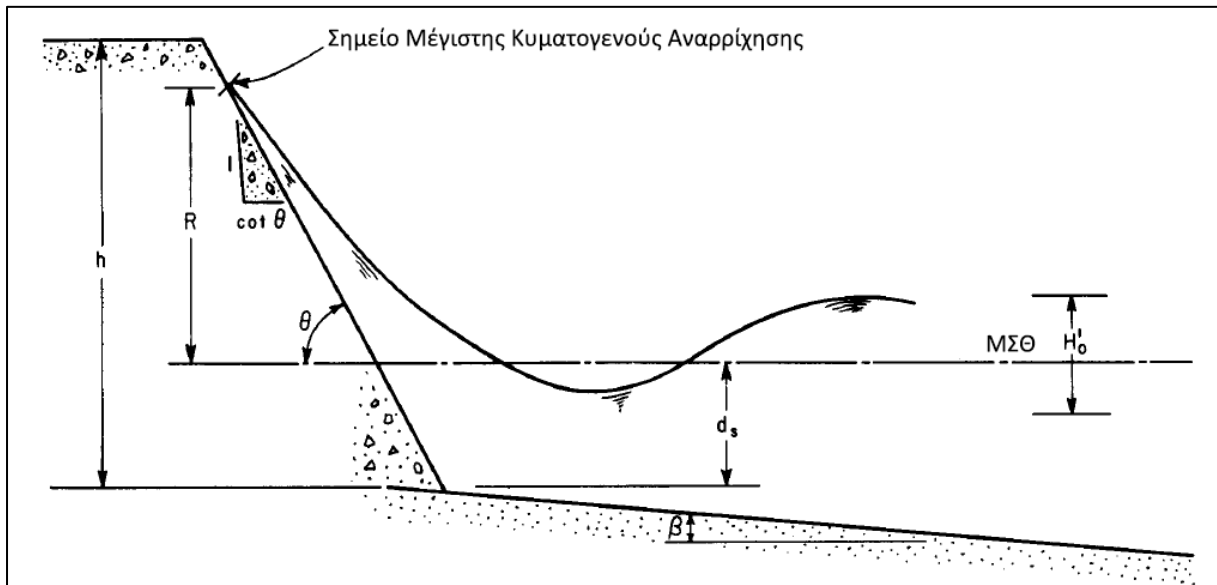
3.2 Σχεδιασμός Λιμενικών Έργων - Κυματοθραυστών

3.2.1 Κυματογενής Αναρρίχηση – Μετάδοση

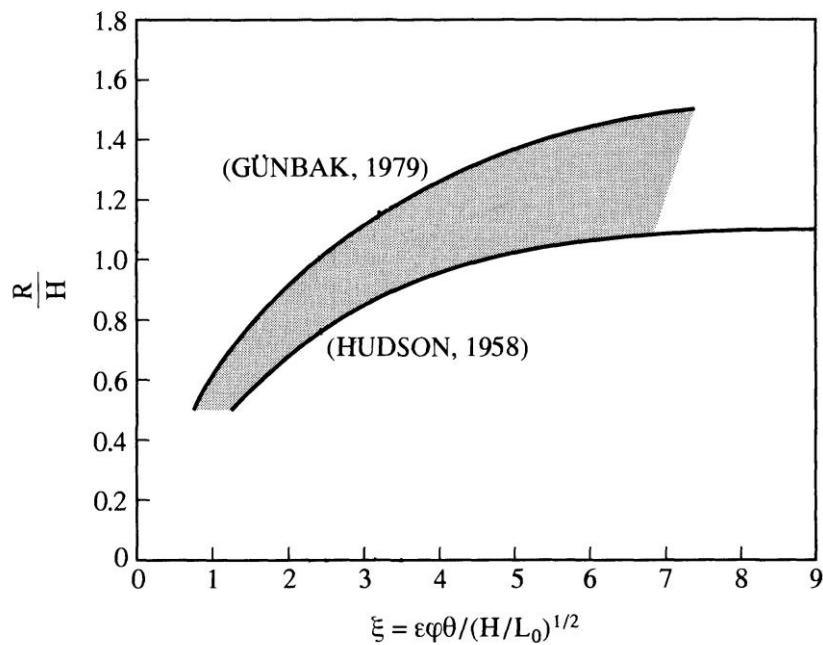
Η στέψη του κυματοθραύστη R_c , δηλαδή το τμήμα της κατασκευής που βρίσκεται πάνω από την στάθμη ηρεμίας της θάλασσας πρέπει να υπολογίζεται σύμφωνα με την υπερπήδηση R έτσι ώστε να ισχύει $R_c \geq R$. Η κυματογενής αναρρίχηση εξαρτάται κυρίως από την κλίση του πρηνούς του κυματοθραύστη και από τα χαρακτηριστικά του κύματος.

Ο υπολογισμός του συντελεστή κυματογενούς αναρρίχησης R/H , υπολογίζεται σύμφωνα με την Εικόνα 3.4, η οποία ισχύει για απλούς μονοχρωματικούς κυματισμούς ύψους H στη θέση του έργου, και μήκους L_o στα βαθιά. Το γραμμοσκιασμένο πεδίο αφορά πειραματικές τιμές,

οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό μόνο παρουσία θωράκισης μεγάλου πορώδους (πχ με χρήση τεχνητών ογκόλιθων). Σε διαφορετική περίπτωση, συνίσταται η χρήση των τιμών του άνω ορίου στο εν λόγω σχήμα.



Εικόνα 3.3 Ορισμός μεγεθών για την κυματογενή αναρρίχηση (USACE, Shore Protection Manual, 1984).



Εικόνα 3.4 Αναρρίχηση σε διαπερατά πρηνή κυματοθραυστών (Μέμος, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, 2013).

Στην πραγματικότητα ωστόσο, συναντάμε σύνθετους κυματισμούς οι οποίοι αναλύονται ως άθροισμα πολλών μονοχρωματικών κυμάτων, επομένως και η αναρρίχηση θα μεταβάλλεται παράλληλα με το εύρος των κυματισμών που προσπίπτουν στην κατασκευή. Η εκτίμησή της γίνεται υποθέτοντας κατανομή Rayleigh για τον κυματισμό στα βαθιά, οπότε η αντίστοιχη εξίσωση για την αναρρίχηση είναι:

$$\frac{R_p}{R_s} = \left(-\frac{\ln p}{2} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

Όπου R_s η αναρρίχηση του χαρακτηριστικού κύματος και R_p η αναρρίχηση με πιθανότητα υπέρβασης p .

Γενικότερα το R_p μπορεί να εκφρασθεί για κατανομή υψών κατά Rayleigh σύμφωνα με τους Van der Meer & Stam ως εξής:

$$R_p = e(-\ln p)^{1/f} \quad (3.2)$$

Όπου $e = 0.4H_s s_m^{-0.25}(\tan \theta)^{0.2}$ και f η παράμετρος σχήματος που εξαρτάται από την διαπερατότητα της κατασκευής και ορίζεται ως:

$$f = 3\xi_m^{-0.75} \text{ για } \xi_m \leq \xi_{mc} \text{ (plunging waves)} \quad (3.3)$$

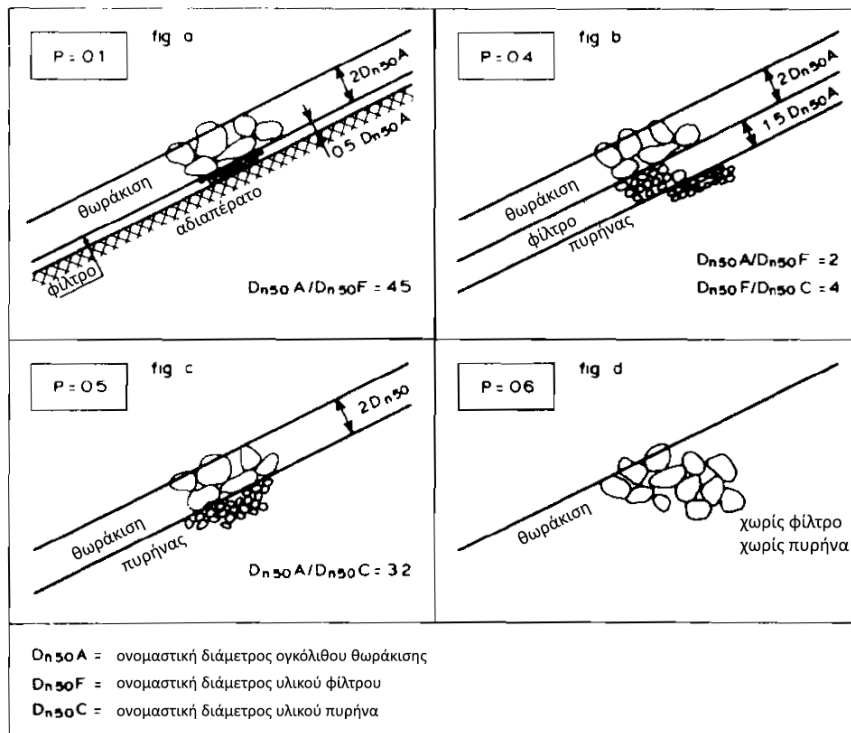
$$f = 0.52P^{-0.3}\xi_m^P\sqrt{\cot\theta} \text{ για } \xi_m > \xi_{mc} \text{ (surging waves)} \quad (3.4)$$

Στις παραπάνω εκφράσεις, η διαφοροποίηση μεταξύ των (3.3) και (3.4) περιγράφεται μέσω του κρίσιμου αριθμού Iribarren:

$$\xi_{mc} = \left(5.77P^{-0.3}\xi_m^P\sqrt{\cot\theta} \right)^{1/(P+0.75)} \quad (3.5)$$

Όπου $\xi_m = \tan \theta \sqrt{\frac{g T_m^2}{2\pi H_s}}$, H_s το χαρακτηριστικό κύμα και T_m η μέση περίοδος του προσπίπτοντος κυματισμού.

Ο συντελεστής P καθορίζει τη διαπερατότητα της κατασκευής και εξαρτάται από το μέγεθος των στρώσεων και του πυρήνα της κατασκευής. Η κατώτερη τιμή είναι $P = 0.1$ για στρώση θωράκισης δύο διαμέτρων σε αδιαπέρατο πυρήνα (άμμο ή άργιλο) και λεπτό ενδιάμεσο στρώμα. Η ανώτερη τιμή του $P = 0.6$ αφορά ομοιογενή κατασκευή αποτελούμενη μόνο από ογκόλιθους θωράκισης. Κυματοθραύστες με θωράκιση πάχους δύο διαμέτρων, ένα ή περισσότερα υποστρώματα και πυρήνα χαρακτηρίζονται από τιμές P της τάξης 0.4 – 0.5. Τα παραπάνω απεικονίζονται στην Εικόνα 3.5:



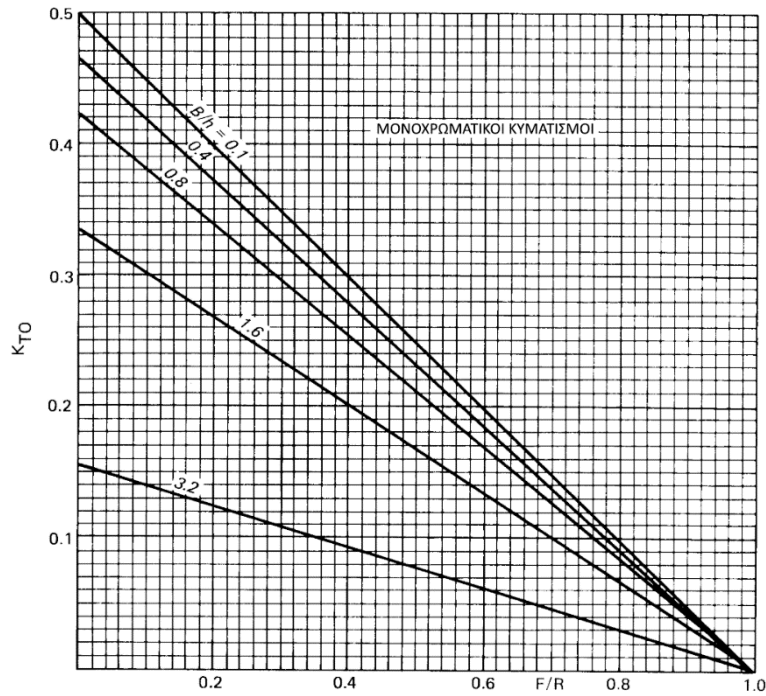
Εικόνα 3.5 Τομές εξωτερικών έργων προστασίας και αντίστοιχοι συντελεστές διαπερατότητας P (van der Meer & Stam, 1992)

Όταν το ελεύθερο περιθώριο του έργου $F = h - d_s$ (Εικόνα 3.3) είναι μικρότερο από την αναρρίχηση R , τότε έχουμε υπερπήδηση της κατασκευής από τον κυματισμό. Λόγω αυτού, προκαλείται κυματισμός στην προστατευμένη περιοχή που ενισχύεται από τα κύματα μικρής κυρτότητας που διαπερνούν το σώμα της λιθορριπής. Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης K_T εκφράζεται μέσω του συντελεστή μετάδοσης λόγω υπερπήδησης K_{T0} και του συντελεστή διάδοσης μέσα από το σώμα της κατασκευής K_t μέσω της εξίσωσης:

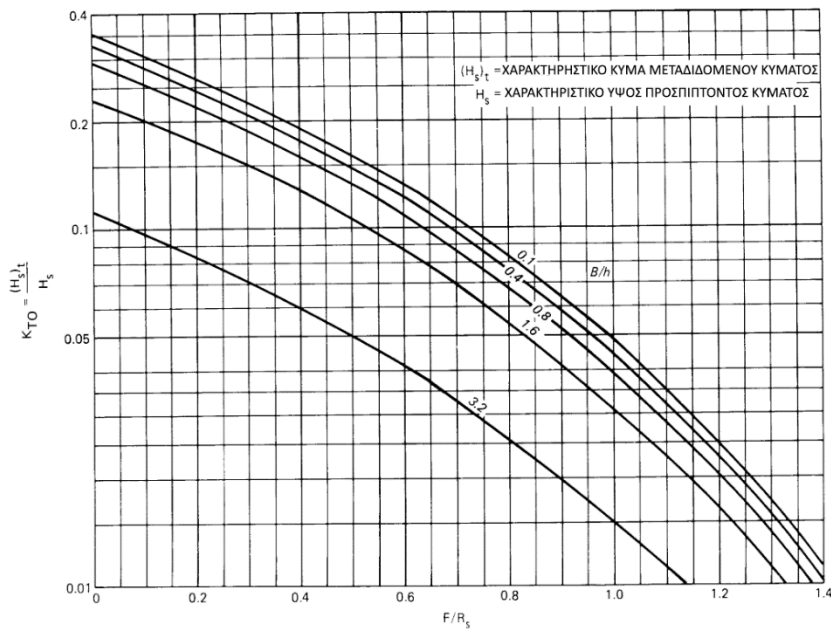
$$K_T = \frac{H_T}{H_i} = \sqrt{K_{T0}^2 + K_t^2} \quad (3.6)$$

Όπου H_T το ύψος του μεταδιδόμενου κυματισμού και H_i το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού.

Ο υπολογισμός του συντελεστή μετάδοσης λόγω υπερπήδησης μπορεί να υπολογισθεί μέσω των παρακάτω δύο διαγραμμάτων για μονοχρωματικούς και σύνθετους κυματισμούς αντίστοιχα:

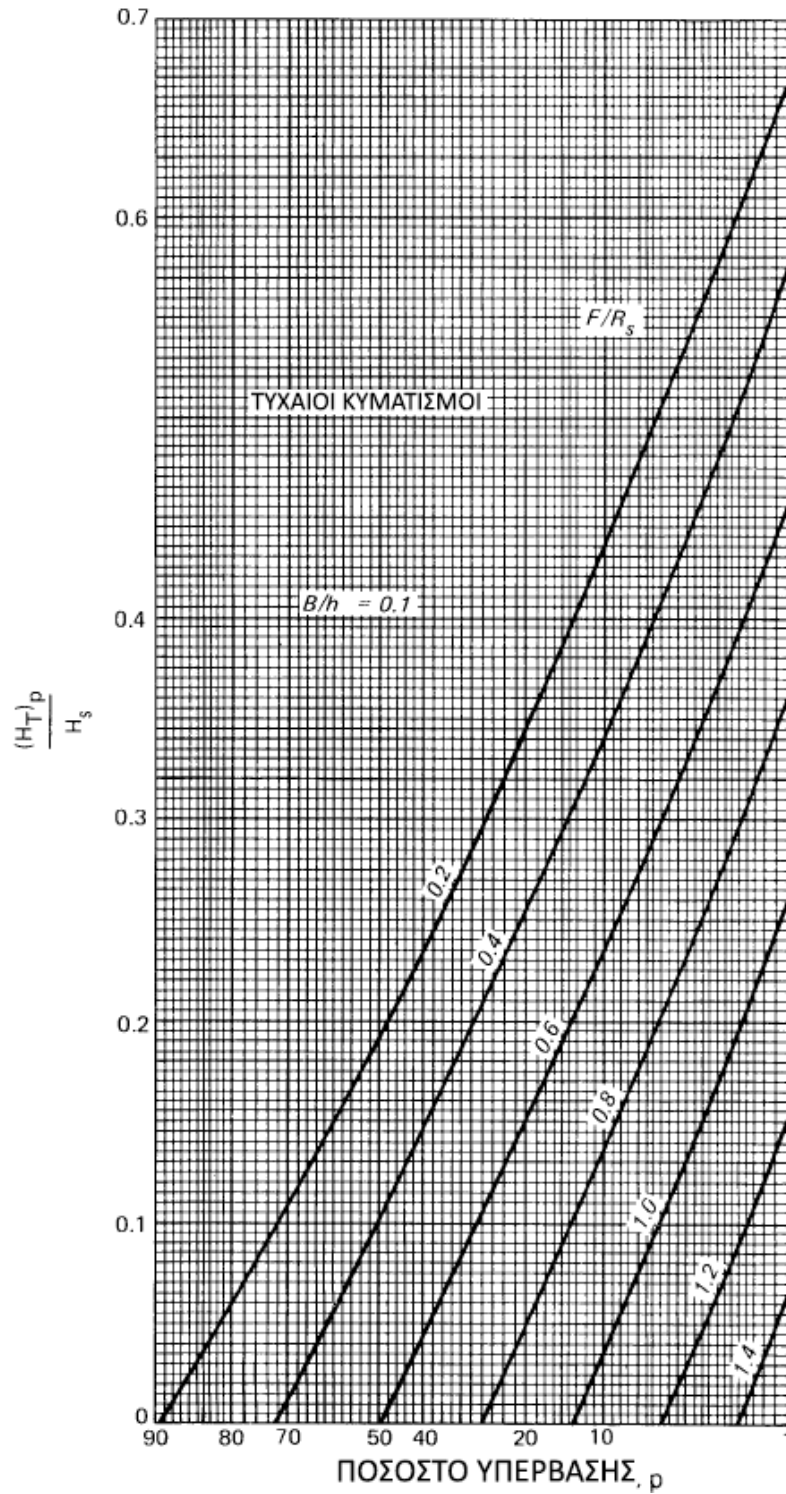


Εικόνα 3.6 Συντελεστής υπερπήδησης K_{TO} για μονοχρωματικό κυματισμό (USACE, Shore Protection Manual, 1984).



Εικόνα 3.7 Συντελεστής υπερπήδησης K_{TO} για σύνθετους κυματισμούς (USACE, Shore Protection Manual, 1984).

Επιπλέον, το ύψος του μεταδιδόμενου κυματισμού λόγω υπερπήδησης μπορεί να υπολογισθεί ως συνάρτηση του ποσοστού υπέρβασης μέσω του παρακάτω διαγράμματος:



Εικόνα 3.8 Ύψος κύματος λόγω υπερπήδησης ως συνάρτηση του ποσοστού υπέρβασης (USACE, Shore Protection Manual, 1984).

Ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με την παρακάτω Εξίσωση 3.7 (van der Meer & Daemen, 1994):

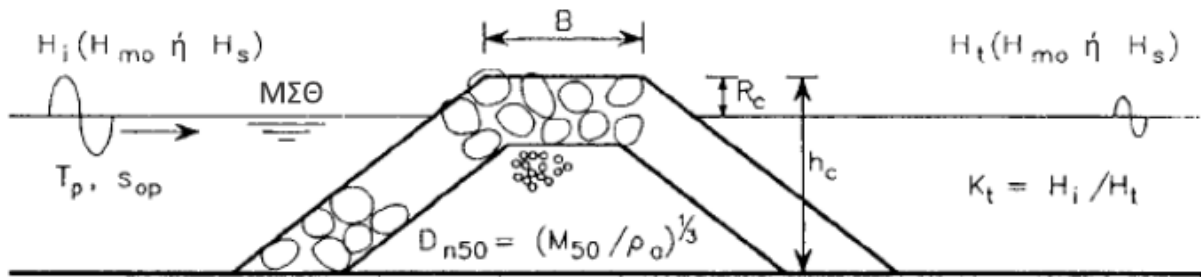
$$K_T = \left(0.031 \frac{H_s}{D_{n50}} - 0.24 \right) \frac{R_c}{D_{n50}} + b \quad (3.7)$$

Όπου D_{n50} η διάμεση ονομαστική διάμετρος των φυσικών ογκόλιθων, R_c η στάθμη της στέψης του έργου και:

$b = -5.42 s_{op} + 0.0323 H_s/D_{n50} - 0.0017(B/D_{n50})^{1.84} + 0.51$ για συμβατικούς κυματοθραύστες, $b = -2.6 s_{op} + 0.05 H_s/D_{n50} + 0.85$ για ομογενείς κυματοθραύστες, B το πλάτος της στέψης, $s_{op} = 2\pi H_i/(gT_p^2)$ η κλίση του κύματος στα βαθιά.

Τα εύρη των παραμέτρων που ελέγχθηκαν εργαστηριακά στην παραπάνω εξίσωση είναι:

$$1 < H_s/D_{n50} < 6, \quad 0.01 < s_{op} < 0.05, \quad 2 < R_c/D_{n50} < 6.$$



Εικόνα 3.9 Οι ορισμοί των παραμέτρων που επηρεάζουν το συντελεστή μετάδοσης.

Αξίζει να αναφερθεί πως η μετάδοση κυματισμού στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και η δημιουργία κύματος στην προστατευόμενη περιοχή συνδέεται με τη λειτουργική αστοχία του έργου. Αυτό σημαίνει πως το έργο μπορεί να μην έχει παρουσιάσει καμία αστοχία όσον αφορά την ευστάθειά του, ωστόσο το ύψος του κυματισμού που δημιουργείται (πχ σε μια λιμενολεκάνη) είναι τόσο, ώστε να μην είναι δυνατή η λειτουργία της προστατευόμενης περιοχής (πχ πρόσδεση ή φορτοεκφόρτωση σκαφών).

Τέλος, σημειώνεται πως σε αρκετές περιπτώσεις ενδείκνυται η χρήση βυθισμένων κυματοθραυστών, των οποίων η στέψη βρίσκεται κάτω από την στάθμη ηρεμίας της θάλασσας. Αυτό έχει αρκετά πλεονεκτήματα όσον αφορά την τοποθέτησή τους σε περιοχές ειδικού ενδιαφέροντος (πχ τουριστικές, περιβαλλοντικά προστατευόμενες) καθώς δεν προκαλούν οπτική όχληση, ενώ το κόστος κατασκευής τους είναι χαμηλότερο, αφού χρειάζεται μικρότερη ποσότητα υλικών. Ωστόσο οι κατασκευές αυτές δεν μπορούν να αποδώσουν στον ίδιο βαθμό με τους κλασικούς κυματοθραύστες καθώς είναι ιδιαίτερα διαπερατές έναντι των κυματισμών. Για τους βυθισμένους κυματοθραύστες γενικά ισχύει $K_T > 0.4$ και αυτή η μικρή απορρόφηση ενέργειας οφείλεται κυρίως στο ότι δεν φτάνουν μέχρι τη στάθμη όπου μεταδίδεται η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας του κυματισμού. Στο σχεδιασμό τους προβλέπεται μεγάλο πλάτος στέψης ώστε να προκαλείται εκεί θραύση του μεγαλύτερου ποσοστού κυματισμών και έτσι η κατασκευή να έχει καλύτερη απόδοση.

3.2.2 Υδραυλική Ευστάθεια Θωράκισης

Η θωράκιση των έργων προστασίας δέχεται δυνάμεις από τους προσπίπτοντες κυματισμούς που τείνουν να παρασύρουν τους ογκόλιθους ή να τους μετατοπίσουν από την αρχική τους θέση, με αποτέλεσμα την πρόκληση ζημιών και την τελική κατάρρευση του έργου. Έχει φανεί από έρευνες πως η σχέση μεταξύ των συχνοτήτων ταλάντωσης του νερού στο πορώδες της διατομής και έξω από αυτή, σε συνάρτηση με την κυρτότητα του κυματισμού, παίζουν σημαντικό ρόλο στην ευστάθεια του πρανούς. Ως πλέον επικίνδυνη ζώνη περιγράφεται η

θέση της ισάλου στο πρανές και συγκεκριμένα κατά τη φάση καθόδου του κύματος, οπότε εξέρχεται η μάζα του νερού από το εσωτερικό του έργου (Μέμος, Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα, 2013). Μεγαλύτερος κίνδυνος εμφανίζεται για τιμές $2 < \xi < 3$ του αριθμού Iribarren $\xi = \tan \theta / \sqrt{H/L_0}$. Κυριότερος τρόπος αντιμετώπισης σε περίπτωση που το παραπάνω κριτήριο παραβιάζεται είναι η αλλαγή της γωνίας θ του πρανούς.

Έχοντας ως δεδομένα τα χαρακτηριστικά του κύματος, τη βαθυμετρία στη θέση κατασκευής του έργου και την γεωμετρία αυτού, ζητούμενο είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους των ογκόλιθων που θα χρησιμοποιηθούν για τη θωράκιση του έργου. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος υπολογισμού είναι με τη χρήση της εξίσωσης του Hudson (1953, 1959) ο οποίος βασίστηκε σε πειράματα φυσικών μοντέλων πρανών, χωρίς υπερπήδηση και με διαπερατό πυρήνα. Με την παρακάτω εξίσωση υπολογίζεται το W_{50} που είναι το μέσο βάρος των ογκόλιθων θωράκισης.

$$W_{50} = \frac{\gamma H^3}{K_D \Delta^3 \cot \theta} \quad (3.8)$$

Όπου γ το ειδικό βάρος του πετρώματος των ογκόλιθων, H το κύμα σχεδιασμού (συνήθως το χαρακτηριστικό κύμα), K_D συντελεστής ευστάθειας, Δ η σχετική πυκνότητα του πετρώματος και θ η γωνία του πρανούς.

Η τιμή του K_D σύμφωνα με το Rock Manual (2007) είναι 3.5 για θραυόμενους κυματισμούς και 4.0 για μη θραυόμενους. Σημειώνεται πως η θραύση που αναφέρεται, προκαλείται λόγω του βάθους του πυθμένα, και όχι λόγω της κλίσης του πρανούς της κατασκευής καθαυτής.

Για τη μετατροπή του βάρους των ογκόλιθων σε τυπική διάστασή τους, μπορεί να γίνει χρήση της:

$$D = 1.15 \left(\frac{W}{\gamma} \right)^{1/3} \quad (3.9)$$

Το βασικό πλεονέκτημα της εξίσωσης Hudson είναι η απλότητα και το μεγάλο εύρος χρήσης της για τις διάφορες διαμορφώσεις πρανών και τις αντίστοιχες τιμές του K_D . Οι περιορισμοί της είναι η εφαρμογή μονοχρωματικών κυματισμών, η μη θεώρηση της περιόδου του κύματος και της διάρκειας της καταιγίδας καθώς και του επιτρεπτού επιπέδου ζημιών, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε διαπερατές κατασκευές που δεν υφίστανται υπερπήδηση.

4 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται από την υπάρχουσα βιβλιογραφία τα πιο κοινά μαθηματικά μοντέλα – μέθοδοι για τον υπολογισμό του μήκους αναπτύγματος, και του κυματικού κλίματος (ύψος κύματος και περίοδος). Από προηγούμενη εργασία έχει αναδειχθεί η δυσκολία της διερεύνησης της βιβλιογραφίας πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, λόγω της έλλειψης επαρκών στατιστικών στοιχείων για την περιγραφή του κυματικού κλίματος, των συνεχών διορθωμένων αναδημοσιεύσεων και του ότι πολλοί ερευνητές προτείνουν δικές τους μεθοδολογίες με αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα (Σταματιάδης, 2019).

Είναι εμφανές λοιπόν, πως λόγω πληθώρας των μεθόδων υπολογισμού ο μελετητής βρίσκεται απέναντι σε ένα δύσκολο έργο επιλογής της καταλληλότερης, η οποία θα ταιριάζει περισσότερο στις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά του προβλήματος που καλείται να επιλύσει.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα πως οι μελετητές καταφεύγουν στις μαθηματικές εξισώσεις ελλείψει άλλων δεδομένων. Ο ορθός τρόπος υπολογισμού του κύματος σχεδιασμού πραγματοποιείται με τη συλλογή κυματικών δεδομένων, δηλαδή μετρήσεων από σταθμούς εγκατεστημένους στην περιοχή μελέτης για μεγάλο χρονικό διάστημα και η στατιστική τους επέκταση μέσω κατανομής Weibull με στόχο την εύρεση του ύψους κύματος με μεγάλη περίοδο επαναφοράς (συνήθως 100 χρόνων). Στην Ελλάδα ωστόσο, δεν υπάρχει πυκνό δίκτυο κυματικών καταγραφών επομένως συχνά γίνεται χρήση των μαθηματικών εξισώσεων που υπολογίζουν τον μέγιστο κυματισμό που μπορεί να αναπτυχθεί σε μια περιοχή βάσει του αναπτύγματος πελάγους.

Παρακάτω ακολουθούν οι επτά βασικότερες μαθηματικές μέθοδοι που επικρατούν στη βιβλιογραφία.

4.1 SMB

Η μέθοδος αυτή προέρχεται από την συνδυαστική εμπειρική διαδικασία που χρησιμοποίησαν οι Sverdrup & Munk (1974) για το πρώτο ευρύ σύστημα πρόβλεψης κυματισμών. Οι καμπύλες πρόβλεψης Sverdrup-Munk αναθεωρήθηκαν από τον Bretschneider (1952, 1958) με τη χρήση εμπειρικών δεδομένων. Αυτό το σύστημα πρόβλεψης επομένως καλείται συχνά “Sverdryp-Munk-Bretschneider” ή μέθοδος SMB (USACE, Shore Protection Manual, 1984).

Ο υπολογισμός του ενεργού μήκους αναπτύγματος (Fetch effective ή F_{eff}) που χρησιμοποιείται κατ’ εξοχή στη βιβλιογραφία ορίζεται ανάλογα με την περιοχή μελέτης. Για κάθε διεύθυνση ανέμου τα μήκη αναπτύγματος (F_i) μετρώνται σε ένα τόξο $\pm 45^\circ$ από την κύρια διεύθυνση, ανά 6° . Συνίσταται προσοχή στο ότι δεν χαράσσεται ακτίνα η οποία να ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση, και κατ’ επέκταση, οι πλησιέστερες ακτίνες απέχουν από αυτή 3° . Με αυτόν τον τρόπο μετρώνται συνολικά 15 μήκη αναπτύγματος που συνεισφέρουν στον υπολογισμό του ενεργού μήκους αναπτύγματος ως εξής:

$$F_{eff} = \frac{\sum F_i \cos \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \quad (4.1)$$

Όπου θ_i είναι η γωνία μεταξύ κάθε μήκους αναπτύγματος και της κύριας διεύθυνσης.

Αρχικά υπολογίζεται η οριακή διάρκεια πνοής του ανέμου (t_{min}) μέσω της ((4.3)). Αν η διάρκεια πνοής του ανέμου t είναι μεγαλύτερη από την οριακή ταχύτητα, τότε επικρατούν fetch-limited συνθήκες και το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s υπολογίζεται μέσω της ((4.2)). Ειδικά, επικρατούν duration-limited συνθήκες, και πρέπει να γίνει αντικατάσταση του F με F_{eq} , που είναι το ισοδύναμο μήκος αναπτύγματος. Η ((4.3)) τότε, επιλύεται ως προς F_{eq} , με διάρκεια πνοής t αντί για t_{min} και έπειτα το H_s υπολογίζεται μέσω της ((4.2)) αντικαθιστώντας το F με F_{eq} .

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.283 \tanh \left(0.0125 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.42} \right) \quad (4.2)$$

$$g \frac{t_{min}}{U_{10}} = 6.5882 \exp \left(\left(0.0161 \left(\ln \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right) \right)^2 - 0.3692 \left(\ln \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right) \right) + 2.2024 \right)^{0.5} + 0.8798 \left(\ln \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right) \right) \right) \quad (4.3)$$

Όπου U_{10} η ταχύτητα του ανέμου 10 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, F το μήκος αναπτύγματος, g η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/s^2), t_{min} η οριακή διάρκεια πνοής.

Η περίοδος αιχμής T_p υπολογίζεται από την:

$$\frac{gT_p}{2\pi U_{10}} = 1.2 \tanh \left(0.077 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.25} \right) \quad (4.4)$$

4.2 Wilson

Ο Wilson (1965) έδωσε ένα σετ δύο εξισώσεων που αντιπροσωπεύει τα δεδομένα από κυματικές παρατηρήσεις διαφόρων μελετών. Για κάθε διεύθυνση ανέμου τα μήκη αναπτύγματος (F_i) μετρώνται σε ένα τόξο $\pm 45^\circ$ από την κύρια διεύθυνση, ανά 6° . Συνίσταται προσοχή στο ότι δεν χαράσσεται ακτίνα η οποία να ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση, και κατ' επέκταση, οι πλησιέστερες ακτίνες απέχουν από αυτή 3° . Με αυτόν τον τρόπο μετρώνται συνολικά 15 μήκη αναπτύγματος που συνεισφέρουν στον υπολογισμό του ενεργού μήκους αναπτύγματος ως εξής:

$$F_{eff} = \frac{\sum F_i \cos^2 \theta_i}{\sum \cos \theta_i} \quad (4.5)$$

Στη μέθοδο Wilson η ελάχιστη διάρκεια πνοής (t_{min}) και το ισοδύναμο μήκος αναπτύγματος (F_{eq}) υπολογίζονται μέσω των

$$t_{min} = F^{0.73} U_{10}^{-0.46} \quad (4.6)$$

$$F_{eq} = t^{1.37} U_{10}^{0.63} \quad (4.7)$$

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s υπολογίζεται μέσω της:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.3 \left(1 - \left(1 + 0.04 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{0.5} \right)^{-2} \right) \quad (4.8)$$

Και η περίοδος αιχμής T_p μέσω της:

$$\frac{gT_p}{U_{10}} = 1.37 \left(1 - \left(1 + 0.008 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \right)^{-5} \right) \quad (4.9)$$

4.3 JONSWAP

Οι Hasselmann et al. (1973) έπειτα από ανάλυση δεδομένων που συλλέγηκαν από το Joint North Sea Wave Observation Project (JONSWAP) πρότεινε την χρήση μαθηματικών εξισώσεων από τις οποίες θα υπολογίζεται το χαρακτηριστικό ύψος και η περίοδος επαναφοράς του κυματισμού.

Στη μέθοδο αυτή, για κάθε κύρια διεύθυνση ανέμου μετρώνται τα μήκη αναπτύγματος (F_i) σε ένα τόξο $\pm 12^\circ$ ανά 3° . Με αυτόν τον τρόπο μετρώνται συνολικά 9 μήκη αναπτύγματος που συνεισφέρουν στον υπολογισμό του ενεργού μήκους αναπτύγματος ως εξής:

$$F_{eff} = \frac{\sum F_i}{i} \quad (4.10)$$

Ο υπολογισμός της οριακής διάρκειας ανέμου (t_{min}) γίνεται μέσω της:

$$\frac{gt_{min}}{U_{10}} = 68.8 \frac{gF}{U_{10}^2} \quad (4.11)$$

Αν $t < t_{min}$ τότε υφίστανται συνθήκες από τις οποίες το κρίσιμο μέγεθος για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών είναι η διάρκεια πνοής.

Το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s και η περίοδος αιχμής T_p υπολογίζονται ως:

Fetch-Limited ($t \geq t_{min}$)

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.0016 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/2} \quad (4.12)$$

$$\frac{gT_p}{U_{10}} = 0.2857 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{1/3} \quad (4.14)$$

Duration-Limited ($t < t_{min}$)

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 8.29 \cdot 10^{-5} \left(\frac{gt}{U_{10}} \right)^{5/7} \quad (4.13)$$

$$\frac{gT_p}{U_{10}} = 0.0676 \left(\frac{gt}{U_{10}} \right)^{3/7} \quad (4.15)$$

Στην περίπτωση πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας όπου $\frac{gt}{U_{10}} \geq 7100$ και $\frac{gF}{U_{10}^2} \geq 22800$ οι εξισώσεις διαμορφώνονται ως εξής:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 0.2433 \quad (4.16)$$

$$\frac{gT_p}{U_{10}} = 8.134 \quad (4.17)$$

4.4 CERC

Το Coastal Engineering Research Center (CERC) εξέδωσε την δουλειά του Charles L. Vincent ο οποίος επιχείρησε να δημιουργήσει ένα απλό μοντέλο πρόβλεψης κυματικών χαρακτηριστικών το οποίο να μπορεί να χρησιμοποιηθεί γρήγορα και με «φθηνά» μέσα, σε περιπτώσεις όπου οι πιο εξεζητημένες και ακριβές τεχνικές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ή όπου η ταχεία εξαγωγή αποτελεσμάτων είναι σημαντική. Βασιζόμενος στη μέθοδο JONSWAP προέβη σε ορισμένες τροποποιήσεις για την καλύτερη ανταπόκριση των duration-limited συνθηκών. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέθοδος του ενεργού μήκους αναπτύγματος του Saville (1952) υποεκτιμά την πρόβλεψη του χαρακτηριστικού κύματος σε σχέση με τις μετρήσεις. Γι' αυτό το λόγο οι προβλέψεις στη μέθοδο CERC γίνονται με τη χρήση του μήκους αναπτύγματος ως ευθεία γραμμή από το σημείο ενδιαφέροντος προς την κύρια διεύθυνση διάδοσης του ανέμου. Επιπλέον η εν λόγω μέθοδος προτείνεται να μη χρησιμοποιείται για μήκη αναπτύγματος άνω των 200 km, οπότε θα πρέπει να επιλέγεται η χρήση αριθμητικού μοντέλου πρόγνωσης. (Vincent, 1984)

Για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών σε fetch-limited και fully developed συνθήκες, οι εξισώσεις των μεθόδων CERC και JONSWAP δεν διαφοροποιούνται.

Αντίθετα για duration-limited συνθήκες τα κυματικά χαρακτηριστικά υπολογίζονται μέσω των:

$$\frac{gH_s}{U_{10}^2} = 8.51 \cdot 10^{-5} \left(\frac{gt}{U_{10}} \right)^{5/7} \quad (4.18)$$

$$\frac{gT_p}{U_{10}} = 7.02 \cdot 10^{-2} \left(\frac{gt}{U_{10}} \right)^{0.411} \quad (4.19)$$

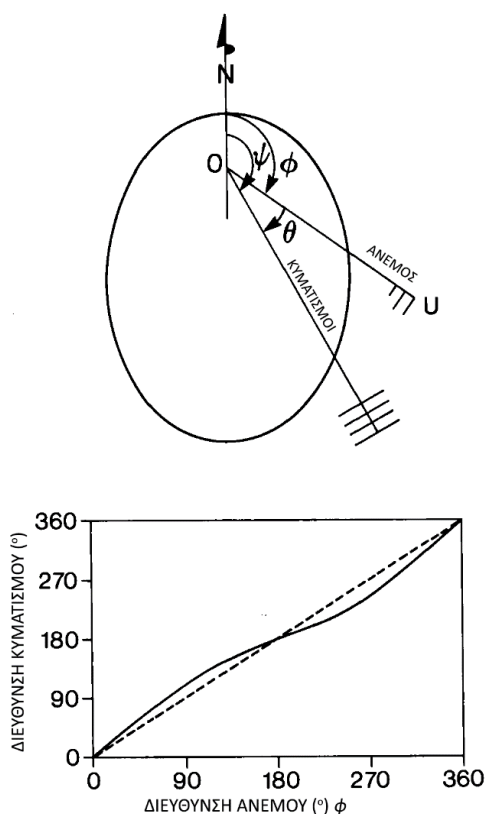
4.5 Donelan

Τα προηγούμενα μαθηματικά μοντέλα πρόβλεψης κυματισμών σε βαθιά ύδατα θεωρούσαν ταύτιση των κατευθύνσεων του ανέμου και του κυματισμού. Παρόλα αυτά, έχει δειχθεί πως κύματα με συχνότητες κοντά στην κορυφή του φάσματος μπορούν σε fetch-limited συνθήκες να διαδίδονται εκτός της διεύθυνσης του ανέμου. (Bishop & Donelan, 1983)

Σύμφωνα με τον Donelan μπορεί να καθοριστεί μια σχέση μεταξύ της κύριας διεύθυνσης της ενέργειας του κυματισμού (ψ) και της διεύθυνσης του ανέμου (φ) σε βαθιά ύδατα και για κάθε δεδομένη περιοχή. Για fetch-limited συνθήκες, ο Donelan βρήκε πως η σχέση μεταξύ φ και ψ με γνωστή κατανομή του μήκους αναπτύγματος F_ψ μπορεί να ληφθεί μεγιστοποιώντας την ποσότητα:

$$\cos\theta F_\psi^{0.426} \quad (4.20)$$

Όπου θ η γωνία μεταξύ των διευθύνσεων ανέμου και κυματισμού (βλ. Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 Διαγραμματική επεξήγηση και συσχέτιση μεταξύ της κύριας διεύθυνσης κυματικής ενέργειας και διεύθυνσης ανέμου σε ελλειπτική λίμνη (Bishop & Donelan, 1983).

Η διαδικασία για τον καθορισμό της σχέσης μεταξύ φ και ψ δίνεται παρακάτω:

1. Για την διεύθυνση ανέμου που εξετάζεται και από το σημείο ενδιαφέροντος, λαμβάνονται ακτίνες μήκους αναπτύγματος μέχρι το όριο της ακτογραμμής. Οι ακτίνες θα πρέπει να έχουν ένα «βολικό» βήμα ανάλογα με την επιθυμητή ανάλυση (μεταξύ 3° και 5°) και να σχηματίζουν τόξο $30^\circ (\pm 15^\circ$ γύρω από την διεύθυνση του ανέμου).
2. Μετρώνται τα μήκη αναπτύγματος και λαμβάνεται ο μέσος όρος.
3. Υπολογίζεται η ποσότητα της (4.20) για κάθε ακτίνα.
4. Η μέγιστη τιμή της παραπάνω έκφρασης για κάθε δεδομένη διεύθυνση ανέμου δίνει την αντίστοιχη κυρίαρχη κυματική διεύθυνση ψ .

Ο υπολογισμός της διεύθυνσης του κυματισμού αν και δεν είναι απαραίτητος για όλες τις κυματικές προγνώσεις, μπορεί να έχει μεγάλη σημασία στον σχεδιασμό κατασκευών σε βαθιά ύδατα, την εκτίμηση κυματικού κλίματος, κλπ. Σε ρηχά και μεταβατικά ύδατα η διάθλαση μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση του κυματισμού ακόμη περισσότερο.

Γνωρίζοντας την σχέση μεταξύ φ και ψ μπορεί να γίνει ελαφρώς ακριβέστερη πρόγνωση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος και της περιόδου κορυφής χρησιμοποιώντας τις fetch-limited εξισώσεις του Donelan:

$$\frac{gH_s}{(U_{10} \cos \theta)^2} = 0.00366 \left(\frac{gF_\psi}{(U_{10} \cos \theta)^2} \right)^{0.38} \quad (4.21)$$

$$\frac{gT_p}{U_{10} \cos \theta} = 0.542 \left(\frac{gF_\psi}{(U_{10} \cos \theta)^2} \right)^{0.23} \quad (4.22)$$

$$\frac{gt}{U_{10} \cos \theta} = 30.1 \left(\frac{gF_\psi}{(U_{10} \cos \theta)^2} \right)^{0.77} \quad (4.23)$$

Όπου F_ψ το μήκος αναπτύγματος στην επικρατέστερη διεύθυνση του κυματισμού.

Οι κυματικοί υπολογισμοί πρέπει να ελέγχονται για duration-limited συνθήκες. Η τιμή F_ψ μπορεί να υπολογισθεί από την (4.23) με γνωστή διάρκεια πνοής. Αν αυτή η τιμή του μήκους αναπτύγματος είναι μικρότερη από το γεωμετρικό, τότε τα κύματα είναι περιορισμένα από τη διάρκεια πνοής και το μικρότερο μήκος αναπτύγματος πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Αυτό με τη σειρά του αλλάζει τη σχέση μεταξύ φ και ψ για τις συγκεκριμένες συνθήκες ταχύτητας, κατεύθυνσης και διάρκειας ανέμου, οπότε οι νέες τιμές πρέπει να επανυπολογισθούν, όπως και το χαρακτηριστικό ύψος και η περίοδος αιχμής του κυματισμού.

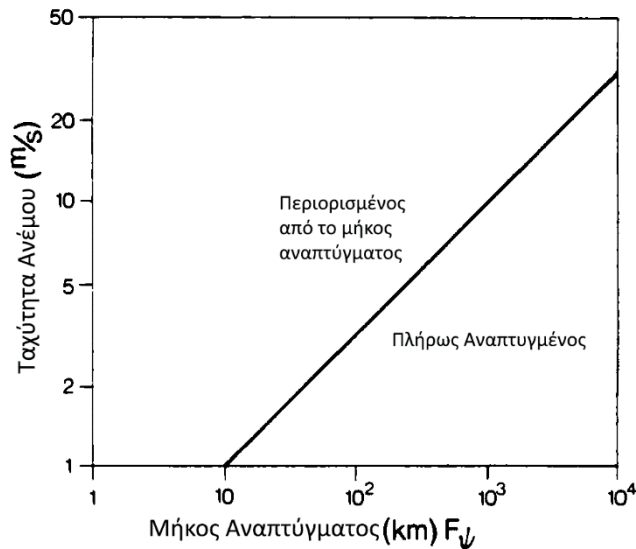
Σε περίπτωση που ισχύει ότι:

$$\frac{gF_\psi}{(U_{10} \cos \theta)^2} \geq 9.47 \cdot 10^4 \quad (4.24)$$

Τότε ο κυματισμός είναι πλήρως ανεπτυγμένος και ο υπολογισμός των κυματικών χαρακτηριστικών γίνεται μέσω των:

$$\frac{gF_{max}}{U_{10}^2} = 0.285 \quad (4.25)$$

$$\frac{gT_p}{U_{10}} = 7.54 \quad (4.26)$$



Εικόνα 4.2 Διάγραμμα διακριτοποίησης μεταξύ fetch-limited και πλήρως ανεπτυγμένου κυματισμού (Bishop & Donelan, 1983).

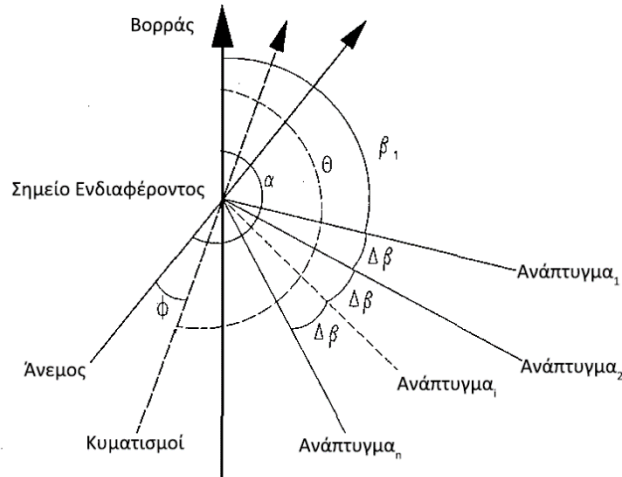
4.6 ACES

Το Automated Coastal Engineering System (ACES) είναι ένα διαδραστικό υπολογιστικό σύστημα σχεδιασμού και ανάλυσης στο πεδίο της παράκτιας μηχανικής. Οι μεθοδολογίες που παρέχονται στο ACES παρέχουν γρήγορες και απλές εκτιμήσεις για την ανάπτυξη κυματισμών σε ανοιχτά ύδατα και περιορισμένα μήκη αναπτύγματος σε βαθιά και ρηχά νερά. Όσον αφορά την πρόγνωση κυματισμών, αυτή γίνεται μέσω απλοποιημένων σχέσεων, σύμφωνα με fetch και duration-limited κριτήρια και οριοθετούνται από τις εκτιμήσεις για πλήρως ανεπτυγμένο φάσμα (Leenknecht, Szuwalski, & Sherlock, 1992).

Αρχικά καθορίζονται οι συνθήκες ανοιχτής θάλασσας και περιορισμένου μήκους αναπτύγματος ως εξής:

- α. Ανοιχτή θάλασσα (Open-water fetches): Στην ανοιχτή θάλασσα, η γένεση του κυματισμού περιορίζεται από τις διαστάσεις του μετεωρολογικού φαινομένου, ενώ το πλάτος του αναπτύγματος έχει την ίδια τάξη μεγέθους με το μήκος αναπτύγματος. Οι απλοποιημένες εκτιμήσεις για την ανάπτυξη του κυματισμού σε ανοιχτή θάλασσα έχουν ως καθοριστικό παράγοντα το μήκος αναπτύγματος (αλλά όχι το πλάτος ή το σχήμα της γεωμετρίας που εξετάζεται). Η ανάπτυξη του κυματισμού θεωρείται ότι γίνεται κατά μήκος του αναπτύγματος στη διεύθυνση διάδοσης του ανέμου.

β. Περιορισμένο μήκος αναπτύγματος (Restricted fetches): Οι πιο περιορισμένες ή σύνθετες γεωμετρικές υδάτινων σωμάτων, όπως λίμνες, ποτάμια, κόλποι και ταμειυτήρες έχουν επίδραση στην ανεμογενή κυματογένεση. Η μεθοδολογία περιορισμένου μήκους αναπτύγματος εφαρμόζει τη λογική της δημιουργίας κυματισμών σε διευθύνσεις άλλες από αυτήν της πνοής του ανέμου, όμοια με τη λογική που εξέφρασε ο Donelan.



Εικόνα 4.3 Οι κανόνες υπολογισμού για την περίπτωση περιορισμένου μήκους αναπτύγματος (Leenknecht, Szuwalski, & Sherlock, 1992).

Αρχικά πρέπει να καθορισθεί η επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης των κυματισμών, μεγιστοποιώντας την ποσότητα:

$$F_{\varphi}^{0.28} (\cos \varphi)^{0.44} \quad (4.27)$$

Όπου φ η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του ανέμου και της κάθε ακτίνας μήκους αναπτύγματος.

Η διαδικασία για τον καθορισμό της εν λόγω διεύθυνσης έχει ως εξής: Για την εξεταζόμενη διεύθυνση ανέμου υπολογίζεται η ποσότητα (4.27) για κάθε ακτίνα μήκους αναπτύγματος. Οι ακτίνες λαμβάνονται σε ένα τόξο 15° ($\pm 7.5^{\circ}$) και με βήμα 1° . Εκεί όπου η (4.27) έχει την μέγιστη τιμή της, αντιστοιχεί στην επικρατέστερη διεύθυνση διάδοσης του κυματισμού, οπότε και εξετάζεται το μήκος αναπτύγματος σε αυτή τη διεύθυνση.

Προτού γίνουν οι υπολογισμοί των χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος πρέπει πρώτα να προσδιορισθεί η οριακή διάρκεια πνοής ανέμου t_{min} :

$$t_{min} = 68.8 \frac{F^{\frac{2}{3}}}{g^{1/3} U_{10}^{1/3}} \quad (4.28)$$

η οποία εφαρμόζεται για ανοιχτή θάλασσα (Open sea), και:

$$t_{min} = 51.09 \frac{F^{0.72}}{g^{0.28} U_{10}^{0.44}} \quad (4.29)$$

η οποία εφαρμόζεται σε περιορισμένο μήκος αναπτύγματος (Restricted Fetch).

Ακολουθούν οι υπολογισμοί των χαρακτηριστικών του κυματισμού:

Ανοιχτή θάλασσα		Περιορισμένο μήκος αναπτύγματος
$H_s = 0.0000851 \left(\frac{U_{10}^2}{g}\right) \left(\frac{gt}{U_{10}}\right)^{5/7} \quad (4.30)$	Duration Limited	$H_s = 0.000103 \left(\frac{U_{10}^2}{g}\right) \left(\frac{gt}{U_{10}}\right)^{0.69} \quad (4.31)$
$T = 0.0702 \left(\frac{U_{10}}{g}\right) \left(\frac{gt}{U_{10}}\right)^{0.411} \quad (4.32)$	($t < t_{min}$)	$T = 0.082 \left(\frac{U_{10}}{g}\right) \left(\frac{gt}{U_{10}}\right)^{0.39} \quad (4.33)$
$H_s = 0.0016 \left(\frac{U_{10}^2}{g}\right) \left(\frac{gF}{U_{10}}\right)^{1/2} \quad (4.34)$	Fetch Limited	$H_s = 0.0015 \left(\frac{U_{10}^2}{g}\right) \left(\frac{gF}{U_{10}}\right)^{1/2} \quad (4.35)$
$T = 0.2857 \left(\frac{U_{10}}{g}\right) \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{1/3} \quad (4.36)$	($t \geq t_{min}$)	$T = 0.3704 \left(\frac{U_{10}}{g}\right) \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{0.28} \quad (4.37)$

Για την περίπτωση πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας (Fully Developed) ισχύουν τα εξής:

$$H_{fd} = 0.2433 \left(\frac{U_{10}^2}{g}\right) \quad (4.38)$$

$$T_{fd} = 8.134 \left(\frac{U_{10}}{g}\right) \quad (4.39)$$

όπου δεν πρέπει να ξεπερνάται η συνθήκη πλήρως ανεπτυγμένης θάλασσας:

$$H = \min(H_s, H_{fd}) \quad (4.40)$$

$$T = \min(T_p, T_{fd}) \quad (4.41)$$

4.7 CEM

Η μέθοδος CEM βασίζεται στη μέθοδο JONSWAP με ορισμένες βελτιώσεις, και περιγράφεται στο Coastal Engineering Manual (CEM) που εκδόθηκε το 2002.

Στη μέθοδο αυτή, για κάθε κύρια διεύθυνση ανέμου μετρώνται τα μήκη αναπτύγματος (F_i) σε ένα τόξο $\pm 15^\circ$ ανά 1° με κέντρο την ευθεία που ταυτίζεται με την κύρια διεύθυνση. Με

αυτών τον τρόπο μετρώνται συνολικά 31 μήκη αναπτύγματος που συνεισφέρουν στον υπολογισμό του ενεργού μήκους αναπτύγματος ως εξής:

$$F_{eff} = \frac{\sum F_i}{i} \quad (4.42)$$

Ο προσδιορισμός των κυματικών χαρακτηριστικών ξεκινά από τον υπολογισμό της ταχύτητας τριβής:

$$u_* = U_{10} (C_d)^{0.5} \quad (4.43)$$

όπου C_d είναι ο συντελεστής αντίστασης που ορίζεται ως:

$$C_d = 0.001(1.1 + 0.035U_{10}) \quad (4.44)$$

Η οριακή διάρκεια πνοής ανέμου είναι:

$$t_{min} = 77.23 \frac{F_{eff}^{0.67}}{U_{10}^{0.34} g^{0.33}} \quad (4.45)$$

Σε περίπτωση όπου $t < t_{min}$, γίνεται αναπροσαρμογή του F_{eff} σε F_{min} :

$$F_{min} = 5.23 \cdot 10^{-3} \left(\frac{gt}{u_*} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{u_*^2}{g} \quad (4.46)$$

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη του κυματισμού υπολογίζονται ως:

$$H_s = 4.13 \cdot 10^{-2} \left(\frac{gF_{eff}}{u_*} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{u_*^2}{g} \quad (4.47)$$

$$T_p = 0.751 \left(\frac{gF_{eff}}{u_*^2} \right)^{1/3} \frac{u_*}{g} \quad (4.48)$$

Για την περίπτωση πλήρως αναπτυγμένης θάλασσας ο υπολογισμός των κυματικών χαρακτηριστικών γίνεται ως εξής:

$$H_s = 211.5 \frac{u_*^2}{g} \quad (4.49)$$

$$T_p = 239.8 \frac{u_*}{g} \quad (4.50)$$

5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21 SW

5.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες προσομοίωσης της παρούσας εργασίας έγινε χρήση του κυματικού μοντέλου MIKE 21 Spectral Waves το οποίο αποτελεί τμήμα του πακέτου MIKE που αναπτύχθηκε από το Danish Hydraulic Institute (DHI). Το MIKE 21 SW χρησιμοποιείται για τη μελέτη κυματογένεσης και διάδοσης κυματισμών από τα βαθιά ύδατα στα ρηχά. Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται πληροφορίες και βασικές έννοιες και εξισώσεις από το εγχειρίδιο χρήσης και το επιστημονικό τεύχος του μοντέλου (MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation, 2017).

5.2 Σύντομη Περιγραφή του MIKE 21 SW

Το MIKE 21 SW είναι ένα μοντέλο ανέμου-κυμάτων νέας γενιάς, βασισμένο σε μη δομημένο πλέγμα. Το μοντέλο προσομοιώνει την ανάπτυξη, την απόσβεση και το μετασχηματισμό των ανεμογενών κυματισμών και της αποθάλασσας σε υπεράκτιες και παράκτιες περιοχές.

Το MIKE 21 SW περιλαμβάνει δύο διαφορετικά είδη σύνθεσης:

- Κατευθυντική ανάλυση διαχωρισμένων παραμέτρων
- Πλήρως φασματική ανάλυση

Η κατευθυντική ανάλυση βασίζεται στην παραμετροποίηση της εξίσωσης διατήρησης κυματικής δράσης. Η παραμετροποίηση γίνεται στο πεδίο των συχνοτήτων εισάγοντας τη μηδενική και πρώτη ροπή του φάσματος κυματικής ενέργειας ως εξαρτημένες μεταβλητές, ακολουθώντας τον Holthuijsen (1989).

Η πλήρως φασματική ανάλυση βασίζεται στην εξίσωση διατήρησης κυματικής δράσης όπως αυτή περιγράφεται από τους Komien et al (1994) και Young (1999) όπου το κατευθυντικό φάσμα συχνοτήτων κυματικής δράσης είναι η εξαρτημένη μεταβλητή.

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

Το MIKE 21 SW περιλαμβάνει τα παρακάτω φυσικά φαινόμενα:

- Ανάπτυξη κυματισμού λόγω δράσης ανέμου
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ κυματισμών
- Διασπορά λόγω θραύσης στα βαθιά
- Διασπορά λόγω τριβής πυθμένα
- Διασπορά λόγω θραύσης προκαλούμενης από τη βαθυμετρία
- Διάθλαση και περίθλαση λόγω διαφοροποιήσεων του βάθους.
- Αλληλεπίδραση μεταξύ κυμάτων και ρευμάτων
- Επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενης βαθυμετρίας

Η διακριτοποίηση των εξισώσεων στο γεωγραφικό και φασματικό χώρο γίνονται με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων όγκων στο κέντρο κάθε υπολογιστικού κελιού. Στο γεωγραφικό

πεδίο γίνεται χρήση μη δομημένου πλέγματος. Η χρονική ολοκλήρωση πραγματοποιείται με την προσέγγιση κλασματικού βήματος όπου για την μετάδοση της κυματικής δράσης εφαρμόζεται μια ρητή μέθοδος πολλαπλής αλληλουχίας.

5.3 Πεδίο Εφαρμογής

Το MIKE 21 SW χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κυματικού κλίματος σε υπεράκτιες και παράκτιες περιοχές. Το μεγαλύτερο πεδίο εφαρμογής του είναι ο σχεδιασμός υπεράκτιων, παράκτιων και λιμενικών έργων όπου η ακριβής εκτίμηση των κυματικών φορτίσεων είναι υψίστης σημασίας για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό αυτών των κατασκευών. Τα δεδομένα μετρήσεων δεν είναι πάντοτε διαθέσιμα για αρκετά μεγάλες περιόδους ώστε να επιτρέπουν την ακριβή εκτίμηση των ακραίων καταστάσεων θαλάσσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα δεδομένα μετρήσεων μπορούν να συμπληρωθούν με δεδομένα από την προσομοίωση των κυματικών συνθηκών κατά τη διάρκεια ιστορικών καταιγίδων με τη χρήση του MIKE 21 SW.

Το μοντέλο εφαρμόζεται ειδικά για ταυτόχρονη πρόγνωση και ανάλυση κυματισμών σε μεγάλη κλίμακα καθώς και σε τοπική κλίμακα. Για τη μεγάλη κλίμακα χρησιμοποιείται πλέγμα αδρής χωρικής και χρονικής ανάλυσης και για την τοπική κλίμακα γίνεται χρήση ορίων υψηλής ανάλυσης και πλέγματος που προσαρμόζεται στη βαθυμετρία και περιγράφει το ρηχό υδάτινο περιβάλλον στην ακτογραμμή.

5.4 Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου

Τα κύματα βαρύτητας περιγράφονται από την εξίσωση μεταφοράς για την πυκνότητα κυματικής δράσης. Στο παρόν μοντέλο επιλέγεται η χρήση της διεύθυνσης του κυματισμού θ , και της σχετικής γωνιακής συχνότητας σ ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Η κυματική πυκνότητα $N(\sigma, \theta)$ εξαρτάται από την πυκνότητα ενέργειας σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (5.1)$$

Για τη διάδοση κυματισμών σε ήπια μεταβαλλόμενη βαθυμετρία, η σχέση μεταξύ της σχετικής γωνιακής συχνότητας και της απόλυτης γωνιακής συχνότητας ω δίνεται από την εξίσωση γραμμικής διασποράς:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \vec{k} \cdot \vec{U} \quad (5.2)$$

Όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας, d το βάθος, \vec{k} το διάνυσμα του κύματος με αριθμό k και διεύθυνση θ και \vec{U} το διάνυσμα της ταχύτητας του ρεύματος.

Το μέτρο της ταχύτητας ομάδας c_g της κυματικής ενέργειας σε σχέση με το ρεύμα δίνεται από την:

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k} \quad (5.3)$$

Η εξίσωση που διέπει το μοντέλο είναι η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης, εκφρασμένη είτε σε καρτεσιανές ή σφαιρικές συντεταγμένες. Στις καρτεσιανές, η εν λόγω εξίσωση έχει ως εξής:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}N) = \frac{S}{\sigma} \quad (5.4)$$

Όπου $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$ είναι η πυκνότητα δράσης, t ο χρόνος, $\vec{x} = (x, y)$ οι καρτεσιανές συντεταγμένες, $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$ η ταχύτητα διάδοσης ομάδας κυμάτων σε τέσσερις διαστάσεις και S ο όρος πηγής για την εξίσωση ισορροπίας ενέργειας. ∇ είναι ο τεσσάρων διαστάσεων διαφορικός τελεστής στο χώρο \vec{x}, σ, θ . Οι τέσσερις χαρακτηριστικές ταχύτητες διάδοσης δίνονται από τις εξισώσεις:

$$(c_x, c_y) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_g + \vec{U} \quad (5.5)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[\frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial s} \quad (5.6)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[\frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \cdot \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right] \quad (5.7)$$

Όπου s είναι η χωρική συντεταγμένη στη διεύθυνση του κυματισμού θ και m η συντεταγμένη κάθετα στο s . $\nabla_{\vec{x}}$ είναι ο δύο διαστάσεων διαφορικός τελεστής στο χώρο \vec{x} .

Ο όρος ενέργειας S στην εξίσωση (5.4) αντιπροσωπεύει την υπέρθεση συναρτήσεων πηγής οι οποίες περιγράφουν διάφορα φυσικά φαινόμενα:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (5.8)$$

Όπου S_{in} η μετάδοση ενέργειας από τον άνεμο, S_{nl} η μεταφορά ενέργειας λόγω μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ κυματισμών, S_{ds} η διάχυση ενέργειας λόγω θραύσης στα βαθιά, S_{bot} η διάχυση ενέργειας λόγω τριβής πυθμένα και S_{surf} η διάχυση ενέργειας λόγω θραύσης προκαλούμενης από τη βαθυμετρία.

Η περίθλαση μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας την εκτίμηση διάθλασης-περίθλασης που προτάθηκε από τους Holthuijsen et al. (2003). Η εκτίμηση αυτή είναι βασισμένη στην εξίσωση ήπιας κλίσης για τη διάθλαση και την περίθλαση, παραλείποντας τη φάση. Παρουσία περίθλασης, το μέγεθος του κυματαριθμού k δίνεται από την:

$$k^2 = \kappa^2(1 + \delta_\alpha) \quad (5.9)$$

Όπου κ είναι η παράμετρος διαχωρισμού όπως ορίζεται από τη θεωρία γραμμικών κυματισμών και δ_α είναι μια παράμετρος περίθλασης που ορίζεται ως:

$$\delta_\alpha = \nabla \cdot \frac{c c_g \nabla \alpha}{\kappa^2 c c_g \alpha} \quad (5.10)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, τα c και c_g είναι η ταχύτητα φάσης και ταχύτητα ομάδας αντίστοιχα, χωρίς την επίδραση της περίθλασης και α είναι το πλάτος της ταλάντωσης. Η ταχύτητα φάσης C και ταχύτητα ομάδας C_g παρουσία περίθλασης δίνονται από τις:

$$C = \frac{\sigma}{k} = \frac{\sigma \kappa}{\kappa k} = \frac{c}{\sqrt{1 + \delta_\alpha}} \quad (5.11)$$

$$C_g = c_g \frac{k}{\kappa} = c_g \sqrt{1 + \delta_\alpha} \quad (5.12)$$

5.5 Δεδομένα Εισόδου

Ακολουθώντας τις οδηγίες του πακέτου MIKE 21 SW για τη σωστή και ακριβή προσομοίωση, πρέπει πρώτα να καθοριστούν ορισμένα δεδομένα εισόδου τα οποία συνοψίζονται παρακάτω:

5.5.1 Υπολογιστικό πλέγμα και βαθυμετρία

Η εισαγωγή κατάλληλου υπολογιστικού πλέγματος και βαθυμετρίας είναι βασική προϋπόθεση για σωστά και αξιόπιστα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Η δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλης περιοχής προς μοντελοποίηση, ικανοποιητική ανάλυση των πεδίων της βαθυμετρίας, των κυματισμών του ανέμου και των ρευμάτων και ο ορισμός των ανοιχτών και κλειστών ορίων, καθώς και των ακτογραμμών. Επιπλέον, η ανάλυση του χώρου πρέπει να επιλέγεται με γνώμονα την αριθμητική σταθερότητα. Το υπολογιστικό πλέγμα και η βαθυμετρία καθορίζονται από το εργαλείο MIKE Zero Mesh Generator.

5.5.2 Οριακές συνθήκες

Ένα υπεράκτιο όριο χωρίς καμία κυματική πληροφορία συνήθως προσομοιάζεται ως ένα απορροφητικό όριο ξηράς. Κανένα κύμα δεν εισέρχεται στον χώρο του μοντέλου, ενώ τα κύματα που διαδίδονται εκτός αυτού απορροφώνται πλήρως.

Αν υπάρχουν διαθέσιμα κυματικά δεδομένα (π.χ. μετρήσεις κυματισμών ή δεδομένα από άλλη προσομοίωση του MIKE 21 SW) μπορεί να επιλεγεί ένα ειδικό όριο. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να περιγραφούν είτε μέσω παραμέτρων (χαρακτηριστικό ύψος, περίοδος αιχμής κλπ.), ή μέσω κυματικού φάσματος. Οι κυματικές οριακές συνθήκες μπορούν να μεταβάλλονται στο χρόνο και στο χώρο.

5.5.3 Συντελεστές τριβής πυθμένα

Η τριβή πυθμένα μπορεί να καθοριστεί ως συντελεστής διάχυσης, ως παράμετρος τραχύτητας κατά Nikuradse ή ως μέγεθος κόκκου αδρανούς.

5.5.4 Πεδίο ανέμου

Η επιτυχής πρόγνωση και πρόβλεψη βασίζονται στην ακρίβεια των πεδίων ανέμου που παρέχονται από μετεωρολογικά μοντέλα και αναλύσεις. Επειδή ο άνεμος είναι η κύρια δύναμη δημιουργίας κυματισμών, είναι σημαντική η ακριβής και αντιπροσωπευτική εισαγωγή του στο MIKE 21 SW. Ο άνεμος μπορεί να προσομοιωθεί ως σταθερός ή ως μεταβλητός στο χώρο και το χρόνο.

6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MIKE 21/3 COUPLED MODEL

6.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες προσομοίωσης των φαινομένων της στερεομεταφοράς και της μεταβολής της μορφολογίας του πυθμένα με στόχο τον έλεγχο λειτουργικότητας των ακτομηχανικών έργων, έγινε χρήση του μοντέλου MIKE 21/3 Coupled Model. Στο παρόν κεφάλαιο παρατίθενται πληροφορίες και βασικές έννοιες και εξισώσεις από το εγχειρίδιο χρήσης και το επιστημονικό τεύχος του μοντέλου (MIKE 21/3 Coupled Model FM, 2019).

6.2 Σύντομη Περιγραφή του MIKE 21/3 Coupled Model

Το MIKE 21/3 Coupled Model είναι ένα δυναμικό σύστημα μοντελοποίησης με εφαρμογή σε παράκτια, παραποτάμια και περιβάλλοντα εκβολών. Αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:

- Hydrodynamic module (Υδροδυναμικό μοντέλο)
- Transport module (Μοντέλο μεταφοράς)
- ECO Lab / Oil Spill module (Μοντέλο πετρελαιοκηλίδας)
- Mud Transport module (Μοντέλο μεταφοράς λάσπης)
- Particle Tracking module (Μοντέλο ιχνηλασίας σωματιδίων)
- Sand Transport module (Μοντέλο μεταφοράς άμμου)
- Shoreline Morphology module (Μοντέλο μορφολογίας ακτογραμμής)
- Spectral Wave module (Μοντέλο φασματικών κυματισμών)

Το υδροδυναμικό και φασματικό μοντέλο είναι τα βασικά υπολογιστικά μέρη του MIKE 21/3 Coupled Models. Χρησιμοποιώντας το MIKE 21/3 Coupled Models καθίσταται δυνατή η από κοινού προσομοίωση μεταξύ κυματισμών και ρευμάτων ενώ ο συνδυασμός του υδροδυναμικού μοντέλου, του φασματικού μοντέλου και της μεταφοράς άμμου επιτρέπει την πλήρη παρακολούθηση της μορφολογίας του πυθμένα και της ακτογραμμής.

6.3 Πεδίο Εφαρμογής

Το MIKE 21/3 Coupled Model εφαρμόζεται γενικά σε προβλήματα όπου τα φαινόμενα ροής και μετακίνησης υλικού είναι σημαντικά, με έμφαση σε ποτάμια, παράκτια και θαλάσσια περιβάλλοντα όπου η ευελιξία των μη-δομημένων υπολογιστικών πεδίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την διερεύνηση της μορφολογικής εξέλιξης της παράκτιας βαθυμετρίας λόγω της επίπτωσης έργων όπως κυματοθραύστες, προβόλους, αναπληρώσεις ακτογραμμής, λιμάνια κλπ.

Είναι πλέον κατάλληλο για μεσοπρόθεσμες μορφολογικές έρευνες (μερικές εβδομάδες έως μήνες) για περιορισμένες παράκτιες περιοχές με τυπικές διαστάσεις 10 km παράλληλα στην ακτογραμμή και 2 km προς τα ανοιχτά. Το υπολογιστικό φορτίο μπορεί να γίνει πολύ μεγάλο για μακροπρόθεσμες προσομοιώσεις ή μεγαλύτερες περιοχές.

6.4 Βασικές Εξισώσεις του Μοντέλου

6.4.1 Υδροδυναμικό μοντέλο & Μοντέλο Μεταφοράς – Αριθμητική Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση στο πεδίο του χώρου γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Το χωρικό πεδίο διακριτοποιείται με την υποδιαίρεση σε μη-αλληλεπικαλυπτόμενα κελιά/στοιχεία.

Στην δισδιάστατη περίπτωση, τα στοιχεία είναι πολύγωνα αυθαίρετου σχήματος, ωστόσο θεωρούνται μόνο τρίγωνα και τετράπλευρα στοιχεία.

Η εξίσωση ρηγών υδάτων στη γενική τους μορφή γράφονται ως:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}(\mathbf{U}) = S(\mathbf{U}) \quad (6.1)$$

Όπου \mathbf{U} το διάνυσμα των μεταβλητών ταχύτητας, \mathbf{F} το διάνυσμα ροής και S το διάνυσμα των όρων πηγής.

Σε καρτεσιανές συντεταγμένες, οι εξισώσεις ρηγών υδάτων σε 2D γράφονται ως:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial (F_x^I - F_x^V)}{\partial x} + \frac{\partial (F_y^I - F_y^V)}{\partial y} = S \quad (6.2)$$

Όπου οι εκθέτες I και V δηλώνουν άτριβες και ιξώδεις ροές αντίστοιχα.

Ολοκληρώνοντας την (6.2) πάνω στο i -οστό κελί και χρησιμοποιώντας το θεώρημα Gauss προκύπτει:

$$\int_{A_i} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} d\Omega + \int_{\Gamma_i} (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n}) ds = \int_{A_i} S(\mathbf{U}) d\Omega \quad (6.4)$$

Όπου A_i είναι η επιφάνεια του κελιού, Ω η μεταβλητή ολοκλήρωσης ορισμένη στο A_i , Γ_i είναι το όριο του i -οστού κελιού και ds η μεταβλητή ολοκλήρωσης πάνω στο όριο. \mathbf{n} είναι το προς τα έξω μοναδιαίο διάνυσμα πάνω στο όριο. Υπολογίζοντας τα ολοκληρώματα, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{A_i} \sum_j^{NS} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \Delta \Gamma_j = S_i \quad (6.5)$$

Εδώ τα U_i και S_i είναι αντίστοιχα οι μέσες τιμές των U και S πάνω στο i -οστό κελί και αφορούν το κέντρο του κελιού, NS είναι ο αριθμός των πλευρών του κελιού, n_j το προς τα έξω μοναδιαίο διάνυσμα στην j -οστή πλευρά και $\Delta \Gamma_j$ το μήκος της j -οστής διεπιφάνειας.

Για την χωρική διακριτοποίηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχήμα 1^{ης} ή 2^{ης} τάξης.

Για την περίπτωση 2D η εξίσωση μεταφοράς δίνεται μέσω της εξίσωσης (6.1)

6.4.2 Χρονική Ολοκλήρωση

Θεωρείται η γενική μορφή των εξισώσεων:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} = \mathbf{G}(\mathbf{U}) \quad (6.6)$$

Για τις 2D προσομοιώσεις χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι χρονικής ολοκλήρωσης: μια χαμηλής και μια ανώτερης τάξης. Η χαμηλής τάξης είναι η πρώτη τάξη ρητή μέθοδος Euler:

$$\mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{U}_n + \Delta t \mathbf{G}(\mathbf{U}_n) \quad (6.7)$$

Η ανώτερης τάξη μέθοδος, είναι η Runge Kutta δευτέρας τάξεως με τη μορφή:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{n+\frac{1}{2}} &= \mathbf{U}_n + \frac{1}{2} \Delta t \mathbf{G}(\mathbf{U}_n) \\ \mathbf{U}_{n+1} &= \mathbf{U}_n + \Delta t \mathbf{G}(\mathbf{U}_{n+\frac{1}{2}}) \end{aligned} \quad (6.8)$$

6.4.3 Μοντέλο Μεταφοράς Άμμου

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας είναι εκείνο που συνδυάζει τη δράση κυματισμού και ρεύματος. Υπάρχει ωστόσο η δυνατότητα να θεωρεί μόνο την ύπαρξη ρεύματος. Για τον συνδυασμό κύματος και ρεύματος (παράκτια εφαρμογή) ο ρυθμός μετακίνησης του ιζήματος λαμβάνεται μέσω γραμμικής παρεμβολής πίνακα ιζήματος. Οι τιμές του πίνακα υπολογίζονται από το πρόγραμμα MIKE 21 Toolbox 'Generation of Q3D Sediment table'. Στον πυρήνα του αυτό το πρόγραμμα είναι ένα ψευδο-τριδιάστατο μοντέλο μεταφοράς ιζήματος (STPQ3D – quasi three-dimensional sediment transport model).

Το μοντέλο αυτό υπολογίζει στιγμιαίες και ολοκληρωμένες ως προς το χρόνο υδροδυναμικές και μεταφορές ιζήματος σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις. Καθώς το μοντέλο υπολογίζει το φορτίο πυθμένα και το φορτίο σε αιώρηση ξεχωριστά, οι τιμές του πίνακα μεταφοράς ιζήματος είναι το συνολικό φορτίο.

Η λογική του ψευδο-τριδιάστατου υδροδυναμικού μοντέλου είναι η λύση της ισορροπίας δυνάμεων στην υδάτινη στήλη

$$\tau = \rho \nu_t \left| \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} \right| \quad (6.9)$$

από όπου η μέση κατά τον χρόνο ταχύτητα \bar{U} υπολογίζεται μέσω ολοκλήρωσης.

Στο μοντέλο, η κίνηση των κυματισμών ορίζεται μέσα από έναν αριθμό γενικών παραμέτρων όπως το ύψος του κυματισμού H (ή H_{rms}), η περίοδος των κυματισμών T (ή T_z) και η γωνία διάδοσης α (ή MWD). Οι τιμές στις παρενθέσεις αφορούν τυχαίο κυματισμό.

Στα ρηχά ύδατα η κίνηση των κυματισμών γίνεται μη-γραμμική. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ σημαντικό για τον υπολογισμό της εγκάρσιας στερεομεταφοράς.

Η κίνηση λόγω κυματισμού κοντά στο όριο του πυθμένα υπολογίζεται με διάφορους τρόπους, τόσο μέσω κλασσικής θεωρίας όσο και ημι-εμπειρικών σχέσεων.

Η χρήση μη-γραμμικής θεωρίας κυματισμών είναι σημαντική για να επιλυθούν ροπές ταχύτητας μεγαλύτερης τάξης, οι οποίες είναι σημαντικές για την μεταφορά ιζήματος. Επειδή δεν υπάρχει κάποια θεωρία που να καλύπτει πλήρως όλες τις υδροδυναμικές συνθήκες επαρκώς, χρησιμοποιείται μια πληθώρα θεωριών για τις ανάγκες του μοντέλου. Κάθε μια ισχύει για ένα περιορισμένο εύρος υδροδυναμικών συνθηκών.

Η τύρβη προέρχεται από τρεις πηγές:

1. Το κυματικό οριακό στρώμα
2. Την διαχεόμενη ενέργεια λόγω θραύσης κυματισμών
3. Τη μέση παροχή

Οι τρεις συνεισφορές στο τυρβώδες ιζώδες υπολογίζονται ανεξάρτητα μεταξύ τους και το συνολικό στιγμιαίο τυρβώδες ιζώδες υπολογίζεται ως το άθροισμα των τριών συνιστωσών σε επίπεδο ενέργειας:

$$v_t^2 = v_{bl}^2 + v_c^2 + v_{br}^2 \quad (6.10)$$

Όπου v_t το συνολικό τυρβώδες ιζώδες, v_{bl} το τυρβώδες ιζώδες στο οριακό στρώμα, v_c το τυρβώδες ιζώδες λόγω μέσου ρεύματος, και v_{br} το τυρβώδες ιζώδες λόγω θραύσης κυματισμών.

Η μεταφορά ιζήματος υπολογίζεται ως το άθροισμα του φορτίου πυθμένα και του φορτίου σε αιώρηση:

$$q_t = q_b + q_s \quad (6.11)$$

Το φορτίο πυθμένα q_b στο μοντέλο STPQ3D υπολογίζεται μέσω της στιγμιαίας παραμέτρου Shields.

Σε περίπτωση υλικού σε μέγεθος βότσαλου μόνο το φορτίο πυθμένα θεωρείται ότι υπάρχει και ο υπολογισμός γίνεται διαφορετικά από την προεπιλεγμένη περιγραφή της άμμου.

Η κατακόρυφη μεταβολή της συγκέντρωσης φορτίου σε αιώρηση υπολογίζεται από την κατακόρυφη εξίσωση διάχυσης για αιωρούμενο ίζημα σύμφωνα με τους Fredsøe et al. (1985).

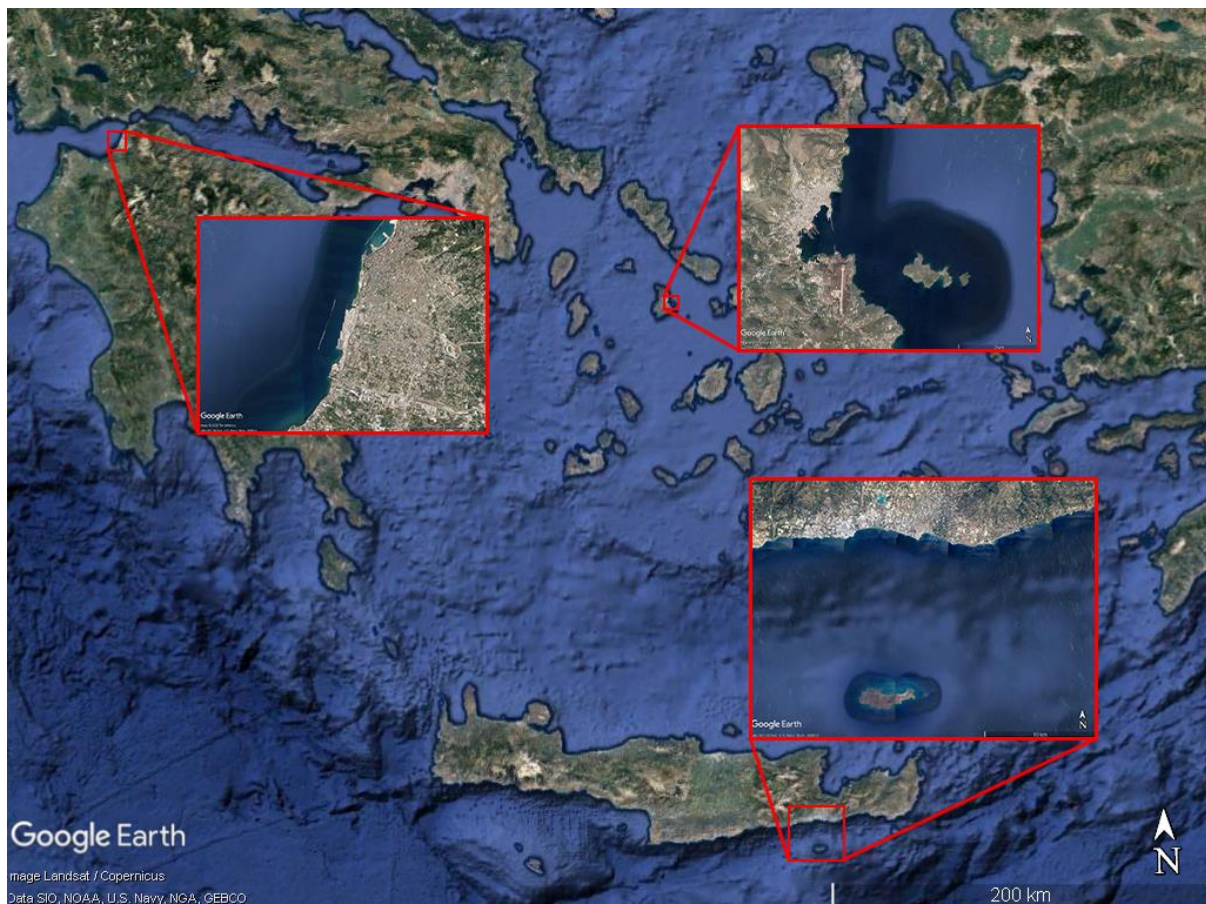
Το φορτίο σε αιώρηση υπολογίζεται ως το γινόμενο της στιγμιαίας ταχύτητας ροής και της στιγμιαίας συγκέντρωσης ιζήματος:

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^0 (uc) dz dt \quad (6.12)$$

7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΜΙΚΕ 21 SW ΣΤΙΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕΛΕΤΗΣ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά στοιχεία για τις περιοχές μελέτης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία που είναι η Πάτρα, η Ερμούπολη και η Ιεράπετρα). Καθεμιά από τις περιοχές μελέτης παρουσιάζει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ως προς τη γεωμετρία μήκους αναπτύγμάτος της (Narrow Field, Restricted Fetch και Open Sea αντίστοιχα) και επιλέγεται ως αντιπροσωπευτική για τον έλεγχο των μαθηματικών εξισώσεων στον υπολογισμό του κυματικού κλίματος.

Στην Εικόνα 7.1 που ακολουθεί, απεικονίζονται οι περιοχές μελέτης στον χάρτη της Ελλάδας.



Εικόνα 7.1 Οι τρεις περιοχές μελέτης (Πάτρα, Ερμούπολη, Ιεράπετρα) στον χάρτη της Ελλάδας (πηγή: Google Earth).

7.1 Περιοχές Μελέτης

7.1.1 Πατραϊκός Κόλπος – Νέο Λιμάνι Πατρών

Ο Πατραϊκός κόλπος είναι τμήμα του Ιονίου Πελάγους μεταξύ της δυτικής Στερεάς Ελλάδας και της Πελοποννήσου, που βρέχει μεταξύ άλλων και την πόλη της Πάτρας, από την οποία έχει πάρει και την ονομασία του.

Στα δυτικά ορίζεται από μία νοητή γραμμή, από το νησάκι Οξεία ως το ακρωτήριο του Αράξου. Ανατολικά περικλείεται από το στενό 2 500 m περίπου, από το Ρίο μέχρι το Αντίρριο και την ομώνυμη σύγχρονη γέφυρα.

Ο Πατραϊκός έχει μήκος 40-50 km. και πλάτος 10-20 km. Καλύπτει μια επιφάνεια μεταξύ 350-400 m², ενώ ο όγκος του εκτιμάται σε 45 m³. Το μέγιστο βάθος του είναι 130 m περίπου σε μία κοιλότητα ανοιχτά της Λακκόπετρας. Ο κόλπος είναι πλούσιος σε ψάρια και είναι κατάλληλος για αλιεία. Πολλές όμορφες παραλίες τόσο από την μεριά της Αχαΐας όσο και της Αιτωλοακαρνανίας βρίσκονται στον Πατραϊκό.

Οι ποταμοί Αχελώος και Εύηνος που εκβάλουν στη βορειοανατολική πλευρά του κόλπου αλλά και ο Πείρος με τον Γλαύκος που εκβάλουν νότια και νοτιοανατολικά αντίστοιχα, αποτελούν τους σημαντικότερους τροφοδότες του κόλπου με γλυκό νερό.

Ο μόνος σημαντικός λιμένας στον Πατραϊκό κόλπο είναι το λιμάνι της Πάτρας, που αποτελεί το δεύτερο μεγαλύτερο της Ελλάδας και το κύριο με επικοινωνία με την Ευρώπη. Εξυπηρετεί τα πορθμεία προς την Αγκώνα, τη Βενετία, το Πρίντεζι και την Τεργέστη της Ιταλίας καθώς προς την Κεφαλλονιά και άλλα νησιά του Ιονίου. Από τα νερά του Πατραϊκού βρέχεται και το Μεσολόγγι με τη περίφημη λιμνοθάλασσά του, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη της χώρας. Εντός της λιμνοθάλασσας Μεσολογγίου βρίσκεται ο λιμένας της πόλης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, επικεντρωνόμαστε στην επίδραση των κυματισμών πάνω στον κυματοθραύστη του νέου (νοτίου) λιμένα Πατρών.

Το Νότιο λιμάνι εκτείνεται από τον ποταμό Γλαύκο προς Νότο μέχρι τον χείμαρρο Διακονιάρη προς Βορρά, εκτάσεως περίπου 456 241.88 m², με τις νηοδόχους Α,Β,С, D και την Ε (υπό κατασκευή) συνολικού μήκους κρηπιδωμάτων 1 292,98 m, εξοπλισμένων με δίκτυο υδροδότησης, δέστρες 50 t και 100 t, προσκρουστήρες και ελαστικές κλίμακες και κανάλι Η/Μ δικτύων. Τα υπάρχοντα κρηπιδώματα Α,Β,С, D διαθέτουν δεκαπέντε ράμπες πρόσδεσης πλοίων εκ των οποίων έντεκα εξυπηρετούν πρυμνοδέτηση, τέσσερις πλαγιοδέτηση και βρίσκονται υπό κατασκευή επί πλέον τέσσερις ράμπες. Υπάρχει προσήνεμος κυματοθραύστης συνολικού μήκους 1 429.56 m, εξοπλισμένος με πλάκα ανωδομής, προφυλακτήριο τοίχο, δέστρες 50 t και δύο μεταλλικούς οβελούς στήριξης φανών.

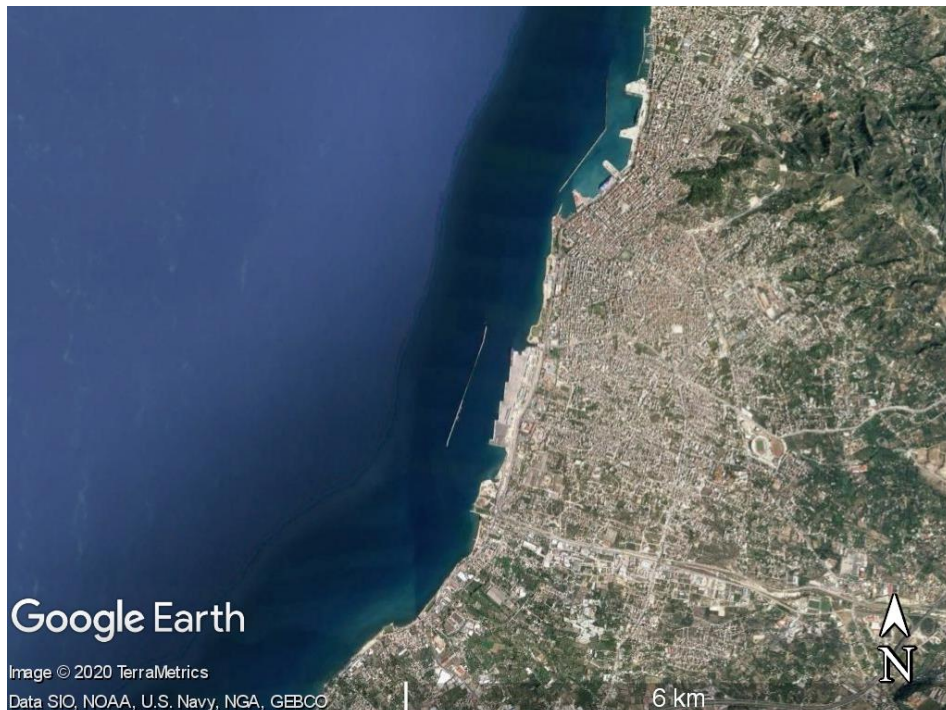
Περιλαμβάνονται επίσης δέκα κτηριακά συγκροτήματα όπως, Τερματικός σταθμός, Κτήριο Υπηρεσιών Λιμένα, Υποσταθμός, Κτήριο Περιπτέρου – Αναψυκτήριου, Υπέργεια Δεξαμενή, Κτήριο Πυροσβεστικού Σταθμού, Υπόστεγο Πυροσβεστικού Σταθμού, Κτήρια Βόρειας Πύλης Α, Κτήριο Νότια Πύλης Β, Πύργος Ελέγχου-VTS και βρίσκονται υπό κατασκευή ο Βόρειος Τερματικός Σταθμός Β1, ο Νότιος Τερματικός Σταθμός Β2 και Αναψυκτήριο.

Υπάρχουν Η/Μ Εγκαταστάσεις Υποσταθμού, Εξωτερικών Ηλεκτρικών δικτύων Οδοφωτισμού και Ασθενών ρευμάτων, Η/Μ εγκαταστάσεις και δίκτυο Ύδρευσης και Άρδευσης, εγκατάσταση και δίκτυο Πυρόσβεσης και εγκατάσταση εξωτερικού δικτύου Αποχέτευσης. Υπάρχει ασφαλοστρωμένο Δίκτυο Εσωτερικής Οδοποιίας και σύνδεσης με το τοπικό οδικό δίκτυο, δίκτυο αποχέτευσης ομβρίων της οδοποιίας και της χερσαίας ζώνης, διαμορφωμένος περιβάλλον χώρος περιμετρικά των κτηριακών εγκαταστάσεων, καθώς και Χώροι

Διακίνησης-Στάθμευσης Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, Στάθμευσης ΙΧ οχημάτων και φορτηγών.



Εικόνα 7.2 Αεροφωτογραφία του νέου λιμένα Πατρών (πηγή: <https://www.patrasport.gr/photo-gallery>).



Εικόνα 7.3 Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής μελέτης του νέου λιμένα Πατρών (πηγή: Google Earth).

7.1.2 Σύρος – Λιμένας Ερμούπολης

Η Σύρος είναι νησί των Κυκλάδων και οι κάτοικοί της επίσημα λέγονται Σύριοι/Σύριες (ή και Συριανοί/Συριανές στην καθομιλουμένη). Πρωτεύουσά της είναι η Ερμούπολη, η οποία είναι πρωτεύουσα και του Νομού Κυκλάδων καθώς και έδρα της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου. Η

Σύρος αναπτύχθηκε ιδιαίτερα μετά το 1826, όταν εγκαταστάθηκαν πρόσφυγες από τα Ψαρά, τη Χίο, την Κρήτη και τη Μικρά Ασία. Υπήρξε ναυτικό, βιομηχανικό και πολιτιστικό κέντρο του νέου ελληνικού κράτους.

Η Σύρος βρίσκεται στο κεντρικό σημείο των Κυκλάδων και απέχει 83 nm από τον Πειραιά και 62 από τη Ραφήνα. Η έκτασή της είναι 84.069 km². Γειτνιάζει με αρκετά νησιά του κυκλαδίτικου συμπλέγματος. Στα βόρεια βρίσκεται η Άνδρος, βορειοανατολικά η Τήνος και ανατολικά η Μύκονος καθώς και τα μικρά νησιά της Δήλου και της Ρήνειας. Βορειοδυτικά βρίσκονται η Κέα και η Γυάρος, δυτικά η Κύθνος και νοτιοδυτικά η Σέριφος. Στα νότια βρίσκονται η Σίφνος, η Αντίπαρος, η Πάρος και η Νάξος.

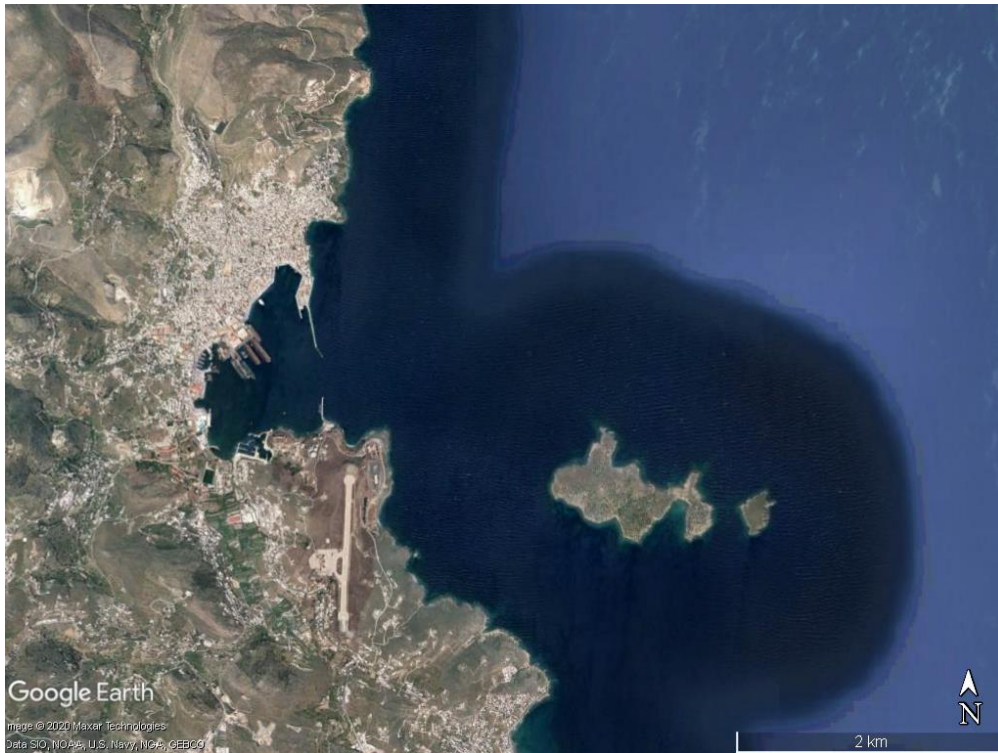
Η Ερμούπολη είναι ο μεγαλύτερος οικισμός της Σύρου, ενός νησιού των Κυκλάδων και έδρα της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου. Βρίσκεται στη ανατολική πλευρά του νησιού και είναι γνωστή και για το ναυπηγείο της και τον σημαντικό λιμένα της. Παλιότερα υπήρξε βιομηχανικό, ναυτιλιακό και πολιτιστικό κέντρο της Ελλάδας, ενώ πλέον αποτελεί γραφικό θέρετρο. Έχει 11 407 κατοίκους.

Η Ερμούπολη βρίσκεται στην ανατολική πλευρά του νησιού της Σύρου και συνδέεται ακτοπλοϊκά όλο τον χρόνο με τον Πειραιά (καθημερινά), με όλες τις υπόλοιπες Κυκλάδες, τα Δωδεκάνησα, τη Χίο και τη Μυτιλήνη. Το Λιμάνι της Σύρου είναι από τα μεγαλύτερα φυσικά λιμάνια στην Ελλάδα. Ο φυσικός όρμος μετατράπηκε τον 19ο αιώνα μετά από αλληπάλληλα λιμενικά έργα μεγάλης κλίμακας στο σημαντικό εμπορικό Λιμάνι της Σύρου.

Τα πρώτα έργα, 1834-1840, επικεντρώθηκαν στο Νησάκι με στόχο να ενισχυθεί η ασφάλεια του βόρειου μυχού και να βελτιωθεί η υποδομή του Λιμανιού της Σύρου, και ολοκληρώθηκαν με την οικοδόμηση του νέου Λοιμοκαθαρηρίου (Λαζαρέττα) στη νότια πλευρά.



Εικόνα 7.4 Αεροφωτογραφία του λιμανιού της Ερμούπολης (πηγή: <https://cyclades24.gr>).



Εικόνα 7.5 Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης του λιμένα της Ερμούπολης (πηγή: Google Earth).

7.1.3 Ιεράπετρα

Η Ιεράπετρα είναι η μεγαλύτερη σε πληθυσμό πόλη του νομού Λασιθίου. Είναι επίσης η τέταρτη μεγαλύτερη πόλη της Κρήτης και το νοτιότερο μείζον οικονομικό και πολιτικό κέντρο της Ελλάδας και της ευρωπαϊκής ηπείρου. Βρίσκεται 100 km νοτιοανατολικά από το Ηράκλειο, 242 km από τα Χανιά και 36 km νότια από τον Άγιο Νικόλαο. Ήταν έδρα ομώνυμης επαρχίας, η οποία αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του σημερινού Δήμου Ιεράπετρας. Κατά την απογραφή του 2011 ο πληθυσμός του κέντρου της πόλης ήταν 12 355, ενώ μαζί με τους προαστιακούς οικισμούς της έφθασε τους 16 139.

Την τελευταία δεκαετία η Ιεράπετρα αποτελεί έναν από τους δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς της Κρήτης και πόλο έλξης Ελλήνων και ξένων τουριστών, εξαιτίας των βραβευμένων παραλιών της (2ο Ευρωπαϊκό βραβείο παραλιών). Τους καλοκαιρινούς μήνες, πραγματοποιούνται οι πολιτιστικές εκδηλώσεις "Κύρβεια", με πληθώρα συναυλιών και παραστάσεις θεάτρου.

Σήμερα η πόλη είναι το μοναδικό αστικό κέντρο στη νότια Κρήτη, ενώ αποτελεί σπουδαίο εμπορικό κέντρο εξαγωγής αγροτικών προϊόντων προς την Ευρώπη και αποτελεί το κύριο οικονομικό και εμπορικό κέντρο του νομού Λασιθίου.

Το λιμάνι της Ιεράπετρας αποτελείται από ένα καλά προστατευμένο αλιευτικό καταφύγιο στο νοτιότερο σημείο της πόλης και από έναν προβλήτα περίπου 500 m πιο βόρεια από όπου πραγματοποιούνται τα τουριστικά δρομολόγια Ιεράπετρας – Χρυσής. Το λιμάνι δίνει τη δυνατότητα αγκυροβόλησης στην προκουμαία και παρέχει καλή προστασία για όλες τις καιρικές συνθήκες, εκτός αν πνέουν ισχυροί νότιοι άνεμοι. Υπάρχει φάρος στα ΝΑ του τείχους του λιμανιού. Δεν θα πρέπει να επιχειρηθεί είσοδος στο λιμάνι τη νύχτα, λόγω του

ότι το άνοιγμα του λιμανιού είναι στενό και δύσκολο στο να προσεγγιστεί, ενώ στο βυθό της εισόδου υπάρχουν επικίνδυνοι βράχοι. Το λιμάνι δεν συνδέεται ακτοπλοϊκά με τον Πειραιά ή άλλα λιμάνια.



Εικόνα 7.6 Φωτογραφία του λιμανιού της Ιεράπετρας (πηγή: <https://www.ierapetra.gr>).



Εικόνα 7.7 Δορυφορική απεικόνιση της περιοχής μελέτης (Ιεράπετρα & Ν. Χρυσή) με μεγέθυνση του αλιευτικού καταφυγίου (πηγή: Google Earth).

7.2 Μεθοδολογία

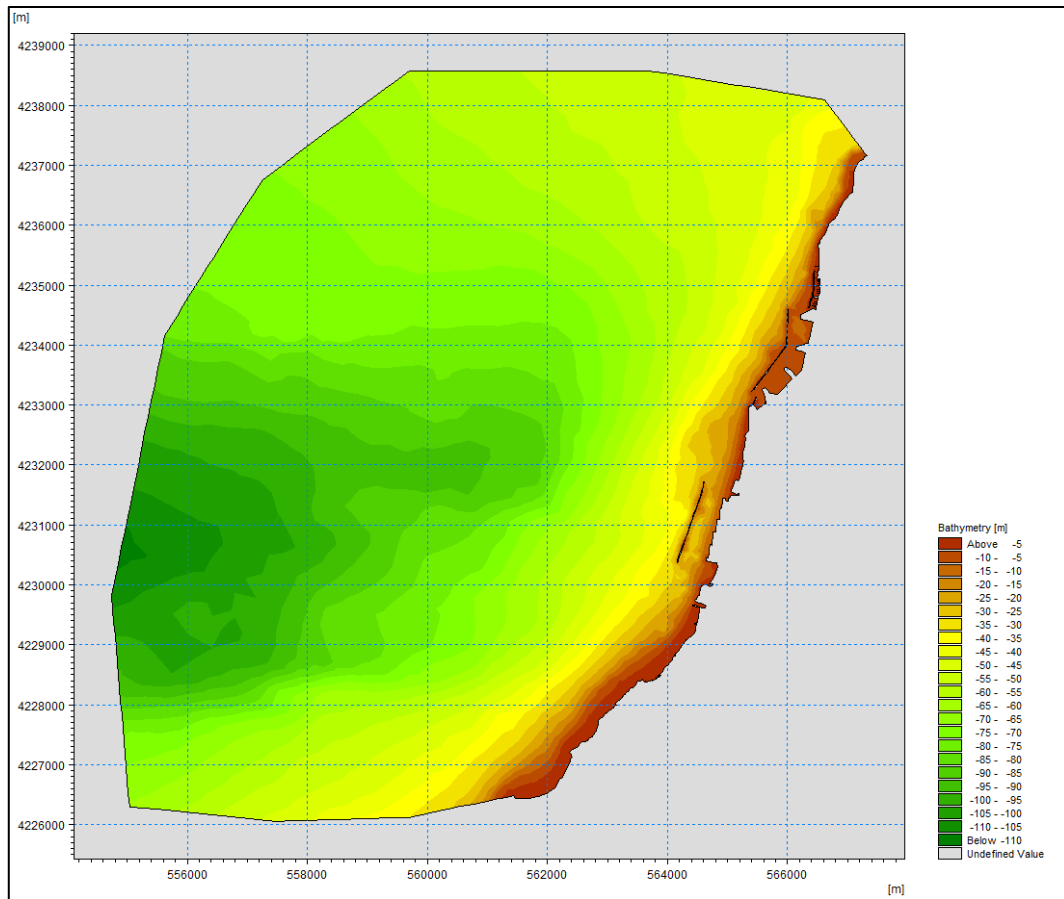
Η διαδικασία που ακολουθείται στην παρούσα ΔΕ έχει ως σκοπό να διαπιστωθεί αν υπάρχει κάποια σύγκλιση στα αποτελέσματα των εμπειρικών μεθόδων όσον αφορά το σχεδιασμό τους.

Έχοντας ήδη έτοιμα αποτελέσματα από την εργασία του Α. Σταματιάδη όσον αφορά την ανάπτυξη των κυματισμών λόγω ανέμου, αυτά χρησιμοποιούνται στις αντίστοιχές τους περιοχές μελέτης (Ερμούπολη, Πάτρα, Χρυσή Λασιθίου) ως δεδομένα εισόδου σε υπολογιστικά μοντέλα μικρότερης έκτασης, μεγαλύτερης ανάλυσης και εστιάζοντας στις υπάρχουσες κατασκευές της κάθε περιοχής. Συγκεκριμένα:

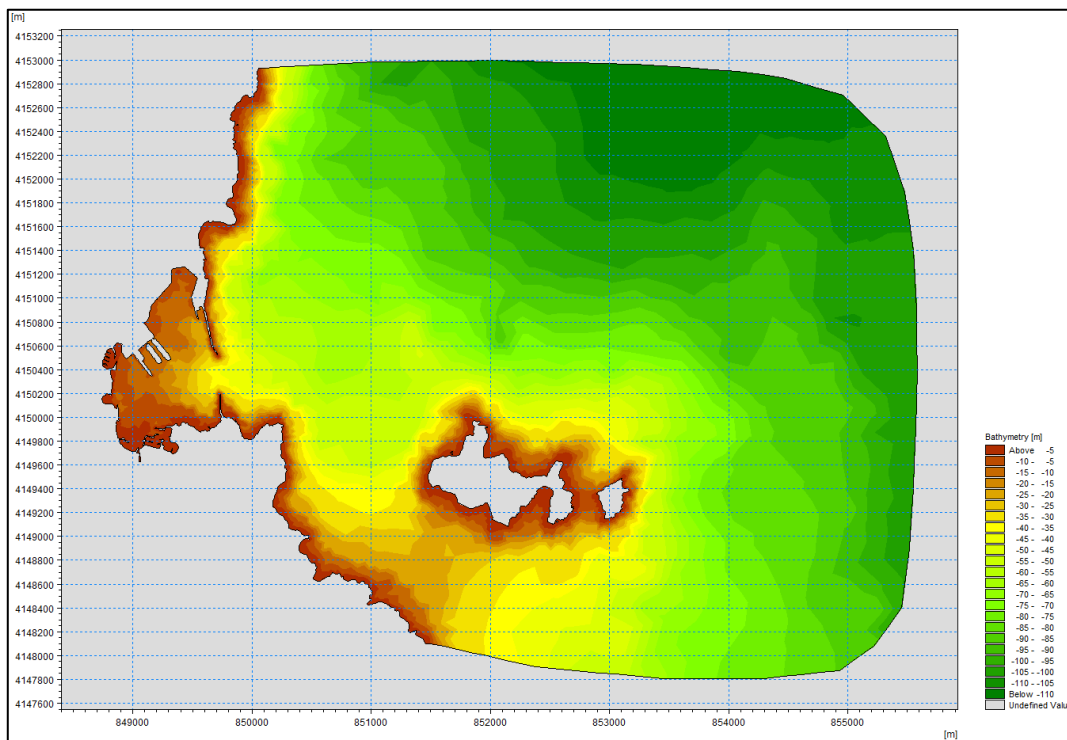
- α. Στην περιοχή της Πάτρας εξετάσθηκε η παράκτια περιοχή γύρω από το νέο και το παλιό λιμάνι, για κυματισμούς προερχόμενους από Δυτικά.
- β. Στην περιοχή της Ερμούπολης εξετάσθηκε η παράκτια περιοχή γύρω από το λιμάνι Ερμούπολης, συμπεριλαμβανομένων και των ν. Δίδυμη και ν Στρογγυλό, για κυματισμούς προερχόμενους από Ανατολικά.
- γ. Στην περιοχή της Χρυσής Λασιθίου εξετάσθηκε η παράκτια περιοχή γύρω από τη ν. Χρυσή και την Ιεράπετρα για κυματισμούς προερχόμενους από Νότια.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την προσομοίωση κάθε περιοχής έχουν ως εξής:

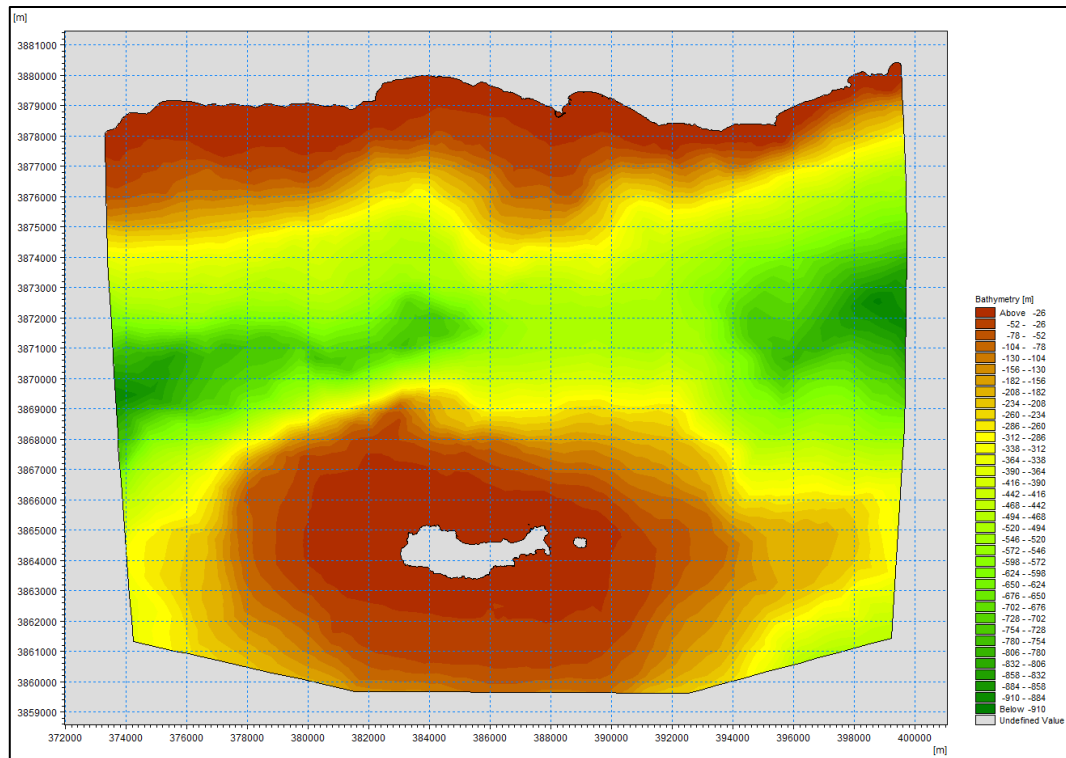
1. Συλλογή πρωτογενών δεδομένων: Για κάθε περιοχή μελέτης, συλλέχθηκαν τα βαθυμετρικά χαρακτηριστικά μέσω της πλατφόρμας του Navionics με απλή λήψη πολλαπλών στιγμιότυπων οθόνης. Η μεγέθυνση της εικόνας (zoom-in) πρέπει να είναι κατάλληλη ώστε να καλύπτει το επίπεδο ανάλυσης που χρειάζεται για την ακριβή προσομοίωση.
2. Δημιουργία μεγαλύτερου χάρτη: Οι παραπάνω εικόνες συρράφηκαν μεταξύ τους ανά περιοχή για τη δημιουργία μεγαλύτερου χάρτη όπου απεικονίζεται ολόκληρη η περιοχή μελέτης. Για τη συρραφή χρησιμοποιήθηκε ειδικό πρόγραμμα επεξεργασίας εικόνων (Photoshop) με κατάλληλους αλγόριθμους για την συρραφή εικόνων σε πανοράματα, ορθομωσαϊκά κλπ. Για την ευκολία του χρήστη, συνιστάται τα στιγμιότυπα που χρησιμοποιούνται να έχουν ανά δύο επικάλυψη τουλάχιστον 40 – 50% ώστε να αναγνωρίζονται εύκολα τα κοινά τους σημεία.
3. Δημιουργία βαθυμετρίας και υπολογιστικού πλέγματος: Οι τελικές εικόνες εισήχθησαν στο γραφικό περιβάλλον του MIKE Mesh Generator ως φόντο, και μέσω των εργαλείων του προγράμματος δημιουργήθηκε η βαθυμετρία και το υπολογιστικό πλέγμα για κάθε περιοχή μελέτης (βλ. Εικόνες 7.8-7.10).



Εικόνα 7.8 Η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής στο λιμάνι Πατρών.



Εικόνα 7.9 Η βαθυμετρία του λιμένα Ερμούπολης και της παράκτιας περιοχής.



Εικόνα 7.10 Η βαθυμετρία της παράκτιας περιοχής της Ιεράπετρας και της ν. Χρυσής.

4. Εισαγωγή οριακών συνθηκών: Το υπολογιστικό πεδίο εισάγεται μαζί με τα κατάλληλα κυματικά δεδομένα στο MIKE 21 SW. Ως οριακή συνθήκη επιλέγεται το χαρακτηριστικό κύμα που υπολογίσθηκε για κάθε μέθοδο από τον Α. Σταματιάδη για τη διεύθυνση ανέμου που εξετάζεται σε κάθε περιοχή.
5. Προσομοίωση και συλλογή αποτελεσμάτων: Για κάθε περιοχή μελέτης γίνεται προσομοίωση επτά διαφορετικών κυματισμών (μία για κάθε εμπειρική μέθοδο) και τα αποτελέσματα που δίνονται από το MIKE 21 SW σε μορφή αρχείων dfsu συλλέγονται για επεξεργασία. Σε αυτά απεικονίζονται το χαρακτηριστικό ύψος, η περίοδος των κυματισμών καθώς και η διεύθυνση διάδοσής τους.
6. Επεξεργασία και παρουσίαση αποτελεσμάτων: Τα αποτελέσματα από τα παραπάνω αρχεία ομαδοποιούνται σε αρχείο Excel και με τη χρήση κώδικα σε γλώσσα Python δημιουργούνται γραφήματα για την καλύτερη κατανόησή τους.

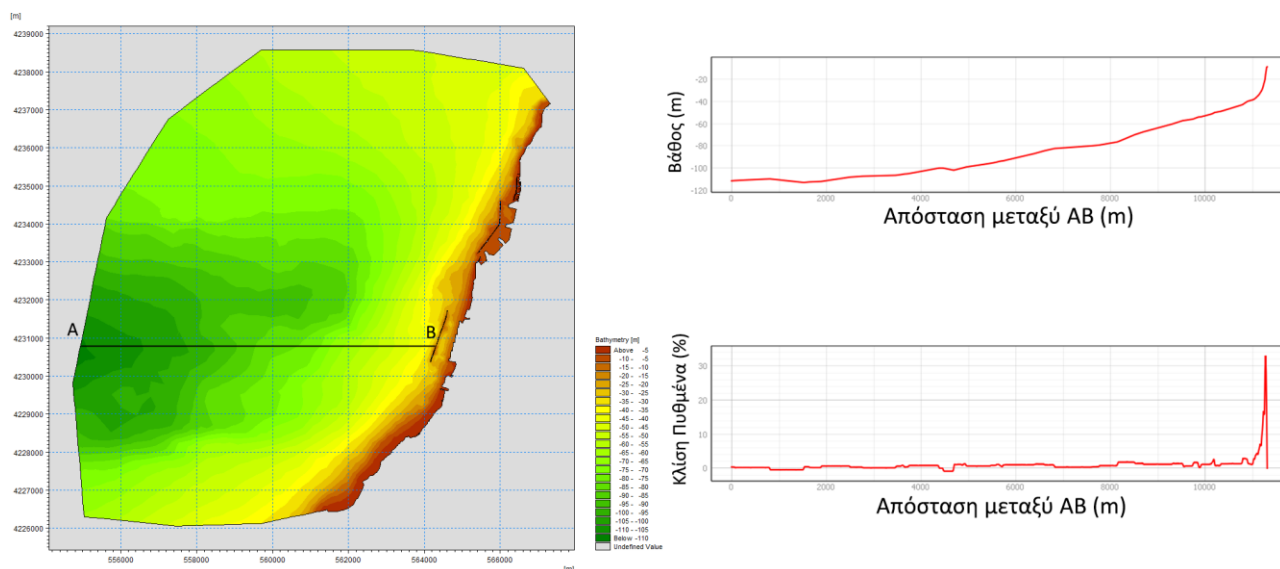
Σημειώνεται πως κάθε προσομοίωση έγινε με τα αποτελέσματα των κυματισμών που δημιουργούνται έπειτα από πνοή σταθερού ανέμου εντάσεως 10 Bf από την αντίστοιχη «επικίνδυνη διεύθυνση» της κάθε περιοχής.

8 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

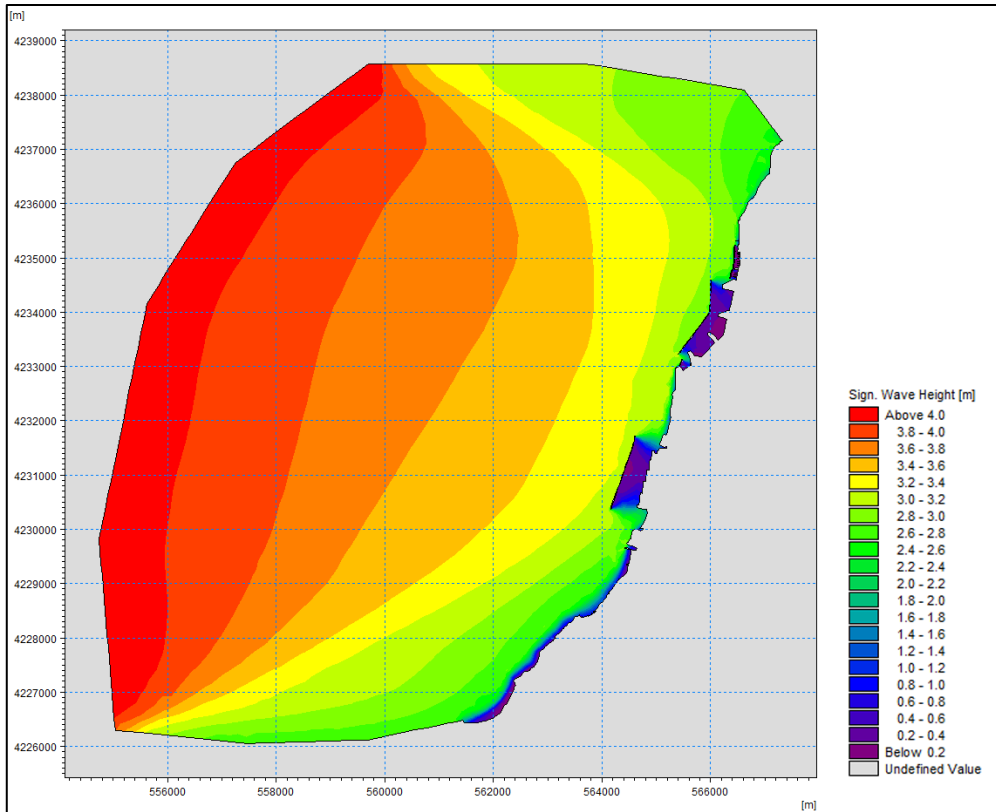
Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται η παράθεση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις των περιοχών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν εικόνες-στιγμιότυπα από την κατανομή των υψών των κυματισμών στις περιοχές μελέτης, καθώς και γραφήματα που «συμπυκνώνουν» την πληροφορία αυτή και την κάνουν πιο κατανοητή στον αναγνώστη.

8.1 Νέο Λιμάνι Πατρών

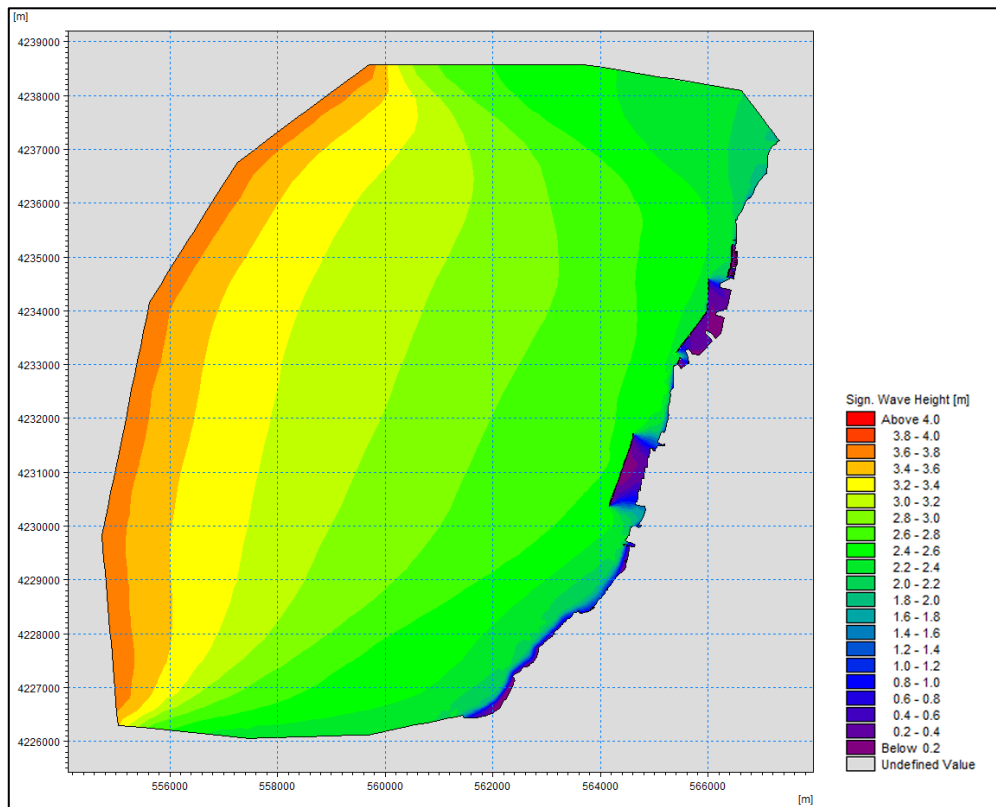
Λόγω της μορφολογίας του Πατραϊκού κόλπου, το κύμα που έρχεται από τα βαθιά δεν συναντά πολλά εμπόδια μέχρι τον κυματοθραύστη του λιμένα, και ταυτόχρονα με την ήπια κλίση και μεγάλα βάθη μέχρι την θέση αυτή, ο κυματισμός δεν απομειώνεται σημαντικά λόγω ρήχωσης ή περίθλασης. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα όπου απεικονίζεται το προφίλ του πυθμένα από το δυτικό άκρο του υπολογιστικού πεδίου μέχρι τον κυματοθραύστη, η κλίση του πυθμένα είναι της τάξης του 1-2%, ενώ το βάθος καθαυτό μειώνεται με σταθερή κλίση μέχρι την θέση του κυματοθραύστη όπου η μείωση γίνεται σχεδόν εκθετικά για περίπου 200 m.



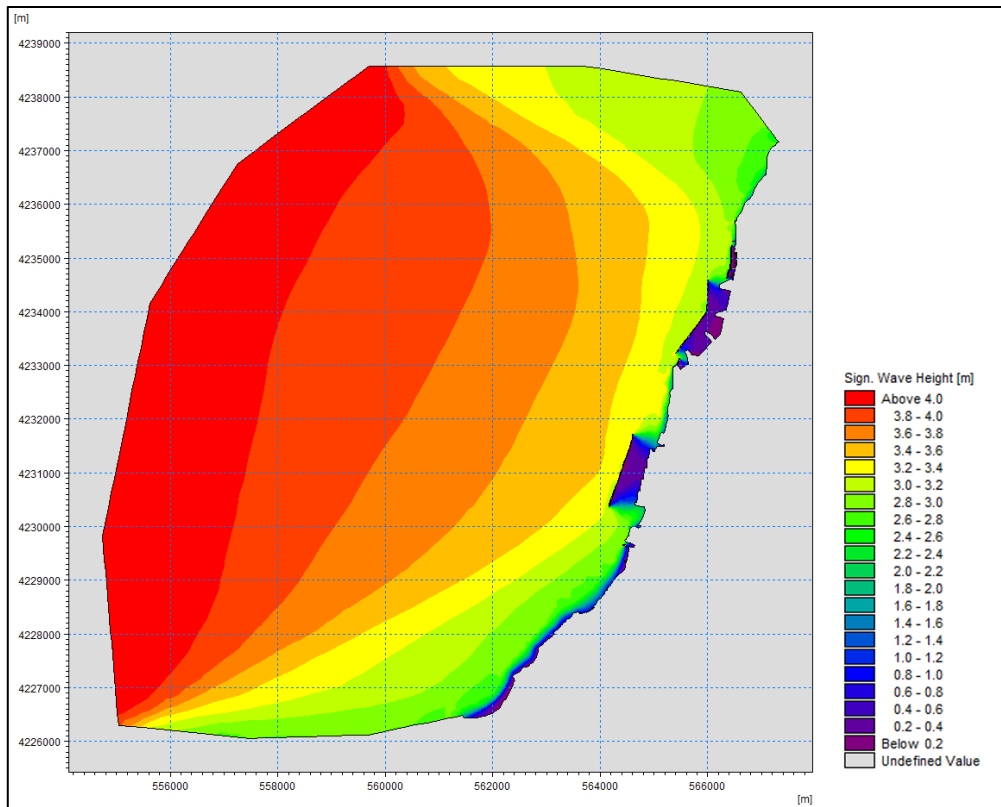
Εικόνα 8.1 Η απεικόνιση της θέσης της τομής AB στο υπολογιστικό πεδίο (αριστερά), η τομή του πυθμένα στον άξονα AB (δεξιά πάνω) και η κλίση κατά τον άξονα AB (δεξιά κάτω) για τον Πατραϊκό Κόλπο.



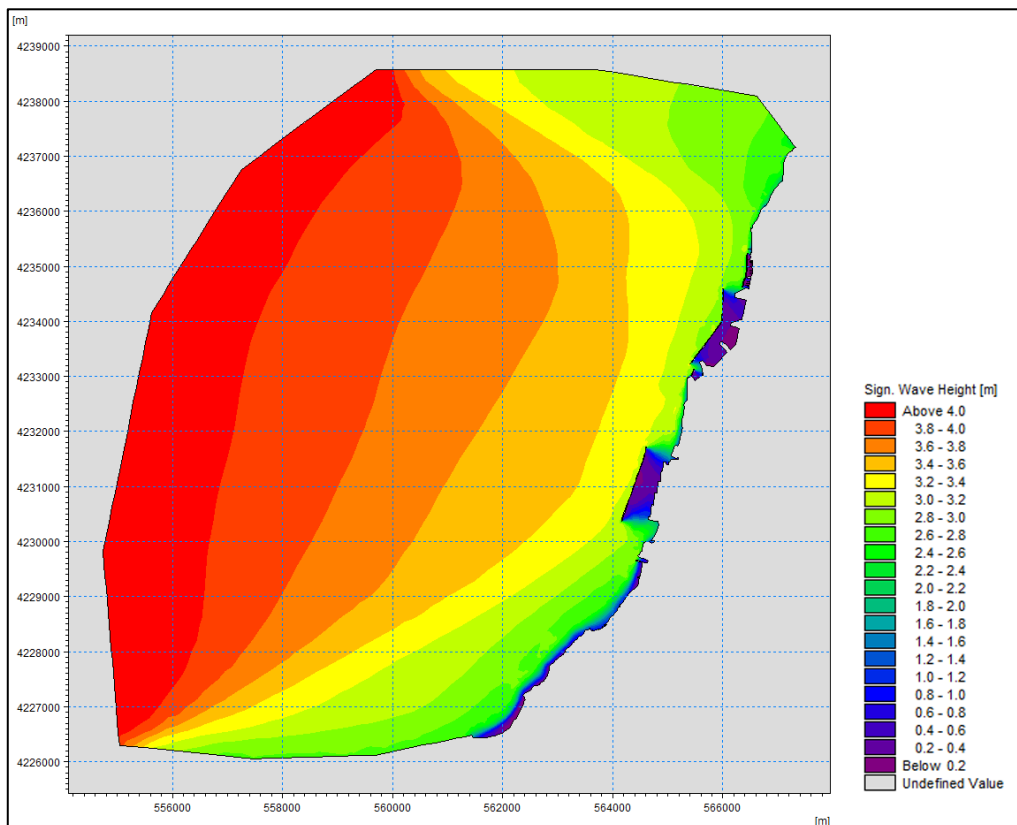
Εικόνα 8.2 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο ACES στον Πατραϊκό Κόλπο.



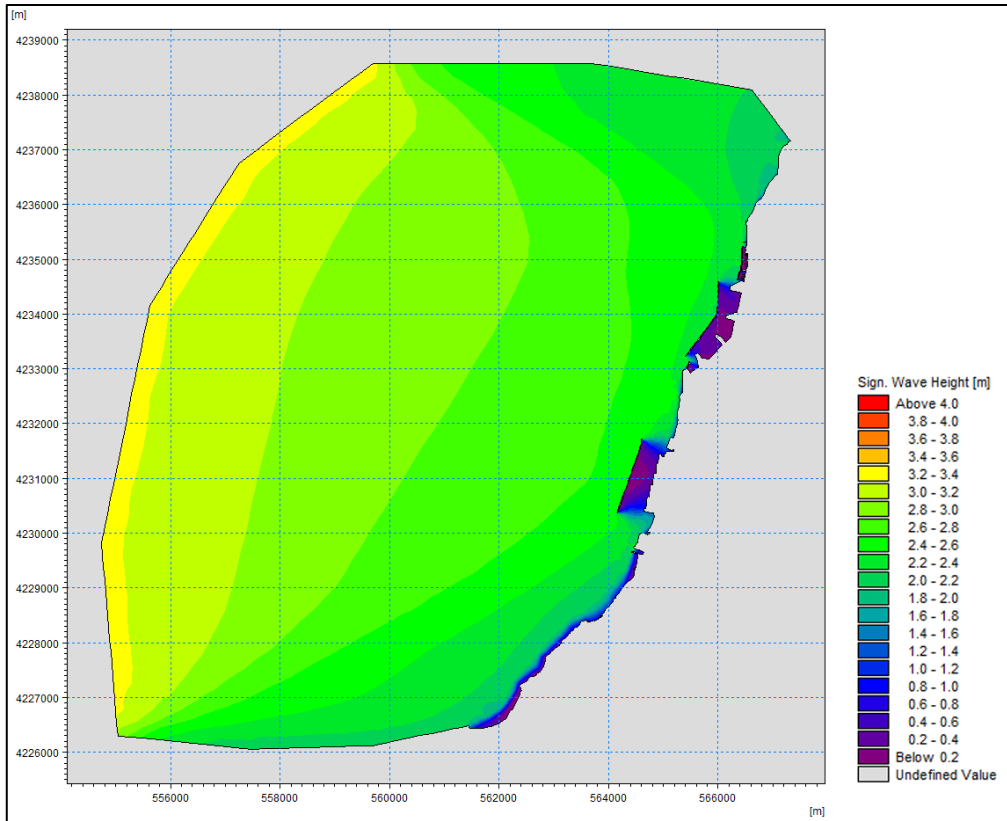
Εικόνα 8.3 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CEM στον Πατραϊκό Κόλπο.



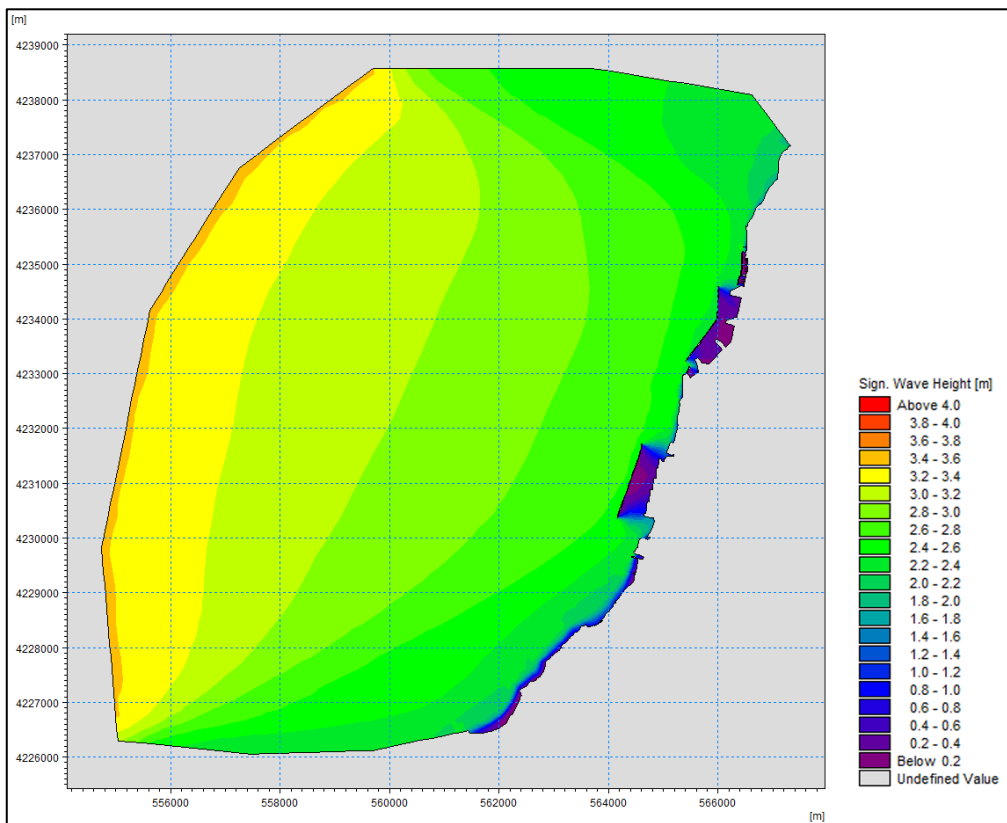
Εικόνα 8.4 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CERC στον Πατραϊκό Κόλπο.



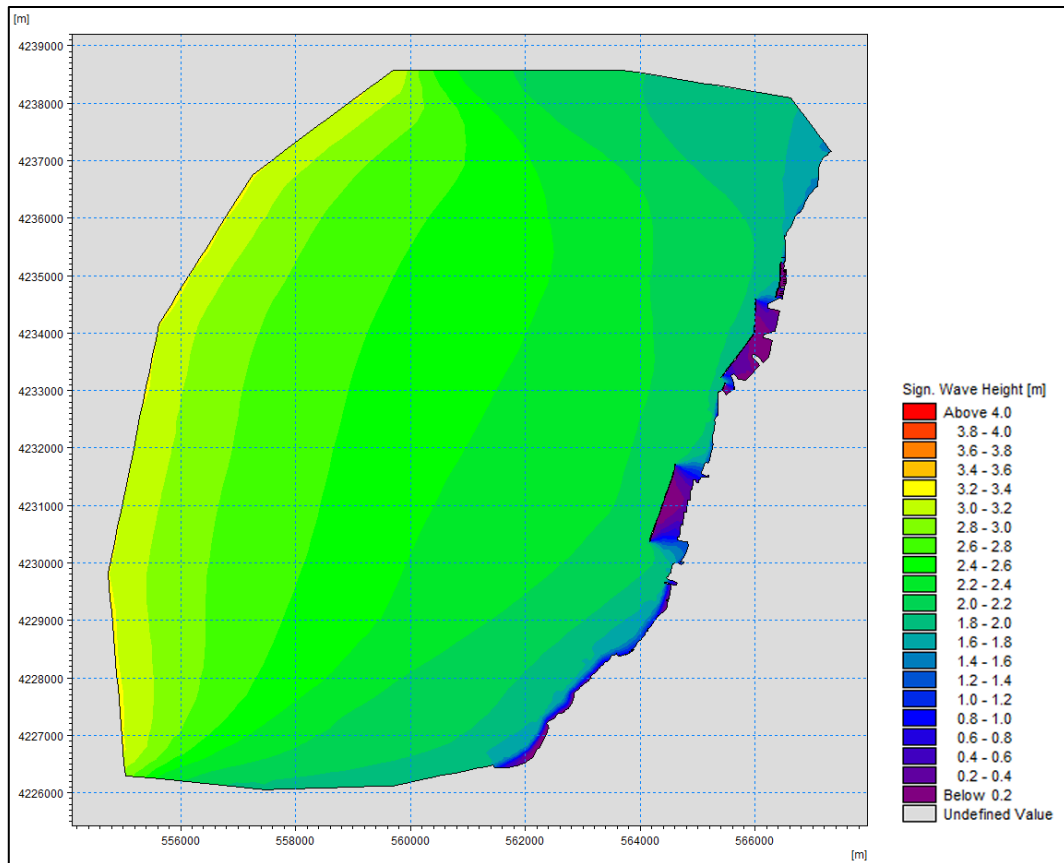
Εικόνα 8.5 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Donelan στον Πατραϊκό Κόλπο.



Εικόνα 8.6 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο JONSWAP στον Πατραϊκό Κόλπο.



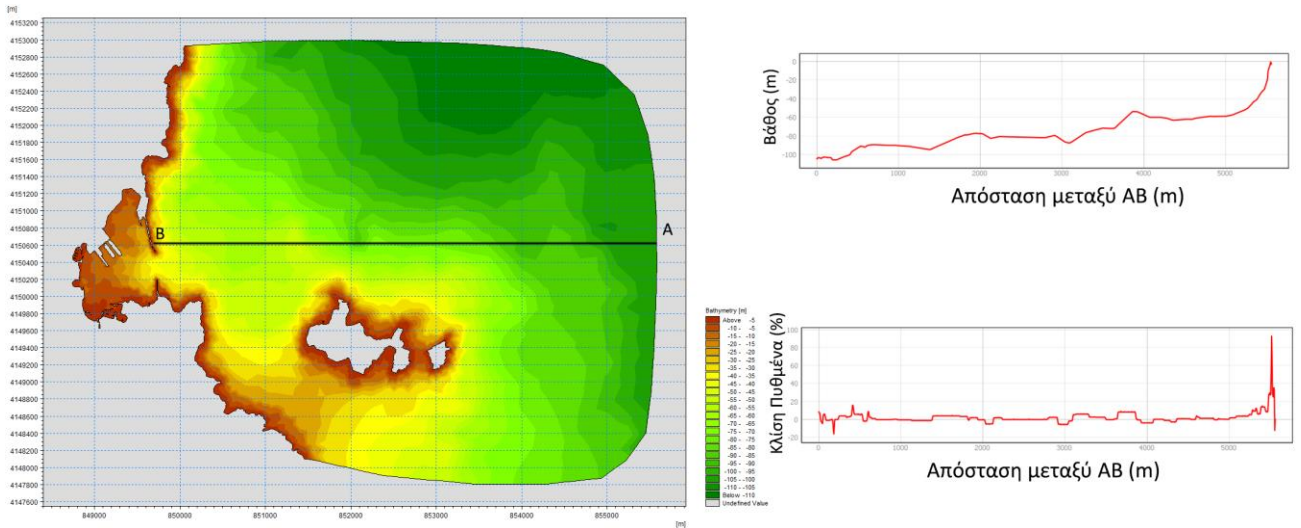
Εικόνα 8.7 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο SMB στον Πατραϊκό Κόλπο.



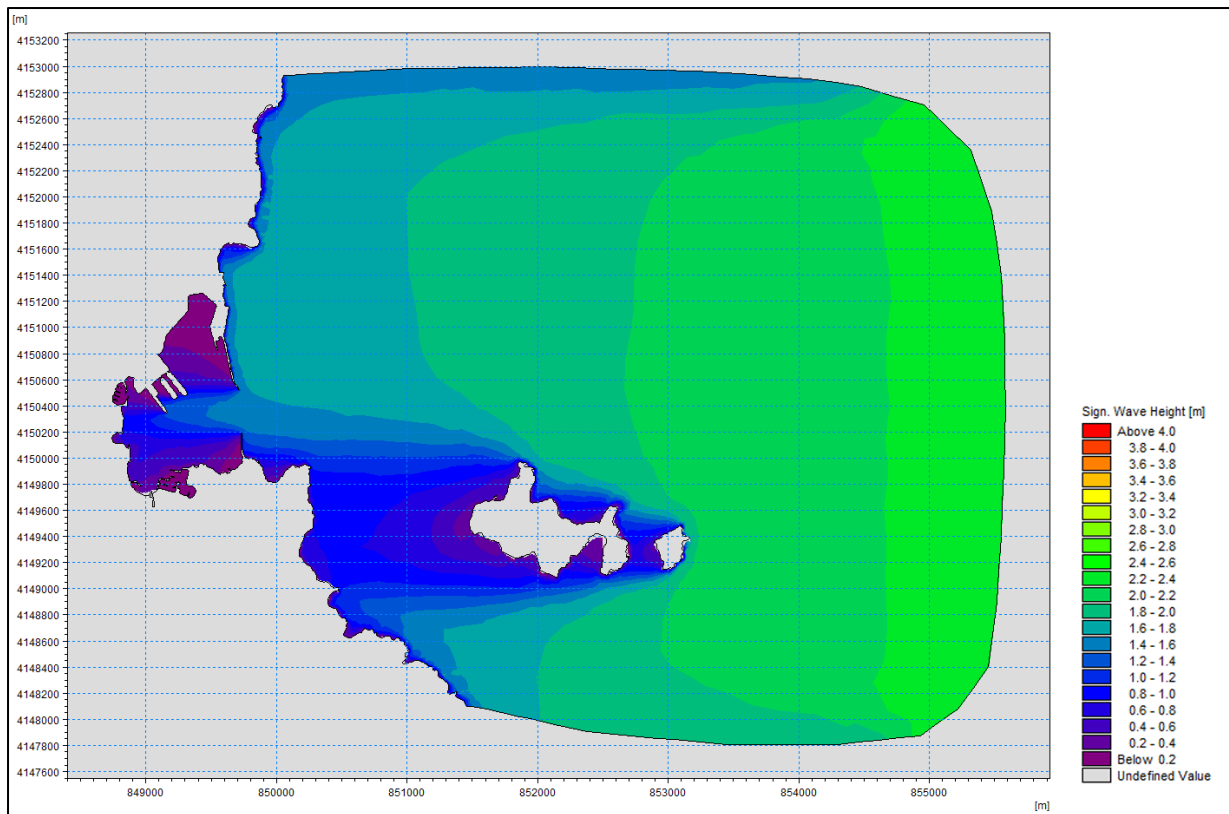
Εικόνα 8.8 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Wilson στον Πατραϊκό Κόλπο.

8.2 Λιμένας Ερμούπολης

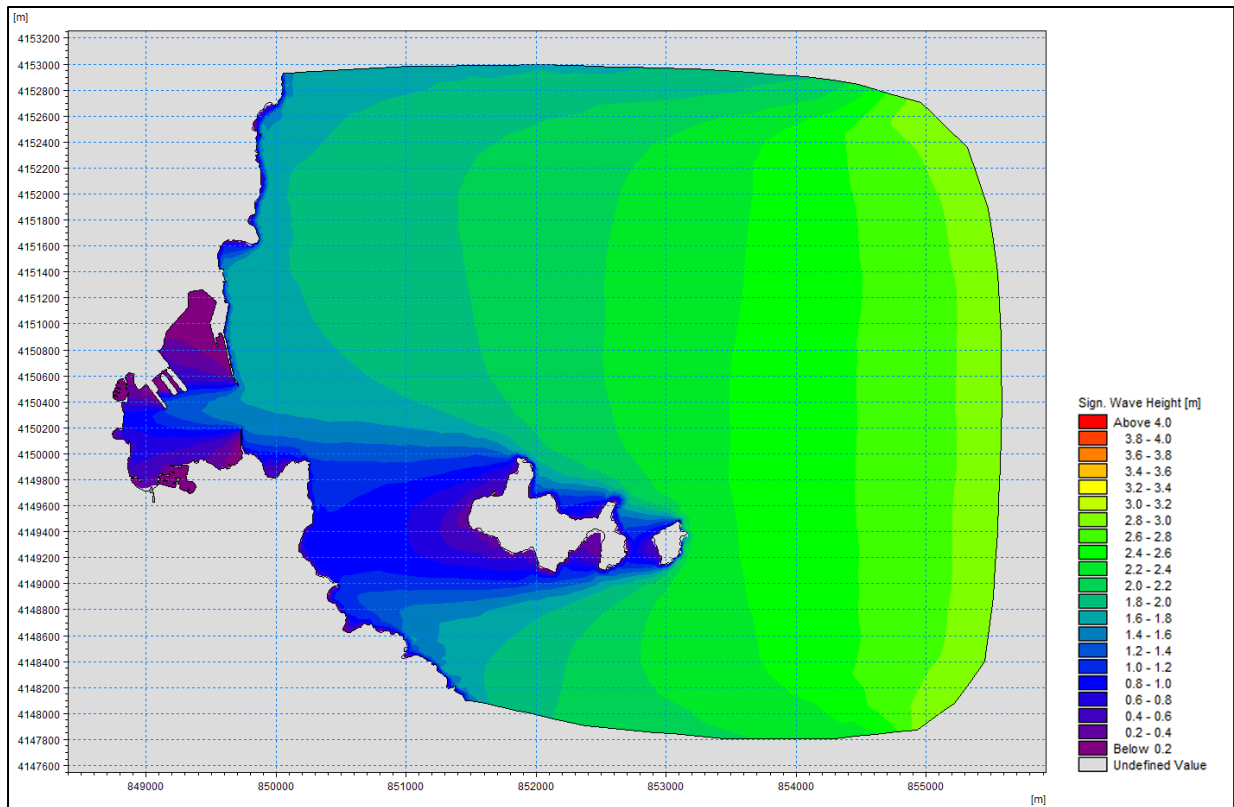
Η παράκτια περιοχή της Ερμούπολης χαρακτηρίζεται από ρηχότερα ύδατα, ενώ η ύπαρξη των νήσων Γάιδaros και Στρογγυλό, αν και δεν βρίσκονται ακριβώς ανάμεσα από την κύρια διεύθυνση του κυματισμού και τον κυματοθραύστη, εντούτοις προσφέρουν μία μικρή προστασία μέσω της περίθλασης που «τραβά» ενέργεια από τον κυματισμό. Ακολουθούν τα στιγμιότυπα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την περιοχή του Λιμένα Ερμούπολης.



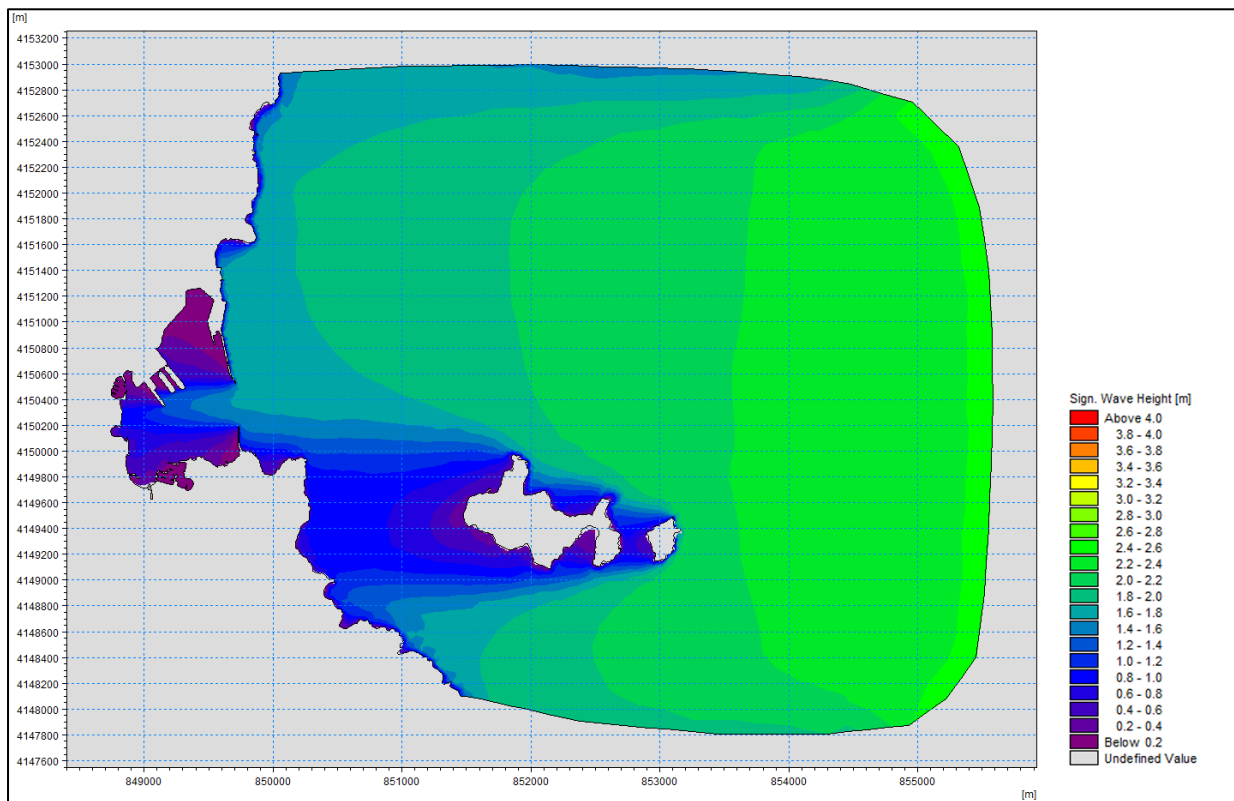
Εικόνα 8.9 Η απεικόνιση της θέσης της τομής AB στο υπολογιστικό πεδίο (αριστερά), η τομή του πυθμένα στον άξονα AB (δεξιά πάνω) και η κλίση κατά τον άξονα AB (δεξιά κάτω) για την παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.



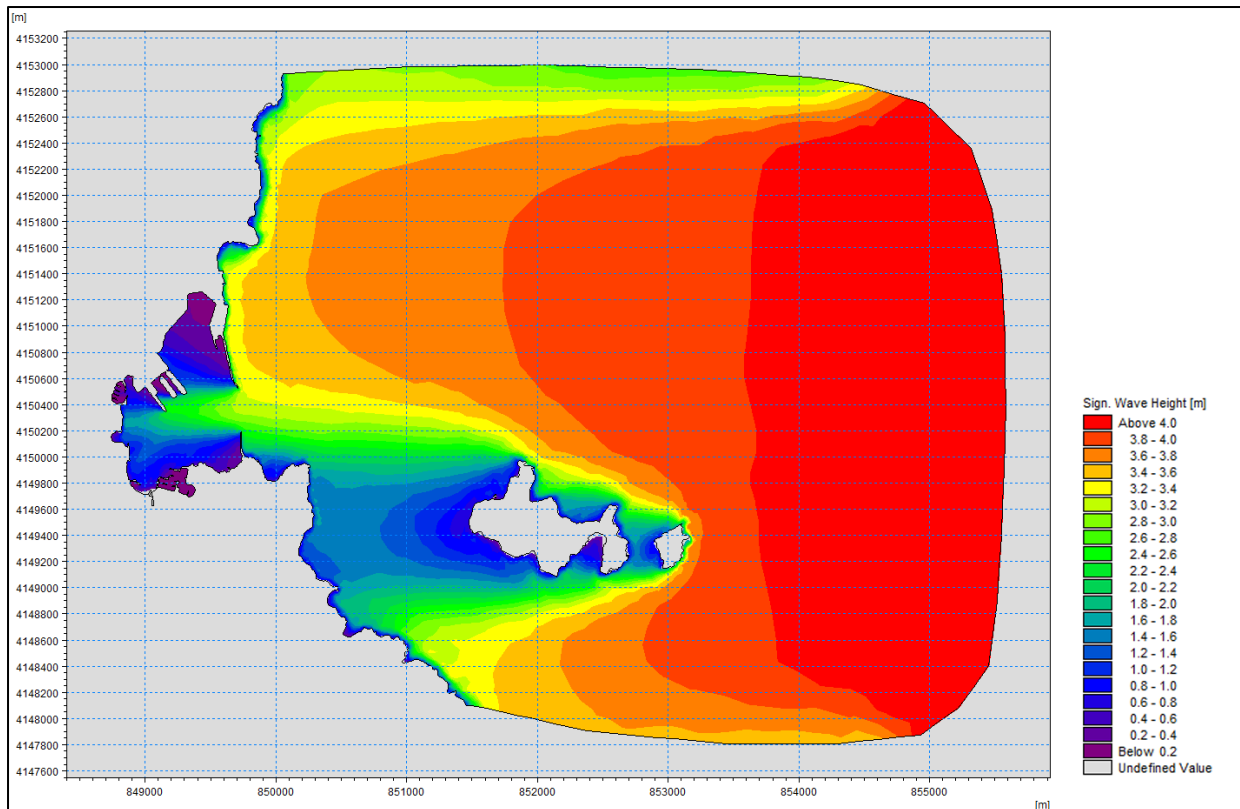
Εικόνα 8.10 Τα αποτελέσματα της προσομίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο ACES στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.



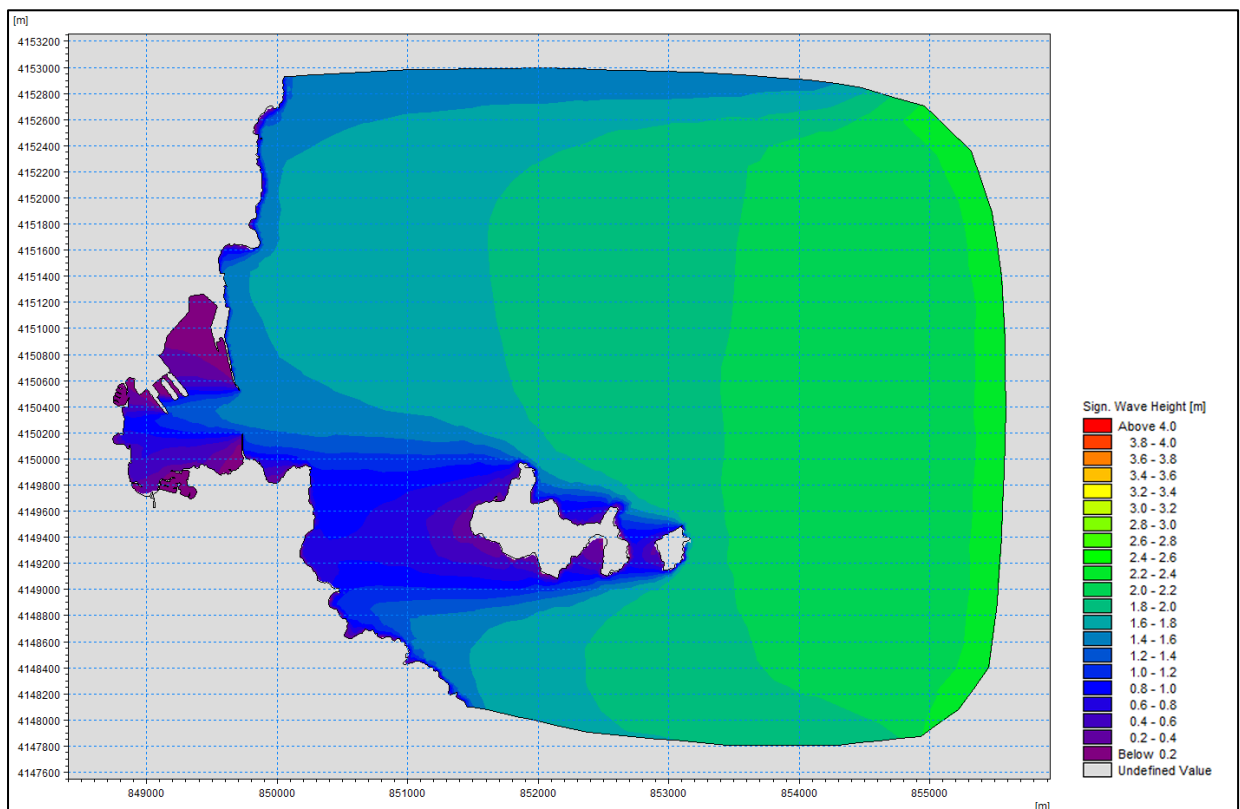
Εικόνα 8.11 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CEM στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.



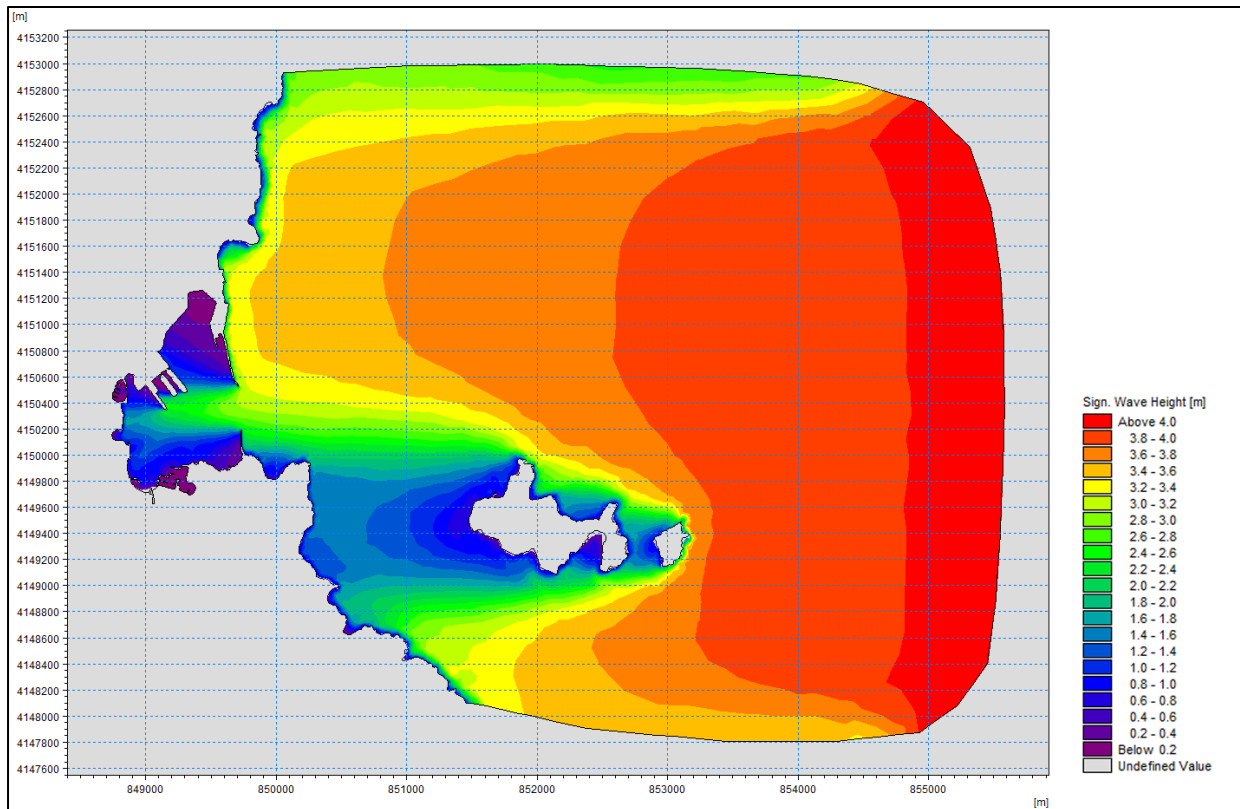
Εικόνα 8.12 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CERC στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.



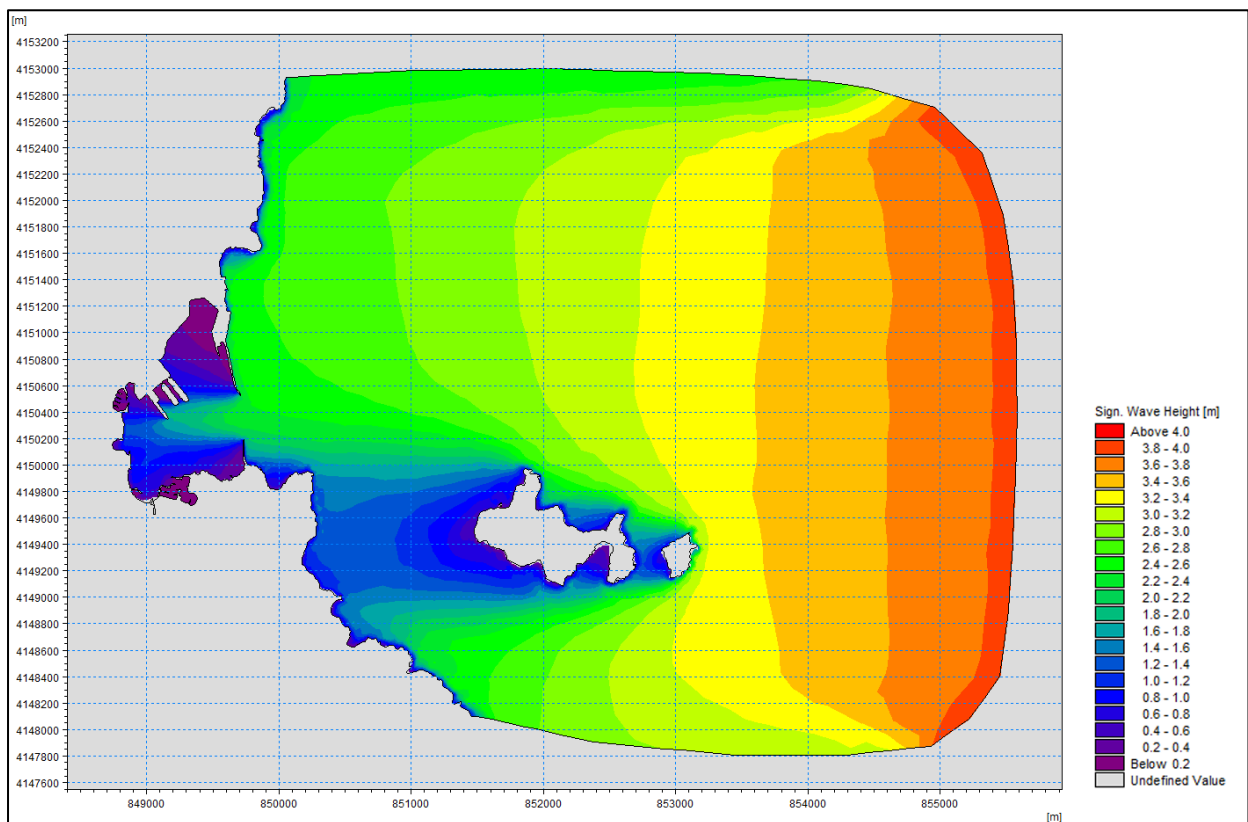
Εικόνα 8.13 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Donelan στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.



Εικόνα 8.14 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο JONSWAP στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.



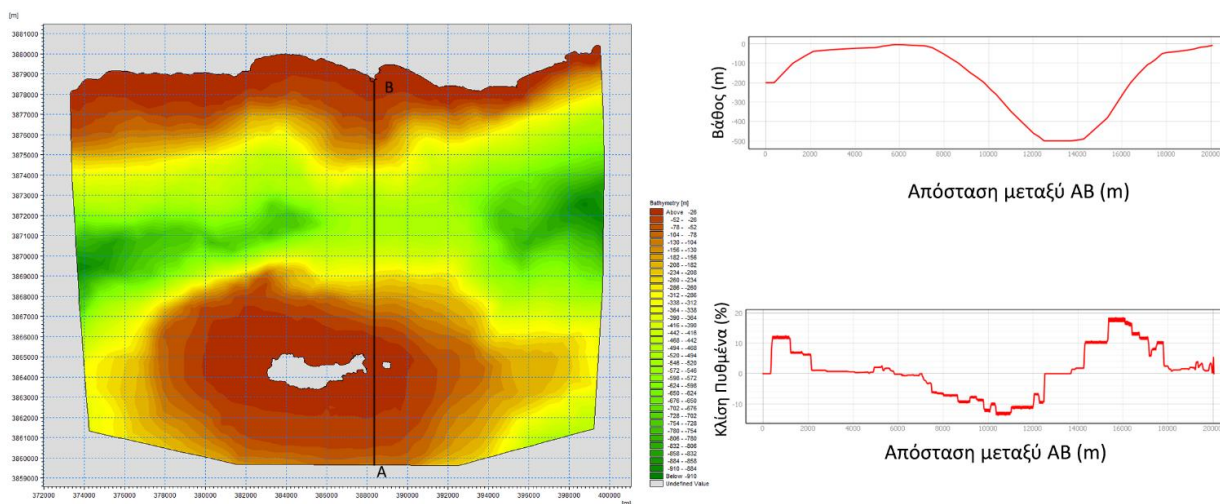
Εικόνα 8.15 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο SMB στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.



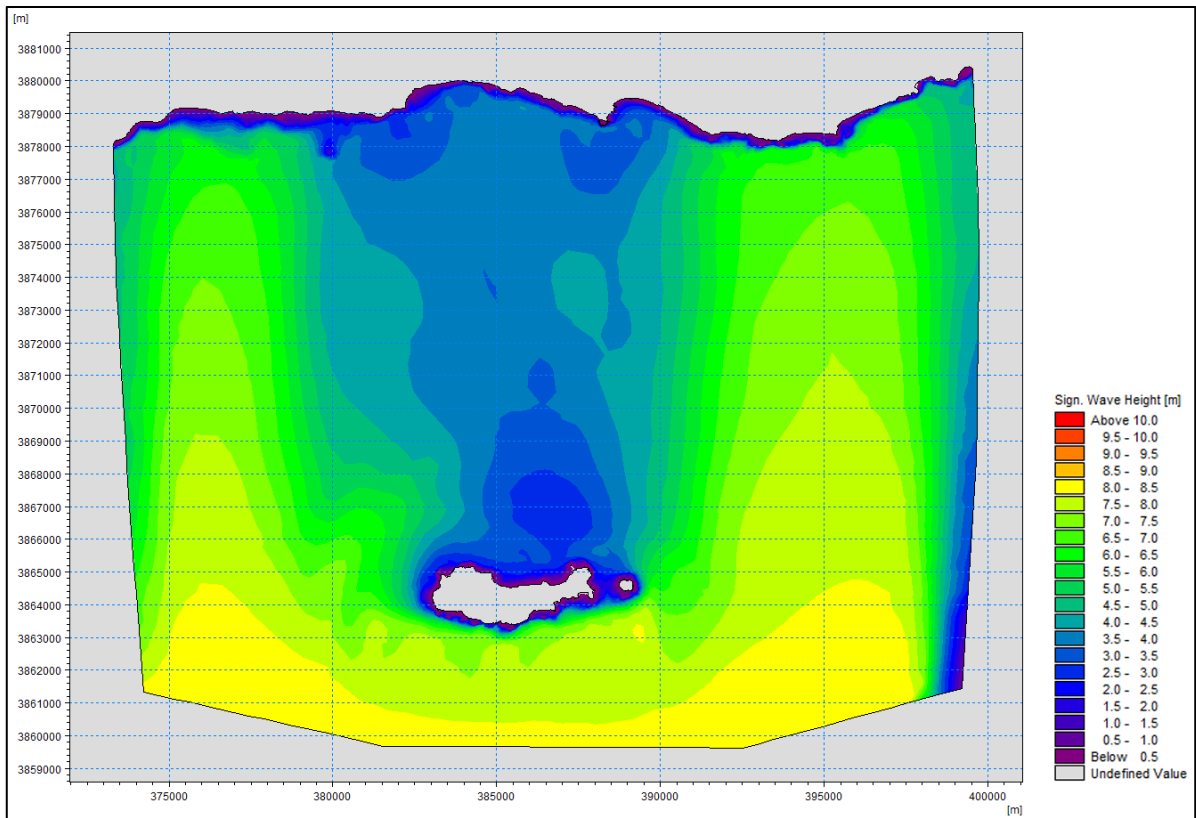
Εικόνα 8.16 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Wilson στην παράκτια περιοχή της Ερμούπολης.

8.3 Ιεράπετρα

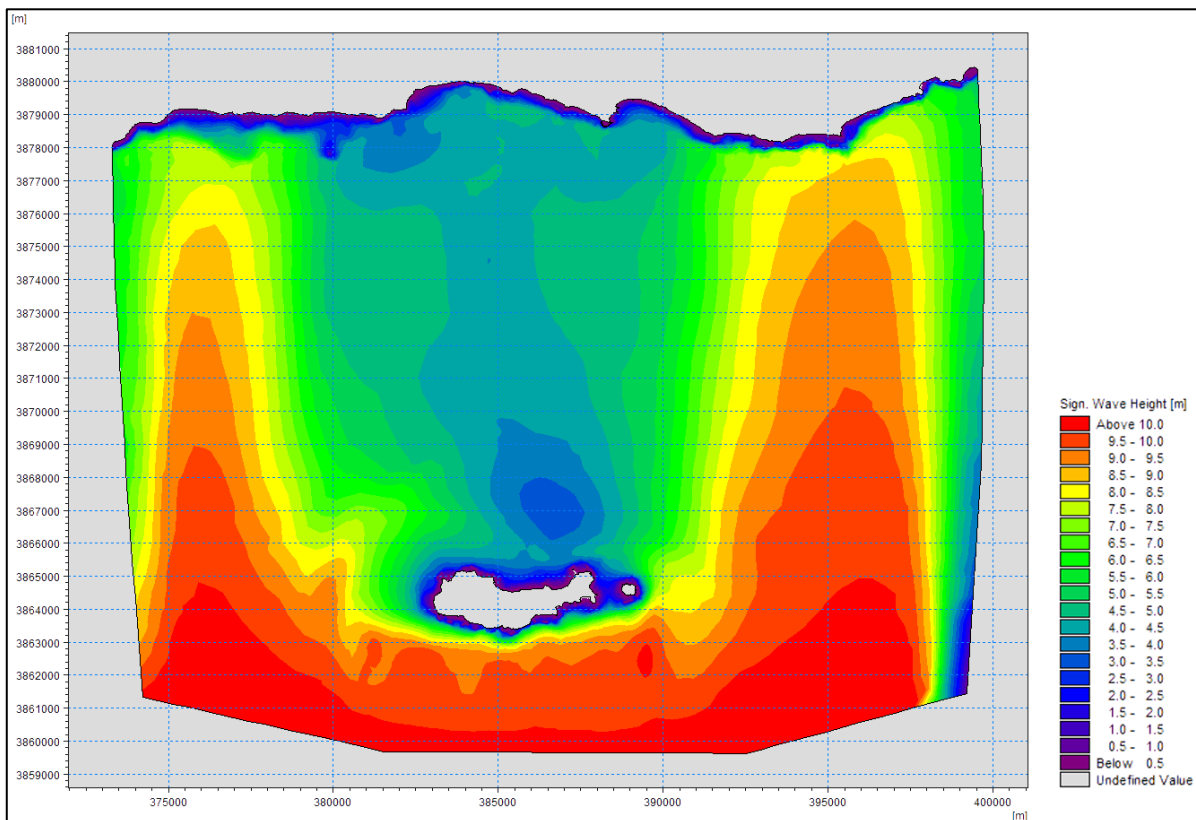
Η παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλα βάρη έως και 850 m, καθώς και από την ύπαρξη της νήσου Χρυσή που βρίσκεται πάνω στον άξονα διάδοσης του κυματισμού από τα βαθιά. Από τη μία λόγω των μεγάλων βαθών αλλά και του χαρακτηρισμού της περιοχής ως ανοιχτή θάλασσα (Open Sea) αναμένεται οι κυματισμοί που φτάνουν στον κυματοθραύστη της Ιεράπετρας να μην απομειώνονται σημαντικά, ωστόσο η ύπαρξη του νησιού προσφέρει μια σχετική προστασία. Φυσικά η ενέργεια του κυματισμού μπορεί να «παρακάμψει» αυτό το εμπόδιο που βρίσκεται στα ανοιχτά αρκετά μακριά από την Ιεράπετρα, λόγω περίθλασης.



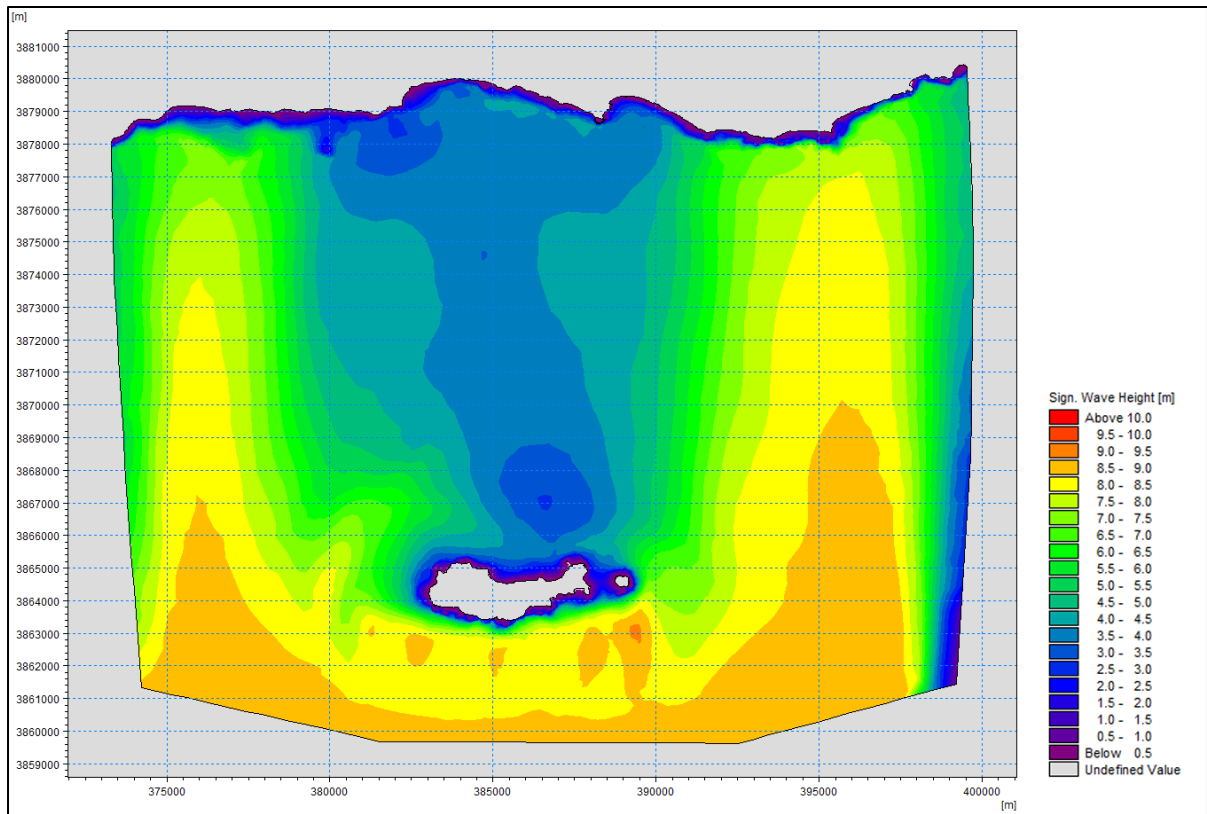
Εικόνα 8.17 Η απεικόνιση της θέσης της τομής AB στο υπολογιστικό πεδίο (αριστερά), η τομή του πυθμένα στον άξονα AB (δεξιά πάνω) και η κλίση κατά τον άξονα AB (δεξιά κάτω) για την παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.



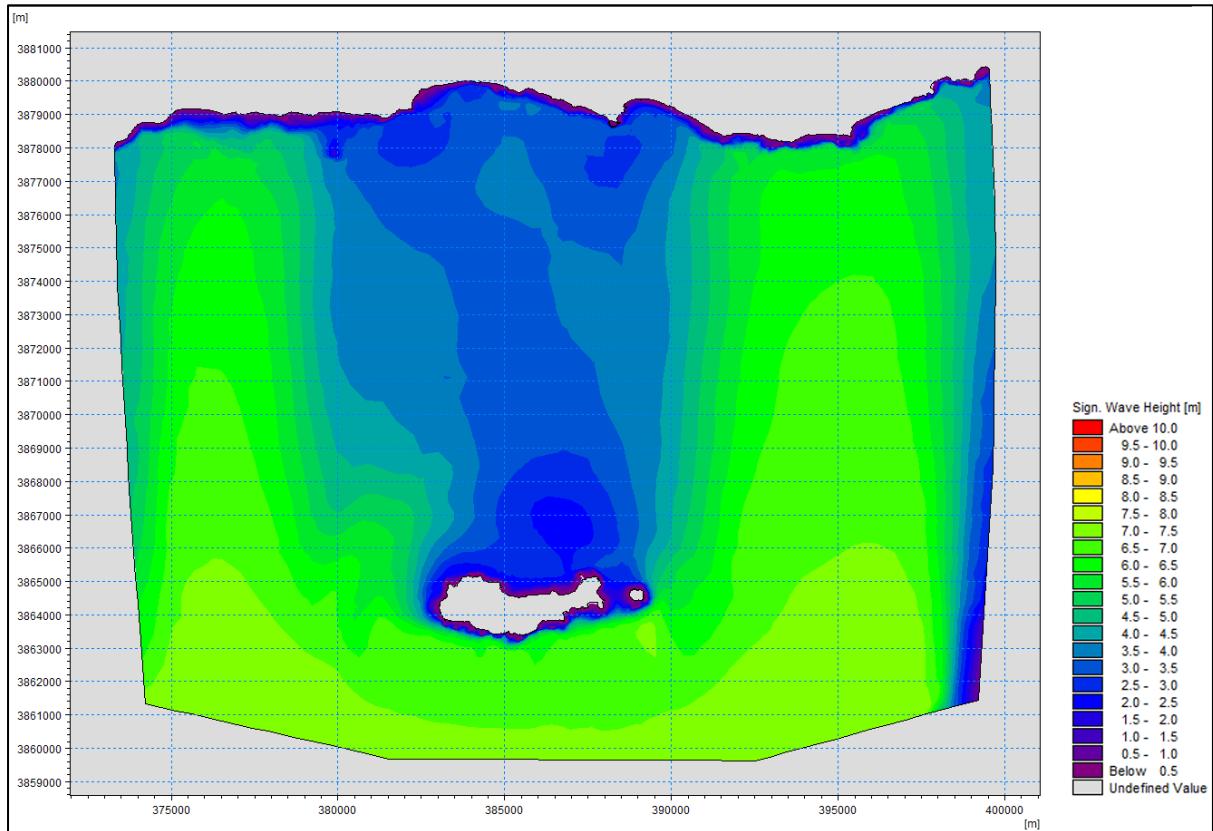
Εικόνα 8.18 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο ACES στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας..



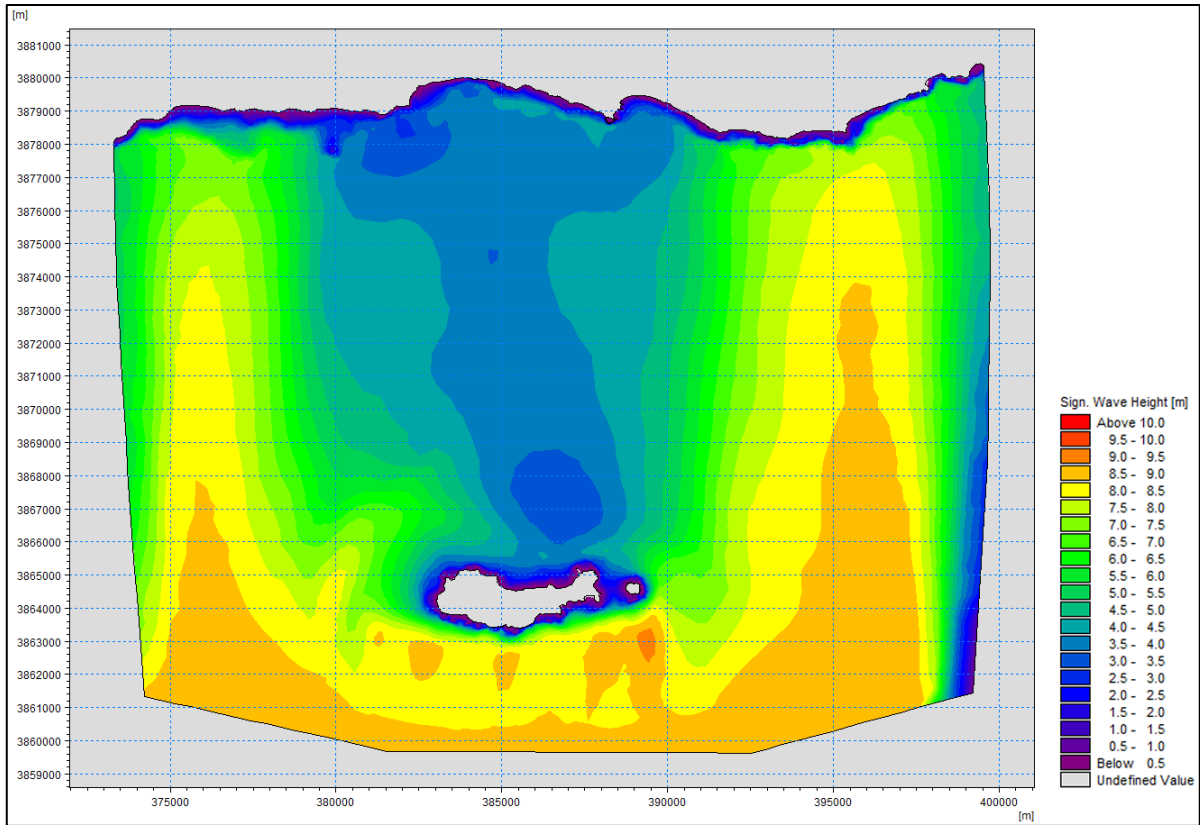
Εικόνα 8.19 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CEM στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.



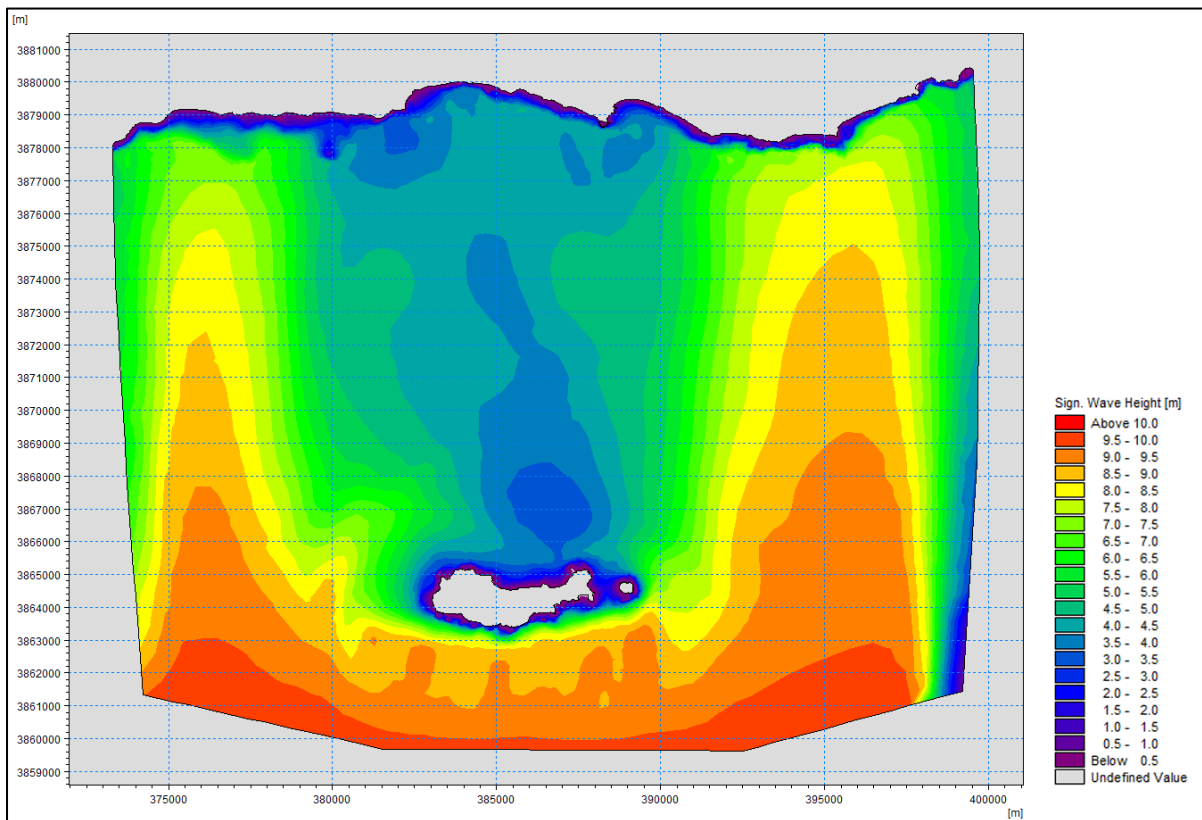
Εικόνα 8.20 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο CERC στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.



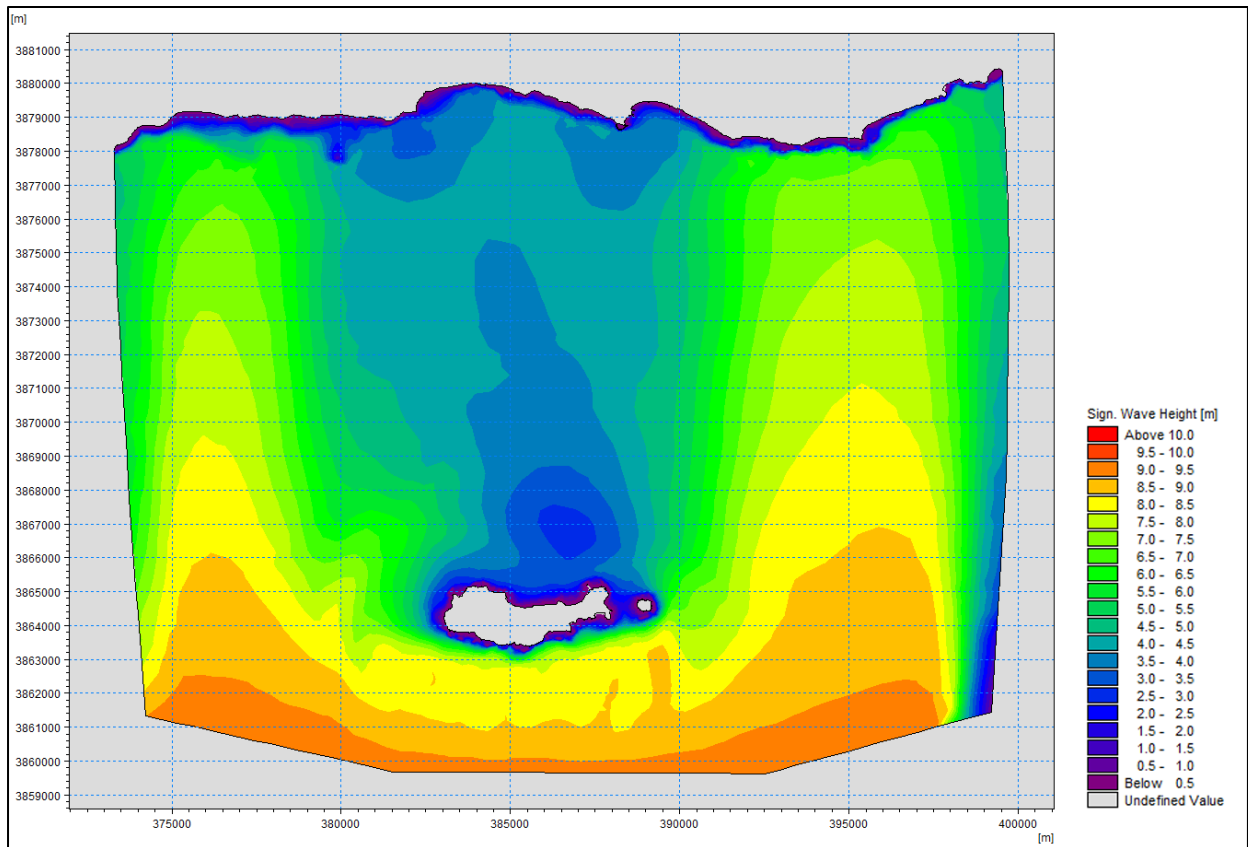
Εικόνα 8.21 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Donelan στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.



Εικόνα 8.22 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο JONSWAP στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.



Εικόνα 8.23 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο SMB στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.



Εικόνα 8.24 Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κυματισμού υπολογισμένου με τη μέθοδο Wilson στην παράκτια περιοχή της Ιεράπετρας.

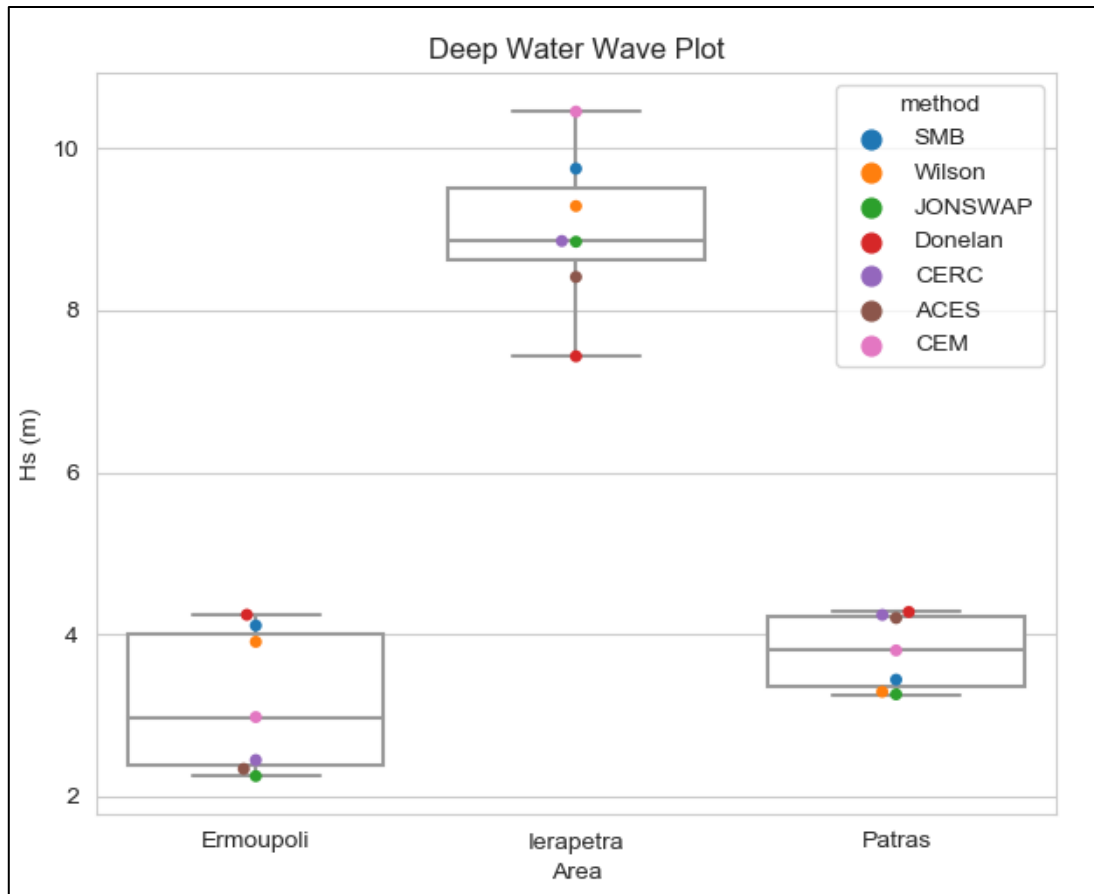
8.4 Συνοπτική Παρουσίαση

Τα συνολικά αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων παρατίθενται στον Πίνακα 8.1.

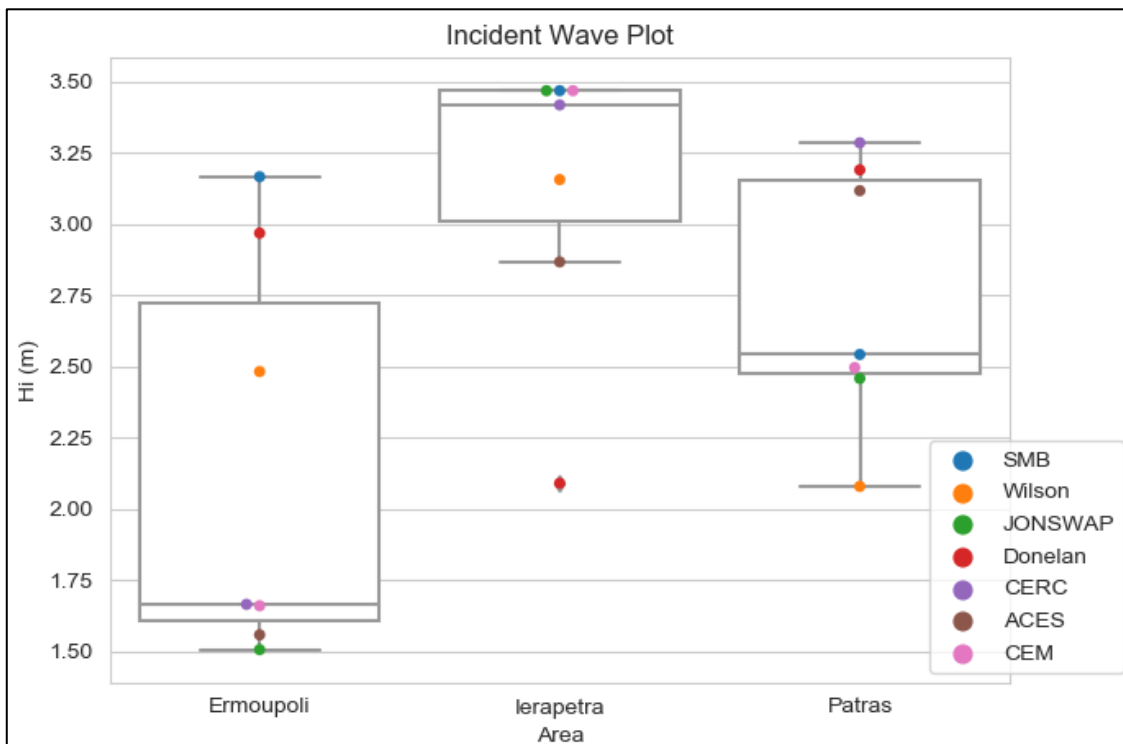
Πίνακας 8.1 Τα δεδομένα εισόδου και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, σε κατάταξη ανά μέθοδο υπολογισμού κύματος στα βαθιά και περιοχή μελέτης.

H_s (m)	H_i (m)	Περιοχή	Μέθοδος
4.108	3.166	Ερμούπολη	SMB
3.907	2.482		Wilson
2.250	1.506		JONSWAP
4.241	2.968		Donelan
2.448	1.665		CERC
2.339	1.558		ACES
2.978	1.660		CEM
9.747	3.468		SMB
9.285	3.156	Ιεράπετρα	Wilson
8.845	3.468		JONSWAP
7.431	2.090		Donelan
8.854	3.418		CERC
8.410	2.867		ACES
10.451	3.468		CEM
3.440	2.542		SMB
3.291	2.079		Wilson
3.259	2.458	Πάτρα	JONSWAP
4.276	3.190		Donelan
4.239	3.285		CERC
4.201	3.117		ACES
3.801	2.496		CEM

Στα παρακάτω γραφήματα, παρατίθενται οι κυματισμοί ανά περιοχή μελέτης, χωρισμένοι ως προς τη μαθηματική μέθοδο με την οποία υπολογίσθηκαν για τον καθορισμό του κυματικού κλίματος.



Εικόνα 8.25 Γράφημα κατανομής των κυματισμών που έρχονται από τα βαθιά, χωρισμένοι ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού του κύματος.



Εικόνα 8.26 Γράφημα κατανομής των κυματισμών που καταλήγουν στους κυματοθραύστες, χωρισμένοι ανά περιοχή μελέτης του κύματος και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.

Παρατηρώντας τα παραπάνω γραφήματα, για κάθε περιοχή, όσον αφορά τους κυματισμούς στα βαθιά ύδατα, φαίνεται πως κυμαίνονται σε ένα σχετικά στενό διάστημα ως προς τις μεθόδους υπολογισμού (βλ. Εικόνα 8.25). Υπενθυμίζεται πως αυτοί είναι οι κυματισμοί που υπολογίσθηκαν από τον Αχιλλέα Σταματιάδη με την χρήση των διαφόρων μαθηματικών μοντέλων στην περιοχή μελέτης. Στην Εικόνα 8.26 παρουσιάζονται οι κυματισμοί που προσπίπτουν στα λιμενικά έργα χωρισμένοι ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο. Σε αυτό το σημείο φαίνεται πως η κατανομή των κυματισμών ανά περιοχή δεν είναι αναλογικά τόσο στενή, πράγμα που σημαίνει πως κατά τον υπολογισμό των ογκόλιθων θωράκισης αναμένεται να προκύψει εξίσου μεγάλη διασπορά ως προς το βάρος τους και τελικά στο κόστος των υλικών.

Επίσης στον Πίνακα 8.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται ο μέσος όρος των κυματικών δεδομένων ανά περιοχή και το ποσοστό μείωσής τους καθώς οι κυματισμοί διαδίδονται στο πεδίο μελέτης μέχρι να φτάσουν στην εκάστοτε κατασκευή. Όπως φαίνεται, η μεγαλύτερη μείωση στο ύψος κύματος παρατηρήθηκε στην περιοχή της Ιεράπετρας, μιας και την πορεία του κυματισμού ανέκοψε η ν. Χρυσή. Ακολουθεί η Ερμούπολη με μείωση του ύψους κύματος περίπου κατά 1/3 το οποίο οφείλεται στην ύπαρξη της ν. Δίδυμης που αν και δεν βρίσκεται στην κύρια διεύθυνση του κυματισμού, εντούτοις προσφέρει ένα είδος προστασίας. Τελευταία βρίσκεται η περιοχή της Πάτρας που δεν διαθέτει κάποιο σημαντικό φυσικό εμπόδιο για την προστασία της από τους κυματισμούς.

Πίνακας 8.2 Συνοπτική ομαδοποίηση των κυματικών δεδομένων ανά περιοχή μελέτης.

Περιοχή	Μ.Ο. Κυματισμού στα Βαθιά (m)	Μ.Ο. Προσπίπτοντος Κυματισμού (m)	Ποσοστό Μείωσης (%)
Ερμούπολη	3.182	2.144	32.63
Ιεράπετρα	9.003	3.134	65.20
Πάτρα	3.787	2.738	27.69

8.5 Σχεδιασμός Θωράκισης Κυματοθραυστών

Σε αυτήν την ενότητα εστιάζουμε στο κομμάτι της ευστάθειας των λιμενικών έργων, και συγκεκριμένα στην κατασκευή των κυματοθραυστών στις περιοχές μελέτης. Στόχος της ενότητας είναι να ελεγχθεί η ύπαρξη διαφορών από τη χρήση των διαφορετικών μαθηματικών μεθόδων υπολογισμού του κυματικού κλίματος και η επίδρασή τους στο σχεδιασμό ευστάθειας και το κόστος του έργου. Από τις διαφορές που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα μεταξύ των κυματισμών στα βαθιά και των κυματισμών που καταλήγουν στα έργα αναμένεται να φανούν αντίστοιχες διαφορές στο βάρος και το μέγεθος των ογκόλιθων.

8.5.1 Ευστάθεια Θωράκισης

Αρχικά γίνεται η υπόθεση ότι θα κατασκευασθεί κυματοθραύστης με πρηνή, με μια τυπική κλίση πρανούς 1:2 (αρκετά συνηθισμένη για έργα προστασίας σε αντίστοιχα βάθη στην Ελλάδα) και χρήση φυσικών ογκόλιθων. Κάνοντας χρήση της εξίσωσης Hudson (Εξ. 3.8)

θεωρούνται θραυστοί ογκόλιθοι λατομείου με ειδικό βάρος $\gamma_s = 2.6 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3}$ ενώ στις θέσεις που χωροθετούνται τα έργα προστασίας οι κυματισμοί είναι μη θραυόμενοι, επομένως η τιμή του $K_D = 4.0$ σύμφωνα με το Rock Manual. Το ειδικό βάρος του θαλασσινού νερού είναι $\gamma_w = 1.025 \frac{\text{tn}}{\text{m}^3}$. Η μόνη μεταβλητή επομένως για την εξίσωση Hudson είναι το κύμα σχεδιασμού H το οποίο λαμβάνεται από την στήλη “ H_i (m)” του Πίνακα 8.1. Επιπλέον, με τη χρήση της εξίσωσης 3.9 το βάρος του κάθε ογκόλιθου μετατρέπεται σε μια μέση διάμετρο ώστε να γίνει πλήρως ο σχεδιασμός της διατομής. Ο πίνακας που ακολουθεί παραθέτει το αντίστοιχο βάρος και μέγεθος ογκόλιθου για κάθε κύμα σχεδιασμού.

Πίνακας 8.3 Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού ευστάθειας των κυματοθραυστών για κάθε περιοχή μελέτης και μέθοδο υπολογισμού κύματος.

H (m)	Βάρος (tn)	Διάμετρος (m)	Περιοχή	Μέθοδος
3.166	2.843	1.185	Ερμούπολη	SMB
2.482	1.370	0.929		Wilson
1.506	0.306	0.564		JONSWAP
2.968	2.342	1.111		Donelan
1.665	0.413	0.623		CERC
1.558	0.339	0.583		ACES
1.660	0.410	0.621		CEM
3.468	3.736	1.298	Ιεράπετρα	SMB
3.156	2.816	1.181		Wilson
3.468	3.736	1.298		JONSWAP
2.090	0.818	0.782		Donelan
3.418	3.577	1.279		CERC
2.867	2.111	1.073		ACES
3.468	3.736	1.298		CEM
2.542	1.471	0.951	Πάτρα	SMB
2.079	0.805	0.778		Wilson
2.458	1.330	0.920		JONSWAP
3.190	2.908	1.194		Donelan
3.285	3.176	1.229		CERC
3.117	2.713	1.166		ACES
2.496	1.393	0.934		CEM

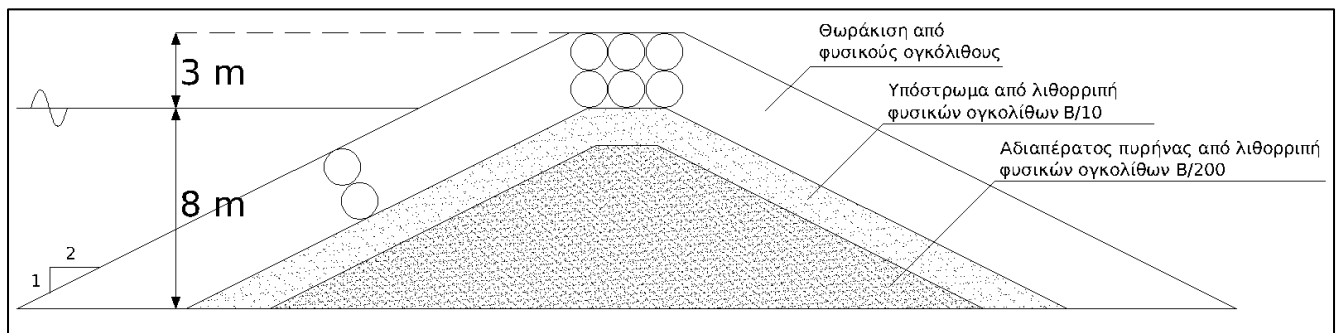
Από τον παραπάνω πίνακα επιβεβαιώνεται η ύπαρξη σημαντικών διαφορών στα μεγέθη του σχεδιασμού κυματοθραυστών και ιδίως στο βάρος των ογκόλιθων ανάλογα με τη μέθοδο

που επιλέγει ο μελετητής να χρησιμοποιήσει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διατηρώντας όλα τα υπόλοιπα μεγέθη σχεδιασμού σταθερά, μικρή μεταβολή στο ύψος κύματος σχεδιασμού οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερη διαφορά στο τελικό βάρος του ογκόλιθου, μιας και στην εξίσωση Hudson που χρησιμοποιείται, το ύψος κύματος υψώνεται στον κύβο. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως για διπλάσιο κύμα σχεδιασμού, προκύπτει όχι διπλάσιο αλλά οκταπλάσιο βάρος ογκόλιθου, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα για παράδειγμα στην περιοχή της Ερμούπολης μεταξύ των μεθόδων JONSWAP (1.506 m κύμα, 0.306 tn ογκόλιθος) και Donelan (2.968 m κύμα, 2.342 tn ογκόλιθος).

8.5.2 Κοστολόγηση κατασκευών

Για την πλήρη κατανόηση των διαφορών που παρουσιάστηκαν στον υπολογισμό της θωράκισης των κυματοθραυστών από τη χρήση των μαθηματικών μοντέλων υπολογισμού κυματικού κλίματος, και ως ένας από τους στόχους της παρούσας ΔΕ, ακολουθεί η κοστολόγηση των υλικών κατασκευής των λιμενικών έργων προστασίας.

Για την σύγκριση των οικονομικών μεγεθών επί ίσους όροις, γίνεται η υπόθεση ότι τα υπάρχοντα λιμενικά έργα κατασκευάζονται σύμφωνα με τη διατομή της Εικόνα 8.27, με τη χρήση δύο στρώσεων φυσικών ογκόλιθων για την θωράκιση, τριών για το πλάτος στέψης ενώ η κατασκευή εδράζεται στον πυθμένα σε βάθος 8 m από τη Μέση Στάθμη Θάλασσας (ΜΣΘ) και η επιφάνεια της στέψης βρίσκεται 3 m πάνω από την ΜΣΘ. Η κλίση των πρανών είναι 1/2, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν παραπάνω με την χρήση της εξίσωσης Hudson. Ο αδιαπέρατος πυρήνας κατασκευάζεται από φυσικούς ογκόλιθους βάρους $B/200$ όπου B το βάρος των ογκόλιθων θωράκισης.



Εικόνα 8.27 Τυπική υποθετική διατομή κυματοθραύστη για την κοστολόγηση των λιμενικών έργων.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους, καθώς και τα τις διαμέτρους του Πίνακας 8.3, υπολογίζεται το εμβαδό διατομής της θωράκισης και του πυρήνα για κάθε μέγεθος ογκόλιθου, και έπειτα το κάθε εμβαδό πολλαπλασιάζεται με το μήκος του κυματοθραύστη σύμφωνα με τον Πίνακα 8.4 ώστε να προκύψουν οι συνολικοί όγκοι των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 8.4 Τα μήκη των προσήνεμων κυματοθραυστών στις περιοχές μελέτης.

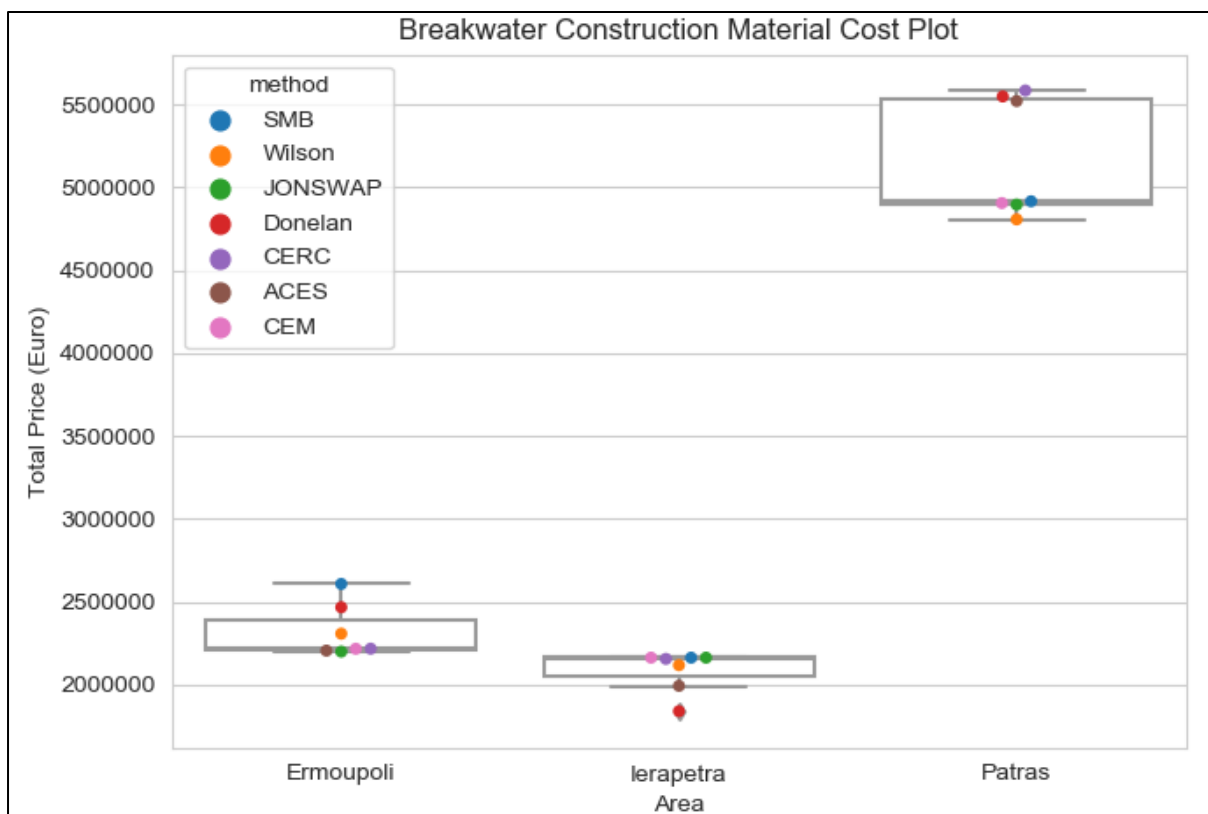
Περιοχή	Μήκος Κυματοθραύστη (m)
Ερμούπολη	672
Ιεράπετρα	546
Πάτρα	1428

Τέλος, η κοστολόγηση γίνεται μέσω ειδικού τιμολογίου που εκδίδει το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, τμήμα του οποίου δίνεται παρακάτω. Για κάθε διαφορετικό βάρος ογκόλιθου θωράκισης, η τιμή μονάδας του αλλάζει σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα. Σημειώνεται πως για την κατασκευή της ενδιάμεσης στρώσης και του αδιαπέρατου φίλτρου, όλοι οι ογκόλιθοι που χρησιμοποιήθηκαν είχαν βάρος μικρότερο των 100 kg επομένως η τιμή μονάδας παρέμεινε σταθερή στα 12.00 €/m³.

Πίνακας 8.5 Τμήμα του τιμολογίου του Υπουργείου Υποδομών και Μεταφορών.

Περιγραφή	Μονάδα	Τιμή μονάδας
Λιθορριπές ατομικού βάρους λίθων 0,5 έως 100 kg	m ³	12.00
Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200 - 1500 kg	m ³	13.00
Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 1500 - 2500 kg	m ³	14.50
Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 2500 - 4000 kg	m ³	16.00

Στην Εικόνα 8.28 που ακολουθεί, φαίνεται η κατανομή του κόστους των υλικών κατασκευής των κυματοθραυστών ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού κύματος.



Εικόνα 8.28 Γράφημα κατανομής του συνολικού κόστους των υλικών κατασκευής κυματοθραύστη (θωράκιση και πυρήνας) για κάθε μέθοδο υπολογισμού, χωρισμένα ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.

Οι διαφορές που παρουσιάζονται φαίνεται πως δεν ξεπερνούν κατά μέσο όρο το 15% μεταξύ μέγιστου και ελάχιστου κόστους κατασκευής για κάθε περιοχή, παρά τη μεγαλύτερη αρχική διαφορά μεταξύ των κυματισμών και του βάρους των ογκόλιθων. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι η κοστολόγηση σύμφωνα με το Υπουργείο Υποδομών γίνεται ανά μεγάλα διαστήματα βάρους των ογκόλιθων, επομένως αν προκύψουν ογκόλιθοι με μικρή διαφορά βάρους, θα έχουν ίδια τιμή μονάδας. Φυσικά, αυτό δεν αναιρεί το γεγονός ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές τόσο σε επίπεδο ευστάθειας όσο και σε οικονομικό, οι οποίες μπορεί να καταστήσουν το έργο μη ανταγωνιστικό. Αξίζει τέλος να αναφερθεί πως στο κόστος κατασκευής δεν συμπεριλαμβάνονται τα μεταφορικά, οι εργασίες τοποθέτησης και άλλα έξοδα, τα οποία ενδέχεται να αλλάζαν σημαντικά τον τελικό προϋπολογισμό του έργου ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και την απόσταση μεταφοράς των υλικών.

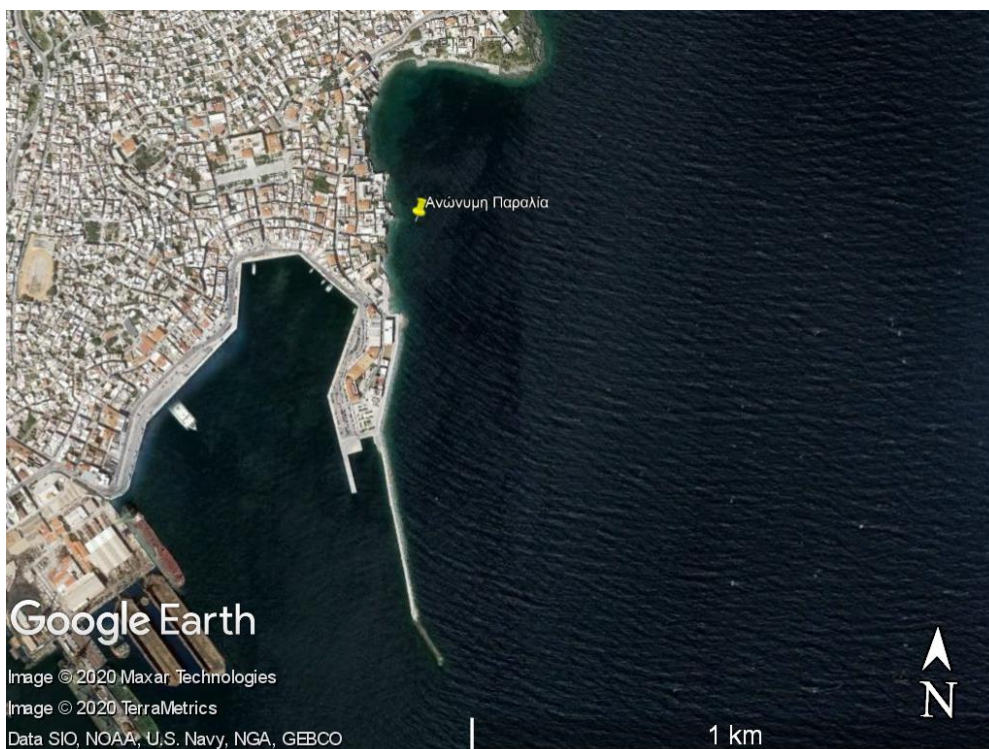
8.6 Ακτομηχανική Μελέτη – Προστασία Ακτογραμμής

Σε αυτήν την ενότητα τα μεγέθη του κυματικού κλίματος που υπολογίσθηκαν με τις διάφορες μαθηματικές μεθόδους, εφαρμόζονται σε ένα σενάριο προστασίας ακτογραμμής σε κοντινές παραλίες στις περιοχές μελέτης. Στόχος είναι να δοθεί έμφαση στο κομμάτι της λειτουργίας των έργων, και να ελεγχθούν τυχόν διαφορές μεταξύ των μαθηματικών μεθόδων υπολογισμού των κυματικών χαρακτηριστικών και πώς αυτές επηρεάζουν το σχεδιασμό και τη λειτουργία ακτομηχανικών έργων.

Λόγω της θέσης των ακτομηχανικών έργων, της φύσης των διεργασιών κοντά στην ακτή (depth-limited συνθήκες) και των απότομων κλίσεων του πυθμένα αναμένεται να φανούν μικρές διαφορές ως προς το μήκος και τη θέση του κυματοθραύστη. Οι μεγάλες κλίσεις οδηγούν σε στενή ζώνη θραύσης, ενώ οι depth-limited συνθήκες σημαίνουν ότι το ύψος του κυματισμού κοντά στην ακτογραμμή είναι αρκετά μικρό σε σχέση με το βάθος και κινείται σε μικρό εύρος.

8.6.1 Επιλογή ακτών μελέτης

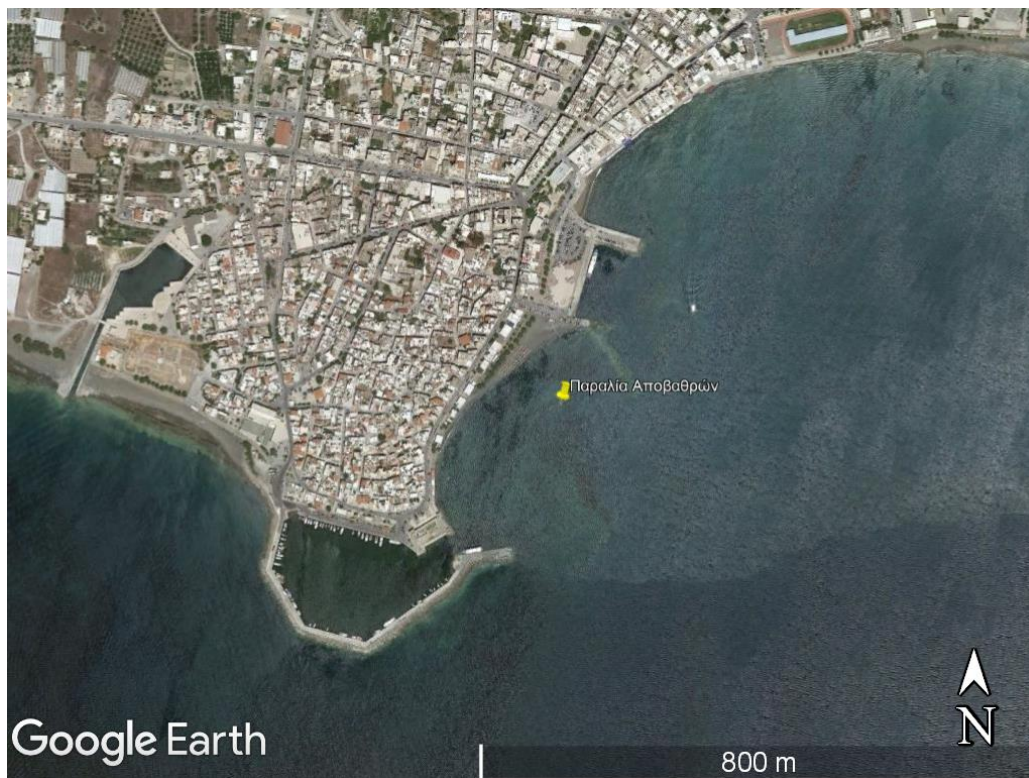
Από τις περιοχές μελέτης της Ερμούπολης, της Πάτρας και της Ιεράπετρας, επιλέγονται αντίστοιχα η ακτή έξω από κατοικημένη περιοχή 500 m βόρεια του λιμένα Ερμούπολης, η ακτή στην εκβολή του ποταμού Γλαύκου 500 m νότια του Νέου Λιμένα Πατρών και η παραλία Αποβάθρων 250 m βόρεια του αλιευτικού καταφυγίου Ιεράπετρας.



Εικόνα 8.29 Ακτή μελέτης στην Ερμούπολη Σύρου (πηγή: Google Earth).



Εικόνα 8.30 Ακτή μελέτης στην εκβολή του ποταμού Γλαύκου στην Πάτρα (πηγή: Google Earth).



Εικόνα 8.31 Ακτή μελέτης «Παραλία Αποβάθρων» στην Ιεράπετρα (πηγή: Google Earth).

8.6.2 Σχεδιασμός κυματοθραυστών

Για καθεμιά από τις παραπάνω παραλίες και για κάθε εμπειρική μέθοδο, από τα ήδη υπολογισμένα αριθμητικά μοντέλα του MIKE γίνεται αναζήτηση της γραμμής θραύσης των

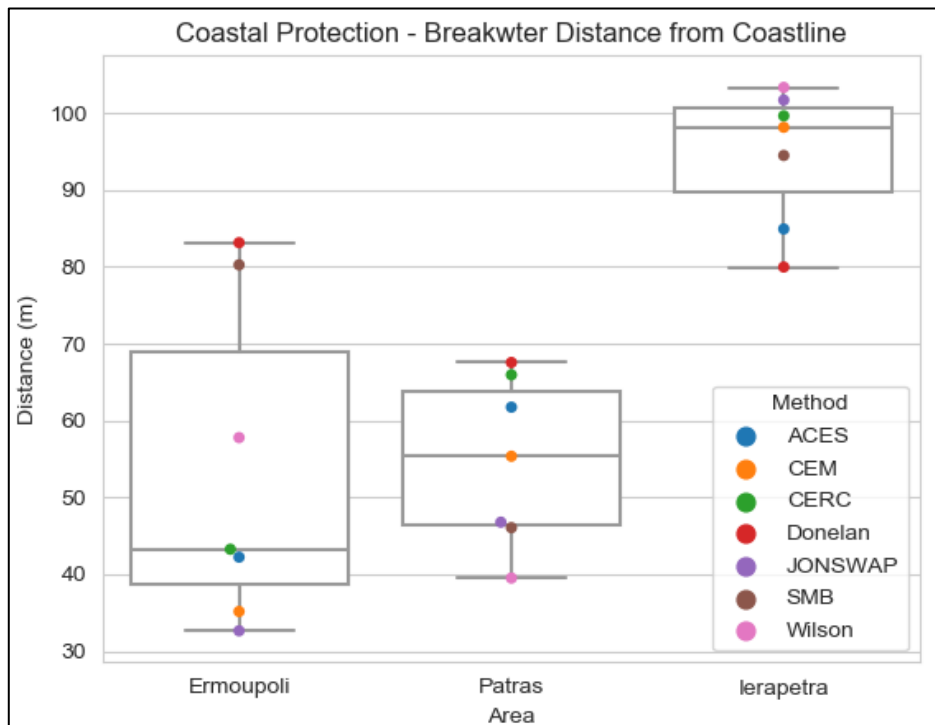
κυματισμών και το αντίστοιχο βάθος θραύσης, καθώς και η περίοδος αιχμής του κυματισμού. Από αυτά τα δεδομένα υπολογίζεται το μήκος κύματος στη θέση της θραύσης μέσω της εξίσωσης διασποράς (Εξίσωση 2.9). Σύμφωνα με τις οδηγίες των Karambas et al. (2015) το μήκος του κυματοθραύστη L_s θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δύο φορές το μήκος κύματος για το οποίο σχεδιάζεται. Επιπλέον, ο λόγος L_s/Y_s (όπου Y_s η απόσταση του κυματοθραύστη από την ακτή) θα πρέπει να έχει κατάλληλη τιμή, ανάλογα με τις ανάγκες προστασίας της ακτογραμμής (σχηματισμός tombolo, προεξοχής, ασθενούς προεξοχής). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε λόγος $L_s/Y_s = 1.5$ για τον σχηματισμό προεξοχής.

Με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν ο

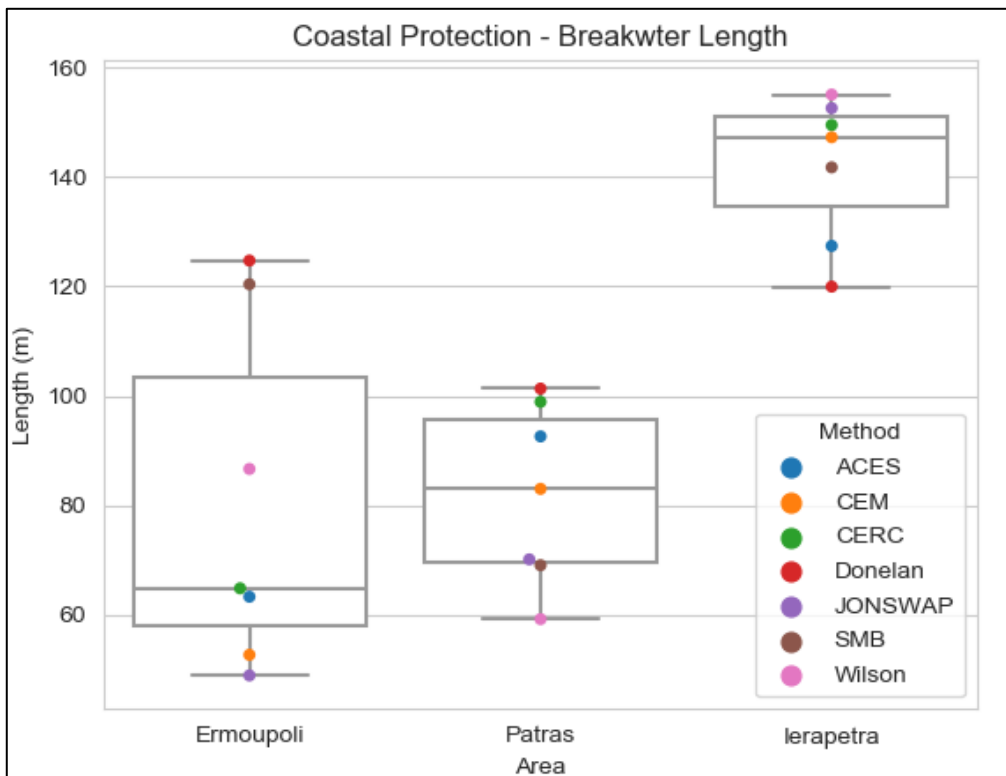
Πίνακας 8.6, και οι Εικόνες Εικόνα 8.32 και Εικόνα 8.33 παρακάτω.

Πίνακας 8.6 Τα αποτελέσματα της ακτομηχανικής μελέτης για την προστασία της ακτογραμμής, για κάθε περιοχή μελέτης και εμπειρική μέθοδο.

Περιοχή	Μέθοδος	$D_b(m)$	$T_{peak}(s)$	$L_b(m)$	$L_s(m)$	$Y_0(m)$
Ερμούπολη	ACES	3.50	5.81	31.67	63.3	42.2
	CEM	2.00	6.17	26.36	52.7	35.2
	CERC	3.52	5.92	32.43	64.9	43.2
	Donelan	7.55	7.89	62.35	124.7	83.1
	JONSWAP	2.00	5.76	24.48	49.0	32.6
	SMB	6.91	7.90	60.19	120.4	80.3
	Wilson	4.38	7.03	43.33	86.7	57.8
Πάτρα	ACES	3.95	7.78	46.30	92.6	61.7
	CEM	4.06	6.97	41.51	83.0	55.3
	CERC	3.88	8.33	49.46	98.9	65.9
	Donelan	4.72	7.85	50.66	101.3	67.5
	JONSWAP	2.72	7.05	35.08	70.2	46.8
	SMB	2.58	7.11	34.54	69.1	46.1
	Wilson	2.39	6.37	29.62	59.2	39.5
Ιεράπετρα	ACES	3.22	11.52	63.69	127.4	84.9
	CEM	3.17	13.36	73.61	147.2	98.2
	CERC	3.14	13.62	74.73	149.5	99.6
	Donelan	3.02	11.20	59.98	120.0	80.0
	JONSWAP	3.18	13.81	76.27	152.5	101.7
	SMB	3.30	12.63	70.86	141.7	94.5
	Wilson	2.91	14.64	77.51	155.0	103.3



Εικόνα 8.32 Γράφημα κατανομής της απόστασης του κυματοθραύστη από την ακτή ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.



Εικόνα 8.33 Γράφημα κατανομής του μήκους του κυματοθραύστη ανά περιοχή μελέτης και μαθηματική μέθοδο υπολογισμού.

Τελικά όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα, οι διαφορές στο μήκος και την απόσταση μεταξύ των διαφόρων μεθόδων είναι μεγαλύτερες από αυτές που αναμένονταν. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι οι κλίσεις του πυθμένα είναι αρκετά πιο ήπιες από ότι αρχικά είχε υποτεθεί, και έτσι η ζώνη θραύσης έχει μεγαλύτερο πλάτος. Σαν αποτέλεσμα, ξεκινώντας από μεγάλες διαφορές στο ύψος κύματος (όπως αυτό υπολογίσθηκε με τις μαθηματικές μεθόδους) καταλήγουμε σε εξίσου μεγάλες διαφορές στα στοιχεία των κυματοθραυστών.

8.6.3 Αριθμητική επαλήθευση μέσω MIKE 21/3

Στην παρούσα υποενότητα γίνεται εφαρμογή αριθμητικής προσομοίωσης με τη χρήση του μοντέλου MIKE 21/3 Coupled Models. Στόχος είναι να διερευνηθεί πώς οι διαφορές μεταξύ των ακραίων τιμών των χαρακτηριστικών του κυματοθραύστη επηρεάζουν τη λειτουργία του στην προστασία της ακτογραμμής. Για την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου χρησιμοποιούνται τα στοιχεία του κυματοθραύστη από τις μεθόδους Donelan και JONSWAP στην περιοχή της Ερμούπολης. Ο λόγος που επιλέγονται αυτές οι μέθοδοι και αυτή η περιοχή, είναι γιατί οδήγησαν αντίστοιχα στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές στα στοιχεία του κυματοθραύστη (απόσταση από την ακτογραμμή, μήκος και διάκενο) με τη μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των τριών περιοχών μελέτης και έτσι αναμένεται να αναδειχθούν τυχόν λειτουργικές αστοχίες των ακτομηχανικών έργων που σχεδιάζονται.

Το MIKE 21/3 Coupled Model είναι ένα δυναμικό σύστημα μοντελοποίησης για εφαρμογές σε παράκτιες περιοχές, εκβολές και ποταμούς. Χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο, μπορούμε να προσομοιώσουμε διαφορετικές διεργασίες με αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Στην παρούσα εφαρμογή προσομοιώνονται οι υδροδυναμικές, κυματικές και ακτομηχανικές διεργασίες στην περιοχή μελέτης με όλες τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Λαμβάνοντας τα κυματικά χαρακτηριστικά που εξετάσθηκαν στην ενότητα 8.2 για τις μεθόδους Donelan και JONSWAP προκύπτουν τελικά οι ταχύτητες των ρευμάτων και η κίνηση του ιζήματος κοντά στην ακτή.

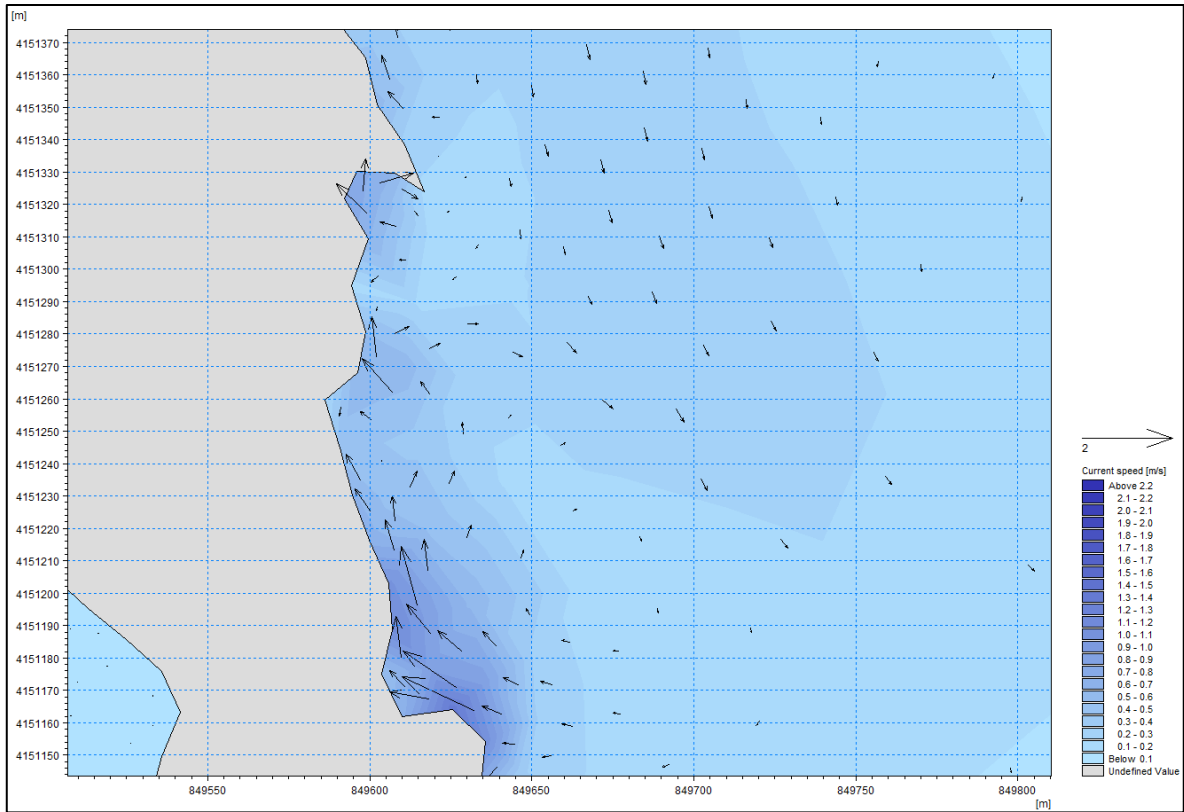
Ακολουθεί η εφαρμογή συνολικά έξι σεναρίων με το μοντέλο MIKE 21/3 Coupled Model χωρισμένα ανά μέθοδο υπολογισμού του κυματισμού (A για Donelan και B για JONSWAP) και σχεδιασμού του κυματοθραύστη (0, 1, 2) σύμφωνα με τα παρακάτω:

- **Σενάρια 0:** τα μηδενικά σενάρια αποτελούν την υφιστάμενη κατάσταση χωρίς καμία παρέμβαση στην ακτογραμμή. Στο Σενάριο 0A εξετάζεται η υφιστάμενη κατάσταση στην ακτή έναντι κυματισμού υπολογισμένου από τη μέθοδο Donelan και στο Σενάριο 0B από τη μέθοδο JONSWAP.
- **Σενάρια 1:** στα Σενάρια 1 ο σχεδιασμός και η χωροθέτηση του κυματοθραύστη γίνεται σύμφωνα με τον κυματισμό από τη μέθοδο Donelan. Στο Σενάριο 1A εξετάζεται η λειτουργία του έναντι κυματισμού υπολογισμένου από τη μέθοδο Donelan και στο Σενάριο 1B από τη μέθοδο JONSWAP.
- **Σενάρια 2:** στα Σενάρια 2 ο σχεδιασμός και η χωροθέτηση του κυματοθραύστη γίνεται σύμφωνα με τον κυματισμό από τη μέθοδο JONSWAP. Στο Σενάριο 2A εξετάζεται η λειτουργία του έναντι κυματισμού υπολογισμένου από τη μέθοδο Donelan και στο Σενάριο 2B από τη μέθοδο JONSWAP.

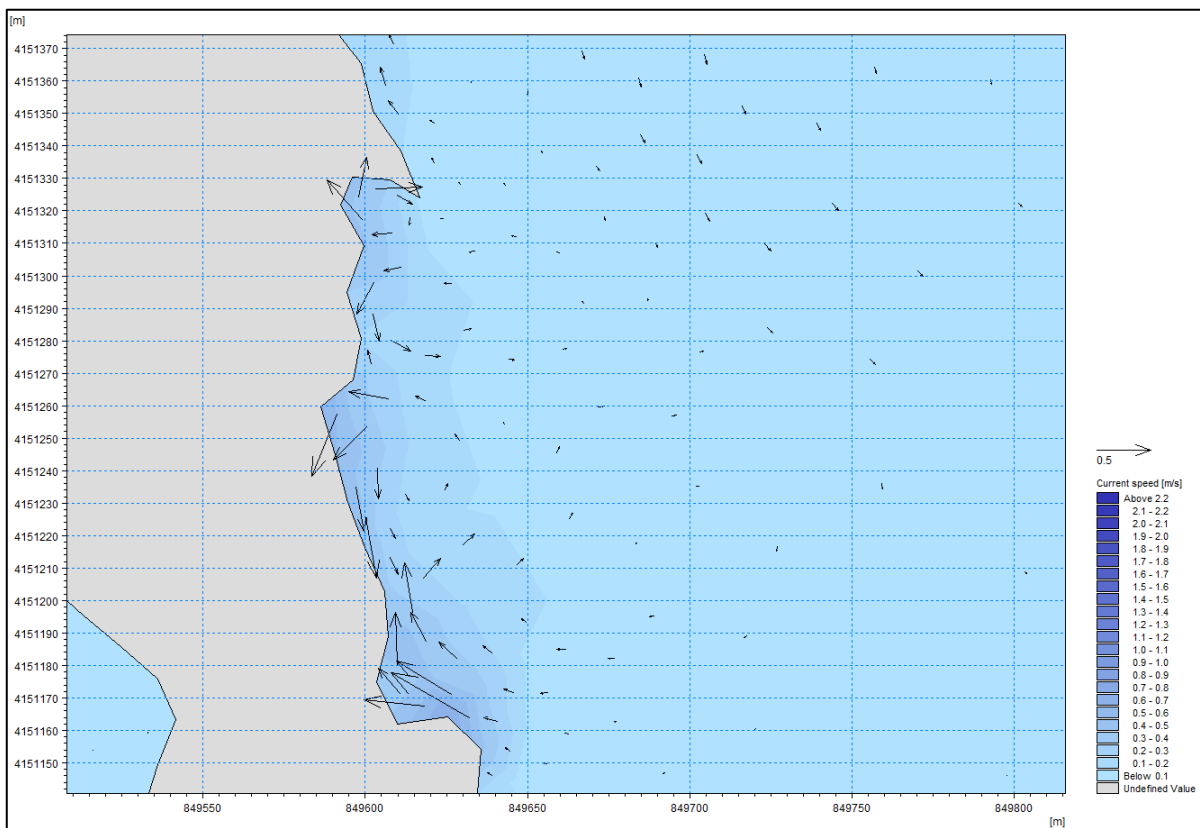
Πίνακας 8.7 Τα εξεταζόμενα σενάρια ομαδοποιημένα ανά είδος παρέμβασης και μέθοδο υπολογισμού του κυματισμού στα βαθιά

	Σενάρια μη-παρέμβασης	Σενάρια 1: Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις Donelan	Σενάρια 2: Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις JONSWAP
A: Προσπίπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις Donelan	Σενάριο 0A	Σενάριο 1A	Σενάριο 2A
B: Προσπίπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις JONSWAP	Σενάριο 0B	Σενάριο 1B	Σενάριο 2B

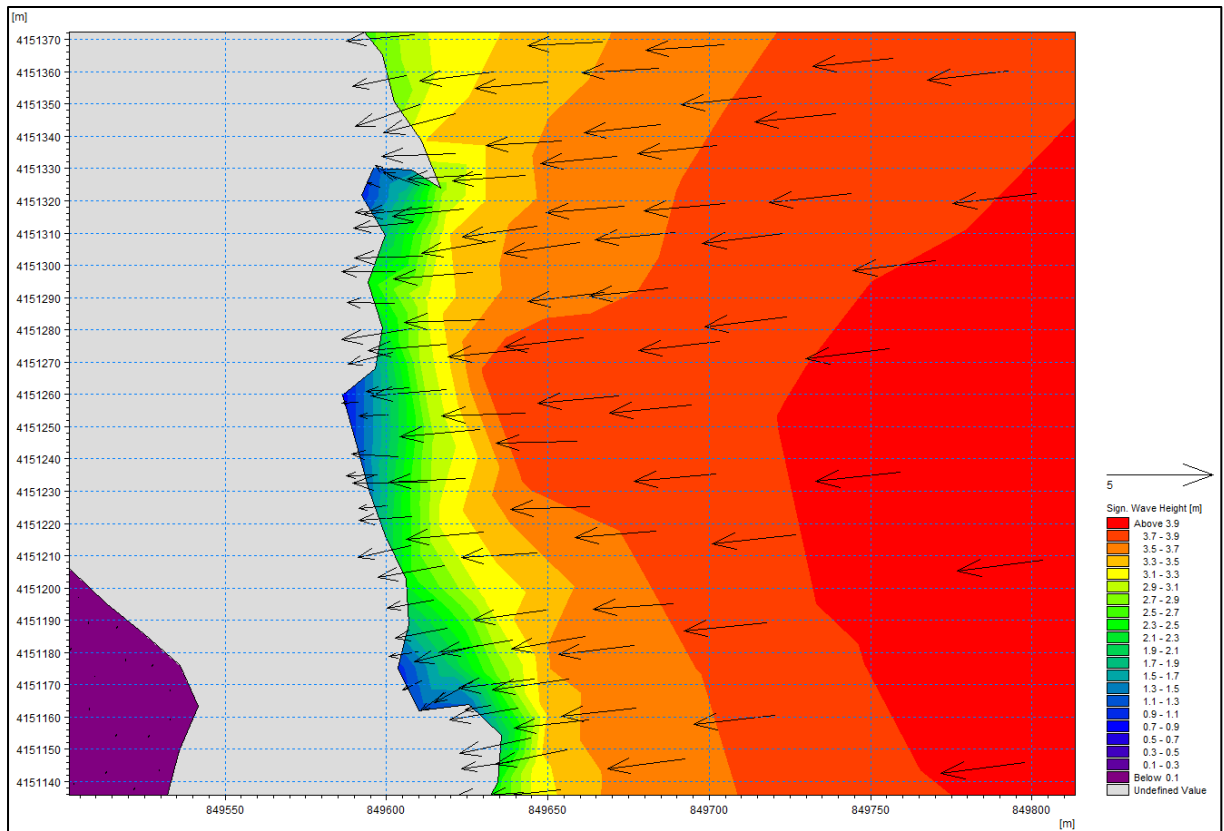
Για τον πιο ολοκληρωμένο έλεγχο των προσομοιώσεων, αρχικά εξετάζονται τα λεγόμενα “μηδενικά σενάρια”, δηλαδή οι περιπτώσεις όπου δεν γίνεται κάποια παρέμβαση και οι οποίες αποτελούν την υφιστάμενη κατάσταση. Αυτά είναι αναγκαία, ώστε να διαπιστωθεί το μέγεθος της διάβρωσης ή απόθεσης που προκύπτει από τις δύο μεθόδους, και να εξετασθεί αν τελικά πράγματι απαιτείται κάποια παρέμβαση στην ακτογραμμή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική προσομοίωση (βλ. Εικόνα 8.34 - Εικόνα 8.39), πράγματι και με τις δύο μεθόδους προκύπτει πρόβλημα διάβρωσης στην υπό μελέτη ακτή, με πιο ισχυρές τάσεις για διάβρωση από τη μέθοδο Donelan, λόγω του μεγάλου ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού.



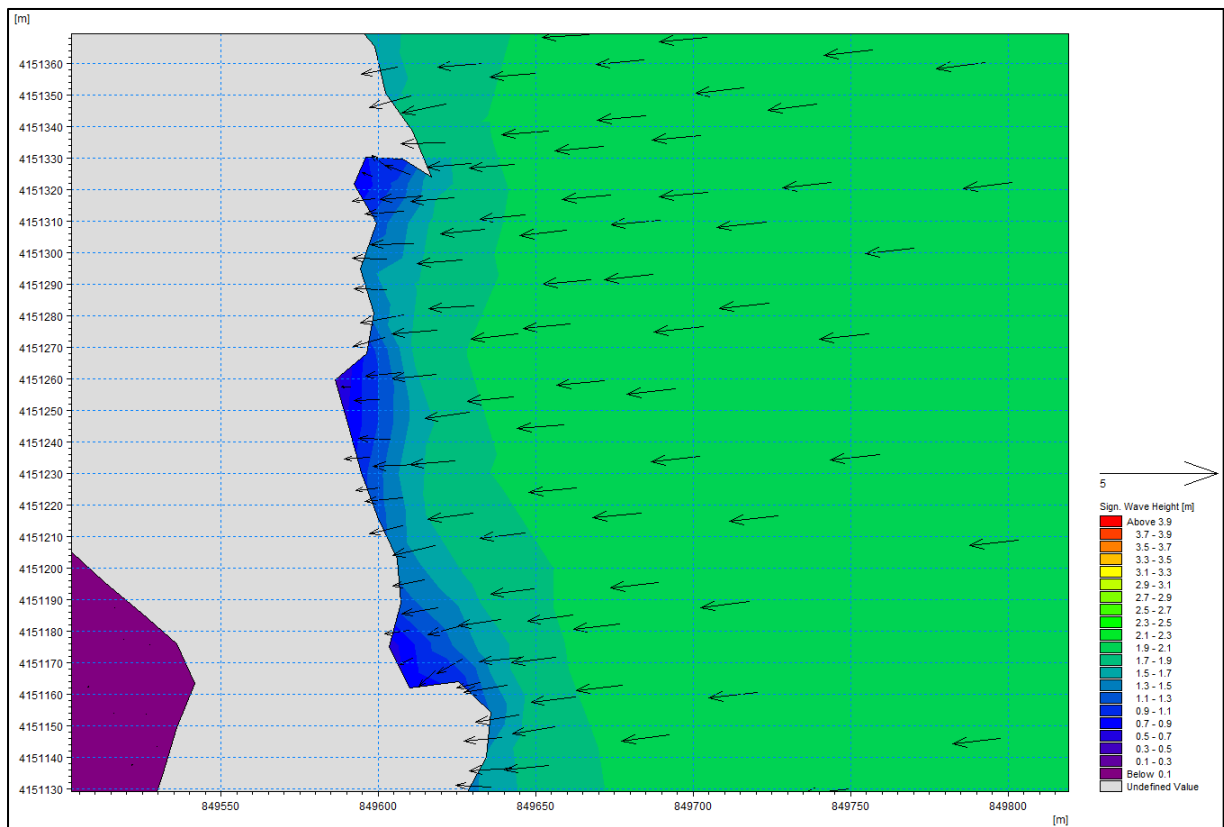
Εικόνα 8.34 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 0Α.



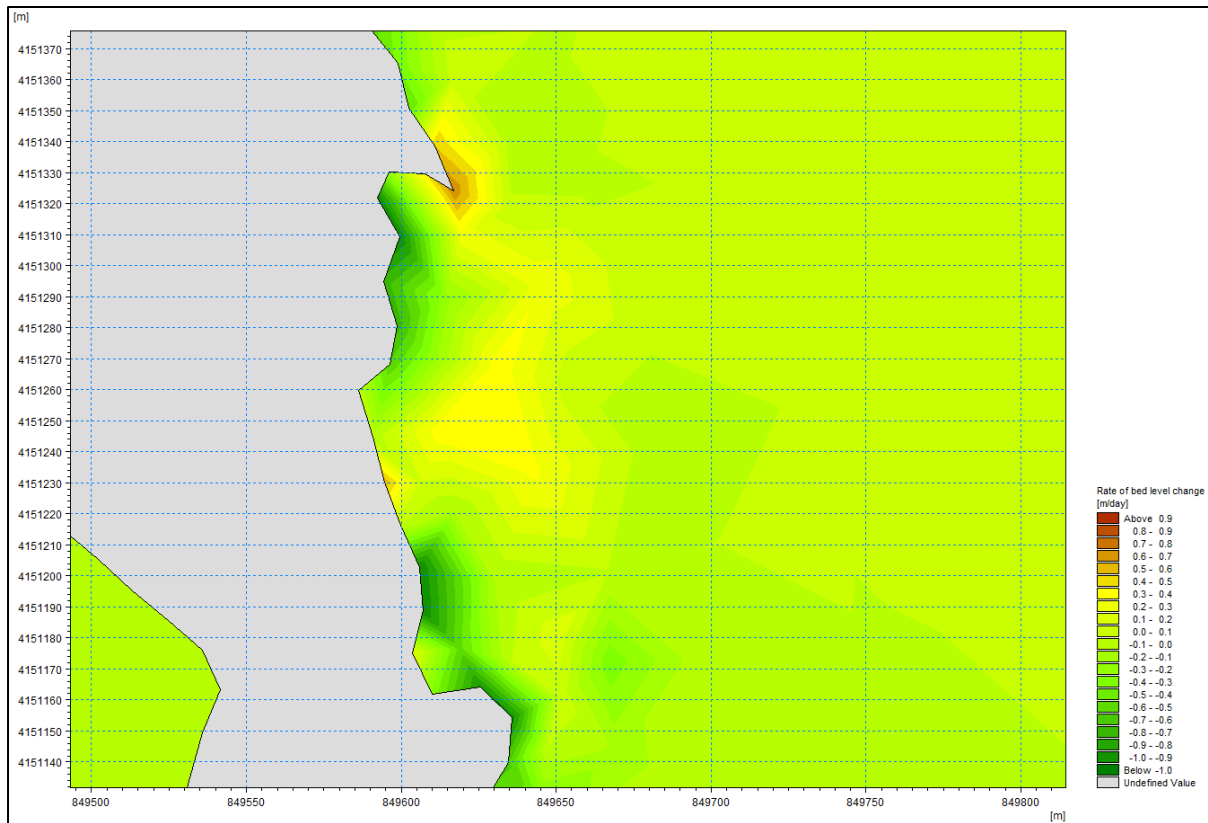
Εικόνα 8.35 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 0Β.



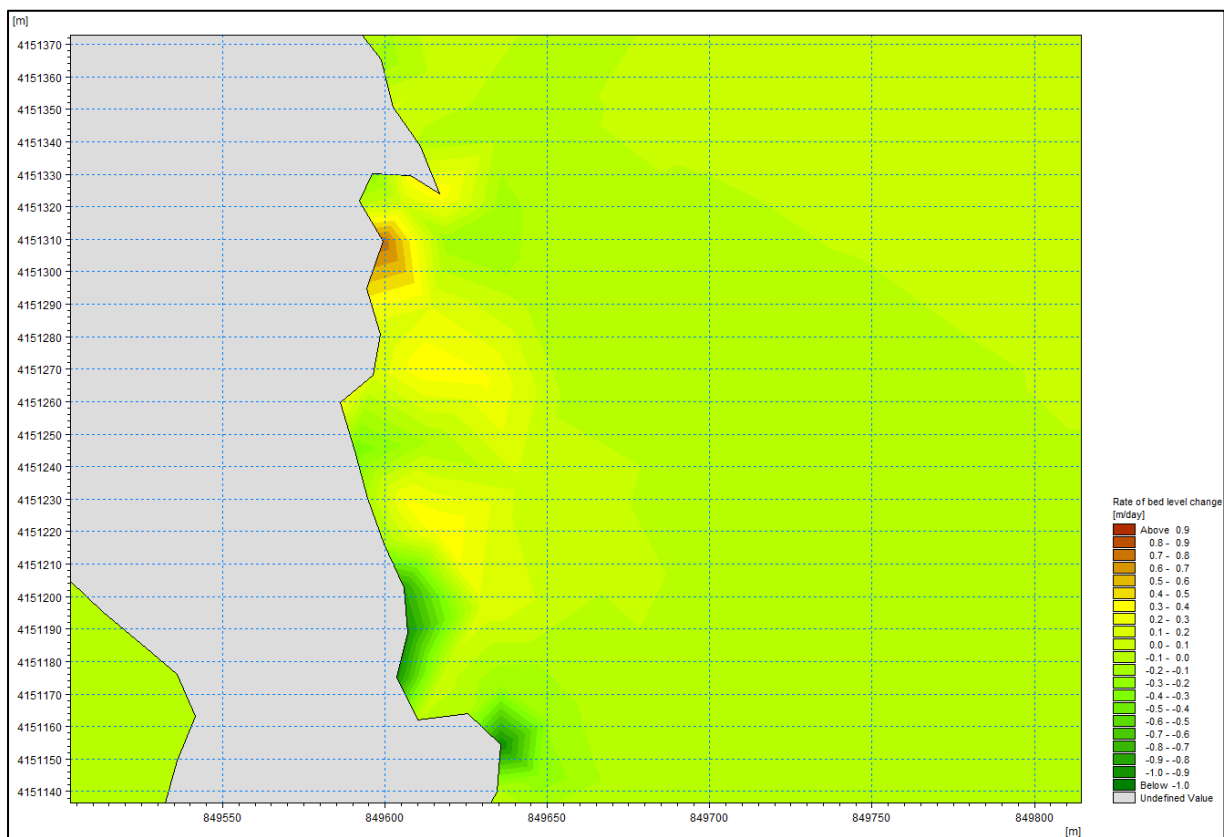
Εικόνα 8.36 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 0Α.



Εικόνα 8.37 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 0Β.



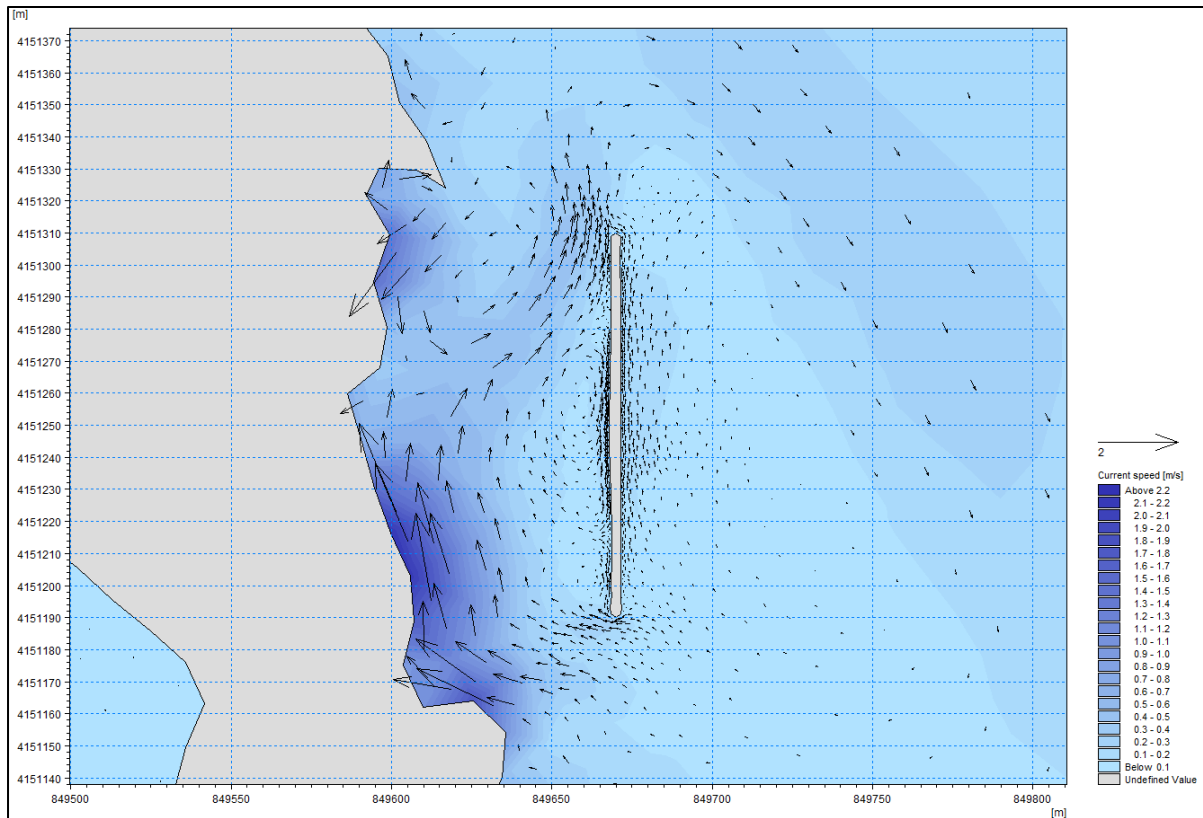
Εικόνα 8.38 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 0Α.



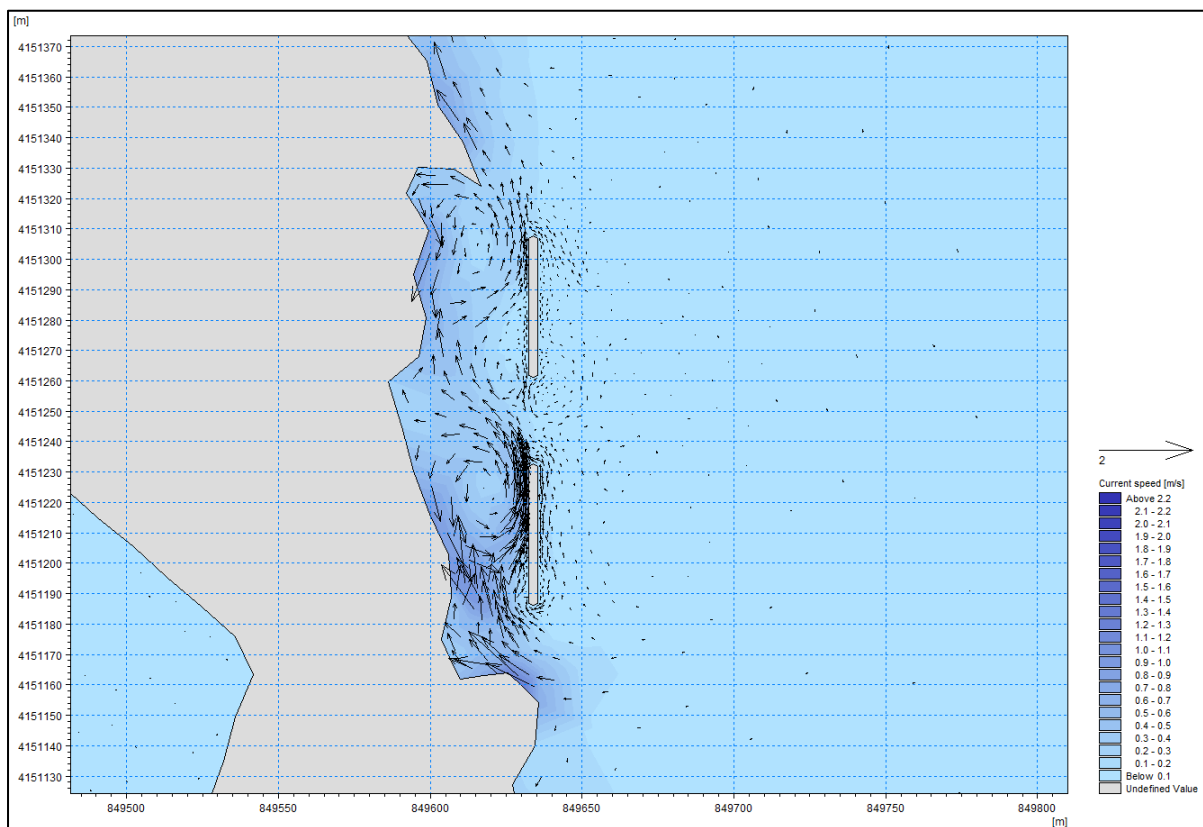
Εικόνα 8.39 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 0Β.

Έχοντας επιβεβαιώσει την εικόνα διάβρωσης στην ακτή μελέτης, το επόμενο βήμα είναι η κατασκευή κυματοθραυστών για τη συγκράτηση ιζήματος και τη δημιουργία αποθέσεων. Κάνοντας χρήση του

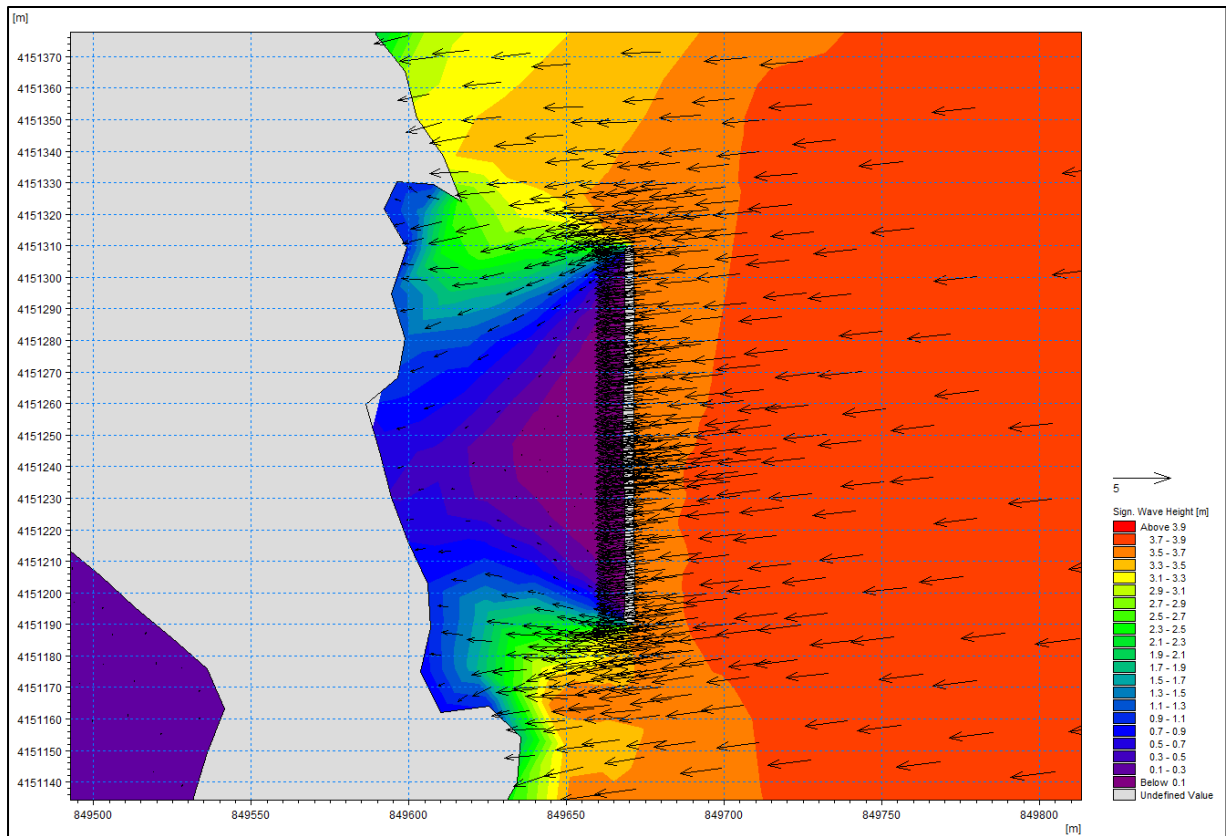
Πίνακας 8.6, για την περίπτωση του κυματισμού από Donelan τοποθετείται κυματοθραύστης μήκους 125 m σε απόσταση 90 m από την ακτογραμμή, και για την περίπτωση του κυματισμού από JONSWAP τοποθετούνται δύο κυματοθραύστες μήκους 50 m έκαστος, με διάκενο 25 m σε απόσταση 35 m από την ακτογραμμή. Έπειτα, εκτελείται ξανά η προσομοίωση και ελέγχεται η ορθή λειτουργία των κυματοθραυστών για τους αντίστοιχους κυματισμούς που σχεδιάστηκαν. Όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες (βλ. Εικόνα 8.40 - Εικόνα 8.45), οι κυματοθραύστες όπως έχουν σχεδιαστεί και χωροθετηθεί για τους αντίστοιχούς τους κυματισμούς, προσφέρουν προστασία στην σκιά τους και αντιστρέφουν τις τάσεις για διάβρωση στην ακτή.



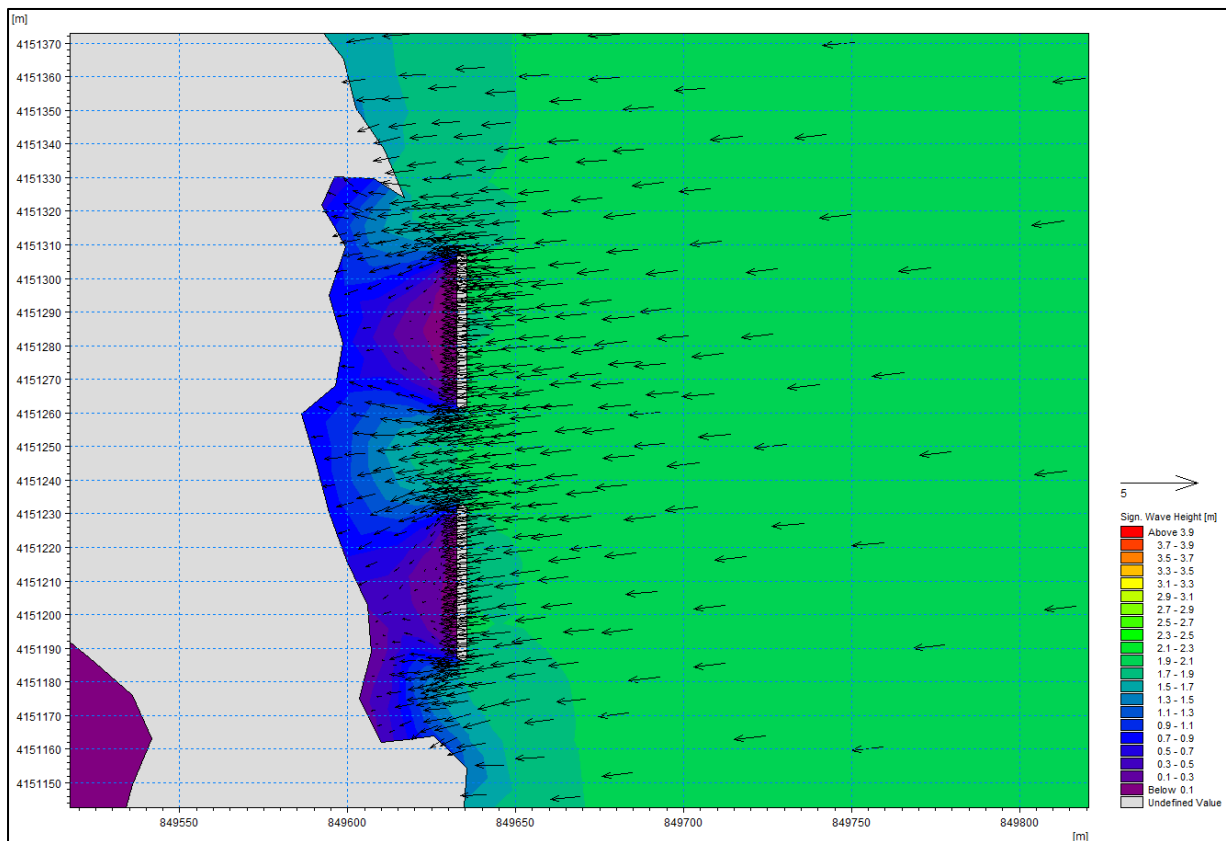
Εικόνα 8.40 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 1Α.



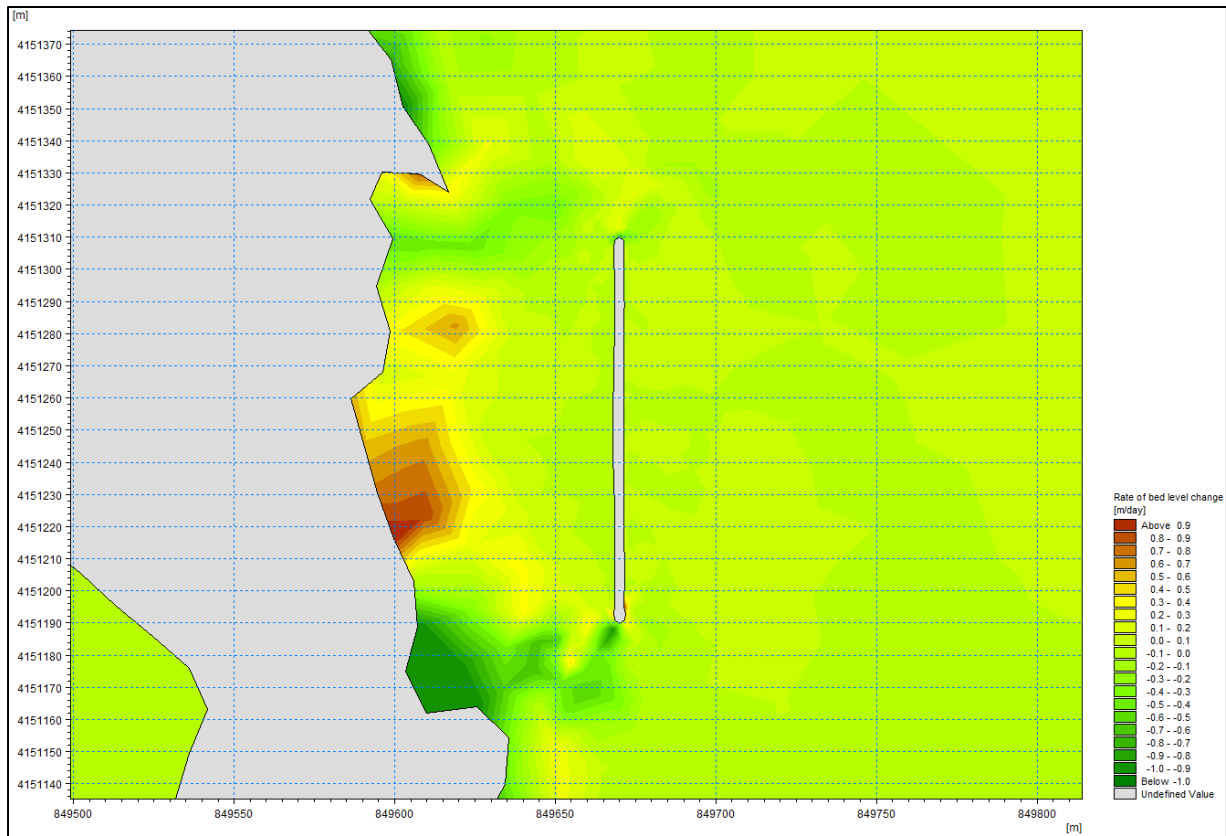
Εικόνα 8.41 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 2Β.



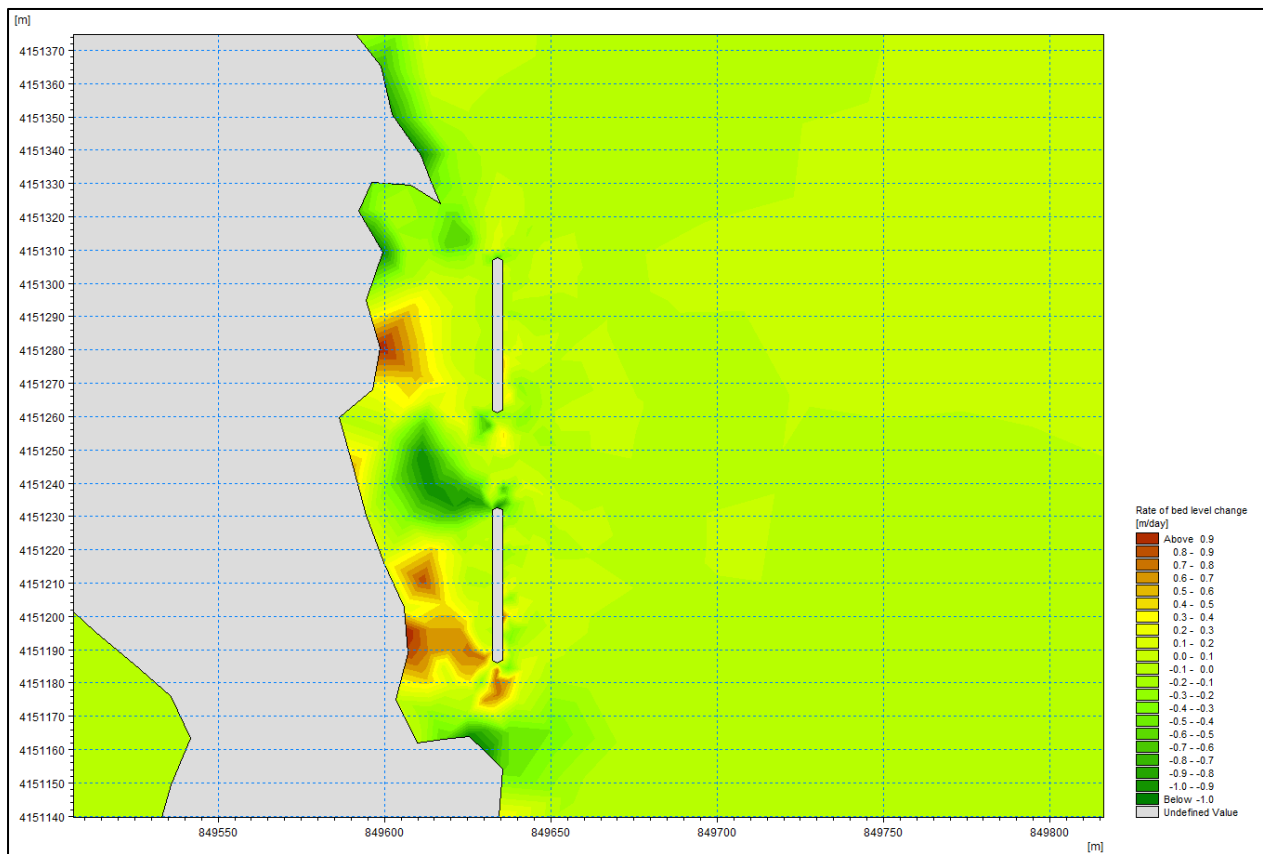
Εικόνα 8.42 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 1Α.



Εικόνα 8.43 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 2Β.

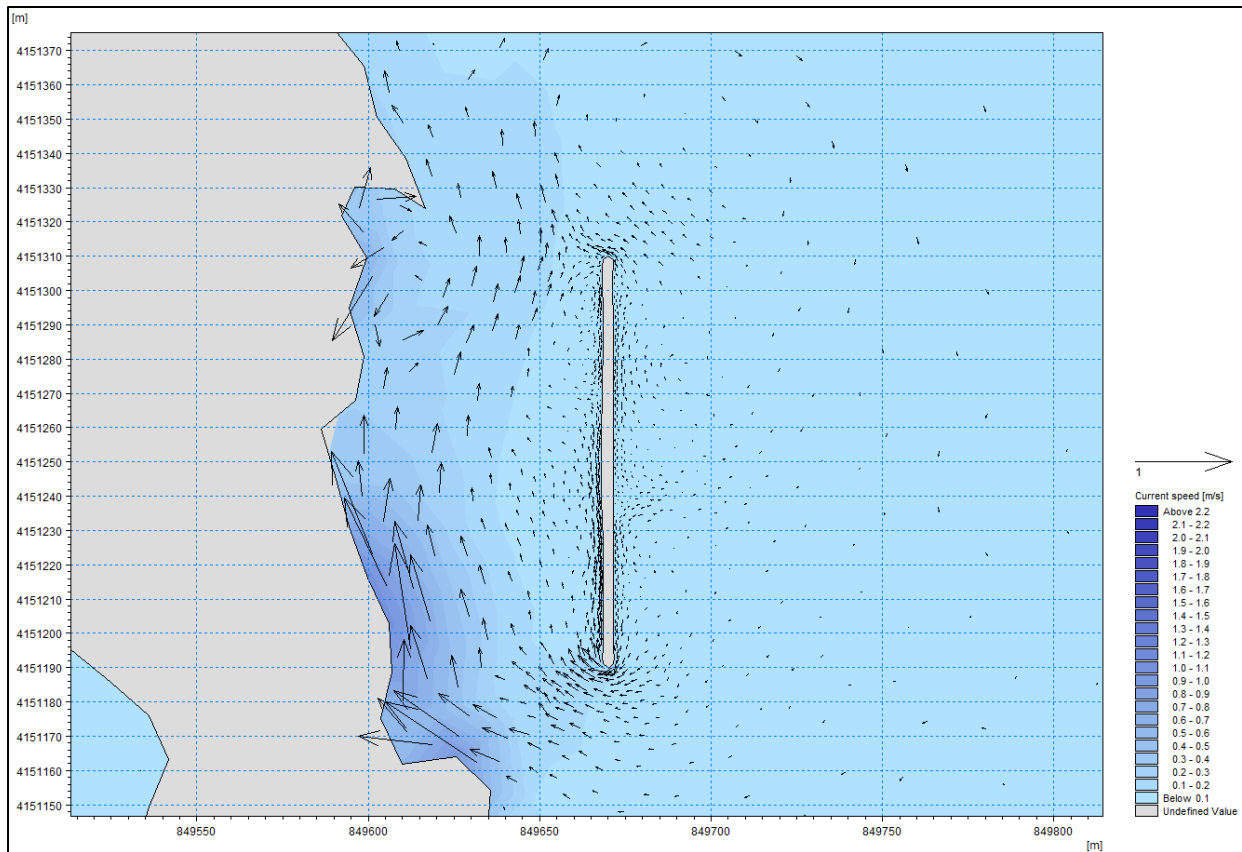


Εικόνα 8.44 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 1Α.

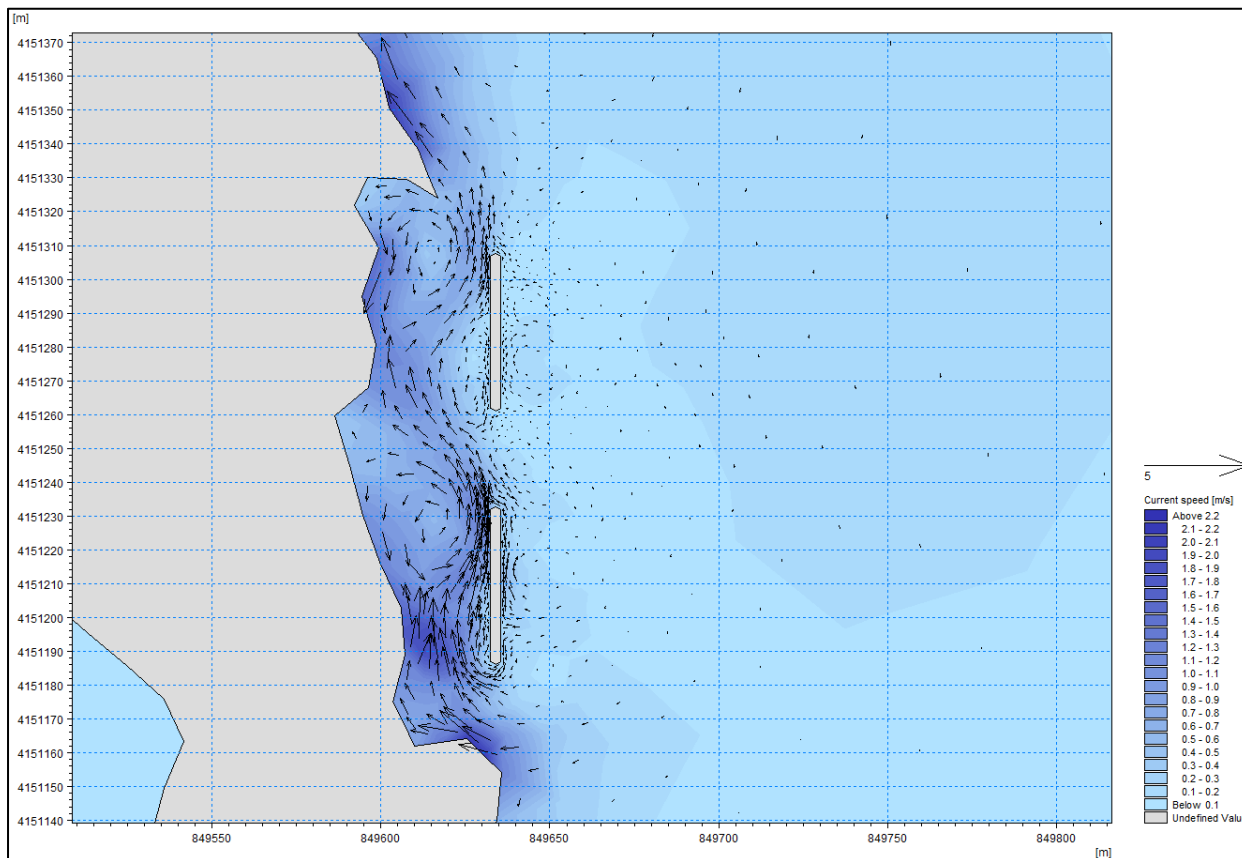


Εικόνα 8.45 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 2Β.

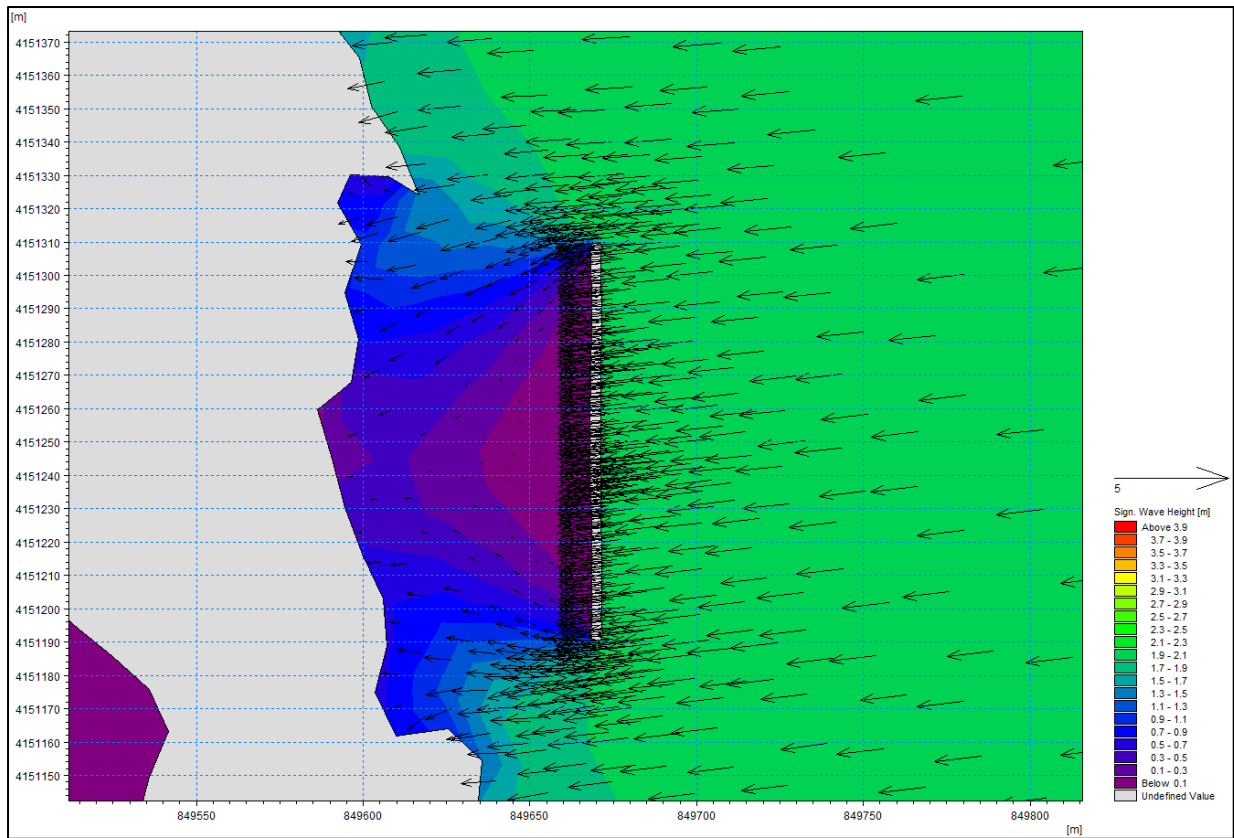
Τέλος, επειδή ένας από τους βασικούς στόχους της εργασίας είναι να αναδειχθούν οι διαφορές που προκύπτουν από τις διάφορες μαθηματικές μεθόδους υπολογισμού κυματικού κλίματος, γίνεται αντιστροφή των κυματισμών στους κυματοθραύστες. Έτσι, ο κυματοθραύστης που σχεδιάστηκε με τη μέθοδο Donelan ελέγχεται έναντι κυματισμού JONSWAP και αντίστροφα. Ο λόγος που γίνονται αυτά τα σενάρια είναι για να γίνει αντιληπτό το γεγονός ότι οι διάφορες μέθοδοι υπολογισμού κυματικού κλίματος οδηγούν τελικά σε αποκλίσεις στα χαρακτηριστικά των έργων, επομένως πρέπει να εξασφαλιστεί ότι επιλέγεται η κατάλληλη μαθηματική μέθοδος για τις ανάγκες της εκάστοτε μελέτης. Πράγματι, από τις εικόνες που ακολουθούν (βλ. Εικόνα 8.46 - Εικόνα 8.51) φαίνεται πως στην αντιστροφή των κυματικών σεναρίων οι κυματοθραύστες δεν εκτελούν τη λειτουργία για την οποία είχαν σχεδιαστεί καθώς στο μεν Σενάριο 1B ο κυματοθραύστης βρίσκεται πολύ μακριά από την ακτή για να προκαλέσει ικανοποιητικές αποθέσεις ιζήματος, ενώ στο Σενάριο 2A οι αποθέσεις που δημιουργούνται είναι πολύ μεγαλύτερες του επιθυμητού με πιθανότητα δημιουργίας tombolo.



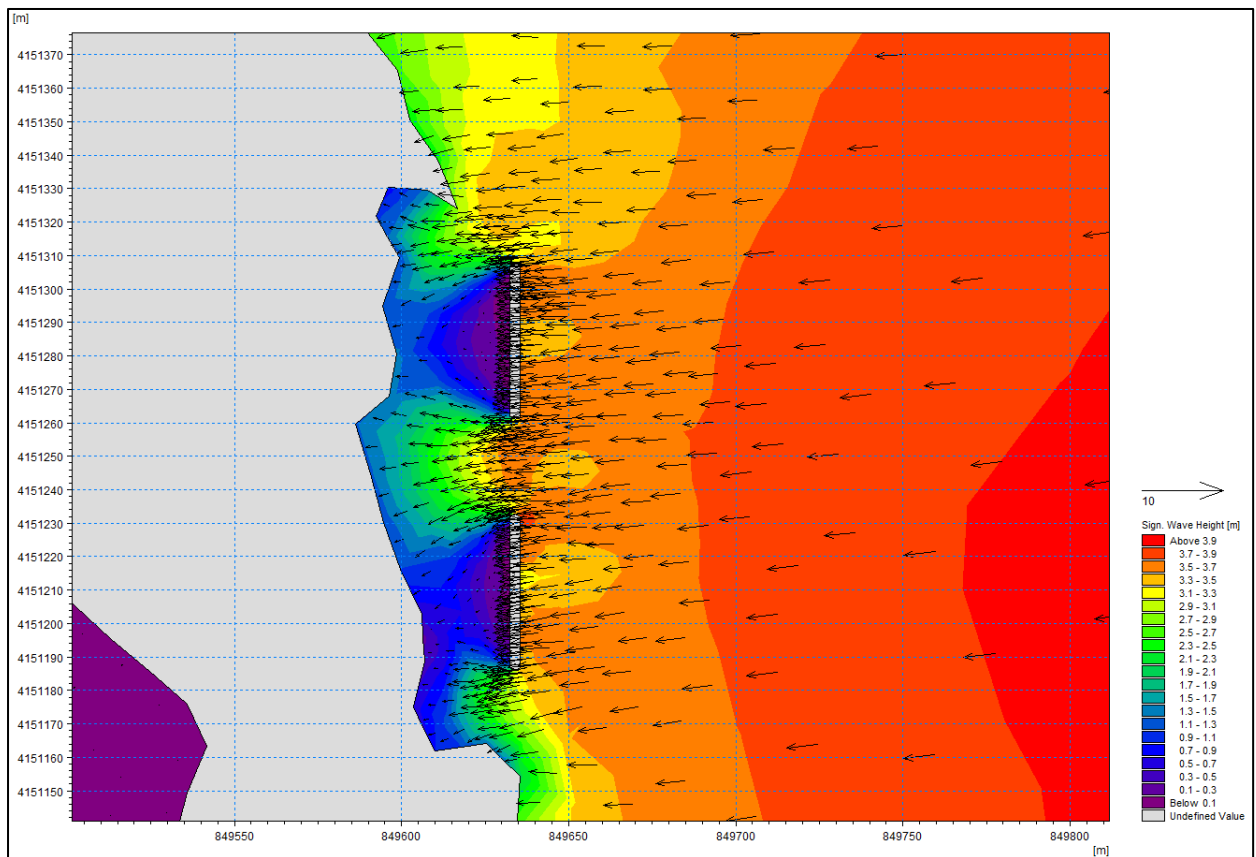
Εικόνα 8.46 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 1B.



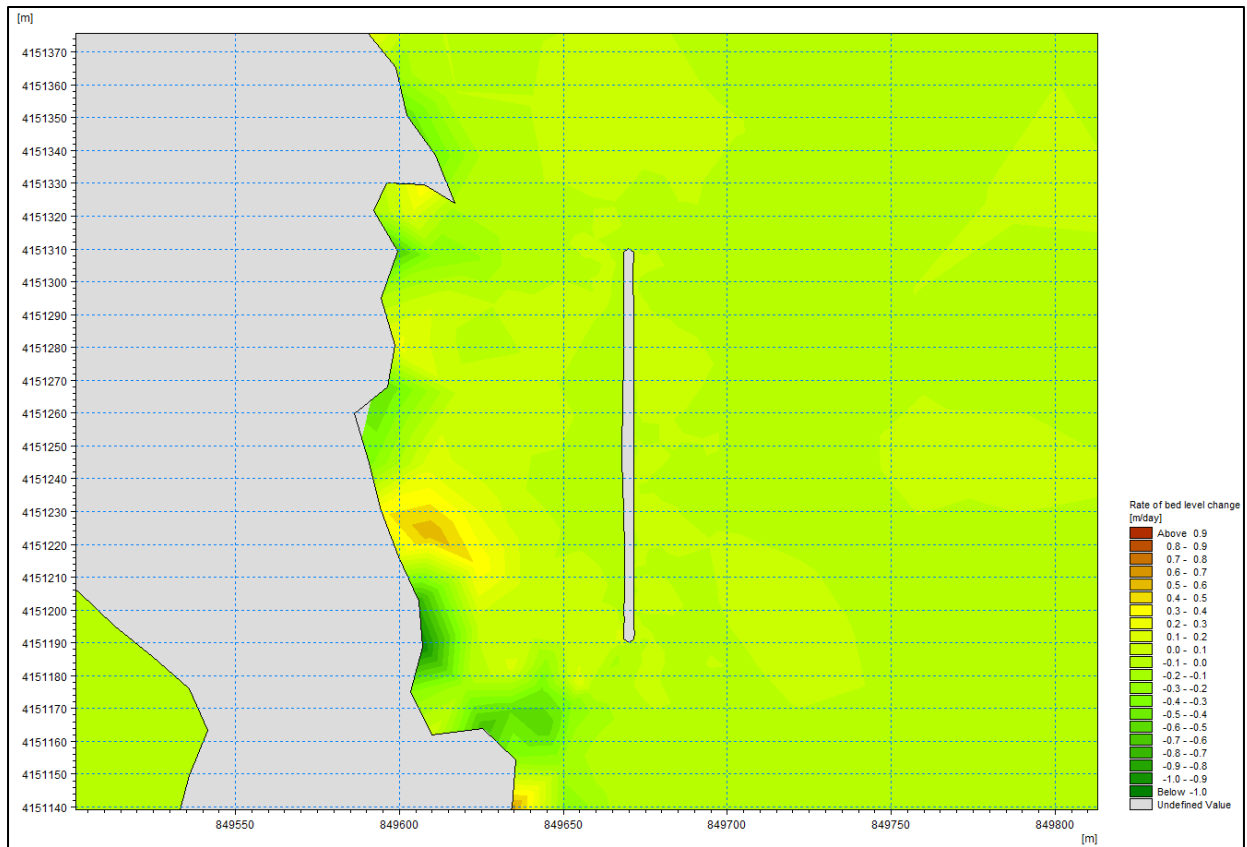
Εικόνα 8.47 Ταχύτητες ρευμάτων στην ακτή μελέτης για το Σενάριο 2A.



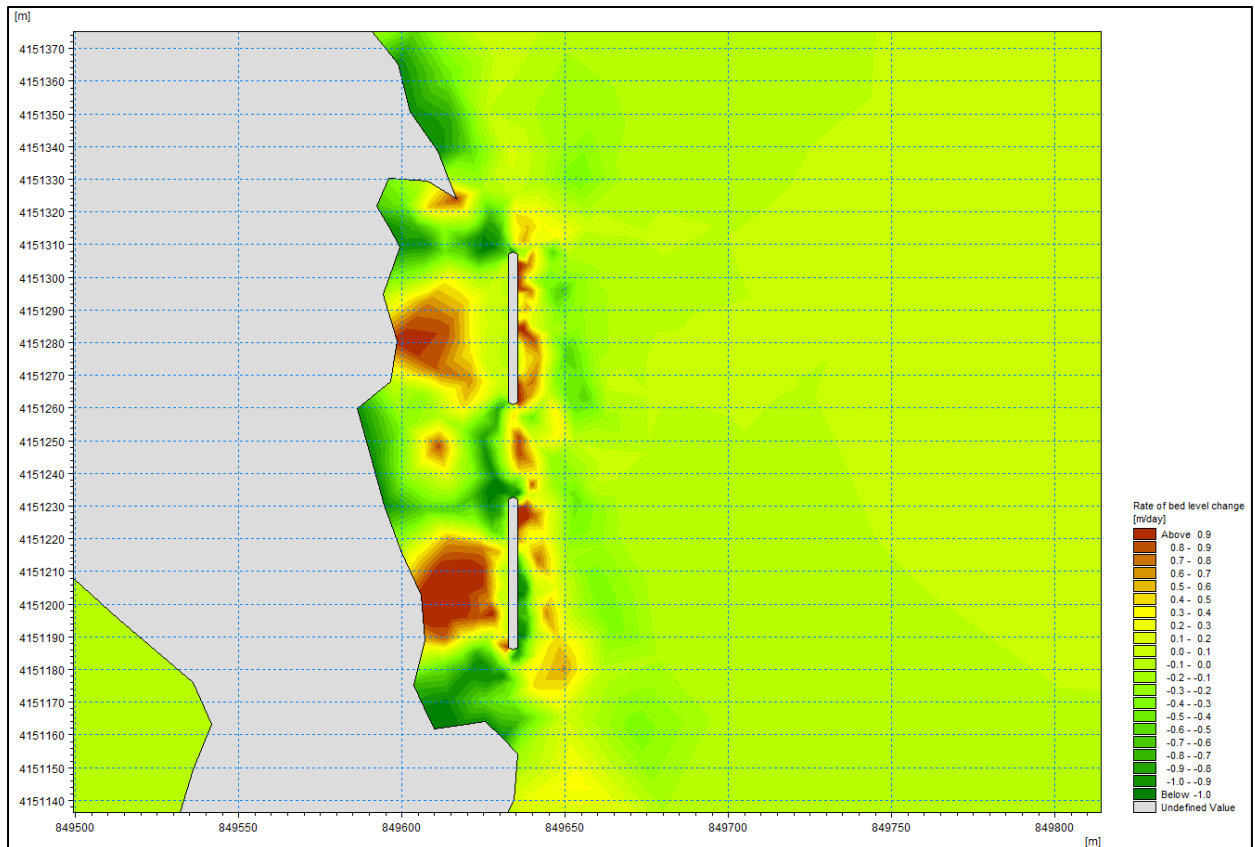
Εικόνα 8.48 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 1B.



Εικόνα 8.49 Χαρακτηριστικό ύψος κύματος για το Σενάριο 2A.



Εικόνα 8.50 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 1B.



Εικόνα 8.51 Ρυθμός μεταβολής πυθμένα για το Σενάριο 2A.

Οι παρακάτω πίνακες συνοψίζουν τα αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις από την εφαρμογή των παραπάνω αριθμητικών προσομοιώσεων.

Πίνακας 8.8 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων υδροδυναμικού πεδίου

	Εναλλακτική DN Υφιστάμενη Κατάσταση Σενάριο “Do Nothing”	Εναλλακτική 1 Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις Donelan	Εναλλακτική W2 Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις JONSWAP
Προσπίπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις Donelan	Σενάριο 0A (βλ. Εικόνα 8.34): Κοντά στην ακτογραμμή εμφανίζονται ρεύματα με ταχύτητες έως και $U = 1.1 \text{ m/s}$ με κατεύθυνση από N προς B	Σενάριο 1A (βλ. Εικόνα 8.40): Στη σκιά του κυματοθραύστη εμφανίζονται ρεύματα με ταχύτητες έως και $U = 2.18 \text{ m/s}$ με κατεύθυνση από NNA προς BBD	Σενάριο 2A (βλ. Εικόνα 8.47): Στη σκιά των κυματοθραυστών εμφανίζονται ρεύματα με ταχύτητες έως και $U = 1.1 \text{ m/s}$ με κατεύθυνση από NNA προς BBD
Προσπίπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις JONSWAP	Σενάριο 0B (βλ. Εικόνα 8.35): Κοντά στην ακτογραμμή εμφανίζονται ρεύματα με ταχύτητες έως και $U = 0.61 \text{ m/s}$ με κατεύθυνση από BA προς NΔ	Σενάριο 1B (βλ. Εικόνα 8.46): Στη σκιά του κυματοθραύστη εμφανίζονται ρεύματα με ταχύτητες έως και $U = 1.0 \text{ m/s}$ με κατεύθυνση NNA από προς BBD	Σενάριο 2B (βλ. Εικόνα 8.41): Στη σκιά των κυματοθραυστών εμφανίζονται ρεύματα με ταχύτητες έως και $U = 1.0 \text{ m/s}$ με κατεύθυνση από N προς B

Πίνακας 8.9 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων προσιπτοντος κυματισμού

	Εναλλακτική DN Υφιστάμενη Κατάσταση Σενάριο “Do Nothing”	Εναλλακτική 1 Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις Donelan	Εναλλακτική 2 Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις JONSWAP
Προσιπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις Donelan	Σενάριο 0A (βλ. Εικόνα 8.36): Κοντά στην ακτογραμμή εμφανίζονται ύψη κύματος έως και $H_s = 3.06$ m	Σενάριο 1A (βλ. Εικόνα 8.42): Στη σκιά του κυματοθραύστη εμφανίζονται ύψη κύματος έως και $H_s = 0.49$ m	Σενάριο 2A (βλ. Εικόνα 8.49): Στη σκιά των κυματοθραυστών εμφανίζονται ύψη κύματος έως και $H_s = 0.91$ m
Προσιπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις JONSWAP	Σενάριο 0B (βλ. Εικόνα 8.37): Κοντά στην ακτογραμμή εμφανίζονται ύψη κύματος έως και $H_s = 1.80$ m	Σενάριο 1B (βλ. Εικόνα 8.48): Στη σκιά του κυματοθραύστη εμφανίζονται ύψη κύματος έως και $H_s = 0.36$ m	Σενάριο 2B (βλ. Εικόνα 8.43): Στη σκιά των κυματοθραυστών εμφανίζονται ύψη κύματος έως και $H_s = 0.61$ m

Πίνακας 8.10 Συγκριτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων ρυθμού μεταβολής πυθμένα.

	Εναλλακτική DN Υφιστάμενη Κατάσταση Σενάριο “Do Nothing”	Εναλλακτική 1 Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις Donelan	Εναλλακτική 2 Κατασκευή κυματοθραύστη με βάση τις εξισώσεις JONSWAP
Προσπίπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις Donelan	Σενάριο 0A (βλ. Εικόνα 8.38): Λόγω του μεγάλου ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού δημιουργούνται ισχυρές τάσεις διάβρωσης στην υπό μελέτη ακτή.	Σενάριο 1A (βλ. Εικόνα 8.44): Ο κυματοθραύστης όπως έχει διαστασιολογηθεί και χωροθετηθεί είναι αποδοτικός καθώς αναστρέφει τις τάσεις διάβρωσης και δημιουργεί τάσεις απόθεσης στη σκιά του προστατεύοντας την υπό μελέτη ακτή.	Σενάριο 2A (βλ. Εικόνα 8.51): Οι κυματοθραύστες όπως έχουν διαστασιολογηθεί και χωροθετηθεί δεν κρίνονται αποδοτικοί καθώς δημιουργούν πολύ ισχυρές τάσεις απόθεσης στη σκιά τους, πέραν του επιθυμητού και πιθανώς να οδηγήσουν στη δημιουργία tombolo.
Προσπίπτων κυματισμός με βάση τις εξισώσεις JONSWAP	Σενάριο 0B (βλ. Εικόνα 8.39): Λόγω του μικρού ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού δημιουργούνται μικρότερες τάσεις διάβρωσης στην υπό μελέτη ακτή.	Σενάριο 1B (βλ. Εικόνα 8.50): Ο κυματοθραύστης όπως έχει διαστασιολογηθεί και χωροθετηθεί δεν είναι αποδοτικός καθώς δεν φαίνεται να δημιουργεί ισχυρές τάσεις απόθεσης στη σκιά του σε σύγκριση μάλιστα με το σενάριο 1A.	Σενάριο 2B (βλ. Εικόνα 8.45): Οι κυματοθραύστες όπως έχουν διαστασιολογηθεί και χωροθετηθεί είναι αποδοτικοί καθώς δημιουργούν τάσεις απόθεσης στη σκιά τους προστατεύοντας την υπό μελέτη ακτή.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 Συνοπτικά Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να αναδειχθούν οι διαφορές που προκύπτουν από τις μαθηματικές εξισώσεις υπολογισμού κυματικού του κλίματος στα ανοιχτά (βαθιά νερά) και η επίδραση που έχουν στον σχεδιασμό λιμενικών και ακτομηχανικών έργων τόσο σε επίπεδο ευστάθειας και κόστους, όσο και σε επίπεδο λειτουργίας. Η έλλειψη προδιαγραφών τόσο στην Ελληνική όσο και στη διεθνή βιβλιογραφία για τον καθορισμό του κυματικού κλίματος με συγκεκριμένες εξισώσεις καθιστά την παρούσα εργασία καινοτόμο για τον ορθό σχεδιασμό λιμενικών και ακτομηχανικών έργων.

Σε προηγούμενη εργασία του Α. Σταματιάδη αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα μαθηματικών εξισώσεων υπολογισμού κυματικών χαρακτηριστικών σε σχέση με αριθμητικές προσομοιώσεις. Εκεί προέκυψε πως δεν υπάρχει αποκλειστικά μία εξίσωση που να δίνει αποδεκτά αποτελέσματα για οποιαδήποτε ακτή, αντίθετα για κάθε διάφορες κατηγορίες γεωμορφολογίας των στερεών ορίων που περιβάλλουν την ακτή, είδος δηλαδή για κάθε μορφή αναπτύγματος πελάγους (Narrow Fetch, Restricted Fetch, Open Sea) αντιστοιχεί διαφορετική εξίσωση που προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων. Για το λόγο αυτό προτάθηκε να χρησιμοποιείται η πλέον κατάλληλη μαθηματική εξίσωση, ανάλογα με τη μορφή του αναπτύγματος πελάγους στην περιοχή που εξετάζεται. Έτσι, για τον υπολογισμό του κυματικού κλίματος στα ανοιχτά, ως πιο κατάλληλη μέθοδος προτάθηκε για πεδίο Narrow Fetch (περιοχή Πάτρας) η μέθοδος CERC, για Restricted Fetch (περιοχή Ερμούπολης) η μέθοδος Donelan και για Open Sea (περιοχή Ιεράπετρας) η μέθοδος CEM. Παράλληλα, ως πιο συντηρητικές εξισώσεις (που δίνουν τα δυσμενέστερα αποτελέσματα) προκρίθηκαν σε κατάταξη για το πεδίο Narrow Fetch οι μέθοδοι CERC και ACES, για Restricted Fetch οι μέθοδοι Donelan και SMB και για Open Sea οι μέθοδοι CEM και JONSWAP (Σταματιάδης, 2019).

Στην παρούσα εργασία που αποτελεί συνέχεια της προηγούμενης έρευνας, όσον αφορά την ευστάθεια των λιμενικών έργων, τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώνονται αφού σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και με πολύ μικρές αποκλίσεις, οι ίδιες εξισώσεις από τις οποίες προκύπτει το πλέον συντηρητικό κυματικό κλίμα στα βαθιά, οδηγούν στο σχεδιασμό έργων με μεγαλύτερες διαστάσεις των απαιτούμενων ογκόλιθων θωράκισης. Πρέπει ωστόσο να τονισθεί πως κάθε περίπτωση που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία είναι ξεχωριστή και επομένως καθεμία απαιτεί δική της μεθοδολογία και προσέγγιση για τον υπολογισμό του κύματος σχεδιασμού. Η χρήση των εξισώσεων από τις οποίες προκύπτει το πιο συντηρητικό ύψος κύματος μπορεί να οδηγήσει σε σχεδιασμό υπέρ της ασφαλείας, δεν είναι ωστόσο πρακτική καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υπερδιαστασιολόγηση με μεγαλύτερο οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος. Η χρήση των μαθηματικών εξισώσεων είναι μια καλή εναλλακτική σε περίπτωση έλλειψης κυματικών δεδομένων στην περιοχή μελέτης που πρέπει να γίνεται μέσα σε ένα ευρύ πλαίσιο οδηγιών και κανόνων εφαρμογής τους.

Όσον αφορά το κόστος των λιμενικών έργων, αυτό φαίνεται να κινείται κατ' αναλογία με το μέγεθος του κυματισμού, επομένως όσο πιο μεγάλο είναι το κύμα σχεδιασμού, τόσο

μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του ογκολίθου θωράκισης και τελικά το κόστος των υλικών κατασκευής. Οι διαφορές που προκύπτουν στο κόστος, ποσοστιαία είναι μικρότερες κατ' αναλογία με αυτές μεταξύ των κυματικών δεδομένων, ωστόσο παραμένουν εξίσου σημαντικές για τον προϋπολογισμό του έργου. Είναι επομένως δελεαστικό για τον μελετητή να λάβει υπόψη του και το οικονομικό σκέλος του προβλήματος και να υπολογίσει το κυματικό κλίμα με τις μαθηματικές εξισώσεις που τελικά θα οδηγήσουν στο τεχνοοικονομικά βέλτιστο αποτέλεσμα. Σημειώνεται επίσης πως για τον υπολογισμό του τελικού κόστους του έργου, λαμβάνονται υπόψη και άλλα έξοδα όπως το κόστος μεταφοράς των υλικών από το κοντινότερο λατομείο, το κόστος λειτουργίας μηχανημάτων, κόστος εργατικού προσωπικού κ.α. που δεν λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα εργασία και δύνανται να αλλάξουν τον προϋπολογισμό του έργου.

Τέλος, όσον αφορά την λειτουργία των ακτομηχανικών έργων, αυτή επιτυγχάνεται με τον ορθό σχεδιασμό και χωροθέτηση του κυματοθραύστη σύμφωνα με τον κυματισμό για τον οποίο σχεδιάζεται. Στην περίπτωση αυτή η εικόνα είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με την ευστάθεια, καθώς στο παράδειγμα της Ερμούπολης που εξετάστηκε φάνηκε πως ο κυματοθραύστης δεν λειτούργησε με τον επιθυμητό τρόπο όταν σχεδιάστηκε τόσο για μεγαλύτερο κυματισμό όσο και για μικρότερο. Εδώ ωστόσο πρέπει να αναφερθεί πως ο σχεδιασμός ακτομηχανικών έργων δεν γίνεται με βάση το μέγιστο κυματισμό αλλά με το μέσο ετήσιο κυματικό κλίμα που επικρατεί στην περιοχή μελέτης. Επομένως οι πίνακες της ΕΜΥ για την μέση ετήσια συχνότητα πνοής που χρησιμοποιούνται στον καθορισμό των μεταβλητών των διαφόρων μεθόδων δεν είναι κατάλληλοι, καθώς δεν προσφέρουν την πληροφορία της πραγματικής διάρκειας πνοής του ανέμου, παρά μόνο την ετήσια συχνότητα εμφάνισής του. Έτσι ο μελετητής δεν είναι σε θέση να αποφανθεί αν επικρατούν Duration-limited συνθήκες, αλλά κάνει την παραδοχή για Fetch-limited συνθήκες.

9.2 Περιεταίρω Έρευνα

Η παρούσα διπλωματική κάνει ένα ακόμα βήμα προς την θέσπιση ενός πλαισίου οδηγιών που οι μελετητές μπορούν να ακολουθούν για τον σχεδιασμό λιμενικών και ακτομηχανικών έργων. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν τρεις περιοχές χαρακτηριστικής γεωμετρίας αναπτύγματος πελάγους που όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα, αντιπροσωπεύονται από διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις. Προτείνεται επομένως ο έλεγχος αντίστοιχων περιοχών με παρόμοιες γεωμετρίες με στόχο την επιβεβαίωση των παρατηρήσεων της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4, οι μαθηματικές μέθοδοι δεν αποτελούν τον συνηθισμένο τρόπο υπολογισμού κυματικού κλίματος, αντίθετα γίνεται χρήση κυματικών δεδομένων με στατιστική παρεμβολή για τον υπολογισμό ύψους κύματος με συγκεκριμένη περίοδο επαναφοράς. Κρίνεται επομένως σημαντικό να γίνει έλεγχος των μαθηματικών εξισώσεων ως προς τα κυματικά δεδομένα, ώστε να ελεγχθούν τυχόν αποκλίσεις μεταξύ μετρήσεων και εξισώσεων.

Τέλος, με τον ίδιο τρόπο που έγινε ο έλεγχος λειτουργικότητας των ακτομηχανικών έργων έναντι κυματισμών υπολογισμένων από μαθηματικές εξισώσεις, μπορεί να εξετασθεί κατά παρόμοιο τρόπο η λειτουργικότητα και των λιμενικών έργων προστασίας. Έτσι μπορεί να

ελεγχθεί η κυματική διείσδυση μέσα στην λιμενολεκάνη και να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός και η χωροθέτηση των εξωτερικών έργων, με γνώμονα την προστασία των θέσεων πρόσδεσης των σκαφών.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bishop, C. T., & Donelan, M. A. (1983). Wave Prediction Models. Στο A. T. V. C. Lakhan, *Applications in Coastal Modeling* (σσ. 75-105). New York, NY: Elsevier Oceanography Series, vol 49.
- CIRIA, C. C. (2007). *The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition)*. London: C683, CIRIA.
- Donelan, M. A. (1980). Similarity Theory Applied to the Forecasting of Wave Heights, Periods, and Directions. *Proceedings of the Canadian Coastal Conference, Canada*, 47-61.
- Hasselmann, K. (1973). *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*. Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut.
- Hasselmann, K. (1976). A Parametric Wave Prediction Model. *Journal of Physical Oceanography*, 200-228.
- Leenknecht, D. A., Szuwalski, A., & Sherlock, A. R. (1992). *Automated Coastal Engineering System: Technical Reference*. Vicksburg, Mississippi: Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, US Army Corps of Engineers.
- Longuet-Higgins. (1952). On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. *Journal of Marine Research*, 245-266.
- MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation. (2017). Hørsholm, Denmark: DHI.
- MIKE 21/3 Coupled Model FM. (2019). Hørsholm, Denmark: DHI.
- Nielsen, P. (2009). *Coastal and Estuarine Processes. Advanced Series on Ocean Engineering - Vol. 29*. Singapore: World Scientific.
- Saville, T. J. (1954). *The Effect of Fetch Width on Wave Generation*. Denver, Colorado: Beach Erosion Board, USACE.
- Smith, J. M. (1991). *Wind-Wave Generation on Restricted Fetches*. Washington, DC: USACE.
- USACE. (1984). *Shore Protection Manual*. Washington, DC: Department of the Army.
- USACE. (2006). *Coastal Engineering Manual*. Washington D.C.: USACE.
- van der Meer, J. W., & Daemen, I. R. (1994). Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 1-19.
- van der Meer, J. W., & Stam, C.-J. M. (1992). Wave Runup on Smooth and Rock Slopes of Coastal Structures. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 534-550.
- Vincent, C. L. (1984). *Deepwater Wind Wave Growth with Fetch and Duration*. Washington, DC: Coastal Engineering Research Center.

- Γαδ, Φ. –Κ. (2011). *Βελτιστοποίηση Διάταξης Συστήματος Προβόλων*. Αθήνα.
- Δήμας, Α. (2016). *Παράκτια Υδραυλική και Ακτομηχανική*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Καραμπάς, Θ., Κρεστενίτης, Ι., & Κουτίτας, Χ. (2015). ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΩΝ/ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΕΡΓΩΝ - ΕΡΓΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΑΚΤΩΝ. Στο *Ακτομηχανική - έργα προστασίας ακτών*. Αθήνα: Εκδόσεις Κάλλιπος.
- Μέμος, Κ. (2013). *Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
- Μέμος, Κ. (2016). *Θαλάσσια Υδροδυναμική*. Αθήνα: ΕΜΠ.
- Σταματιάδης, Α. (2019). *Αριθμητική Προσομοίωση Ανεμογενών Κυματισμών και Σύγκριση με Μαθηματικές Εξισώσεις*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Αθήνα.