

## ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

## ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ-ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

## Διερεύνηση ακτομηχανικών διεργασιών για ακραίες κυματικές συνθήκες με χρήση του μοντέλου XBeach

# ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Ελευθερία Κραγιοπούλου

Επιβλέπουσα: Β.Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Ιούνιος 2016

## Διερεύνηση ακτομηχανικών διεργασιών για ακραίες κυματικές συνθήκες με χρήση του μοντέλου XBeach

**Λέξεις-Κλειδιά:** ακραίες κυματικές συνθήκες, διαχείριση πλημμύρας, μεταφορά ιζημάτων, εξέλιξη πυθμένα, αναρρίχηση κύματος, XBeach, Ρέθυμνο

## XBeach model application on assessing coastal zone processes under extreme storm events

**Keywords:** extreme storm events, flood risk management, sediment transport, bed update, wave run-up, XBeach, Rethymno

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

## Ευχαριστίες

Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κ. Βίκυ Τσουκαλά, για τις ιδέες της, τις συμβουλές της, τη στήριξή της και τη γενικότερη συνεισφορά της στο τελικό αποτέλεσμα. Ευχαριστώ επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες Βασίλη Αφεντούλη και Νίκο Μαρτζίκο για τη συνεργασία στο διατιθέμενο τεχνικό υλικό του εργαστηρίου και την παροχή των απαιτούμενων πρωτογενών δεδομένων, καθώς και τις συμφοιτήτριες Λένα Σκαρλάτου και Δώρα Πυρπιρή που υπήρξαν συνοδοιπόροι όλη τη χρονιά με τις αντίστοιχες δικές τους εργασίες. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου, χωρίς την οικονομική στήριξη των οποίων δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	i
Περίληψη	iii
Abstract	v
Extended summary	vii
1. Introduction	vii
2. Case study area and storm events	vii
3. Model application	X
4. Results and Discussion	xi
4.1 Wave climate conditions	xi
4.2 Storm events	xii
4.3 Profile bed update and wave run-up	xiv
5. Conclusions	xvi
References	xvii
1. Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της εργασίας	1
1.2 Πρωτότυπα σημεία	2
1.3 Διάρθρωση της εργασίας	2
2. Περιγραφή βασικών εννοιών	5
2.1 Η επίδραση της κλιματική αλλαγής στις παράκτιες περιοχές	5
2.2 Μεταφορά ιζημάτων	7
2.3 Αναρρίχηση κύματος	14
2.4 Το ερευνητικό πρόγραμμα PEARL	16
3. Παρουσίαση της Περιοχής Μελέτης	19
3.1. Το πρόβλημα-Ιστορικές πλημμύρες	
3.2 Περιγραφή της Περιοχή Μελέτης	23
3.3 Σενάρια προσομοίωσης	
3.3.1 Σενάριο κυματικού κλίματος	
3.3.2 Σενάρια καταιγίδας	
4. Παρουσίαση του μοντέλου XBeach	
4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου	

4.2 Βήματα δημιουργίας των απαραίτητων αρχείων	47
5. Εφαρμογή του μοντέλου	49
5.1 Αποτελέσματα υπολογισμών	52
5.1.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης κυματικού κλίματος	52
5.1.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης καταιγίδων	54
Σενάριο 1	55
Σενάριο 2	59
Σενάριο 3	65
Σενάριο 4	71
Σενάριο 5	76
Σενάριο 6	81
5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	86
6. Συμπεράσματα-Προτάσεις	95
6.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	97
Βιβλιογραφικές Αναφορές	99
ПАРАРТНМА	103

## Περίληψη

Οι παράκτιες περιοχές αντιμετωπίζουν ολοένα και μεγαλύτερο κίνδυνο από πλημμυρικά γεγονότα. Ακραία καιρικά φαινόμενα λόγω κυρίως της κλιματικής αλλαγής σε συνδυασμό με την έντονη αστικοποίηση και τη λανθασμένη πολιτική διαχείριση δημιουργούν έντονα προβλήματα στις παράκτιες πόλεις. Για την καλύτερη κατανόηση και κατ' επέκταση αντιμετώπιση των πλημμυρικών αυτών φαινομένων αναπτύχθηκε το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα PEARL (Preparing for Extreme And Rare events in coastaL regions). Στόχος του προγράμματος είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για τις παράκτιες κοινωνίες με στρατηγικές ανάλογες με την περιοχή και την περίπτωση του φαινομένου, οι οποίες θα οδηγήσουν στη διαχείριση του κινδύνου από ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα, μειώνοντας στο ελάχιστο τις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυξάνοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα των παράκτιων περιοχών. Στο πρόγραμμα αυτό ανήκουν έντεκα περιοχές μελέτης από όλο τον κόσμο, μεταξύ των οποίων είναι και η πόλη του Ρεθύμνου στην Κρήτη.

Στα πλαίσια λοιπόν των απαιτήσεων του προγράμματος PEARL, μελετήθηκε η ανταπόκριση της ακτής του Ρεθύμνου υπό συνθήκες ακραίων κυματισμών ώστε να εκτιμηθούν τα φαινόμενα της διάβρωσης και της αναρρίχησης του κύματος στην ακτή και γενικότερα η βραχυπρόθεσμη εξέλιξη της ακτογραμμής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό μοντέλο XBeach, ένα δισδιάστατο μορφολογικό μοντέλο διαθέσιμο ελεύθερα στο κοινό κατάλληλο για την προσομοίωση των παράκτιων διαδικασιών υπό ακραίες μεταβαλλόμενες στο χρόνο κυματικές συνθήκες. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης, η οποία περιλαμβάνει το λιμάνι και την ακτογραμμή στα ανατολικά του λιμανιού μήκους περίπου 4 km, αφορούν σε έξι αντιπροσωπευτικά ακραία σενάρια καταιγίδας των επικρατέστερων ανέμων. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν εκτιμήσεις του ύψους κύματος, των υδροδυναμικών μεγεθών, της εγκάρσιας και κατά μήκος της ακτής μεταφοράς των ιζημάτων καθώς και της εξέλιξης του πυθμένα, της διάβρωσης των αμμοθινών και της αναρρίχησης του κύματος (wave run-up) σε κατάλληλα επιλεγμένες διατομές εγκάρσια της ακτής. Εξετάστηκε επίσης με εφαρμογή του μοντέλου η συμπεριφορά της περιοχής μελέτης σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου κυματικού κλίματος.

Τα αποτελέσματα αυτά αναμένεται να βοηθήσουν τα ενδιαφερόμενα μέρη στον εντοπισμό των περισσότερο τρωτών περιοχών και στην εκτίμηση του κινδύνου που αντιμετωπίζουν ώστε να συμβάλουν στην υιοθέτηση ενός ολοκληρωμένου και αποδοτικού προγράμματος για τη διαχείριση των φυσικών κινδύνων που αντιμετωπίζει η περιοχή.

## Abstract

Coastal communities are increasingly at risk from coastal hazards such as floods. Extreme hydro-meteorological events related to seal level rise, storm surges, heavy precipitation, shoreline erosion are driven by climate change and increase the exposure of people, livelihoods, environmental services, resources and infrastructure to hazard. Combined with climate change, rapid urbanization and poor governance often result in significant increase of flood risk.

Flooding has always been a serious problem for Rethymno, Crete. Major flood events have been encountered throughout the years, resulting in serious damages mainly in the Old Town of Rethymno and the east low-laying areas. For this reason Rethymno city is one of the case study areas of PEARL project (Preparing for Extreme And Rare events in coastaL regions), an EU-funded research project, which aims to develop and apply adaptive risk management strategies for coastal communities against extreme hydro-meteorological events, minimizing social, economic and environmental impacts. For this reason, investigating the beach erosion and wave run-up height taking place at the coastline of Rethymno is of great importance.

Within this framework, the XBeach public-domain numerical model is used. XBeach is a two-dimensional model for wave propagation, long waves and mean flow, sediment transport and morphological changes of the near-shore area, beaches, dunes and back barrier during storms. Specifically in this project, XBeach is applied on the study area which contains the port of Rethymno and the adjacent 4 km long coastline on the east in order to assess the coastal response, erosion and wave run-up level under six different time-varying extreme storm events of the most frequent wind conditions, as obtained by SWAN model. The output refers to wave height, hydrodynamics, cross-shore and alongshore sediment transport estimations, as well as bed update, avalanching and wave run-up calculations on twelve cross-shore profiles. Model application and study area's response on annual wave climate conditions are investigated as well.

The results obtained are very helpful for the stakeholders, as they can play an important role to the identification of the most vulnerable areas, the flood risk assessment and finally to the development of an integrated flood risk management strategy aiming at the improvement of Rethymno's coastal area resilience against extreme storm events.

## **Extended summary**

### **1. Introduction**

Coastal floods are regarded as one of the most dangerous and harmful of all natural disasters. Climate change combined with rapid urbanization and poor governance lead to a significant increase in the exposure of people, livelihoods, environmental services, resources and infrastructure of coastal communities to hazard.

Flooding has always been a serious problem for Rethymno, Greece. Major flood events have been encountered throughout the years, resulting in serious damages mainly in the Old Town of Rethymno and the east low-laying areas (Makropoulos et al. 2015). For this reason Rethymno city is one of the eleven case study areas of PEARL (Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions) project (Figure 2.1b), an EU funded research project, which aims at developing adaptive risk management strategies for coastal communities focusing on extreme hydro-meteorological events, with a multidisciplinary approach integrating social, environmental and technical research and innovation so as to increase the resilience of Coastal Regions all over the world. PEARL will consider all fundamentals in the risk governance cycle, focusing on the enhancement of forecasting, prediction and early warning capabilities and the building of resilience and reduction of risk through learning from experience and the avoidance of past mistakes.

Within this framework, the XBeach public-domain numerical model is used in this project. XBeach is a two-dimensional morphological model for wave propagation, long waves and mean flow, sediment transport and morphological changes of the nearshore area, beaches, dunes and backbarrier during storms (Roelvink et al., 2009).

#### 2. Case study area and storm events

Rethymno city is sited at the Region of Crete in Greece (Figure 2.1a) and its population stands at 32,468 inhabitants (Census 2011) with a density of 140.12 population/km<sup>2</sup>. As the  $3^{rd}$  most populous urban area in the island of Crete, commercial, administrative, cultural and tourist activities are being developed along the north coast where the city is located. The mean absolute altitude is 15 m (Makropoulos et al. 2015).

The investigated area includes the Port of Rethymno, located in the Northern end of Crete within the homonymous bay and the adjacent coastal area at the east (a total area of about 8 km<sup>2</sup>), with a coastline of approximately 4 km (3760 m) length. The grid is constructed with dimensions 1500x5160 m in x- and y- axes respectively and the spatial steps are chosen dx=dy=5m (Figure 2.1c). The first point coordinates (left down corner) are (542361, 3913477) in EGSA 87 Coordinate System, but the grid has been rotated counter clockwise at 90° so as the XBeach results could be directly comparable to MIKE21 results obtained in future projects. The topography data were extracted from the Hellenic Cadastre map and the bathymetry data from the Hellenic Navy Hydrographic Service case study map. Figure 2.2a presents the initial bathymetry and topography of the case study area as shown in XBeach.



Figure 2.1 (a) The PEARL project case studies (b) The location of the investigated case study area in Greece, Crete (c) Grid dimensions, coastline, bathymetry contours and investigated profiles of the case study area

The SWAN model is initially used to simulate the offshore wave characteristics (directional spectrum) taking into account the changes of wind climate, followed by the MIKE21 PMS model which is applied for the transformation of the offshore information to shallower regions, up to the coast (Tsoukala et al., 2016). The necessary wave condition at the offshore boundary of the local geographical area were derived from a downscaling approach followed which was based in the transformation of global wind fields carrying the effect of climate change and resulting into nearshore wave conditions. With offshore wave data available, categorization of storm events was derived, where a storm is defined as the event exceeding a minimum significant wave height (Hs>2) and with a minimum duration of 6 hours. The coastal response is tested here under four storm scenarios (Table 2.1), as obtained by SWAN model, for the mean wave direction i.e. for North, Northwest and Northeast wind directions  $(270^\circ, 225^\circ \text{ and } 315^\circ \text{ respectively, including } \pm 45^\circ \text{ incident wave directions})$ . The frequency of each wave direction is shown in Figure 2.2b (Tsoukala et al., 2016), where N wind is proved to be the most frequent and NE the less. The first storm scenario is hindcasting (period 1960-2000) while the rest are forecasting (period 2000-2100) scenarios. The storm scenarios selected to be simulated by XBeach characterize the worst storm category of each wind direction and the results obtained concern the hydrodynamics and sediment transport calculations. The case study is also simulated for the annual wave climate conditions (Karabas et al., 2010). The characteristics of the equivalent annual waves are shown in Table 2.2.

Twelve cross shore transects per 300 m as shown in Figure 2.1c are also investigated for each storm event in order to estimate the bed update, dune erosion and wave run-up level. The first transect is located 100m to the right of the port. Sediment properties are selected uniform sand with porosity of 0.4 and size of 0.2 mm.

Scenario	Direction	Hs range (m)	Tp range (s)	Average Hs (m)	Average Tp (s)	Event duration (h)
1	Ν	2.01-4.61	6.71-9.28	2.86	7.85	103.5
2	Ν	2.46-4.95	7.84-9.65	4.18	9.07	72
3	NW	2.43-3.03	7.41-8.16	2.79	7.87	39
4	NE	2.07-2.66	6.78-8.96	2.41	8.16	24

Table 2.1 Characteristic storm events simulated by XBeach (Tsoukala et al., 2016)

Table 2.2 Characteristics of equivalent annual waves (Karabas et al., 2010)



**Figure 2.2** (a) Initial bathymetry and topography as shown on XBeach (b) Mean wave direction at the case study for three time periods (Tsoukala et al., 2016)

#### **3. Model application**

XBeach is a two-dimensional morphological model of near-shore processes to compute the natural coastal response during time varying storm and hurricane conditions including dune erosion, overwash and breaching (Roelvink et al., 2009). The model consists of non stationary shallow water equations, short wave propagation, sediment transport and bed update. In addition, a developed time-dependent wave action balance solver is included in the model to solve the wave refraction and to simulate the propagation and dissipation of the wave group (Mehvar et al., 2015). To include short wave-induced mass fluxes and return flows in shallow water, the Generalized Lagrangian Mean (GLM) formulation is implemented. Additionally, the computational fluid dynamic is solved by Navier Stokes equations while the sediment transport rates are calculated using an advection-diffusion equation (Bolle et al., 2010). The numerical implementation is mainly first order upwind in line with the momentum-conserving form of Stelling and Duinmeijer method (2003), which improves long wave run-up and backwash on the beach (Roelvink et al., 2010).

The XBeach model can be applied to areas extending several kilometers in the longshore and about a kilometer (several surf zone widths) in the cross-shore (Bolle et al., 2010). Although the model has been validated with series of analytical, laboratory and field test cases, the validation for different cases is still under process to make the model more reliable, it has been shown to have quantitative skill in estimating storm impact, overwash and breaching processes on sandy beaches (Roelvink er al., 2009, McCall et al., 2010), like Rethymno's coastline. It is a public-domain model that has been developed with funding and support by the US Army Corps of Engineers, by a consortium of UNESCO-IHE, Deltares, Delft University of Technology and the University of Miami. More details about the model and its mathematical and theoretical background can be found at the user's manual (Roelvink D., 2010; XBeach Manual, Deltares 2015B).

XBeach is applied here in hydrostatic mode. Four different extreme forecasting storm scenarios (Table 2.1) obtained by SWAN model (Tsoukala et al., 2016) for North, Northwest and Northeast wind directions (270°, 225° and 315° respectively, including ±45° incident wave directions) are simulated using the 2D instationary mode of XBeach based on a sequence of time-varying wave groups generated using a Jonswap spectrum (keyword: *wbctype=jons\_table*). The results obtained are evaluations of hydrodynamics (wave height, velocities), cross-shore and alongshore sediment transport. Model application is also investigated for wave climate conditions (Table 2.2). The characteristic waves of NW, N and NE wind direction, as obtained from Karabas et al., 2010, are simulated for 24 h using the 2D stationary mode of XBeach (keyword: *wbctype=stat\_table*). The results refer to hydrodynamics and sediment transport calculations. Twelve transects per 300 m (Figure 2.1c) using the 1D transect mode for each storm event are investigated as well. The output obtained concerns profile bed update, avalanching and wave run-up predictions. The wave run-up height is given by  $R_{u2\%}$ . It should be mentioned that profile calculations are only possible for the instationary mode of XBeach, so the results obtained refer to the storm events and not to the wave climate conditions.

#### 4. Results and Discussion

#### 4.1 Wave climate conditions

Wave climate conditions were simulated for 24 h of NW, N and NE characteristic waves as shown in Table 2.2. The output depicted in Figures 4.1 and 4.2 concerns the hydrodynamics calculations, i.e. wave height H (m) and velocities u and v (m/s) on x- and y- axes respectively and sediment transport calculations ( $m^2/s$ ) described in two dimensions ( $S_{utot}$  and  $S_{vtot}$  referring to x- and y- direction respectively) including both bed and suspended sediment transport. The computational x-axis is always oriented towards the coast, approximately perpendicular to the coastline, while the y-axis is alongshore, so  $S_{utot}$  refers to the cross shore sediment transport while  $S_{vtot}$  refers to the alongshore sediment transport. It can be derived by the results that the study area is not facing erosion or flooding problems under the annual wave climate conditions.



**Figure 4.1** Spatial distribution of wave height H (m) and velocities u, v (m/s) for wave climate conditions on x- and y- axes respectively



Figure 4.2 Spatial distribution of sediment transport  $S_{utot}$  and  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) for wave climate conditions on x- and y-axes respectively

#### 4.2 Storm events

The hydrodynamics calculations of the worst case scenarios i.e. Scenario 2 (N-direction storm event with the highest identified significant wave height  $H_s$ =4.95 m and storm duration D=72 h) and Scenario 4 (NE-direction storm event) are presented in Figure 4.3 and 4.4. The output concerns the wave height H (m) and velocities u and v (m/s) on x- and y- axes respectively, referring to values at the cell centre. In XBeach only the offshore boundary (and not the lateral boundaries) is a wave generating boundary. Therefore, if waves under an angle are imposed, like Scenarios 3 and 4 here, a "shadow zone" in which no waves are generated is occurred (Figure 4.4).



Figure 4.3 Spatial distribution of wave height H (m) and velocities u, v (m/s) on x- and yaxes respectively for Scenario 2



**Figure 4.4** Spatial distribution of wave height (H) and velocities u, v (m/s) on x- and y- axes respectively for Scenario 4-"shadow zone" indicated with the red circle

The output of the most important sediment transport occurring is described in Figure 4.5, i.e. for Scenario 2 and Scenario 4. In XBeach, the obtained results of sediment transport ( $m^2/s$ ) are described in two dimensions ( $S_{utot}$  and  $S_{vtot}$  referring to x- and y- direction respectively) including both bed and suspended sediment transport, with the last one being the bulk of the total transport. As observed, both N and NE waves cause alongshore sediment transport with main direction to the port.



**Figure 4.5** Spatial distribution of sediment transport (m<sup>2</sup>/s) for Scenario 2 for (a) x-axis and (b) y-axis respectively and for Scenario 4 for (c) x-axis and (d) y-axis respectively.

#### 4.3 Profile bed update and wave run-up

The bed evolution, dune erosion and wave run-up level of 12 different profiles were investigated. As shown in Table 4.1, the profiles that proved to be the most vulnerable in common for all storm scenarios are transects no. 1, 6, 10, and 12 (Figure 2.1c) due to their high wave run-up level and/or the fact that a large distance of the inland area is flooding by the sea water. Profile no.12 bed update and avalanching results for all the investigated storm events are presented in Figure 4.6 as well as the time-varying evolution and flooding of Profile no.10 for storm Scenario 2 is depicted in Figure 4.7. Variable zs refers to the water level, while zb refers to the bed level and zb0 to the initial bed level.

	Storm scenario	) 1-N direction	Storm scenari	o 2-N direction
Profile	maxRu (m)	Inland distance	maxRu (m)	Inland distance
		flooding (m)		flooding (m)
1	1.1	125	2	140
6	1.2	40	2.3	45
10	1.6	35	1.8	115
12	2.1	35	2.3	50
	Storm scenario	3-NW direction	Storm scenario	4-NE direction
		Inland		Inland
Profile	maxRu (m)	distance	maxRu (m)	distance
		flooding (m)		flooding (m)
1	0.9	15	3.5	160
6	0.8	30	2.3	60
10	0.7	25	2.8	165

Table 4.1 Results of the most vulnerable profiles in common



Figure 4.6 Profile no.12 bed update and dune erosion at the end of each storm event



Figure 4.7 Profile No.10 time-varying evolution for storm Scenario 2

#### 5. Conclusions

The area is proved to be enough protected from NW direction storm events because of the Port presence, retaining low wave run-up heights all along the coast and no flooding problems are observed. The same though is not happening with N wind storms, which are also the most frequent. In this case, wave run-up height ranges mainly between 1.5 and 2.5 m with the max values being observed both in the middle and in the end of the coastline, while flooding is occurring at the low-laying areas. The study area is also very sensitive to storms caused even by moderate NE wind, where the wave run-up height gets up to 4.2m at Profile 12 and most of the profiles indicate flooding. Generally the severest bed evolution and dune erosion take place under NE storm events, but NE waves are the less frequent. Wave height can reach values up to 7 m in Scenario 2, while velocities are getting generally higher mainly around the port constructions and in the surf zone. Overall, the most vulnerable areas to erosion and flooding are the low-laving areas located at the east of the port and at the last 1 km of the study area, where the whole coastal area covered by sand and/or farmland is flooding. The narrow sandy area in the middle of the coastline is also vulnerable, as the sea water reaches the level of the street and the buildings both in Scenario 2 and 4. The fact that most of the profiles seem to be flooding usually during the first 3-6 hours of the storm event is also important. The cross-shore sediment transport is more intense for N wind storm events (max value 0.003  $m^2/s$ ) indicating mainly beach erosion and not aggradation, while alongshore sediment transport becomes more important for oblique waves (max value  $0.004 \text{ m}^2/\text{s}$ ) with direction mainly to the port. The results obtained are very helpful for the stakeholders, as they play an important role to the development of an integrated flood risk management strategy focusing on the most vulnerable areas and the improvement of Rethymno's coastal area resilience against extreme and rare events.

#### References

- Bolle A., Mercelis P., Roelvink D., Haerens P., Trouw K.,2010, Application and validation of XBeach for three different field sites. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*; No 32 (2010): Shanghai, China, 2010
- Hughes S.A., 2003, Estimating Irregular Wave Runup on Smooth, Impermeable Slopes, US Army Corps of Enginners
- Karabas Th. And Kabanis N., 2010, Research work on recast and protection against erosion and incident waves of the coastline of Rethymno at the east of the homonymous port, Coastal Study, Institute of Computational Mathematics and Technology Research Institute (available only in Greek)
- Makropoulos C., Tsoukala V., Belibassakis K., Lykou A., Chondros M., Gourgoura P. and Nikolopoulos D., 2015, Managing flood risk in coastal cities through an integrated modeling framework supporting stakeholders' involvement: The case of Rethymno, Crete, *Proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Conference*, 28/6-3/7/2015, Hague, the Netherlands
- McCall R.T., 2008, The longshore dimension in dune overwash modeling: development, verification and validation of XBeach, MSc Thesis, Delft University of Technology
- Mehvar S., Dastgheib A., Roelvink J. 2015, Validation if XBeach model for wave run-up, Proceedings of the 36th IAHR World Congress, 28/6-3/72015, Hague, the Netherlands
- Roelvink D., 2010, XBeach model description and manual, Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of technology, report June 21 2010
- Roelvink, J.A, A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, J. Lescinski. 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56, 1133-1152
- Tsoukala V.K., Chondros M., Kapelonis Z., Martzikos N., Lyckou A., Belibassakis K., Makropoulos C., 2016, An integrated wave modeling framework for extreme and rare events for climate change in coastal areas-the case of Rethymno, Crete, *Oceanologia*, 58(2), 71-89.
- XBeach Manual, Deltares, 2015 B, available on http://oss.deltares.nl/web/xbeach/ (accessed May 31st, 2016)

## 1. Εισαγωγή

#### 1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Οι παράκτιες περιοχές αντιμετωπίζουν ολοένα και μεγαλύτερο κίνδυνο από διάφορους παράγοντες που οδηγούν σε πλημμύρες. Ακραία καιρικά φαινόμενα εξαιτίας κυρίως της κλιματικής αλλαγής σε συνδυασμό με την έντονη αστικοποίηση και τη λανθασμένη πολιτική διαχείριση δημιουργούν έντονα προβλήματα στις παράκτιες πόλεις. Φυσικές διαδικασίες και φαινόμενα όπως η αύξηση της στάθμης της θάλασσας, οι έντονες κατακρημνίσεις και η διάβρωση των ακτών καθώς επίσης και η ανθρώπινη δραστηριότητα συντελούν στην δημιουργία πλημμύρας στις παράκτιες περιοχές. Για την καλύτερη κατανόηση και κατ' επέκταση αντιμετώπιση των πλημμυρικών φαινομένων αλλά και η κατανόηση της τρωτότητας των περιοχών αυτών, λαμβάνοντας ακόμη υπόψη τα πολιτικά, οικονομικοκοινωνικά, πολιτιστικά και ιστορικά στοιχεία τους, τα οποία έχουν σημαντική επίδραση στον τρόπο

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, αναπτύχθηκε το πρόγραμμα PEARL (Preparing for Extreme And Rare events in coastaL regions), ένα ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα το οποίο στοχεύει στην ανάπτυξη και εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για τις παράκτιες κοινωνίες με στρατηγικές ανάλογα με την περιοχή και την περίπτωση του φαινομένου για την διαχείριση του κινδύνου από ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα, μειώνοντας στο ελάχιστο τις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυξάνοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα των παράκτιων περιοχών (Makropoulos et al.,2015). Στο πρόγραμμα ανήκουν έξι περιοχές μελέτες από τον ευρωπαϊκό χώρο και πέντε από τις άλλες ηπείρους-το Ρέθυμνο της Κρήτης είναι μία από τις παράκτιες περιοχές που εξετάζονται. Τα αποτελέσματα του προγράμματος, όταν αυτό ολοκληρωθεί, αναμένεται να βοηθήσουν τα ενδιαφερόμενα μέρη οποιασδήποτε παράκτιας περιοχής να υιοθετήσουν ένα ολοκληρωμένο και αποδοτικό πρόγραμμα για τη διαχείριση των φυσικών κινδύνων που αντιμετωπίζει η κάθε περιοχή.

Αντικείμενο λοιπόν της παρούσας εργασίας, η οποία υλοποιήθηκε στα πλαίσια των απαιτήσεων του προγράμματος PEARL, είναι η μελέτη της διάβρωσης της ακτής και του επιπέδου της κυματικής αναρρίχησης (wave run-up) που σημειώνονται στην παράκτια περιοχή του Ρεθύμνου λόγω πλημμυρικών φαινομένων από τη θάλασσα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό μοντέλο XBeach, ένα δισδιάστατο μορφολογικό μοντέλο διαθέσιμο ελεύθερα στο κοινό κατάλληλο για την προσομοίωση των παράκτιων διαδικασιών υπό ακραίες μεταβαλλόμενες στο χρόνο κυματικές συνθήκες. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν σε κάναβο διαστάσεων 5160\*1500m με μέγεθος κελιού 5\*5 m που περιλαμβάνει το λιμάνι και την ακτογραμμή μήκους περίπου 4 km ανατολικά του λιμανιού. Η προσομοίωση αφορά έξι αντιπροσωπευτικά ακραία σενάρια καταιγίδας των επικρατέστερων ανέμων. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν εκτιμήσεις των υδροδυναμικών μεγεθών, της εγκάρσιας και κατά μήκος της ακτής μεταφοράς των ιζημάτων καθώς και της εξέλιξης του πυθμένα, της διάβρωσης των αμμοθινών και της αναρρίχησης του κύματος (wave run-up) σε

κατάλληλα επιλεγμένες διατομές εγκάρσια της ακτής. Εξετάστηκε επίσης με εφαρμογή του μοντέλου η συμπεριφορά της περιοχής μελέτης σε αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου κυματικού κλίματος.

Τα αποτελέσματα αυτά αναμένεται να βοηθήσουν τα ενδιαφερόμενα μέρη στον εντοπισμό των περισσότερο τρωτών περιοχών και στην εκτίμηση του κινδύνου που αντιμετωπίζουν ώστε να συμβάλουν στην υιοθέτηση ενός ολοκληρωμένου και αποδοτικού προγράμματος για τη διαχείριση των φυσικών κινδύνων που αντιμετωπίζει η περιοχή.

### 1.2 Πρωτότυπα σημεία

Είναι η πρώτη μελέτη μεταξύ των ελληνικών πανεπιστημίων που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό και την εξέταση των παραπάνω υδροδυναμικών και μορφολογικών μεγεθών το αριθμητικό μοντέλο XBeach. Πρόκειται για ένα μοντέλο που επιδέχεται ακόμα βελτιώσεις, αλλά γνωρίζει ολοένα και μεγαλύτερη αποδοχή από πανεπιστήμια του εξωτερικού, ελληνικές και ξένες εταιρείες. Εξετάστηκε το θεωρητικό και μαθηματικό του υπόβαθρο, ο τρόπος παρουσίασης των αποτελεσμάτων του, ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτεί, η φιλικότητα προς το χρήστη, η συμβατότητά του με άλλα μοντέλα. Το γενικότερο συμπέρασμα που αποκτήθηκε είναι πως το XBeach είναι κατάλληλο για τη μελέτη της ανταπόκρισης της παράκτιας ζώνης υπό ακραίες κυματικές συνθήκες.

Ακόμα, τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από τους υπολογισμούς στη μελέτη αυτή αποτελούν χρήσιμα δεδομένα για πιθανές μελλοντικές καταιγίδες και τις αντίστοιχες επιπτώσεις τους. Η πολύτιμη γνώση αυτών μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις διοικητικές αρχές της περιοχής του Ρεθύμνου με σκοπό την κατασκευή έργων προστασίας και τη λήψη κατάλληλων μέτρων για την ενημέρωση των κατοίκων, την προστασία του περιβάλλοντος και των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

### 1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Στο 2° κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στην έννοια της κλιματικής αλλαγής και στον τρόπο που η ίδια επηρεάζει τις παράκτιες περιοχές και ακολουθεί συνοπτική επεξήγηση των σημαντικότερων εννοιών που μελετώνται εδώ, δηλαδή η έννοια της στερεομεταφοράς (sediment transport) της αναρρίχησης κύματος (wave run-up). Διακρίνονται επίσης οι περιοχές στις οποίες χωρίζεται και μελετάται γενικότερα η παράκτια ζώνη. Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στη δομή και στους στόχους του ευρωπαϊκού προγράμματος PEARL, καθώς και στις περιοχές που αποτελούν αντικείμενο μελέτης του ερευνητικού προγράμματος, καθώς το αντικείμενο της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος αυτού.

Στο 3° κεφάλαιο παρουσιάζεται εκτενώς η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας, το Ρέθυμνο της Κρήτης. Περιγράφεται το πρόβλημα των πλημμυρών που αντιμετωπίζει η περιοχή και παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες της περιοχής μελέτης και του κανάβου, απαραίτητες για την εφαρμογή του μοντέλου. Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλα τα σενάρια που επιλέχθηκαν να προσομοιωθούν από το μοντέλο XBeach, δηλαδή οι συνθήκες κυματικού κλίματος, όπως αυτές προέκυψαν από τη μελέτη των Καραμπάς κ.α. (2010) και τα σενάρια καταιγίδων, όπως αυτά υπολογίστηκαν στη μελέτη των Tsoukala et al. (2016) με χρήση του μοντέλου SWAN.

Ακολουθεί το 4° κεφάλαιο όπου παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο του XBeach με αναλυτική περιγραφή των εξισώσεων των βασικότερων σημείων του μοντέλου. Γίνεται αναφορά στις λειτουργίες και στις μεταβλητές του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της μελέτης, καθώς και στα βήματα που πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης για την επιτυχή λειτουργία των υπολογισμών. Αναλυτικά η περιγραφή του μοντέλου υπάρχει στο αντίστοιχο εγχειρίδιο (XBeach Model Description and Manual, Roelvink et al., 2010) το οποίο διατίθεται ελεύθερα στο διαδίκτυο.

Στο 5° και σημαντικότερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τόσο για το κυματικό κλίμα όσο και για κάθε σενάριο καταιγίδας. Τα αποτελέσματα αφορούν υπολογισμούς για το ύψος κύματος, τις ταχύτητες, τη μεταφορά ιζήματος, την αναρρίχηση του κύματος σε 12 διατομές εγκάρσιες στην ακτογραμμή σε απόσταση 300 m μεταξύ τους, με την πρώτη να βρίσκεται 100m ανατολικά του λιμανιού και τέλος την εξέλιξη του πυθμένα σε επίπεδο προφίλ αλλά και ολόκληρης της περιοχής. Να διευκρινιστεί εδώ ότι τα αποτελέσματα σε επίπεδο προφίλ δίνονται μόνο για την περίπτωση των καταιγίδων, καθώς η λειτουργία του μοντέλου που αφορά το κυματικό κλίμα (stationary mode) δεν υπολογίζει αναρρίχηση κύματος και εξέλιξη πυθμένα σε επίπεδο προφίλ. Ακολουθούν συγκεντρωτικοί και συγκριτικοί πίνακες μεταξύ των διαφόρων μεγεθών και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Τέλος, το κεφάλαιο 6 περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τους παραπάνω υπολογισμούς. Πρόκειται για αποτελέσματα ιδιαίτερα χρήσιμα προς τους ενδιαφερόμενους, καθώς δίνουν τη δυνατότητα εκτίμησης των πιο ευάλωτων περιοχών σε περιπτώσεις ακραίων φαινομένων, των επιπέδων διάβρωσης και αναρρίχησης κύματος στις εκάστοτε κυματικές συνθήκες, ώστε να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας και προετοιμασίας έναντι των μελλοντικών καταιγίδων. Τέλος, ακολουθούν προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

### 2.1 Η επίδραση της κλιματική αλλαγής στις παράκτιες περιοχές

Ο όρος «Κλιματική Αλλαγή» αναφέρεται στη μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος και ειδικότερα σε μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών που εκτείνονται σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Τέτοιου τύπου μεταβολές περιλαμβάνουν στατιστικά σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τη μέση κατάσταση του κλίματος ή τη μεταβλητότητά του, που εκτείνονται σε βάθος χρόνου δεκαετιών ή περισσότερων ακόμα ετών. Οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται σε φυσικές διαδικασίες, καθώς και σε ανθρώπινες δραστηριότητες με επιπτώσεις στο κλίμα, όπως η τροποποίηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας (Πρίνος, 2014). Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change) στην τελευταία της αναφορά (2014) κατέληξε ότι η κλιματική αλλαγή και η υπερθέρμανση του πλανήτη υφίστανται και ως κύριος παράγοντας πρόκλησής τους αναγνωρίζεται η ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι παράκτιες περιοχές είναι οι πρώτες που απειλούνται από τις επιπτώσεις αυτών των φαινομένων-απειλή που εκφράζεται μέσω της αύξησης της στάθμης της θάλασσας, της συγνότητας εμφάνισης καταιγίδων, έντονης διάβρωσης, υφαλμύρωσης των παράκτιων γλυκών νερών λόγω διείσδυσης του θαλασσινού και φαινομένων όπως κυματισμοί θύελλας (storm surges), κυκλώνες και τσουνάμι. Όταν τα παραπάνω συνδυάζονται με έντονη αστικοποίηση και έλλειψη σωστής πολιτικής διαγείρισης, ή/και όταν η πλημμύρα από τη μεριά της θάλασσας συνδυάζεται με έντονη βροχόπτωση και αύξηση της στάθμης των ποταμών, τότε το πρόβλημα από τις καταστροφικές επιπτώσεις των πλημμυρών γίνεται εντονότερο. Ενδεικτικά αναφέρονται οι μεγαλύτερες πλημμύρες που σημειώθηκαν παγκοσμίως το διάστημα 1990-2016 με βάση τις απώλειες σε ανθρώπινες ζωές (Πίνακας 2.1) και με βάση τις συνολικές οικονομικές απώλειες (Πίνακας 2.2).

Η σημερινή μέση τιμή ανόδου της μέσης παγκόσμιας στάθμης εκτιμάται στα 1-2 mm/year αλλά στο μέλλον αναμένεται να αυξηθεί, καθώς η μάζα των ωκεανών θα αυξηθεί από το λιώσιμο των παγετώνων εν όψει της αναμενόμενης κλιματικής αλλαγής και η ένταση της ανόδου αυτής θα εξαρτηθεί από το ποσό των αερίων του θερμοκηπίου και επομένως από την αντίστοιχη αύξηση της θερμοκρασίας (Παπανικολάου κ.α., 2011). Βέβαια, οι προβλέψεις της έκθεσης αξιολόγησης της IPCC και ερευνητών όσον αφορά την κατασκευή σεναρίων ανόδου στάθμης της θάλασσας αναφέρονται σε ένα εύρος από 0.2 έως 2 μέτρα στα επόμενα 100 χρόνια. Το πολύ μεγάλο εύρος που εμπεριέχεται στην πρόβλεψη καθιστά την χρησιμότητα της από τους υπεύθυνους φορείς πρόληψης και αντιμετώπισης της ενδεχόμενης ανόδου της στάθμης της θάλασσας πολύ δύσκολη. Επιπλέον, η έννοια και η εφαρμογή μιας παγκόσμιας μέσης τιμής στάθμης της θάλασσας δεν μπορεί παρά να είναι περιορισμένης σημασίας διότι αυτή παρουσιάζει πολλές διαφοροποιήσεις ανά περιοχή. Επομένως, τόσο η αναπαράσταση όσο και η πρόβλεψη της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας είναι χρήσιμη και δυνατή σε τοπική και όχι σε παγκόσμια κλίμακα.

Το ερευνητικό πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ-CCSEAWAVS έχει σαν στόχο τη διερεύνηση των επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής στη στάθμη και στο κυματικό κλίμα των ελληνικών θαλασσών, στην τρωτότητα των παράκτιων περιοχών και στην ασφάλεια των λιμενικών και παράκτιων έργων. Σύμφωνα με τη μελέτη του συντονιστή του προγράμματος (Πρίνος, 2014),

τα αποτελέσματα για την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στο κυματικό κλίμα, την μετεωρολογική παλίρροια και την τρωτότητα επιλεγμένων παράκτιων περιοχών, δείχνουν διαφορετικές επιδράσεις για την επόμενη πεντηκονταετία (2000-2049) και την μεθεπόμενη (2050-2100) και οι επιδράσεις αυτές εξαρτώνται από την παράκτια περιοχή. Για παράδειγμα, για την περίοδο 2000-2050 αρχικά αποτελέσματα δείχνουν την αύξηση του ακραίου σημαντικού ύψους κύματος σε σχέση με το παρόν κλίμα. Στην πλειοψηφία των περιοχών που μελετώνται, οι ακραίες τιμές της μετεωρολογικής παλίρροιας παρουσιάζουν σημαντική αύξηση το διάστημα 2000-2050 σε σχέση με το παρόν κλίμα (στην περιοχή του Θρακικού (14%) και Β. Αιγαίου (19%) για περίοδο επαναφοράς 50 ετών). Στην περιοχή του Β. Αιγαίου και για περίοδο επαναφοράς 100 έτη, η αύξηση της ακραίας μετεωρολογικής παλίρροιας φτάνει και το 19.7% στην παράκτια περιοχή της Λέσβου. Η αντίστοιχη αύξηση στην περιοχή του Θρακικού Πελάγους προσεγγίζει το 15.5%. Την πεντηκονταετία (2050-2099) παρατηρείται μείωση των ακραίων τιμών της μετεωρολογικής παλίρροιας στις περισσότερες περιοχές. Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων στη μελέτη του Κόκκινου κ.α. (2014) στα πλαίσια του ίδιου ερευνητικού προγράμματος, προκύπτει πως οι βόρειες ακτές της Κρήτης είναι ιδιαίτερα τρωτές σε κατάκλυση. Όσον αφορά τη μακροχρόνια μεταβλητότητα της μέσης στάθμης της θάλασσας για το Κρητικό Πέλαγος κατά τη διάρκεια των δύο τελευταίων δεκαετιών από δορυφορικά δεδομένα υπολογίστηκε άνοδος ίση με 3,1 mm/year (Πρίνος, 2014).

Ημερομηνία	Χώρα	Αριθμός θανάτων
15/12/1999	Βενεζουέλα	30.000
12/6/2013	Ινδία	6.054
1/7/1998	Κίνα	3.656
30/6/1996	Κίνα	2.775
23/5/2004	Αιτή	2.665
19/10/1997	Σομαλία	2.311
05/1994	Ινδία	2.001
28/7/2010	Πακιστάν	1.985
08/1998	Ινδία	1.811
1/6/1991	Κίνα	1.729

**Πίνακας 2.1** Οι μεγαλύτερες πλημμύρες παγκοσμίως το διάστημα 1990-2016 με βάση τις απώλειες σε ανθρώπινες ζωές (πηγή: www.emdat.be)

\_

Ημερομηνία	Χώρα	Συνολική οικονομική ζημιά ('000 US\$)
5/8/2011	Ταϋλάνδη	40.000.000
1/7/1998	Κίνα	30.000.000
29/5/2010	Κίνα	18.000.000
09/2014	Ινδία	16.000.000
1/8/1995	Νότια Κορέα	15.000.000
28/5/2013	Γερμανία	12.900.000
30/6/1996	Κίνα	12.600.000
24/6/1993	НПА	12.000.000
11/8/2002	Γερμανία	11.600.000
9/6/2008	НПА	10.000.000

**Πίνακας 2.2** Οι μεγαλύτερες πλημμύρες παγκοσμίως το διάστημα 1990-2016 με βάση τις συνολικές οικονομικές απώλειες (πηγή: www.emdat.be)

Σ' αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να ακολουθήσει μια σύντομη παρουσίαση της θεωρίας των βασικότερων εννοιών που μελετώνται κυρίως στην παρούσα εργασία, δηλαδή αυτή της μεταφοράς των ιζημάτων (sediment transport) και της αναρρίχησης κύματος (wave run-up).

#### 2.2 Μεταφορά ιζημάτων

Η μετακίνηση των ιζημάτων στην ακτή είναι ένα περίπλοκο φαινόμενο. Η υδροδυναμική κατάσταση κοντά στον πυθμένα, όταν υπάρχουν κυματισμοί ή ρεύματα ή και τα δύο, αποτελεί τον ουσιαστικό παράγοντα αποσταθεροποίησης των κόκκων των ιζημάτων. Είναι άγνωστο και πολύπλοκο το τι συμβαίνει σε επίπεδο κόκκου. Οι διάφορες συνιστώσες που δρουν πάνω σε έναν κόκκο της επιφάνειας του πυθμένα, δηλαδή οι ορθές και διατμητικές τάσεις από το κινούμενο νερό, η αντίδραση στήριξης σε άλλους κόκκων, είναι δυνατών να δημιουργήσουν τις κατάλληλες δυναμικές συνθήκες αποκόλλησης των επιφανειακών κόκκων. Στην περίπτωση λεπτοκόκκων εδαφών, όπως αργιλικών, μοριακές δυνάμεις συνοχής (συνεκτικά εδάφη), κάνουν πιο δύσκολη την έναρξη της διάβρωσης του πυθμένα, ιδίως σε πυθμένες όπου έχει προχωρήσει διαδικασία στερεοποίησης.

Μετά την αποσταθεροποίηση των κόκκων η κίνησή τους γίνεται με δύο τρόπους: (α) όταν η κίνηση των κόκκων γίνεται με κύλιση στον πυθμένα ή διαδοχικά άλματα που συνεπάγονται περιοδική επαφή με τον πυθμένα, τότε η μεταφορά φερτών χαρακτηρίζεται σαν φορτίο πυθμένα (Σχήμα 2.1) (β) όταν οι κόκκοι των ιζημάτων βρίσκονται σχεδόν συνέχεια σε αιώρηση στη στήλη του νερού λόγω της τύρβης, του οριακού στρώματος (με ή χωρίς αμμοκυμάτια) και των θραυόμενων κυματισμών, τότε η μεταφορά φερτών χαρακτηρίζεται σαν φορτίο σε αιώρηση (Σχήμα 2.2).

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των κόκκων, των κυματισμών και των κυματογενών ρευμάτων, κυριαρχεί το ένα ή το άλλο φορτίο. Προφανώς, όσο πιο μεγάλη είναι η διάμετρος

των κόκκων τόσο πιο σημαντικό είναι το φορτίο πυθμένα. Η συνολική παροχή qt του φορτίου φερτών υλών είναι το άθροισμα της παροχής δύο επιμέρους φορτίων, του φορτίου πυθμένα qb και του φορτίου σε αιώρηση qs: qt=qb+qs (Καραμπάς κ.α., 2015).

Συνήθως οι κυματισμοί είναι οι κύριοι παράγοντες που προκαλούν την αποσταθεροποίηση των κόκκων και στη συνέχεια τα θαλάσσια ρεύματα αναλαμβάνουν τη μεταφορά τους σε μεγάλες οριζόντιες αποστάσεις. Η τυρβώδης ροή του ρεύματος και των (θραυόμενων και μη) κυματισμών συμβάλλει στην κατακόρυφη διάχυση των φερτών σε αιώρηση, σε συνεργασία με τις περιοδικές τροχιές των κυματισμών που επαυξάνουν την κατακόρυφη διάχυση. Ένα ποσοστό της κυματικής ενέργειας καταναλίσκεται στην αποκόλληση και κατακόρυφη διάχυση των κόκκων, και το ρεύμα με την τυρβώδη κινητική του ενέργεια συμπληρώνει τη διάχυση, αναλαμβάνοντας το κύριο μέρος της οριζόντιας μεταφοράς.

Από υδροδυναμική σκοπιά, οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς φερτών είναι (Καραμπάς κ.α., 2015):

- Μεταφορά λόγω των παράκτιων κυματογενών ρευμάτων: στην παράκτια ζώνη όπου οι (θραυόμενοι και μη) κυματισμοί συνυπάρχουν με το παράκτιο κυματογενές ρεύμα, η ροή κοντά στον πυθμένα αποσταθεροποιεί και θέτει σε κίνηση τους κόκκους των ιζημάτων. Αφού πραγματοποιηθεί η αποκόλληση των κόκκων, αυτοί μεταφέρονται προς την κατεύθυνση του ρεύματος (Σχήματα 2.1. και 2.2.).
- 2. Μεταφορά λόγω κυματικής ασυμμετρίας: λόγω της μη γραμμικής φύσης των κυματισμών η κίνηση των φερτών είναι και αυτή ασύμμετρη. Έτσι, κάτω από την κορυφή του κύματος, όπου η ταχύτητα είναι μεγάλη και έχει κατεύθυνση προς την ακτή, πραγματοποιείται μεγαλύτερη μεταφορά φερτών, με κατεύθυνση προς την ακτή, ενώ κάτω από την κοιλιά, όπου η ταχύτητα είναι μικρότερη και έχει φορά προς τα ανοιχτά, πραγματοποιείται μικρότερη στερεομεταφορά με κατεύθυνση προς τα ανοιχτά. Σαν συνολικό (μέσο ως προς την περίοδο του κύματος) αποτέλεσμα έχουμε τη μεταφορά φερτών στη διεύθυνση μετάδοσης των κυματισμών (Σχήμα 2.3).
- 3. Μεταφορά λόγω δευτερογενών κυματογενών ρευμάτων (Σχήμα 2.4):
  - του τρισδιάστατου ρεύματος επαναφοράς (undertow) με κατεύθυνση προς τα ανοιχτά
  - του ρεύματος κοντά στον πυθμένα, στο οριακό στρώμα του κυματισμού με κατεύθυνση την κατεύθυνση μετάδοσης του κυματισμού.

Ο μηχανισμός αυτός είναι ίδιος με αυτόν της  $1^{\eta\varsigma}$  περίπτωσης, εφόσον τα ρεύματα αυτά συνυπάρχουν με το πρωτογενές κυματογενές ρεύμα.



Σχήμα 2.1 Φορτίο πυθμένα (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)



Σχήμα 2.2 Φορτίο σε αιώρηση (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)



Σχήμα 2.3 Επίδραση της ασυμμετρίας του κυματισμού στη μέση στερεοπαροχή (Καραμπάς Θ. κ.α., 2015)



Σχήμα 2.4 Δευτερογενές ρεύμα εγκάρσια στην ακτή και μεταφορά φερτών (Καραμπάς κ.α., 2015)

Ελάχιστες παραλίες έχουν σταθερή ακτογραμμή κατά τη διάρκεια ενός ολοκληρωμένου, από φυσικές διεργασίες, χρονικού διαστήματος πχ. μερικά χρόνια. Η εισαγωγή και εξαγωγή ιζήματος από την παραλία είναι μια συνεχής διαδικασία. Όταν υπερτερεί η πρώτη τότε έχουμε πρόσχωση της ακτογραμμής, δηλαδή μετακίνησή της προς τη μεριά της θάλασσας, ενώ όταν υπερτερεί η εξαγωγή ιζήματος έχουμε διάβρωση, δηλαδή μετακίνηση της ακτογραμμής προς τη στεριά, η οποία μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στον αφανισμό αμμωδών παραλιών. Επίσης όταν η μεταφορά των φερτών υλών συμβαίνει παράλληλα στην ακτογραμμή πρόκειται για τη λεγόμενη παράκτια στερεομεταφορά, διαφορετικά πρόκειται για εγκάρσια στερεομεταφορά.

Η παράκτια και η εγκάρσια μεταφορά φερτών υλών σε μικρό πλάτος της παράκτιας θαλάσσιας ζώνης έχουν ιδιαίτερη σημασία και σοβαρά μορφολογικά επακόλουθα για τις ακτές. Η εκτίμηση του ετήσιου ισοζυγίου φερτών υλών σε ένα τμήμα της ακτής, που είτε είναι εκ φύσεως προβληματικό είτε κινδυνεύει από τις αναδράσεις της φύσης πάνω σε σχεδιαζόμενο τεχνικό έργο, αποτελεί ένα σοβαρό τεχνικό πρόβλημα.

Σε ένα τμήμα μιας ακτής, το οποίο εξελίσσεται μορφοδυναμικά λόγω στερεομεταφορών ανεξάρτητα από την υπόλοιπη ακτή, είναι δυνατόν να περιέχονται πολλές πηγές (sources) και πολλές παγίδες (sinks) φερτών υλών. Οι κυριότερες πηγές και παγίδες φερτών υλών (Καραμπάς κ.α. 2015) είναι οι εξής (Σχήμα 2.5):

α. Πηγές – αίτια πρόσχωσης

- Τα υδατορεύματα αποτελούν την κυριότερη πηγή φερτών, καθώς μεταφέρουν σημαντικές ποσότητες φερτών υλών ετησίως. Το υλικό αυτό προέρχεται από τη διάβρωση χερσαίων εκτάσεων της γης και ένα μεγάλο μέρος του είναι αργιλώδες και ιλυώδες, ενώ ένα ποσοστό είναι άμμος. Τα πλέον χονδρόκοκκα παραμένουν στις ακτές, ενώ τα υπόλοιπα καθιζάνουν σε μεγαλύτερα βάθη
- Η διάβρωση απότομων γαιωδών πρανών σε ακτές, κάτω από τη δράση της βροχής και τους χειμερινούς κυματισμούς, έχει σαν αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό τους με χερσογενή ιζήματα.
- Η μεταφορά κόκκων από τους ανέμους, η βιογενής απόθεση από κελύφη νεκρών θαλάσσιων οργανισμών (κοράλλια τροπικών θαλασσών) και η τεχνητή τροφοδοσία ακτών είναι συμπληρωματικές πηγές φερτών υλών.
- Η τεχνητή τροφοδότηση των ακτών, δηλαδή η τεχνητή επαναπλήρωση των φερτών με υλικό που μεταφέρεται από βαθύτερα, από άλλες ακτές ή ακόμα και από δανειοθαλάμους στην ξηρά. Η τεχνητή τροφοδότηση αποτελεί μια μέθοδο αντιμετώπισης της διάβρωσης των ακτών.

β. Παγίδες φερτών υλών – αίτια διάβρωσης

- Τα παλιρροϊκά στόμια, στα οποία οι προς τα έσω στερεοπαροχές κατά την πλημμυρίδα είναι μεγαλύτερες από αυτές προς τα έξω κατά την αμπώτιδα.
- Τα υφαλοπρανή και τα υποβρύχια φαράγγια, στα οποία παγιδεύονται, οδηγούμενα προς τα ανοιχτά, μεγάλες ποσότητες φερτών υλών.
- Η ανεμογενής ή κυματογενής μεταφορά προς την εσωτερική ζώνη των αμμοθινών, η λείανση από τριβή ανθρακικών υλικών της ακτής (όχι χαλαζιακών) και τέλος οι αμμοληψίες είναι επίσης περιοχές αφαίρεσης φερτών υλών σε φυσικές συνθήκες.
- Εγκάρσια στερεομεταφορά από τους χειμερινούς κυματισμούς που μεταφέρουν τα ιζήματα προς τα ανοιχτά. Εάν αυτά μεταφερθούν σε μεγάλα βάθη, οι θερινοί κυματισμοί μπορεί να μην είναι ικανοί να τα επανεναποθέσουν στην ακτή.
- Προσχώσεις στα σημεία καμπής των ακτών, όπου μεταφέρονται και εναποτίθενται φερτά. Συχνά τα φερτά αυτά δεν μπορούν να επιστρέψουν πίσω στην ακτή, λόγω της μη ύπαρξης κατάλληλων κυματικών συνθηκών.
- Τα παράκτια τεχνικά έργα, τα οποία προβάλλουν μέσα στη ζώνη θραύσης της κυρίαρχης στερεομεταφοράς, με αποτέλεσμα την κατακράτηση μέρους των κατά μήκος της ακτής κινούμενων μαζών ιζημάτων. Με εξαίρεση την περίπτωση κατά την οποία η αποστολή των έργων είναι να εμπλουτίσουν μια διαβρούμενη ακτή, τέτοιες παγιδεύσεις είναι άχρηστες (π.χ. παγίδευση φερτών και ρήχωση λιμενολεκάνης).

- Διακοπή ή ελάττωση της ποσότητας των χερσογενών ιζημάτων που τροφοδοτούν τις ακτές. Η κατασκευή φραγμάτων, η οικιστική δόμηση, η κατασκευή δρόμων, οι αγροτικές καλλιέργειες συγκρατούν το χερσογενές ίζημα που προέρχεται από τις διαβρώσεις των εδαφών της ενδοχώρας και μεταφέρεται στις ακτές μέσω των ποταμών και των χειμάρρων. Έτσι εμποδίζεται η φυσική τροφοδότησή των ακτών με αποτέλεσμα τη διάβρωσή τους.
- Θαλάσσιοι τοίχοι προστασίας της ακτής. Η κατασκευή των θαλάσσιων τοίχων οδηγεί κατά κανόνα στη διάβρωση των ακτών γιατί συνοδεύεται γενικά από μείωση του εύρος της ακτής, με συνέπεια τη μείωση του πλάτους της ζώνης θραύσης και αναρρίχησης. Το γεγονός αυτό αποτρέπει την απώλεια σημαντικής κυματικής ενέργειας στη διεργασία της θραύσης, αλλά να προσπίπτει στο θαλάσσιο τοίχο. Κατόπιν, ένα μεγάλο μέρος της ανακλάται από αυτόν, παρασέρνοντας προς τα ανοιχτά το ίζημα και οδηγώντας σε περαιτέρω διάβρωση.
  - στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής αναπλήρωση εγκάρσια στερεομεταφορά (μαράγγι) μαράγγι)
- Εξόρυξη άμμου για διάφορες χρήσεις.

Σχήμα 2.5 Παράγοντες ισοζυγίου φερτών υλών (Καραμπάς κ.α., 2015)

απώλειες

Οι μεταβολές βέβαια που προκαλούνται είτε από φυσικά είτε από ανθρωπογενή αίτια δεν συμβαίνουν μέσα στο ίδιο χρονικό διάστημα. Αντιθέτως αυτό κυμαίνεται πάρα πολύ: από μερικές ώρες έως χιλιετίες. Ένας χονδρικός διαχωρισμός τους μπορεί να γίνει στις εξής κατηγορίες (Δουκάκης 2007): στις μακροπρόθεσμες, βραχυπρόθεσμες και στιγμιαίες αλλαγές. Οι πρώτες αφορούν μεταβολές οι οποίες έχουν ορατό αποτέλεσμα σε διάστημα 50
χρόνων και περισσότερο, όπως πχ η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας. Οι βραχυπρόθεσμες μπορούν να συμβούν σε διάστημα της τάξης των 10 χρόνων ή και λιγότερο και μάλιστα να συμβεί να είναι αντίθετες των μακροπρόθεσμων. Οι στιγμιαίες μεταβολές, οι οποίες μελετώνται στην παρούσα εργασία, αφορούν περιπτώσεις ακραίων καιρικών φαινομένων (πχ κύματα καταιγίδας) τα οποία είναι δυνατόν να επιφέρουν αλλαγή στη θέση της ακτογραμμής κατά δεκάδες μέτρα μέσα σε λίγες ώρες. Στον Πίνακα 4.1 καταγράφονται ορισμένες φυσικές διεργασίες οι οποίες μπορούν να έχουν ως αποτέλεσμα τη διάβρωση ή την πρόσχωση της ακτής με την αντίστοιχη κλίμακα του χρόνου στον οποίο μπορούν να συμβούν.

Φυσικό αίτιο	Αποτέλεσμα	Κλίμακα χρόνου
Ιζήματα παραλίας	Διάβρωση/πρόσχωση	Δεκαετίες ως χιλιετίες
Άνοδος της στάθμης της θάλασσας	Διάβρωση	Αιώνες ως χιλιετίες
Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας	Διάβρωση	Μήνες έως χρόνια
Κύματα καταιγίδας	Διάβρωση	Ώρες έως ημέρες
Κύματα μεγάλου ύψους	Διάβρωση	Ωρες έως μήνες
Κύματα μικρής περιόδου	Διάβρωση	Ωρες έως μήνες
Ομαλά κύματα	Πρόσχωση	Ώρες έως μήνες
Ρεύματα κατά μήκος της ακτής	Διάβρωση/Καμία αλλαγή/πρόσχωση	Ώρες έως χιλιετίες
Ρεύματα διαφυγής	Διάβρωση	Ώρες έως μήνες
Υπόγεια ροή	Διάβρωση	Ώρες έως ημέρες
Ζώνη κυματαγωγής	Διάβρωση	Ώρες έως ημέρες
Άνεμος	Διάβρωση	Ωρες έως αιώνες
Βύθιση, συμπίεση	Διάβρωση	Χρόνια έως χιλιετίες
Τεκτονική βύθιση	Διάβρωση/πρόσχωση	Στιγμιαία ή αιώνες έως χιλιετίες

Πίνακας 4.1 Τα φυσικά αίτια διάβρωσης ή πρόσχωσης της ακτής και οι αντίστοιχοι χρόνοι στους οποίους είναι δυνατόν να συμβούν (Δουκάκης, 2007).

Οι κλιματικές αλλαγές (ή μεταβολές της τάξης των μερικών ετών/δεκαετιών) επηρεάζουν το ισοζύγιο των φερτών σε μια ακτή προκαλώντας μορφολογικές μεταβολές, συνήθως διαβρώσεις. Οι κυριότερες αιτίες των διαβρώσεων εξαιτίας των κλιματικών αλλαγών/μεταβολών θεωρούνται οι παρακάτω:

1. Μεταβολή στη συχνότητα εμφάνισης και έντασης των ανέμων

Έστω μια ακτή όπου (όπως κατά το πλείστο των περιπτώσεων) είχε αποκατασταθεί μια δυναμική ισορροπία τις τελευταίες δεκαετίες (ή ακόμη και αιώνες) με ισορροπημένο ισοζύγιο φερτών υλών ή με συστηματικές διαβρώσεις ή προσαμμώσεις με ήπιους ρυθμούς. Στην ακτή

αυτή δηλαδή, οι κυματισμοί που επικρατούσαν στο παρελθόν, σε συνδυασμό με τις παγίδες/πηγές των φερτών, επέφεραν έναν τέτοιο προσανατολισμό της ακτογραμμής και της βαθυμετρίας ώστε να προκύπτει σχεδόν ισορροπία ισοζυγίου. Με τις κλιματικές αλλαγές στη συχνότητα εμφάνισης και στην ένταση των ανέμων, μπορεί να διαταραχθεί το υφιστάμενο ισοζύγιο της ακτής και να προκύψει έλλειμμα και συνεπώς διάβρωση της ακτής. Προφανώς η διάβρωση θα συνοδεύεται από πρόσχωση σε άλλη ακτή ή μεταφορά σε μια από τις παγίδες φερτών που προαναφέρθηκαν.

### 2. Δράση μεγάλου ύψους κυματισμών

Τον χειμώνα, οι μεγάλου ύψους κυματισμοί μεταφέρουν την άμμο εγκάρσια στην ακτή, προς τα ανοιχτά, διαβρώνοντας την ακτή. Το καλοκαίρι, μεταφέρεται η άμμος προς την ακτή από τους ήπιους κυματισμούς και το swell και αποκαθίσταται (πρόσχωση, θερινό προφίλ). Ωστόσο, λόγω κλιματικής αλλαγής, μπορεί να διαταραχθεί η παραπάνω ισορροπία. Εάν εμφανιστούν ακραία καιρικά φαινόμενα (δηλαδή κυματισμοί μεγάλου ύψους), η άμμος μπορεί να μεταφερθεί αρκετά βαθιά, βαθύτερα από ό,τι στο παρελθόν, και σε βάθη μεγαλύτερα του βάθους «κλεισίματος». Από τα βάθη αυτά είναι πιθανόν να μη μπορεί να επιστρέψει, με τους θερινούς κυματισμούς και το swell, με αποτέλεσμα να μη συντελεστεί πλήρως η διεργασία της πρόσχωσης και να μην αποκατασταθεί η πραγματοποιούμενη διάβρωση.

3. Αύξηση μέσης στάθμης της θάλασσας

Μελλοντικά, κάτω από συνθήκες μόνιμης ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας λόγω των κλιματικών μεταβολών (λιώσιμο των πάγων και θερμοκρασιακή διαστολή λόγω της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας), το προφίλ ισορροπίας θα πρέπει να είναι παρόμοιο με το υφιστάμενο εφόσον το υλικό της ακτής και οι κυματικές συνθήκες δεν μεταβληθούν σημαντικά. Ωστόσο, η διαμόρφωση ενός περίπου ίδιου προφίλ οδηγεί σε διάβρωση της ακτής.

4. Μεταβολές στην ένταση και συχνότητα βροχοπτώσεων

Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν τις διαβρώσεις των εδαφών της ενδοχώρας και συνεπώς και τη φυσική τροφοδότηση των ακτών με χερσογενές ίζημα, που πραγματοποιείται μέσω των ποταμών και των χειμάρρων.

Σε πολλές παράκτιες περιοχές τα αίτια της διάβρωσης βρίσκονται συνήθως στον συνδυασμό των παραπάνω παραγόντων, με κάθε παράγοντα να επηρεάζει με διαφορετική βαρύτητα το φαινόμενο.

## 2.3 Αναρρίχηση κύματος

Όταν τα κύματα προσπίπτουν σε ένα θαλάσσιο μέτωπο υπερυψώνονται. Η μέγιστη υπερύψωση της κορυφής του κύματος πάνω από τη στάθμη ηρεμίας της θάλασσας (Σ.Η.Θ.) κατά την επαφή του με το μέτωπο ορίζεται ως αναρρίχηση κύματος, R (διεθνώς wave runup). Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέγεθος για την αναρρίχηση είναι η παράμετρος  $R_{u2\%}$ , η οποία ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της ήρεμης επιφάνειας της θάλασσας και του υψομέτρου που υπερβαίνει το 2% των κυμάτων. Με άλλα λόγια, για κάθε 100 κύματα που αναρριχώνται σε μια ακτή, 2 κύματα θα υπερβούν με την αναρρίχηση τους το επίπεδο που ορίζει η τιμή  $R_{u2\%}$  (Hughes S., 2003). Αυτή είναι και η τιμή που υπολογίζει το XBeach.

Η αναρρίχηση κύματος αποτελεί στην ουσία το άθροισμα της τοπικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας (wave setup) και του ύψους διαβροχής (wave swash/uprush) και αποτελεί το

μέγιστο επίπεδο που φτάνουν τα κύματα σε σχέση με την στάθμη της θάλασσας σε ηρεμία (Εικόνα 4.1) (Ορισμοί διεθνώς: wave run-down: The lower level reached by (swash and) backwash of a wave on a beach, or coastal structure wave run-up: The upper level reached by a wave on a beach, or coastal structure). Το φαινόμενο της τοπικής ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας (wave set-up) προκαλείται από τη μείωση του ύψους κύματος στη ζώνη κυματαγωγής (surf-zone) και είναι ανάλογη του ύψους κύματος τη στιγμή της θραύσης. Αντίστοιχα η έννοια της διαβροχής αναφέρεται στην αναπαραγωγή κυμάτων επί την κλίση της ακτής περιλαμβάνοντας μια επιβραδυνόμενη ανοδική ροή (uprush/ swash) προς την ακτή και μια επιταχυνόμενη καθοδική ροή προς την θάλασσα (downrush/backwash). Ως ζώνη διαβροχής (swash zone) ορίζεται η περιοχή δράσης των κυμάτων επί της ακτής (Εικόνα 4.2) η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με το επίπεδο του νερού, έχοντας ως όρια το ανώτατο και το κατώτατο σημείο που φτάνουν τα κύματα (run-up και run-down) (πηγή: coastalwiki.org).



Εικόνα 4.1 Ορισμός της αναρρίχησης κύματος (πηγή: hurricanescience.org)



Εικόνα 4.2 Ορισμός ζωνών της παράκτιας περιοχής (πηγή: tulane.edu)

## 2.4 Το ερευνητικό πρόγραμμα PEARL

Μεγάλη προσπάθεια γίνεται από πλήθος διεπιστημονικών ομάδων οι οποίες στοχεύουν μέσα από τη δράση τους στην εύρεση αποτελεσματικών στρατηγικών για την προστασία της παράκτιας ζώνης και την προσαρμογή της στις νέες περιβαλλοντικές συνθήκες. Μερικά από τα σημαντικότερα χρηματοδοτούμενα προγράμματα που ασχολούνται με τη διαχείριση του κινδύνου πλημμύρας είναι τα Risc-Kit, Micore και Corfu. Σ' αυτές τις προσπάθειες ανήκει και το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα PEARL, το οποίο μεταξύ άλλων περιοχών περιλαμβάνει και τη μελέτη για την προστασία της παράκτιας περιοχής του Ρεθύμνου. Καθώς το αντικείμενο της παρούσας μελέτης υλοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος PEARL, ακολουθεί μια αναλυτικότερη περιγραφή της δομής και των στόχων του προγράμματος αυτού.

Η μελέτη λοιπόν και διαχείριση των πλημμυρικών φαινομένων στην πόλη του Ρεθύμνου, με σκοπό τη μείωση της πιθανότητας μιας πλημμύρας και των πλημμυρικών επιπτώσεων, είναι μία από τις 11 περιοχές μελέτης που περιλαμβάνει το πρόγραμμα PEARL (Preparing for Extreme And Rare events in coastaL regions), ένα ερευνητικό πρόγραμμα με χρηματοδότηση από την Ευρωπαϊκή Ένωση, με στόχο ολοκλήρωσης το 2018. Το πρόγραμμα αυτό στοχεύει στην ανάπτυξη και εφαρμογή ενός ολοκλήρωμένου πλαισίου για τις παράκτιες κοινωνίες με στρατηγικές ανάλογα με την περιοχή και την περίπτωση του φαινομένου για την διαχείριση του κινδύνου από ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα, μειώνοντας στο ελάχιστο τις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αυξάνοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα των παράκτιων περιοχών (Makropoulos et al.,2015). Η ανάγκη για την ύπαρξη και εφαρμογή ενός τέτοιου σχεδίου γίνεται πλήρως κατανοητή αν ληφθούν υπόψη οι καταστροφές που έχουν επιφέρει οι πλημμύρες ανά τον κόσμο τόσο σε κοινωνικό όσο και οικονομικό επίπεδο.

Το πρόγραμμα ξεκίνησε εξετάζοντας παράκτιες περιοχές μόνο στην περιοχή της Ευρώπης, πλέον όμως περιλαμβάνει και περιοχές μελέτης και από άλλες ηπείρους,, με έξι (6) περιοχές μελέτης να βρίσκονται στον Ευρωπαϊκό χώρο και πέντε (5) στις περιοχές της Ασίας και της Καραϊβικής. Συγκεκριμένα, οι παράκτιες περιοχές μελέτης που ανήκουν στο πρόγραμμα είναι (Χάρτης 2.1): Γκρέβε (Greve, Δανία), the Elbe Estuary (Αμβούργο, Γερμανία), Les Boucholeurs (Γαλλία), Γένοβα (Genoa, Ιταλία), Μαρμπέλα (Marbella, Ισπανία), Ρέθυμνο (Ελλάδα), St. Lucia, St. Maarten, Τοχόκου (Tohoku, Ιαπωνία), Μπανγκόκ (Bangkok, Ταϊλάνδη) και Ταιβάν (Taiwan).



**Χάρτης 2.1** Οι εξεταζόμενες παράκτιες περιοχές του προγράμματος Pearl (πηγή: http://www.pearl-fp7.eu/casestudies/)

Πιο αναλυτικά, οι στόχοι του προγράμματος είναι οι εξής (Makropoulos et al., 2014):

- Ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ευέλικτων προσεγγίσεων που ελαχιστοποιούν τις οικονομικοκοινωνικές απώλειες και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και ενισχύουν την ανθεκτικότητα των παράκτιων περιοχών έναντι ακραίων καιρικών φαινομένων
- Η βελτίωση της πρόγνωσης και των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για πιθανή εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων μέσω καινοτόμων τεχνολογιών και μεθοδολογιών ρεαλιστικά προσαρμοσμένες στα πραγματικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι παράκτιες κοινωνίες
- Η ανάπτυξη ενός περιεκτικού πλαισίου μείωσης της διακινδύνευσης το οποίο είναι ικανό να αναγνωρίζει όλες τις πιθανές περιπτώσεις κινδύνου και η ανάπτυξη στρατηγικών που μπορούν με το ελάχιστο δυνατό κόστος να μειώσουν αποτελεσματικά την τρωτότητα των παράκτιων περιοχών
- Η ενδυνάμωση της κυβερνητικής πολιτικής και του ρόλου όλων των εμπλεκομένων (δημοτικές αρχές, τοπικές κοινωνίες) σε σχέδια ανταπόκρισης μετά από έγκαιρη προειδοποίηση
- Η δημιουργία μιας βάσης δεδομένων από όλο τον κόσμο που θα παρέχει στοιχεία και πληροφορίες από πραγματικές περιοχές μελέτες, τις πρακτικές που εφαρμόστηκαν και τα αποτελέσματά τους ώστε να αποτελέσουν γνώση για μελλοντικές περιπτώσεις.

Το πρόγραμμα PEARL, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, είναι οργανωμένο σε οχτώ πακέτα εργασίας. Συνοπτικά, το 1° Πακέτο Εργασίας (ΠΕ1) περιλαμβάνει την κατανόηση των γενεσιουργών παραγόντων της τρωτότητας και των συνθηκών της επικινδυνότητας που αποτελεί βασική προϋπόθεση για την ετοιμότητα αντιμετώπισης καταστροφών και τη διαχείριση των επιπτώσεων. Στο 2° Πακέτο Εργασίας (ΠΕ2) υπάρχει ο στόχος ανάπτυξης ενός πλαισίου χαρακτηρισμού των ακραίων γεγονότων, η ανάλυση της κλιματικής αλλαγής και της αύξησης του επιπέδου της θαλάσσιας επιφάνειας, η εκτίμηση των επιπτώσεων και των μελλοντικών καταστροφών και τέλος η εφαρμογή αυτών σε περιοχές μελέτης. Το 3° Πακέτο Εργασίας (ΠΕ3) ασχολείται με την ανάπτυξη ενός πλαισίου για την ολιστική και πολλαπλή αξιολόγηση των κινδύνων (στρατηγικών και επιχειρησιακών). Το 4° Πακέτο

Εργασίας (ΠΕ4) είναι αφιερωμένο στην υπέρβαση των ορίων των μοντέλων, στην πρόγνωση των πλημμυρών και στην έγκαιρη προειδοποίηση των παράκτιων περιοχών. Ο στόχος του 5<sup>ου</sup> Πακέτου Εργασίας (ΠΕ5) είναι να αναπτύξει και να δοκιμάσει μια διαδραστική διαδικτυακή μάθηση και το σχεδιασμό μιας πλατφόρμας, μέσω της οποίας τα ενδιαφερόμενα μέρη θα αλληλεπιδρούν με τις βασικές διεργασίες του PEARL, εργαλείων, μεθόδων και πλαισίων. Στη συνέχεια, θα επικεντρωθεί στην υποστήριξη λήψης αποφάσεων για τη χάραξη πολιτικής και στη συνεργασία της επιστήμης και της πολιτικής με έμφαση στη διαχείριση των κινδύνων. Το 6<sup>ο</sup> Πακέτο Εργασίας (ΠΕ6) προσπαθεί να καταστήσει δυνατή την αποτελεσματική διαχείριση και διεξαγωγή των εργασιών, που θα διεξαχθούν στις περιοχές μελέτης. Επίσης, θα είναι αφιερωμένο στην αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας του PEARL για την ολιστική διαχείριση του κινδύνου και της διακυβέρνησης στις παράκτιες περιοχές μελέτης. Τέλος, τα Πακέτα Εργασίας 7 και 8 (ΠΕ7, ΠΕ8) βοηθούν στην παρουσίαση και οργάνωση όλων των που παρήχθησαν από το πρόγραμμα.



Σχήμα 2.1 Τα πακέτα εργασίας του προγράμματος PEARL (πηγή: http://www.pearl-fp7.eu/)

# 3. Παρουσίαση της Περιοχής Μελέτης

Το Ρέθυμνο είναι πρωτεύουσα του νομού Ρεθύμνου της Κρήτης (Εικόνα 3.1) και έδρα του ομώνυμου Δήμου της περιφέρειας Κρήτης (πρόγραμμα Καλλικράτης) και η τρίτη μεγαλύτερη πόλη του νησιού μετά το Ηράκλειο και τα Χανιά. Ο πληθυσμός του ανέρχεται στους 34.300 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2011, εμφανίζει έντονη τουριστική κίνηση κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ οι 10.500 και πλέον ενεργοί φοιτητές καθιστούν την πόλη ιδιαίτερα ζωντανή και κατά την υπόλοιπη περίοδο. Η οικονομία στηρίζεται κυρίως στον τουρισμό, καθώς υπάρχουν πολλά αξιοθέατα όπως το ενετικό λιμάνι (Εικόνα 3.2) και φρούριο (ενετικό κάστρο Φορτέτζα), μεγάλη αμμώδης παραλία και ισχυρή ξενοδοχειακή υποδομή. Γι' αυτό το λόγο, οι περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες της πόλης αναπτύσσονται γύρω από το λιμάνι και το παράκτιο μέτωπο.



Εικόνα 3.1 Η Κρήτη και η πόλη του Ρεθύμνου (πηγή: Google Earth)



**Εικόνα 3.2** (α) Ελαιογραφία του πρώτου μισού του 17<sup>ου</sup> αι. (αγνώστου), βρίσκεται στο Δημαρχείο Ρεθύμνου. (β) Το ενετικό λιμάνι σήμερα (πηγή: www.i-diadromi.gr)

## 3.1. Το πρόβλημα-Ιστορικές πλημμύρες

Οι πλημμύρες ήταν πάντα ένα σοβαρό πρόβλημα που αντιμετώπιζε το Ρέθυμνο, απειλώντας τους κατοίκους, τα κτίρια και τη δημόσια περιουσία. Μεγάλες πλημμύρες έχουν σημειωθεί κατά καιρούς τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας ζημιές κυρίως στην παλιά πόλη του Ρεθύμνου και στις χαμηλού υψομέτρου περιοχές στα ανατολικά (Εικόνες 3.3-3.4). Επιπρόσθετα, οι αλλαγές στις συνθήκες του ανέμου, κατά πάσα πιθανότητα λόγω της κλιματικής αλλαγής, είχαν ως αποτέλεσμα την πρόκληση θυελλωδών φαινομένων συχνότερα σε σχέση με το παρελθόν. Σύμφωνα με το αρχείο του προγράμματος PEARL, οι τελευταίες σημαντικές καταιγίδες σημειώθηκαν στο Ρέθυμνο στις 18 Μαρτίου 2014, 24 Οκτωβρίου 2014, 13 Ιανουαρίου 2015 και 10 Φεβρουαρίου 2015, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

A/A	Ημερομηνία πλημμύρας
1	20-21/11/1964
2	05-07/10/1989
3	28-29/11/2000
4	11/12/2010
5	28/02/2012
6	03/12/2013
7	11/12/2013
8	18/3/2014
9	24/10/2014
10	13/01/2015
11	10/02/2015

**Πίνακας 3.1** Καταγεγραμμένα πλημμυρικά γεγονότα στο λιμάνι του Ρεθύμνου (πηγή: http://www.pearl-fp7.eu /casestudies/greece/)

Ως αποτέλεσμα των ακραίων κυμάτων παρατηρήθηκαν ακραίες κυματικές υπερπηδήσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5, κατά μήκος των προσήνεμων κυματοθραυστών του λιμανιού, οι οποίες απειλούν τη σταθερότητα των κυματοθραυστών, καθώς και την ασφάλεια του ανθρώπινου πληθυσμού. Οι κυματικές υπερπηδήσεις οδηγούν επίσης σε πλημμύρα της επιφάνειας του λιμανιού. Περαιτέρω μεγάλες ποσότητες θαλασσινού νερού (Εικόνα 3.6) εισέρχονται από τα δυτικά (στη θέση του χώρου στάθμευσης), οι οποίες πλημμυρίζουν την επιφάνεια του λιμανιού, καθώς και την ευρύτερη παράκτια περιοχή, προκαλώντας διακοπή στις διαδικασίες φόρτωσης και εκφόρτωσης, καταστροφή στις λιμενικές εγκαταστάσεις και στο εμπορικό τμήμα του λιμένα, κυκλοφοριακά προβλήματα και καταστροφές στα παράκτια καταστήματα και εστιατόρια. Επιπλέον, οι παραλίες δίπλα στον λιμένα είναι εκτεθειμένες στη διάβρωση, γεγονός το οποίο καταστρέφει την ακτογραμμή και επηρεάζει αρνητικά τη συμβολή του τουρισμού της παράκτιας περιοχής στην τοπική οικονομία.

Η εμφάνιση ακραίων υδρομετεωρολογικών γεγονότων αποτελεί πραγματική απειλή για την κοινότητα του Ρεθύμνου και κάνει όλο και πιο έντονη την ανάγκη για ειδικούς επιχειρησιακούς οδικούς χάρτες επέμβασης, οι οποίοι θα ενισχύσουν την υπάρχουσα υποδομή και τις επιχειρησιακές στρατηγικές για τον κίνδυνο πλημμυρών, βοηθώντας τους αρμοδίους φορείς να αναγνωρίσουν τις περιοχές που είναι πιο ευάλωτες στις πλημμύρες και να καθορίσουν μια αποτελεσματική στρατηγική διαχείριση των πλημμυρών λαμβάνοντας υπόψη περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά κριτήρια για το Ρέθυμνο.



**Εικόνα 3.3** Ιστορική πλημμύρα στο Ρέθυμνο, 28 Οκτωβρίου 1991 (πηγή: Αρχοντάκης Δ., 2013)



Εικόνα 3.4 Πλημμυρισμένοι δρόμοι, 25/10/2014 (πηγή: flashnews.gr)



Εικόνα 3.5 Ζημιές στον προσήνεμο κυματοθραύστη (α) υπάρχουσες ζημιές, φωτογραφία στις 4/1/2014 (πηγή: προσωπικό αρχείο της Αρχοντίας Λύκου) (β) νέες ζημιές μετά από επιδιορθώσεις, φωτογραφία στις 14/1/2015 (πηγή: RethemnosNews.gr)



**Εικόνα 3.6** (α) Κατάκλυση του θαλασσινού νερού μέσω κυματικής υπερπήδησης (overtopping) στην ευρύτερη περιοχή των λιμενικών εγκαταστάσεων (πηγή: protothema.gr) (β) συντρίμμια από τη ζημιά που προκλήθηκε στον προσήνεμο κυματοθραύστη (πηγή: rethemnos.gr)

## 3.2 Περιγραφή της Περιοχή Μελέτης

Η περιοχή που μελετάται στην παρούσα εργασία (Εικόνα 3.1) περιλαμβάνει το λιμάνι, το οποίο βρίσκεται στη βόρεια πλευρά του νησιού στον ομώνυμο κόλπο και την παράκτια περιοχή που βρίσκεται ανατολικά του λιμανιού, μια ακτογραμμή μήκους περίπου 4 km (3760 m). Το σημείο αρχής του κανάβου (κάτω αριστερή γωνία) έχει συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87: (x, y) = (542361, 3913477). Ο κάναβος έχει διαστάσεις 5160x1500 m με διάσταση κελιού 5x5m και καλύπτει μια περιοχή έκτασης περίπου 8 km<sup>2</sup>, ενώ το μέγιστο βάθος είναι τα 23m. Εντός των ορίων λοιπόν αυτής της περιοχής πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί μεγεθών όπως το ύψος κύματος, οι ταχύτητες και η μεταφορά ιζήματος κατά μήκος και εγκάρσια της ακτογραμμής.



**Σχήμα 3.1** Η περιοχή μελέτης. (πηγή: Google Earth) Διακρίνονται τα όρια του κανάβου, η ακτογραμμή, οι βαθυμετρικές καμπύλες και οι κάθετες διατομές στην ακτογραμμή

Μελετήθηκε επίσης το φαινόμενο της αναρρίχησης κύματος, της διάβρωσης των αμμοθινών και της εξέλιξης του πυθμένα σε 12 μηκοτομές του εδάφους (προφίλ) κάθετα στην ακτογραμμή. Η απόσταση μεταξύ των προφίλ ορίστηκε στα 300 m με την πρώτη διατομή να βρίσκεται σε απόσταση 100m ανατολικά του λιμανιού. Το μέγεθος του κόκκου της άμμου επιλέχτηκε ενιαίο ίσο με 0,2 mm και το πορώδες ίσο με 0,4 (Εικόνα 3.7). Με την εξαγωγή αποτελεσμάτων για όλα τα προφίλ ξεχωριστά, επιτυγχάνεται μια ολοκληρωμένη εικόνα για την τρωτότητα της περιοχής σε κατάκλυση.



Εικόνα 3.7 Φωτογραφία από την κοκκομετρία της ακτής του Ρεθύμνου (πηγή: φωτογραφία από προσωπικό αρχείο Λύκου Α.)

Τα βυθομετρικά δεδομένα της περιοχής μελέτης προέκυψαν από ψηφιοποίηση στο σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCad χάρτη της Υδρογραφικής Υπηρεσίας (Κλίμακα 1:50000), τμήμα του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 3.8, ενώ τα τοπογραφικά στοιχεία ελήφθησαν από το Εθνικό Κτηματολόγιο (Εικόνα 3.9) και επεξεργάστηκαν στο ArcGis.



Εικόνα 3.8 Τμήμα του χάρτη της υδρογραφικής υπηρεσίας από τον οποίο αποσπάστηκε η βαθυμετρία της περιοχής



Εικόνα 3.9 Χάρτης της περιοχής μελέτης στο Εθνικό Κτηματολόγιο

### 3.3 Σενάρια προσομοίωσης

Τα σενάρια που επιλέχτηκαν να προσομοιωθούν περιλαμβάνουν μεμονωμένα γεγονότα ακραίων καταιγίδων για τις επικρατούσες ανεμολογικές συνθήκες καθώς και τις αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου κυματικού κλίματος.

#### 3.3.1 Σενάριο κυματικού κλίματος

Το κυματικό κλίμα της περιοχής προσομοιώθηκε στην παρούσα μελέτη για 24 h υπό συνδυασμό Βορειοδυτικού, Βόρειου και Βορειοανατολικού κυματισμού, με βάση το ετήσιο ποσοστό εμφάνισης του κάθε ανέμου και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των κυματισμών, όπως αυτά προέκυψαν από τη μελέτη των Καραμπάς κ.α. (2010). Για τον υπολογισμό του κυματικού κλίματος στα ανοιχτά της περιοχής εφαρμόστηκαν οι σχέσεις Jonswap. Ο ισοδύναμος κυματισμός είναι αντιπροσωπευτικός της κυματικής κατάστασης σε ετήσια βάση και ο υπολογισμός του έγινε ως εξής: αφού επιλεγεί ή υπολογιστεί η αντιπροσωπευτική περίοδος Τε του ισοδύναμου κυματισμού για κάθε διεύθυνση πνοής, υπολογίζεται το ύψος του ισοδύναμου κυματισμού για κάθε διεύθυνση πνοής, υπολογίζεται το ύψος του ισοδύναμου κυματισμού του τη μέση τετραγωνική τιμή των Borah and Balloffet (1985) σύμφωνα με τη σχέση

$$H_e^2 T_e = \frac{\sum H_i^2 T_i f_i}{\sum f_i}$$
(3.1)

όπου H<sub>i</sub>, T<sub>i</sub>, f<sub>i</sub> τα ύψη, οι περίοδοι και οι συχνότητες εμφάνισης των κυμάτων που αντιστοιχούν στα διάφορα επίπεδα έντασης του ανέμου από την σχετική διεύθυνση. Ουσιαστικά ο ισοδύναμος κυματισμός είναι ο κυματισμός που εμφανίζεται με συχνότητα f=Σfi και έχει το ίδιο ενεργειακό περιεχόμενο με το σύνολο των κυματισμών των διαφόρων εντάσεων του σχετικού τομέα. Με βάση τα παραπάνω υπολογίστηκαν λοιπόν στη μελέτη των Καραμπάς κ.α. (2010) το σημαντικό ύψος κύματος He, η περίοδος Te και η συχνότητα εμφάνισης f των ισοδύναμων κυματισμών ανοιχτού πελάγους για τους επικρατέστερους ανέμους (Πίνακας 3.2). Ο υπολογισμός του ενεργού μήκους ανάπτυξης των κυματισμών έγινε σ' ένα τομέα ±45° ως προς την κύρια διεύθυνση, με βάση τις ακτίνες ανά 10°, χρησιμοποιώντας ανεμολογικά δεδομένα από το Σταθμό Ρεθύμνου της Ε.Μ.Υ. Το ίζημα θεωρήθηκε και σ' αυτήν την προσομοίωση ομοιόμορφη άμμος με μέγεθος κόκκου ίσο με 0,2 mm και πορώδες ίσο με 0,4.

Για την εκτίμηση του κυματικού πεδίου στην ευρύτερη περιοχή στη μελέτη των Καραμπάς κ.α. (2010) εφαρμόστηκε το μοντέλο μετάδοσης κυματισμών μεγάλης κλίμακας WAVE-LS (Large Scale), το οποίο βασίζεται στην αριθμητική επίλυση της εξίσωσης διατήρησης ισοζυγίου κατευθυντικής κυματικής ενέργειας, εξίσωση στην οποία βασίζεται και το μοντέλο SWAN. Αντίστοιχα, το μοντέλο WAVE-L είναι ένα μοντέλο μετάδοσης γραμμικών κυματισμών που εφαρμόζεται σε μέσες και μικρές κλίμακες των παράκτιων περιοχών. Οι εξισώσεις που επιλύονται είναι υπερβολικής μορφής και προκύπτουν από την αντικατάσταση της κατανομής της πίεσης και των ταχυτήτων, από τη γραμμική θεωρία (κυματισμοί μικρού εύρους), στις γραμμικοποιημένες εξισώσεις Navier-Stokes και έτσι έχουν τη δυνατότητα

περιγραφής της μετάδοσης των απλών αρμονικών γραμμικών κυματισμών σε οποιοδήποτε βάθος ήπιας κλίσης, δηλαδή συνδυασμός των φαινομένων της διάθλασης, περίθλασης, ανάκλασης και ρήχωσης. Στην ίδια μελέτη εφαρμόστηκαν επίσης το μοντέλο κυματογενούς κυκλοφορίας WICIR (Wave Induced CIRculation) και το μοντέλο στερεομεταφοράς και εξέλιξης μορφολογίας πυθμένα SEDTR (SEDiment TRansport).

			• 5			
BF	U (m/s)	f %	Hos (m)	Tp (sec)	He (m)	Te (sec)
4	7,0	1,878	1,21	5,80		
5	9,8	1,016	1,72	6,54		
6	12,7	0,784	2,22	7,13		
7	15,7	0,376	2,75	7,65		
8	19,0	0,077	3,33	8,16	1,86	6,45
9	22,5	0,0	3,94	8,41		
10	26,0	0,0	4,55	8,84		
>11	31,0	0,0	5,43	9,38		
Σύνολο		4,131				

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά ισοδύναμων κυματισμών (Καραμπάς κ.α., 2010)

ΒΔ άνεμος

Β άνε	μος

BF	U (m/s)	f %	Hos (m)	Tp (sec)	He (m)	Te (sec)
4	7,0	3,535	1,21	5,80		
5	9,8	1,491	1,97	7,16		
6	12,7	1,248	2,63	7,98		
7	15,7	0,696	3,26	8,57		
8	19,0	0,221	3,94	9,13	2,19	6,83
9	22,5	0,0	4,67	9,41		
10	26,0	0,0	5,40	9,88		
>11	31,0	0,0	6,43	10,49		
Σύνολο		7,191				

#### ΒΑ άνεμος

BF	U (m/s)	f %	Hos (m)	Tp (sec)	He (m)	Te (sec)
4	7,0	1,127	1,21	5,80		
5	9,8	0,552	1,90	7,00		
6	12,7	0,508	2,46	7,63		
7	15,7	0,309	3,04	8,19		
8	19,0	0,044	3,68	8,73	2,10	6,77
9	22,5	0,0	4,36	9,00		
10	26,0	0,0	5,04	9,45		
>11	31,0	0,0	6,01	10,03		
Σύνολο		2,54				

### 3.3.2 Σενάρια καταιγίδας

Η πληροφορία για τις ακραίες κυματικές συνθήκες αντλήθηκε από τη μελέτη των Tsoukala et al. (2016), επομένως κρίνεται απαραίτητο στο σημείο αυτό να περιγραφεί αναλυτικότερα η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στη μελέτη αυτή.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στη μελέτη των Tsoukala et al. (2016), βασίζεται σε διακριτά βήματα που έχουν στόχο να μεταφέρουν την πληροφορία για την εξέλιξη των μακροχρόνιων ατμοσφαιρικών αλλαγών έως τα ρηχά νερά, υπολογίζοντας την κυματική αναρρίχηση και υπερπήδηση στην ακτή κάτω από ακραία γεγονότα καταιγίδων. Αυτό θα βοηθήσει μελλοντικές έρευνες, που θα υπολογίζουν την επερχόμενη πλημμύρα στην παράκτια ζώνη, οριοθετώντας τις περιοχές κατάκλυσης.

Ξεκινώντας από τα ανεμολογικά δεδομένα, που χρησιμοποιούνται ως κινητήριες δυνάμεις, αξιοποιούνται περιφερειακά ατμοσφαιρικά μοντέλα (REMO), που βασίζονται στο σύστημα μοντέλων Europamodel/Deutschland model system (Majewski and Schrodin 1994), και προσφέρουν πληροφορίες την ατμοσφαιρική δράση στην ευρύτερη περιοχή της Ευρώπης. Έπειτα, μια κλιματική ανάλυση της Μεσογείου και της Ελληνικής Θάλασσας και των ατμοσφαιρικών μεταβλητών μπορεί να επιτευχθεί, χρησιμοποιώντας μοντέλα, όπως π.χ. RegCM regional model (RegCNET: regional climate network 2003). Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί ένα σενάριο εκπομπής AR4-A1B ανάμεσα σε διάφορα, που έχουν καταστρωθεί. Τα αποτελέσματα του για την ιστορική περίοδο (hindcasting) βασίζονται σε δεδομένα εισόδου από τις μετρούμενες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία στη συνέχεια περιλαμβάνει συνοπτικά τα εξής: έχοντας επιλέξει ένα σενάριο κλιματικής αλλαγής και εξέλιξης των ανεμολογικών συνθηκών στο μέλλον, το μοντέλο SWAN (Simulating WAves Nearshore) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των κυματικών χαρακτηριστικών στα ανοιχτά (κατευθυντικό φάσμα), λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω αλλαγές. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται το μοντέλο MIKE 21 PMS για τη μετατροπή των υπεράκτιων πληροφοριών σε πιο ρηχές περιοχές μέχρι την ακτή. Τέλος, ένας συνδυασμός των μοντέλων MIKE 21 BW και EutOtop καθώς και εμπειρικών τύπων χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των κυματικών υπερπηδήσεων (wave overtopping) και αναρριχήσεων (wave run-up).

Πιο συγκεκριμένα, οι κυματικές προσομοιώσεις στα ανοικτά χρησιμοποιούν ένα σύστημα τριών επιπέδων SWAN, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος «Thalis CCSEAWAVS» για την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη στάθμη της θάλασσας και το κυματικό κλίμα των ελληνικών θαλασσών, της τρωτότητας των παράκτιων περιοχών και την ασφάλεια των παράκτιων και των λιμενικών κατασκευών. Αυτό το σύστημα προσομοίωσης χρησιμοποιεί ιστορικά (hindcast) και μελλοντικά (forecast) ανεμολογικά πεδία (επίσης ανεπτυγμένα στο πλαίσιο του Thalis-CCSEAWAVS) για την εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών, με χωρικό βήμα 20 km στη λεκάνη της Μεσογείου (Σχήμα 3.2- Επίπεδο 1). Αυτά τα δεδομένα παρέχουν τις οριακές συνθήκες για την επανάληψη της προσομοίωσης με χρήση ενός πυκνότερου κανάβου χωρικού βήματος 5 km στο εσωτερικό της περιοχής της Ανατολικής Μεσογείου (Σχήμα 3.2-Επίπεδο 2). Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται ένας υψηλής ανάλυσης κάναβος με χωρικό βήμα 0,5 km στην επιλεγμένη παράκτια περιοχή (Σχήμα 3.2-Επίπεδο 3).



Σχήμα 3.2. Εκτίμηση των κυματικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας μια συρρικνούμενη προσέγγιση τριών επιπέδων (Χριστοδούλου Χ., 2015).

Έπειτα, τα αποτελέσματα του Επιπέδου-3 της Thalis CCSEAWAVS, δηλαδή ύψος κύματος στα ανοικτά, περίοδος και κατεύθυνση, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν και να ταξινομηθούν οι κυματισμοί θύελλας (storm surges), που θα προσβάλλουν την περιοχή. Να διευκρινιστεί εδώ ότι τα κύματα θύελλας ορίζονται ως η μεταβολή στο επίπεδο της θαλάσσιας επιφάνειας, που προκαλείται από κάποια καταιγίδα. Ορίζονται στη διαφορά μεταξύ της παρατηρούμενης στάθμης της θαλάσσιας επιφάνειας και της αναμενόμενης αύξησης λόγω παλίρροιας την ίδια χρονική στιγμή. Οι κυματισμοί θύελλας συνδέονται, γενικά, με χαμηλά βαρομετρικά και υψηλές ταχύτητες ανέμων και απειλούν με φυσικές καταστροφές, κυρίως, σε περιοχές, όπου συμβαίνουν τροπικοί κυκλώνες. Ωστόσο, ακόμα και σε περιοχές, όπου οι ατμοσφαιρικές αλλαγές δεν είναι τόσο έντονες, οι γεννώμενοι κυματισμοί θύελλας μπορούν να προκαλέσουν πλημμύρες και αλλαγή στη βαθυμετρία της περιοχής (Neddham and Keim 2011). Αυτό λοιπόν είναι ένα κρίσιμο βήμα της όλης διαδικασίας δεδομένου, ότι ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η πρόβλεψη των ακραίων τιμών των κυματικών χαρακτηριστικών. Η βασική ιδέα είναι να ομαδοποιηθούν οι καταιγίδες με παρόμοια κυματικά χαρακτηριστικά σε τάξεις (ανάλογα με την ένταση), προκειμένου να εφαρμοστούν οι επιθυμητές προσομοιώσεις σε κάθε μια από αυτές.

Επιπλέον, αυτό θα αποτελέσει μια χρήσιμη πληροφορία για ενδεχόμενη μελλοντική έρευνα σχετικά με την εκτίμηση της παράκτιας τρωτότητας από κάθε τάξη καταιγίδας. Πολλοί επιστήμονες της παράκτιας έρευνας έχουν κάνει προσπάθειες στο παρελθόν προς αυτή την κατεύθυνση, όπως ο Halsey (1986), ο οποίος πρότεινε μία κατάταξη των υπερτροπικών

καταιγίδων των ακτών του Ατλαντικού με βάση τον δείκτη των εν δυνάμει καταστροφών. Οι Mendoza and Jiménez (2005), παρείχαν μια ταξινόμηση των καταιγίδων με βάση την εν δυνάμει διάβρωση της παραλίας στην Καταλονική Ακτή. Η ταξινόμηση, που υιοθετήθηκε εδώ, είναι μία από τις πιο καλά τεκμηριωμένες και βασίζεται στην έννοια του ενεργειακού περιεχομένου (Dolan and Davis, 1992).

Τα παραπάνω αποτελέσματα αξιοποιούνται περαιτέρω ως οριακές συνθήκες για μια προσομοίωση της παράκτιας περιοχής επιλυμένη σε φάσεις, συμπεριλαμβανομένης και της περιοχής του Ρεθύμνου, με τη βοήθεια ενός αριθμητικού κυματικού μοντέλου, που βασίζεται στις Παραβολικές εξισώσεις Ήπιας Κλίσης – Parabolic Mild Slope equations (PMS, MIKE21). Με τον τρόπο τα κυματικά χαρακτηριστικά προσομοιώνονται περαιτέρω στο Επίπεδο-4, λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον τοπικά φαινόμενα, όπως τη ρήχωση, τη διάθλαση, την τριβή στον πυθμένα και την κυματική θραύση, που πραγματοποιούνται στις πιο ρηχές περιοχές, οι οποίες αντιπροσωπεύονται στον πυκνό χωρο-χρονικό κάναβο του Επίπεδου-4, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3. Τα αποτελέσματα του παραπάνω μοντέλου αποτελούν τα δεδομένα για το υδροδυναμικό μοντέλο για τον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων κυματογενών ρευμάτων από τις τάσεις ακτινοβολίας.



Σχήμα 3.3 Αριθμητικός κάναβος της βαθυμετρίας του Ρεθύμνου στο μοντέλο ΜΙΚΕ21 (Χριστοδούλου Χ., 2015)

Τέλος, οι εμπειρικοί τύποι και τα κυματικό μοντέλο MIKE 21 BW εφαρμόζονται για να προχωρήσουμε περαιτέρω κατά μήκος της ακτογραμμής και να υπολογίσουμε την κυματική υπερπήδηση και αναρρίχηση. Το ανωτέρω μοντέλο λύνει τις εξισώσεις τύπου Boussinesq (Madsen et al., 1991) στο πεδίο του χρόνου. Επιλύει τη διάδοση των κυμάτων λεπτομερώς και είναι πιο κατάλληλο για την προσομοίωση των μη γραμμικών κυματικών αλληλεπιδράσεων, ικανές να αναπαράγουν την κυματική μετατροπή κατά μήκος ενός αυθαίρετου προφίλ πυθμένα από τα ενδιάμεσα νερά έως την ακτή για τη μελέτη της

κυματικής διάδοσης στην ζώνη διαβροχής. Έτσι, η μονοδιάστατη εκδοχή χρησιμοποιείται εδώ για να προσομοιωθεί η αναρρίχηση στην ακτή. Επιπλέον, διαθέσιμοι εμπειρικοί τύποι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση. Από την άλλη, το EurOtop είναι ένα ευρέως αποδεκτό εργαλείο για τη διερεύνηση του κινδύνου πλημμυρών, που περιλαμβάνει τεχνικές για την πρόβλεψη της κυματικής υπερπήδησης σε κυματοθραύστες, λιμενοβραχίονες και άλλες δομές στην ακτογραμμή.

Αυτή η αριθμητική αλληλουχία, που προτείνεται στην παρούσα εργασία, και το ακόλουθο διάγραμμα ροής (Σχήμα 3.4) συνοψίζει την παραπάνω διαδικασία σε τέσσερα διακριτά βήματα.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής που απεικονίζει την ακολουθούμενη διαδικασία

Όσον αφορά την κατηγοριοποίηση των κυματισμών θύελλας, έχοντας υπόψη τα κυματικά δεδομένα, μπορεί να προσδιοριστεί και να κατηγοριοποιηθεί ένα ακραίο γεγονός που θα δώσει έναν κυματισμό θύελλας. Κατά αυτόν τον τρόπο διαχειρίζονται όλα τα ακραία γεγονότα ομαδοποιημένα και όχι μεμονωμένα και είναι δυνατόν να συνδεθούν με δείκτες τρωτότητας, κάτι το οποίο θα χρησιμεύσει σε μελλοντικές έρευνες. Σύμφωνα με τους Dolan and Davis (1992) για τον ορισμό των κυματισμών καταιγίδας, η ταξινόμηση γίνεται σε πέντε ομάδες: I-weak, II-moderate, III-significant, IV-severe και V-extreme. Το πρώτο βήμα, πριν να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος, είναι ο χαρακτηρισμός της καταιγίδας, η οποία ορίζεται ως ένα γεγονός, που υπερβαίνει μια ελάχιστη τιμή σημαντικού ύψους κύματος (εδώ Hs > 2 m) και διαρκεί κατ' ελάχιστον 6 hrs. Στη συνέχεια το ενεργειακό περιεχόμενο κάθε συμβάντος υπολογίζεται ως εξής:

$$E = \int_{t1}^{t2} H_s^2 dt ag{3.2}$$

όπου  $(t_1-t_2)$  είναι η διάρκεια της καταιγίδας.

Η παραπάνω ανάλυση χωρίστηκε σε δύο περιόδους: 1960-2000 (hind casting) και 2000-2100 (forecasting) εννοώντας παρελθοντικές και μελλοντικές προβλέψεις (past and future projections). Αυτή η τεχνική εφαρμόστηκε και από άλλους ερευνητές σε περιοχές κοντά στο Ρέθυμνο (π.χ. Χανιά, Κρήτη, Kokkinos et al., 2014). Η ανάλυση έγινε για Βόρεια κατεύθυνση ανέμου και για Βορειοδυτική, αφού είναι οι επικρατέστερες στην περιοχή. Τα αποτελέσματα για το μέσο ύψος κύματος, τη μέση περίοδο κορυφής και τη διάρκεια της κάθε καταιγίδας, μαζί με την ομαδοποίηση, απεικονίζονται στους Πίνακες 3.3-3.8.

Πίνακας 3.3 Καταιγίδες περιόδου 1960-2000 για Β διεύθυνση ανέμου (Tsoukala et al., 2016)

Βόρεια Διεύθυνση 1960-2000										
Κατηγορία καταιγίδας	Εύρος Hs (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο Η <sub>s</sub> (m)	Μέση Tp (s)	Μέση Διάρκεια (h)	Αριθμός γεγονότων				
Ι-Ασθενής	2.00-4.55	6.18-9.38	2.48	7.66	14.20	318				
II-Μέτρια	2.00-5.67	6.49-10	2.94	8.08	34.50	27				
III-Σημαντική	2.19-4.63	7.50-9.59	3.56	8.69	44.25	4				
ΙΥ-Σοβαρή	2.00-5.61	6.71-10.72	3.27	8.31	72.50	6				
<b>V-Ακραία</b>	-	-	-	-	-	0				

Πίνακας 3.4 Καταιγίδες περιόδου 2000-2100 για Β διεύθυνση ανέμου (Tsoukala et al., 2016)

Βόρεια Διεύθυνση 2000-2100									
Κατηγορία καταιγίδας	Εύρος Hs (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο Η <sub>s</sub> (m)	Μέση Tp (s)	Μέση Διάρκεια (h)	Αριθμός γεγονότων			
Ι-Ασθενής	2.00-5.25	6.35-10.11	2.5	7.68	14.13	823			
II-Μέτρια	2.00-5.02	6.67-9.93	2.79	7.99	42.03	94			
ΙΙΙ-Σημαντική	2.19-5.95	6.90-10.33	3	8.19	61.84	13			
ΙV-Σοβαρή	2.00-5.36	6.38-10.00	3.24	8.24	81.38	6			
<b>V-Ακραία</b>	2.46-4.95	7.84-9.65	4.17	9.08	72.00	1			

Πίνακας 3.5 Καταιγίδες περιόδου 1960-2000 για ΒΔ διεύθυνση ανέμου (Tsoukala et al., 2016)

Βορειοδυτική Διεύθυνση 1960-2000									
Κατηγορία καταιγίδας	α Εύρος Hs ; (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο Η <sub>s</sub> (m)	Μέση Τρ (s)	Μέση Διάρκεια (h)	Αριθμός γεγονότων			
Ι-Ασθενής	2.48-4.56	6.18-9.38	2.49	7.67	11.40	10			

Βορειοδυτική Διεύθυνση 2000-2100									
Κατηγορία καταιγίδας	Εύρος Hs (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο H <sub>s</sub> (m)	Mέση Tp (s)	Μέση Διάρκεια (h)	Αριθμός γεγονότων			
Ι-Ασθενής	2.00-4.55	6.18-9.38	2.47	7.65	10.55	33			
ΙΙ-Μέτρια	2.00-5.67	6.49-10.03	2.99	8.13	39.00	1			

**Πίνακας 3.6** Καταιγίδες περιόδου 2000-2100 για ΒΔ διεύθυνση ανέμου (Tsoukala et al., 2016)

**Πίνακας 3.7** Καταιγίδες περιόδου 1960-2000 για BA διεύθυνση ανέμου (Martzikos et al., 2016)

		Βορειοδυτικ	ή Διεύθυνσ	ղ 1960-2000		
Κατηγορία καταιγίδας	Εύρος Hs (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο Η <sub>s</sub> (m)	Μέση Τρ (s)	Μέση Διάρκεια (h)	Αριθμός γεγονότων
Ι-Ασθενής	2.00-4.38	5.99-10.3	2.43	7.89	9.95	41
II-Μέτρια	2.00-4.24	7.32-9.64	2.88	8.19	36	2

**Πίνακας 3.8** Καταιγίδες περιόδου 2000-2100 για BA διεύθυνση ανέμου (Martzikos et al., 2016)

	Βορειοδυτική Διεύθυνση 2000-2100								
Κατηγορία καταιγίδας	Εύρος Hs (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο H <sub>s</sub> (m)	Μέση Τρ (s)	Μέση Διάρκεια (h)	Αριθμός γεγονότων			
Ι-Ασθενής	2.00-4.03	5.95-9.79	2.47	7.83	11.7	100			
II-Μέτρια	2.00-3.63	7.41-9.34	2.78	8.47	34.8	5			

Όσον αφορά στα σενάρια των ακραίων κυματισμών που προσομοιώθηκαν στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε η ανταπόκριση της περιοχής για έξι διαφορετικά ιστορικά και μελλοντικά σενάρια καταιγίδας όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.9, για τις κύριες κυματικές διευθύνσεις που εντοπίζονται στην περιοχή. Σύμφωνα με το Σχήμα 3.6 (Tsoukala et al., 2016), στην περιοχή μελέτης έχουμε κατά φθίνουσα σειρά συχνότητας εμφάνισης Βόρεια, Βορειοδυτική και Βορειοανατολική κυματική διεύθυνση. Οι χρονοσειρές των καταιγίδων που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από το μοντέλο SWAN και μετρήθηκαν στο σημείο με συντεταγμένες στο ΕΓΣΑ 87 (X,Y)= (540445.455, 3916318.814) και βάθος -19,2 m. Στη συνέχεια οι κυματισμοί θύελλας κατηγοριοποιήθηκαν όπως περιγράφεται στους Πίνακες 3.3-3.8 (Tsoukala et al., 2016) σε πέντε κατηγορίες αυξανόμενης σοβαρότητας. Η κατηγοριοποίηση αυτή επιτρέπει στους φορείς διαχείρισης των ακτών να συνδέουν κάθε καταιγίδα με τις πιθανές συνέπειες, ανάλογα με την κατηγορία στην οποία ανήκει, να εντοπίζουν εύκολα τις ευπαθείς περιοχές και να λαμβάνουν τα κατάλληλα μέτρα για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Στην παρούσα μελέτη, όσον αφορά τη Βόρεια διεύθυνση, έγιναν υπολογισμοί για τα δύο ιστορικά σενάρια κατηγορίας ΙV-Σοβαρή που σημείωσαν αντίστοιχα το μεγαλύτερο ύψος κύματος και τη μεγαλύτερη διάρκεια, ένα ιστορικό σενάριο τυπικής καταιγίδας κατηγορίας II-Μέτρια για λόγους σύγκρισης και εκτίμησης της κρισιμότητας των αποτελεσμάτων σε περίπτωση ακραίου φαινομένου, καθώς και για το μελλοντικό ακραίο γεγονός καταιγίδας κατηγορίας V-Ακραία. Για τη Βορειοδυτική διεύθυνση το μοντέλο εφαρμόστηκε για το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή το μελλοντικό κατηγορίας II-Μέτρια και τέλος για τη Βορειοανατολική επίσης για το δυσμενέστερο μελλοντικό σενάριο καταιγίδας κατηγορίας ΙΙ-Μέτρια.

Να τονιστεί τέλος πως η προσομοίωση των προφίλ αφορά μόνο στις συνθήκες των καταιγίδων και όχι του κυματικού κλίματος, καθώς, όπως αναλύεται παρακάτω, το μοντέλο δεν προσφέρει αυτή τη δυνατότητα.

Σενάριο	Διεύθυνση	Εύρος Hs (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο Hs (m)	Μέση Tp (s)	Διάρκεια καταιγίδα ς (h)
1 (ιστορικό)	Ν	2,59-5,61	9,27-10,72	5,10	9,93	43,5
2 (ιστορικό)	Ν	2,01-4,61	6,71-9,28	2,86	7,85	103,5
3 (μελλοντικό)	Ν	2,46-4,95	7,84-9,65	4,18	9,07	72
4 (ιστορικό)	Ν	1,99-2,69	6,97-7,82	2,27	7,47	51
5 (μελλοντικό)	NW	2,43-3,03	7,41-8,16	2,79	7,87	39
6 (μελλοντικό)	NE	2,07-2,66	6,78-8,96	2,41	8,16	24

Πίνακας 3.9 Τα αντιπροσωπευτικά σενάρια καταιγίδας που προσομοιώθηκαν



**Σχήμα 3.6** Μέση διεύθυνση κυματισμού στην περιοχή μελέτης για τρεις περιόδους (Tsoukala et al., 2016)

## 4. Παρουσίαση του μοντέλου XBeach

Για όλους τους υπολογισμούς των απαραίτητων μεγεθών στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε εξ ολοκλήρου το μοντέλο XBeach, ένα αριθμητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς της ακτής κατά τη διάρκεια ακραίων κυματικών συνθηκών. Πιο αναλυτικά, πρόκειται για ένα παράκτιο μορφοδυναμικό μοντέλο δύο διαστάσεων που χρησιμοποιείται για υπολογισμούς διάδοσης των κυμάτων, μακρά κύματα και ενδιάμεση ροή, μεταφορά ιζήματος και μορφολογικές αλλαγές στην παράκτια περιοχή, την παραλία και τους αμμολόφους κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας έχοντας ως κύριο σκοπό την ανίχνευση της απόκρισης των παράκτιων αμμοθινικών συστημάτων κάτω από τοπικές προβλέψεις κλιματικής αλλαγής. Διατίθεται ελεύθερα στο ευρύ κοινό (http://oss.deltares.nl/web/xbeach/home) με χρηματοδότηση που προέρχεται κυρίως από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Αμερικάνικο Σώμα Στρατού Μηχανικών (US Army Corps of Engineers, Rijkwaterstaat), με την υποστήριξη των UNESCO-IHE, της Deltares (πρώην WL|Delft Hydraulics) και των πανεπιστημίων Delft University of Technology και University of Miami.

То περιλαμβάνει τις υδροδυναμικές διαδικασίες μοντέλο που αφορούν τους μετασχηματισμούς των βραχέων κυμάτων (short wave action balance), διάθλαση, ρήχωση και θραύση, των μακρών κυματισμών (κύματα βαρύτητας), παραγωγή, διάδοση και διάχυση των κυμάτων, την αύξηση της στάθμης της θάλασσας (wave setup) και τα ασταθή ρεύματα, καθώς και την υπερπήδηση και πλημμύρα των αμμοθινών (overwash and inundation) (Trouw K. et al, 2015). Δεν περιλαμβάνει το φαινόμενο της περίθλασης και αυτό είναι ένα από τα μειονεκτήματά του. Παρόλο που το μοντέλο έχει εγκριθεί από πλήθος αναλυτικών και εργαστηριακών μετρήσεων καθώς και μετρήσεων πεδίου, η εγκυρότητα της εφαρμογής του για κάθε περίπτωση βρίσκεται ακόμα υπό εξέταση ώστε να γίνει το μοντέλο πλήρως αξιόπιστο. Έχει αποδειχτεί σε κάθε περίπτωση πως το XBeach είναι κατάλληλο για τη μελέτη της επίδρασης ακραίων κυματισμών και τις διαδικασίες πλημμύρας και διάβρωσης των αμμοθινών σε αμμώδεις παραλίες (Mehvar S., 2015).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η πιο πρόσφατη έκδοση με το όνομα «Kingsday», καθώς και η αμέσως προηγούμενη «Groundhogday». Οι διαφορές τους εντοπίστηκαν στα εξής: Η πρώτη διαθέτει όλα τα αποτελέσματα που επιλέχθηκαν από το χρήστη να εξάγει το πρόγραμμα συγκεντρωμένα σ' ένα αρχείο τύπου netcdf που δημιουργεί με το όνομα xboutput.nc, ενώ η δεύτερη δημιουργεί ένα ξεχωριστό αρχείο τύπου .dat για κάθε αποτέλεσμα που ζητήθηκε από το χρήστη να εξαχθεί. Αυτό το χαρακτηριστικό κάνει την πρόσφατη έκδοση πιο εύχρηστη, αλλά στη νεότερη παρατηρήθηκε ότι δεν υπολογίζεται ξεχωριστά το αιωρούμενο ίζημα και το ίζημα πυθμένα, παρά μόνο το συνολικό. Επίσης, η παλιότερη έκδοση θεωρεί ως χρόνο εκκίνησης tstart=1 sec ενώ η νεότερη tstart=0 sec.

### 4.1 Θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου

#### 4.1.1 Δημιουργία κανάβου

Το XBeach χρησιμοποιεί ένα σύστημα συντεταγμένων όπου ο άξονας x είναι κάθετος στην ακτή και ο άξονας y κατά μήκος της ακτής. Υπάρχει η δυνατότητα κεκλιμένου κανάβου, ορθογωνικού κανάβου (ως απλοποιημένη παραδοχή του κεκλιμένου), καθώς και κλιμακωτού κανάβου με βαθμιαία πυκνότερη ανάλυση και ως προς τις δύο διευθύνσεις. Το μοντέλο δίνει επίσης τη δυνατότητα χρήσης σε πραγματικές συντεταγμένες της περιοχής μελέτης, μέσω ενός αρχικού σημείου προσανατολισμού (xori, yori) και γωνίας περιστροφής alfa η οποία ορίζεται αντιωρολογιακά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Μεγέθη όπως η επιφάνεια του νερού και το επίπεδο του πυθμένα υπολογίζονται στο κέντρο του κελιού, ενώ μεγέθη όπως οι ταχύτητες, οι τάσεις ακτινοβολίας και η μεταφορά ιζημάτων, υπολογίζονται στις διεπιφάνειες των κελιών (Σχήμα 4.2).



**Σχήμα 4.1**. Ορθογωνικός κάναβος και τρόπος προσαντολισμού της περιοχής μελέτης (Roelvink D. et al., 2010)



Σχήμα 4.2. Ο κάναβος του μοντέλου XBeach (McCall R., 2008) και σημείο υπολογισμού των διαφόρων μεγεθών

### 4.1.2 Επιλογές υπολογισμού υδροδυναμικών μεγεθών

To XBeach προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα τριών επιλογών για την επίλυση των υδροδυναμικών εξισώσεων:

- Στάσιμα κύματα (stationary wave model): Το μοντέλο στην επιλογή αυτή επιλύει τις εξισώσεις των κυμάτων αγνοώντας τα κύματα βαρύτητας (infragravity waves).
- Μη στάσιμα κύματα (surf beat mode/instationary): Επιλύονται τόσο τα βραχέα κύματα όσο και τα μακρά κύματα.
- Μη υδροστατική λειτουργία (non-hydrostatic mode): Στην επιλογή αυτή εφαρμόζεται ένας συνδυασμός από μη γραμμικές εξισώσεις στα ρηχά νερά με έναν διορθωτικό όρο της πίεσης, επιτρέποντας τη διάδοση και απόσβεση ανεξάρτητων κυμάτων.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται, όπως προτείνεται και από το εγχειρίδιο του μοντέλου, η λειτουργία των στάσιμων κυματισμών για την περίπτωση των χαρακτηριστικών ισοδύναμων κυματισμών και η λειτουργία των μη στάσιμων κυματισμών για την περίπτωση των καταιγίδων.

Στην επιλογή των στάσιμων κυματισμών, οι διαφοροποιήσεις των κυματικών ομάδων και όλες οι κινήσεις λόγω βαρύτητας αγνοούνται. Αυτό είναι κατάλληλο για συνθήκες όπου το τυχαίο κύμα είναι σχετικά μικρό και/ή βραχύ, οπότε αυτές οι κινήσεις θα ήταν μικρές έτσι κι αλλιώς. Οι διαδικασίες που επιλύονται είναι η κυματική διάδοση, διασπορά, ρήχωση, διάθλαση και η θραύση των κυμάτων ενώ εισάγεται και ένα μοντέλο τροχιακών κινήσεων. Αυτές οι διαδικασίες είναι συνήθως κυρίαρχες στις παράκτιες περιοχές περιορισμένης έκτασης. Για τη θραύση των κυματισμών χρησιμοποιείται το μοντέλο Baldock *et al.* (1998). Οι τάσεις ακτινοβολίας αναγκάζουν τις εξισώσεις κυμάτων στα ρηχά να οδηγούν σε ρεύματα

και αυξομειώσεις της στάθμης της θάλασσας λόγω των κυμάτων (wave setdown and setup). Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να εφαρμοστούν δυνάμεις ανέμου και παλίρροιας, όπως επίσης και οι επιδράσεις της κυματικής ασυμμετρίας και της κλίσης του πυθμένα. Ένας περιορισμένος αριθμός από μεταβλητές του μοντέλου επιτρέπουν το χρήστη να ρυθμίσει ακριβώς το προφίλ που θέλει ως αποτέλεσμα αυτών των επιδράσεων.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της λειτουργίας αυτής του XBeach σε σύγκριση με άλλα μοντέλα είναι ότι τα πλευρικά όρια είναι εξ ολοκλήρου χωρίς διαταραχές εάν η ακτή είναι κατά μήκος ομοιόμορφη κοντά σ αυτά τα όρια.

Στην επιλογή των μη στάσιμων κυματισμών, οι κινήσεις των βραχέων κυμάτων επιλύονται γρησιμοποιώντας την γρονικά εξαρτημένη εξίσωση κυμάτων (εξισώσεις HISWA, Holthuijsen et al., 1989). Αυτή η εξίσωση επιλύει τη διαφοροποίηση του ύψους κύματος στη κλίμακα των κυματικών ομάδων (wave groups scale). Υιοθετεί ένα μοντέλο διάχυσης (model dissipation) κατάλληλο για χρήση σε κυματικές ομάδες (Roelvink, 1993a; Daly et al., 2012) και ένα μοντέλο τροχιακών κινήσεων (Svendsen, 1984; Nairn et al., 1990; Stive and de Vriend, 1994) για την αναπαράσταση της επιφάνειας του νερού μετά τη θραύση. Αυτές οι διαφοροποιήσεις, μέσω των τάσεων ακτινοβολίας, ασκούν μία δύναμη στην υδάτινη στήλη και οδηγούν σε μεγαλύτερες κυματικές περιόδους (βαρυτικά κύματα-infragravity waves) και σε ασταθή ρεύματα, τα οποία επιλύονται με τις μη γραμμικές εξισώσεις στα ρηχά (Roelvink & Reniers, 2012). Έτσι, συμπεριλαμβάνονται τα ρεύματα που δημιουργούνται από τα κύματα (longshore currents, rip currents, undertow), τα ανεμογενή ρεύματα (stationary, uniform) και τα μακρά (infragravity) κύματα, καθώς και το μέγιστο επίπεδο (runup) και χαμηλότερο επίπεδο (rundown) της επιφάνειας του νερού λόγω των μακρών κυματισμών (swash). Στη συνέχεια ακολουθεί σύντομη περιγραφή του θεωρητικού υπόβαθρου που υιοθετεί το μοντέλο για τα κυριότερα σημεία που αφορούν τους υπολογισμούς της εργασίας. Αναλυτικά οι πληροφορίες βρίσκονται στο εγχειρίδιο του XBeach (XBeach Manual, Deltares, 2015, Roelvink et al., 2010).

#### 4.1.3 Εξισώσεις βραχέων κυματισμών

Η κυματική δύναμη στην εξίσωση ορμής στα ρηχά λαμβάνεται από μία έκδοση της εξίσωσης κυματικής ισορροπίας εξαρτημένη απ' το χρόνο. Όπως στο μοντέλο HISWA για στάσιμα κύματα του πανεπιστημίου Delft (Holthuijsen et al., 1989) η διανομή στις διάφορες διευθύνσεις της κυματικής δράσης λαμβάνεται υπόψη, ενώ το φάσμα συχνοτήτων παριστάνεται από μία συχνότητα,  $f_{m-1,0}$ . Η εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης δίνεται τότε από τον τύπο:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma}$$
(4.1)

όπου η κυματική δράση Α υπολογίζεται ως εξής:

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)}$$
(4.2)

ópou to  $\theta$  paristánei th gunia prósptustic we proc ton áxona x,  $S_w$  h punnútic the kumatiky enérgeiac kai s h esuteriký kumatiký sucnóthta.

#### 4.1.4 Θραύση κυματισμών

Στο XBeach είναι δυνατό να ληφθούν υπόψη οι εξής διαδικασίες που οδηγούν στην απόσβεση των βραχέων κυματισμών: η θραύση, η τριβή του πυθμένα και η θαλάσσια βλάστηση.

Πέντε διαφορετικοί σχηματισμοί θραύσης των κυματισμών διατίθενται στο XBeach (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1.	Θεωρίες	θραύσης	των	κυμάτων	που	υποστηρίζει	το	XBeach	(XBeach	Manual
2015, Deltares	3)									

Μοντέλα Θραύσης των Κυματισμών	Τύπος κυματισμών			
Roelvink (1993a)	Μη στάσιμα			
Roelvink 1993a (extended)	Μη στάσιμα			
Daly et al (2010)	Μη στάσιμα			
Baldock et al. (1998)	Στάσιμα			
Janseen & Battjes (2007)	Στάσιμα			

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Roelvink 1993a (extended) για την περίπτωση των μη στάσιμων κυματισμών και το μοντέλο Baldock *et al.* (1998) για την περίπτωση των στάσιμων, όπως προτείνεται και από το εγχειρίδιο του XBeach.

Στο σχηματισμό της απόσβεσης των κυμάτων εξαιτίας της θραύσης (προσέγγιση μη στάσιμων κυματισμών) η ιδέα στη θεωρία Roelvink 1993a βασίζεται στον υπολογισμό της απόσβεσης ενός κλάσματος θραυόμενων κυματισμών (Q<sub>b</sub>) πολλαπλασιασμένο με την απόσβεση σε κάθε γεγονός θραύσης. Έτσι, η παράμετρος α εφαρμόζεται ως συντελεστής διάχυσης (dissipation coefficient),  $T_{rep}$  είναι η αντιπροσωπευτική κυματική περίοδος και  $E_w$  η κυματική ενέργεια. Το κλάσμα των θραυόμενων κυματισμών προσδιορίζεται με τη χρήση του  $H_{rms}$  (root-mean-square wave height) και του μέγιστου ύψους κύματος  $H_{max}$ , το οποίο υπολογίζεται ως ποσοστό του βάθους του νερού h συν ένα κλάσμα του ύψους κύματος δ (δHrms), χρησιμοποιώντας το συντελεστή θραύσης γ. Στον υπολογισμό του Hrms, το ρ συμβολίζει την πυκνότητα του νερού και το g σταθερά βαρύτητας. Η συνολική κυματική ενέργεια ε<sub>w</sub> υπολογίζεται ολοκληρώνοντας πάνω στους τομείς των κυματικών διευθύνσεων (Εξισώσεις 4.3, 4.4, 4.5).

$$\overline{D_w} = 2 \frac{a}{T_{rep}} Q_b E_w \tag{4.3}$$

$$Q_b = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right), \quad H_{rms} = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho g}}, \quad H_{max} = \gamma(h + \delta H_{rms})$$
(4.4)

$$E_w(x, y, t) = \int_0^{2\pi} S_w(x, y, t, \theta) d\theta$$
(4.5)

Σαν παραλλαγή αυτού του σχηματισμού, στη θεωρία Roelvink 1993a extended η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι η απόσβεση των κυμάτων είναι πλέον ανάλογη στην ποσότητα  $H^3/h$  αντί για  $H^2$  (Εξίσωση 4.6).

$$\overline{D_w} = 2\frac{\alpha}{T_{rep}} Q_b E_w \frac{H_{rms}}{h}$$
(4.6)

Στην περίπτωση των στάσιμων κυματισμών, όπως αναφέρθηκε, εφαρμόζεται η θεωρία Baldock *et al.* (1998) (Εξισώσεις 4.7, 4.8). Εδώ το κλάσμα των θραυόμενων κυματισμών  $Q_b$  και το ύψος κύματος στη θραύση  $H_b$  υπολογίζονται διαφορετικά σε σχέση με τις παραπάνω θεωρίες των μη στάσιμων καταστάσεων. Το α συμβολίζει το συντελεστή διάχυσης, frep την αντιπροσωπευτική εσωτερική συχνότητα και y ο συντελεστής βαθμονόμησης.

$$\overline{D_w} = \frac{1}{4} a Q_b \rho g f_{rep} (H_b^2 + H_{rms}^2)$$
(4.7)

$$Q_b = \exp\left(-\left(\frac{H_b^2}{H_{rms}^2}\right)\right), \quad H_b = \frac{0.88}{k} \tanh\left(\frac{\gamma kh}{0.88}\right)$$
(4.8)

Τόσο στην περίπτωση των μη στάσιμων όσο και των στάσιμων κυματισμών, η συνολική κυματική απόσβεση διανέμεται αναλογικά στις κυματικές διευθύνσεις σύμφωνα με την εξίσωση

$$D_{w}(x, y, t, \theta) = \frac{S_{w}(x, y, t, \theta)}{E_{w}(x, y, t)} \overline{D_{w}}(x, y, t)$$

$$(4.9)$$

#### 4.1.5 Τριβή πυθμένα

Για τον υπολογισμό της απόσβεσης των βραχέων κυμάτων λόγω της τριβής του πυθμένα (bottom friction) χρησιμοποιείται ο τύπος

$$D_f = \frac{2}{3\pi} \rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} sinhkh}\right)^3 \tag{4.10}$$

όπου  $f_w$  ο συντελεστής τριβής των βραχέων κυμάτων. Η τιμή του επηρεάζει μόνο την εξίσωση κυματικής δράσης και είναι άσχετη με την τριβή του πυθμένα στην εξίσωση ροής. Περισσότερες πληροφορίες στο εγχειρίδιο του XBeach.

#### 4.1.6 Τάσεις ακτινοβολίας

Οι τάσεις ακτινοβολίας υπολογίζονται με βάση τη γραμμική θεωρία κυματισμών ως εξής (Εξισώσεις 4.11, 4.12, 4.13):

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int \cos^2\theta \, S_r d\theta \tag{4.11}$$

$$S_{xy,r}(x, y, t) = S_{yx,r}(x, y, t) = \int \sin\theta \, \cos\theta S_r d\theta \tag{4.12}$$

$$S_{yy,r}(x,y,t) = \int \sin^2\theta \, S_r d\theta \tag{4.13}$$

#### 4.1.7 Εξισώσεις κυμάτων στα ρηχά

Για τα κύματα χαμηλών συχνοτήτων και μέσες ροές χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις κυμάτων στα ρηχά. Για τον υπολογισμό της ροής μάζας λόγω κυμάτων και την ακόλουθη ροή (return flow) χρησιμοποιείται ο ως προς το βάθος γενικευμένος μέσος Lagrangian σχηματισμός GLM (depth-averaged Generalized Lagrangian Mean) (Andrews and McIntyre, 1978, Walstra et al., 2000). Στο πλαίσιο αυτό, οι εξισώσεις συνέχειας και οι εξισώσεις ορμής σχηματίζονται με όρους της ταχύτητας Lagrange u<sup>L</sup> η οποία ορίζεται ως η απόσταση που διανύει ένα μόριο νερού σε μια κυματική περίοδο προς την περίοδο αυτή. Αυτή η ταχύτητα συνδέεται με την ταχύτητα Euler ως εξής:

$$u^L = u^E + u^S \tag{4.14}$$

$$v^L = v^E + v^S \tag{4.15}$$

Όπου  $u_s$  και  $v_s$  παριστάνουν την ταχύτητα Stokes στην κατεύθυνση x και y αντίστοιχα (Phillips, 1977) και υπολογίζονται σύμφωνα με τις Εξισώσεις 4.16, 4.17, όπου η ενέργεια της κυματικής ομάδας  $E_w$  και η κατεύθυνση προκύπτουν από την ισορροπία της κυματικής δράσης.

$$u^{S} = \frac{E_{w} \cos\theta}{\rho hc} \tag{4.16}$$

$$v^{S} = \frac{E_{w} \sin\theta}{\rho hc} \tag{4.17}$$

Οι εξισώσεις ορμής GLM που προκύπτουν δίνονται από τους εξής τύπους:

$$\frac{\partial u^{L}}{\partial t} + u^{L}\frac{\partial u^{L}}{\partial x} + v^{L}\frac{\partial u^{L}}{\partial y} - fv^{L} - v_{h}\left(\frac{\partial^{2}u^{L}}{\partial x^{2}} + \frac{\partial^{2}u^{L}}{\partial y^{2}}\right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^{E}}{\rho h} - g\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_{x}}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h}$$
(4.18)

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} - f u^L - v_h \left( \frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h}$$
(4.19)

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \tag{4.20}$$

Όπου τ<sub>sx</sub> και τ<sub>sy</sub> είναι οι διατμητικές δυνάμεις του ανέμου, τ<sub>bx</sub> και τ<sub>by</sub> οι διατμητικές τάσεις πυθμένα, η η στάθμη του νερού,  $F_x$  και  $F_y$  οι κυματικές δυνάμεις,  $F_{v,x}$  και  $F_{v,y}$  οι δυνάμεις λόγω της θαλάσσιας βλάστησης, v<sub>h</sub> το ιξώδες και f ο συντελεστής Coriolis. Να σημειωθεί ότι οι όροι των διατμητικών τάσεων υπολογίζονται με την ταχύτητα Euler και όχι με τις ταχύτητες GLM, όπως παρατηρείται στην παραπάνω εξίσωση.

#### 4.1.8 Μεταφορά ιζημάτων

Οι συγκεντρώσεις των ιζημάτων στη στήλη νερού υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης (depth-averaged advection diffusion equation) (Galappatti and Vreugdenhil, 1985) η οποία διατυπώνεται ως εξής:

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^{E}}{\partial x} + \frac{\partial hCv^{E}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{h} h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{h} h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_{s}}$$
(4.21)

Όπου το C παριστάνει την ως προς το βάθος συγκέντρωση του ιζήματος που μεταβάλλεται με το χρόνο και  $D_h$  είναι ο συντελεστής διάχυσης ιζήματος. Η συμπαράσυρση του ιζήματος παριστάνεται από το χρόνο προσαρμογής  $T_s$ , ο οποίος δίνεται από μια απλή προσέγγιση βασισμένη στο τοπικό βάθος νερού h και στην ταχύτητα πτώσης του ιζήματος  $w_s$ :

$$T_s = \max\left(0.05\frac{h}{w_s}, 0.2\right)s$$
 (4.22)

όπου μια μικρή τιμή του  $T_s$  αντιστοιχεί σε σχεδόν στιγμιαία ανταπόκριση των ιζημάτων. Η συμπαράσυρση ή εναπόθεση των ιζημάτων εξαρτάται από την αντιστοιχία μεταξύ της πραγματικής συγκέντρωσης των ιζημάτων και τη συγκέντρωση ισορροπίας  $C_{eq}$  παριστάνοντας έτσι τον όρο της πηγής στην εξίσωση μεταφοράς ιζημάτων.

Στα διάφορα σχήματα για τον υπολογισμό της μεταφοράς ιζημάτων, η συγκέντρωση ισορροπίας (τόσο για το ίζημα του πυθμένα όσο και το αιωρούμενο) σχετίζεται με το μέγεθος της ταχύτητας  $v_{mg}$ , την τροχιακή ταχύτητα  $u_{rms}$  και την ταχύτητα πτώσης  $w_s$ . Να σημειωθεί εδώ ότι το XBeach υπολογίζει τη συγκέντρωση των ιζημάτων στη κατάσταση ισορροπίας ξεχωριστά για το φορτίο βυθού και το φορτίο που αιωρείται. Αναλυτικά τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται ως εξής:

Πρώτον, όσον αφορά τη ταχύτητα Euler, εάν η επίδραση των μακρών κυματισμών είναι ενεργοποιημένη, το μέγεθος της ταχύτητας v<sub>mg</sub> είναι ίσο με το μέγεθος της ταχύτητας Euler:

$$v_{mg} = \sqrt{(u^E)^2 + (v^E)^2} \tag{4.23}$$

Εάν η επίδραση των μακρών κυματισμών δεν λαμβάνεται υπόψη, το μέγεθος της ταχύτητας εξαρτάται από δύο όρους: πρώτον από έναν παράγοντα της ταχύτητας του προηγούμενου χρονικού βήματος ( $v_{mg n-1}$ ) και δεύτερον από ένα τρέχων μέρος, το οποίο βασίζεται στο συντελεστή  $f_{cats}$  της περιόδου του αντιπροσωπευτικού κύματος  $T_{rep}$ .

$$v_{mg} = \left(1 - \frac{dt}{f_{cats}T_{rep}}\right) v_{mg}^{n-1} + \frac{dt}{f_{cats}T_{rep}} \sqrt{u^{E^2} + v^{E^2}}$$
(4.24)

Δεύτερον, η ταχύτητα  $u_{rms}$  αποκτάται από την μεταβολή της κυματικής ενέργειας χρησιμοποιώντας γραμμική κυματική θεωρία. Σ' αυτήν την περίπτωση η  $T_{rep}$  είναι η περίοδος του αντιπροσωπευτικού κύματος και  $H_{rms}$  το ύψος κύματος της μεθόδου τετραγωνικής ρίζας μέσων τετραγώνων (RMS). Σ αυτήν την εξίσωση το βάθος του νερού ενισχύεται με ένα συντελεστή του ύψους κύματος δ.

$$urms = \frac{\pi H_{rms}}{T_{rep}\sqrt{2}\sinh\left(kh + \delta H_{rms}\right)}$$
(4.25)

Τρίτον, η ταχύτητα πτώσης w<br/>s υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$w_{s} = \alpha_{1} \sqrt{\Delta g D_{50}} + \alpha_{2} \frac{\Delta g D_{50}^{2}}{v}$$
(4.26)

Η συγκέντρωση ιζήματος ισορροπίας  $C_{eq}$  μπορεί να υπολογιστεί στο μοντέλο από δύο διαθέσιμες φόρμουλες μεταφοράς ιζημάτων: Soulsby-Van Rijn και van Thiel-van Rijn. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι η εξής: Πρώτον, στη 2<sup>η</sup> μέθοδο δεν υπολογίζεται ο συντελεστής οπισθέλκουσας (drag coefficient) και δεύτερον η κρίσιμη

ταχύτητα υπολογίζεται από το ξεχωριστό υπολογισμό της κρίσιμης ταχύτητας από τα ρεύματα U<sub>crc</sub> (Shields, 1936) και από τα κύματα U<sub>crw</sub> (Komen and Miller, 1975). Και στις δύο μεθόδους πάντως, η συνολική συγκέντρωση ισορροπίας δίνεται από τον τύπο 4.27.

$$C_{eq} = \max\left(\min(C_{eq,b}, 0.5C_{max}) + \min(C_{eq,s}, 0.5C_{max}), 0\right)$$
(4.27)

Στη μελέτη έχει υιοθετηθεί το σχήμα van Thiel-van Rijn (van Rijn, 2007; van Thiel de Vries, 2009). και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις υπολογίζονται ως εξής:

$$C_{eq,b} = \frac{A_{sb}}{h} \left( \sqrt{v_{mg}^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - U_{cr} \right)^{1.5}$$
(4.28)

$$C_{eq,\sigma} = \frac{A_{s\sigma}}{h} \left( \sqrt{v_{mg}^2 + 0.64u_{rms,2}^2} - U_{cr} \right)^{2.4}$$
(4.29)

Για τις οποίες το φορτίο πυθμένα και το αιωρούμενο φορτίο υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$A_{sb} = 0.015h \frac{(D_{50}/h)^{1.2}}{(\Delta g D_{50})^{0.75}}$$
(4.30)

$$A_{ss} = 0.012 D_{50} \frac{D_*^{-0.6}}{(\Delta g D_{50})^{0.1.2}}$$
(4.31)

Η κρίσιμη ταχύτητα u<sub>cr</sub> ορίζει το βάθος εκείνο στο οποίο το ίζημα τίθεται σε κίνηση. Όπως προαναφέρθηκε, υπολογίζεται ως σταθμισμένο άθροισμα της επιμέρους συνεισφοράς των ρευμάτων και των κυμάτων (van Rijn, 2007):

$$U_{cr} = \beta U_{crc} + (1 - \beta) U_{crw} \quad (4.32), \qquad \acute{o}\pi ov \qquad \beta = \frac{v_{mg}}{v_{mg} + u_{rms}}$$
(4.33)

Η κρίσιμη ταχύτητα για τα ρεύματα (Shields, 1936):

$$U_{crc} = \begin{cases} 0.19D_{50}^{0.1}log10(\frac{4h}{D_{90}}) \ for \ D_{50} \le 0.0005 \\ 8.5D_{50}^{0.6}log10\left(\frac{4h}{D_{90}}\right) \ for \ D_{50} \le 0.002 \\ 1.3\sqrt{\Delta g D_{50}} \left(\frac{h}{D_{50}}\right)^{1/6} \ for \ D_{50} > 0.0005 \end{cases}$$
(4.34)

Η κρίσιμη ταχύτητα για τα κύματα (Komer and Miller, 1975):

$$U_{crw} = \begin{cases} 0.24 (\Delta g)^{2/3} (D_{50} T_{rep})^{1/3} \text{ for } D_{50} \le 0.0005 \\ 0.95 (\Delta g)^{0.57} (D_{50})^{0.43} T_{rep}^{0.43} \text{ for } D_{50} > 0.0005 \end{cases}$$
(4.35)

Η επίδραση της ασυμμετρίας και της λοξότητας των κυμάτων λαμβάνεται υπόψη στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, όπως φαίνεται παρακάτω (4.36):

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC(u^E - u_a \sin\theta_m)}{\partial x} + \frac{\partial hC(v^E - u_a \cos\theta_m)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} (4.36)$$

Το XBeach υπολογίζει την ενέργεια των βραχέων κυμάτων ως μέσο όρο από το μήκος τους και έτσι δεν προσομοιώνει το σχήμα του κύματος. Μια διακριτοποίηση μεταξύ της κυματικής λοξότητας και ασυμμετρίας πραγματοποιήθηκε από τον Van Thiel de Vries (2009), ώστε να επηρεάζεται η ταχύτητα μεταφοράς των ιζημάτων. Σ' αυτήν την εξίσωση το u<sub>a</sub> υπολογίζεται με βάση την κυματική λοξότητα S<sub>k</sub>, την παράμετρο κυματικής ασυμμετρίας A<sub>s</sub>, την ταχύτητα urms και δύο συντελεστές βαθμονόμησης fS<sub>k</sub>, fA<sub>s</sub> (4.37). Υψηλή τιμή της u<sub>a</sub> θα προσομοιώνει μια εντονότερη συνιστώσα της παράκτιας μεταφοράς ιζημάτων.

$$u_a = (f_{Sk}S_k - f_{As}A_s)u_{rms} (4.37)$$

Οι οριακές συνθήκες για τη μεταφορά ιζημάτων είναι παντού οι συνθήκες Neumann, το οποίο συνεπάγεται ότι οι κλίσεις κάθετα στα όρια τίθενται ίσες με το μηδέν στην εξίσωση μεταφοράς-διάχυσης, όπως επίσης και οι κλίσεις στη μεταφορά του φορτίου πυθμένα στην ίδια κατεύθυνση. Αλλαγές σε προφίλ κάθετα στην ακτή λόγω κλίσεων κάθετα στην ακτή είναι πιθανές, επιτρέποντας το όριο να ακολουθεί ομαλά το υπόλοιπο μοντέλο, παρόλα αυτά προτείνεται να είναι τα όρια μακριά από την περιοχή ενδιαφέροντος.

#### 4.1.9 Εξέλιξη πυθμένα

Το επίπεδο του πυθμένα μεταβάλλεται εξαιτίας της μεταφοράς ιζημάτων σύμφωνα με την εξίσωση (4.38):

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-P)} \left( \frac{\partial qx}{\partial x} + \frac{\partial qy}{\partial y} \right) = 0$$
(4.38)

Όπου p το πορώδες,  $f_{mor}$  ο συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης (Reniers et al., 2004a), ενώ τα  $q_x$  και  $q_y$  παριστάνουν τα ποσοστά μεταφοράς ιζήματος στη διεύθυνση x και y αντίστοιχα και δίνονται από τις εξισώσεις (4.39) και (4.40):

$$q_x(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C u^E}{\partial x}\right] + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x}\right]\right]$$
(4.39)

$$q_{y}(x, y, t) = \left[\frac{\partial h C v^{E}}{\partial y}\right] + \left[\frac{\partial}{\partial y}\left[D_{h}h\frac{\partial C}{\partial y}\right]\right]$$
(4.40)

Ο συντελεστής μορφολογικής επιτάχυνσης morfac επιταχύνει τη μορφολογική χρονική κλίμακα σχετικά με την υδροδυναμική χρονική κλίμακα. Αυτό σημαίνει ότι αν για παράδειγμα έχουμε μια προσομοίωση 10 λεπτών και έχουμε δώσει τιμή 6 στην παράμετρο morfac, στην ουσία προσομοιώνουμε την μορφολογική εξέλιξη για μια ώρα.

Στην παρούσα εργασία, έχουμε ίζημα μεγέθους 0,2 mm ( $D_{50}$ =0,0002) με πορώδες 0,4 και κλίση 1,1. Να σημειωθεί τέλος ότι το XBeach μπορεί να συμπεριλάβει και την περίπτωση όπου περισσότερες από μία κλάσεις ιζημάτων είναι σημαντικό να οριστούν στην προσομοίωση.

#### 4.1.10 Διάβρωση των αμμοθινών (avalanching)

Για τον υπολογισμό της κατάπτωσης του αμμώδους υλικού από το μέτωπο των θινών προς το μέτωπο του αιγιαλού κατά τη διάρκεια της διάβρωσης των αμμοθινών λόγω καταιγίδας (avalanching), με σκοπό τον υπολογισμό της εξέλιξης του πυθμένα, χρησιμοποιείται η κρίσιμη κλίση πυθμένα τόσο για την περιοχή ύδατος όσο και για την περιοχή ξηράς. Θεωρείται πως οι πλημμυρισμένες περιοχές είναι πολύ περισσότερο επιρρεπείς στη διάβρωση και γι' αυτό χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές κρίσιμες κλίσεις για τα ξηρά και υγρά σημεία. Οι προεπιλεγμένες τιμές αυτών είναι 1 και 0,3 αντίστοιχα (dryslp και wetslp αντίστοιχα). Όταν αυτή η τιμή υπερβαίνεται, υλικό ανταλλάσσεται μεταξύ των γειτονικών κελιών τόσο ώστε να αποκατασταθεί και πάλι η τιμή της κρίσιμης κλίσης.

$$\left|\frac{\partial z_b}{\partial x}\right| > m_{cr} \tag{4.41}$$

Για την αποφυγή δημιουργίας μεγάλων κρουστικών κυμάτων εξαιτίας των ξαφνικών αλλαγών στο επίπεδο του πυθμένα, η εξέλιξη του πυθμένα λόγω διάβρωσης των αμμοθινών έχει περιοριστεί από μια ανώτατη ταχύτητα v<sub>av,max</sub>. Η παρακάτω εξίσωση φανερώνει την αλλαγή που συμβαίνει στο επίπεδο του πυθμένα μέσα σ ένα χρονικό βήμα.

$$\Delta z_{b} = \begin{cases} \min\left(\left(\left|\frac{\partial z_{b}}{\partial x}\right| - m_{cr}\right)\Delta x, v_{av,max}\Delta t\right), \frac{\partial z_{b}}{\partial x} > 0\\ \max\left(-\left(\left|\frac{\partial z_{b}}{\partial x}\right| - m_{cr}\right)\Delta x, -v_{av,max}\Delta t\right), \frac{\partial z_{b}}{\partial x} < 0 \end{cases}$$
(4.42)

#### 4.1.11 Αναρρίχηση κύματος

Το XBeach χρησιμοποιεί το αριθμητικό σχήμα upwind 1<sup>ης</sup> τάξης σε συνδυασμό με τη μέθοδο διατήρησης της ορμής (momentum-conserving form) Stelling and Duinmeijer (2003) για τον υπολογισμό της κυματικής αναρρίχησης (XBeach Manual, Deltares, 2010). Το μοντέλο χρησιμοποιεί ρητά σχήματα με ένα αυτόματο χρονικό βήμα που προκύπτει από το κριτήριο Courant, με προβολή αποτελέσματος σε χρονικά διαστήματα που ορίζει ο χρήστης. Να τονιστεί ότι το XBeach επιλύει πλήρως τα μακρά κύματα (infragravity waves) και επιλύει τα βραχέα κύματα με ένα ενεργειακό ισοζύγιο. Αυτό σημαίνει ότι μόνο η επίδραση των μακρών κυματισμών λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της κυματικής αναρρίχησης (wave run-up).

Σε περίπτωση που κάποιος ενδιαφέρεται για την αναρρίχηση κύματος λόγω και των τυχαίων βραχέων κυματισμών (πχ σε ύπαρξη κατασκευών), υπάρχουν δύο τρόποι: α.) να χρησιμοποιήσει τη μη υδροστατική λειτουργία (non-hydrostatic mode), παρόμοια με αυτή του μοντέλου SWASH, όπου πρέπει να θέσει τις τιμές nonh=1 και swave =0 στο αρχείο δήλωσης των παραμέτρων params.txt. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο θα χρησιμοποιήσει τον μη υδροστατικό όρο πίεσης και θα επιλύσει πλήρως όλες τις κυματικές κινήσεις , επομένως και αυτές των βραχέων κυματισμών. Έτσι ο υπολογισμός της αναρρίχησης κύματος θα περιλαμβάνει και την αναρρίχηση λόγω των βραχέων κυματισμών. Να ληφθεί όμως υπόψη ότι αυτή η λειτουργία απαιτεί κάναβο με αρκετά λεπτομερή ανάλυση ώστε να παραστήσει ικανοποιητικά τους βραχύς κυματισμούς β.) να θέσει swrunup = 1, κατά αυτόν τον τρόπο η αναρρίχηση κύματος λόγω των βραχέων κυματισμών επιλύεται εμπειρικά. Αυτή η μέθοδος δεν προτείνεται ωστόστο για τον υπολογισμό της αναρρίχησης κύματος, καθώς αυτό που κάνει είναι απλά να επεκτείνει τη μεταφορά ιζήματος σε περιοχές που θα έπρεπε να είναι υγρές εξαιτίας της κυματικής αναρρίχησης λόγω βραχέων κυματισμών, αλλά στην πραγματικότητα είναι ξηρές καθώς το XBeach επιλύει τελικά μόνο τους μακρύς κυματισμούς.

## 4.1.12 Αριθμητικό Σχήμα

Το XBeach απαιτείται να είναι σε θέση να διαχειριστεί πολύπλοκες υδροδυναμικές καταστάσεις, οι οποίες περιλαμβάνουν υπερκρίσιμη ροή και υδραυλικά άλματα. Για το λόγο αυτό απαιτείται ένα αρκετά εύρωστο αριθμητικό σχήμα, το οποίο θα ελαχιστοποιεί την αριθμητική διάχυση. Η μετάδοση λοιπόν των κυμάτων και της ενέργειας καθώς και η μεταφοράς-διασποράς της συγκέντρωσης των ιζημάτων εξίσωση επιλύονται χρησιμοποιώντας το αριθμητικό σχήμα Upwind 1<sup>ης</sup> τάξης χωρικά και το ρητό σχήμα Euler χρονικά (McCall R.T., 2008). Για τις εξισώσεις ρηχών νερών, εφαρμόζεται η μέθοδος των Stelling and Duinmeijer (2003), η οποία βελτιώνει τον υπολογισμό της αναρρίγησης κύματος και της διάβρωσης των αμμοθινών, διατηρώντας παράλληλα μια απλή προσέγγιση αριθμητικού σχήματος  $1^{\eta\varsigma}$  τάξης (Roelvink et al., 2007).

### 4.1.13 Οριακές Συνθήκες

Το XBeach παρέχει στους χρήστες τη δυνατότητα δύο επιλογών σχετικά με τις οριακές συνθήκες του μοντέλου, οι οποίες εφαρμόζονται στο θαλάσσιο όριο (seaward boundary). Πρόκειται για την επιλογή με φασματικές συνθήκες (spectral conditions), που είναι και η πιο συνηθισμένη, καθώς και μη φασματικές συνθήκες (non-spectral conditions). Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται μεταξύ άλλων η επιλογή του μονοπαραμετρικού φάσματος (single parametric spectrum), κυματικό φάσμα που μεταβάλλεται ως προς το χρόνο ή ως προς το χώρο (time varying and/or spatially varying), είτε φάσματα που προκύπτουν από το κυματικό μοντέλο SWAN, επιτρέποντας έτσι το συνδυασμό των δύο μοντέλων. Η δεύτερη κατηγορία αναφέρεται σε στάσιμα κύματα, όπου προσδιορίζεται μια ομοιόμορφη και σταθερή κυματική ενέργεια και διεύθυνση κύματος, χωρίς να περιλαμβάνει πλέον κυματικές ομάδες και περιλαμβάνει τον ορισμό μιας δεδομένης κυματικής κατάστασης (single sea state), μιας σειράς από κυματικές καταστάσεις (series of sea states) και χρονοσειρές κυμάτων.

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες στα πλευρικά όρια του μοντέλου, και πάλι προσφέρονται δύο επιλογές: Οριακές συνθήκες Neumann, όπου η κατά μήκος κλίση τίθεται ίση με 0 και συνθήκες σχετικές με την κορυφή του κύματος, όπου η κλίση της κυματικής ενέργειας στην κορυφή του κύματος τίθεται ίση με μηδέν. Να σημειωθεί ότι και οι δύο επιλογές δημιουργούν κάποια σημεία «σκιάς» στο μοντέλο (shadow zones).

Αυτή η λειτουργία είναι απαραίτητη για περιπτώσεις όπου οι ανοδικές και καθοδικές κινήσεις της στάθμης της θάλασσας είναι έντονες, όπως και η αναρρίχηση κύματος, και καταλληλότερη σε σκεδαστικές/εκτεθειμένες παραλίες (dissipative beaches), όπου τα βραχέα κύματα διασκορπίζονται κυρίως όταν είναι κοντά στην ακτογραμμή. Οι σκεδαστικές (εκτεθειμένες) παραλίες, σε αντίθεση με της ανακλαστικές (προστατευμένες, reflective beaches) χαρακτηρίζονται κυρίως ως εξαγωγείς υλικού προς τη θάλασσα, είναι παραλίες υψηλής ενέργειας, δηλαδή έχουν έντονο κυματισμό και είναι συνήθως επίπεδες ακτές με

μικρή κλίση και λεπτόκοκκα ιζήματα. Ακόμα και στις παραλίες που βρίσκονται ανάμεσα στις δύο αυτές κατηγορίες (intermediate beaches) και κατά τη διάρκεια καταιγίδων, οι κινήσεις της στάθμης της θάλασσας είναι κυρίαρχες επομένως προτείνεται αυτή η λειτουργία.

Στα πλαίσια αυτής της λειτουργίας, είναι δυνατόν να επιλεγούν μονοδιάστατα μοντέλα εγκάρσια στην ακτή ή δισδιάστατα μοντέλα. Στην περίπτωση μονοδιάστατης προσομοίωσης, αγνοούνται οι κατά μήκος της ακτής κλίσεις. Στη δισδιάστατη προσομοίωση η εισερχόμενη ενέργεια του κύματος θα ποικίλλει κατά μήκος του θαλάσσιου ορίου και στο χρόνο, ανάλογα με τις οριακές συνθήκες που θα επιλεγούν από το χρήστη.

Προς το παρόν δεν είναι δυνατό να οριστούν κύματα από το όριο ξηράς του μοντέλου.

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες που ισχύουν για τη μεταφορά ιζημάτων, η συγκέντρωση του ιζήματος κατά μήκος και των τεσσάρων ορίων θεωρείται μηδενική, γι αυτό χρησιμοποιούνται οι συνθήκες Neumann σε όλα τα όρια (McCall, 2008).

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι στο XBeach υπάρχει η δυνατότητα να ληφθεί υπόψη και η ροή από υπόγεια ύδατα όπως επίσης και τα κύματα που δημιουργούνται από τη διέλευση των πλοίων.

## 4.2 Βήματα δημιουργίας των απαραίτητων αρχείων

Σύμφωνα με τον τρόπο που μελετήθηκαν τα φαινόμενα στην παρούσα εργασία, για την εκτέλεση των υπολογισμών απατούνται τα εξής αρχεία:

Ένα αρχείο βαθυμετρίας-τοπογραφίας, με την ονομασία bed.dep όπου κάθε κελί του κανάβου αντιστοιχίζεται σε μια τιμή-εάν η τιμή αυτή είναι αρνητική, πρόκειται για θάλασσα, εάν η τιμή είναι θετική, πρόκειται για ξηρά (μπορεί να ρυθμιστεί και αντίστροφα).

Ένα αρχείο με την ονομασία nebed.dep στο οποίο σημειώνεται η θέση των οποιοδήποτε κατασκευών περιλαμβάνονται στην περιοχή μελέτης, τοποθετώντας σε κάθε κελί αντίστοιχα με τα κελιά της βαθυμετρίας την τιμή 1 εάν πρόκειται για κελί που περιλαμβάνει άμμο και την τιμή 0 εάν πρόκειται για κελί που αναφέρεται σε στοιχεία και κατασκευές μη διαβρώσιμες (erodible and non-erodible layers). Τα αρχεία που περιέχουν μόνο αριθμούς (βαθυμετρίας και διαβρωσιμότητας), προτείνεται οι αριθμοί να είναι γραμμένοι σε επιστημονική μορφή.

Εάν ο κάναβος δεν εχει κελιά σταθερού μεγέθους, αλλά στην πορεία επιθυμεί ο χρήστης ένα πιο πυκνό κάναβο, τότε απαιτούνται και τα αρχεία x.grd y.grd. Να σημειωθεί βέβαια όταν σ αυτήν την περίπτωση το μέγεθος του κελιού πρέπει να μειώνονται όσο το δυνατόν πιο βαθμιαία. Τα ίδια αρχεία απαιτούνται και στην περίπτωση που η περιοχή εξετάζεται με τις πραγματικές συντεταγμένες της. Στην παρούσα εργασία η περιοχή μελέτης τοποθετήθηκε κατά τέτοιο τρόπο (η ξηρά κατακόρυφα στα δεξιά) ώστε τα αποτελέσματα να είναι άμεσα συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα του μοντέλου MIKE21. Παρόλα αυτά είναι γνωστό σε ποιες συντεταγμένες αντιστοιχεί το κάθε κελί του κανάβου.

Στη συνέχεια ετοιμάζεται το αρχείο params.txt (βλ. παράρτημα) στο οποίο δίνονται τιμές στις παραμέτρους που περιλαμβάνει το xbeach, ανάλογα με την επιθυμία του χρήστη. Εδώ καθορίζονται όλες οι λεπτομέρειες μεταξύ των οποίων το είδος του τρεξίματος, το σχήμα που

θα χρησιμοποιηθεί για τη θραύση των κυμάτων, για τη μεταφορά του ιζήματος, η διάρκεια την καταιγίδας, ποια αποτελέσματα θα παρουσιάσει το πρόγραμμα και ανά ποιο χρονικό διάστημα όταν αυτό ολοκληρωθεί. Μ' αυτό το αρχείο επίσης συνδέονται όλα τα υπόλοιπα αρχεία που περιλαμβάνονται στο φάκελο του τρεξίματος με ειδικές λέξεις-κλειδιά πχ. ne\_layer=nebed.dep ή bcfile=filelist.txt. Σε όποια μεταβλητή δεν δοθεί κάποια τιμή από το χρήστη, θα χρησιμοποιηθεί η πρότυπη τιμή (default) του XBeach.

Το αρχείο filelist.txt (βλ. παράρτημα) απαιτείται όταν μελετάται χρονοσειρά κυματισμών που ακολουθεί κάποιο φάσμα ή κυματικό κλίμα που διαφοροποιείται στο χρόνο. Εκεί καταγράφεται η διάρκεια του κάθε κύματος της χρονοσειράς, το χρονικό βήμα, η διάρκεια και το όνομα του αρχείου (πχ.jonswap\_1.txt) που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά του κύματος αυτού. Να σημειωθεί πως ό,τι αναφέρεται σε χρόνο γράφεται πάντα σε δευτερόλεπτα.

Τέλος, στο αρχείο jonswap.txt (βλ. παράρτημα) αναφέρονται τα στοιχεία του κάθε κυματισμού: Ύψος κύματος  $H_{m0}$ , περίοδος  $T_p$ , κύρια διεύθυνση μετάδοσης του κυματισμού και άλλα χαρακτηριστικά του φάσματος Jonswap.

Όλα τα αρχεία ακολουθούν συγκεκριμένους τρόπους γραφής και σειρά τοποθέτησης των παραμέτρων, τα οποία αναφέρονται αναλυτικά στο εγχειρίδιο του μοντέλου. Όταν είναι πλέον έτοιμα τα αρχεία, πρέπει να βρίσκονται στον ίδιο φάκελο μαζί με τα αρχεία του μοντέλου XBeach. Από εκεί ο χρήστης εκτελεί την εφαρμογή (xbeach.exe) και ξεκινάνε οι υπολογισμοί, την εξέλιξη των οποίων μπορεί να παρακολουθεί.

Όταν οι υπολογισμοί τελειώσουν, έχουν δημιουργηθεί τα αρχεία των αποτελεσμάτων. Στο αρχείο XBlog.txt αναγράφονται όλες οι λεπτομέρειες των υπολογισμών και στο XBwarning.txt τυχόν προτάσεις του προγράμματος για τιμές που καταχώρησε ο χρήστης, οι οποίες δεν είναι μεν λάθος αλλά είναι ασυνήθιστες ή περιττές ή έχουν διπλοκαταχωρηθεί. Στο αρχείο XBerror.txt, σε περίπτωση που εντοπίστηκε σφάλμα και οι υπολογισμοί τερματίστηκαν ξαφνικά υπάρχει πιθανότητα να αναγράφεται ο λόγος για τον οποίο έγινε αυτό και τέλος είναι τα αρχεία με κατάληξη bcf για κάθε κύμα της χρονοσειράς και το αρχείο xboutput.nc (μορφή netcdf) στη νεότερη έκδοση του μοντέλου που περιλαμβάνει όλα τα αποτελέσματα που επέλεξε ο χρήστης να παρουσιαστούν ή αντίστοιχα αρχεία της μορφής.dat για κάθε αποτέλεσμα στην αμέσως παλαιότερη έκδοση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο περιβάλλον της Matlab, με την εντολή xb\_view; και αφού έχει οριστεί ως path ο αντίστοιχος φάκελος καθώς και ο φάκελος με τα εργαλεία που συνδέουν το XBeach με τη Matlab (από την ιστοσελίδα της Deltares επίσης).
# 5. Εφαρμογή του μοντέλου

Όπως αναφέρεται και στο Κεφάλαιο 3, η περιοχή που μελετήθηκε όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 περιλαμβάνει το λιμάνι και την παράκτια περιοχή που βρίσκεται ανατολικά του λιμανιού, μια ακτογραμμή μήκους περίπου 4 km (3760 m). Το σημείο αρχής του καννάβου (κάτω αριστερή γωνία) έχει συντεταγμένες στο σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ 87: (x, y) = (542361, 3913477). Ο κάνναβος έχει διαστάσεις 5160x1500 m με μέγεθος κελιού 5x5m και καλύπτει μια περιοχή έκτασης περίπου 8 km<sup>2</sup>, ενώ το μέγιστο βάθος είναι τα 23m. Το μέγεθος του κόκκου της άμμου επιλέχτηκε ενιαίο και ίσο με 0,2 mm και το πορώδες ίσο με 0,4.



**Σχήμα 5.1** Η περιοχή μελέτης. (πηγή: Google Earth). Διακρίνονται τα όρια του κανάβου, η ακτογραμμή, οι βαθυμετρικές καμπύλες και οι κάθετες διατομές στην ακτή.

Το μοντέλο εφαρμόστηκε για έξι διαφορετικά ιστορικά και μελλοντικά σενάρια καταιγίδας (Πίνακας 5.1) όπως αυτά προέκυψαν από το μοντέλο SWAN (Tsoukala et al., 2016) για τις κύριες κυματικές διευθύνσεις (Σχήμα 3.6) που επικρατούν στην περιοχή, δηλ. κατά φθίνουσα σειρά συχνότητας εμφάνισης Βόρεια, Βορειοδυτική και Βορειοανατολική διεύθυνση (270°, 225° και 315° αντίστοιχα, περιλαμβάνοντας τομέα διεύθυνσης ±45°). Ο τρόπος κατηγοριοποίησης και η τελική κατάταξη των παραπάνω γεγονότων καταιγίδας περιγράφεται στους Πίνακες 3.2-3.5 του Κεφαλαίου 3. Οι χρονοσειρές των καταιγίδων που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν από το μοντέλο SWAN (Tsoukala et al., 2016) και μετρήθηκαν στο σημείο με συντεταγμένες στο ΕΓΣA 87 (X,Y) = (540445.455, 3916318.814)και βάθος -19,2 m. Χρησιμοποιήθηκε η υδροστατική δισδιάστατη λειτουργία του XBeach για μη στάσιμα κύματα (2D hydrostatic instationary mode), όπως προτείνεται από το εγχειρίδιο του μοντέλου για την περίπτωση των καταιγίδων. Καθώς λοιπόν πρόκειται για κυματικές συνθήκες που διαφοροποιούνται στο χρόνο ακολουθώντας το φάσμα JONSWAP, για την επίτευξη της προσομοίωσης τέθηκαν στο αρχείο δήλωσης παραμέτρων (params.txt) τα εξής: για τις κυματικές συνθήκες wbctype=jons και bcfile=filelist.txt, όπου filelist. txt είναι το αρχείο στο οποίο καταγράφονται η διάρκεια της κάθε χρονοσειράς και το χρονικό βήμα και γίνεται η σύνδεση της καθεμιάς με το αρχείο jonswap.txt όπου καταγράφονται όλα τα στοιχεία που αφορούν τη χρονοσειρά, όπως το ύψος κύματος, η συχνότητα και άλλες λεπτομέρειες του φάσματος (βλ. Παράρτημα). Να αναφερθεί πως στους υπολογισμούς δεν λήφθηκε υπόψη το φαινόμενο της παλίρροιας, μιας και στην περιοχή μελέτης δεν είναι έντονο. Για τη θραύση των κυματισμών υιοθετήθηκε το μοντέλο Roelvink (1993a) extended (λέξη-κλειδί: break=roelvink2) ενώ για τη μεταφορά ιζημάτων η θεωρία των Van Thiel-Van Rijn (λέξη-κλειδί: form=vanthiel\_vanrijn). Αναλυτικότερα τα παραπάνω περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4 και στο εγχειρίδιο του μοντέλου. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων αφορούν τα υδροδυναμικά μεγέθη (ύψος κύματος και ταχύτητες) και τον υπολογισμό της μεταφοράς ιζημάτων. Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα απόκτησης κι άλλων μεγεθών, όμως αυτά επιλέχτηκαν από το χρήστη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Στην παρούσα μελέτη, όσον αφορά τη Βόρεια διεύθυνση, έγιναν υπολογισμοί για τα δύο ιστορικά σενάρια κατηγορίας ΙV-Σοβαρή που σημείωσαν αντίστοιχα το μεγαλύτερο ύψος κύματος και τη μεγαλύτερη διάρκεια, ένα ιστορικό σενάριο τυπικής καταιγίδας κατηγορίας II-Μέτρια για λόγους σύγκρισης και εκτίμησης της κρισιμότητας των αποτελεσμάτων σε περίπτωση ακραίου φαινομένου, καθώς και για το μελλοντικό ακραίο γεγονός καταιγίδας κατηγορίας V-Ακραία. Για τη Βορειοδυτική διεύθυνση το μοντέλο εφαρμόστηκε για το δυσμενέστερο σενάριο, δηλαδή το μελλοντικό κατηγορίας II-Μέτρια και τέλος για τη Βορειοανατολική επίσης για το δυσμενέστερο μελλοντικό σενάριο καταιγίδας κατηγορίας ΙΙ-Μέτρια.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η αρχική βαθυμετρία-τοπογραφία της περιοχής μελέτης όπως προβάλλεται στο XBeach. Να τονιστεί πως ο κάναβος δέχτηκε περιστροφή 90° αντιωρολογιακά, ώστε οι εικόνες να είναι άμεσα συγκρίσιμες με τα αποτελέσματα άλλων μοντέλων (πχ. MIKE21). Το μοντέλο δίνει τη δυνατότητα της πραγματοποίησης των υπολογισμών σε πραγματικές συντεταγμένες.



**Σχήμα 5.2.** Η αρχική βαθυμετρία-τοπογραφία της περιοχής μελέτης όπως προβάλλεται στο XBeach (μεταβλητή z<sub>b0</sub>)

Σενάριο	Διεύθυνση	Εύρος Hs (m)	Εύρος Τρ (s)	Μέσο Hs (m)	Μέση Tp (s)	Διάρκεια καταιγίδα ς (h)
1 (ιστορικό)	В	2,59-5,61	9,27-10,72	5,10	9,93	43,5
2 (ιστορικό)	В	2,01-4,61	6,71-9,28	2,86	7,85	103,5
3 (μελλοντικό)	В	2,46-4,95	7,84-9,65	4,18	9,07	72
4 (ιστορικό)	В	1,99-2,69	6,97-7,82	2,27	7,47	51
5 (μελλοντικό)	ВΔ	2,43-3,03	7,41-8,16	2,79	7,87	39
6 (μελλοντικό)	BA	2,07-2,66	6,78-8,96	2,41	8,16	24

Πίνακας 5.1. Τα σενάρια καταιγίδας που προσομοιώθηκαν στο XBeach

Αν και το XBeach αναπτύχθηκε αρχικά για την προσομοίωση καταιγίδων, όλο και περισσότεροι μελετητές δοκιμάζουν την εφαρμογή του σε συνθήκες κυματικού κλίματος. Εδώ το μοντέλο εφαρμόστηκε για τους ισοδύναμους κυματισμούς ανά διεύθυνση πνοής των επικρατέστερων ανέμων όπως αυτοί προέκυψαν από τη μελέτη των Καραμπάς κ.α. (2010) (Πίνακας 5.2). Συγκεκριμένα, το κυματικό κλίμα της περιοχής προσομοιώθηκε με χρήση της λειτουργίας στάσιμων κυματισμών (stationary mode), όπως υποδεικνύει και το εγχειρίδιο του μοντέλου για την περίπτωση αυτή, για 24 h υπό συνδυασμό Βορειοδυτικού, Βόρειου και Βορειοανατολικού ανέμου, με βάση το ετήσιο ποσοστό εμφάνισης του καθενός. Για μη φασματικές συνθήκες λοιπόν που αποτελούνται από στάσιμα κύματα και διαφοροποιούνται στο χρόνο ορίζονται τα εξής στο αρχείο παραμέτρων: wbctype=stat\_table και δημιουργία επιπλέον αρχείου bcfile=filelist.txt στο οποίο καταγράφονται με συγκεκριμένη σειρά όπως ορίζει το εγχειρίδιο οι λεπτομέρειες, όπως το ύψος κύματος, η περίοδος, η διεύθυνση και η διάρκεια (βλ Παράρτημα). Τα παραπάνω περιγράφονται αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 4. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων αφορούν στον υπολογισμό των υδροδυναμικών μεγεθών ύψος κύματος και ταχύτητες και στον υπολογισμό της εγκάρσιας και κατά μήκος της ακτής μεταφοράς ιζημάτων υπό συνθήκες κυματικού κλίματος.

Πίνακας 5.2. Τα χαρακτηριστικά των ετήσιων αντιπροσωπευτικών κυμάτων που προσομοιώθηκαν (Καραμπάς κ.α., 2010)

Διεύθυνση	He (m)	Te (s)
BΔ	1,86	6,45
В	2,19	6,83
BA	2,10	6,77

Τέλος, μελετήθηκε με εφαρμογή του μοντέλου το φαινόμενο της αναρρίχησης κύματος, της διάβρωσης της ακτής και η μορφολογική εξέλιξη του πυθμένα σε 12 εγκάρσιες διατομές στην ακτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 για καθένα από τα παραπάνω σενάρια καταιγίδας (Πίνακας 5.1) χρησιμοποιώντας τη λειτουργία 1D transect mode για μη στάσιμους

κυματισμούς. Να σημειωθεί ότι το XBeach δεν δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού αναρρίχησης κύματος σε διατομές στην περίπτωση της λειτουργίας για στάσιμους κυματισμούς, επομένως τα φαινόμενα αυτά μελετήθηκαν μόνο για την περίπτωση των καταιγίδων και όχι για συνθήκες κυματικού κλίματος. Επομένως τα αρχεία που απαιτούνται και ο τρόπος δήλωσης των παραμέτρων είναι παρόμοιος με αυτόν της προσομοίωσης των γεγονότων καταιγίδας. Η απόσταση μεταξύ των προφίλ ορίστηκε στα 300 m σε μια ακτογραμμή συνολικού μήκους 3760 m, με την πρώτη διατομή να βρίσκεται σε απόσταση 100m ανατολικά του λιμανιού. Τα αποτελέσματα αφορούν υπολογισμούς της εξέλιξης του πυθμένα σε επίπεδο προφίλ, της διάβρωσης των αμμοθινών και της αναρρίχησης κύματος. Με την εξαγωγή αποτελεσμάτων για όλα τα προφίλ ξεχωριστά, επιτυγχάνεται μια ολοκληρωμένη εικόνα για την τρωτότητα της περιοχής σε κατάκλυση.

#### 5.1 Αποτελέσματα υπολογισμών

#### 5.1.1. Αποτελέσματα προσομοίωσης κυματικού κλίματος

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για το κυματικό κλίμα της περιοχής, το οποίο προσομοιώθηκε για 24 h υπό συνδυασμό Βορειοδυτικού, Βόρειου και Βορειοανατολικού ανέμου, με βάση το ετήσιο ποσοστό εμφάνισης του καθενός (29,8%, 51,9%, 18,3% αντίστοιχα), όπως αυτό προκύπτει από τη μελέτη των Καραμπάς κ.α. (2010, σελ. 30). Όπως προαναφέρθηκε, για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιείται η λειτουργία των στάσιμων κυματισμών (stationary mode) του XBeach, για την οποία δεν δύναται να παραχθούν διατομές με σκοπό τον υπολογισμό της κυματικής αναρρίχησης. Τα αποτελέσματα αφορούν υπολογισμούς για το ύψος κύματος Η (m), τις ταχύτητες u,v (m/s) (Σχήμα 5.3) και τη στερεομεταφορά  $S_{utot}$ ,  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) (Σχήμα 5.4). Η στερεομεταφορά υπολογίζεται ξεχωριστά για τις δύο διευθύνσεις ως εξής: συνολική μεταφορά ιζημάτων (φορτίο πυθμένα και αιωρούμενο) εγκάρσια στην ακτή (άξονας x),  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και συνολική μεταφορά ιζημάτων (φορτίο πυθμένα και αιωρούμενο) κατά μήκος της ακτής (άξονας y), S<sub>vtot</sub> (m<sup>2</sup>/s). Στην πρώτη περίπτωση οι αρνητικές τιμές σημαίνουν μεταφορά ιζημάτων προς τα αριστερά (απομακρυνόμενο από την ακτή), ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι αρνητικές τιμές σημαίνουν μεταφορά ιζημάτων προς τα κάτω (στα αρνητικά του άξονα y). Όσον αφορά τις ταχύτητες GLM, παρουσιάζεται η ταχύτητα u (m/s) ως προς τον άξονα x και η ταχύτητα v (m/s) ως προς τον άξονα y στο κέντρο του κελιού. Να σημειωθεί πως ο άξονας x είναι πάντοτε εγκάρσιος στην ακτή, ενώ ο άξονας y κατά μήκος αυτής.



**Σχήμα 5.3.** Ύψος κύματος Η (m) και ταχύτητες u, v (m/s) στους άξονες x και y αντίστοιχα μετά από προσομοίωση κυματικού κλίματος 24h



**Σχήμα 5.4.** Μεταφορά ιζημάτων  $S_{utot}$  εγκάρσια στην ακτή και  $S_{vtot}$  κατά μήκος της ακτής μετά από προσομοίωση κυματικού κλίματος 24 h

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, το ύψος κύματος στις αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου κυματικού κλίματος δεν ξεπερνάει το 1,5 m και οι ταχύτητες το 1 m/s. Όσον αφορά τη στερεομεταφορά, αυτή παραμένει σε χαμηλά επίπεδα της τάξης του  $1*10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s τόσο εγκάρσια όσο και κατά μήκος της ακτής. Τα παραπάνω φανερώνουν μια περιοχή που υπό φυσιολογικές κυματικές συνθήκες δεν κινδυνεύει από έντονες μορφολογικές αλλαγές (διάβρωση/ πρόσχωση).

#### 5.1.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης καταιγίδων

Στη συνέγεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για όλα τα σενάρια των καταιγίδων που προσομοιώθηκαν στο XBeach (Πίνακας 5.1). Όπως προαναφέρθηκε, για τους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιείται η λειτουργία των μη στάσιμων κυματισμών (instationary mode). Τα αποτελέσματα αφορούν υπολογισμούς για το ύψος κύματος Η (m), τις ταχύτητες u,v (m/s) και τη στερεομεταφορά  $S_{utot}$ ,  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s). Η στερεομεταφορά υπολογίζεται ξεχωριστά για τις δύο διευθύνσεις ως εξής: συνολική μεταφορά ιζημάτων (φορτίο πυθμένα και αιωρούμενο) στη διεύθυνση εγκάρσια στην ακτή x,  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και συνολική μεταφορά ιζημάτων (φορτίο πυθμένα και αιωρούμενο) στη διεύθυνση κατά μήκος της ακτής y,  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s). Στην πρώτη περίπτωση οι αρνητικές τιμές σημαίνουν μεταφορά ιζημάτων προς τα αριστερά (απομακρυνόμενο από την ακτή), ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι αρνητικές τιμές σημαίνουν μεταφορά ιζημάτων προς τα κάτω (στα αρνητικά του άξονα y). Να σημειωθεί ότι το φορτίο πυθμένα είναι σχεδόν μηδενικό και το σύνολο μεταφοράς ιζημάτων προέρχεται κυρίως από το αιωρούμενο φορτίο. Γι' αυτό το λόγο παρουσιάζεται στην εργασία η εικόνα της μεταφοράς του συνολικού ιζήματος. Όσον αφορά τις ταχύτητες GLM, παρουσιάζεται η ταχύτητα u (m/s) ως προς τον άξονα x και η ταχύτητα v (m/s) ως προς τον άξονα y στο κέντρο του κελιού. Ενδεικτικά για το Σενάριο 2 παρουσιάζονται επιπλέον η κυματική ενέργεια E (Nm/m<sup>2</sup>), η μέση ταχύτητα Euler  $u_e$  (m/s) και  $v_e$  (m/s) (ως προς τον άξονα x και y αντίστοιχα), καθώς και η εικόνα της τροχιακής ταχύτητας  $u_{rms}$  (m/s). Να διευκρινιστεί πως το XBeach παρέχει τη δυνατότητα κι άλλων υπολογισμών και προβολής των αποτελεσμάτων τους (βλ. Roelvink D. et al., 2010), αυτά όμως επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν από το χρήστη για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας.

Για την ιστορική καταιγίδα (περιόδου 1960-2000) Βόρειας διεύθυνσης κατηγορίας ΙV-Σοβαρή που σημείωσε το μεγαλύτερο ύψος κύματος Hs=5,61 m και είχε διάρκεια D=43,5 h, προέκυψαν τα εξής (Σχήμα 5.5-5.6):



Σχήμα 5.5. Ύψος κύματος H (m) και ταχύτητες u (m/s) και v(m/s) ως προς τον άξονα x και y αντίστοιχα μετά το πέρας της καταιγίδας

Παρατηρούμε ότι μετά το πέρας της καταιγίδας το ύψος κύματος εμφανίζει μέγιστες τιμές που φτάνουν σε σημεία ακόμα και τα 8 m ενώ οι ταχύτητα u έχει μέγιστη τιμή ίση με 2 m/s και η ταχύτητα v ίση με 1,5 m/s. Η εγκάρσια στερεομεταφορά φτάνει τα  $3x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s απομακρυνόμενη από την ακτή ενώ η παράκτια το  $1 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s με φορά κυρίως προς το λιμάνι, ενώ γίνεται εντονότερη γύρω από αυτό. Στον Πίνακα 5.2 καταγράφεται η μέγιστη τιμή της κυματικής αναρρίχησης για κάθε προφίλ καθώς και ο χρόνος στον οποίο αυτή παρατηρείται, η μέγιστη κατάκλυση της ξηράς από το θαλασσινό νερό και τέλος το επίπεδο της κυματικής αναρρίχησης στο τέλος του επεισοδίου της καταιγίδας. Σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα οι δυσμενέστερες διατομές, είτε με βάση την τιμή της κυματικής αναρρίχησης που υπολογίστηκε, είτε/και με βάση την κατάκλυση του νερού επί της ξηράς. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση στο καθένα από αυτά και στο Σχήμα 5.8 περιγράφεται η μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 10 σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του επεισοδίου (t=0h, 1,5h, 3h, 43,5h). Παρατηρούμε ότι η περιοχή πλημμυρίζει ήδη από το  $1^{\circ}$  3ωρο της καταιγίδας, όπου το νερό φτάνει στα 180 m εντός της ξηράς. Στον ίδιο χρόνο παρατηρείται επίσης και η μέγιστη κυματική αναρρίχηση, ίση με 2,3m σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2, η τιμή της οποίας συνεχίζει να υφίσταται μέχρι και το τέλος της καταιγίδας. Η μορφολογική εξέλιξη και των δώδεκα προφίλ στο τέλος της καταιγίδας, δηλ. μετά το πέρας των 43,5 h παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η παράμετρος zb0 συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος zb τη διαμόρφωση του νέου πυθμένα και η παράμετρος zs την επιφάνεια του νερού.



Σχήμα 5.6. Μεταφορά ιζημάτων  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) εγκάρσια και κατά μήκος της ακτής αντίστοιχα

Πίνακας 5.2 Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης για κάθε διατομή. Με πορτοκαλί σημειώνονται οι δυσμενέστερες διατομές, με έντονο μαύρο η μέγιστη τιμή κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης του νερού στην ξηρά

Διατομή	max Ru (m)	Χρόνος παρατήρησης του maxRu πρώτη φορά (h)	Κατάκλυση (m)	Ru στο τέλος της καταιγίδας (m)
1	1,6	3	135	1,4
2	2,3	1,5	51	1,1
3	2,1	4,5	10	2
4	2,2	3	25	1,5
5	2,3	6	30	2
б	2,8	3	45	2
7	1,8	4,5	50	1,5
8	1,8	9	65	1,5
9	2,3	10,5	60	1,3
10	2,3	3	180	2,3
11	1,6	3	85	1,2
12	2,4	4,5	115	2,2



Σχήμα 5.7. Τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση σε καθένα από αυτά. Με z<sub>b0</sub> συμβολίζεται ο αρχικός πυθμένας, με z<sub>b</sub> ο νέος πυθμένας και με z<sub>s</sub> η επιφάνεια του νερού.



Σχήμα 5.8. Χρονική εξέλιξη του προφίλ 10 κατά τη διάρκεια της καταιγίδας-Σενάριο1

Το 2° Σενάριο αφορά τη μεγαλύτερη σε διάρκεια ιστορική καταιγίδα (περίοδος 1960-2000) Βόρειας διεύθυνσης, συγκεκριμένα D=103,5 h. Ανήκει στην κατηγορία IV-Σοβαρή και έχει μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος Hs=4,61 m. Στα Σχήματα 5.9-5.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Ενδεικτικά γι' αυτό το σενάριο παρουσιάζονται επιπλέον η κυματική ενέργεια Ε (Nm/m<sup>2</sup>), οι ταχύτητες Euler (με τις οποίες υπολογίζονται οι διατμητικές τάσεις στον πυθμένα) u<sub>e</sub> και v<sub>e</sub> ως προς τους άξονες x και y αντίστοιχα και η τροχιακή ταχύτητα u<sub>rms</sub> (m/s).



Σχήμα 5.9. Ύψος κύματος Η (m) και κυματική ενέργεια Ε (Nm/m²) μετά το πέρας της καταιγίδας



Σχήμα 5.10. Ταχύτητες u (m/s) ως προς τον άξονα x και v(m/s) ως προς τον άξονα y



**Σχήμα 5.11**. Ταχύτητες Euler  $u_e$  (m/s)  $v_e$  (m/s) ως προς άξονα x και y αντίστοιχα και τροχιακή ταχύτητα  $u_{rms}$  (m/s)



**Σχήμα 5.12.** Μεταφορά ιζημάτων  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) εγκάρσια και κατά μήκος της ακτής αντίστοιχα

Παρατηρούμε ότι μετά το πέρας της καταιγίδας το ύψος κύματος εμφανίζει μέγιστες τιμές που δεν ξεπερνούν τα 4 m, ενώ οι ταχύτητες παρουσιάζουν μέγιστη τιμή ίση με 1 m/s η οποία εμφανίζεται όπως ήταν αναμενόμενο στα ρηχά νερά και γύρω από το λιμάνι. Η στερεομεταφορά παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, φτάνοντας στην τιμή των  $2 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  και ως προς τις δύο διευθύνσεις. Στον Πίνακα 5.3 καταγράφεται η μέγιστη τιμή της κυματικής αναρρίχησης για κάθε προφίλ καθώς και ο χρόνος στον οποίο αυτή παρατηρείται, η μέγιστη κατάκλυση και τέλος το επίπεδο της κυματικής αναρρίχησης στο τέλος του επεισοδίου. Σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα οι δυσμενέστερες διατομές, είτε με βάση την τιμή της κυματικής αναρρίγησης που υπολογίστηκε, είτε/και με βάση την κατάκλιση της ξηράς από το νερό. Στο Σχήμα 5.13 παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση στο καθένα από αυτά και στο Σχήμα 5.14 περιγράφεται η μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 1 σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του επεισοδίου (t=0h, 6h, 51h, 103,5h). Παρατηρούμε ότι η περιοχή πλημμυρίζει ήδη από το  $1^{\circ}$ 6ωρο της καταιγίδας, όπου το νερό φτάνει στα 125 m εντός της ξηράς. Τρεις ώρες νωρίτερα παρατηρείται και η μέγιστη κυματική αναρρίχηση του συγκεκριμένου προφίλ, ίση με 1,1 m (Πίνακας 5.3), ενώ στο τέλος της καταιγίδας η ίδια φτάνει τα 0,4 m. Η μορφολογική εξέλιξη και των δώδεκα προφίλ στο τέλος της καταιγίδας, δηλ. μετά το πέρας των 103,5 h, παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η παράμετρος zb0 συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος zb τη διαμόρφωση του νέου πυθμένα και η παράμετρος zs την επιφάνεια του νερού.

Πίνακας 5.3. Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης για κάθε διατομή. Με πορτοκαλί σημειώνονται οι δυσμενέστερες διατομές, με έντονο μαύρο η μέγιστη τιμή κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης του νερού στην ξηρά

Διατομή	max Ru (m)	Χρόνος παρατήρησης του maxRu πρώτη φορά (h)	Κατάκλυση (m)	Ru στο τέλος της καταιγίδας (m)
1	1,1	3	125	0,4
2	1,4	1,5	15	1,4
3	1,3	1,5	4	1,1
4	1,7	1,5	10	1,7
5	1,3	7,5	20	0,5
6	1,2	7,5	40	0,6
7	1,8	12	50	1,5
8	1,6	15	25	0,5
9	1,7	13,5	40	0,5
10	1,6	7,5	35	1,6
11	1,6	1,5	75	0,4
12	2,1	28,5	35	0,7



Σχήμα 5.13. Τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση σε καθένα από αυτά. Με z<sub>b0</sub> συμβολίζεται ο αρχικός πυθμένας, με z<sub>b</sub> ο νέος πυθμένας και με z<sub>s</sub> η επιφάνεια του νερού.



Σχήμα 5.14. Χρονική εξέλιξη του προφίλ 1 κατά τη διάρκεια της καταιγίδας-Σενάριο 2

Το δυσμενέστερο σενάριο μελλοντικής καταιγίδας (περίοδος 2000-2100), βόρειας διεύθυνσης, ανήκει στην Κατηγορία V των ακραίων γεγονότων με μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος Hs=4,95 m και διάρκεια καταιγίδας 72 h. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών (Σχήμα 5.15, 5.16).



**Σχήμα 5.15.** Ύψος κύματος H (m) μετά το πέρας της καταιγίδας Ταχύτητες m/s (α) ως προς τον άξονα x (β) ως προς τον άξονα y

Παρατηρούμε ότι μετά το πέρας της καταιγίδας το ύψος κύματος εμφανίζει σε σημεία μέγιστη τιμή ίση με 7 m, ενώ οι ταχύτητες παρουσιάζουν μέγιστη τιμή ίση με 1,5 m/s η οποία εμφανίζεται όπως ήταν αναμενόμενο στα ρηχά νερά και γύρω από το λιμάνι. Η εγκάρσια στερεομεταφορά είναι εντονότερη από την παράκτια, με την πρώτη να φτάνει το  $1,5x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s ενώ η παράκτια τα  $6x10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. Στον Πίνακα 5.4 καταγράφεται η μέγιστη τιμή της κυματικής αναρρίχησης για κάθε προφίλ καθώς και ο χρόνος στον οποίο αυτή παρατηρείται, η μέγιστη απόσταση διείσδυσης του θαλασσινού νερού στη στεριά (κατάκλυση) και τέλος το ύψος της κυματικής αναρρίχησης στο τέλος του επεισοδίου. Σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα οι δυσμενέστερες διατομές, είτε με βάση την τιμή της κυματικής αναρρίχησης που υπολογίστηκε, είτε/και με βάση την κατάκλυση της ξηράς από το θαλασσινό νερό. Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση στο καθένα από αυτά και στο Σχήμα 5.18 περιγράφεται η μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 10 σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του επεισοδίου (t=0h, 12h, 36h, 48h, 60h, 72h). Παρατηρούμε ότι το θαλασσινό νερό γαί για με βάση την το θαλασσινό γερό φτάνει στη

μέγιστή του απόσταση εντός της ξηράς μετά από 60 ώρες καταιγίδας, καλύπτοντας 115 m ξηράς. Περίπου στα μισά της καταιγίδας σημειώνεται και η μέγιστη κυματική αναρρίχηση του συγκεκριμένου προφίλ, ίση με 1,8 m (Πίνακας 5.4), ενώ στο τέλος της καταιγίδας η ίδια φτάνει τα 1,4 m. Η μορφολογική εξέλιξη και των δώδεκα προφίλ στο τέλος της καταιγίδας, δηλ. μετά το πέρας των 72 h παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η παράμετρος zb0 συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος zb τη διαμόρφωση του νέου πυθμένα και η παράμετρος zs την επιφάνεια του νερού.



**Σχήμα 5.16.** Μεταφορά ιζημάτων  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και  $\stackrel{m}{S}_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) εγκάρσια και κατά μήκος της ακτής αντίστοιχα

**Πίνακας 5.4**. Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης για κάθε διατομή. Με πορτοκαλί σημειώνονται οι δυσμενέστερες διατομές, με έντονο μαύρο η μέγιστη τιμή κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης του νερού στην ξηρά

Διατομή	max Ru (m)	Χρόνος παρατήρησης του maxRu πρώτη φορά (h)	Κατάκλυση (m)	Ru στο τέλος της καταιγίδας (m)
1	2	33	140	0,9
2	1,9	39	25	0,8
3	2,1	27	10	2
4	2,3	30	10	2,3
5	2	42	35	1,8
6	2,3	48	45	0,8
7	1,8	21	50	1,2
8	1,8	33	55	0,8
9	2,3	60	55	0,8
10	1,8	33	115	1,4
11	1,5	21	95	1,2
12	2,3	30	70	0,7



Σχήμα 5.17. Τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση σε καθένα από αυτά. Με z<sub>b0</sub> συμβολίζεται ο αρχικός πυθμένας, με z<sub>b</sub> ο νέος πυθμένας και με z<sub>s</sub> η επιφάνεια του νερού.



Σχήμα 5.18. Χρονική εξέλιξη του προφίλ 10 κατά τη διάρκεια της καταιγίδας-Σενάριο 3

Για τη συγκεκριμένη κατηγορία καταιγίδας (V-ακραία, 2000-2100) έγιναν υπολογισμοί του επιπέδου της κυματικής αναρρίχησης στο προφίλ 9 στη μελέτη των Tsoukala et al., (2016) χρησιμοποιώντας κι άλλες μεθόδους. Για λόγους σύγκρισης και αφορμής περαιτέρω αναζήτησης, παρατίθενται στον Πίνακα 5.5 τα αποτελέσματα του κάθε μοντέλου. Να τονιστεί ωστόσο ότι για τις άλλες μεθόδους, η τιμή της κυματικής αναρρίχησης προκύπτει ως ο μέσος όρος όλων των καταιγίδων της κατηγορίας και όχι από μία συγκεκριμένη καταιγίδα της κατηγορίας όπως συμβαίνει στην περίπτωση του XBeach εδώ. Παρόλα αυτά παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα είναι αρκετά κοντινό με τους υπολογισμούς του μοντέλου ΜΙΚΕ21 και λιγότερο συντηρητικό από τις εμπειρικές μεθόδους.

**Πίνακας 5.5**. Σύγκριση της κυματικής αναρρίχησης (wave run-up) στο προφίλ 9 με υπολογισμούς άλλων μεθόδων

Ru (m)- Διατομή 9				
Empirical Stockdon et al. (2006)	Empirical CEM(2008)	Numerical Boussinesq (MIIKE21)	Numerical Stelling and Duinmeijer,2003 (XBeach)	
2.42	2.99	2.25	2.3	

Συνοπτικά, η ποσότητα της κυματικής αναρρίχησης υπολογίστηκε στις υπόλοιπες μεθόδους με τους εξής τρόπους (Tsoukala et al.,2016):

1. Εμπερική σχέση Stockdon et al. (2006)

$$Ru = 1.1 \left( 0.35 \tan\beta (H_s L_o)^{1/2} + \left( H_s L_o \frac{(0.536 \tan\beta^2 + 0.004)^{1/2}}{2} \right) \right)$$
(5.1)

όπου  $\tan\beta$  η κλίση της ακτής και L<sub>o</sub> το μήκος κύματος στα βαθειά συσχετισμένο με την μέγιστη περίοδο  $T_p$  για κάθε καταιγίδα. Για κάθε τιμή του μέγιστου  $H_s$ , επιλέγεται ταυτόχρονα μια τιμή  $\xi$ .

2. Εξίσωση κυματικής αναρρίχησης μη γραμμικών κυμάτων Coastal Engineering Manual (2008)

$$\frac{Ru}{H_s} = \begin{cases} 0.96\xi & \text{for } 1 < \xi < 1.5\\ 1.17\xi^{0.46} & \text{for } 1.5 < \xi \end{cases}$$
(5.2)

όπου ο αριθμός Irribaren ορίζεται ως:

$$\xi = \frac{\tan\alpha}{\sqrt{\frac{H_s}{L_o}}}$$

3. Με αριθμητική προσομοίωση στη μονοδιάστατη έκδοση Boussinesq- μοντέλο υπορουτίνα του MIKE (MIKE21 BW).

Πρόκειται για μια ιστορική καταιγίδα (περίοδος 1960-2000) Βόρειας διεύθυνσης που ανήκει στην κατηγορία ΙΙ-Μέτρια με μέσο σημαντικό ύψος κύματος Hs=2,27 m και διάρκεια D=51 h. Η καταιγίδα αυτή προσομοιώθηκε κυρίως για λόγους σύγκρισης με πιο ακραία γεγονότα, ώστε να τονιστούν και να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις των τελευταίων. Στα Σχήματα 5.19, 5.20 παρατίθενται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.19. Ύψος κύματος Η (m) και ταχύτητες u και v m/s ως προς τον άξονα x και y αντίστοιχα μετά το πέρας της καταιγίδας



**Σχήμα 5.20.** Μεταφορά ιζημάτων  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) εγκάρσια και κατά μήκος της ακτής αντίστοιχα

Παρατηρούμε ότι το ύψος κύματος σημειώνει μέγιστη τιμή ίση με 4,5 m, ενώ οι ταχύτητες δεν ξεπερνούν το 1,5 m/s. Η εγκάρσια στερεομεταφορά δεν ξεπερνά τα  $2x10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s και η παράκτια τα  $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ . Στον Πίνακα 5.6 καταγράφεται η μέγιστη τιμή της κυματικής αναρρίχησης για κάθε προφίλ καθώς και ο χρόνος στον οποίο αυτή παρατηρείται, η μέγιστη κατάκλυση και τέλος το επίπεδο της κυματικής αναρρίχησης στο τέλος του επεισοδίου της καταιγίδας. Σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα οι δυσμενέστερες διατομές, είτε με βάση την τιμή της κυματικής αναρρίχησης που υπολογίστηκε, είτε/και με βάση την κατάκλυση της ξηράς από το θαλασσινό νερό. Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση στο καθένα από αυτά και στο Σχήμα 5.22 περιγράφεται η μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 7 σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του επεισοδίου (t=0h, 6h, 39h, 51h). Παρατηρούμε ότι η μέγιστη αναρρίγηση επιτυγγάνεται μετά από 39 h ώρες καταιγίδας και είναι ίση με 1,8 m μέγρι και το τέλος του επεισοδίου, ενώ η μέγιστη κατάκλυση σημειώνεται επίσης στην ίδια διατομή φτάνοντας τα 50 m, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.6. Συμπεραίνεται δηλαδή πως η περιοχή αποδεικνύεται αρκετά δυναμική σε περιπτώσεις καταιγίδων μέτριας σοβαρότητας. Η μορφολογική εξέλιξη και των δώδεκα προφίλ στο τέλος της καταιγίδας, δηλ. μετά το πέρας των 51 h παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η παράμετρος zb0 συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος zb τη διαμόρφωση του νέου πυθμένα και η παράμετρος zs την επιφάνεια του νερού.

**Πίνακας 5.6.** Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης για κάθε διατομή. Με πορτοκαλί σημειώνονται οι δυσμενέστερες διατομές, με έντονο μαύρο η μέγιστη τιμή κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης του νερού στην ξηρά

Διατομή	max Ru (m)	Χρόνος παρατήρησης του maxRu πρώτη φορά (h)	Κατάκλυση (m)	Ru στο τέλος της καταιγίδας (m)
1	1	33	25	0,9
2	1	9	5	1
3	1,3	6	5	1,3
4	1,2	3	5	1,2
5	1,2	39	15	1,2
6	1,2	39	35	1,2
7	1,8	39	50	1,8
8	1,1	42	35	1,1
9	0,9	6	30	0,9
10	1,1	12	40	1,1
11	1,1	42	30	1,1
12	1,3	6	30	1,3



Σχήμα 5.21. Τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση σε καθένα από αυτά. Με z<sub>b0</sub> συμβολίζεται ο αρχικός πυθμένας, με z<sub>b</sub> ο νέος πυθμένας και με z<sub>s</sub> η επιφάνεια του νερού.



Σχήμα 5.22. Μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 7 κατά τη διάρκεια της καταιγίδας

Όσον αφορά τη Βορειοδυτική διεύθυνση του ανέμου, εξετάστηκε το δυσμενέστερο μελλοντικό γεγονός (περίοδος 2000-2100) το οποίο κατατάσσεται στην κατηγορία ΙΙ- Μέτρια με μέγιστο ύψος κύματος Hs=3,03 m και διάρκεια καταιγίδας D=39h.

Να σημειωθεί εδώ ότι στο XBeach μόνο το ανοιχτό θαλάσσιο όριο (offshore boundary) και όχι τα πλάγια όρια (lateral boundaries) θεωρούνται όρια παραγωγής κυμάτων. Γι' αυτό το λόγο εάν εφαρμοστούν πλάγια κύματα, όπως σ' αυτό το σενάριο, δημιουργείται μια «ζώνη σκιάς» (shadow zone) στην οποία δεν παράγονται κύματα, όπως σημειώνεται στο Σχήμα 5.23.



Σχήμα 5.23. Ύψος κύματος Η (m) και ταχύτητες u και v (m/s) ως προς τον άξονα x και y αντίστοιχα μετά το πέρας της καταιγίδας-σημειώνεται με κόκκινο κύκλο η περιοχή της ζώνης σκιάς (shadow zone).



**Σχήμα 5.24.** Μεταφορά ιζημάτων  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) εγκάρσια και κατά μήκος της ακτής αντίστοιχα

Όπως παρατηρούμε στα αποτελέσματα, το ύψος κύματος δεν ξεπερνάει τα 4,5 m και οι ταχύτητες τα 2 m/s, με την ταχύτητα v να είναι αισθητά πιο έντονη γύρω από το λιμάνι. Η στερεομεταφορά είναι έντονη γύρω από το λιμάνι (0,01 m<sup>2</sup>/s στη διεύθυνση y) ενώ κοντά στην ακτή η εγκάρσια φτάνει τα  $1.5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s και η παράκτια τα  $3 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, κυρίως στο τελευταίο 1,5 km της υπό μελέτης ακτογραμμής. Στον Πίνακα 5.7 καταγράφεται η μέγιστη τιμή της κυματικής αναρρίχησης για κάθε προφίλ καθώς και ο χρόνος στον οποίο αυτή παρατηρείται, η μέγιστη κατάκλυση και τέλος το επίπεδο της κυματικής αναρρίχησης μετά το πέρας του επεισοδίου. Σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα οι δυσμενέστερες διατομές, είτε με βάση την τιμή της κυματικής αναρρίχησης που υπολογίστηκε, είτε/και με βάση την απόσταση της κατάκλυσης. Στο Σχήμα 5.25 παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση στο καθένα από αυτά και στο Σχήμα 5.26 περιγράφεται η μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 6 σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του επεισοδίου (t=0h, 6h, 24h, 39h). Παρατηρούμε ότι η μέγιστη αναρρίχηση επιτυγχάνεται μετά από 24 h ώρες καταιγίδας και είναι ίση με 0,8 m μέχρι και το τέλος του επεισοδίου, ενώ η μέγιστη κατάκλυση σημειώνεται στην αμέσως επόμενη διατομή φτάνοντας τα 45 m, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.7. Η μορφολογική εξέλιξη και των δώδεκα προφίλ στο τέλος της καταιγίδας, δηλ. μετά το πέρας των 39 h παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η παράμετρος zb0 συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος zb τη διαμόρφωση του νέου πυθμένα και η παράμετρος zs την επιφάνεια του νερού.

**Πίνακας 5.7.** Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης για κάθε διατομή. Με πορτοκαλί σημειώνονται οι δυσμενέστερες διατομές, με έντονο μαύρο η μέγιστη τιμή κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης του νερού στην ξηρά

Διατομή	max Ru (m)	Χρόνος παρατήρησης του maxRu πρώτη φορά (h)	Κατάκλυση (m)	Ru στο τέλος της καταιγίδας (m)
1	0,8	12	15	0,8
2	1,2	6	5	1,2
3	1,2	12	3	1,2
4	1,2	7,5	5	0,7
5	0,8	6	10	0,8
6	0,8	6	30	0,8
7	0,6	3	45	0,6
8	0,9	4,5	12	0,9
9	0,7	4,5	25	0,8
10	0,8	7,5	25	0,7
11	0,7	9	25	0,8
12	0,8	3	25	0,7



Σχήμα 5.25. Τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση σε καθένα από αυτά. Με z<sub>b0</sub> συμβολίζεται ο αρχικός πυθμένας, με z<sub>b</sub> ο νέος πυθμένας και με z<sub>s</sub> η επιφάνεια του νερού.



Σχήμα 5.26 Μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 6 κατά τη διάρκεια της καταιγίδας-Σενάριο 5

Για τη Βορειοανατολική διεύθυνση του ανέμου εξετάστηκε το μελλοντικό σενάριο καταιγίδας το οποίο ανήκει στην κατηγορία ΙΙ-Μέτρια με διάρκεια 24h και μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος Hs=2,7m. Να σημειωθεί και εδώ όπως και στο προηγούμενο σενάριο, ότι στο XBeach μόνο το ανοιχτό θαλάσσιο όριο (offshore boundary) και όχι τα πλάγια όρια (lateral boundaries) θεωρούνται όρια παραγωγής κυμάτων. Γι αυτό το λόγο εάν εφαρμοστούν πλάγια κύματα δημιουργείται μια «ζώνη σκιάς» (shadow zone) στην οποία δεν παράγονται κύματα, όπως σημειώνεται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 5.27.** Ύψος κύματος Η (m) και ταχύτητες u και v (m/s) ως προς τον άξονα x και y αντίστοιχα μετά το πέρας της καταιγίδας-σημειώνεται με κόκκινο κύκλο η περιοχή της ζώνης σκιάς (shadow zone).



**Σχήμα 5.28.** Μεταφορά ιζημάτων  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) και  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s) εγκάρσια και κατά μήκος της ακτής αντίστοιχα

Στο σενάριο αυτό παρατηρούμε ότι το ύψος κύματος εμφανίζει μέγιστη τιμή που φτάνει τα 4,5 m kai oi tayúthtec to 1,5 m/s. H eykápsia stepeohetagopá gtávei ta  $1.5 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s kai n παράκτια τα  $2x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Στον Πίνακα 5.8 καταγράφεται η μέγιστη τιμή της κυματικής αναρρίχησης για κάθε προφίλ καθώς και ο χρόνος στον οποίο παρατηρείται, η μέγιστη κατάκλυση και τέλος το επίπεδο της κυματικής αναρρίχησης μετά το πέρας του επεισοδίου. Σημειώνονται με πορτοκαλί χρώμα οι δυσμενέστερες διατομές είτε με βάση την τιμή της κυματικής αναρρίχησης που υπολογίστηκε, είτε/και με βάση την κατάκλυση της ξηράς από το θαλασσινό νερό. Στο Σγήμα 5.29 παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση στο καθένα από αυτά και στο Σχήμα 5.30 περιγράφεται η μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 12 σε διαφορετικές χρονικές στιγμές του επεισοδίου (t=0h, 3h, 12h, 24h). Στο προφίλ αυτό σημειώνεται η μέγιστη κυματική αναρρίχηση του γεγονότος και γενικότερα όλων των σεναρίων που εξετάστηκαν ίση με 4,2 m στο πρώτο μάλιστα 3ωρο της καταιγίδας. Σ' αυτό το σενάριο σημειώνονται επίσης ιδιαίτερα μεγάλες κατακλύσεις, φτάνοντας στις διατομές 1 και 10 ακόμα και τα 165 και 160 m αντίστοιχα. Η μορφολογική εξέλιξη και των δώδεκα προφίλ στο τέλος της καταιγίδας, δηλ. μετά το πέρας των 24 h παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η παράμετρος zb0 συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος zb τη διαμόρφωση του νέου πυθμένα και η παράμετρος zs την επιφάνεια του νερού.

Πίνακας 5.8. Συγκεντρωτικός πίνακας κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης για κάθε διατομή. Με πορτοκαλί σημειώνονται οι δυσμενέστερες διατομές, με έντονο μαύρο η μέγιστη τιμή κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης του νερού στην ξηρά

Διατομή	max Ru (m)	Χρόνος παρατήρησης του maxRu πρώτη φορά (h)	Κατάκλυση (m)	Ru στο τέλος της καταιγίδας (m)
1	3,5	3	160	1,7
2	2,5	3	75	0,8
3	2,4	3	10	2
4	2,5	3	45	2,5
5	2,1	3	35	2
6	2,3	3	60	0,6
7	1,5	3	50	1,5
8	3,3	3	130	3,3
9	2,1	3	85	2,1
10	2,8	3	165	1,7
11	1,5	3	85	0,6
12	4,2	3	145	0,7



Σχήμα 5.29 Τα δυσμενέστερα προφίλ της καταιγίδας στο χρόνο που σημειώθηκε η μέγιστη αναρρίχηση σε καθένα από αυτά. Με z<sub>b0</sub> συμβολίζεται ο αρχικός πυθμένας, με z<sub>b</sub> ο νέος πυθμένας και με z<sub>s</sub> η επιφάνεια του νερού.


Σχήμα 5.30. Εξέλιξη του προφίλ 12 κατά τη διάρκεια της καταιγίδας-Σενάριο 6

### 5.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το κύριο μέρος των ακτομηχανικών φαινομένων λαμβάνει χώρα μέσα στη ζώνη θραύσης των κυματισμών, δηλαδή από το βάθος που πραγματοποιείται η θραύση μέχρι και την ακτή και έχει στην περίπτωση των καταιγίδων πλάτος περί τα 350-400 m. Συγκεκριμένα, μετά τη θραύση των κυματισμών και τη μετακίνηση του μετώπου θραύσης προς την ακτή, δημιουργούνται έντονα τυρβώδη φαινόμενα στην υδάτινη μάζα που έχουν ως αποτέλεσμα την αιώρηση των λεπτόκοκκων κυρίως υλικών του πυθμένα. Η πλάγια πρόσπτωση των κυματισμών στην ακτή δημιουργεί κατά μήκος της ακτής μια συνιστώσα μεταφοράς νερού που ισοδυναμεί με ρεύμα σημαντικής έντασης (longshore current). Το ρεύμα αυτό σε συνδυασμό με την κυματική κίνηση και την τύρβη στη ζώνη θραύσης, αποτελεί και τον βασικό παράγοντα μεταφοράς των υλικών κατά μήκος της ακτής (Kαραμπάς κ.α., 2010).

Όσον αφορά τα αποτελέσματα για τις αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου κυματικού κλίματος, το μοντέλο φαίνεται να προσομοιώνει ικανοποιητικά την ανταπόκριση της ακτής σε αυτές τις συνθήκες, με το ύψος κύματος να μην ξεπερνάει τα 2m και τη στερεομεταφορά να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα (1x10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s). Πρόκειται δηλαδή για μια ακτογραμμή που υπό φυσιολογικές καιρικές συνθήκες δεν φαίνεται να παρουσιάζει προβλήματα διάβρωσης ή πλημμύρας και η ακτή βρίσκεται σε ετήσια δυναμική ισορροπία.

Όσον αφορά τα σενάρια καταιγίδας, όπως προκύπτει από όλους τους παραπάνω υπολογισμούς, η ακτή αποδεικνύεται προστατευμένη από κύματα βορειοδυτικής προέλευσης λόγω της παρουσίας του λιμανιού με την αναρρίχηση κύματος να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα-κυματική αναρρίχηση όχι μεγαλύτερη από 1 m και διατομές χωρίς δείγματα πλημμύρας. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα σχετικά με τη στερεομεταφορά υπό βορειοδυτικούς κυματισμούς, με έντονη μεταφορά ιζημάτων γύρω από την περιοχή του λιμανιού, ενώ τα δύο πρώτα χιλιόμετρα ακτογραμμής ανατολικά του λιμανιού, όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.24 της παράκτιας στερεομεταφοράς, προκύπτουν να βρίσκονται υπό τη ζώνη επίδρασης του προσήνεμου κυματοθραύστη, πράγμα που σημαίνει ότι η κυματική ενέργεια είναι μειωμένη σε σχέση με τις περιοχές που βρίσκονται πιο ανατολικά. Έτσι οι μηχανισμοί μεταφοράς άμμου (κυματισμοί και κυματογενή ρεύματα) έχουν μικρότερη ένταση σ αυτήν την περιοχή και η παράκτια στερεομεταφορά φτάνει έξω από αυτή τη ζώνη «σκιάς» την τιμή των 3x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s.

Στους βόρειους και βορειοανατολικούς κυματισμούς η ακτογραμμή είναι πλήρως εκτεθειμένη. Οι βόρειοι άνεμοι κυριαρχούν στην περιοχή και ακραίες καταιγίδες αυτής της διεύθυνσης προκαλούν αναρρίχηση κύματος με μέση τιμή τα 2 m (μέση τιμή όλων των διατομών Σεναρίων 1, 2 και 3), πλημμύρα σε αρκετές διατομές και μέγιστη εγκάρσια μεταφορά ιζήματος ίση με  $3x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s απομακρυνόμενη από την ακτή και παράκτια στερεομεταφορά  $1x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, τιμές που εμφανίζονται στο Σενάριο 1, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.9. Το μέγεθος της διάρκειας της καταιγίδας αποδεικνύεται πως έχει λιγότερες επιπτώσεις σε σύγκριση με το μέγεθος του ύψους κύματος, αφού στο Σενάριο 2, το οποίο έχει μεν μεγαλύτερη διάρκεια καταιγίδας αλλά εμφανίζει μικρότερα ύψη κύματος σε σχέση με τα Σενάρια 1 και 3 (διάρκεια D=103,5 h και H<sub>max</sub>=4,61m έναντι διάρκειας D=43,5 h και H<sub>max</sub>=5,61m του Σεναρίου 1), η στερεομεταφορά είναι αισθητά μικρότερη και ως προς τις δύο διευθύνσεις. Σε καταιγίδες μέτριας σοβαρότητας (Σενάριο 4) η μέση κυματική

αναρρίχηση μεταξύ των διατομών δεν ξεπερνάει το 1,5 m, η κατάκλυση παραμένει σε φυσιολογικά επίπεδα, ενώ η παράκτια στερεομεταφορά φτάνει την τιμή των  $3 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

Όσον αφορά τους βορειοανατολικούς ανέμους, μπορεί να έχουν τη μικρότερη συχνότητα εμφάνισης, ωστόσο η περιοχή προκύπτει ιδιαίτερα ευάλωτη σε βορειοανατολικές καταιγίδες ακόμα και μέτριας σοβαρότητας, με μέση τιμή αναρρίχησης κύματος ίση με 2,8 m και διατομές με μεγάλη κατάκλυση ακόμα και της τάξης των 150 m. Η μεταφορά ιζημάτων εγκάρσια στην ακτή φτάνει τα 1,5x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s εμφανίζοντας τάσεις πρόσχωσης, ενώ κατά μήκος της ακτής τα 2x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s με κατεύθυνση προς το λιμάνι. Γενικότερα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.9, στα Σενάρια βόρειων κυματισμών παρατηρείται μεγαλύτερη εγκάρσια στερεομεταφορά έναντι της παράκτιας, ενώ στους πλάγιους κυματισμούς, όπως ήταν αναμενόμενο, υπερτερεί η παράκτια στερεομεταφορά (Σενάρια 5 και 6).

Στα Σχήματα 5.31 και 5.32 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της στερεομεταφοράς για όλα τα σενάρια καταιγίδας που προσομοιώθηκαν. Οι αρνητικές τιμές στον άξονα x υποδηλώνουν ίζημα που απομακρύνεται από την ακτή, ενώ στον άξονα y ίζημα με κατεύθυνση προς το λιμάνι. Οι τιμές S<sub>utot</sub> και S<sub>vtot</sub> αναφέρονται στο σύνολο του ιζήματος, δηλαδή στο άθροισμα του ιζήματος πυθμένα και του αιωρούμενου, εγκάρσια και κατά μήκος της ακτής αντίστοιχα, με το αιωρούμενο να αποτελεί το κυρίως ίζημα που μεταφέρεται. Όπως αναφέρεται και στη μελέτη των Καραμπάς κ.α. (2010) και επιβεβαιώνεται και εδώ και από τα αποτελέσματα του ΧΒeach, στην περίπτωση των Β και ΒΑ κυματισμών η κύρια διεύθυνση της στερεομεταφοράς είναι προς τα δυτικά (προς το λιμάνι). Στο δυτικό άκρο της ακτής που εξετάζεται βρίσκεται ο λιμένας, η παρουσία του οποίου διακόπτει την παράλληλη προς την ακτή μεταφορά μαζών νερού και ιζήματος. Έτσι στην περιοχή αυτή εναποτίθεται το ίζημα δημιουργώντας προβλήματα πρόσχωσης στην είσοδο του λιμένα.

Το ύψος κύματος στα δυσμενέστερα Σενάρια 1 και 3 φτάνει σε σημεία τα 7 m, ενώ στα υπόλοιπα δεν ξεπερνάει τα 5 m. Σε όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες, όπως ήταν αναμενόμενο λόγω ανάκλασης, γύρω από τις λιμενικές κατασκευές και εντός της ζώνης κυματαγωγής (surf zone). Ενδεικτικά στο Σενάριο 1 η ταχύτητα u παρουσιάζει μέγιστη τιμή ίση με 2 m/s και η ταχύτητα v τιμή ίση με 1,5 m/s. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κυματογενή ρεύματα λόγω των Β κυματισμών σε μια περιοχή περίπου 1000 m ανατολικά του υπήνεμου μώλου. Κρίνοντας από τα Σχήματα των ταχυτήτων η κυκλοφορία χαρακτηρίζεται από στροβίλους και ρεύματα επαναφοράς, (γνωστά στη διεθνή βιβλιογραφία ως rip-currents) με κατεύθυνση προς τα ανοιχτά.

Σενάριο	Εγκάρσια στερεομεταφορά (cm <sup>2</sup> /s)	Παράκτια στερεομεταφορά (cm <sup>2</sup> /s)
1	30	10
2	2	2
3	15	6
4	2	3
5	15	30
6	15	20

**Πίνακας 5.9** Συγκεντρωτικός πίνακας στερεομεταφοράς στην ακτή για όλα τα σενάρια καταιγίδων



**Σχήμα 5.31** Συνολική μεταφορά ιζήματος  $S_{utot}$  (m<sup>2</sup>/s) ως προς τον άξονα x (εγκάρσια στην ακτή) για όλα τα σενάρια καταιγίδας



**Σχήμα 5.32** Μεταφορά ιζήματος  $S_{vtot}$  (m<sup>2</sup>/s)ως προς τον άξονα y (κατά μήκος της ακτής) για όλα τα σενάρια καταιγίδας

Στον Πίνακα 5.10 παρουσιάζονται το εύρος της αναρρίχησης κύματος και το εύρος κατάκλυσης για κάθε σενάριο καταιγίδας. Είναι εμφανές πως οι δυσμενέστερες τιμές εμφανίζονται για τους ΒΑ κυματισμούς του Σεναρίου 6 και για το Σενάριο 1 των βόρειων κυματισμών, ακολουθούμενο από το Σενάριο 3. Όπως προαναφέρθηκε, η ακτή δεν φαίνεται να αντιμετωπίζει προβλήματα υψηλής κυματικής αναρρίχησης και πλημμύρας υπό την επίδραση βορειοδυτικών κυματισμών όπως και βόρειων καταιγίδων μέτριας σοβαρότητας.

Σενάριο	Εύρος κυματικής	Εύρος κατάκλυσης	
	αναρριχήσης (m)	(III)	
1	1,6-2,8	10-180	
2	1,1-2,1	4-125	
3	1,5-2,3	10-140	
4	0,9-1,8	5-50	
5	0,6-1,2	3-45	
6	1,5-4,2	10-165	

Πίνακας. 5.10 Εύρος κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης για κάθε σενάριο καταιγίδας

Καθώς πρόκειται για μεμονωμένα γεγονότα ακραίων καταιγίδων, μπορεί να γίνει λόγος μόνο για βραχυπρόθεσμη εξέλιξη της ακτογραμμής και όχι για μόνιμη. Σε περιπτώσεις καταιγίδων μέτριας κατηγορίας (Σενάριο 4) πλήττονται κυρίως οι κεντρικές περιοχές της περιοχής μελέτης (Διατομές 6-8) που χαρακτηρίζονται από το μικρότερο πλάτος ακτογραμμής (35-40 m). Αντίθετα, σε περιπτώσεις ακραίων καταιγίδων αντιμετωπίζουν πρόβλημα διατομές σε όλο το μήκος της ακτογραμμής, είτε λόγω υψηλής τιμής αναρρίχησης κύματος και/είτε λόγω μεγάλης κατάκλυσης του θαλασσινού νερού επί της ξηράς, με αποτέλεσμα αυτό να καλύπτει όλη την περιοχή της παραλίας που καλύπτεται με άμμο και παράκτιες καλλιεργήσιμες εκτάσεις φτάνοντας συχνά το επίπεδο του δρόμου και των παράκτιων ξενοδοχειακών μονάδων και κατοικιών. Ιδιαίτερα ευαίσθητες προκύπτουν τότε, όπως σημειώνεται στο Σχήμα 5.35, οι χαμηλού υψομέτρου περιοχές αμέσως ανατολικά του λιμανιού (διατομή 1) και στο τελευταίο περίπου χιλιόμετρο της υπό μελέτη ακτογραμμής (διατομές 10-12). Παρατηρούνται επίσης τάσεις πρόσχωσης στη βάση του υπήνεμου μώλου. Ενδεικτικά για το Σενάριο 1, το οποίο αποδείχτηκε το δυσμενέστερο για τους βόρειους κυματισμούς, η βραχυπρόθεσμη αυτή διάβρωση της ακτογραμμής κυμαίνεται από 10 m στις κεντρικές περιοχές μέχρι 40m στα άκρα του υπό μελέτης τμήματος της ακτογραμμής.



Σχήμα 5.35 Βραχυπρόθεσμη εξέλιξη ακτογραμμής για το Σενάριο 1-Σημειώνονται με κύκλο οι περιοχές όπου εντοπίζεται η εντονότερη διάβρωση

Αναλυτικότερα, τα προφίλ που προκύπτουν τα δυσμενέστερα από άποψη υψηλού επιπέδου αναρρίγησης κύματος ή/και μεγάλης κατάκλυσης είναι, με ελάγιστες διαφοροποιήσεις, κοινά σε όλα τα σενάρια καταιγίδας που προσομοιώθηκαν. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.10 τα προφίλ αυτά είναι οι διατομές Νο. 1, 6, 10 και 12. Αυτό υποδεικνύει τρωτότητα της περιοχής στην αρχή της ακτογραμμής, δηλαδή αμέσως μετά το λιμάνι όπου πρόκειται για περιοχή χαμηλού υψομέτρου καλυμμένη με άμμο, στο τέλος αυτής όπου οι περιοχές έχουν επίσης ιδιαίτερα χαμηλό υψόμετρο και περιλαμβάνουν άμμο και γεωργικές εκτάσεις που συχνά παρατηρείται να μετατρέπονται σε έλη, αλλά και στη μέση της περιοχής μελέτης. Στην τελευταία περίπτωση πρόκειται για περιοχή με μικρό σχετικά πλάτος παραλίας ίσο με 55m (το στενότερο σημείο παρουσιάζεται στη διατομή 3 με πλάτος 20 m), όπου το νερό της θάλασσας φτάνει συχνά στο ύψος του δρόμου. Τα παραπάνω υποδεικνύουν τρωτότητα της ακτογραμμής σε όλο το μήκος της. Στο Σχήμα 5.33 παρουσιάζεται η μορφολογική εξέλιξη του προφίλ 12 για όλα τα σενάρια καταιγίδας, μετά το πέρας αυτών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα περισσότερα προφίλ πλημμυρίζουν ή η κυματική αναρρίχηση φτάνει στα μέγιστα επίπεδα μέσα στις πρώτες ώρες των καταιγίδων (συνήθως τις πρώτες 3 με 9 ώρες του γεγονότος). Στο Σχήμα 5.34 παρουσιάζεται επίσης για το προφίλ 12 το μέγιστο ύψος της αναρρίχησης κύματος στο χρόνο στον οποίο συμβαίνει για κάθε σενάριο καταιγίδας που προσομοιώθηκε.

Τα μέγιστα επίπεδα της αναρρίχησης κύματος σημειώνονται για το BA σενάριο καταιγίδας (Σενάριο 6) και κυμαίνονται από 1,5 έως 4,2 m στη διατομή 12. Η πλημμύρα των

περισσότερων διατομών είναι εμφανής, αφού η κατάκλυση φτάνει ακόμα και τα 165 m στη διατομή 10, παραμένοντας σε υψηλά επίπεδα σε όλο το μήκος της ακτογραμμής. Αν και η συχνότητα εμφάνισης βορειοανατολικών κυματισμών θύελλας είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες διευθύνσεις σύμφωνα με τις μελέτες των Καραμπά κ.α. (2010) και Tsoukala et al. (2016), το συμπέρασμα αυτό είναι αρκετά κρίσιμο, εφόσον πρόκειται μάλιστα για σενάριο καταιγίδας μέτριας σοβαρότητας. Ακολουθεί το Σενάριο 1, όπου η αναρρίχηση κυμαίνεται από 1,6 έως 2,8 m στη διατομή 6 και εντοπίζονται επίσης πλημμυρισμένες διατομές, με τη διατομή 10 να εμφανίζεται και πάλι η δυσμενέστερη. Μεταξύ των σεναρίων Βόρειας διεύθυνσης υποδεικνύεται υψηλότερη επικινδυνότητα των καταιγίδων με μεγαλύτερο ύψος κύματος παρά μεγαλύτερη διάρκεια. (Σενάριο 1 και 3 δυσμενέστερα έναντι του Σεναρίου 2). Σ' ένα σενάριο καταιγίδας μέτριας σοβαρότητας αντίστοιχα (Σενάριο 4), το οποίο ανήκει στο 8% των περιπτώσεων σύμφωνα με τον Πίνακα 3.3, η αναρρίχηση κυμαίνεται από 0,9 έως 1,8 m στη διατομή 7, ενώ η κατάκλυση δεν ξεπερνάει τα 50 m. Στην περίπτωση των Βορειοδυτικών κυματισμών θύελλας η αναρρίγηση δεν ξεπερνάει το 1 m και η κατάκλυση παραμένει σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και αρκετά μακριά από τη σκιά του λιμανιού.

Αναρρίχηση κύματος (m)					
Σενάριο Καταιγίδας	Διεύθυνση	Διατομή 1	Διατομή 6	Διατομή 10	Διατομή 12
1	В	1,6	2,8	2,3	2,4
2	В	1,1	1,2	1,6	2,1
3	В	2	2,3	1,8	2,3
4	В	1	1,2	1,1	1,3
5	BΔ	0,9	0,8	0,7	0,8
6	BA	3,5	2,3	2,8	4,2

**Πίνακας 5.10** Αποτελέσματα μέγιστης αναρρίχησης κύματος και κατάκλυσης για τα κοινά δυσμενέστερα προφίλ όλων των σεναρίων

Κατάκλυση (m)					
Σενάριο Καταιγίδας	Διεύθυνση	Διατομή 1	Διατομή 6	Διατομή 10	Διατομή 12
1	В	135	45	180	115
2	В	125	40	35	35
3	В	140	45	115	70
4	В	25	35	30	30
5	$\mathrm{B}\Delta$	15	30	25	25
6	BA	160	60	165	145



Σχήμα 5.33 Η εξέλιξη της διατομής 12 στο τέλος κάθε σεναρίου καταιγίδας



Σχήμα 5.34 Η μέγιστη τιμή της αναρρίχησης κύματος στη διατομή 12 στον χρόνο στον οποίο αυτή σημειώθηκε για κάθε σενάριο καταιγίδας

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ανταπόκριση της ακτής του Ρεθύμνου σε ακραία καιρικά φαινόμενα στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PEARL το οποίο στοχεύει στην υιοθέτηση στρατηγικών για την προστασία των παράκτιων περιοχών. Οι πλημμύρες αποτελούν σοβαρό πρόβλημα για την παράκτια περιοχή του Ρεθύμνου και γι' αυτό η μελέτη της διάβρωσης της ακτής και του επιπέδου της κυματικής αναρρίγησης υπό συνθήκες καταιγίδας και της βραχυπρόθεσμης τελικά εξέλιξης της ακτογραμμής είναι ιδιαίτερα σημαντική. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μορφολογικό μοντέλο XBeach, το οποίο εφαρμόστηκε σε περιοχή μελέτης που περιλαμβάνει το λιμάνι του Ρεθύμνου και την ακτογραμμή μήκους περίπου 4 km στα ανατολικά του λιμανιού, ένας κάναβος συνολικών διαστάσεων 1500x5160 m, με μέγεθος κελιού 5x5 m. Με την εφαρμογή του μοντέλου πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί ύψους κύματος, ταχυτήτων, εγκάρσιας και κατά μήκους της ακτής στερεομεταφοράς, καθώς και εκτιμήσεις της εξέλιξης του πυθμένα, της διάβρωσης των αμμοθινών και της αναρρίγησης του κύματος σε 12 προφίλ ανά 300 m κάθετα στην ακτογραμμή, από τα οποία μπορούν να αντληθούν συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του συνόλου της ακτογραμμής. Τα δεδομένα των έξι σεναρίων καταιγίδων που επιλέχτηκαν να προσομοιωθούν στο XBeach αποκτήθηκαν από το μοντέλο SWAN σύμφωνα με τη μελέτη των Tsoukala et al. (2016) και περιλαμβάνουν τους δυσμενέστερους κυματισμούς βόρειας, βορειοδυτικής και βορειοανατολικής διεύθυνσης, ενώ παράλληλα δοκιμάστηκε η εφαρμογή του μοντέλου σε συνθήκες ετήσιου κυματικού κλίματος με στοιχεία που αποκτήθηκαν από τη μελέτη των Καραμπάς κα. (2010).

Όσον αφορά στα αποτελέσματα για τις αντιπροσωπευτικές συνθήκες του ετήσιου κυματικού κλίματος, το μοντέλο φαίνεται να προσομοιώνει ικανοποιητικά την ανταπόκριση της ακτής σε αυτές τις συνθήκες, με το ύψος κύματος να μην ξεπερνάει τα 2m και τη στερεομεταφορά να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα  $(1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s})$  και ως προς τις δύο διευθύνσεις. Προκύπτει πως πρόκειται για μια ακτογραμμή που υπό φυσιολογικές καιρικές συνθήκες δεν παρουσιάζει προβλήματα διάβρωσης ή πλημμύρας και η ακτή βρίσκεται σε ετήσια δυναμική ισορροπία.

Όσον αφορά στα σενάρια καταιγίδας, η ακτή αποδεικνύεται προστατευμένη από κύματα βορειοδυτικής προέλευσης λόγω της παρουσίας του λιμανιού με την κυματική αναρρίχηση και την κατάκλυση να παραμένουν σε χαμηλά επίπεδα-κυματική αναρρίχηση όχι μεγαλύτερη από 1 m και μέγιστη κατάκλυση 50 m. Ωστόσο παρατηρείται έντονη στερεομεταφορά γύρω από την περιοχή του λιμανιού, ενώ τα δύο πρώτα χιλιόμετρα της ακτογραμμής ανατολικά του λιμανιού προκύπτουν να βρίσκονται υπό τη ζώνη επίδρασης του προσήνεμου κυματοθραύστη, με αποτέλεσμα η παράκτια στερεομεταφορά να είναι αισθητά μικρότερη εντός αυτής της ζώνης, ενώ πέρα από αυτήν φτάνει τα  $3x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.

Οι βόρειοι άνεμοι κυριαρχούν στην περιοχή και ακραίες καταιγίδες αυτής της διεύθυνσης προκαλούν αναρρίχηση κύματος με μέση τιμή τα 2 m (μέση τιμή όλων των διατομών Σεναρίων 1, 2 και 3), πλημμύρα σε αρκετές διατομές με κατάκλυση που ξεπερνάει τα 100 m στις περιοχές χαμηλού υψομέτρου, μέγιστη εγκάρσια μεταφορά ιζήματος ίση με  $3x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, κυρίως απομακρυνόμενη από την ακτή και παράκτια στερεομεταφορά ίση με  $1x10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s,

τιμές που εμφανίζονται στο δυσμενέστερο Σενάριο 1. Το μέγεθος της διάρκειας της καταιγίδας αποδεικνύεται πως έχει λιγότερες αρνητικές επιπτώσεις σε σύγκριση με το μέγεθος του ύψους κύματος, αφού το Σενάριο 2, το οποίο έχει μεν μεγαλύτερη διάρκεια καταιγίδας αλλά εμφανίζει μικρότερα ύψη κύματος σε σχέση με τα Σενάρια 1 και 3 εμφανίζει στερεομεταφορά αισθητά μικρότερη και ως προς τις δύο διευθύνσεις. Σε καταιγίδες μέτριας σοβαρότητας (Σενάριο 4) η μέση κυματική αναρρίχηση μεταξύ των διατομών δεν ξεπερνάει το 1,5 m, η κατάκλυση παραμένει σε φυσιολογικά επίπεδα, ενώ η παράκτια στερεομεταφορά φτάνει την τιμή των  $3x10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.

Όσον αφορά τους βορειοανατολικούς κυματισμούς, μπορεί να έχουν τη μικρότερη συχνότητα εμφάνισης, ωστόσο η περιοχή προκύπτει ιδιαίτερα ευάλωτη σε βορειοανατολικές καταιγίδες ακόμα και μέτριας σοβαρότητας, με μέση τιμή αναρρίχησης κύματος ίση με 2,8 m και διατομές με μεγάλη κατάκλυση ακόμα και της τάξης των 150 m. Η μεταφορά ιζημάτων εγκάρσια στην ακτή φτάνει τα 1,5x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s εμφανίζοντας τάσεις πρόσχωσης στην ακτή, ενώ η στερεομεταφορά κατά μήκος της ακτής τα 2x10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s με κατεύθυνση προς το λιμάνι.

Γενικότερα, όπως ήταν αναμενόμενο, στα σενάρια βόρειων κυματισμών παρατηρείται μεγαλύτερη εγκάρσια στερεομεταφορά έναντι της παράκτιας, ενώ στους πλάγιους κυματισμούς, υπερτερεί η παράκτια στερεομεταφορά. Είναι σημαντικό τέλος να τονιστεί πως στις καταιγίδες βόρειας και ανατολικής διεύθυνσης η παράκτια στερεομεταφορά έχει φορά κυρίως προς το λιμάνι, με κίνδυνο την δημιουργία προβλημάτων πρόσχωσης στην είσοδο του λιμένα. Ακόμα και στους κυματισμούς βορειοδυτικής διεύθυνσης, όπου το ίζημα έξω από τη ζώνη σκιάς του λιμανιού μεταφέρεται κυρίως προς τα ανατολικά, κοντά στην περιοχή του λιμένα υπάρχει στερεομεταφορά επίσης με κατεύθυνση προς την είσοδο του λιμένα λόγω του φαινομένου της διάθλασης.

Το ύψος κύματος στα δυσμενέστερα Σενάρια 1 και 3 φτάνει σε σημεία τα 7 m, ενώ στα υπόλοιπα δεν ξεπερνάει τα 5 m. Σε όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν οι ταχύτητες είναι μεγαλύτερες, γύρω από τις λιμενικές κατασκευές και στα ρηχά νερά.

Οι δυσμενέστερες τιμές κυματικής αναρρίχησης και κατάκλυσης εμφανίζονται για τους BA κυματισμούς του Σεναρίου 6 και για τους B κυματισμούς του Σεναρίου 1, ακολουθούμενο από το Σενάριο 3. Όπως προαναφέρθηκε, η ακτή δεν φαίνεται να αντιμετωπίζει προβλήματα υψηλής κυματικής αναρρίχησης και πλημμύρας υπό την επίδραση βορειοδυτικών κυματισμών όπως και βόρειων καταιγίδων μέτριας σοβαρότητας.

Σε περιπτώσεις καταιγίδων μέτριας κατηγορίας (Σενάριο 4) πλήττονται κυρίως οι κεντρικές περιοχές της περιοχής μελέτης (Διατομές 6-8) που χαρακτηρίζονται από το μικρότερο πλάτος ακτογραμμής. Αντίθετα, σε περιπτώσεις ακραίων καταιγίδων αντιμετωπίζουν πρόβλημα διατομές σε όλο το μήκος της ακτογραμμής, είτε λόγω υψηλής τιμής αναρρίχησης κύματος και/είτε λόγω μεγάλης κατάκλυσης του θαλασσινού νερού επί της ξηράς, με αποτέλεσμα αυτό να καλύπτει όλη την περιοχή της παραλίας που καλύπτεται με άμμο και παράκτιες καλλιεργήσιμες εκτάσεις φτάνοντας συχνά το επίπεδο του δρόμου και των παράκτιων ξενοδοχειακών μονάδων και κατοικιών. Ιδιαίτερα ευαίσθητες προκύπτουν τότε, οι χαμηλού υψομέτρου περιοχές αμέσως ανατολικά του λιμανιού (διατομή 1) και στο τελευταίο περίπου χιλιόμετρο της υπό μελέτη ακτογραμμής (διατομές 10-12). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα περισσότερα προφίλ πλημμυρίζουν ή η κυματική αναρρίχηση φτάνει στα μέγιστα επίπεδα μέσα στις πρώτες ώρες των καταιγίδων (συνήθως τις πρώτες 3 με 9 ώρες του γεγονότος).

Τα μέγιστα επίπεδα της αναρρίχησης κύματος σημειώνονται για το BA σενάριο καταιγίδας (Σενάριο 6) και κυμαίνονται από 1,5 έως 4,2 m στη διατομή 12. Η πλημμύρα των περισσότερων διατομών είναι εμφανής, αφού η κατάκλυση φτάνει ακόμα και τα 165 m στη διατομή 10, παραμένοντας σε υψηλά επίπεδα σε όλο το μήκος της ακτογραμμής. Αν και η συχνότητα εμφάνισης βορειοανατολικών κυματισμών θύελλας είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες διευθύνσεις το συμπέρασμα αυτό είναι αρκετά κρίσιμο, εφόσον πρόκειται μάλιστα για σενάριο καταιγίδας μέτριας σοβαρότητας. Ακολουθεί το Σενάριο 1, όπου η αναρρίχηση κυμαίνεται από 1,6 έως 2,8 m στη διατομή 6 και εντοπίζονται επίσης πλημμυρισμένες διατομές, με τη διατομή 10 να εμφανίζεται και πάλι η δυσμενέστερη. Μεταξύ των σεναρίων Βόρειας διεύθυνσης υποδεικνύεται υψηλότερη επικινδυνότητα των καταιγίδων με μεγαλύτερο ύψος κύματος παρά μεγαλύτερη διάρκεια. (Σενάριο 1 και 3 δυσμενέστερα έναντι του Σεναρίου 2). Σ' ένα σενάριο καταιγίδας μέτριας σοβαρότητας αντίστοιχα (Σενάριο 4), το οποίο ανήκει στο 8% των περιπτώσεων, η αναρρίχηση κυμαίνεται από 0,9 έως 1,8 m, ενώ η κατάκλυση δεν ξεπερνάει τα 50 m. Στην περίπτωση των Βορειοδυτικών κυματισμών θύελλας η αναρρίχηση δεν ξεπερνάει το 1 m και η κατάκλυση παραμένει σε χαμηλά επίπεδα ακόμα και αρκετά μακριά από τη σκιά του λιμανιού.

Ωστόσο οφείλουμε να παραδεχθούμε ότι σύμφωνα με τα πραγματικά πλημμυρικά γεγονότα που έχουν συμβεί στην περιοχή, το σημαντικότερο πρόβλημα της περιοχής παραμένει η κυματική υπερπήδηση (overtopping) που συμβαίνει στον προσήνεμο κυματοθραύστη στη βόρεια πλευρά του λιμανιού με αποτέλεσμα την έκθεση και καταστροφή των γύρω λιμενικών εγκαταστάσεων και περιοχών και όχι η διάβρωση και η πλημμύρα τμημάτων της ακτής.

Τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν από την παραπάνω μελέτη είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τις ανάγκες του προγράμματος PEARL αλλά και για τις ενδιαφερόμενες αρχές του Ρεθύμνου, αφού μπορούν να συμβάλουν στον εντοπισμό των πιο ευαίσθητων περιοχών έναντι ακραίων καιρικών φαινομένων, στην εκτίμηση του μεγέθους της τρωτότητάς τους και τελικά στην υιοθέτηση προληπτικών, αποδοτικών και οικονομικών στρατηγικών που θα οδηγήσουν στην προστασία της ευρύτερης παράκτιας περιοχής και των κατοίκων του Ρεθύμνου από πιθανά πλημμυρικά γεγονότα.

### 6.1 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Αν και η ακτογραμμή του Ρεθύμνου είναι αρκετά ομοιόμορφη και η ανάλυση του κανάβου θεωρείται ικανοποιητική, προτείνεται η μελέτη με βάση έναν λεπτομερέστερο κάναβο, (δεν υποστηρίζεται ακόμα τριγωνικός κάναβος από το μοντέλο XBeach), ιδιαίτερα στην περιοχή διεπαφής θάλασσας και ξηράς. Να σημειωθεί βέβαια ότι ένας τέτοιος κάναβος θα πρέπει να έχει αρκετά βαθμιαία μειούμενο μέγεθος κελιών ώστε να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις του μοντέλου. Θα μπορούσε επίσης να προταθεί έρευνα σε επιμέρους μικρότερες περιοχές μελέτης της παρούσας, τόσο για καλύτερη ανάλυση όσο και για λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Τέλος, ένα πιο λεπτομερή κάναβο απαιτεί και η περίπτωση που ο μελετητής θέλει να λάβει υπόψη και την αλληλεπίδραση μεταξύ κυμάτων-ρευμάτων (λέξη-κλειδί: wci=1).

Το XBeach αποδεικνύεται κατάλληλο σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία για τη μελέτη της ανταπόκρισης της ακτογραμμής λόγω ακραίων καιρικών φαινομένων, ενώ έχει αρχίσει να δοκιμάζεται και για προσομοίωση συνθηκών κυματικού κλίματος. Το εγχειρίδιο του μοντέλου κρίνεται αρκετά βοηθητικό και οι μελετητές που το χρησιμοποιούν διεθνώς ολοένα

αυξάνονται. Αν και το XBeach επιδέχεται συνεχώς βελτιώσεις τόσο ως προς το θεωρητικό του υπόβαθρο (για παράδειγμα δεν λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της περίθλασης) όσο και ως προς τη φιλικότητά του προς το χρήστη και τον τρόπο προβολής των αποτελεσμάτων του, τα αρχεία netcdf τα οποία δημιουργεί το μοντέλο μετά το τέλος των υπολογισμών, είναι αρκετά δύσκολα στη χρήση τους και κυρίως στην συμβατότητα τους με άλλα μοντέλα. Για παράδειγμα θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον η σύνδεση των αποτελεσμάτων του XBeach με το Excel ή το πρόγραμμα ArcGis. Είναι ακόμα αξιοσημείωτο πως απαιτεί ιδιαίτερα μεγάλο υπολογιστικό χρόνο για την πραγματοποίηση των υπολογισμών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων του XBeach με αποτελέσματα άλλων μοντέλων, (MIKE21, Litpack, Delft3D), ώστε να εντοπιστούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε μοντέλου αλλά κυρίως για να διαμορφωθεί μια ορθότερη εικόνα για την τρωτότητα και τον τρόπο ανταπόκρισης της ακτογραμμής έναντι των ακραίων καιρικών φαινομένων. Ακόμα περισσότερο, θα μπορούσε με εφαρμογή του μοντέλου να δοκιμαστεί η αποτελεσματικότητα διαφόρων λύσεων που θα οδηγήσουν στην προστασία της περιοχής από τις πλημμύρες.

Τέλος, απώτερος σκοπός των παραπάνω υπολογισμών, είναι η μελέτη του φαινομένου της ταυτόχρονης πλημμύρας από την πλευρά της θάλασσας (coastal flooding) αλλά και από την πλευρά της ξηράς (inland flooding) λόγω έντονης βροχόπτωσης και γενικότερα ακραίων καιρικών συνθηκών, δηλαδή μια ολοκληρωμένη αντιπλημμυρική μελέτη για την περιοχή του Ρεθύμνου. Ταυτόχρονα επιδιώκεται η εξαγωγή γνώσης και μεθοδολογίας που μπορεί να προσαρμοστεί και σε άλλες παράκτιες περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα πλημμύρας στα πλαίσια των απαιτήσεων και του οράματος του προγράμματος PEARL.

- Δουκάκης Ευστράτιος 2007, Μέθοδοι προσδιορισμού του ρυθμού μεταβολής των ακτογραμμών, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σημειώσεις μαθήματος Παράκτιο Περιβάλλον
- Καραμπάς Θ. και Καμπάνης Ν. 2010, Ερευνητικό έργο για την επίλυση του προβλήματος διάβρωσης, την προστασία και την ανάπλαση της ακτογραμμής και τη μείωση του προσπίπτοντος κυματισμού ανατολικά της μαρίνας Ρεθύμνου, Ακτομηχανική Μελέτη, Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας
- Καραμπάς Θ., Κρεστενίτης Ι. και Κουτίτας Χ., 2015, Ακτομηχανική-Έργα Προστασίας Ακτών, κεφ. Παράκτια Στερεομεταφορά, Μορφοδυναμική των ακτών, Διάβρωση ακτών, Αθήνα:
   Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, διαθέσιμο στο: http://hdl.handle.net/11419/2092
- Κόκκινος Δ., Γαλιατσάτου Π. και Πρίνος Π., 2014 Δείκτης τρωτότητας σε κατάκλιση παράκτιων περιοχών του Αιγαίου Πελάγους, 6° Πανελλήνιο Συνέδριο για τη Διαχείριση και Βελτίωση των Παράκτιων Ζωνών, 24-27/11/2014, Αθήνα
- Παπανικολάου Μ., Παπανικολάου Δ. και Βασιλάκης Ε., 2011, Μεταβολές της στάθμης της θάλασσας και επιπτώσεις στις ακτές, Επιτροπή μελέτης επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής, Τράπεζα της Ελλάδος
- Πρίνος Π., 2014, Η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις ελληνικές θάλασσες και παράκτιες περιοχές-το πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ-CCSEAWAVS, 6° Πανελλήνιο Συνέδριο για τη Διαχείριση και Βελτίωση των Παράκτιων Ζωνών, 24-27/11/2014, Αθήνα
- Χριστοδούλου Χ., 2016, Κυματική αναρρίχηση στην παράκτια περιοχή του Ρεθύμνου υπό ακραίες κυματικές συνθήκες, Μεταπτυχιακή εργασία ΕΜΠ
- Andrews D.G. and Mcintyre M. E., 1978, An exact theory of nonlinear waves on a Lagrangian-mean flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 89, 609
- Baldock T.E., Holmes P., Bunker S. and van Weert P., 1998, Cross-shore hydrodynamics within an unsaturated surfzone, *Coastal Engineering*, 34, 173-196
- Borah K. and Balloffet A., 1985, Beach evolution caused by littoral drift barrier, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, vol 111, no4, 645-660
- Daly C., Roelvink J.A., van Dongeren A.R., Van Thiel de Vries J.M. and McCamm R.T., 2012, Validation of an advective-deterministic approach to short wave breaking in a surf-beat model, *Coastal Engineering*, 60, 69-83
- Dolan, R., Davis, R.E., 1992, An intensity scale for Atlantic coast northeast storms, *Journal* of Coastal Research, 7(1), 53-84
- Galappatti R. and Vreugdenhill C.B., 1985, A depth integrated model for suspended transport, Journal for *Hydraulic Research*, 23(4), 359-377

- Halsey, S.D., 1986. Proposed clasiffication scale for major Northesast storms: East Coast USA, based on extent of damage. Geological society of America, abstracts with programs (Northeastern section), 18 -21
- Holthuijsen L.H., Booij N. and Herbers T.H.C., 1989, A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents, *Coastal Engineering*, 13(1), 23-54
- Hughes S.A., 2003, *Estimating Irregular Wave Runup on Smooth, Impermeable Slopes*, US Army Corps of Engineers
- Komar P.D. and Miller M.C., 1975, On the comparison between the threshold of sediment motion under waves under unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold, *Journal of Sedimentary Research*, 362-367
- Madsen, P.A., Murray, R. and Sorensen, O.R., 1991, A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 1. J. Coastal Engineering 15, 371–388
- Majewski, D. and Schrodin, R., 1994, Short description of the Europa-Modell (EM) and Deutschland-Modell (DM) of the DWD Quaterly Bulletin, April, 1-31.
- Makropoulos C., Tsoukala V., Belibassakis K., Lykou A., Chondros M., Gourgoura P. and Nikolopoulos D., 2015, Managing flood risk in coastal cities through an integrated modeling framework supporting stakeholders' involvement: The case of Rethymno, Crete, *Proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress*, 28/6-3/7/2015, The Hague, the Netherlands
- Makropoulos C., Tsoukala V., Lykou A., Chondros M, Manojlovic N. and Vojinovic Z., 2014, Improving resilience against extreme and rare events in coastal regions: An initial methodological proposal-The case of the city of Rethymno, available on http://www.pearl-fp7.eu/wpcontent/uploads/2015/07/AdaptToClimate2014\_Makropoulos\_et\_al.pdf(last access on 15th June, 2016)
- Manual, EurOtop, 2007, Wave Overtopping of Sea defences and related structures: Assessment Manual, UK: NWH Allsop, T. Pullen, T. Bruce, www.overtoppingmanual.com
- Martzikos N., Lykou A., Makropoulos C. and Tsoukala V., 2016, Extended analysis of thresholds and classification for storm impacts at Rethymno (in progress)
- McCall R., 2008, *The longshore dimension in dune overwash modelling- development, verification and validation of XBeach*, MSc thesis, Delft University of Technology
- Mehvar S., Dastgheib A., Roelvink JA, 2015, Validation of XBeach model for wave run-up, *Proceedings of the 36<sup>th</sup> IAHR World Congress*, 28/6-3/7/2015, The Hague, the Netherlands
- Mendoza, E.T., Jiménez, J.A., 2005. A storm classification based on the beach erosion potential in the Catalonian coast. Coastal Dynamics, 3:1-11.

- Nairn R.B., Roelvink J.A. and Southgate H.N., 1990, Transition zone width and implications for modeling surfzone hydrodynamics, *Proceedings of 22th International Conference on Coastal Engineering*, 68-81
- Needham, H.F., Keim, B.D., 2011. Storm Surge: Physical Processes and an Impact Scale. Chapter 20 within publication Recent Hurricane Research- Climate, Dynamics, and Societal Impacts, ISBN: 978-953-307-238-8, 385-406.
- Phillips O.M., 1977, The dynamics of the upper ocean, Cambridge University Press, 366
- Reniers A.M., Roelvink J.A. and Thornton E.B., 2004, Morphodynamic modeling of an embayed beach under wave group forcing, *Journal of Geophysical Research*, 109
- Roelvink J.A., 1993a, Dissipation in random wave group incident on a beach, *Coastal Engineering*, 19, 127-150
- Roelvink J.A., 1993b, Surf beat and its effect on cross-shore profiles, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft
- Roelvink J.A. and Reniers A.J.H.M., 2012, *A Guide to Modeling Coastal Morphology*, World Scientific Publishing Company
- Roelvink D., Reniers A., Dongeren A., van Thiel de Vries J., *XBeach Model Description and Manual*, Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, Report version 6, June 2010
- Roelvink J.A, A. Reniers, A. van Dongeren, J. van Thiel de Vries, R. McCall, J. Lescinski. 2009. Modeling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands, *Coastal Engineering*, 56, 1133-1152
- Soulsby R.L., 1997, Dynamics of Marine Sands, London: Thomas Telford Publications
- Stelling G.S, Duinmeijer S.P.A., 2003, A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2003, 43, 1329-1354
- Stive M.J.F. and De Vriend H.J., 1994, Shear stresses and mean flow in shoaling and breaking waves, *Proceedings of 24<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering*, 594-608
- Svendsen I.A., 1984a, Mass flux and undertow in a surf zone, *Coastal Engineering*, 8, 347-365
- Svendsen I.A., 1984b, Wave heights and set-up in a surf zone, *Coastal Engineering*, 8, 303-329
- Trouw K. et al. 2012, Numerical modeling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: A sensitivity study with different types of numerical models, *Coastal Engineering Proceedings*, 33, 2012
- Tsoukala V.K., Chondros M., Kapelonis Z., Martzikos N., Lyckou A., Belibassakis K., Makropoulos C., 2016, An integrated wave modeling framework for extreme and rare events for climate change in coastal areas-the case of Rethymno, Crete, *Oceanologia*, 58(2), 71-89

Walstra R., Roelvink A. and Groeneweg J., 2000, Calculation of wave driven currents in a 3D mean flow model, Proceedings of 27<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, 1050-1063

http://www.pearl-fp7.eu (last access on 25<sup>th</sup> June 2016)

XBeach Manual, Deltares, 2015 B, available on http://oss.deltares.nl/web/xbeach/ (last access on  $25^{\text{th}}$  June 2016)

www.emdat.be (last access on 25<sup>th</sup> June 2016)

hurricanescience.org (last access on 25<sup>th</sup> June 2016)

tulane.edu (last access on 25<sup>th</sup> June 2016)

ПАРАРТНМА

#### Παράδειγμα αρχείου Params.txt

XBeach parameter settings input file date: 07-Mar-2016 22:00:00 function: xb\_write\_params

```
Bed composition parameters
rhos
       = 2650
       = 0.400000
por
D50
        = 0.0002
D90
        = 0.0004
Grid parameters
depfile = bed.dep
posdwn = -1
      = 299
nx
     = 1031
ny
dx
     = 5
     = 5
dy
alfa
    = 0
vardx = 0
     = 0
xori
     = 0
yori
thetamin = 225
thetamax = 315
dtheta = 90
thetanaut = 1
Initial conditions
zs0
      = 0
Model time
tstop = 156600
Wave boundary condition parameters
instat
        = jons
Wave-spectrum boundary condition parameters
bcfile = filelist.txt
rt
     = 5400
dtbc
      = 1
Morphology parameters
morfac = 10
morfacopt = 1
morstart = 250
struct = 1
ne_layer = nebed.dep
```

```
Sediment transport parameters
waveform = vanthiel
form
        = 2
facua = 0.100000
turb
       = 2
Output variables
        =5400
tintg
        =0
tstart
nglobalvar = 18
Η
zb
zb0
ZS
u
v
Susg
Svsg
Subg
Svbg
Svtot
Sutot
cctot
ccg
Е
ue
ve
urms
```

## Παράδειγμα αρχείου Filelist.txt (instationary mode)

FILELIST

10800	1.0000	jonswap_1.txt
5400	1.0000	jonswap_2.txt
16200	1.0000	jonswap_3.txt
10800	1.0000	jonswap_4.txt
10800	1.0000	jonswap_5.txt
16200	1.0000	jonswap_6.txt
5400	1.0000	jonswap_7.txt
10800	1.0000	jonswap_8.txt
10800	1.0000	jonswap_9.txt
5400	1.0000	jonswap_10.txt
16200	1.0000	jonswap_11.txt
10800	1.0000	jonswap_12.txt
10800	1.0000	jonswap_13.txt
16200	1.0000	jonswap_14.txt

## Παράδειγμα αρχείου Filelist.txt (stationary mode)

1.86 6.45 225. 3.3 20. 25920. 1 2.19 6.83 270. 3.3 20. 43200. 1 2.10 6.77 315. 3.3 20. 17280. 1

# Παράδειγμα αρχείου Jonswap.txt

Hm0	=	5.05
fp	=	0.101
mainang	=	270.0000
gammajsp	=	1.0000
S	=	20.0000
fnyq	=	1.0000







Σχήμα Π1. Μορφολογία των διατομών για t=0.







Σχήμα Π2. Μορφολογική εξέλιξη των διατομών μετά το πέρας της καταιγίδας του Σεναρίου 1. Η παράμετρος z<sub>b0</sub> συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος z<sub>b</sub> τη διαμόρφωση του τελικού πυθμένα και η παράμετρος z<sub>s</sub> την επιφάνεια του νερού.







Σχήμα Π3. Μορφολογική εξέλιξη των διατομών μετά το πέρας της καταιγίδας του Σεναρίου 2. Η παράμετρος z<sub>b0</sub> συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος z<sub>b</sub> τη διαμόρφωση του τελικού πυθμένα και η παράμετρος z<sub>s</sub> την επιφάνεια του νερού.







Σχήμα Π4. Μορφολογική εξέλιξη των διατομών μετά το πέρας της καταιγίδας του Σεναρίου 2. Η παράμετρος z<sub>b0</sub> συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος z<sub>b</sub> τη διαμόρφωση του τελικού πυθμένα και η παράμετρος z<sub>s</sub> την επιφάνεια του νερού.



m






Σχήμα Π5. Μορφολογική εξέλιξη των διατομών μετά το πέρας της καταιγίδας του Σεναρίου 2. Η παράμετρος z<sub>b0</sub> συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος z<sub>b</sub> τη διαμόρφωση του τελικού πυθμένα και η παράμετρος z<sub>s</sub> την επιφάνεια του νερού.

## Σενάριο 5







Σχήμα Π6. Μορφολογική εξέλιξη των διατομών μετά το πέρας της καταιγίδας του Σεναρίου 2. Η παράμετρος z<sub>b0</sub> συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος z<sub>b</sub> τη διαμόρφωση του τελικού πυθμένα και η παράμετρος z<sub>s</sub> την επιφάνεια του νερού.

## Σενάριο 6





m





Σχήμα Π7. Μορφολογική εξέλιξη των διατομών μετά το πέρας της καταιγίδας του Σεναρίου 2. Η παράμετρος z<sub>b0</sub> συμβολίζει τον αρχικό πυθμένα, η παράμετρος z<sub>b</sub> τη διαμόρφωση του τελικού πυθμένα και η παράμετρος z<sub>s</sub> την επιφάνεια του νερού.