



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ

Μαρία Ν. Καλύρη

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Οκτώβριος 2021

Επιβλέπουσα: Καθηγήτρια Β. Τσουκαλά
Συνεπιβλέπων: Διδάσκων (ΠΔ 407/1980) Μ. Χονδρός

Καλύρη Ν. Μ. (2021)

Μαθηματική προσομοίωση παράκτιας κατάκλυσης της παράκτιας ζώνης του Ρεθύμνου Κρήτης

Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Kalpyri N. M. (2021)

Numerical Simulation of Coastal Flooding in Coastal Area of Rethymno, Island of Crete

Laboratory of Harbor Works, National Technical University of Athens, Greece

Το περιεχόμενο της ανά χείρας μεταπτυχιακής 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.

The content of this postgraduate diploma thesis is the product of my own intellectual effort. The integration of other material, published or not, without concrete reference that do not allow ambiguities or misunderstandings, is strictly prohibited.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία μου, με την οποία ολοκληρώνω τις σπουδές μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στο Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων». Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, αλλά και των σπουδών μου γενικότερα.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κα Βασιλική Τσουκαλά, Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την άρτια συνεργασία και το χρόνο που διέθεσε συμβάλλοντας καθοριστικά στην επίλυση όλων των εμποδίων και των προβληματισμών που προέκυψαν και που οδήγησαν τελικά στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω θερμά τον Διδάκτορα κ. Μιχάλη Χονδρό, Διδάσκοντα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε ανιδιοτελώς και για την συνεχή στήριξη του τα χρόνια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Αναστάσιο Μεταλληνό και τον Υποψήφιο Διδάκτορα Ανδρέα Παπαδημητρίου που με βοήθησαν να αντιμετωπίσω επιμέρους προβλήματα κατά τη διάρκεια της έρευνας. Όπως επίσης και την κα Α. Λύκου για τα χρήσιμα δεδομένα και συμβουλές που παρείχε για την παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Χρήστο Μακρόπουλο για διάφορα δεδομένα που διέθεσε για την ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας αλλά και τα σχόλια του ως μέλος της τριμελούς επιτροπής αξιολόγησης για τη βελτίωση του τεύχους, καθώς επίσης και το μόνιμο μέλος της τριμελούς επιτροπής Λέκτορα κ. Ηλία Παπακωνσταντή για τα σχόλια και τις προτάσεις βελτίωσης της διπλωματικής.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα έκθεση αποτελεί τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία η οποία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» με ειδίκευση στη «Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης και Λιμένων», του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την προσομοίωση της παράκτιας πλημμύρας λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των φαινομένων που συντελούν στην εμφάνισή της. Η εν λόγω μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε παράκτια περιοχή, βασίζεται στην αξιοποίηση ανοιχτών βάσεων δεδομένων θαλάσσιας κατάστασης και στην εφαρμογή προηγμένων και κατάλληλων αριθμητικών μοντέλων και συγκρίνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων με καταγραφές των συμβάντων που μελετώνται με στόχο τη βαθμονόμηση και επαλήθευση των αριθμητικών μοντέλων που εφαρμόζονται. Η περιοχή διερεύνησης, στην οποία εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, είναι η παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου στο νησί της Κρήτης, στην Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στην εκδήλωση τέτοιων φαινομένων.

Την επίβλεψη της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας ανέλαβαν η κα. Βασιλική Τσουκαλά (επιβλέπουσα), Καθηγήτρια της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών και Διευθύντρια του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων του Τομέα Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) και ο Δρ Μιχάλης Κ. Χονδρός (συνεπιβλέπων), Διδάσκων (ΠΔ 407/1980) της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών (ΕΜΠ). Η τριμελής εξεταστική επιτροπή αποτελείται από την επιβλέπουσα Καθηγήτρια κα. Βασιλική Τσουκαλά, το μόνιμο μέλος Επ. Καθηγητή κ. Ηλία Παπακωνσταντή και τον Καθηγητή κ. Χρήστο Μακρόπουλο.

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας:

Μαθηματική προσομοίωση παράκτιας κατάκλυσης της παράκτιας ζώνης του Ρεθύμνου Κρήτης

Title of Thesis:

Numerical Simulation of Coastal Flooding in the Coastal Area of Rethymno, Island of Crete

Λέξεις κλειδιά: : Παράκτια πλημμύρα, μαθηματική προσομοίωση, μετεωρολογική παλίρροια, κυματική υπερπήδηση, κατάκλυση

Key words: coastal flooding, numerical modelling, storm surge, wave overtopping, inundation

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	13
EXTENDED ABSTRACT	14
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	22
1.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ	22
1.2. ΣΤΟΧΟΣ	23
1.3. ΣΗΜΕΙΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ.....	24
1.4. ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	24
2. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑ.....	25
2.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΟΔΗΓΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	25
2.1.1. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΣΤΑΘΜΗΣ	26
2.1.2. ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ.....	29
2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ.....	35
2.2.1. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΘΑΜΗ.....	37
2.2.2. ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ.....	40
2.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ	41
3. ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	47
3.1. ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΡΕΥΝΕΣ.....	47
3.2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	54
3.3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	57
3.3.1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ RMS.....	57
3.3.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (EUROTOR)	59
3.3.3. ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS 2D	60
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ	75
4.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ.....	75
4.2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΩΝΤΑΙ	79
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	82

5.1.	ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΟΙΧΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ.....	82
5.1.1.	ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ ΣΤΑ ΑΝΟΙΧΤΑ.....	82
5.1.2.	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΑΘΜΗ.....	86
5.1.3.	ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΡΟΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ.....	88
5.2.	ΒΥΘΟΜΕΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	88
5.3.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	90
5.4.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ.....	94
5.5.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ.....	97
5.6.	ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ.....	99
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	101
6.1.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	101
6.1.1.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	101
6.1.2.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ.....	101
6.2.	ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	102
6.2.1.	ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ.....	102
6.2.2.	ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ.....	103
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ.....	104
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	109
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I: ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	109
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ.....	112
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ III: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (EUROTOR, 2018).....	120
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ.....	123
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ.....	125

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 2-1: Θαλάσσιοι παράγοντες πρόκλησης παράκτιων πλημμυρών	26
Εικόνα 2-2: Επίδραση της Σελήνης στη δημιουργία του φαινομένου της αστρονομικής παλίρροιας (Γιάννης Ν. Κρεστενίτης, 2015)	27
Εικόνα 2-3: Κάτοψη (α) και τομή (β) της ακτής (Robert G. Dean, 2000).....	29
Εικόνα 2-4: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κυματογενούς αύξησης της στάθμης της θάλασσας (wave setup) (CEM, Chapter 4, Surf Zone Hydrodynamics, 2003)	30
Εικόνα 2-5: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κυματικής αναρρίχησης στην ακτή (wave runup) (Μέμος, 2016)	31
Εικόνα 2-6: Παράδειγμα κυματικής υπερπήδησης, αποδεικνύοντας την τυχαία συμπεριφορά, α) αριστερά: όγκος νερού από την υπερπήδηση αθροιστικά β) δεξιά: βάθος νερού στη στέψη του έργου (EurOtop, 2018)).....	34
Εικόνα 2-7: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών του φαινομένου της κυματικής υπερπήδησης (wave setup) για κατασκευές μη λεία πρηνή (EurOtop, 2018)	34
Εικόνα 2-8: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών του φαινομένου της κυματικής υπερπήδησης (wave setup) για κατασκευές σύνθετων κρηπιδοτοιχών (EurOtop, 2018)	35
Εικόνα 2-9: Ημερομηνίες κατά τις οποίες έχει εκδώσει τεύχη η Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος	37
Εικόνα 2-10: Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας, ανά τον κόσμο, για τα έτη 1900 έως και 2000 (IPCC Report, 2019)	38
Εικόνα 2-11: Διαγράμματα πρόβλεψης της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για τα έτη 2000 έως και 2300 (IPCC Report, 2019)	38
Εικόνα 2-12: Διαγράμματα πρόβλεψης της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για τα έτη 2000 έως και 2100 (IPCC Report, 2019)	39
Εικόνα 2-13: Χάρτης μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης στην Ευρώπη (IPCC Report, 2019).....	40
Εικόνα 2-14: Hemsby, on the Norfolk coast, UK (05.12.2013). «Επτά κατοικίες πλησίον της ακτής κατέρρευσαν της νύχτα της μεγάλης κακοκαιρίας» [Πηγή: www.bbc.com].....	41
Εικόνα 2-15: Cromer, on the Norfolk coast, UK (06.12.2013). «Τα κύματα χτυπούν τον παραλιακό δρόμο και τον προβλήτα στο Cromer, Norfolk το βράδυ της μεγάλης κακοκαιρίας» [Πηγή: https://www.dailymail.co.uk]	42
Εικόνα 2-16: Cromer, on the Norfolk coast, UK (06.12.2013). «Στιγμιότυπα από την επομένη μέρα από το πέρασμα της κακοκαιρίας» [Πηγή: https://www.dailymail.co.uk]	42
Εικόνα 2-17: Tybee Island, GA, United States (18.06.2016). «Πλημμύρες σε αστική περιοχή λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας» [Πηγή: https://seagrant.noaa.gov]	43
Εικόνα 2-18: Tybee Island, GA, United States (03.09.2016). «Παράκτια πλημμύρα καλύπτει τον μοναδικό δρόμο που συνδέει την πόλη με την ηπειρωτική χώρα» [Πηγή: www.nytimes.com]	43
Εικόνα 2-19: Περιοχή Καλαμάτας (01.10.2018). «Το νερό κάλυψε την παραλιακή οδό Ναυαρίνου λόγω του μεσογειακού κυκλώνα» [Πηγή: www.messinialive.gr].....	44
Εικόνα 2-20: Περιοχή Καλαμάτας (01.10.2018). «Βυθίσεις σκαφών στη μαρίνα Καλαμάτας από τον μεσογειακό κυκλώνα» [Πηγή: https://city.sigmalive.com]	44
Εικόνα 2-21: Περιοχή Καλαμάτας (29.09.2018). «Το νερό κάλυψε την παραλιακή οδό Ναυαρίνου λόγω του μεσογειακού κυκλώνα» [Πηγή: www.messinialive.gr].....	45
Εικόνα 2-22: Περιοχή Ρίου (18.09.2020). «Καταστροφές σε δημόσιες και ιδιωτικές ιδωκτησίες» [Πηγή: https://www.thetoc.gr]	45
Εικόνα 2-23: Περιοχή Ρίου (18.09.2020). «Το νερό κάλυψε την παραλιακή οδό του Ρίου και προκάλεσε καταστροφές στα παραλιακά μαγαζιά» [Πηγή: https://www.thetoc.gr]	46

Εικόνα 3-1: Εκτίμηση των χαρακτηριστικών κυμάτων στα «βαθιά» χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση μείωσης κλίμακας 3 επιπέδων (Tsoukala, et al., 2016)	51
Εικόνα 3-2: Διαγράμματα πιθανοτικών συναρτήσεων για το ύψος κύματος, την περίοδο κορυφής και τη μέση διεύθυνση του κύματος, για τρεις χρονικές περιόδους (Tsoukala, et al., 2016).....	52
Εικόνα 3-3: Εποχιακό μοτίβο του σημαντικού ύψους κύματος H_s (αριστερό πλαίσιο) και της περιόδου κορυφής T_p (δεξί πλαίσιο) για τρεις φορές περιόδους (Tsoukala, et al., 2016).....	52
Εικόνα 3-4: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας	56
Εικόνα 3-5. Σκαρίφημα απεικόνισης βασικών παραμέτρων εισόδου στο Νευρωνικό Δίκτυο EurOtop. (Πηγή: EurOtop, 2018).....	60
Εικόνα 3-6: Ιδιότητες των κελιών του υπολογιστικού κανάβου (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, User's Manual)	65
Εικόνα 3-7: Υπολογιστικός και γεωμετρικός κανάβος (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, Reference Manual) ...	65
Εικόνα 3-8: Ορισμός της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, Reference Manual)	66
Εικόνα 3-9: Γεωμετρικά δεδομένα του ορίου του κελιού (cell face) και πίνακας ιδιοτήτων (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, Reference Manual).....	67
Εικόνα 4-1: Θέση περιοχής διερεύνησης σε σχέση με την Ελλάδα [Πηγή: Google Earth].....	75
Εικόνα 4-2: Θέση περιοχής διερεύνησης σε σχέση με την Κρήτη [Πηγή: Google Earth].....	76
Εικόνα 4-3: Πρώτη θέσει διερεύνησης επί της ακτογραμμής – βόρεια του παραλιακού δρόμου [Πηγή: Google Maps].....	77
Εικόνα 4-4: Δεύτερη θέση διερεύνησης επί της ακτογραμμής – βόρεια του χώρου στάθμευσης [Πηγή: Google Maps].....	77
Εικόνα 4-5: Τρίτη θέση διερεύνησης επί της ακτογραμμής – προσήνεμος μώλος λιμένα Ρεθύμνου [Πηγή: Google Maps].....	78
Εικόνα 4-6: Παράκτιες περιοχές του Ρεθύμνου με τάσεις πλημμύρας.....	79
Εικόνα 4-7: Περιοχή Ρεθύμνου (11.12.2010). «Το νερό έχει κατακλύσει όλη την περιοχή του λιμένα Ρεθύμνου» [Πηγή: https://www.youtube.com/watch?v=JM_hCOIOyT0].....	80
Εικόνα 4-8: Περιοχή Ρεθύμνου (11.12.2010). «Κυματική υπερπήδηση στην περιοχή του χώρου στάθμευσης και του προσήνεμου μώλου του λιμένα Ρεθύμνου» [Πηγή: https://www.youtube.com/watch?v=jdY8qKaZS5w]	80
Εικόνα 4-9: Περιοχή Ρεθύμνου (28.02.2012). «Η θάλασσα κάλυψε το χώρο στάθμευσης και το λιμάνι» [Πηγή: https://www.youtube.com/watch?v=1HEGUwHsnGg]	81
Εικόνα 4-10: Περιοχή Ρεθύμνου (01.01.2015). «Ολόκληρη η περιοχή του λιμένα καλύφθηκε από νερό» [Πηγή: www.Rethemnosnews.gr , https://www.youtube.com/watch?v=PwWlUKMhPvU]	81
Εικόνα 4-11: Περιοχή Ρεθύμνου (13.01.2015). «Τα κύματα υπερπηδούν τη θωράκιση και πλημμυρίζει η περιοχή του λιμένα Ρεθύμνου» [Πηγή: https://www.youtube.com/watch?v=dq6R24HSA1s]	81
Εικόνα 5-1. Σημείο εξαγωγής δεδομένων θαλάσσιας κατάστασης από τη βάση Copernicus (περιόδου 1993-2019) στα ανοιχτά του Λιμένα Ρεθύμνου.....	83
Εικόνα 5-2: Ροδόγραμμα μέσου ετήσιου σημαντικού ύψους κύματος, H_s (m), ανοιχτά του Ρεθύμνου [Επεξεργασία δεδομένων βάσης Copernicus, περίοδος 1993-2019].....	84
Εικόνα 5-3. Ζεύγη υψών, H_s (m), και περιόδου κορυφής T_p (s), κυματισμού στα ανοιχτά της παράκτιας περιοχής του Ρεθύμνου για τη Βόρεια διεύθυνση. Οι μπλε κουκίδες απεικονίζουν τα δεδομένα όπως προκύπτουν από την ανοιχτή βάση δεδομένων Copernicus, ενώ οι κόκκινες απεικονίζουν τους αντιπροσώπους που λαμβάνονται υπόψη για περαιτέρω διερεύνηση.	86
Εικόνα 5-4. Διαθέσιμα βυθομετρικά δεδομένα στο Λιμένα Ρεθύμνου.	88
Εικόνα 5-5. Βυθομετρικά δεδομένα που ψηφιοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Ρεθύμνου (navigonics) και όρια (κόκκινο ορθογώνιο) αριθμητικού καννάβου.....	89

Εικόνα 5-6. Βυθομετρικός κάρναβος (από τη ΜΣΘ) παράκτιας περιοχής διερεύνησης που κατασκευάστηκε με χωρικό βήμα $dx = dy = 2.5 \text{ m}$.	89
Εικόνα 5-7. Διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους που αξιοποιείται ως δεδομένο εισόδου για την προσομοίωση της παράκτιας κατάκλυσης.	90
Εικόνα 5-8. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο S1 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=5.24 \text{ m}$, $T_p=9.23 \text{ s}$, διεύθυνση 338.52° και στάθμη θάλασσας $+0.18 \text{ M}\Sigma\Theta$).	91
Εικόνα 5-9. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο S2 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=5.19 \text{ m}$, $T_p=9.23 \text{ s}$, διεύθυνση 356.9° και στάθμη θάλασσας $+0.32 \text{ M}\Sigma\Theta$).	91
Εικόνα 5-10. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο S3 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=4.98 \text{ m}$, $T_p=9.23 \text{ s}$, διεύθυνση 346.09° και στάθμη θάλασσας $+0.28 \text{ M}\Sigma\Theta$).	92
Εικόνα 5-11. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο S4 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=5.79 \text{ m}$, $T_p=10.15 \text{ s}$, διεύθυνση 346.09° και στάθμη θάλασσας $+0.24 \text{ M}\Sigma\Theta$).	92
Εικόνα 5-12. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο N1 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=2.0 \text{ m}$, $T_p=6.0 \text{ s}$, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας $-0.50 \text{ M}\Sigma\Theta$).	93
Εικόνα 5-13. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο N49 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=2.0 \text{ m}$, $T_p=6.0 \text{ s}$, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας $+0.50 \text{ M}\Sigma\Theta$).	93
Εικόνα 5-14. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο N24 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=7.0 \text{ m}$, $T_p=11.0 \text{ s}$, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας $-0.50 \text{ M}\Sigma\Theta$).	94
Εικόνα 5-15. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το σενάριο N72 (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=7.0 \text{ m}$, $T_p=11.0 \text{ s}$, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας $+0.50 \text{ M}\Sigma\Theta$).	94
Εικόνα 5-16: Τέσσερις υποπεριοχές (με γαλάζιο χρώμα) διερεύνησης και τρία μέτωπα (κίτρινο, κόκκινο και πορτοκαλί) από τα οποία διεισδύουν τα θαλάσσια ύδατα και κατακλύζουν την παράκτια περιοχή του Ρεθύμνου. Διατομές (1-2-3) υπολογισμού υπερπήδησης.	95
Εικόνα 5-17. Προβλέψεις (μπλε κουκίδες) και δεδομένα εκπαίδευσης (κόκκινες κουκίδες) κυματικής υπερπήδησης Νευρωνικού Δικτύου (EurOtop, 2018) για την α) Διατομή 1, β) Διατομή 2 και γ) Διατομή 3.	95
Εικόνα 5-18. Παροχή κυματικής υπερπήδησης στις Διατομές 1 (γαλάζια τρίγωνα), 2 (μωβ κουκίδες) και 3 (μπλε τετράγωνα) όπως υπολογίστηκαν μέσω του Νευρωνικού Δικτύου (EurOtop, 2018) για τα σενάρια N1-N72.	97
Εικόνα 5-19. Αριθμητικό πεδίο υδροδυναμικού μοντέλου και όρια εισόδου και εξόδου ροής. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται η περιοχή που κατακλύστηκε σύμφωνα με τις καταγραφές και τις μαρτυρίες κατά τη διάρκεια των τεσσάρων συμβάντων.	97
Εικόνα 5-20: Περιοχές κατάκλυσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (με παλέτα διαβάθμισης μπλε χρώματος ανάλογα με το βάθος ροής) σε σύγκριση με την περιοχή που κατακλύστηκε στην πραγματικότητα κατ' εκτίμηση από καταγραφές βίντεο και μαρτυρίες κατοίκων (επισημασμένες με κόκκινο χρώμα).	99
Εικόνα 5-21. Κλάσεις επικινδυνότητας (1. Χαμηλή: γαλάζιες κουκίδες, 2. Μέτρια: μωβ, 3. Υψηλή: ροζ) για την περιοχή του πάρκινγκ σε συνάρτηση με τα ζεύγη κυματικών χαρακτηριστικών στα ανοιχτά και την α) ελάχιστη και β) μέγιστη θαλάσσια στάθμη.	100

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 3-1: Σύνθεση των 14 επιλεγμένων αδιάστατων παραμέτρων εισόδου του ANN (Πηγή: Eurotop, 2018)..... 60

Πίνακας 4-1: Πλημμυρικά γεγονότα του παρελθόντος για τα οποία θα εφαρμοσθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία 80

Πίνακας 5-1. Μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης σημαντικού ύψους κυματισμού, H_s (m), ανά διεύθυνση [Επεξεργασία δεδομένων βάσης Copernicus, περίοδος 1993-2019]. 84

Πίνακας 5-2. Μέση (ανά ομάδα ύψους) περίοδος κορυφής, T_p (s), ανά διεύθυνση [Επεξεργασία δεδομένων βάσης Copernicus, περίοδος 1993-2019]. 84

Πίνακας 5-3. Κυματικά χαρακτηριστικά στα ανοιχτά της περιοχής κατά την ώρα που εξελίσσονταν τα τέσσερα υπό διερεύνηση παράκτια πλημμυρικά γεγονότα..... 85

Πίνακας 5-4. Μεταβολή θαλάσσιας στάθμης σύμφωνα με τα δεδομένα της βάσης Copernicus (περιόδου 1987 - 2019)..... 86

Πίνακας 5-5. Μεταβολή θαλάσσιας στάθμης λόγω αστρονομικής παλίρροιας σύμφωνα με τα δεδομένα της βάσης AVISO (περιόδου 1980 - 2017). 87

Πίνακας 5-6: Δεδομένα θαλάσσιας κατάστασης κατά τη διάρκεια των τεσσάρων υπό μελέτη παράκτιων πλημμυρικών γεγονότων..... 87

Πίνακας 5-7: Ύψη κυματισμών στον πόδα των διατομών και αποτελέσματα παροχής κυματικής υπερπήδησης για τις τρεις διατομές και τα σενάρια S1-S4. 96

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία (ΜΔΕ) αφορά τη διερεύνηση της παράκτιας πλημμύρας μέσω αξιοποίησης ανοιχτών βάσεων δεδομένων, μαθηματικών προσομοιώσεων του παράκτιου κυματικού πεδίου και της χερσαίας κατάκλυσης, και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με καταγραφές πραγματικών συμβάντων στο παρελθόν στην παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου Κρήτης.

Τα δεδομένα τα οποία λαμβάνονται υπόψη από τα μαθηματικά μοντέλα που αξιοποιούνται για την προσομοίωση των παράκτιων διεργασιών είναι η γεωμορφολογία του πυθμένα, η ύπαρξη παράκτιων και λιμενικών έργων (π.χ. έργα θωράκισης της ακτογραμμής, παραλιακούς δρόμους, κατακόρυφα μέτωπα, προβλήτες κ.α.), η τοπογραφία της παράκτια ζώνης μέσω ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους, η μεταβολή της Θαλάσσιας Στάθμης λόγω αστρονομικής και μετεωρολογικής παλίρροιας (astronomical tide and storm surge) και το προσπίπτον κυματικό κλίμα στα «ανοιχτά». Έχοντας ως βάση τα παραπάνω δεδομένα, στόχος των υπό εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων είναι η προσομοίωση της κυματικής διάδοσης από τα «ανοιχτά» έως την ακτογραμμή, προσομοιώνοντας όλα τα κυρίαρχα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη (ρήχωση, θραύση, διάθλαση, περίθλαση, τριβή πυθμένα), της κυματικής αναρρίχησης και υπερπήδησης και της πλημμυρικής κατάκλυσης της παράκτιας χερσαίας επιφάνειας.

Η προτεινόμενη από την παρούσα ΜΔΕ μεθοδολογία, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα καινοτόμο υπολογιστικό σύστημα αλληλουχίας και σύζευξης εξελιγμένων μαθηματικών μοντέλων κυματικής διάδοσης, αναρρίχησης, υπερπήδησης και υδροδυναμικής κατάκλυσης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε παράκτια περιοχή μέχρι το σημείο όπου η διάβρωση μεταβάλλει σημαντικά τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του παράκτιου μετώπου και οι παρακείμενες εκροές ποταμών αρχίζουν να έχουν σημαντική συμβολή στην άνοδο της θαλάσσιας στάθμης στην παράκτια ζώνη ενδιαφέροντος.

Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε στην παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου στο νησί της Κρήτης, στην Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στην εκδήλωση τέτοιων φαινομένων και τα αποτελέσματα της συγκρίθηκαν με καταγραφές συμβάντων στο παρελθόν με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης, πέραν αυτών των γεγονότων διερευνήθηκαν και διακριτά σενάρια θαλάσσιας κατάστασης με διαφορετικά κυματικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές θαλάσσιες στάθμες με στόχο τη βαθύτερη κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν στην παράκτια κατάκλυση. Ο λόγος που η περιοχή του Ρεθύμνου της Κρήτης επιλέχθηκε να διερευνηθεί είναι γιατί πέραν του γεγονότος ότι αναφερόμαστε σε μια περιοχή που πλήττεται σφοδρά και συχνά από παράκτιες πλημμύρες, εξαιτίας της έντονης τουριστικής, οικιστικής και εμπορικής δραστηριότητας πολύ κοντά στην ακτογραμμή, τίθενται σε κίνδυνο η ασφάλεια των κατοίκων, οι ιδιοκτησίες και οι υποδομές.

Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι ότι η παράκτια περιοχή είναι εκτεθειμένη σε κυματισμούς που προσπίπτουν από ΔΒΔ, ΒΒΔ, Β και ΒΒΑ, η αστρονομική παλίρροια έχει μικρή συμβολή ως αίτιο πρόκλησης παράκτιας πλημμύρας σε σύγκριση με τη μετεωρολογική παλίρροια, οι κυματισμοί διατηρούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που έχουν στα βαθιά νερά όταν προσεγγίζουν το ευάλωτο σε πλημμύρα παράκτιο μέτωπο λόγω της ύπαρξης απότομων κλίσεων του πυθμένα έμπροσθεν αυτού του μετώπου και τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα η συμβολή της αύξησης της θαλάσσιας στάθμης στην εμφάνιση και στην κλάση επικινδυνότητας παράκτιας πλημμύρας, είναι σημαντική εν προκειμένω στην παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου κυρίως λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας.

EXTENDED ABSTRACT

The present thesis provides an integrated framework for modelling of coastal inundation, aiming to help coastal communities understand their risks and consequently to prevent the adverse effects to society. The proposed framework involves the implementation and coupling of a suite of sea state hindcast data, numerical wave and hydrodynamic models and empirical formulas. The validity of any model is demonstrated by its success in reproducing recorded events and to this end, the coastal zone of Rethymno in the Island of Crete, Greece is examined to demonstrate the proposed framework's performance to capture historical coastal flood events.

1. Introduction

Coastal flooding is regarded as one of the most dangerous natural disasters that can harm coastal cities. Rapid urbanization of coastal areas in conjunction with climate change and often inadequate coastal protection infrastructure, lead to increased flood risks for coastal communities. The processes that drive flood risks include the still sea water elevation due to astronomical tide, storm surge, mean sea level rise due to climate change, and wave action, i.e., setup, runup and overtopping. The manner in which these drivers combine among themselves determines the magnitude of any flood impacts. According to the most recently published report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2019), sea level continues to rise at an increasing rate and the increased mean and extreme sea levels are projected to exacerbate risks for human communities in low-lying coastal areas. In addition, coastal hazards will be further exacerbated by an increase of the frequency of extreme events of storm surges. In general, there are many uncertainties and variables in coastal processes during an extreme flood, and many possible adjustments to methodologies for treating such an event. Recent research efforts have contributed to the understanding, modelling and prediction of coastal flood events (Gad et al., 2020; Tsoukala et al., 2016; Gallien et al., 2014). The present thesis aims to provide a generic and integrated numerical modelling framework to help coastal communities understand their risks. The proposed framework involves the implementation and coupling of a suite of hindcast data, numerical (wave propagation and hydrodynamic) models and empirical formulas. The model results should be in basic agreement with past flooding patterns, and historical data should be used to evaluate these results. To this end, the study area of Rethymno in the Island of Crete, Greece is examined herein to validate the proposed framework. Most of human activities in Rethymno are being developed along its coastal front in the vicinity of the port. Major coastal flood events have been encountered throughout the years, mainly due to combined effects of storm surge and wave overtopping (mostly over the port's windward breakwater and over the revetment works of the parking area as shown in Figure 1), resulting in severe damages and posing a serious threat for coastal residents' safety.

2. Integrated framework for coastal inundation modelling

The proposed framework is based on the work of Tsoukala et al. (2016) but it is further enhanced herein to incorporate the utilization of open metocean databases, the significant contribution of storm surge, and the implementation of a hydrodynamic model to simulate the coastal inundation. Specifically, the framework consists of the following five distinct steps:

1) Gathering of metocean hindcast data. The most crucial step of the entire process is to identify reliable sea state datasets during the occurrence of past coastal flood events. Freely provided and widely used initiatives of open data for metocean parameters have been developed in recent years. For instance, wave climate (significant wave height, peak period and mean wave direction) and storm surge elevation data can be obtained from Copernicus Marine Service (marine.copernicus.eu). Wind

climate data can be obtained from National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, noaa.gov). Data regarding Astronomical Tide can be obtained from AVISO Satellite Altimetry Data (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data, avis.altimetry.fr).

2) Constructing a Digital Elevation Model (DEM) and a bathymetric grid, based on executed surveys, to represent the sea bottom morphology of the study area and the urban land area.

3) Simulating nearshore wave field. Numerical simulations of wave transformation from offshore to nearshore should then be executed by implementing an appropriate wave model that takes into account all dominant phenomena taking place in the nearshore zone, i.e., shoaling, refraction, diffraction, depth-induced breaking and bottom friction.

4) Estimating profile nearshore hydraulics. Based on the simulated nearshore wave characteristics from the previous step, the wave setup, runup and overtopping are calculated by using empirical formulas (e.g., FEMA, 2015; EurOtop, 2018), in selected cross-shore transects along the flood-prone coastal front. It is important to underline that the wave overtopping component is highly uncertain, due to its non-linear, spatially and temporally variable stochastic nature. Incident wave characteristics and structure’s geometry significantly affect the overtopping process and therefore attention should be paid on the assumptions to be made.

5) Simulating coastal inundation. The results of the previous step along with the DEM, serve as input for simulating the inundation by implementing an appropriate hydrodynamic model, based on the shallow water equations, capable of describing the motion of water (Teng et al. 2017) in terms of depth-averaged two-dimension velocity and water depth in response to the forces of gravity and friction.

3. Implementation of the proposed framework in the coastal front of Rethymno

Historical data are used to evaluate the results of the proposed framework. Four past coastal flooding events are considered herein (Table 1).

Table 1. Sea state data during flood events in Rethymno.

Coastal flooding event:		S1	S2	S3	S4
Date:		11/12/2010	28/02/2012	01/01/2015	13/01/2015
Offshore wave characteristics	H_s (m)	5.24	5.19	4.98	5.79
	T_p (s)	9.23	9.23	9.23	10.15
	MWD	338.52°	356.9°	346.09°	358.77°
Sea water level elevation	Storm surge (m)	+0.15	+0.30	+0.26	+0.23
	Astronomical tide (m)	+0.03	+0.02	+0.02	+0.01
	Total (m)	+0.18	+0.32	+0.28	+0.24

During these events, sea water level elevation due to meteorological forcing (storm surge) and wave overtopping led to coastal inundation, posing serious threats for residents’ safety. Based on video recordings of the events, the parking, urban and port areas (as defined in Figure 1) were heavily flooded, with significant flow depths and velocities, and overtopping spray was observed along the coastal road, west of the port.



Figure 1. Flood-prone coastal areas of Rethymno. According to the observations, areas highlighted with transparent light blue color (i.e., the coastal road west of the port, the parking lot, port and urban areas) are susceptible to being inundated by sea water during a storm. The sea-land interface boundaries, from which seawater can penetrate, are highlighted with yellow (in front of the coastal road), red (in front of the parking area) and orange (in front of the port's windward breakwater) solid lines. Three cross-shore transects, where the nearshore hydraulics were calculated, are depicted.

In order to obtain reliable sea state data during these occurrences the following were conducted: wave climate data were obtained from Copernicus. Given the orientation of the shoreline and the geomorphology of the study area, it is evident that the coastal area is exposed to waves arriving from Northwest, North, and Northeast directions. According to the obtained offshore wave dataset, the most frequent incident wave direction and the highest wave heights arrive from the North and Northwest sectors due to the larger fetch lengths and wind characteristics. Storm surge elevation from Mean Water Level (MWL) were also obtained from the same database. Finally, data regarding Astronomical Tide were obtained from AVISO. It is observed that the astronomical tide has a low range and thus has a minor contribution as a flooding driver, while storm surge plays the dominant role in sea water elevation.

In addition of the aforementioned data regarding past events, a further analysis was carried out in relation to wave characteristics coming from the North. In Figure 2, pairs of wave height and period are given, as obtained from the data base (blue dots). In light of this pair distribution, some wave representative pairs are chosen (red dots in Figure 2) for further analysis.

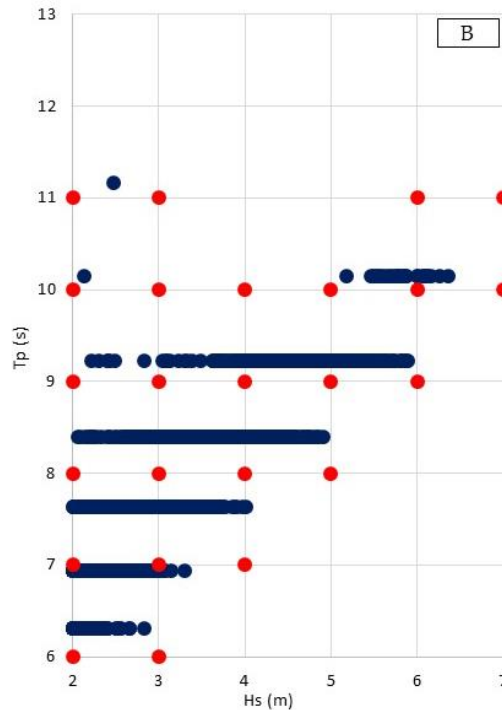


Figure 2. Pairs of offshore H_s (m) and T_p (s) coming from the North sector. Blue dots represent data from the Copernicus database and red dots illustrate the chosen wave pairs representatives (scenarios N1-N72).

A DEM was available (from a previous relevant Project, entitled “Pearl-Preparing for extreme and rare events in coastal regions” (pearl-fp7.eu), for the study area with a fine spatial resolution of 0.8 m in both horizontal dimensions. A bathymetric grid was also constructed, based on executed surveys with spatial step of 2.5 m. Numerical simulations of wave transformation from offshore to nearshore were then executed by implementing a nonlinear mild-slope of parabolic approximation wave model, developed by Chondros et al. (2021). The spatial distribution of nearshore wave heights, indicatively for the first event, is illustrated in Figure 3. It is observed that waves retain the largest proportion of their offshore energy when attacking the flood-prone coastal front, in contrast to the adjacent shores where a wide breaker zone occurs and waves reach the shoreline with significant loss of their energy. This can be attributed to the local foreshore morphology where steep sea bottom slopes are present.

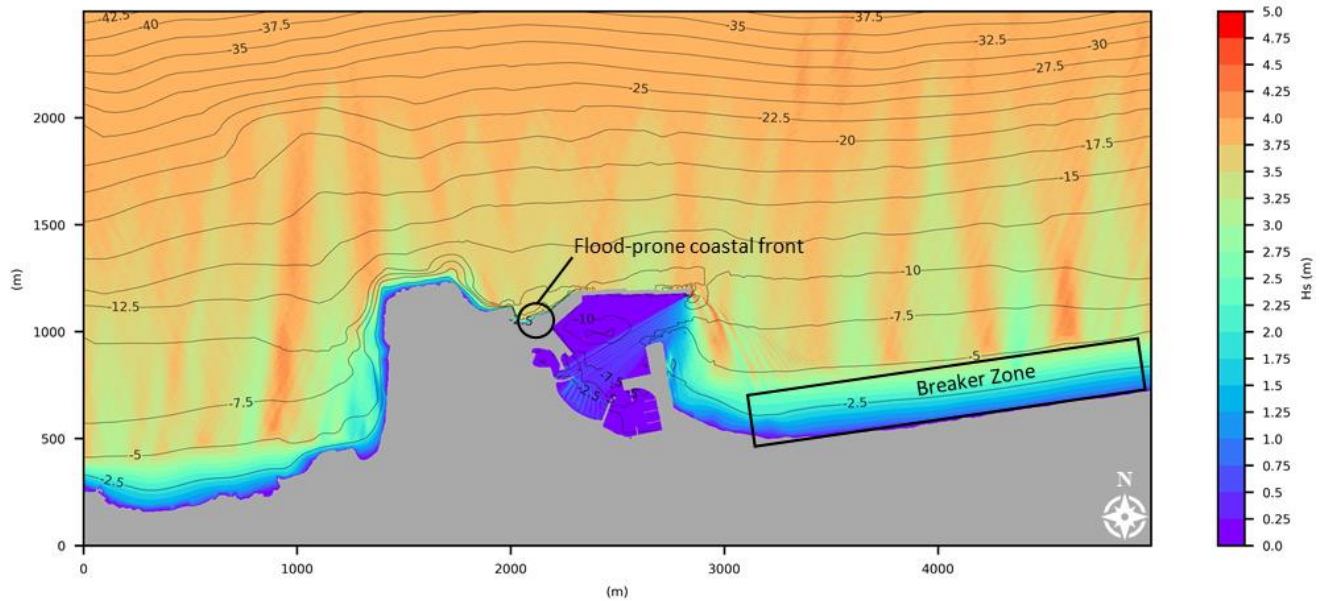


Figure 3. Simulation results of spatial distribution of nearshore wave heights (indicated by color palette) for the flood event occurred in 10/12/2010; contours indicate sea water depths.

Having determined the nearshore wave characteristics at the toe of the structures, the wave overtopping discharge was then calculated by considering the total water level elevation as presented in Table 1 and implementing the Neural Network (EurOtop, 2018) in the three transects (as shown in Figure 1) along the selected boundaries. Indicative results are given in Table 2. It can be observed that the largest overtopping volumes occur in transect 2 which is representative of the parking area’s front. Indeed, according to the visual observations of the residents, the urban area is inundated from sea water penetrating mainly from this boundary.

Table 2. Nearshore wave height at the toe of the structures and mean wave overtopping discharges.

	Διατομή	S1	S2	S3	S4
Significant wave height at the toe of the structure H_s (m)	1	3.42	3.85	3.53	4.31
	2	4.15	4.31	4.16	4.45
	3	5.48	4.93	5.03	5.33
Wave overtopping discharge q (l/s/m)	1	1.00	2.14	1.15	6.92
	2	34.90	53.30	41.70	58.90
	3	7.85	1.82	2.68	8.09

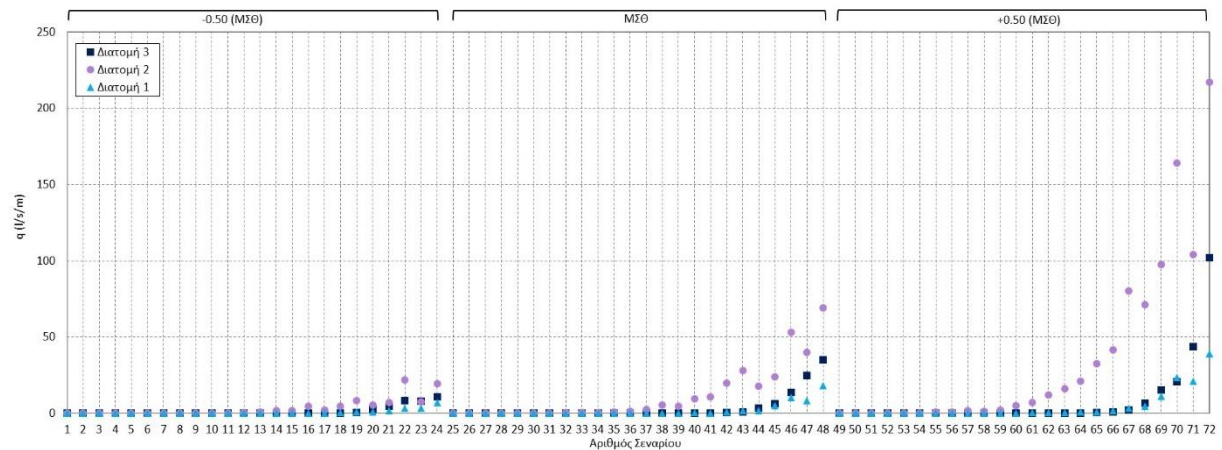


Figure 4. Wave overtopping discharge in Sections 1, 2 and 3 as estimated by the Neural Network (EurOtop, 2018) accounting for the scenarios N1-N72.

The calculated overtopping discharges along the boundaries and the DEM, serve as input for simulating the inundation by implementing the hydrodynamic model HEC-RAS 2D (US Army Corps of Engineers, 2016), which is the last step of the proposed model suite. Inundated areas resulting from the simulations, in comparison to the ones indicated by video recordings and local stakeholders' observations, are depicted in Figure 5. The proposed framework captures satisfactorily the inundated areas.

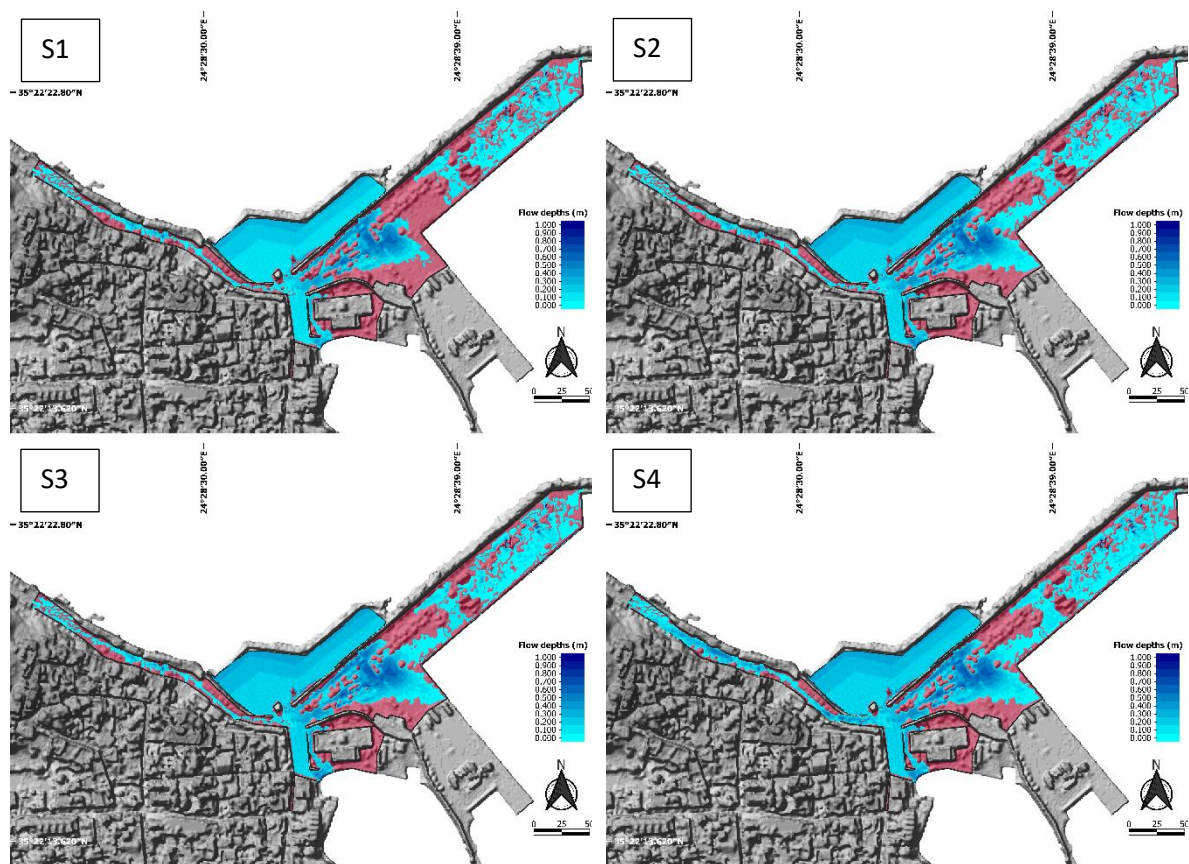


Figure 5. Simulation results of inundation (highlighted with blue color) for S1-S4, in comparison with observed (from video recordings and local stakeholders' observations) inundated areas (highlighted with red color).

Finally, based on the simulation results of inundation for scenarios N1 - N72, a preliminary categorization of the coastal flood risk was made based on the criterion of the maximum occurred flow depth per each subarea. The coastal flood risk was discretized into three classes:

1. Low risk, with flow depths $d \leq 0.15$ m.
2. Medium risk, with flow depths $0.15 < d \leq 0.35$ m.
3. High risk, with flow depths $d > 0.35$ m.

It is noted though that the risk should additionally include the flow velocities, the spatial extent of the flood and the vulnerability of the coastal area. In Figure 6, the risk categorization (1. Low: light blue dots, 2. Medium: purple, 3. High: pink) is illustrated individually for the parking area in relation to offshore wave characteristics and for low and maximum sea water levels.

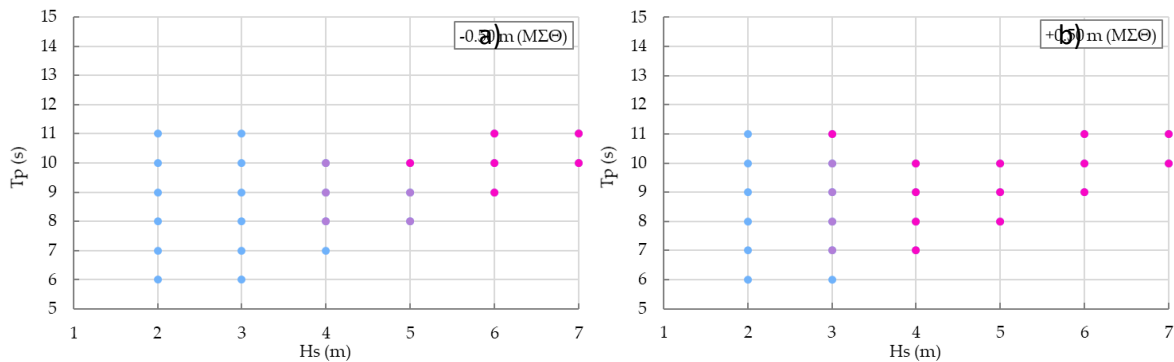


Figure 6. Risk categorization (1. Low: light blue dots, 2. Medium: purple, 3. High: pink) for the parking area in relation to offshore wave characteristics and for sea water levels: a) low water level and b) maximum water level.

4. Conclusions

An integrated framework for modelling of coastal inundation was presented, implementing a suite of sea state hindcast data, numerical wave and hydrodynamic models and neural networks. Due to its generic nature, it can be applied to any coastal region. The framework was applied in the coastal zone of Rethymno and its results were found in basic agreement with past flooding patterns. The main conclusion that can be drawn from the present research, regarding flooding drivers of the coastal area of Rethymno, is the following. The high energy waves arriving from the North, ride on top of the elevated (mainly due to storm surge; astronomical tide has minor contribution) sea water level and reach the flood-prone fronts of the study area, having retained the largest proportion of their offshore energy. As a result, significant overtopping processes take place during the storm, mostly over the revetment works of the parking area, allowing large sea water volumes to inundate this area and consequently to move landward and further inundate the urban area.

References

Chondros M., Metallinos A., Memos C., Karambas T. and Papadimitriou A. (2021), Concerted nonlinear mild-slope wave models for enhanced simulation of coastal processes, *Appl. Math. Model.*, 91, 508-529.

EurOtop, (2018). Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., *Manual on wave overtopping of sea defences*

and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.

FEMA (2015), Federal Emergency Management Agency. Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping, Coastal Wave Setup.

Gad, F.-K., Chatzinaki, M., Vandarakis, D., Kyriakidou, C., and Kapsimalis V. (2020), Assessment of Wave Storm-Induced Flood Vulnerability in Rhodes Island, Greece, *Water*, 12, 2978.

Gallien, T., Sanders, B., Flick, R. (2014), Urban coastal flood prediction: integrating wave overtopping, flood defenses and drainage, *Coast. Eng.* 91, 18-28.

IPCC (2019), Pörtner, H.-O., Roberts, D.C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., Weyer, N.M., Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.

Teng, J., Jakeman, A.J., Vaze, J., Croke, B.F.W. Dutta, D. and Kim, S., (2017), Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environ. Model. Softw.*, 90, 201-216.

Tsoukala, V., Chondros, M., Kapelonis, Z., Martzikos, N., Lykou, A., Belibassakis, K. and Makropoulos, C. (2016). An integrated wave modelling framework for extreme and rare events for climate change in coastal areas – the case of Rethymno, Crete, *Oceanologia*, 58, 71-89.

US Army Corps of Engineers (2016), HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual, Version 5.0. Hydrologic Engineering Center, 1-538.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι πλημμύρες αποτελούν ένα φαινόμενο το οποίο απαντάται πολύ συχνά στην φύση, υπό συνθήκες μπορεί να εμφανισθεί στο μεγαλύτερο μέρος της χερσαίας επιφάνειας της γης και απασχολεί σημαντικά τον άνθρωπο, καθώς οι επιπτώσεις του είναι ιδιαίτερα δυσάρεστες. Κατά την εξέλιξη τέτοιων φαινομένων ανά τον κόσμο, έχουν καταγραφεί μεγάλης έκτασης υλικές ζημιές σε υποδομές και περιουσίες, σοβαρές επιπτώσεις στη χλωρίδα και την πανίδα της εκάστοτε περιοχής καθώς και τραυματισμοί ακόμα και απώλειες ανθρώπινων ζωών.

Υποκατηγορία των πλημμυρών αποτελούν οι παράκτιες πλημμύρες οι οποίες εντοπίζονται σε περιοχές που βρίσκονται κοντά στην ακτογραμμή, εκκινούν από τη θάλασσα ζώνη και κατευθύνονται προς την ξηρά. Οι παράκτιες πλημμύρες θεωρούνται από τις πιο επικίνδυνες και επιβλαβείς φυσικές καταστροφές που πλήττουν αστικές περιοχές γειτνιάζουσες με ακτές.

Τα κυριότερα φαινόμενα, τα οποία οδηγούν στην εμφάνιση επικίνδυνων πλημμυρικών γεγονότων είναι η άνοδος της στάθμης της θάλασσας λόγω της αστρονομικής παλίρροιας (astronomical tide), της μετεωρολογικής παλίρροιας (storm surge), καθώς και η κυματική δράση συμπεριλαμβανοντας την κυματογενή ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας (wave setup), την κυματική αναρρίχηση (wave runup) και την κυματική υπερπήδηση (wave overtopping). Ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται τα ανωτέρω φαινόμενα καθορίζει και το μέγεθος των επιπτώσεων της δημιουργούμενης πλημμύρας, ενώ, κατά τη διάρκεια ενός τέτοιου γεγονότος, τα φυσικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα, συντελούνται με μεγάλη ποικιλομορφία και πολυπλοκότητα.

Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης πλημμύρας από τη θάλασσα, επηρεάζοντας άμεσα τους παραπάνω παράγοντες. Γι' αυτό το λόγο αποτελεί ένα υψηλής προτεραιότητας πρόβλημα τόσο σε επιστημονικό όσο και σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο. Η ταχεία αστικοποίηση των παράκτιων περιοχών σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, τις συχνά ανεπαρκείς υποδομές προστασίας, αλλά και την ενίοτε κακή διαχείριση τέτοιων κινδύνων, οδηγούν στην αύξηση των επιπτώσεων για τις παράκτιες κοινότητες. Επιπλέον, πολλές παράκτιες περιοχές είναι ακόμα πιο ευάλωτες στην παράκτια κατάκλυση λόγω της παράκτιας διάβρωσης. Οι προσπίπτοντες κυματισμοί μέσω των φαινομένων της αναρρίχησης και της υπερπήδησης σε συνδυασμό με τη γεωμορφολογία της παράκτιας περιοχής και την ανύψωση της θάλασσας στάθμης, κατακλύζουν όλο και συχνότερα και βιαιότερα τις παράκτιες περιοχές. Υπολογίζεται ότι οι ετήσιες ζημιές από τις παράκτιες πλημμύρες μπορεί να αυξηθούν κατά 30 φορές έως το 2050 και κατά 700 φορές έως το 2100 και ότι ο αριθμός των Ευρωπαίων που κάθε χρόνο θα είναι εκτεθειμένοι σε καταστροφικές παράκτιες πλημμύρες, θα αυξηθεί από περίπου 102.000 σήμερα, σε 530.000 έως 740.000 το 2050 και σε 1,52 έως 3,64 εκατομμύρια το 2100 (Vousdoukas, 2018).

1.1. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται σαφές ότι υπάρχει ανάγκη για την πρόγνωση των παράκτιων πλημμυρών, αλλά και τη δημιουργία συστημάτων που θα δίνουν τη δυνατότητα έγκαιρης προειδοποίησης, με την ανάπτυξη και εφαρμογή αξιόπιστων επιστημονικών εργαλείων. Τα εργαλεία αυτά θα βοηθήσουν τους φορείς χάραξης πολιτικής, σε τοπικό και εθνικό επίπεδο, καθώς και τις υπηρεσίες πολιτικής προστασίας για την έγκαιρη ενημέρωση των παράκτιων κοινοτήτων αλλά και για την ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης του κινδύνου.

Αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας (ΜΔΕ) είναι η διερεύνηση της παράκτιας πλημμύρας μέσω αξιοποίησης ανοιχτών βάσεων δεδομένων, μαθηματικών

προσομοιώσεων του παράκτιου κυματικού πεδίου και της χερσαίας κατάκλυσης, και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με καταγραφές πραγματικών συμβάντων στο παρελθόν. Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε παράλληλα με το χρηματοδοτούμενο (από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση») Ερευνητικό Πρόγραμμα «Ανάπτυξη Υπολογιστικού Συστήματος Βραχυχρόνιας Πρόγνωσης Παράκτιων Πλημμυρών με Αξιοποίηση Τεχνητής Νοημοσύνης» (με Ακαδημαϊκούς Συμβούλους την Καθηγήτρια Τσουκαλά Β. και τον Ομ. Καθηγητή Μέμο Κ. και μεταδιδακτορικούς ερευνητές τον Δρ. Χονδρό Μ. και Δρ. Μεταλληνό Α.) με στόχο την ανάπτυξη ενός Συστήματος Έγκαιρης Πρόγνωσης Παράκτιων Πλημμυρών με αξιοποίηση Μηχανικών Μάθησης και συγκεκριμένα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.

1.2. ΣΤΟΧΟΣ

Στο πλαίσιο του προαναφερθέντος Ερευνητικού Προγράμματος, η παρούσα ΜΔΕ θέτει ως βασικό στόχο την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την διερεύνηση συμβάντων παράκτιας πλημμύρας του παρελθόντος λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των φαινομένων που συντελούν στην εμφάνισή της. Η εν λόγω μεθοδολογία βασίζεται στην αξιοποίηση ανοιχτών βάσεων δεδομένων, μαθηματικών προσομοιώσεων του παράκτιου κυματικού πεδίου, υπολογισμών της υπερπήδησης μέσω Νευρωνικών Δικτύων, μαθηματικών προσομοιώσεων της χερσαίας κατάκλυσης και σύγκριση των αποτελεσμάτων με καταγραφές μέσω οπτικοακουστικών μέσων και μαρτυριών των κατοίκων της παράκτιας ζώνης, με στόχο τη βαθμονόμηση και επαλήθευση των μαθηματικών μοντέλων που εφαρμόζονται.

Τα μαθηματικά μοντέλα που αξιοποιούνται για την προσομοίωση των παράκτιων διεργασιών λαμβάνουν υπόψη τα εξής δεδομένα:

- τη γεωμορφολογία του πυθμένα,
- την ύπαρξη παράκτιων και λιμενικών έργων (π.χ. έργα θωράκισης της ακτογραμμής, παραλιακούς δρόμους, κατακόρυφα μέτωπα, προβλήτες κ.α.),
- την τοπογραφία της παράκτιας ζώνης μέσω ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους,
- τη μεταβολή της Θαλάσσιας Στάθμης λόγω αστρονομικής και μετεωρολογικής παλίρροιας (astronomical tide and storm surge) και
- το προσπίπτον κυματικό κλίμα στα «ανοιχτά».

Έχοντας ως βάση τα παραπάνω δεδομένα, στόχος των υπό εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων είναι η προσομοίωση:

- της κυματικής διάδοσης από τα «ανοιχτά» έως την ακτογραμμή, προσομοιώνοντας όλα τα κυρίαρχα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη (ρήχωση, θραύση, διάθλαση, περίθλαση, τριβή πυθμένα),
- της κυματικής αναρρίχησης και υπερπήδησης και
- της πλημμυρικής κατάκλυσης της παράκτιας χερσαίας επιφάνειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε παράκτια περιοχή μέχρι το σημείο όπου η διάβρωση μεταβάλλει σημαντικά τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του παράκτιου μετώπου και οι παρακείμενες εκροές ποταμών αρχίζουν να έχουν σημαντική συμβολή στην άνοδο της θαλάσσιας στάθμης στην παράκτια ζώνη ενδιαφέροντος. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η μεθοδολογία είναι κυρίως κατάλληλη για τοπικές κλίμακες και

προφανώς βασίζεται στην χωροχρονική ανάλυση και στην ακρίβεια των δεδομένων των ανοικτών βάσεων που χρησιμοποιούνται.

1.3. ΣΗΜΕΙΑ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ

Μέσα από τη βιβλιογραφική αναδίφηση που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας ΜΔΕ προκύπτει ότι δεν υπάρχει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την προσομοίωση παράκτιων πλημμυρικών γεγονότων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των μηχανισμών που συμβάλουν, αξιοποιώντας δεδομένα από τις ανοιχτές βάσεις και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με καταγραφές και αυτοψίες. Συνεπώς, η παρούσα ΜΔΕ προτείνει μια καινοτόμο μεθοδολογία, αλληλουχίας και σύζευξης εξελιγμένων μαθηματικών μοντέλων κυματικής διάδοσης, αναρρίχησης, υπερπήδησης και υδροδυναμικής κατάκλυσης ως ένα ενιαίο υπολογιστικό σύστημα, το οποίο μάλιστα εφαρμόζεται και σε πραγματική περιοχή, δηλαδή την παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου. Επίσης, τα αποτελέσματα της ΜΔΕ, προσδιορίζουν για πρώτη φορά, συγκεκριμένα ποιοι μηχανισμοί συμβάλλουν στην εκδήλωση ενός παράκτιου πλημμυρικού γεγονότος στην εν λόγω παράκτια ζώνη προσφέροντας πολύτιμη πληροφορία για την κατάλληλη μελλοντική ενίσχυση της προστασίας και ανθεκτικότητας της παράκτιας ζώνης. Τέλος, η σπουδαιότητα της εν λόγω προτεινόμενης μεθοδολογίας κρίνεται ακόμα μεγαλύτερη δεδομένης της εν εξελίξει κλιματικής αλλαγής που επιδρά στη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας αλλά και στα ακραία κυματικά φαινόμενα τα οποία κατακλύουν όλο και συχνότερα τις παράκτιες περιοχές.

1.4. ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πέραν του παρόντος πρώτου κεφαλαίου, στο δεύτερο κεφάλαιο δίνεται μια σύντομη περιγραφή των βασικών εννοιών του προβλήματος που αντιμετωπίζει η παρούσα ΜΔΕ και συγκεκριμένα της παράκτιας πλημμύρας και των μηχανισμών που την προκαλούν. Επιπλέον γίνεται αναφορά στη συμβολή της κλιματικής αλλαγής στην ενίσχυση της επικινδυνότητας και παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα παράκτιων πλημμυρών σε εθνικό διεθνές επίπεδο.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφική έρευνα που έγινε στο πλαίσιο της παρούσης, παρουσιάζοντας συναφείς έρευνες που έχουν υλοποιηθεί και κατόπιν δίδεται, αναλυτικά, η προτεινόμενη μεθοδολογία η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του φαινομένου της παράκτιας πλημμύρας και το αντίστοιχο επιστημονικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζονται τα μαθηματικά μοντέλα που εφαρμόζονται.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την παρουσίαση της περιοχής διερεύνησης και την ανάλυση της παράκτιας ζώνης. Επιπλέον περιγράφονται, τα παράκτια πλημμυρικά φαινόμενα που έχουν καταγραφεί στην περιοχή τα προηγούμενα έτη.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά στην εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας στην περιοχή διερεύνησης. Περιγράφονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, η προσομοίωση της κυματικής διάδοσης, ο υπολογισμός της κυματικής υπερπήδησης και, ολοκληρώνοντας, η προσομοίωση της παράκτιας κατάκλυσης, μαζί με σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται σύνοψη των αποτελεσμάτων της έρευνας και εξάγεται το σύνολο των συμπερασμάτων που προκύπτουν.

2. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΛΗΜΜΥΡΑ

Σύμφωνα με τους Krestenitis et al. (2015) η πλημμύρα στην παράκτια ζώνη (coastal flood) είναι το φαινόμενο κατά το οποίο οι, συνήθως ξηρές, πεδινές εκτάσεις χαμηλού υψομέτρου πίσω (ανάντη) από την ακτογραμμή κατακλύζονται από θαλάσσια ύδατα για μεγάλο (ικανό) χρονικό διάστημα, προκαλώντας συνήθως καταστροφές και επιπτώσεις στο φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον, αντίστοιχα. Όμως, οι μεγάλες σε χωροχρονική κλίμακα πλημμύρες δε θα πρέπει να συγχέονται με τη συνήθη αναρρίχηση των τυπικών (ακόμα και μεγάλων σε ύψος) κυματισμών, που μπορεί να προκαλέσει πρόσκαιρη κατάκλυση στην ακτή με θαλάσσια ύδατα, τα οποία όμως υποχωρούν γρήγορα προς τα ανοιχτά. Η έκταση της παράκτιας πλημμύρας συναρτάται με την ανύψωση της στάθμης των θαλάσσιων υδάτων και την τοπογραφία της περιοχής κατάκλυσης (inundation). Σύμφωνα επίσης με τους Krestenitis et al. (2015) οι παράκτιες πλημμύρες μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικούς τύπους ως ακολούθως:

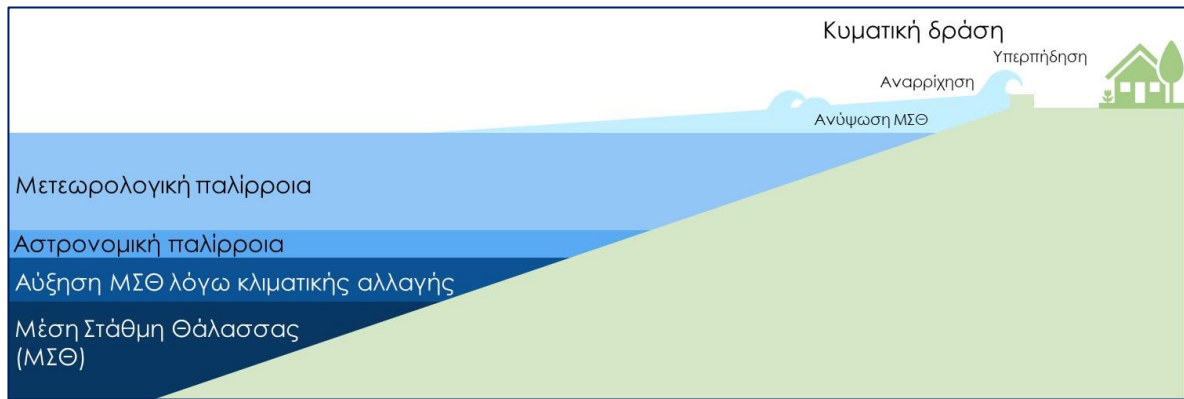
- Άμεση κατάκλυση, όταν η ανύψωση της ΣΘ υπερβαίνει το υψόμετρο του εδάφους σε περιοχές όπου συνήθως υπάρχει επίπεδο ανάγλυφο χωρίς φυσικά ή τεχνικά αναχώματα (αμμόλοφοι ή φράγματα).
- Υπερπήδηση (overtopping) των φυσικών αναχωμάτων (αμμόλοφοι, αμμοθίνες, φυσικά πρανή κ.λπ.) ή τεχνητών κατασκευών ή έργων προστασίας (θωρακίσεις, κυματοθραύστες, κατακόρυφα μέτωπα, μώλοι, αποβάθρες προβλήτες κ.λπ.) της ακτής. Η βίαιη και απότομη υπερπήδηση των αναχωμάτων οφείλεται κυρίως στη δράση των μακρών κυματισμών, ενώ η πιο αργή, αλλά και πιο επιμένουσα, οφείλεται συνήθως σε συνδυασμό έντονων μετεωρολογικών παλιρροιών με την ανώτατη πλήμμη της αστρονομικής παλίρροιας. Η υπερπήδηση μπορεί να προκαλέσει ροές μεγάλων ταχυτήτων και παροχών στα κατάντη των αναχωμάτων, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν υποσκαφή (scouring) τους και διάβρωση σημαντικών εκτάσεων στην παράκτια ζώνη.
- Θραύση ή αστοχία (breaching) φυσικών ή τεχνητών αναχωμάτων. Συνήθως λαμβάνει χώρα σε ανοικτές ακτές, εκτεθειμένες στη δράση των μετεωρολογικών παλιρροιών και των κυματισμών. Η αστοχία συνήθως είναι κατάρρευση ενός μέρους του φράγματος, λόγω καθίζησης ή υποσκαφής, που συνοδεύεται από διαρροή και ολίσθηση του υλικού του, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται η ροή στο χερσαίο τμήμα της παράκτιας ζώνης κατάντη του αναχώματος.

Στο επόμενο υποκεφάλαιο αναλύονται οι μηχανισμοί που οδηγούν στην εμφάνιση παράκτιων πλημμυρών.

2.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΠΟΥ ΟΔΗΓΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΜΦΑΝΙΣΗ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Τα κυριότερα φαινόμενα, τα οποία οδηγούν στην εμφάνιση επικίνδυνων πλημμυρικών γεγονότων μπορούν να διαχωρισθούν σε δύο κατηγορίες, σε εκείνα που σχετίζονται με τη διακύμανση της θαλάσσιας στάθμης και εκείνα που αφορούν την κυματική δράση. Συγκεκριμένα, όπως αποτυπώνεται και στην Εικόνα 2-1, τα βασικότερα φαινόμενα που οδηγούν στη εμφάνιση πλημμυρών είναι τα εξής:

- η άνοδος της στάθμης της θάλασσας λόγω της αστρονομικής παλίρροιας,
- η άνοδος της στάθμης της θάλασσας λόγω της μετεωρολογικής παλίρροιας,
- η κυματογενής ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας (setup),
- η κυματική αναρρίχηση (runup) και
- η κυματική υπερπήδηση (overtopping).



Εικόνα 2-1: Θαλάσσιοι παράγοντες πρόκλησης παράκτιων πλημμυρών

Ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζονται τα ανωτέρω φαινόμενα καθορίζει και το μέγεθος των επιπτώσεων της δημιουργούμενης πλημμύρας. Κατά τη διάρκεια μίας πλημμύρας, τα φυσικά φαινόμενα τα οποία λαμβάνουν χώρα, συντελούνται με μεγάλη πολυπλοκότητα και πληθώρα συνδυασμών, καθιστώντας εξίσου πολύπλοκη την επιλογή του τρόπου αντιμετώπισής της. Στα επόμενα υποκεφάλαια περιγράφονται αναλυτικά τα αίτια πρόκλησης παράκτιων πλημμυρών.

2.1.1. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΣΤΑΘΜΗΣ

Η μεταβολή, και συγκεκριμένα η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, θεωρείται ως ένας από τους κυριότερους παράγοντες τρωτότητας των ακτών και επικινδυνότητας για τη εμφάνιση φαινομένων πλημμύρας. Τα βασικότερα επίπεδα στάθμης της θάλασσας που προσδιορίζονται από τη στατιστική επεξεργασία μετρήσεων είναι τα εξής:

- Μέση Στάθμη Θάλασσας (ΜΣΘ). Είναι το μέσο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας που προκύπτει από παρατηρήσεις που λαμβάνονται ανά ίσα χρονικά διαστήματα για μία μακροχρόνια περίοδο.
- Μέση πλήμμη (ΜΠ). Είναι το μέσο ύψος των πλημμυρών που παρατηρήθηκαν στο χρονικό διάστημα των μετρήσεων.
- Μέγιστη Πλήμμη (ΑΠ). Είναι το μέγιστο ύψος που παρατηρήθηκε κατά το χρονικό διάστημα των μετρήσεων.
- Μέση Ρηχία (ΜΡ). Είναι το μέσο ύψος των ρηχιών που παρατηρήθηκαν στο χρονικό διάστημα των μετρήσεων.
- Κατωτάτη Ρηχία (ΚΡ). Είναι το ελάχιστο ύψος που παρατηρήθηκε κατά το χρονικό διάστημα των μετρήσεων.

Σύμφωνα με την Υδρογραφική Υπηρεσία (ΥΥ) και την έκθεση «Στατιστικά Στοιχεία της Στάθμης της Θάλασσας Ελληνικών Λιμένων» (2013), η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας οφείλεται κατά κύριο λόγο στο φαινόμενο της παλίρροιας η οποία διακρίνεται στην αστρονομική και την μετεωρολογική, ανάλογα με το γενεσιουργό αίτιο της.

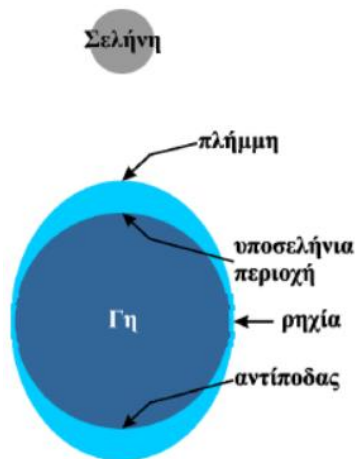
- **Αστρονομική παλίρροια**

Αστρονομική παλίρροια, σύμφωνα με την Υδρογραφική Υπηρεσία (ΥΥ) και την έκθεση «Στατιστικά Στοιχεία της Στάθμης της Θάλασσας Ελληνικών Λιμένων» (2013), λέγεται το φαινόμενο της

περιοδικής ανυψώσεως και πτώσεως της στάθμης της θάλασσας, που οφείλεται στις μεταβολές των ελκτικών δυνάμεων της Σελήνης και του Ήλιου στα διάφορα σημεία της γήινης επιφάνειας.

Αν θεωρήσουμε ότι η επιφάνεια της Γης καλύπτεται από νερό (Εικόνα 2-2), τότε λόγω της επιδράσεως της ελκτικής δυνάμεως της Σελήνης στα μόρια του θαλάσσιου νερού, θα δημιουργηθεί μια κίνηση νερού προς τη θέση κοντά στη Σελήνη και προς την αντιδιαμετρική της περιοχή, με αποτέλεσμα η στάθμη της θάλασσας να ανυψωθεί στα σημεία αυτά και να μειωθεί στα σημεία που βρίσκονται στον κάθετο στη διάκεντρο Γης – Σελήνης μέγιστο κύκλο.

Η χρονική περίοδος κατά την οποία η στάθμη της θάλασσας ανέρχεται λέγεται Πλημμυρίδα, ενώ η χρονική περίοδος κατά την οποία η στάθμη της θάλασσας κατέρχεται λέγεται άμπωτης. Πλήμμη είναι η φάση της παλίρροιας κατά την οποία η στάθμη της θάλασσας λαμβάνει το κατά πλημμυρίδα μέγιστο ύψος, ενώ ρηχία, όταν η στάθμη της θάλασσας λαμβάνει το κατά την άμπωτιδα ελάχιστο ύψος. Τέλος, εύρος παλίρροιας είναι η διαφορά ύψους μίας πλήμμης με την επόμενη ρηχία και αντίστροφα.



Εικόνα 2-2: Επίδραση της Σελήνης στη δημιουργία του φαινομένου της αστρονομικής παλίρροιας (Γιάννης Ν. Κρεστενίτης, 2015)

Αν το φαινόμενο της αστρονομικής παλίρροιας οφειλόταν μόνο στην επίδραση της Σελήνης και η κάλυψη της γήινης επιφάνειας με νερό ήταν ομοιόμορφη, θα έπρεπε σε κάθε τόπο να είχαμε ανύψωση των νερών κατά την άνω και κάτω μεσημβρινή διάβαση της Σελήνης (δηλαδή, όταν η Σελήνη βρίσκεται στο επίπεδο του μεσημβρινού του τόπου). Στην περίπτωση αυτή κατά τη διάρκεια μίας ημέρας θα είχαμε δύο ανυψώσεις και δύο καταπτώσεις της επιφάνειας της θάλασσας.

Στην πραγματικότητα αφ' ενός με λόγω των δυνάμεων τριβής και αδράνειας, αφ' ετέρου λόγω του ότι το φαινόμενο της παλίρροιας οφείλεται και στην επίδραση του Ηλίου, η μέγιστη ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας σε ένα τόπο δε συμβαίνει κατά το χρόνο της μεσημβρινής διαβάσεως της Σελήνης, αλλά παρουσιάζει μια διαφορά χρόνου η οποία λέγεται Σεληνοπαλιρροιακό διάλειμμα (Lunitidal interval) ή Αποκατάσταση λιμένα (Port establishment).

Στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο αλλά και στον ευρύτερο χώρο της Μεσογείου, η συνιστώσα της αστρονομικής παλίρροιας είναι μικρή σε σχέση με τη μεταβολή που προκαλείται από την επίδραση των μετεωρολογικών φαινομένων (Υδρογραφική Υπηρεσία, 2013).

- **Μετεωρολογική παλίρροια**

Η μετεωρολογική παλίρροια (storm surge) είναι μακρύς κυματισμός που προκαλείται από συνδυασμό βαρομετρικών πιέσεων σε διαφορετικές περιοχές της θαλάσσιας επιφάνειας και πολλές φορές το κύμα αυτό ενισχύεται από πνοή ισχυρού ανέμου προς την ακτή (Μέμος, 2016). Η μεταβολή της στάθμης της θάλασσας λόγω πνοής ανέμου παρατηρείται σε εκτεταμένες παράκτιες περιοχές. Παρόλο που η διατμητική τάση λόγω ανέμου είναι πολύ μικρή, το αποτέλεσμά της σε μεγάλες εκτάσεις νερού μπορεί να είναι σημαντικό. Οι μετεωρολογικές παλίρροιες λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους όταν η θυελλογενής ανύψωση της στάθμης της θάλασσας συμπίπτει με τη μέγιστη ανώτατη πλήμμη στον κύκλο της αστρονομικής παλίρροιας.

Η διατμητική τάση του ανέμου που ασκείται στην επιφάνεια του νερού αντιπροσωπεύεται από τη σχέση (Robert G. Dean, 2000) :

$$\tau_w = \rho k W |W| \quad (2.1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του νερού, W η διανυσματική ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 μέτρων και k ο συντελεστής τριβής της τάξης του 10^{-6} , ο οποίος δίνεται από τις σχέσεις του Van Dorn (1953):

$$k = \begin{cases} 1,2 \cdot 10^{-6} , & IWI \leq W_c \\ 1,2 \cdot 10^{-6} + 2,25 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 - \frac{W_c}{IWI}\right)^2 , & IWI > W_c \end{cases} \quad (2.2)$$

όπου $W_c = 5,6$ m/s.

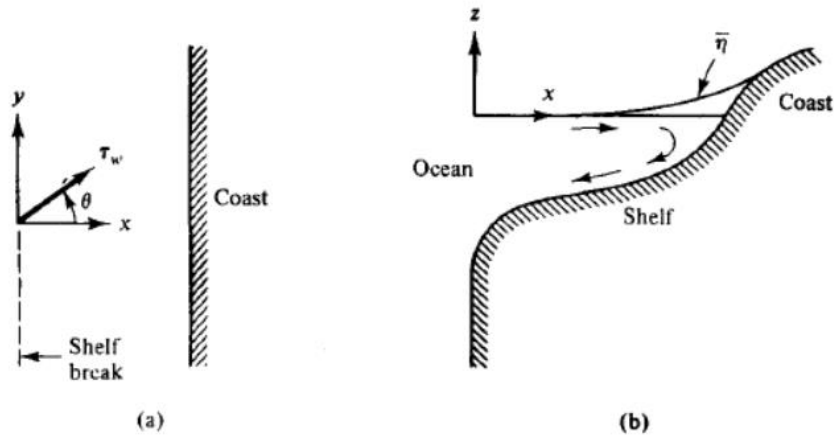
Εάν υιοθετήσουμε ένα σύστημα συντεταγμένων σε μία ακτογραμμή, και τον άνεμο να φυσάει υπό γωνία θ προς την ακτή (Εικόνα 2-3), η διατμητική τάση του ανέμου στη ξηρά είναι $\tau_{wx} = |\tau_w| \cos\theta$. Η γραμμικοποιημένη εξίσωση κίνησης σε αυτή τη διεύθυνση είναι:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho(h+\eta)} [\tau_{zx}(h) - \tau_{zx}(-h)] \quad (2.3)$$

όπου

h το βάθος του νερού και

η η μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας.



Εικόνα 2-3: Κάτοψη (a) και τομή (b) της ακτής (Robert G. Dean, 2000)

Μετά από πολύ ώρα, η ροή U στο άξονα του x θα πρέπει να είναι μηδενική, λόγω της παρουσίας της ακτής και επομένως οι εξισώσεις σταθερής κατάστασης δείχνουν ότι η διατμητική τάση του ανέμου θα εξισορροπείται από τη διατμητική τάση του πυθμένα όπως και από τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης. Δεδομένου ότι δεν μπορούμε πλέον να ορίσουμε την τριβή του πυθμένα στη συνθήκη της μέσης (μηδενικής) ροής U , ορίσουμε έναν συντελεστή n ώστε να ισχύει:

$$n\tau_{zx}(n) = \tau_{zx}(n) - \tau_{zx}(-h) \quad (2.4)$$

ή

$$n = 1 - \frac{\tau_{zx}(-h)}{\tau_{zx}(n)} \quad (2.5)$$

Αυτός ο παράγοντας, ο οποίος αθροίζει την επίδραση της τριβής του πυθμένα με τη διατμητική τάση του ανέμου, είναι μεγαλύτερος του 1, όταν η διάτμηση τάσης του πυθμένα (Εικόνα 2.4) είναι αρνητική. Οι τυπικές τιμές είναι $n = 1,15$ έως $1,30$ (SPM, 1977).

Επομένως η εξίσωση, τελικά, γίνεται

$$\frac{\partial n}{\partial x} = \frac{n\tau_{zx}(n)}{\rho g(h+n)} \quad (2.6)$$

2.1.2. ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ

Στην εμφάνιση παράκτιας πλημμύρας συμβάλει επίσης σε μεγάλο βαθμό η κυματική δράση και συγκεκριμένα:

- **Κυματογενής ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας στη ζώνη θραύσης και διαβροχής (wave setup)**

Η αύξηση (βραχυπρόθεσμη έως και μεσοπρόθεσμη) της μέσης στάθμης της θάλασσας, λόγω της δράσης των κυματισμών στα ρηχά νερά, χαρακτηρίζεται ως κυματογενής ανύψωση της στάθμης της θάλασσας (wave setup), (Κρεστενίτης, 2017). Επομένως, το συνολικό βάθος νερού είναι το άθροισμα του βάθους του νερού σε ηρεμία και η κυματογενής Ανύψωση της Στάθμης της Θάλασσας (wave setup) (CEM, Chapter 4, Surf Zone Hydrodynamics, 2003).

$$d = h + \bar{\eta} \quad (2.7)$$

όπου,

h το βάθος του νερού σε ηρεμία και

$\bar{\eta}$ η μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία

Η μέση στάθμη του νερού διέπεται από εγκάρσια διατήρηση ισορροπίας της ορμής.

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{\rho g d} \frac{dS_{xx}}{dx} \quad (2.8)$$

όπου S_{xx} η εγκάρσια συνιστώσα της εγκάρσιας ακτινοβολίας, για ομογενή κύματα και βαθυμετρία κατά μήκος της ακτής. Η ακτινοβολία αυξομειώνει (setup – setdown) τη μέση στάθμη της θάλασσας στα περιοχή κοντά στην ακτή.

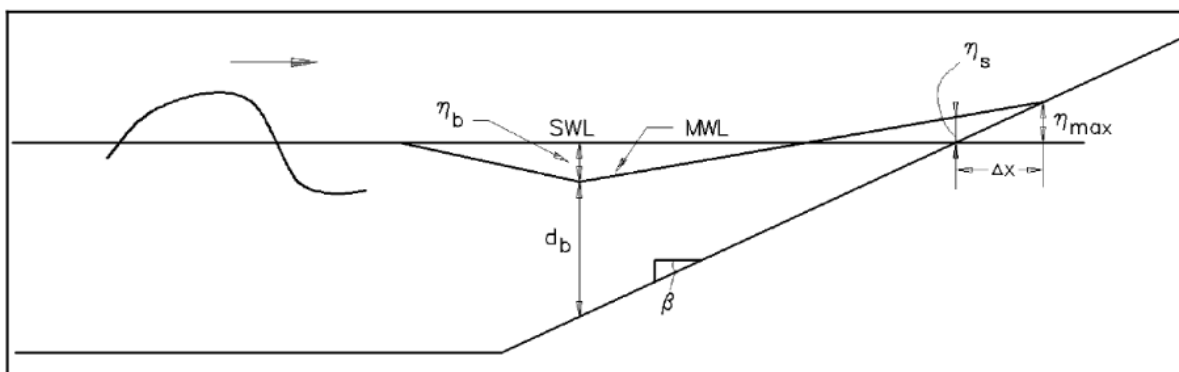
Σύμφωνα με τους Longuet-Higgins and Stewart (1963), στην περιοχή ανοιχτά της ζώνης θραύσης, η κυματογενής ανύψωση της στάθμης της θάλασσας (wave setup), για απλούς κυματισμούς, υπολογίζεται με την ολοκλήρωση της ακόλουθης σχέσης:

$$\bar{\eta} = -\frac{1}{8} \frac{H^2 \frac{2\pi}{L}}{\sinh\left(\frac{4\pi}{L}d\right)} \quad (2.9)$$

θεωρώντας ότι ισχύει η θεωρία των γραμμικών κυματισμών, με κυματισμούς κάθετους στην ακτή και $\bar{\eta} = 0$ στα βαθιά νερά. Η μέγιστη πτώση της στάθμης της θάλασσας (setdown), εμφανίζεται κοντά στην περιοχή θραύσης $\bar{\eta}_b$.

Εντός της ζώνης θραύσης, το $\bar{\eta}$ αυξάνει μεταξύ της θέσης εκκίνησης της θραύσης και της ακτογραμμής. Η κλίση, θεωρώντας ότι η ισχύει η θεωρεία γραμμικών κυμάτων ($S_{xx} = \frac{3}{16} \rho g H^2$), δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{d\bar{\eta}}{dx} = -\frac{1}{1 + \frac{8}{3\gamma_b^2}} \tan\beta \quad (2.10)$$



Εικόνα 2-4: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κυματογενούς αύξησης της στάθμης της θάλασσας (wave setup) (CEM, Chapter 4, Surf Zone Hydrodynamics, 2003)

Τέλος, συνδυάζοντας τις δύο ανωτέρω εξισώσεις (2.9) και (2.10), από την παρακάτω σχέση δίνεται η κυματογενής ανύψωση της στάθμης της θάλασσας στην ακτογραμμή σε κατάσταση ηρεμίας :

$$\bar{n}_s = \bar{n}_b + \left[\frac{1}{1 + \frac{8}{3\gamma_b^2}} \right] h_b \quad (2.11)$$

Ο πρώτος όρος στην εξίσωση (2.11) είναι η μέγιστη πτώση της στάθμης της θάλασσας (setdown) στην θέση θραύσης των κυματισμών και ο δεύτερος η κυματογενής ανύψωση της στάθμης της θάλασσας (setup) κατά μήκος της ζώνης θραύσης. Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας λόγω της κυματικής επιρροής (wave setup) αυξάνει γραμμικά εντός της ζώνης θραύσης σε μία επίπεδη ακτή. Για δείκτη βάθους θραύσης 0.8, έχουμε $\bar{n}_s \approx 0.15 d_b$. Σημειώνεται ότι για μεγάλα ύψη θραυόμενων κυματισμών, d_b θα είναι μεγαλύτερο όπως και το wave setup. Τέλος, η τελευταία εξίσωση μας δίνει το wave setup, με την προϋπόθεση της ηρεμίας των υδάτων. Για να υπολογισθεί το μέγιστο wave setup και η θέση της μέση ακτογραμμής, θα πρέπει να βρεθεί το σημείο συνάντησης της ακτής με το ύψος στάθμης της θάλασσας λόγω των κυματισμών (setup). Αυτό για μία επίπεδη παραλία υπολογίζεται με δοκιμές από τις ακόλουθες σχέσεις.

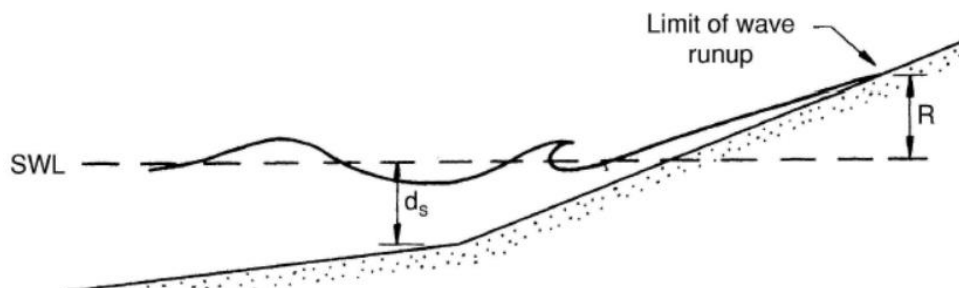
$$\Delta x = \frac{\bar{n}_s 1}{\tan\beta - \frac{d\bar{n}}{dx}} \quad (2.12)$$

$$\bar{n}_{max} = \bar{n}_s + \frac{d\bar{n}}{dx} \Delta x \quad (2.13)$$

όπου Δx η μετακίνηση της ακτογραμμής προς την ξηρά και n_{max} είναι η κυματογενής ανύψωση της στάθμης της θάλασσας (wave setup) στη μέση ακτογραμμή.

- **Κυματική αναρρίχηση (runup)**

Η κυματική αναρρίχηση ορίζεται ως η μέγιστη (κατακόρυφη) υπερύψωση πάνω από τη στάθμη ηρεμίας (Εικόνα 2-5). Η κυματική ανύψωση αποτελείται από δύο συνιστώσες, την κυματογενή ανύψωση της μέση στάθμης της θάλασσας (wave setup) και την κυματική διαταραχή σε σχέση με τη μέση στάθμη θάλασσας (swash). Το ανώτερο όριο της κυματικής αναρρίχησης είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό του ενεργού τμήματος του προφίλ της παραλίας (CEM, Chapter 4, Surf Zone Hydrodynamics, 2003).



Εικόνα 2-5: Σχηματική απεικόνιση του φαινομένου της κυματικής αναρρίχησης στην ακτή (wave runup) (Μέμος, 2016)

Έως σήμερα, οι θεωρητικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό της κυματικής αναρρίχησης στις ακτές δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον παράκτιο σχεδιασμό. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίζονται στην πρόβλεψη της κυματικής αναρρίχησης αφορούν το μη γραμμικό μετασχηματισμό κυμάτων,

την κυματική ανάκλαση, τις τρισδιάστατες επιδράσεις (βαθυμετρία, βαρυτικά κύματα), το πορώδες, την τραχύτητα, την διαπερατότητα και την ανύψωση των υπόγειων υδάτων.

Μονοχρωματικοί Κυματισμοί (regular waves)

Για τους θραυόμενους κυματισμούς, ο Hunt (1959) καθόρισε εμπειρικά την κυματική αναρρίχηση ως συνάρτηση της κλίσης της παραλίας, του ύψους του προσπίπτοντος κυματισμού και της κλίσης των κυμάτων (wave steepness), βάσει εργαστηριακών δεδομένων. Ο τύπος, του Hunt, δίδεται σε αδιάστατη μορφή (Battjes, 1974) από τη σχέση:

$$\frac{R}{H_o} = \xi_o \quad \text{για } 0.1 < \xi_o < 2.3 \quad (2.14)$$

για ομοιόμορφες, λείες αδιαπέραστες κλίσεις, όπου ξ_o είναι η παράμετρος ομοιότητας θραύσης,

$$\xi_o = \tan\beta \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

Οι Walton et al. (1989) τροποποίησαν την εξίσωση (14) για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε απότομες κλίσεις, αντικαθιστώντας τον όρο $\tan\beta$ στη παράμετρο ομοιότητας θραύσης, η οποία γίνεται άπειρη καθώς το β προσεγγίζει το $\pi/2$, με το $\sin\beta$. Η τροποποιημένη εξίσωση Hunt επαληθεύτηκε με εργαστηριακά δεδομένα από τους Saville (1956) και Savage (1958) για κλίσεις 1/10 έως κατακόρυφες.

Για μη θραυόμενους κυματισμούς, η κυματική αναρρίχηση για ομοιόμορφη κλίση δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{R}{H_o} = (2\pi)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\pi}{2\beta} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.16)$$

βασισμένη σε κριτήρια που αναπτύχθηκαν από τους Miche (1951) και Keller (1961), Walton et al. (1989).

Σύνθετοι Κυματισμοί

Η κυματική αναρρίχηση των σύνθετων κυματισμών (irregular waves) έχει βρεθεί, επίσης, ότι υπολογίζεται συναρτήσει της παραμέτρου ομοιότητας θραύσης (Holman, 1985), (Mase, 1989), (Nielsen, 1991), αλλά διαφέρει από τον υπολογισμό κυματικής αναρρίχησης των απλών κυματισμών (regular waves), λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μεμονωμένων διαστημάτων εκτέλεσης. Μπορεί να αποτραπεί η αύξηση του ύψους κύματος λόγω σημαντικής αντίδρασης από το προηγούμενο κύμα ή μπορεί να δημιουργηθεί απότομη αύξηση του ύψους κύματος από ένα επακόλουθο μεγάλο κενό. Ο λόγος του αριθμού των κορυφών της κυματικής αναρρίχησης με τον αριθμό των προσπίπτοντων κυματισμών αυξάνει με την αύξηση της παραμέτρου ομοιότητας θραύσης (οι λόγοι κυμαίνονται από 0.2 έως 1.0 για ξ_o από 0.15 έως 3.0). Έτσι, η ενέργεια χαμηλής συχνότητας (από μακρά κύματα – infragravity waves) κυριαρχεί στην κυματική αναρρίχηση για χαμηλές τιμές ξ_o .

Ο Mase (1989) παρουσίασε εξισώσεις για την πρόγνωση της κυματικής αναρρίχησης σύνθετων κυματισμών, σε ομαλές και αδιαπέραστες ακτές (κλίση 1/5 έως 1/30), βάσει εργαστηριακών

δεδομένων. Οι σχέσεις του Mase για τη μέγιστη κυματική αναρρίχηση (R_{max}), την κυματική αναρρίχηση η οποία υπερβαίνει το 2% των αναρρίχσεων ($R_{2\%}$), τη μέση τιμή των άνω 1/10 τιμών αναρρίχησης ($R_{1/10}$), τη μέση τιμή των άνω 1/3 τιμών αναρρίχησης ($R_{1/3}$) και τη μέση κυματική αναρρίχηση (R), δίνονται ακολούθως:

$$\frac{R_{max}}{H_o} = 2.32\xi_o^{0.77} \quad (2.17)$$

$$\frac{R_{2\%}}{H_o} = 1.86\xi_o^{0.71} \quad (2.18)$$

$$\frac{R_{1/10}}{H_o} = 1.70\xi_o^{0.71} \quad (2.19)$$

$$\frac{R_{1/3}}{H_o} = 1.38\xi_o^{0.70} \quad (2.20)$$

$$\frac{\bar{R}}{H_o} = 0.88\xi_o^{0.69} \quad (2.21)$$

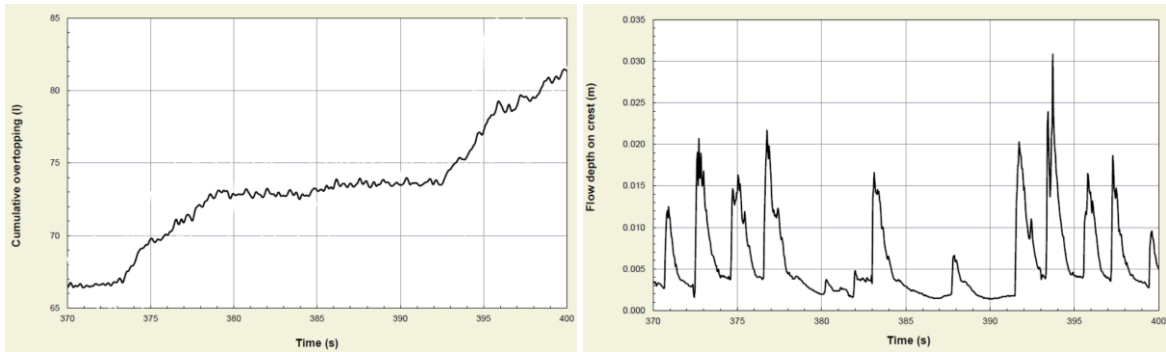
για $1/30 \leq \beta \leq 1/5$ και $H_o/L_o \geq 0.007$, όπου H_o είναι το σημαντικό ύψος κύματος στα βαθιά και το ξ_o υπολογίζεται από το σημαντικό ύψος κύματος και μήκος κύματος στα βαθιά. Η κατάλληλη κλίση για φυσικές παραλίες είναι η κλίση της όψης της (Holman R. A., 1986), (Mase, 1989). Η κυματογενής ανύψωση της στάθμης της θάλασσας περιλαμβάνεται στις εξισώσεις (17), (18), (19), (20), (21). Ο Walton (1992), προχώρησε περισσότερο την ανάλυση του Mase's (1989) για να μπορεί να προβλέψει στατιστικά στοιχεία της κυματικής αναρρίχησης για οποιοδήποτε ποσοστό υπέρβασης υπό την προϋπόθεση ότι η κυματική αναρρίχηση ακολουθεί την πιθανοτική κατανομή Rayleigh.

- **Κυματική υπερπήδηση (overtopping)**

Η κυματική υπερπήδηση είναι το φαινόμενο που εμφανίζεται όταν το ύψος της στέψης του θαλάσσιου μετώπου είναι χαμηλότερο από το ύψος της μέγιστης αναρρίχησης του κύματος. Για αυτό το λόγο η κάθετη απόσταση μεταξύ της μέσης στάθμης της θάλασσας και του ύψους της στέψης (ελεύθερο περιθώριο ή freeboard), θεωρείται εξαιρετικά σημαντική. Η υπερπήδηση των κυμάτων είναι άμεσα εξαρτημένη από αυτό (αυξάνεται με τη μείωσή του και αντίστροφα) και στις παράκτιες διατομές, τόσο κατακόρυφες όσο και με πρηνή, περιγράφεται από τη μέση παροχή της q , η οποία μετριέται σε m^3/sec (ή litres/sec) ανά μέτρο μήκους διατομής (Γαπαδόπουλος, 2013).

Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχει σταθερή παροχή πάνω από την στέψη μιας κατασκευής κατά τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου της υπερπήδησης. Αντίθετα, η κυματική υπερπήδηση είναι πολύ τυχαία σε σχέση με το χρόνο, το χώρο και τον όγκο. Τα μεγάλα κύματα θα φέρουν μεγάλο όγκο νερού πάνω από την εκάστοτε στέψη μίας κατασκευής, σε σύντομο χρονικό διάστημα (λιγότερο από μια περίοδο κύματος), ενώ τα κύματα μικρότερου ύψους μπορεί να μην προκαλέσουν υπερπήδηση (EurOtop, 2018).

Ένα παράδειγμα μετρήσεων κυματικής υπερπήδησης φαίνεται στην Εικόνα 2-6 για χρονικό διάστημα 30 δευτερολέπτων. Το πρώτο γράφημα της εικόνας δίνει την αθροιστική υπέρβαση όπως μετρήθηκε στη δεξαμενή υπερπήδησης. Το δεύτερο γράφημα της εικόνας (βάθη ροής) δείχνει την ανώμαλη διακύμανση της κυματικής υπερπήδησης, όπου σε αυτή την περίπτωση τα περισσότερα κύματα πραγματοποιούν υπερπήδηση της στέψης του θαλάσσιου μετώπου. Για να υπολογισθεί η μέση παροχή κυματικής υπερπήδησης, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η διάρκεια των μετρήσεων και το πλάτος του αγωγού που κατευθύνει το νερό που υπερπηδά στη δεξαμενή.



Εικόνα 2-6: Παράδειγμα κυματικής υπερπήδησης, αποδεικνύοντας την τυχαία συμπεριφορά, α) αριστερά: όγκος νερού από την υπερπήδηση αθροιστικά β) δεξιά: βάθος νερού στη στέψη του έργου (EurOtop, 2018))

Η μέση παροχή υπερπήδησης για κατασκευές με μη λεία πρανή δίνεται από την παρακάτω σχέση (EurOtop, 2018):

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.09 \cdot \exp \left[- \left(1.5 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad \text{για κλίσεις πρανών 1:2 έως 1:4/3} \quad (2.22)$$

Οι αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού υπολογίζονται από τους τύπους:

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 0.1035 \cdot \exp \left[- \left(1.35 \frac{R_c}{H_{m0} \cdot \gamma_f \cdot \gamma_\beta} \right)^{1.3} \right] \quad \text{για κλίσεις πρανών 1:2 έως 1:4/3} \quad (2.23)$$

όπου

q : η παροχή υπερπήδησης

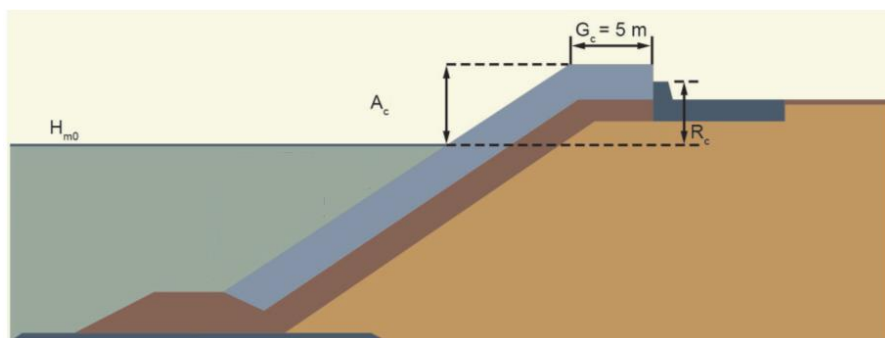
g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

H_{m0} : το χαρακτηριστικό ύψος κύματος από φασματική ανάλυση

γ_f : ο συντελεστής τραχύτητας ογκολίθου θωράκισης

γ_β : ο συντελεστής λοξότητας προσπίπτοντος κύματος

R_c : το ελεύθερο περιθώριο του έργου θωράκισης



Εικόνα 2-7: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών του φαινομένου της κυματικής υπερπήδησης (wave setup) για κατασκευές μη λεία πρανή (EurOtop, 2018)

Η μέση παροχή υπερπήδησης για κατασκευές σύνθετων κρηπιδοτείχων δίνεται από την παρακάτω σχέση (Πηγή: EurOtop, 2018):

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 1.3 \left(\frac{d}{h}\right)^{0.5} 0.0014 \left(\frac{H_{m0}}{hs_{m-1.0}}\right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3} \quad \text{για } \frac{R_c}{H_{m0}} \geq 1.35 \quad (2.24)$$

$$\frac{q}{\sqrt{g \cdot H_{m0}^3}} = 1.3 \left(\frac{d}{h}\right)^{0.5} 0.011 \left(\frac{H_{m0}}{hs_{m-1.0}}\right)^{0.5} \exp\left(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0}}\right) \quad \text{για } \frac{R_c}{H_{m0}} < 1.35 \quad (2.25)$$

όπου

q : η παροχή υπερπήδησης

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

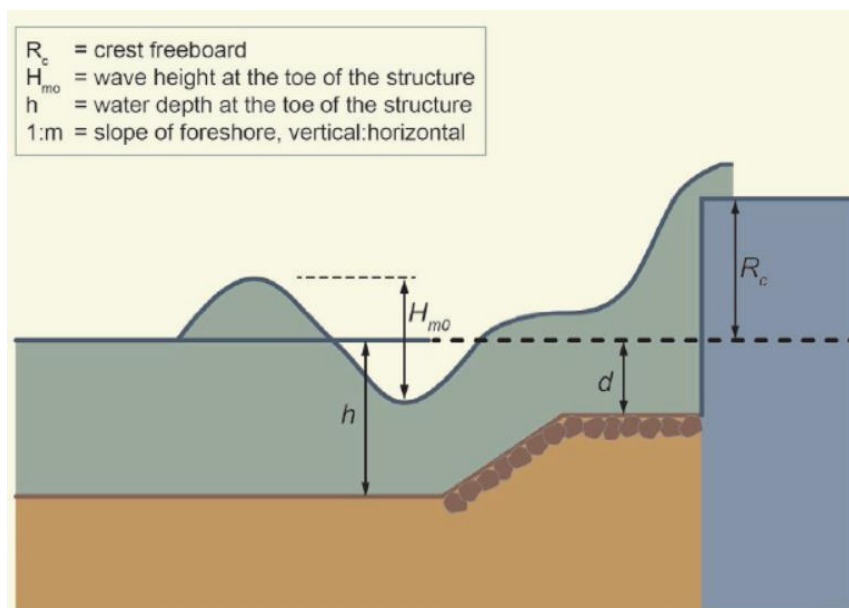
H_{m0} : το χαρακτηριστικό ύψος κύματος από φασματική ανάλυση

h : το εύρος της ροής του κύματος υπερπήδησης

d : το βάθος του νερού μπροστά από τον κρηπιδότοιχο

$s_{m-1.0}$: κλίση του κύματος με το μήκος κύματος στα βαθιά

R_c : το ελεύθερο περιθώριο του έργου θωράκισης



Εικόνα 2-8: Σχηματική απεικόνιση χαρακτηριστικών του φαινομένου της κυματικής υπερπήδησης (wave setup) για κατασκευές σύνθετων κρηπιδοτείχων (EurOtop, 2018)

2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ

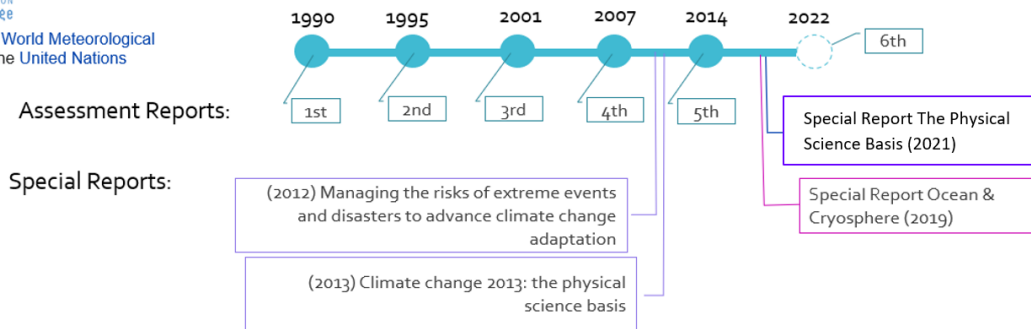
Η κλιματική αλλαγή, σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), αναφέρεται στη μεταβολή της κατάστασης του

κλίματος η οποία μπορεί να προσδιοριστεί (π.χ. χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους) από τις αλλαγές του μέσου μεγέθους και τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων που το χαρακτηρίζουν και διατηρείται για εκτεταμένη περίοδο, συνήθως για δεκαετίες ή περισσότερο. Ο όρος αναφέρεται σε κάθε μεταβολή στο κλίμα κατά τη διάρκεια του χρόνου, είτε αυτό έχει να κάνει με φυσικές μεταβολές, είτε με ανθρωπογενείς επιδράσεις. Αυτή η χρήση του όρου διαφέρει από τον ορισμό που δόθηκε από τη Σύμβαση-Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change), η οποία ορίζει την κλιματική αλλαγή ως την αλλαγή που παρατηρείται στο κλίμα, ως συνέπεια έμμεσων ή άμεσων ανθρώπινων δραστηριοτήτων που επιφέρουν μεταβολές στη παγκόσμια ατμοσφαιρική σύσταση και αυτό, σε συνδυασμό με τη φυσική μεταβολή του κλίματος, παρατηρείται σε συγκρίσιμες χρονικές περιόδους (IPCC M. J., 2018).

Σύμφωνα με το IPCC, για τις μελλοντικές προβλέψεις έχουν ορισθεί τέσσερα σενάρια κλιματικής αλλαγής τα οποία ονομάζονται RCPs (Representative Concentration Pathways) και είναι τα εξής (ΥΠΕΝ, 2021), (Δημόπουλος, 2019):

- **Σενάριο RCP 2.6.** Το οποίο αναπτύχθηκε από τον οργανισμό περιβαλλοντικής αξιολόγησης και πολιτικής της Ολλανδίας και την ερευνητική ομάδα IMAGE και βασίζεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης αερίων θερμοκηπίου. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο το μέγιστο των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου θα συμβεί κατά την τρέχουσα δεκαετία 2010-2020, ενώ στη συνέχεια θα ακολουθήσει σημαντική μείωση. (ευνοϊκό σενάριο μετριασμού)
- **Σενάριο RCP4.5.** Το οποίο αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Ερευνών για την παγκόσμια αλλαγή του εργαστηρίου (JGCRI) και την ερευνητική ομάδα MiniCam στις Ηνωμένες Πολιτείες και βασίζεται στην υπόθεση ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα αυξάνονται μέχρι το 2040, μετά μειώνονται ραγδαία για τριάντα χρόνια και στη συνέχεια σταθεροποιούνται. (ενδιάμεσο σενάριο μετριασμού)
- **Σενάριο RCP6.0.** Το οποίο αναπτύχθηκε από το Εθνικό Ινστιτούτο Περιβαλλοντικών Μελετών (NIES) και την ερευνητική ομάδα AIM στην Ιαπωνία και βασίζεται στην υπόθεση ότι οι εκπομπές διπλασιάζονται μέχρι το 2080 περίπου και έπειτα μειώνονται δραματικά. (ενδιάμεσο σενάριο μετριασμού)
- **Σενάριο RCP8.5.** Το οποίο αναπτύχθηκε από το Διεθνές Ινστιτούτο Ανάλυσης Εφαρμοσμένων Συστημάτων (IIASA) στην Αυστρία και την ερευνητική ομάδα επιστημόνων MESSAGE και βασίζεται στην υπόθεση ότι οι παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου θα συνεχίσουν να αυξάνονται καθ' όλη τη διάρκεια του 21ου αιώνα. (ακραίο σενάριο)

Η συγκεκριμένη Επιτροπή εκδίδει ανά τακτά χρονικά διαστήματα (5 έως 7 χρόνια) εκθέσεις αξιολόγησης (Assessment Reports) και ειδικές εκθέσεις (Special Reports) οι οποίες αναλύουν τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά που αφορούν την κλιματική αλλαγή. Η πρώτη έκθεση αξιολόγησης κυκλοφόρησε το 1990 και έκτοτε έχουν ακολουθήσει τέσσερις (4) ακόμα, κατά τα έτη 1995, 2001, 2007 και 2014 και πλειάδα ειδικών εκθέσεων (πχ 2012 και 2013), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 2-9. Η επόμενη έκθεση προβλέπεται να εκδοθεί το 2022, όμως το 2019, και πιο πρόσφατα τον Αύγουστο του 2021, δημοσιεύτηκαν δύο ακόμα ειδικές εκθέσεις, σχετικά με στοιχεία που αφορούν τους ωκεανούς και την κρούσφαιρα και τη βάση της φυσικής επιστήμης, αντίστοιχα.



Εικόνα 2-9: Ημερομηνίες κατά τις οποίες έχει εκδώσει τεύχη η Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος

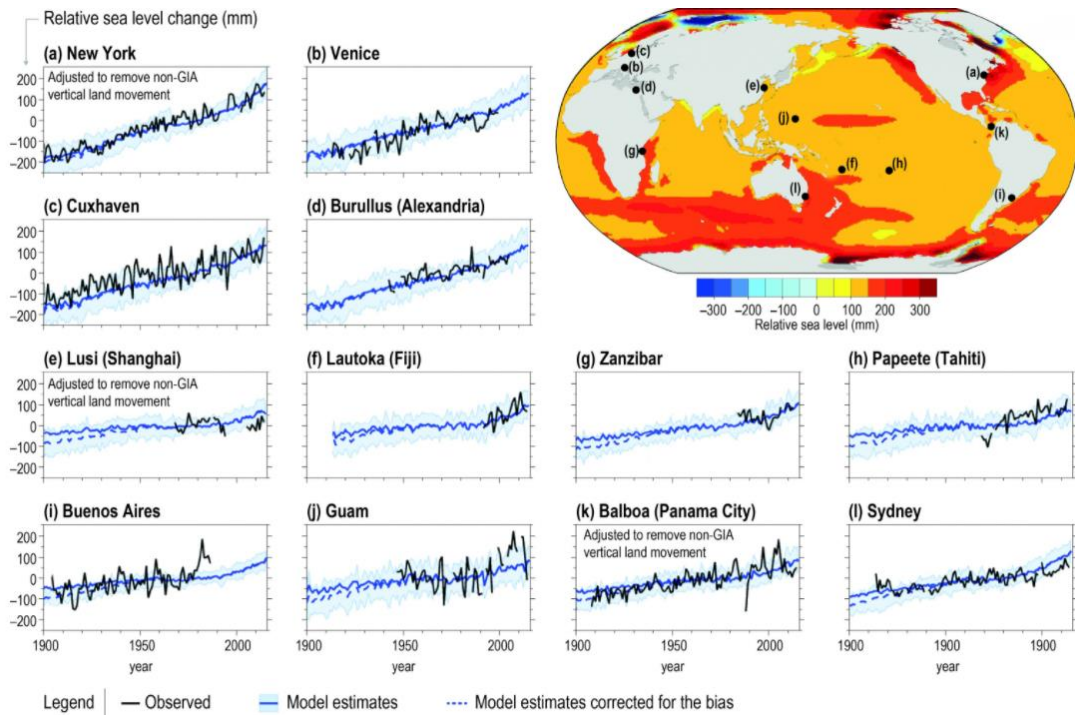
Από την ειδική έκθεση του 2019 (IPCC Report, 2019) έχουν συλλεχθεί τα στοιχεία που ακολουθούν, σύμφωνα με τα οποία το ύψος της μέσης στάθμης της θάλασσας, τα τελευταία χρόνια αυξάνει συνεχώς όπως και η συχνότητα των ακραίων κυματικών γεγονότων. Στα επόμενα δύο υποκεφάλαια αναλύονται η μεταβολή της θαλάσσιας στάθμης και του κυματικού κλίματος λόγω της κλιματικής αλλαγής.

2.2.1. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΘΑΜΗ

Η μέση στάθμη της θάλασσας φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την κλιματική αλλαγή παρατηρώντας τα ακόλουθα διαγράμματα και το χάρτη που τα συνοδεύει (Εικόνα 2-10), όπου αποτυπώνεται η καταγεγραμμένη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας για τα έτη 1900 έως 2000. Επί της θαλάσσιας επιφάνειας του παγκόσμιου χάρτη έχει εφαρμοσθεί χρωματική κλίμακα η οποία αποτυπώνει τη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας, με το μπλε χρώμα να αναφέρεται στη μεγαλύτερη μείωση της και το κόκκινο στη μεγαλύτερη αύξηση της. Όπως είναι εμφανές πως στο μεγαλύτερο μέρος του πλανήτη η στάθμη της θάλασσας φαίνεται να ανυψώνεται σημαντικά με την πάροδο των ετών. Ελάχιστες περιοχές παρουσιάζουν μείωση της στάθμης (μπλε αποχρώσεις), ενώ ένα μεγάλο ποσοστό εμφανίζει σημαντική αύξηση της θαλάσσιας στάθμης (κόκκινες αποχρώσεις).

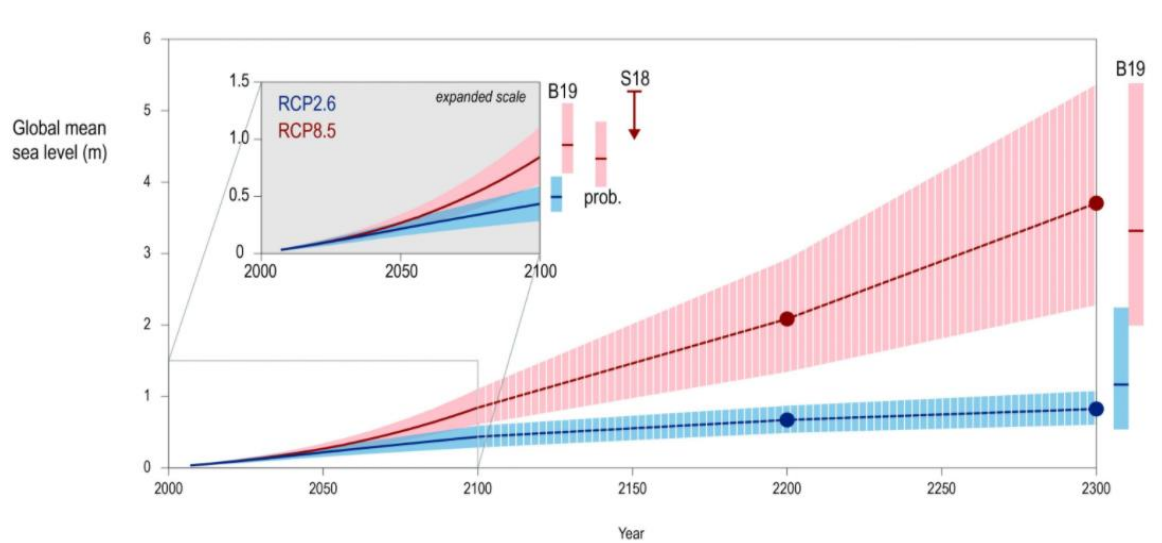
Επιπλέον τα διαγράμματα που συνοδεύουν το χάρτη παρουσιάζουν την διακύμανση της στάθμης της θάλασσας σε συγκεκριμένες θέσεις οι οποίες επισημαίνονται στο χάρτη με τα ανάλογα γράμματα (a -l). Στα διαγράμματα, με μαύρο χρώμα υποδηλώνονται οι μετρήσεις που έχουν καταγραφεί και με γαλάζιο η συνολική μεταβολή της στάθμης της θάλασσας σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του φαινομένου. Η αυξητική πορεία της θαλάσσιας στάθμης παρατηρείται σε όλες τις περιοχές που εξετάζονται.

Εντός της Μεσογείου μετρήσεις πάρθηκαν από τις περιοχές της Βενετίας (b) και της Αλεξάνδρειας (d), στις οποίες η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, μεταξύ των ετών 1900 και 200, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις που προέκυψαν, είναι της τάξεως των 300mm.

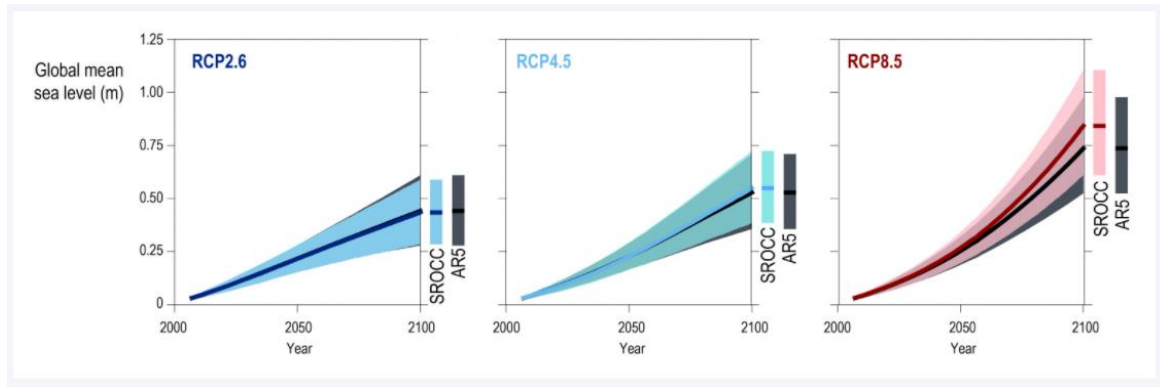


Εικόνα 2-10: Μεταβολή της στάθμης της θάλασσας, ανά τον κόσμο, για τα έτη 1900 έως και 2000 (IPCC Report, 2019)

Από την συγκεκριμένη έκθεση της Επιτροπής (IPCC Report, 2019), αλιεύθηκαν επίσης και στοιχεία προβλέψεων, έως το έτος 2100. Σύμφωνα με τα δεδομένα αυτά, η ανοδική πορεία της στάθμης της θάλασσάς προβλέπεται να συνεχισθεί σύμφωνα με όλα τα σενάρια κλιματικής αλλαγής, ακόμα και με την επιλογή του πιο αισιόδοξου σεναρίου RCP2.6 (Εικόνα 2-11). Επιλέγοντας το δυσμενέστερο σενάριο, προκύπτει μέση αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά περίπου μισό μέτρο, έως το έτος 2100, πάνω από δύο μέτρα έως το έτος 2200 και πάνω από τρία μέτρα έως το έτος 2300.



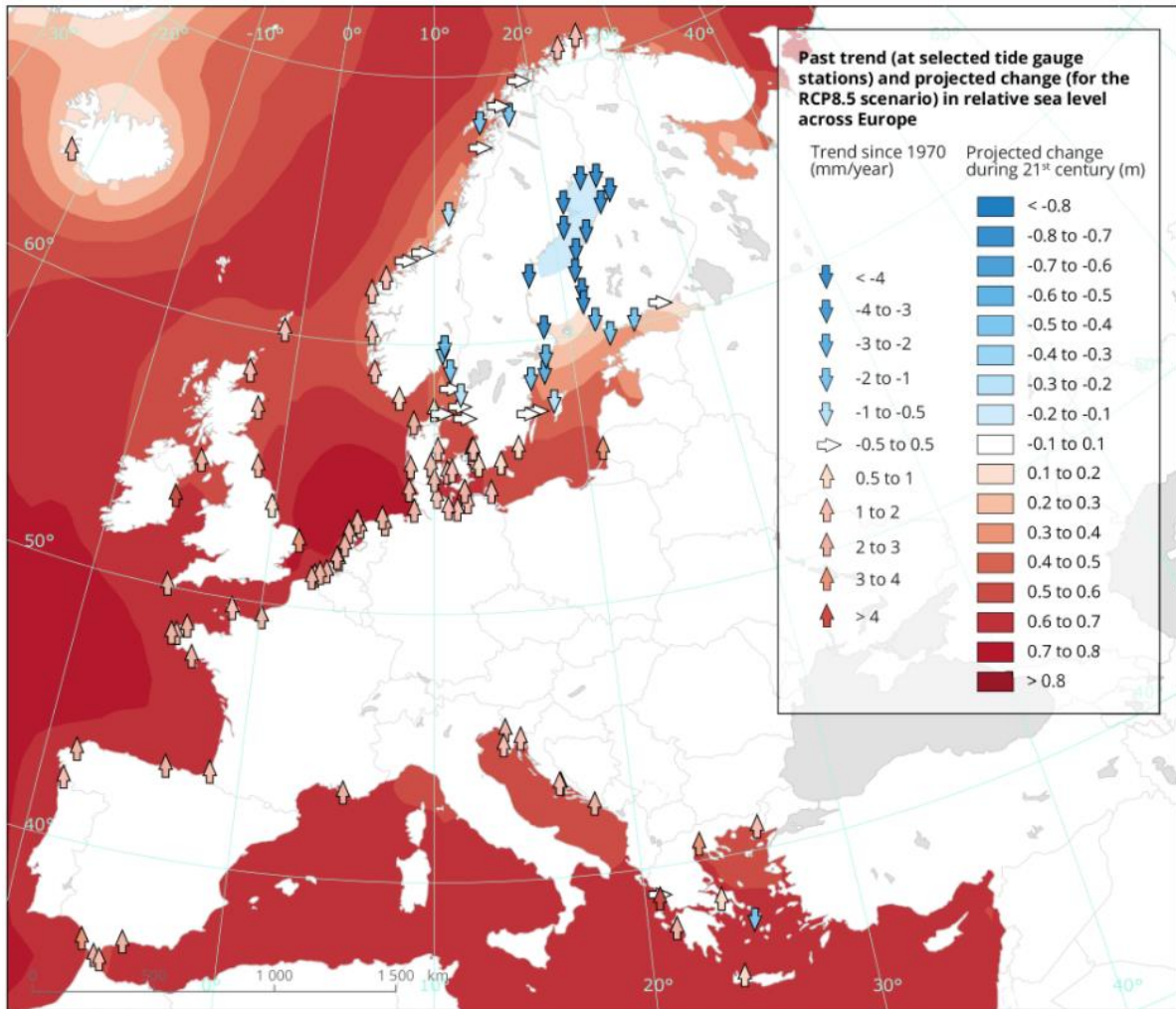
Εικόνα 2-11: Διαγράμματα πρόβλεψης της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για τα έτη 2000 έως και 2300 (IPCC Report, 2019)



Εικόνα 2-12: Διαγράμματα πρόβλεψης της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για τα έτη 2000 έως και 2100 (IPCC Report, 2019)

Τέλος, βάσει του ακόλουθου χάρτη, όπου απεικονίζονται οι Ευρωπαϊκές θάλασσες και ακτές (Εικόνα 2-13), ο οποίος παρουσιάζει (με χρωματιστά βέλη) την τάση μεταβολής της στάθμης της θάλασσας στην Ευρώπη από το έτος 1970 σύμφωνα με μετρήσεις παλιρροιογράφων και ταυτόχρονα απεικονίζει την πρόβλεψη για άνοδο της θαλάσσιας στάθμης, για το δυσμενέστερο σενάριο κλιματικής αλλαγής (RCP 8.5), επιβεβαιώνεται η ανωτέρω παρατήρηση, πως η στάθμη της θάλασσας παρουσιάζει έντονη ανοδική τάση.

Η θαλάσσια περιοχή της Ελλάδας, σύμφωνα με το χάρτη, εντάσσεται στις περιοχές στις οποίες η στάθμη θα ανυψωθεί κατά περίπου 0.4 έως 0.6 μέτρα, με τη νότια Ελλάδα να παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές.



Εικόνα 2-13: Χάρτης μεταβολής της θαλάσσιας στάθμης στην Ευρώπη (IPCC Report, 2019)

2.2.2. ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ

Η κλιματική αλλαγή, σύμφωνα με την έκθεση της Επιτροπής (IPCC, 2019), φαίνεται να επηρεάζει και το κυματικό κλίμα τόσο σε παγκόσμιο όσο και σε τοπικό επίπεδο και συγκεκριμένα την εμφάνιση ακραίων κυματικών γεγονότων.

Σύμφωνα με τα στοιχεία που συλλέχθηκαν, όσον αφορά την περιοχή της Μεσόγειου, στην οποία βρίσκεται η περιοχή διερεύνησης, ισχύουν τα εξής:

- το ετήσιο και το εποχιακό μέσο ύψος κύματος, προβλέπεται να μειωθεί στην περιοχή της Μεσογείου θάλασσας,
- το μελλοντικό ακραίο ύψος κύματος προβλέπεται να μειωθεί και τέλος
- ο αριθμός των υπερτροπικών κυκλώνων προβλέπεται επίσης, να μειωθεί στην περιοχή της Μεσογείου θάλασσας.

2.3. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Η ταχεία αστικοποίηση των παράκτιων περιοχών σε συνδυασμό με την κλιματική αλλαγή, τις συχνά ανεπαρκείς υποδομές, αλλά και την κακή διαχείριση των αρχών διοίκησης, οδηγούν στην αύξηση των κινδύνων πλημμύρας για τις παράκτιες κοινότητες. Επιπλέον, σε πολλές περιοχές, η ευαλωτότητα στις πλημμύρες έχει αυξηθεί λόγω της παράκτιας διάβρωσης. Οι προσπίπτοντες κυματισμοί μέσω των φαινομένων της αναρρίχησης και της υπερπήδησης σε συνδυασμό με τη γεωμορφολογία της παράκτιας περιοχής και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, κατακλύζουν όλο και συχνότερα και βιαιότερα τις παράκτιες περιοχές. Μερικά παραδείγματα από παράκτιες πλημμύρες και τα αποτελέσματα αυτών παρατίθενται ακολούθως.

- **Norfolk coast, UK – 2013**

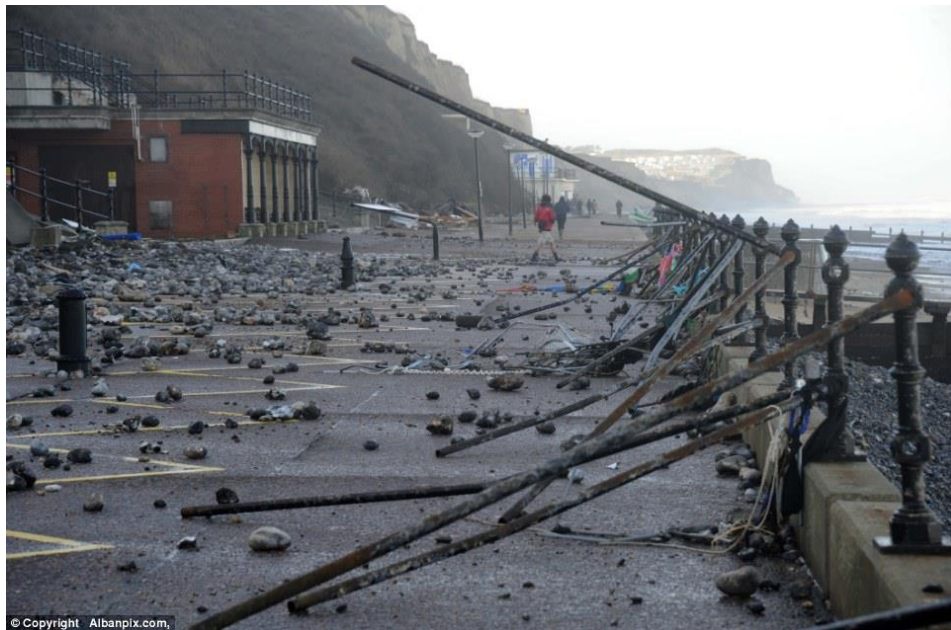
Στις 5 Δεκεμβρίου 2013, οι ανατολικές ακτές της Northfolk, βάλλονται από τη μεγαλύτερη καταιγίδα η οποία έχει καταγραφεί στο Ηνωμένο Βασίλειο τα τελευταία 60 χρόνια (από το 1953). Η καταιγίδα διήρκεσε μέχρι τις 7 Δεκεμβρίου 2013 και προκάλεσε πολύ σοβαρές καταστροφές στην περιοχή, οδηγώντας σε δραματικές περιβαλλοντικές και οικονομικές συνέπειες. Ενδεικτικά, επτά κατοικίες στην περιοχή Hemsby, κατέρρευσαν και βρέθηκαν στη θάλασσα και περίπου 1400 σπίτια συνολικά πλημμύρησαν στις ανατολικές ακτές της Αγγλίας.



Εικόνα 2-14: Hemsby, on the Norfolk coast, UK (05.12.2013). «Επτά κατοικίες πλησίον της ακτής κατέρρευσαν της νύχτα της μεγάλης κακοκαιρίας» [Πηγή: www.bbc.com]



Εικόνα 2-15: Cromer, on the Norfolk coast, UK (06.12.2013). «Τα κύματα χτυπούν τον παραλιακό δρόμο και τον προβλήτα στο Cromer, Norfolk το βράδυ της μεγάλης κακοκαιρίας» [Πηγή: <https://www.dailymail.co.uk>]



Εικόνα 2-16: Cromer, on the Norfolk coast, UK (06.12.2013). «Στιγμιότυπα από την επομένη μέρα από το πέρασμα της κακοκαιρίας» [Πηγή: <https://www.dailymail.co.uk>]

- **Tybee Island, GA, United States - 2016**

Το νησί Tybee, στις εκβολές του ποταμού Σαβάνα, αποτελεί ένα από τα χαρακτηριστικότερα παραδείγματα περιοχών που επηρεάζονται από της αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Στην περιοχή, πλέον, παρατηρείται αύξηση της συχνότητας εμφάνισης πλημμυρών σε περίπου 10 φορές το χρόνο σε σχέση με την συχνότητα των μόλις πέντε ή λιγότερων γεγονότων το χρόνο πριν από 40 χρόνια. Το νησί εξυπηρετείται από έναν ενιαίο αυτοκινητόδρομο, ο οποίος έχει γίνει ιδιαίτερα

επιρρεπής σε παλιρροιακές πλημμύρες κατά τη διάρκεια της πανσελήνου ή της νέας σελήνης. Οι συνθήκες είναι χειρότερες κατά τη διάρκεια των υψηλότερων παλιρροιών της άνοιξης, οι οποίες συμβαίνουν δύο φορές το μήνα όταν ο ήλιος, η σελήνη και η Γη ευθυγραμμίζονται. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένα μεγάλο τμήμα των υποδομών της περιοχής βρίσκεται προσωρινά κάτω από τη στάθμη του νερού, αποκόπτοντας την πόλη από την ηπειρωτική χώρα και δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα στις μετακινήσεις των κατοίκων της περιοχής. Εικόνες από την εξέλιξη αντίστοιχων πλημμυρικών φαινομένων κατά το έτος 2016 παρατίθενται ακολούθως.



Εικόνα 2-17: Tybee Island, GA, United States (18.06.2016). «Πλημμύρες σε αστική περιοχή λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας» [Πηγή: <https://seagrant.noaa.gov>]



Εικόνα 2-18: Tybee Island, GA, United States (03.09.2016). «Παράκτια πλημμύρα καλύπτει τον μοναδικό δρόμο που συνδέει την πόλη με την ηπειρωτική χώρα» [Πηγή: www.nytimes.com]

- **Καλαμάτα, Ελλάδα – 2018**

Το Σεπτέμβριο του 2018, ο κυκλώνας «Ζορμπάς» σάρωσε κυριολεκτικά την πόλη της Καλαμάτας και προκάλεσε ένα εντονότατο φαινόμενο παράκτιας πλημμύρας στην ακτογραμμή της Μεσσηνίας.

Σημαντικές καταστροφές προκλήθηκαν σε ιδιωτικές και δημόσιες περιουσίες που βρίσκονταν κοντά στην παράκτια ζώνη καθώς λόγω των ακραίων κυματικών συνθηκών το νερό κάλυψε τον παραλιακό δρόμο, παρασύροντας στο πέρασμά του τραπεζοκαθίσματα και ομπρέλες των καταστημάτων πλησίον της ακτής. Οκτώ σκάφη τα οποία ήταν προσδεμένα στη μαρίνα Καλαμάτας βυθίστηκαν και σε πολλά ακόμα προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές. Οι εικόνες που ακολουθούν αποτυπώνουν την κατάσταση που δημιουργήθηκε με το πέρασμα της κακοκαιρίας.



Εικόνα 2-19: Περιοχή Καλαμάτας (01.10.2018). «Το νερό κάλυψε την παραλιακή οδό Ναυαρίνου λόγω του μεσογειακού κυκλώνα» [Πηγή: www.messinialive.gr]



Εικόνα 2-20: Περιοχή Καλαμάτας (01.10.2018). «Βυθίσεις σκαφών στη μαρίνα Καλαμάτας από τον μεσογειακό κυκλώνα» [Πηγή: <https://city.sigmalive.com>]



Εικόνα 2-21: Περιοχή Καλαμάτας (29.09.2018). «Το νερό κάλυψε την παραλιακή οδό Ναυαρίνου λόγω του μεσογειακού κυκλώνα» [Πηγή: www.messinialive.gr]

- **Ρίο, Ελλάδα - 2020**

Το Σεπτέμβριο του 2020, ο μεσογειακός κυκλώνας «Ιανός» έπληξε ένας μεγάλο μέρος της χώρας. Μία από της περιοχές στην οποία, λόγω του φαινομένου, προκλήθηκε παράκτια πλημμύρα ήταν και η περιοχή του Ρίου όπου η στάθμη του νερού ανέβηκε τόσο ώστε να καλύψει τον παραλιακό δρόμο και να εισχωρήσει σε κατοικίες και καταστήματα τα οποία βρίσκονταν κοντά στην ακτογραμμή. Ο απολογισμός του φαινομένου ήταν και σε αυτή την περίπτωση, πολυάριθμες υλικές ζημιές στα παραλιακά καταστήματα και σε υποδομές αλλά και διακοπής της κυκλοφορίας στις οδούς όπου είχε κατακλύσει το νερό.



Εικόνα 2-22: Περιοχή Ρίου (18.09.2020). «Καταστροφές σε δημόσιες και ιδιωτικές ιδιοκτησίες» [Πηγή: <https://www.thetoc.gr>]



Εικόνα 2-23: Περιοχή Ρίου (18.09.2020). «Το νερό κάλυψε την παραλιακή οδό του Ρίου και προκάλεσε καταστροφές στα παραλιακά μαγαζιά» [Πηγή: <https://www.thetoc.gr>]

3. ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. ΣΥΝΑΦΕΙΣ ΕΡΕΥΝΕΣ

Έρευνες των τελευταίων ετών έχουν συμβάλει σημαντικά στην κατανόηση των παράκτιων πλημμυρών και των φαινομένων που οδηγούν σε αυτές και συγκεκριμένα στην κατανόηση σύνθετων φαινομένων (μετεωρολογική παλίρροια και κυματισμοί) (IPCC, 2012) στη μαθηματική προσομοίωση της διάδοσης των κυματισμών, στην παράκτια υδραυλική και στην κίνηση των πλημμυρικών υδάτων στο χερσαίο περιβάλλον.

Οι Petroliaqkis at al. (2016) διερεύνησαν τη δυνατότητα χρήσης συνδυασμένων μεθόδων πιθανοτήτων για τον υπολογισμό των στοιχείων επικινδυνότητας των παράκτιων πλημμυρών, εστιάζοντας στην ανάπτυξη της βέλτιστης μεθοδολογίας για την εκτίμηση της πιθανότητας ταυτόχρονης εμφάνισης γεγονότων παράκτιων και ποταμών πλημμυρών. Η ανάλυση εφαρμόστηκε σε 32 απολήξεις ποταμών, οι οποίες επιλέχθηκαν με στόχο την κάλυψη μίας μεγάλης ποικιλίας μορφών του παράκτιου περιβάλλοντος στην Ευρώπη. Η μεθοδολογία που αφορά στην προσομοίωση των δεδομένων των παρατηρήσεων, λόγω έλλειψης μακροπρόθεσμων μετρήσεων, προσαρμόστηκε σύμφωνα με προβλέψεις του παρελθόντος για την μετεωρολογική παλίρροια, το ύψος κύματος και την παροχή. Η αναμενόμενη μετεωρολογική παλίρροια προσομοιώθηκε αξιοποιώντας το υδροδυναμικό μοντέλο Delft3D-Flow το οποίο τροφοδοτήθηκε από επεξεργασμένα στοιχεία ανέμου και πίεσης τα οποία συλλέχθηκαν από την ανάλυση ECMWF ERA-Interim (Dee, et al., 2011). Με παρόμοιο τρόπο προσομοιώθηκαν και οι προβλέψεις του κυματικού κλίματος του παρελθόντος, χρησιμοποιώντας την τελευταία έκδοση του ECMWF ανεξάρτητου κυματικού μοντέλου ECWAM (BidlotBOGAR et al., 2006; Bidlot, 2012; ECMWF, 2015), με κυματικά δεδομένα από το ERA-Interim. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά που προέκυψαν, βρέθηκε από μέτρια έως μεγάλη εξάρτηση μεταξύ μετεωρολογικής παλίρροιας και κυμάτων για τις περισσότερες από τις ευρωπαϊκές θαλάσσιες περιοχές οι οποίες διερευνήθηκαν για αντίστοιχα συνδυαστικά φαινόμενα τα οποία λάμβαναν χώρα την ίδια ημέρα (κατάσταση μηδενικής καθυστέρησης). Όσον αφορά τη σχέση μεταξύ μετεωρολογικής παλίρροιας και παροχής ποταμών, παρατηρήθηκε επίσης μέτρια έως μεγάλη εξάρτηση μεταξύ τους, όμως όχι για την κατάσταση της μηδενικής καθυστέρησης. Αντίθετα, το συμπέρασμα που προέκυψε είναι πως θα πρέπει να παρέλθει ένα σημαντικό χρονικό διάστημα μερικών ημερών με τη μετεωρολογική παλίρροια σαφώς να οδηγεί σε κυματική διεύθυνση. Τέλος, στην περίπτωση της παροχής κυμάτων και ποταμών, βρέθηκε πολύ μεγάλη συσχέτιση, αλλά για άλλη μια φορά κυρίως σε μη μηδενική καθυστέρηση, γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη σημαντικού χρονικού διαστήματος υστέρησης για να φτάσει η εξάρτηση σε τέτοιες τιμές με το κύμα να οδηγεί σαφώς σε κυματική διεύθυνση.

Οι Gallien at al. (2014), μέσω της επί τόπου παρατήρησης των πλημμυρικών φαινομένων, αξιολόγησαν την ακρίβεια δύο μοντέλων πρόβλεψης αστικών πλημμυρών. Το πρώτο, εκ των δύο μοντέλων, το αναφερόμενο και ως στατικό, συγκρίνει το ύψος στάθμη του νερού σε σχέση με τη χερσαία στάθμη, ενώ το δεύτερο, και πιο εξελιγμένο, βασίζεται σε ένα υδροδυναμικό μοντέλο το οποίο χρησιμοποιεί χρονικά εξαρτημένες τιμές της υπερπήδησης και υπολογίζει τη χερσαία ροή. Η χρονικά εξαρτώμενες τιμές της υπερπήδησης εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας παραμετροποιημένα εμπειρικά μοντέλα με δεδομένα ερευνών και τοπικά ύψη κύματος τα οποία μεταφέρθηκαν στα «ρηχά» μέσω του του μοντέλου Simulating Waves Nearshore (SWAN) και εισήχθησαν στο υδροδυναμικό μοντέλο. Τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου προέκυψαν κοντά στις παρατηρήσεις πεδίου, ενώ το στατικό μοντέλο υπερεκτίμησε τα πλημμυρικά φαινόμενα, δείχνοντας ότι η παράκτια αστική πλημμυρική στάθμη δεν ισοσταθμίζεται με την στάθμη των υδάτων στην ακτή κατά τη διάρκεια παροδικών γεγονότων.

Οι Barnard et al. (2014) ανέπτυξαν το Σύστημα Μοντελοποίησης Παράκτιας Καταιγίδας (Coastal Storm Modeling System - CoSMoS) με στόχο την πρόβλεψη του αντίκτυπου των καταιγίδων στις ακτές, τη λεπτομερή πρόβλεψη των παράκτιων πλημμυρών οι οποίες προκαλούνται από τις καταιγίδες, και της διάβρωσης των ακτών και των κατακρημνίσεων βραχωδών σχηματισμών, σε επίπεδο μεγάλης κλίμακας (εκατοντάδες χιλιόμετρα). Το CoSMoS εφαρμόζεται σε μελέτες προβλέψεων του παρελθόντος, σε λειτουργικές εφαρμογές αλλά και σε μελλοντικά κλιματικά σενάρια και αναπτύχθηκε για να παρέχει πληροφορίες σχετικά με επερχόμενες επικίνδυνες καταιγίδες στους ανταποκριτές έκτακτης ανάγκης και σε μελετητές της παράκτιας ζώνης με απώτερο στόχο την αναβάθμιση της δημόσιας ασφάλειας, τον μετριασμό των ατυχημάτων και την αποτελεσματική διαχείριση της κατανομής των πόρων σε αντίστοιχα ζητήματα. Το πρωτότυπο αυτό σύστημα, το οποίο αναπτύχθηκε για τις ακτές της Καλιφόρνιας, χρησιμοποιεί το παγκόσμιο κυματικό μοντέλο WAVEWATCH III, το δορυφορικά βασισμένο παγκόσμιο μοντέλο παλίρροιας TOPEX/Poseidon, ατμοσφαιρικά δεδομένα από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία των ΗΠΑ για (λειτουργικές προβλέψεις) και ατμοσφαιρικά δεδομένα από τα Παγκόσμια Κλιματικά Μοντέλα (για μελλοντικές προγνώσεις), για τον προσδιορισμό των περιφερειακών κυματικά ορίων και επιπέδων τη στάθμης της θάλασσας. Αυτές οι φυσικές διαδικασίες, χρησιμοποιώντας μια σειρά ένθετων μοντέλων Delft3D-WAVE (SWAN) και Delft3D-FLOW (FLOW) και με τα μοντέλα τομών της ακτής XBeach (eXtreme Beach) και ένα μπεύζιανό πιθανολογικό μοντέλο κατακρήμνισης, υπολογίστηκαν καθώς προσεγγίζουν την ακτή. Το συμπέρασμα που προέκυψε από τις δοκιμές σε προβλέψεις του παρελθόντος καταδεικνύει ότι, παρά την όχι και τόσο σαφή εικόνα όσον αφορά την προϋπάρχουσα μορφολογία της παραλίας σε απόσταση 500 χιλιομέτρων από την περιοχή της που μελετήθηκε πιλοτικά, το CoSMoS εντόπισε αποτελεσματικά τα διακριτά τμήματα της ακτής που ήταν ευάλωτά σε παράκτιες πλημμύρες βάσει μιας σειράς από σημερινά και μελλοντικά ωκεανογραφικά στοιχεία εισόδου, κάνοντάς το ένα αποτελεσματικό εργαλείο για το σχεδιασμό λειτουργικών και μελλοντικών κλιματικών σεναρίων.

Οι Gad et al. (2020) αξιολόγησαν το δείκτη ευπάθειας πλημμύρας (Mendoza & Jiménez, 2015) παράκτιων περιοχών λόγω καταιγίδων, όπου τα γεγονότα καταιγίδων ορίστηκαν βάσει του σημαντικού ύψους κύματος, της μέγιστης περιόδου και της διάρκειας του κύματος και κατηγοριοποιήθηκαν σε πέντε τάξεις (από τα πιο ήπια στα πιο ισχυρά) που αντικατοπτρίζουν την ένταση του κάθε γεγονότος. Στη συνέχεια, ο κίνδυνος πλημμύρας εκτιμήθηκε χρησιμοποιώντας έναν εμπειρικό τύπο για τον υπολογισμό της κυματικής αναρρίχησης σε διασταυρούμενα προφίλ και δεδομένα μετεωρολογικής παλίρροιας στην περιοχή. Τέλος, ένας δείκτης ευπάθειας πλημμύρας (FVI - Flood Vulnerability Index) χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της ευπάθειας σύμφωνα με μια κλίμακα από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή. Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκε ως περιοχή διερεύνησης το νησί της Ρόδου στην Ελλάδα. Οι πιο έντονες καταιγίδες εντοπίστηκαν στο ανατολικό, νοτιοανατολικό και νότιο τμήμα του νησιού. Περισσότερο από το 60% των καταιγίδων χαρακτηρίστηκαν ως ασθενής, ενώ ακραία γεγονότα υπολογίστηκε ότι λαμβάνουν χώρα με συχνότητα μικρότερη από 2,5%. Τέλος, όσον αφορά τον κίνδυνο πλημμύρας και την ευπάθεια, οι μέγιστες τιμές αναρρίχησης κυμάτων εντοπίστηκαν στη νοτιοανατολική περιοχή του νησιού και το πιο ευάλωτο τμήμα κρίθηκε ότι είναι το βορειοδυτικό, καθώς ο δείκτης FVI εκτιμήθηκε ως πολύ υψηλός για ασθενή και ακραία γεγονότα. Αυτή η μεθοδολογία παρέχει μια προσέγγιση ποσοτικοποίησης της ευαισθησίας έναντι των πλημμυρών σε περιφερειακή κλίμακα μέσω της χαρτογράφησης παράκτιων περιοχών με πολύ υψηλή ευαισθησία. Ο δείκτης FVI μπορεί να εφαρμοστεί σε τοπική χωρική κλίμακα σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί από υψηλή έως πολύ υψηλή ευαισθησία. Ωστόσο, μια τέτοια εφαρμογή απαιτεί πιο λεπτομερή δεδομένα (π.χ., από τοπογραφικές και βαθυμετρικές έρευνες).

Οι Doong et al. (2012) ανέπτυξαν ένα λειτουργικό σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης κινδύνου παράκτιας πλημμύρας ((CoFEWs - Coastal Flooding Early Warning System) χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα τεχνολογία παρακολούθησης της θαλάσσιας κατάστασης, τα αριθμητικά μοντέλα πρόβλεψης για τους ωκεανούς, ιστορικές βάσεις δεδομένων και εμπειρικά δεδομένα, καθώς και την επιστήμη των υπολογιστών. Το προτεινόμενο σύστημα έχει τη δυνατότητα να παρέχει δεδομένα για το παρελθόν, πληροφορίες για το παρόν και το μέλλον. Το σύστημα αναπτύχθηκε για τις ακτές της Ταϊβάν λόγω των συχνών εμφανίσεων τυφώνων. Η έρευνα αφορά ένα σύστημα χωρίς καμία χειροκίνητη ενέργεια, το οποίο ενσωματώνει πηγές δεδομένων. Τα θαλάσσια αριθμητικά μοντέλα παίζουν σημαντικό ρόλο στο σύστημα επειδή παρέχουν δεδομένα για την αξιολόγηση πιθανών πλημμυρών. Το κυματικό μοντέλο SWAN που έχει ενσωματωθεί με το μοντέλο κυμάτων μεγάλου τομέα (NWW III) έχει δημιουργηθεί για την πρόβλεψη του παράκτιου κυματικού κλίματος, επιπλέον της μετεωρολογικής παλίνροιας η οποίας υπολογίζεται από ένα μοντέλο POM. Στο σύστημα έχει ενσωματωθεί επίσης τεχνολογία αφομοίωσης δεδομένων για μεγαλύτερη ακρίβεια. Όσον αφορά τη λειτουργία του, ένα προειδοποιητικό σήμα εμφανίζεται όταν η στάθμη του νερού της καταϊγίδας ξεπεράσει το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας που έχει ορισθεί ως όριο συναγερμού. Το συγκεκριμένο σύστημα προειδοποίησης χρησιμοποιείται εδώ και χρόνια από τις παράκτιες περιοχές στην Ταϊβάν για τον μετριάσμο των πλημμυρών.

Οι Kleermaeker et al. (2012) έδωσαν μια επισκόπηση των πολλών αναπτύξεων που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός ακριβούς και αξιόπιστου συστήματος πρόβλεψης, μέσω της ανάλυσης του συστήματος πρόβλεψης που εφαρμόζεται στα θαλάσσια ύδατα της Βόρειας Θάλασσας και συγκεκριμένα της Ολλανδίας από τη 1^η Σεπτεμβρίου του 2012. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι πως για να προκύψει μία πρόβλεψη μέσω ενός λειτουργικού περιβάλλοντος απαιτούνται μοντέλα τελευταίας τεχνολογίας. Ολόκληρη η διαδικασία, από την εισαγωγή και τον ποιοτικό έλεγχο των παρατηρήσεων, μέσω της λειτουργίας των μοντέλων και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων μέχρι τη διανομή των τελικών προειδοποιήσεων πρέπει να λειτουργεί σωστά. Ο πιο αδύναμος κρίκος σε αυτήν την αλυσίδα ενεργειών καθορίζει τη δύναμη του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης. Επομένως, το λειτουργικό σύστημα θα πρέπει να κριθεί συνολικά, λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια και την αξιοπιστία.

Οι Bogaard et al. (2016) παρουσίασαν ένα μοντέλο έγκαιρης προειδοποίησης κινδύνου που δημιουργεί κυματικά και υδροδυναμικά μοντέλα με σκοπό την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με συνθήκες κοντά στην ακτή και ένα πρόσθετο μοντέλο για εξαγωγή φυσικών επιδράσεων στην ακτή, όπως η κυματική αναρρίχηση. Τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου εισάγονται σε ένα σύστημα λήψης αποφάσεων, βασισμένο σε δίκτυο Bayesian, με στόχο τη σύνδεση των παράκτιων κινδύνων με τις κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές τους συνέπειες. Το πρόγραμμα ονομάστηκε RISC-KIT και έχει ως στόχο να ενισχύσει τη δύναμη και την εφαρμογή των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης και υποστήριξης (EWS - Early Warning Systems, DSS - Decision Support Systems). Το βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Delft-FEWS, ένα γενικό εργαλείο για συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές σε όλη την Ευρώπη. Το Delft-FEWS παρέχει ένα υπερσύγχρονο πλαίσιο EWS, μπορεί να προσαρμόζεται στις συγκεκριμένες απαιτήσεις κάθε ξεχωριστού αντικειμένου έρευνας. Έχει αναπτυχθεί σε δέκα περιοχές στις ευρωπαϊκές θάλασσες, για την παροχή προβλέψεων και βραχυπρόθεσμων προειδοποιήσεων σε πραγματικό χρόνο. Μια σημαντική καινοτομία του συστήματος έγκειται στην εφαρμογή διπλής λειτουργίας: ως σύστημα πρόβλεψης και προειδοποίησης και ως εργαλείο, εκ των προτέρων σχεδιασμού, για την αξιολόγηση της μακροπρόθεσμης τρωτότητας λόγω πολλαπλών (χαμηλής συχνότητας) παράκτιων κινδύνων, για διάφορα κλιματικά σενάρια.

Οι Dreier και Fröhle (2016) ανέπτυξαν ένα λειτουργικό σύστημα παρόντος – μέλλοντος, τα οποίο αποτελείται από διαθέσιμες μετρήσεις πεδίου, δεδομένα από αριθμητικές προσομοιώσεις κυματικών συνθηκών και μια εμπειρική προσέγγιση αναρρίχησης, το οποίο εφαρμόστηκε στην περιοχή German Bight. Το σύστημα συνδυάζει αριθμητικά αποτελέσματα από το μοντέλο φασματικών κυμάτων (SWAN) και μια εμπειρική προσέγγιση υπερπήδησης κύματος (EurOtop) για το τρέχον ύψος κύματος τις μελλοντικές προβλέψεις και εφαρμόζεται σε θαλάσσιο έργο προστασίας στο νησί της North Frisian Pellworm. Η εγκυρότητά του επιβεβαιώθηκε με την πρόβλεψη ενός ισχυρού φαινομένου καταιγίδας το Δεκέμβριο του 2013. Η ποιότητα των προβλέψεων εκτιμήθηκε ξεχωριστά για τις κυματικές συνθήκες στα «ρηχά» και για το μέσο ύψος κυματικής αναρρίχησης με βάσει τις διαθέσιμες μετρήσεις.

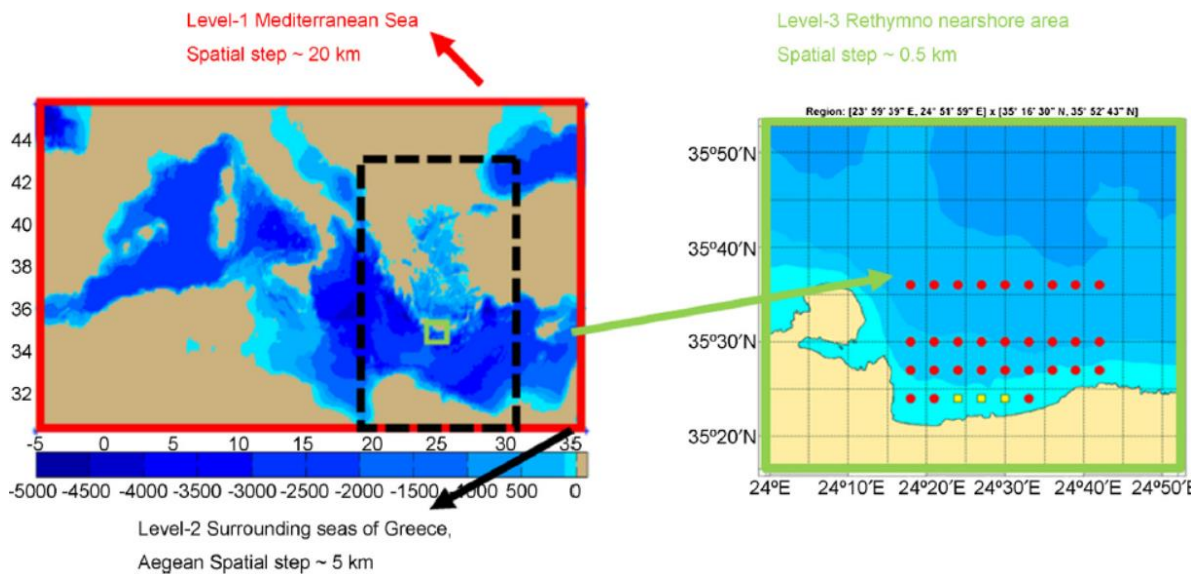
Οι Winter et al. (2020) παρουσίασαν τα βήματα για την ανάπτυξη ενός συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης κινδύνου πλημμύρας προκαλούμενης από κύματα καταιγίδων κατά μήκος των ακτών των κοραλλιογενών υφάλων, παρέχοντας μια ανασκόπηση των μεθόδων που μπορούν να ενσωματωθούν σε τέτοια συστήματα. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη έρευνα, τα εργαλεία ενός τέτοιου συστήματος, θα πρέπει να είναι σε θέση να προβλέψουν την τοπική στάθμη της θάλασσας, τα κύματα στα «βαθιά», καθώς και τον μετασχηματισμό τους κοντά στους υφάλους και να μεταφράσουν αυτές τις πληροφορίες στα χερσαία επίπεδα πλημμυρών. Επιπλέον, για την πρόγνωση μελλοντικών σεναρίων απαιτούνται μακροπρόθεσμες προβολές ανάπτυξης των κοραλλιογενών υφάλων, σύνθεση υφάλων και αλλαγή της ακτογραμμής.

Οι Merrifield et al. (2021) ανέπτυξαν ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης κινδύνου για πλημμύρες που προέρχονται από κύματα, χρησιμοποιώντας δεδομένα παρατηρήσεων κυματικών και υδροδυναμικών φαινομένων από διαφορετικές περιοχές, ιστορικά στοιχεία ακτών και ένα αριθμητικό μοντέλο αναρρίχησης. Το εν λόγω σύστημα δίνει την τελική στάθμη του νερού, συνδυάζοντας προβλέψεις παλίρροιας και ανωμαλιών στο επίπεδο της θάλασσας και με εκτιμήσεις της κυματικής αναρρίχησης. Το κυματικό μοντέλο SWASH που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο σύστημα, σε αντίθεση με τους ευρέως χρησιμοποιούμενους εμπειρικούς τύπους αναρρίχησης που βασίζονται στο σημαντικό ύψος κύματος και στην περίοδο κορυφής και χρησιμοποιούν μόνο μια κλίση για τη βαθυμετρία, ενσωματώνει φασματικό προσπίπτον κυματισμό και χρησιμοποιεί προφίλ βάθους από διατομές για τη βαθυμετρία. Οι προβλέψεις της τελικής στάθμης της θάλασσας που προκύπτουν με χρήση του μοντέλου SWASH δίνουν αποτελέσματα για ένα διάστημα αρκετών ημερών, από πριν. Μέσο του συστήματος προσδιορίζονται οι ακριβείς κυματικές συνθήκες και η στάθμη της θάλασσας που θα οδηγήσουν σε παράκτια πλημμύρα αλλά και οι βασικοί συντελεστές αβεβαιότητας. Η ικανότητα πρόβλεψης της τελικής θαλάσσιας στάθμης μειώνεται λόγω λαθών στην πρόβλεψη του προσπίπτοντος κυματισμού, στο μοντέλο μονοδιάστατης αναρρίχησης και στην έλλειψη πληροφορίας σχετικά με τη μορφολογία του πυθμένα. Μεγαλύτερα σφάλματα προκύπτουν για τα πιο ακραία γεγονότα. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου συστήματος σε διαφορετικές τοποθεσίες προϋποθέτει πρόβλεψη των κυματικών συνθηκών του παρελθόντος και πρόγνωση των μελλοντικών, αριθμητική προσομοίωση της κυματικής αναρρίχησης η οποία σχετίζεται με τοπικές καταιγίδες και την αντίστοιχη μορφολογία του εδάφους και βαθμονόμηση του μοντέλου μέσω παρατηρήσεων των πλημμυρών.

Η μεθοδολογία που προτείνεται έχει βασιστεί σε προηγούμενη έρευνα των Tsoukala et al. (2016), μέσω της οποίας προτεινόταν μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία η οποία αφορούσε την κυματική υπερπήδηση και αναρρίχηση υπό ακραία κυματικά σενάρια προκαλούμενα από τη μετεωρολογική παλίρροια. Εκμεταλλευόμενοι τα ανεμολογικά δεδομένα του παρελθόντος και τις μελλοντικές κλιματικές προβλέψεις, προτάθηκε μία μέθοδος μείωσης κλίμακας, χρησιμοποιώντας μια σειρά

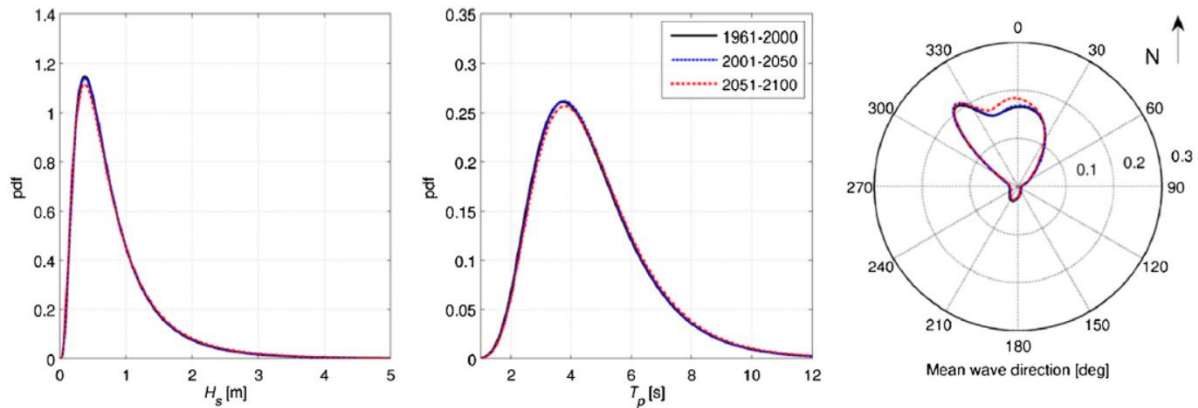
από κατάλληλα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης της κυματικής διάδοσης από τα «βαθιά» έως τη ζώνη θραύσης.

Η περιοχή εφαρμογή της μεθοδολογίας ήταν, όπως και στην περίπτωση της παρούσας διπλωματικής, η παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου για την οποία έγιναν προσομοιώσεις των κυματικών χαρακτηριστικών μέσω του μοντέλου SWAN για την περίοδο 1960 – 2100. Το μοντέλο SWAN χρησιμοποιήθηκε, μέσω ενός σχήματος τριών επιπέδων (Athanasoulis, 2014) το οποίο αναπτύχθηκε στο πλαίσιο το πρόγραμμα Thales CCSEAWAVS (Prinos, 2014), αρχικά για την προσομοίωση των κυματικών χαρακτηριστικών στα «βαθιά» (φάσμα κατεύθυνσης) λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές του κυματικού κλίματος. Τα δεδομένα εισόδου του ανεμολογικού κλίματος τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση SWAN, παράχθηκαν, επίσης, από το πρόγραμμα CCSEAWAVS. Το περιφερειακό ατμοσφαιρικό μοντέλο REMO, το οποίο είναι βασισμένο στο μοντέλο συστήματος Euroamodel/Deutschland (Majewski και Schrodin, 1994), χρησιμοποιήθηκε για να συλλεχθούν στοιχεία υψηλής ανάλυσης όσον αφορά την ατμοσφαιρική πίεση. Η ανάλυση του κλίματος της Μεσογείου και της ελληνικής θαλάσσιας περιοχής και τελικά η εκτίμηση των ατμοσφαιρικών μεταβλητών, πραγματοποιήθηκε μέσω του περιφερειακού μοντέλου RegCM (RegCNET: regional climate network, 2003). Η χωρική ανάλυση που επιλέχθηκε ήταν 25km x 25km και για τα μελλοντικά ατμοσφαιρικά δεδομένα, στο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το AR4-A1B σενάριο. Δεδομένα για την ελληνική θάλασσα έχουν συλλεχθεί, επιπλέον και από τη νέα έκδοση του περιφερειακού μοντέλου RegCM3_10, με χωρική ανάλυση 10 km x 10 km (Velikou, 2014).

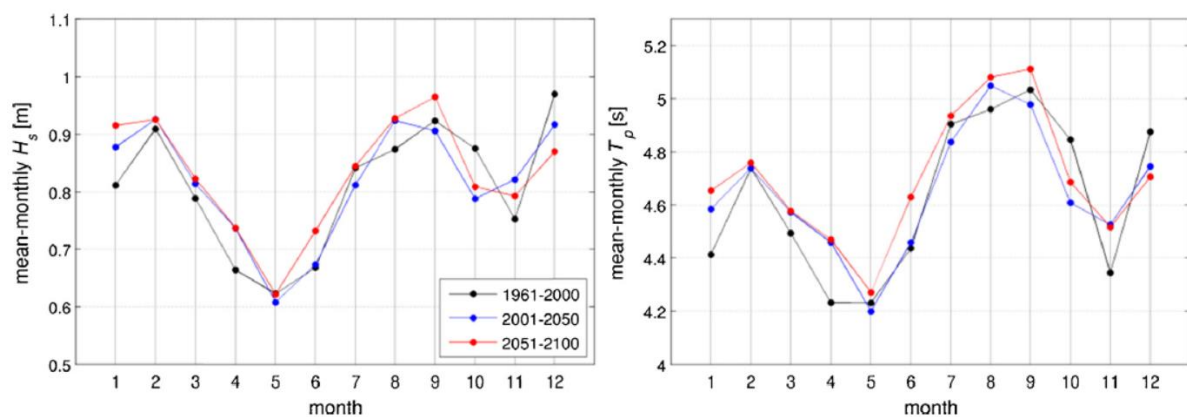


Εικόνα 3-1: Εκτίμηση των χαρακτηριστικών κυμάτων στα «βαθιά» χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση μείωσης κλίμακας 3 επιπέδων (Tsoukala, et al., 2016)

Η βαθυμετρία της περιοχής ενδιαφέροντος κατασκευάστηκε από συνδυασμό του Γενικού Βαθυμετρικού Χάρτη της Βάσης Δεδομένων των Ωκεανών (GEBCO, 2009) και ενός ναυτικού χάρτη της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Πολεμικού Ναυτικού. Η κατανομή του σημαντικού ύψους κύματος, την περίοδο κορυφής και της μέσης διεύθυνσης του κύματος, σε σημεία πλησίον του έργου, για το παρελθόν, το παρόν και το μέλλον, απεικονίζεται στην ακόλουθη εικόνα (Εικόνα 3-2). Επιπλέον το εποχιακό μοτίβο για τις τρεις αυτές χρονικές περιόδους παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-3.



Εικόνα 3-2: Διαγράμματα πιθανοτικών συναρτήσεων για το ύψος κύματος, την περίοδο κορυφής και τη μέση διεύθυνση του κύματος, για τρεις χρονικές περιόδους (Tsoukala, et al., 2016)



Εικόνα 3-3: Εποχιακό μοτίβο του σημαντικού ύψους κύματος H_s (αριστερό πλαίσιο) και της περιόδου κορυφής T_p (δεξί πλαίσιο) για τρεις φορές περιόδους (Tsoukala, et al., 2016)

Διαθέτοντας τα δεδομένα των κυμάτων στα «βαθιά», πραγματοποιήθηκε κατηγοριοποίησή των καταιγίδων, προκειμένου τα φαινόμενα μετεωρολογικής παλίρροιας να αντιμετωπισθούν σαν ομάδες και όχι σαν μεμονωμένα στοιχεία και να συνδεθούν με αντίστοιχους παράγοντες τρωτότητας της ακτής σε μελλοντικές έρευνες. Η ταξινόμηση έγινε στις πέντε (5) κατηγορίες που ακολουθούν :

- I. Αδύναμη
- II. Μέτρια
- III. Σημαντική
- IV. Κρίσιμη
- V. Ακραία

Ως καταιγίδα ορίστηκε κάθε γεγονός που ξεπερνά σε ύψος το ελάχιστο καθορισμένο σημαντικό ύψος κύματός και σε διάρκεια την ελάχιστη καθορισμένη διάρκεια. Στην έρευνα αυτή το κατώτατο όριο ύψους κύματος ορίστηκε στα 2μ και η ελάχιστη διάρκεια 6 ώρες. Το όριο των δύο (2) μέτρων, για το ελάχιστο ύψος κύματος, καθορίστηκε με στόχο την περιγραφή σπάνιων γεγονότων με μόνο το 10% των συνολικών ύψος κύματος. Η ενέργεια κάθε γεγονότος υπολογίζεται ως εξής:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad (3.1)$$

όπου $(t_1 - t_2)$ ορίζεται η διάρκεια της καταιγίδας και H_s είναι κάθε ύψος κύματος μεγαλύτερο από το κατώτατο όριο.

Η ανωτέρω ανάλυση πραγματοποιήθηκε για δύο περιόδους, το παρελθόν (1960 – 2000) και το μέλλον (2000 – 2100), για τη διεύθυνση του βόρειο ανέμου, ο οποίος λόγω της θέσης της περιοχής ενδιαφέροντος είναι και ο κυρίαρχος για την δημιουργία κυματισμών στην ακτογραμμή του Ρεθύμνου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν, το ύψος κύματος κυμάνθηκε μεταξύ 2 μέτρων και 6 περίπου μέτρων, με το συγκεκριμένο εύρος να εμφανίζεται σε οποιαδήποτε κατηγορία καταιγίδας, καθώς σε κάθε γεγονός μπορεί να υπάρξουν μικρά ύψη κύματος μεγάλης χρονικής διάρκειας αλλά και μεγάλα ύψη κύματος μικρής χρονικής διάρκειας.

Παράλληλα με τα παραπάνω βήματα, συλλέχθηκαν καταγεγραμμένα βίντεο με γεγονότα υπερπήδησης στην περιοχή του λιμένα Ρεθύμνου τα οποία στη συνέχεια κατηγοριοποιήθηκαν με την ακόλουθη διαδικασία. Αρχικά, υπολογίσθηκε το ανάπτυγμα πελάγους τους (FEff) μέσω του CEM (2008). Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν οι ανεμολογικές μετρήσεις (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου) για την περιοχή του Ρεθύμνου, οι οποίες καταγράφονταν ανά τρεις (3) ώρες, για τα έτη 1958 έως 2008. Τέλος, γνωρίζοντας τα προαναφερόμενα στοιχεία υπολογίσθηκαν τα κυματικά χαρακτηριστικά των γεγονότων, όπως το χαρακτηριστικό ύψος κύματος και η περίοδος κορυφής, με την μέθοδο πρόβλεψης SMB (Bretschneider, 1952, 1958). Γνωρίζοντας πλέον τα κυματικά χαρακτηριστικά, τα γεγονότα ταξινομήθηκαν με τη μέθοδο των πέντε (5) κατηγοριών και εφαρμόζοντας την εξίσωση (3.1). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι πως τα γεγονότα του παρελθόντος κατατάχθηκαν έως και την Κατηγορία III.

Οι μέσες τιμές του ύψους κύματος και της περιόδου κορυφής κάθε κατηγορίας καταιγίδας, στη συνέχεια, δόθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο κυματικό μοντέλο MIKE21 PMS για την προσομοίωση της εξέλιξης του κυματικού κλίματος στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά και οι προστίπτουσες τάσεις ακτινοβολίας χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου στο υδροδυναμικό μοντέλο MIKE21 HD για την προσομοίωση του υδροδυναμικού πεδίου, αντίστοιχα. Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε είναι πως οι προσομοιώσεις έδωσαν αποτελέσματα που συμφωνούν με τα δεδομένα των παρατηρήσεων των πλημμυρών του παρελθόντος στις αντίστοιχες τοποθεσίες. Δυστυχώς τα αποτελέσματα του υδροδυναμικού μοντέλου, τα οποία σίγουρα επηρεάζουν το φαινόμενο της υπερπήδησης, δεν μπορούν να ενσωματωθούν στην πλειοψηφία των αριθμητικών μοντέλων τέτοιων φαινομένων, ως οριακές συνθήκες.

Τελικά, το ύψος κύματος που υπολογίσθηκε στα «ρηχά νερά» και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του, χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου σε εμπειρικούς τύπους και χρονικά εξαρτημένα μοντέλα προσομοίωσης κυματικής μετάδοσης (MIKE21 BW) για να υπολογισθούν τελικά η κυματική αναρρίχηση και υπερπήδηση (EurOtop). Τα δύο φαινόμενα υπολογίσθηκαν σε χαρακτηριστικές τομές της ακτογραμμής στις θέσεις ενδιαφέροντος.

Ο υπολογισμός της κυματικής αναρρίχησης έγινε με τις τρεις (3) ακόλουθες μεθόδους:

- 1) Εμπειρικός τύπος των Stockdon et al. (2006)

$$Ru = 1.1 \cdot \left\{ (0.35 \tan \beta)(H_s L_0)^{1/2} + \left[H_s L_0 \frac{(0.536 \tan \beta^2 + 0.004)^{1/2}}{2} \right] \right\} \quad (3.2)$$

όπου $\tan \beta$ είναι η κλίση της παραλίας και L_0 είναι το μήκος κύματος στα «βαθιά» που σχετίζεται με την περίοδο κορυφής κύματος T_p για κάθε καταιγίδα (όλες οι τιμές είναι σε m). Το τελικό R_u για κάθε κατηγορία καταιγίδων λαμβάνεται παίρνοντας το μέσο ύψος κύματος που υπολογίζεται για όλες τις καταιγίδες.

2) Εξίσωση αναρρίχησης σύνθετων κυματισμών του Coastal Engineering Manula (CEM, 2008)

$$\frac{R_u}{H_s} = \begin{cases} 0.96\xi & \text{για } 1.0 < \xi < 1.5 \\ 1.17\xi^{0.46} & \text{για } 1.5 < \xi \end{cases} \quad (3.3)$$

όπου ξ ο αριθμός Iribaren ο οποίος ορίζεται από τη σχέση $\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{H_s/L_0}}$

3) Αριθμητική προσομοίωση, μονοδιάστατη, κυματικού μοντέλου τύπου Boussinesq (MIKE21 BW)

Τα κυματικά χαρακτηριστικά (H_s , T_p), όπως υπολογίστηκαν με το μοντέλο PMS, δίνονται στο χρονικά εξαρτούμενο μοντέλο, ως σύνθετες χρονικές σειρές ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας μαζί με το προφίλ βαθυμετρίας.

Το τελευταίο βήμα της συγκεκριμένης έρευνας είναι ο υπολογισμός της μέσης παροχής υπερπήδησης. Με την εισαγωγή χαρακτηριστικών κυμάτων π.χ. το ύψος κύματος στον πόδα του έργου (H_{m0}), η περίοδος κύματος (T), το ύψος της στέψης του έργου προστασίας της ακτής (R_c), το πλάτος στέψης του έργου προστασίας της ακτής (G_c), το συντελεστής μείωσης (g) ανάλογα με τη διαπερατότητα, στα εργαλεία EurOtop (EurOtop, 2007), όπως οι παραμετρικές εξισώσεις και τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, μπορεί κανείς να υπολογίσει την υπερπήδηση.

3.2. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το αντικείμενο της παρούσας ΜΔΕ είναι η προσομοίωση πλημμυρικών γεγονότων του παρελθόντος μέσω της εφαρμογής μιας σειράς μαθηματικών μοντέλων και εξισώσεων υψηλής ακρίβειας και η σύγκριση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων με καταγραφές που έχουν συλλεχθεί για τα συγκεκριμένα γεγονότα.

Όπως αναφέρεται και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η μεθοδολογία που προτάθηκε από την έρευνα των Tsoukala et al. (2016) και χρησιμοποιήθηκε ως βάση για της μεθοδολογίας της παρούσας, προσφέρει μία ολοκληρωμένη προσέγγιση για τον υπολογισμό της υπερπήδησης και της αναρρίχησης των κυμάτων μέσω μιας αλυσίδας αριθμητικών εργαλείων, ξεκινώντας από περιφερειακά μοντέλα κλιματικής αλλαγής και τελειώνοντας στην ακτή, η οποία μπορεί να εφαρμοσθεί σε οποιαδήποτε παράκτια ζώνη, για οποιοδήποτε κλιματικό σενάριο.

Η προαναφερθείσα μεθοδολογία των Tsoukala et al. (2016) αναπτύσσεται περαιτέρω από την παρούσα ΜΔΕ εντάσσοντας και διαφοροποιώντας τα ακόλουθα:

- Αξιοποίηση ανοικτών βάσεων δεδομένων ως δεδομένα εισόδου στα μοντέλα,
- Συμπερίληψη μετεωρολογικής παλίνρροιας,
- Μαθηματική υδροδυναμική προσομοίωση της παράκτιας κατάκλυσης.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αναλύεται στα εξής έξι βήματα:

Βήμα 1. Συγκέντρωση δεδομένων σχετικά με τη θαλάσσια κατάσταση στο παρελθόν

Αυτό είναι και το πιο κρίσιμο βήμα της διαδικασίας, κατά το οποίο συλλέγονται αξιόπιστα δεδομένα που αφορούν το σύνολο της θαλάσσιας κατάστασης κατά την εμφάνιση των υπό διερεύνηση παράκτιων πλημμυρών του παρελθόντος. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και εξελιχθεί αξιόπιστες πλατφόρμες οι οποίες παρέχουν, ελεύθερα, θαλάσσια δεδομένα. Για παράδειγμα, στην παρούσα έρευνα το κυματικό κλίμα (σημαντικό ύψος κύματος, περίοδος κορυφής και μέση διεύθυνση κύματος) και τα δεδομένα ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας λόγω της μετεωρολογικής παλίρροιας συλλέγονται από την πλατφόρμα Copernicus Marine Service. Το κυματικό κλίμα διακρίνεται σε ανεμογενείς κυματισμούς (wind-waves) και αποθάλασσα (swell). Τέλος, δεδομένα σχετικά με την αστρονομική παλίρροια συλλέγονται από την βάση της AVISO Satellite Altimetry Data.

Βήμα 2. Κατασκευή ψηφιακού τοπογραφικού και βυθομετρικού μοντέλου

Δημιουργείται ένα ψηφιακό τοπογραφικό διάγραμμα (DEM) και ένα αντίστοιχο βυθομετρικό, τα οποία αποτυπώνουν την περιοχή διερεύνησης. Τα στοιχεία για την δημιουργία τους βασίζονται σε εκτελεσμένες υδρογραφικές έρευνες. Το διάγραμμα το οποίο προκύπτει, τελικά, αποτυπώνει συνολικά την μορφολογία και τα χαρακτηριστικά της χερσαίας και της θαλάσσιας περιοχής ενδιαφέροντος, αντίστοιχα βασισμένα στο τοπογραφικό και βυθομετρικό πλέγμα.

Βήμα 3. Προσομοίωση κυματικού κλίματος κοντά στην ακτή

Πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση του μετασχηματισμού του κύματος από τα βαθιά στην περιοχή κοντά στην ακτή, με την εφαρμογή του κατάλληλου κυματικού μοντέλου το οποίο λαμβάνει υπόψη όλα τα κυρίαρχα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στη θαλάσσια ζώνη των αβαθών νερών, κοντά στην ακτής.

Βήμα 4. Εκτίμηση των υδραυλικών συνθηκών της ακτής

Στο στάδιο αυτό, η περιοχή διερεύνησης η οποία είναι επιρρεπής σε πλημμύρες χωρίζεται σε υποπεριοχές με παρόμοιες γεωμορφολογικές ιδιότητες σε σχέση με το παράκτιο μέτωπο (π.χ. κρηπιδώματα, θωρακίσεις, αμμώδεις ή βραχώδεις παραλίες). Με βάση τα κυματικά χαρακτηριστικά στα ρηγά, που προέκυψαν από την προσομοίωση του προηγούμενου βήματος, η κυματογενής ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας, η κυματική αναρρίχηση και υπερπήδηση υπολογίζονται χρησιμοποιώντας εμπειρικούς τύπους (π.χ. (Jones, et al., 2015), (Van der Meer, et al., 2016)). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι τα χαρακτηριστικά της κυματικής υπερπήδησης χαρακτηρίζονται από υψηλή αβεβαιότητα, λόγω της μη γραμμικής, χωρικά και χρονικά μεταβλητής στοχαστικής φύσης του συγκεκριμένου φαινομένου. Τα χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος και η γεωμετρία της κατασκευής που αντιμετωπίζει το φαινόμενο επηρεάζουν σημαντικά την κυματική υπερπήδηση και επομένως πρέπει να δοθεί προσοχή στις υποθέσεις που πρέπει να γίνουν. Παράγοντες που περιλαμβάνονται στη διαδικασία υπολογισμού της υπερπήδησης, όπως είναι ο συντελεστής τριβής και διεύθυνσης του κύματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παράμετροι βαθμονόμησης για την εξακρίβωση της ολοκλήρωσης του φαινομένου της υπερπήδησης.

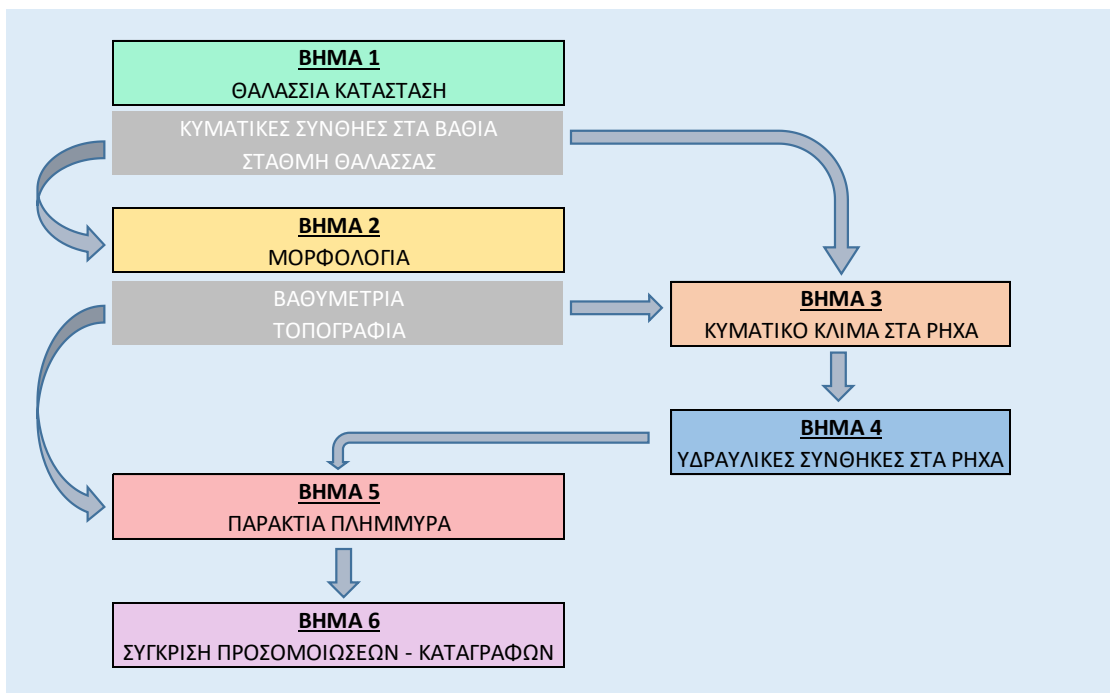
Βήμα 5. Προσομοίωση παράκτιας πλημμύρας

Τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος μαζί με το ψηφιακό τοπογραφικό – βυθομετρικό διάγραμμα, χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου για την προσομοίωση της πλημμύρας εφαρμόζοντας κατάλληλο υδροδυναμικό μοντέλο, βασισμένο στις εξισώσεις ρηχών νερών, ικανό να περιγράψει την κίνηση του νερού (Teng, et al., 2017) ως προς την ταχύτητα στο οριζόντιο μέσο βάθος και ως προς το βάθος του νερού ως αντίδραση στις δυνάμεις της βαρύτητας και της τριβής. Τέλος, ο συντελεστής Manning που ελέγχει την αντίσταση στη ροή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως παράμετρος βαθμονόμησης για την επιβεβαίωση της χωροχρονικής ανάπτυξης της πλημμύρας.

Βήμα 6. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων με καταγραφές συμβάντων

Μετά την ολοκλήρωση της βασικής διαδικασίας προσομοίωσης μίας παράκτιας πλημμύρας η οποία έχει συμβεί στο παρελθόν ακολουθεί το τελευταίο βήμα, αυτό της σύγκρισης των αποτελεσμάτων με καταγραφές από τα γεγονότα τα οποία προσομοιώθηκαν. Η έκταση την οποία θα καλύψει κάθε πλημμυρικό συμβάν του παρελθόντος που μελετάται, αποτυπώνεται σε χάρτη της περιοχής σύμφωνα με καταγραφές από βίντεο, φωτογραφίες και περιγραφές από αυτόπτες μάρτυρες. Σύμφωνα με τις ίδιες πηγές επίσης υπολογίζεται η χρονική διάρκεια μέσα στην οποία πραγματοποιήθηκε η κατάκλυση αλλά και η παροχή του νερού που εισχώρησε στην χερσαία επιφάνεια. Τα δεδομένα αυτά, συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα αντίστοιχα πλημμυρικά γεγονότα και μέσω αυτής της σύγκρισης ελέγχεται η ακρίβεια του μοντέλου προσομοίωσης, των δεδομένων εισόδου και η ορθότητα της βαθμονόμησης του μοντέλου. Εάν τα αποτελέσματα δε συγκλίνουν αρχίζει η διαδικασία διερεύνησης της παραμέτρου η οποία επηρέασε το αποτέλεσμα με στόχο τη βελτιστοποίηση των μοντέλων προσομοιώσεων. Τονίζεται ότι είναι σημαντικό να εξετασθούν με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια το υλικό και οι μαρτυρίες σχετικά με τα συμβάντα έτσι ώστε να έχει νόημα η σύγκριση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Συγκεντρωτικά τα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας παρουσιάζονται στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 3-4: Διάγραμμα ροής προτεινόμενης μεθοδολογίας

3.3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στα ακόλουθα υποκεφάλαια παρουσιάζεται το επιστημονικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζονται τα μαθηματικά μοντέλα που εφαρμόζονται στην παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία.

3.3.1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ PMS

Στην παρούσα διπλωματική αξιοποιείται ένα εξελιγμένο κυματικό μοντέλο (Chondros et al. 2021) το οποίο βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων ήπιας κλίσης (mild-slope) παραβολικής προσέγγισης με ενισχυμένη μη γραμμικότητα που δίδει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας λαμβάνοντας υπόψη αρμονικούς και μη κυματισμούς. Είναι ικανό να προσομοιώσει με ακρίβεια την ταυτόχρονη παρουσία όλων των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε ένα παράκτιο πεδίο, όπως:

- Διάδοση γραμμικών και μη γραμμικών κυματισμών
- Ρήχωση
- Διάθλαση
- Περίθλαση
- Απώλεια ενέργειας λόγω θραύσης και τριβής πυθμένα

Τα μεγέθη που υπολογίζει είναι το ύψος κύματος, η περίοδος και η διεύθυνση των κυματισμών και οι τάσεις ακτινοβολίας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του κυματικού πεδίου σε παράκτιες περιοχές, όπου η διασπορά λόγω ανάκλασης μπορεί να αγνοηθεί και η περίθλαση είναι κυρίαρχη στον κάθετο άξονα της κύριας διεύθυνσης διάδοσης κυματισμού.

Το εξελιγμένο κυματικό μοντέλο βασίζεται στην έρευνα των Kirby and Dalrymple (1983) οι οποίοι παρήγαγαν μία παραβολική εξίσωση με τη μορφή διαφορικής εξίσωσης 3^{ης} τάξης η οποία διέπει το εύρος A της βασικής συνιστώσας συχνότητας ενός κύματος Stokes. Οι εξισώσεις που διέπουν το κυματικό μοντέλο έχουν την παρακάτω μορφή (Kirby 1986, Chondros et al. 2021) :

$$C_g A_x + i(\bar{k} - a_0 k) C_g A + \frac{1}{2} (C_g)_x A + \frac{i}{\omega} (\alpha_1 - b_1 \frac{\bar{k}}{k}) (C C_g A_y)_y - \frac{b_1}{\omega k} (C C_g A_y)_{yx} + \frac{b_1}{\omega} \left(\frac{k_x}{k^2} + \frac{(C_g)_x}{2k C_g} \right) (C C_g A_y)_y + \frac{i \omega k^2}{2} D |A|^2 A + \frac{w}{2} A = 0 \quad (3.4)$$

όπου η παράμετρος D δίνεται από τη σχέση

$$D = \frac{(\cosh 4kh + 8 - 2 \tanh^2 kh)}{8 \sinh^4 kh}$$

όπου A είναι το κυματικό εύρος που σχετίζεται με το συντελεστή η , όπου $\eta = A e^{-i(kx - \omega t)}$, x είναι η κυρίαρχη διεύθυνση των κυματισμών, k είναι ο κυματαριθμός, ω γωνιακή συχνότητα, h είναι το βάθος νερού, \bar{k} είναι μια παράμετρος που αφορά τον μέσο όρο των κυματαριθμών κατά μήκος του y άξονα, C είναι η φασική ταχύτητα, C_g είναι η ταχύτητα ομάδας των κυμάτων, w είναι ένας συντελεστής διασποράς και τέλος οι συντελεστές a_0 , α_1 και b_1 χρησιμοποιούνται ανάλογα με το φάσμα των γωνιών που λαμβάνεται υπόψη. Ο κυματαριθμός, k , σχετίζεται με γωνιακή συχνότητα των κυματισμών ω , και το βάθος νερού h , μέσω της γραμμικής διασποράς $\omega^2 = gk \tanh(kh)$.

Στο μοντέλο επιτρέπεται η προσομοίωση σύνθετων μονοκατευθυντικών κυματισμών χωρίζοντας το φάσμα των κυματισμών σε διακριτές κυματικές συνιστώσες οι οποίες προσομοιώνονται ξεχωριστά. Τα κυματικά χαρακτηριστικά σε κάθε κελί του υπολογιστικού καννάβου στη συνέχεια προκύπτουν

μέσω γραμμικής υπέρθεσης όλων των αποτελεσμάτων χωρικής διάδοσης του κύματος των διακριτών συνιστωσών. Το φάσμα διακριτοποιείται σε κλάσεις ίσης ενέργειας χρησιμοποιώντας τη φασματική συνάρτηση πηγής Jonswar ή TMA. Έτσι, κάθε κυματική συνιστώσα χαρακτηρίζεται από το ίδιο κλάσμα κυματικής ενέργειας και συνεπώς και ύψους κύματος. Η συγκεκριμένη προσέγγιση προσφέρει ιδιαίτερα υψηλή ακρίβεια στα αποτελέσματα χωρίς να είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός του φάσματος σε πολλές συνιστώσες (περισσότερες από 50) που συνήθως απαιτούνται από τις λεγόμενες “single summation” μεθόδους διακριτοποίησης του ενεργειακού φάσματος των κυματισμών.

Στις παραπάνω εξισώσεις η ταχύτητα φάσης, η ταχύτητα ομάδος και ο κυματαριθμός είναι μεταβλητές οι οποίες εξαρτώνται άμεσα από τη επιλεχθείσα σχέση διασποράς. Τα πιο διαδεδομένα διεθνώς μαθηματικά μοντέλα της κατηγορίας των εξισώσεων ήπιας κλίσης υιοθετούν την γραμμική σχέση διασποράς για τον υπολογισμό των ταχυτήτων ακόμα και στα ενδιάμεσα και βαθιά νερά υστερώντας σημαντικά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς η μη γραμμικότητα παίζει σημαντικό ρόλο στα κυματικά χαρακτηριστικά και ιδίως στο ύψος κύματος που ενδιαφέρει τις εφαρμογές.

Αντίθετα, το συγκεκριμένο μοντέλο υπερέχει των αντίστοιχης κατηγορίας μοντέλων που κυκλοφορούν διεθνώς, προσφέροντας πιο ακριβή αποτελέσματα αφού υιοθετεί τη φιλοσοφία μιας καινοτόμου μεθοδολογίας, όπως προτάθηκε από τους Chondros and Memos (2014), υπολογισμού των παραμέτρων k και C , που εμφανίζονται στις βασικές εξισώσεις. Η μεθοδολογία αυτή επιλύει χωροχρονικά ανώτερης τάξης μη γραμμικές θεωρίες Stokes 2^{ης} και 5^{ης} τάξης, Cnoidal και Solitary.

Πιο συγκεκριμένα, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η διάδοση μη γραμμικών κυματισμών το μοντέλο ακολουθεί μια αναλυτική προσέγγιση υπολογισμού της σχέσης διασποράς ενσωματώνοντας έτσι τη μη γραμμικότητα σε οποιοδήποτε βάθος νερού. Αρχικά υπολογίζεται η παράμετρος Ursell $Ur = HL^2/h^3$ (H είναι το ύψος κύματος και L είναι το μήκος κύματος) και η παράμετρος που εκφράζει τη διασπορά συχνοτήτων, $s = H/L$, σε κάθε κελί του υπολογιστικού πεδίου. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραμέτρους καθώς και τις περιοχές εφαρμογής των διαφόρων θεωριών διάδοσης των κυματισμών όπως προτάθηκαν αυτές από τον Hedges (1995), υπολογίζεται η μη γραμμική διασπορά σε συνάρτηση με τις θεωρίες κυματισμών Stokes δεύτερης ή πέμπτης τάξης, Cnoidal ή θεωρία μοναχικού κύματος ως ακολούθως:

Περιοχές εφαρμογής θεωριών διάδοσης κυματισμών			Σχέση διασποράς
$s < 0.04$	$Ur < 40$	Stokes 1st	$\omega^2 = gk \tanh(kh)$
$s > 0.04$	$Ur < 40$	Stokes higher	$\omega^2 = gk(1 + \varepsilon^2 D) \tanh(kh)$
$s > 0.00$	$40 < Ur < 4000$	Cnoidal	$\omega^2 = gk^2 h(1 + H/mh(2 - m - 3E/K))$, όπου K, E are the complete elliptic functions of the first and second kind, respectively. The parameter m is the modulus of the elliptic functions. Alternatively, the modified Cnoidal equation is used herein: $\omega^2 = gk^2 h(1 + f(m)H/h)$, Bell et al. (2004) assumed a value of 0.4 for $f(m)$
$s > 0.00$	$Ur > 4000$	Solitary	$\omega^2 = gk^2 h(1 + H/h)$

Εναλλακτικά χρησιμοποιείται και η μη γραμμική σχέση διασποράς όπως καταστρώθηκε από τους Kirby and Dalrymple (1983) με σημαντικά ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με τα γραμμικά μοντέλα. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται και στην παρούσα μελέτη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός και η ενσωμάτωση μη γραμμικών ταχυτήτων, με τους πιο πάνω τρόπους, καθιστούν το μοντέλο πολύ ακριβές χωρίς να ανεβάζουν τον απαιτούμενο υπολογιστικό φόρτο και χρόνο.

3.3.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (EUROTOP)

Στην παρούσα ΜΔΕ οι υπολογισμοί της κυματικής υπερπήδησης βασίστηκαν στην εφαρμογή εργαλείων πρόβλεψης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (Artificial Neural Networks) όπως έχουν καταστρωθεί από μια πολυπληθή ομάδα επιστημόνων και ερευνητών από διάφορα ερευνητικά ιδρύματα (Van der Meer Consulting, HR Wallingford, University Edinburgh, Ghent University, University of Aachen, University of Bologna, Flemish Ministry of Works, Environment Agency UK, University of Roma Tre IT, Deltares and Delft University of Technology NL, Waterschap Scheldestromen NL).

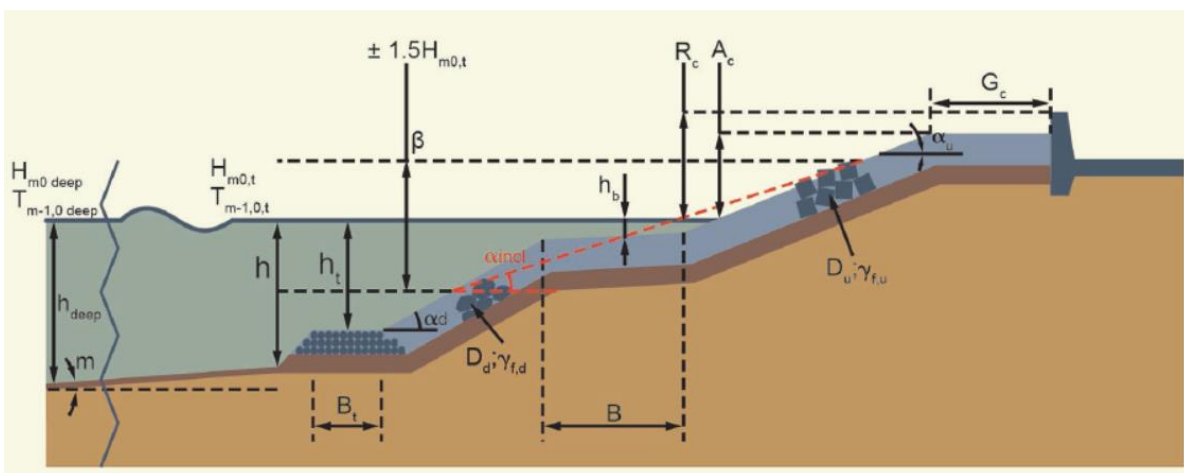
Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ANN) εμπίπτουν στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης και σε αυτό το πλαίσιο μπορούν να οριστούν ως συστήματα που προσομοιώνουν τη νοημοσύνη προσπαθώντας να αναπαράγουν τη δομή του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα είναι οργανωμένα με τη μορφή στρωμάτων και μέσα σε κάθε στρώμα υπάρχουν ένα ή περισσότερα στοιχεία επεξεργασίας που ονομάζονται «νευρώνες».

Το πρώτο στρώμα είναι το επίπεδο εισόδου και ο αριθμός των νευρώνων σε αυτό το επίπεδο είναι ίσος με τον αριθμό των παραμέτρων εισόδου. Το τελευταίο στρώμα είναι το επίπεδο εξόδου και ο αριθμός των νευρώνων σε αυτό το επίπεδο είναι ίσος με τον αριθμό των παραμέτρων εξόδου που πρέπει να προβλεφθούν. Τα στρώματα μεταξύ των επιπέδων εισόδου και εξόδου είναι τα κρυμμένα επίπεδα και αποτελούνται από έναν αριθμό νευρώνων που πρέπει να καθοριστούν στη διαμόρφωση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Κάθε νευρώνας σε κάθε στρώμα λαμβάνει πληροφορίες από το προηγούμενο στρώμα μέσω των συνδέσεων, πραγματοποιεί κάποιες τυπικές λειτουργίες και παράγει μια έξοδο. Κάθε συνδεσιμότητα έχει έναν συντελεστή βαρύτητας που έχει εκχωρηθεί, ως αποτέλεσμα της βαθμονόμησης του νευρωνικού δικτύου, η οποία είναι μια διαδικασία εκμάθησης που πραγματοποιείται με την εκπαίδευση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου σε μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει παραμέτρους εισόδου και εξόδου. Η είσοδος ενός νευρώνα αποτελείται από ένα σταθμισμένο άθροισμα των εξόδων του προηγούμενου στρώματος, η έξοδος ενός νευρώνα παράγεται χρησιμοποιώντας μια γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης. Αυτή η διαδικασία ακολουθείται για κάθε νευρώνα. ο νευρώνας εξόδου παράγει την τελική πρόβλεψη του νευρωνικού δικτύου.

Το εργαλείο που χρησιμοποιείται αποτελείται από τρία παρόμοια Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα με την ίδια αρχιτεκτονική και κύρια χαρακτηριστικά, αλλά το καθένα έχει εκπαιδευτεί στο σύνολο δεδομένων. Το συγκεκριμένο εργαλείο λαμβάνει ως δεδομένο εισόδου 14 παραμέτρους (που αναλύονται στον Πίνακας 3-1 και απεικονίζονται στην Εικόνα 3-5 και δίδει ως δεδομένα εξόδου 3 παραμέτρους, τη μέση παροχή υπερπήδησης q , το συντελεστή μετάδοσης K_t και το συντελεστή ανάκλασης K_r . Οι παράμετροι εισόδου του εργαλείου του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου είναι αδιάστατες, για να αναπαράγουν τη συνάφεια συγκεκριμένων βασικών γεωμετρικών και φυσικών παραμέτρων.

Πίνακας 3-1: Σύνθεση των 14 επιλεγμένων αδιάστατων παραμέτρων εισόδου του ANN (Πηγή: Eurotop, 2018)

#	Parameter	Type	Representation of
1	$H_{m0,t}/L_{m-1,0,t}$	Wave conditions	Wave steepness (breaking)
2	β [rad]	Wave conditions	Wave obliquity
3	$h/L_{m-1,0,t}$	Wave conditions	Shoaling parameter
4	$h_t/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the toe submergence
5	$B_t/L_{m-1,0,t}$	Geometry	Effect of the toe width
6	$d_b/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the berm level
7	$B/L_{m-1,0,t}$	Geometry	Effect of the berm width
8	$R_c/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the relative crest height (including the crown wall if present)
9	$A_c/H_{m0,t}$	Geometry	Effect of the relative crest height
10	$G_c/L_{m-1,0,t}$	Geometry	Effect of the crest width
11	$\cot\alpha_d$	Geometry	Downstream slope
12	$\cot\alpha_{incl}$	Geometry	Average slope in the run-up/down area
13	$D/H_{m0,t}$	Structure characteristics	Indication of structure permeability and/or roughness
14	γ_f	Structure characteristics	Dissipation induced by structure roughness and permeability



Εικόνα 3-5. Σκαρίφημα απεικόνισης βασικών παραμέτρων εισόδου στο Νευρωνικό Δίκτυο EurOtop. (Πηγή: EurOtop, 2018)

3.3.3. ΜΟΝΤΕΛΟ HEC-RAS 2D

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα Μ.Δ.Ε. προκειμένου να προσομοιωθεί η παράκτια κατάκλυση είναι το υδροδυναμικό μοντέλο HEC-RAS 2D του Κέντρου Τεχνικής Υδρολογίας (Hydrologic Engineering Center) του Σώματος Μηχανικών του Στρατού των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Corps of Engineers).

Το HEC-RAS είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα λογισμικού κατάλληλο για μονοδιάστατους (1D) και δισδιάστατους (2D) υδραυλικούς υπολογισμούς σε ένα πλήρες δίκτυο από φυσικούς ή τεχνητούς ανοικτούς αγωγούς και υδατορεύματα (River Analysis System), πλημμυρικές (εκτός της κοίτης) εκτάσεις, περιοχές προστατευμένες από αναχώματα, κλπ. Επίσης, έχει τη δυνατότητα υπολογισμού της διάβρωσης της κοίτης σε γέφυρες, την κίνηση και απόθεση φερτών υλών και την ανάλυση της ποιότητας του νερού.

Πιο αναλυτικά, το μοντέλο HEC-RAS δύναται να προσομοιώσει τόσο υποκρίσιμες, όσο και υπερκρίσιμες συνθήκες ροής ή συνδυασμό και των δύο, καθώς και την επίδραση διαφόρων εμποδίων στη ροή, όπως γεφυρών, οχετών, υπερχειλιστών και κατασκευών μέσα στη ζώνη κατάληψης της πλημμύρας. Η υπολογιστική διαδικασία στην μονοδιάστατη ανάλυση (η οποία συναντάται κατά βάση εντός της κοίτης) βασίζεται στην επίλυση της μονοδιάστατης εξίσωσης ενέργειας, ενώ οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών εκτιμώνται κατά Manning. Στις πλημμυρικές εκτάσεις, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να επιλέξει για τον υπολογισμό των υδραυλικών στοιχείων είτε τις δισδιάστατες εξισώσεις διάχυσης (2D Diffusion Wave equations-DSW), είτε τις δισδιάστατες εξισώσεις Saint Venant (Full 2D Saint Venant/Shallow Water equations-SW). Το αριθμητικό μοντέλο παρέχει επιπλέον τη δυνατότητα διαστασιολόγησης κατασκευών (στηθαίων, αναχωμάτων κ.λπ.) για αντιπλημμυρική προστασία. Τέλος, δίνει τη δυνατότητα για την κατάρτιση χαρτών πλημμύρας στις ζώνες κατάκλυσης και την γραφική αναπαράσταση διάδοσης του πλημμυρικού κύματος.

Το ανωτέρω λογισμικό θεωρήθηκε κατάλληλο καθώς προσομοιώνει σε εξαιρετικό βαθμό τις συνθήκες πλημμυρικού γεγονότος, ακόμα και σε περιπτώσεις με σύνθετη γεωμετρία και τεχνικά έργα ποταμού. Ταυτόχρονα είναι φιλική προς το χρήστη η εισαγωγή δεδομένων από ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών, όπως το λογισμικό ArcGIS, παρέχει αποτελέσματα με ικανοποιητική ακρίβεια και σε εύχρηστες μορφές (πίνακες, σχεδιαγράμματα, σκαριφήματα).

Η ακόλουθη παρουσίαση του υπόβαθρου του μοντέλου αντλήθηκε από το ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ (ΥΠΕΝ, 2018)

3.3.3.1. Παραδοχές Υπολογισμού

Το λογισμικό HEC-RAS πραγματοποιεί υπολογισμούς ροής μονοδιάστατης και δισδιάστατης ανάλυσης τόσο σε συνθήκες μόνιμης (steady flow) όσο και μη μόνιμης ροής (unsteady flow). Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι μαθηματικές εξισώσεις στις οποίες βασίζεται η μονοδιάστατη ανάλυση σε μόνιμη και μη μόνιμη ροή, και έπειτα οι εξισώσεις για την δισδιάστατη ανάλυση.

❖ Μονοδιάστατη (1D) ανάλυση

- Μόνιμη Ροή

Η μονοδιάστατη ανάλυση χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου η συνιστώσα της ταχύτητας στην διεύθυνση της ροής είναι πολύ σημαντικότερη των άλλων δύο συνιστωσών, όπως συμβαίνει συνήθως στην ροή του νερού εντός των ορίων της κοίτης ενός ποταμού. Οι παραδοχές που υιοθετούνται είναι οι εξής: 1) μόνιμη ή μη μόνιμη ροή, 2) βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή, δηλαδή το βάθος ροής μπορεί να αλλάζει βαθμιαία και σε μεγάλη σχετικά απόσταση 3) μικρές κατά μήκος κλίσεις υδατορεύματος (έως 10%).

Στη μόνιμη ροή το βάθος ροής δεν μεταβάλλεται με τον χρόνο. Η βασική εξίσωση την οποία επιλύει το λογισμικό HEC-RAS είναι η εξής:

Μονοδιάστατη εξίσωση ενέργειας:

$$H_1 = H_2 + \Delta H_{\alpha 1-2} \quad (3.5)$$

όπου:

$$H = y + \frac{a V^2}{2g}$$

το ολικό ύψος ενέργειας σε κάθε διατομή.

Μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών 1 και 2 ανοικτού αγωγού, η εξίσωση ενέργειας έχει τη μορφή:

$$y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + \Delta H_{\alpha 1-2} \quad (3.6)$$

όπου:

y_1, y_2 = στάθμες ελεύθερης επιφάνειας στις διατομές 1,2 αντίστοιχα

V_1, V_2 = μέσες ταχύτητες (ολική παροχή/ολικό εμβαδόν υγρής διατομής)

α_1, α_2 = συντελεστές διόρθωσης κινητικής ενέργειας στις διατομές 1,2

g = επιτάχυνση της βαρύτητας

$\Delta H_{\alpha 1-2}$ = απώλειες ενέργειας μεταξύ των διατομών 1-2

Επιπρόσθετα,

$$\Delta H_{\alpha 1-2} = L \cdot S_f + C \cdot \left(\frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) \quad (3.7)$$

όπου:

L = μήκος του τμήματος μεταξύ των διατομών 1 και 2

S_f = μέση κλίση γραμμής ενέργειας λόγω γραμμικών τριβών μεταξύ των διατομών 1 και 2

C = συντελεστής τοπικών απωλειών λόγω συστολής ή διαστολής.

Η ταχύτητα V υπολογίζεται κατά Manning:

$$V = \frac{1}{n} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

όπου:

n = συντελεστής τραχύτητας κατά Manning

R = υδραυλική ακτίνα διατομής

J = κλίση γραμμής ενέργειας

Επειδή η ροή είναι μόνιμη, μπορούν να απαλειφθούν οι χρονικοί όροι στην εξίσωση ενέργειας και ως βαθμιαία μεταβαλλόμενη, ισχύει υδροστατική κατανομή της πίεσεως σε κάθε διατομή. Η υπόθεση μονοδιάστατης ροής απαιτείται, ώστε το ολικό ενεργειακό φορτίο να μπορεί να θεωρηθεί ίδιο σε όλα τα σημεία μιας διατομής και οι μικρές κατά μήκος κλίσεις, επειδή το πιεζομετρικό φορτίο που αποτελεί συνιστώσα του, στην εξίσωση (3.6), αναπαρίσταται από το βάθος ροής το οποίο μετρείται κατακόρυφα. Επιπλέον, τα όρια της διατομής θεωρούνται σταθερά, δηλαδή δεν

λαμβάνεται υπόψη η διαφοροποίηση των διατομών λόγω μεταφοράς φερτών υλικών, διαβρώσεως κ.λπ.

- Μη Μόνιμη Ροή

Στη μη μόνιμη ροή το βάθος ροής μεταβάλλεται με το χρόνο. Οι δύο βασικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (3.9)$$

όπου:

A_T = παροχή που εισέρχεται στη διατομή

Q = ολική παροχή

q_1 = η εισροή ανά μονάδα μήκους του αγωγού

x = η κατά μήκος απόσταση του ποταμού

t = ο χρόνος

Εξίσωση ποσότητας κίνησης:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (3.10)$$

όπου:

Q = ολική παροχή

A = εμβαδόν της διατομής

V = ταχύτητα υπολογίζεται κατά Manning

S_f = μέση κλίση γραμμής ενέργειας λόγω τριβών μεταξύ των διατομών 1 και 2

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας

- Υπολογιστική διαδικασία

Ο προσδιορισμός της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε διατομή του υδατορεύματος επιτυγχάνεται με επαναληπτική διαδικασία (Μέθοδος Σταθερού Βήματος), η οποία έχει ως εξής:

1. Υιοθετείται μια στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στην ανάντη διατομή y_1 , προκειμένου για υποκρίσιμη ροή ή στην κατάντη διατομή y_2 , αν πρόκειται για υπερκρίσιμη ροή.
2. Βάσει της αρχικά υιοθετηθείσας στάθμης, υπολογίζονται το εμβαδόν της υγρής διατομής, η ταχύτητα ροής και η κινητική ενέργεια.
3. Με τις ευρεθείσες στο βήμα 2 τιμές, υπολογίζεται η μέση κλίση της γραμμής ενέργειας και η απώλεια του ενεργειακού φορτίου.

4. Με τις νέες τιμές από τα βήματα 2, 3 επιλύεται η εξίσωση (3.6) ως προς την ενεργειακή στάθμη y_1 (υποκρίσιμη ροή) ή y_2 (υπερκρίσιμη ροή).
5. Η τιμή του y συγκρίνεται με την αρχική υπόθεση (βήμα 1). Επαναλαμβάνονται τα βήματα 1 έως 4 έως την επιθυμητή σύγκλιση.

Ακολουθεί ο ενεργειακός έλεγχος της στάθμης που βρέθηκε (π.χ. πάνω από το κρίσιμο βάθος σε περίπτωση υποκρίσιμης ροής). Ο υπολογισμός της ελεύθερης επιφάνειας εκτελείται δύο φορές, εναλλακτικά, υποθέτοντας υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή (mixed-flow). Οι τελικές στάθμες προκύπτουν λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο ομάδες αποτελεσμάτων, καθώς και τη σχετική ανάλυση του υδραυλικού άλματος, εάν αυτό εμφανίζεται.

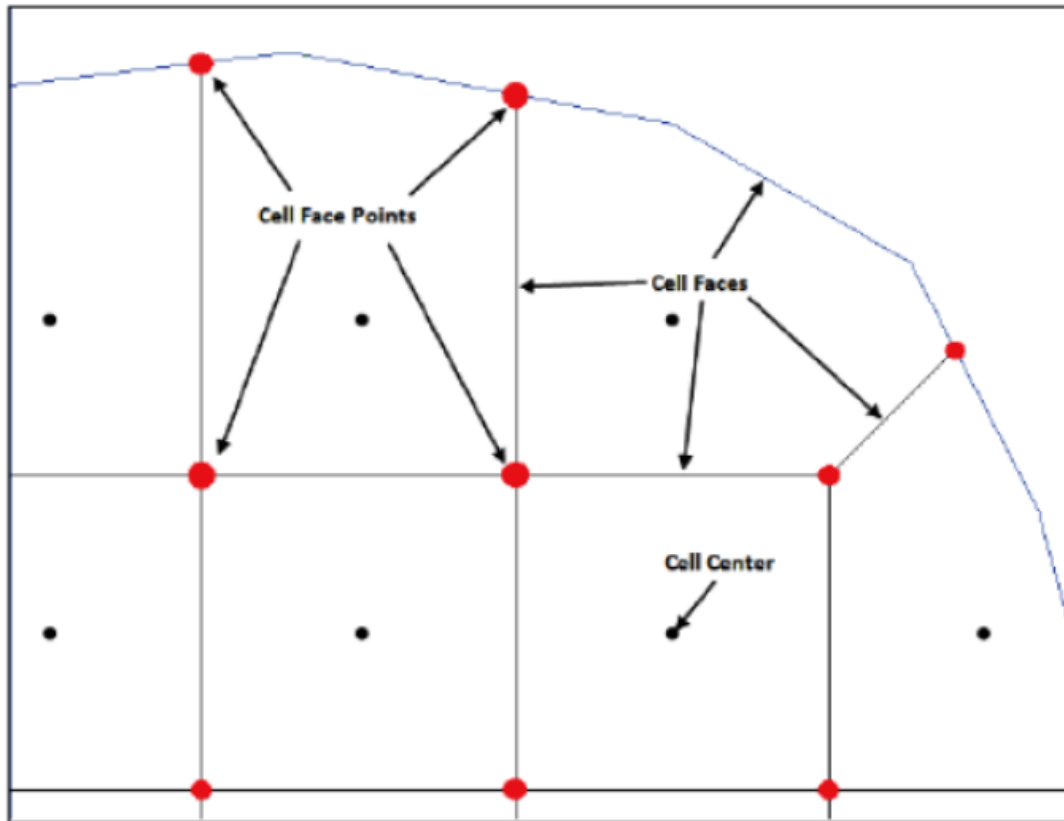
Ταυτόχρονα, επιλύονται επιπρόσθετα, σε συνθήκες μη μόνιμης ροής, οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής, ήτοι οι εξισώσεις (3.9) και (3.10) για τον προσδιορισμό της άγνωστης στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας σε κάθε διατομή του υδατορέματος, μέσω ενός αριθμητικού σχήματος πεπερασμένων διαφορών (Skyline Matrix solver). Το πρόγραμμα εκτελεί καθορισμένο αριθμό διαδοχικών προσεγγίσεων (στην προκειμένη περίπτωση γίνεται χρήση έως 20 διαδοχικών προσεγγίσεων όπου απαιτείται) μέχρι ότου επιτευχθεί ικανοποιητική γραμμή επιφάνειας του νερού.

❖ Δισδιάστατη (2D) ανάλυση

Για την υπολογιστική προσομοίωση στο δισδιάστατο πεδίο χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις ρηχών υδάτων (Shallow Water equations-SW). Για την επίλυση υιοθετούνται παραδοχές, όπως: 1) ασυμπιεστή ροή, 2) ενιαία πυκνότητα και υδροστατική πίεση, 3) οι εξισώσεις είναι ολοκληρωμένες στο βάθος (εξισώσεις Saint-Venant), 4) τα μεγέθη στην κατακόρυφη κλίμακα είναι πολύ μικρότερα από το αντίστοιχα μεγέθη στην οριζόντια κλίμακα. Στα αβαθή ύδατα, η εξίσωση ορμής απλοποιείται και χρησιμοποιείται σε δισδιάστατη μορφή μαζί με την εξίσωση διατήρησης της μάζας, παράγοντας ένα απλοποιημένο μοντέλο, το «Προσέγγιση μέσω διάχυσης κύματος των εξισώσεων ρηχών υδάτων» (Diffusion-wave approximation of the Shallow Water Equations (DSW)).

Επιπλέον, για να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, χρησιμοποιείται στο δισδιάστατο πεδίο ένας υπολογιστικός κানাβος, με βάση την προσέγγιση Casulli, 2008. Ως αποτέλεσμα, προκύπτουν βαθυμετρικές εξισώσεις για τον κানাβο τόσο για τις εξισώσεις των ρηχών υδάτων (SW), όσο και για τις εξισώσεις διάχυσης (DSW).

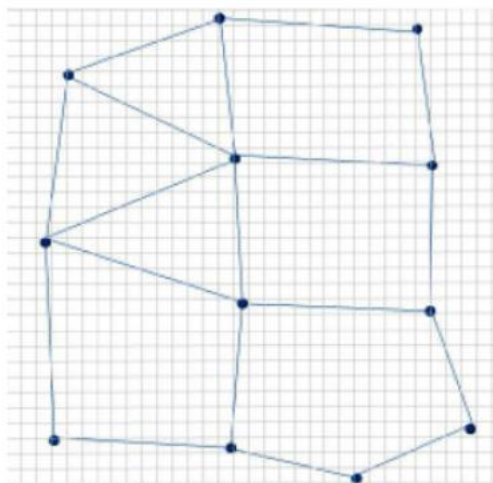
Ο υπολογιστικός κানাβος περιλαμβάνει κελιά τα οποία έχουν τις εξής τρεις ιδιότητες: 1) το κέντρο του κελιού (cell center), στο οποίο γίνεται ο υπολογισμός της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας, 2) τα όρια του κελιού (cell face) και 3) τα άκρα των ορίων του κελιού (cell face points), όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3-6: Ιδιότητες των κελιών του υπολογιστικού κανάβου (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, User's Manual)

Τα υπολογιστικά κελιά του κανάβου περιλαμβάνουν κάποια επιπλέον στοιχεία, όπως είναι η υδραυλική ακτίνα, ο όγκος και το εμβαδόν των διατομών, τα οποία μπορούν να υπολογισθούν από την βαθυμετρία.

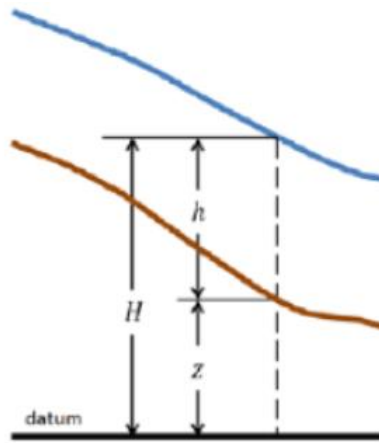
Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 3-7), ο γεωμετρικός κανάβος αναπαριστάται από τον Καρτεσιανό κανάβο με γκρι και ο υπολογιστικός κανάβος με μπλε.



Εικόνα 3-7: Υπολογιστικός και γεωμετρικός κανάβος (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, Reference Manual)

- Εξισώσεις ρηχών υδάτων (SW)

Για την επίλυση των εξισώσεων θεωρείται ότι η στάθμη του νερού $[H(x,y,t)]$ είναι το άθροισμα του υψομέτρου του εδάφους $[z(x,y,t)]$ και του βάθους του νερού $[h(x,y,t)]$:



Εικόνα 3-8: Ορισμός της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, Reference Manual)

$$H(x, y, t) = z(x, y, t) + h(x, y, t) \quad (3.11)$$

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας σε διανυσματική μορφή είναι:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot h \cdot V + q = 0 \quad (3.12)$$

όπου

V = το διάνυσμα της ταχύτητας $V = (u, v)$

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ = ο διανυσματικός διαφορικός τελεστής των μερικών παραγώγων

H = η στάθμη του νερού $[H(x,y,t)]$

q = όρος πηγής/καταβόθρας

Ολοκληρώνοντας σε μια οριζόντια περιοχή και χρησιμοποιώντας το θεώρημα Gauss, για την εξίσωση (3.12) προκύπτει:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V \cdot n dS + Q = 0 \quad (3.13)$$

όπου:

Ω = το τρισδιάστατο πεδίο που καταλαμβάνει το ρευστό

V = το διάνυσμα της ταχύτητας $V = (u, v)$

S = τα πλευρικά όρια

n = μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο όριο

Q = η παροχή που περνά μέσω του εδάφους (διήθηση) ή πάνω από το έδαφος στο πεδίο Ω (εξάτμιση ή βροχή)

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας) που χρησιμοποιεί το λογισμικό για την επίλυση με χρήση υπό-κανάβου (sub-grid bathymetry approach) είναι:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + \sum_k V_k \cdot n_k \cdot A_k(H) + Q = 0 \quad (3.14)$$

όπου:

$\Omega(H^n)$ = ο όγκος του κελιού στο χρονικό βήμα n , ως συνάρτηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

V_k = η μέση ταχύτητα στο όριο (face) k του κελιού

n_k = μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο όριο k

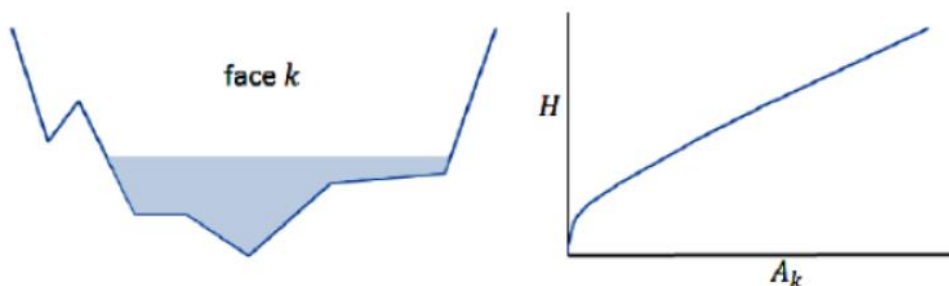
$A_k(H)$ = το εμβαδόν του ορίου (face) k ως συνάρτηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

Δt = η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών βημάτων

H^{n+1}, H^n = η στάθμη του νερού στην οποία οι εκθέτες υποδεικνύουν το χρονικό βήμα

Q = η παροχή που περνά μέσω του εδάφους (διήθηση) ή πάνω από το έδαφος στο πεδίο Ω (εξάτμιση ή βροχή)

Στην Εικόνα 3-9, η αριστερή εικόνα δίδει ένα ενδεικτικό σκαρίφημα του ορίου (face) όπως φαίνεται στον κানাβο και η δεξιά εικόνα την αντίστοιχη σχέση του εμβαδού του ορίου A_k με την στάθμη της επιφάνειας του νερού H .



Εικόνα 3-9: Γεωμετρικά δεδομένα του ορίου του κελιού (cell face) και πίνακας ιδιοτήτων (Πηγή: HEC-RAS 5.0.1, Reference Manual)

Όταν τα μεγέθη στην οριζόντια κλίμακα είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα στην κατακόρυφη κλίμακα, τότε η κατακόρυφη ταχύτητα μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρή. Σε αυτήν την περίπτωση, η ολοκληρωμένη κατά βάθος (vertically-averaged) εξίσωση ορμής Navier-Stokes μπορεί να χρησιμοποιηθεί, οπότε δίνεται η εξίσωση διατήρησης της ορμής για τα αβαθή ύδατα από τις εξισώσεις Saint-Venant:

Εξίσωση κατά x :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (3.15)$$

Εξίσωση κατά y :

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (3.16)$$

όπου:

u, v = οι ταχύτητες στο Καρτεσιανό επίπεδο

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας

v_t = ο συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας στην οριζόντια διεύθυνση

c_f = ο συντελεστής τριβής

f = η παράμετρος Coriolis

Οι παραπάνω εξισώσεις δίνονται σε διανυσματική μορφή:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g\nabla H + v_t \nabla^2 V - c_f V + f k \times V \quad (3.17)$$

όπου:

$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ = ο διανυσματικός διαφορικός τελεστής των μερικών παραγώγων

k = το μοναδιαίο διάνυσμα στην κατακόρυφη διεύθυνση

V = το διάνυσμα της ταχύτητας $V=(u,v)$

∇H = η κλίση της επιφάνειας της στάθμης του νερού

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας

f = η παράμετρος Coriolis

- Προσέγγιση διάχυσης κύματος στις εξισώσεις ρηχών υδάτων (Diffusion-wave approximation of the Shallow Water Equations)

Κάνοντας την υπόθεση ότι οι αδρανειακοί όροι είναι πολύ μικρότεροι των όρων τριβής και βαρύτητας, η εξίσωση ορμής (3.17) απλοποιείται στην:

$$V = \frac{-(R(H))^{\frac{2}{3}}}{n} \frac{\nabla H}{|\nabla H|^{\frac{1}{2}}} \quad (3.18)$$

όπου:

V = το διάνυσμα της ταχύτητας

R = η υδραυλική ακτίνα

∇H = η κλίση της επιφάνειας της στάθμης του νερού

n = ο συντελεστής Manning

Όταν η ταχύτητα χαρακτηρίζεται από ισορροπία μεταξύ της κλίσης της βαρομετρικής πίεσης και της τριβής πυθμένα, τότε η εξίσωση (3.18) μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη θέση της εξίσωσης ορμής (3.17). Εισάγοντας την εξίσωση (3.12) στην εξίσωση (3.18) προκύπτει η κλασική διαφορική μορφή της προσέγγισης διάχυσης κύματος των εξισώσεων ρηχών (DSW):

$$\frac{\partial H}{\partial t} - \nabla \cdot \beta \nabla H + q = 0 \quad (3.19)$$

όπου:

$$\beta = \frac{(R(H))^{\frac{5}{3}}}{n|\nabla H|^{\frac{1}{2}}}$$

∇H = η κλίση της επιφάνειας της στάθμης του νερού

H = η στάθμη του νερού [$H(x,y,t)$]

q = όρος πηγής/καταβόθρας

R = η υδραυλική ακτίνα

n = ο συντελεστής Manning

Επιπρόσθετα, εισάγοντας την εξίσωση (3.19) στην εξίσωση συνέχειας (3.14), προκύπτει:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} - \sum_k a \nabla H n + Q = 0 \quad (3.20)$$

όπου:

$$a = a(H) = \frac{(R(H))^{\frac{2}{3}} A_k(H)}{n|\nabla H|^{\frac{1}{2}}}$$

$\Omega(H^n)$ = ο όγκος του κελιού στο χρονικό βήμα n , ως συνάρτηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

$A_k(H)$ = το εμβαδόν του ορίου (face) k , ως συνάρτηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

∇H = η κλίση της επιφάνειας της στάθμης του νερού

n = ο συντελεστής Manning

Q = η παροχή που περνά μέσω του εδάφους (διήθηση) ή πάνω από το έδαφος στο πεδίο Ω (εξάτμιση ή βροχή)

R = η υδραυλική ακτίνα

∇H = η κλίση της επιφάνειας της στάθμης του νερού

H^{n+1}, H^n = η στάθμη του νερού στην οποία οι εκθέτες υποδεικνύουν το χρονικό βήμα

- Οριακές Συνθήκες

Σε κάθε χρονικό βήμα, πρέπει να δίνονται οι οριακές συνθήκες στα όρια του πεδίου. Το HEC-RAS χρησιμοποιεί τις εξής τρεις:

- i. Στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας: Η τιμή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας $H=H_b$ δίνεται σε ένα από τα όρια.
- ii. Κλίση της ελεύθερης επιφάνειας: Θεωρείται η κλίση της επιφάνειας του νερού S_b κάθετα στο όριο: $\nabla H \cdot n = S_b$, όπου n = μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο όριο
- iii. Παροχή: Δίνεται η παροχή Q_b που περνά από το όριο. Στην εξίσωση (3.13) πρέπει να ισχύει:

$$\iint_b V \cdot n dS = Q_b$$

όπου το ολοκλήρωμα υπολογίζεται στο όριο b για το οποίο εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη, n = μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο όριο, V = το διάνυσμα της ταχύτητας και S = η κλίση της επιφάνειας του νερού.

Σε περίπτωση χρήσης βαθυμετρικού κανάβου, τότε στην εξίσωση (3.14) θα πρέπει να ισχύει:

$$V_b \cdot n_b \cdot A_b(H) = Q_b$$

όπου ο δείκτης b δηλώνει το όριο στο οποίο εφαρμόζεται η οριακή συνθήκη, V = το διάνυσμα της ταχύτητας, n = μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα στο όριο, $H = H_b$ = η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας, A = το εμβαδόν του ορίου και Q = η παροχή που περνά από το όριο.

- Υπολογιστική διαδικασία

I. Αριθμητική επίλυση με τις εξισώσεις διάχυσης (DSW)

Για την υδραυλική επίλυση με τις εξισώσεις διάχυσης χρησιμοποιείται η εξίσωση (3.20), στην οποία οι χρονικές παράγωγοι διακριτοποιούνται με πεπερασμένες διαφορές (Finite Differences Approximation), ενώ οι χωρικές παράγωγοι με βάση την υβριδική μέθοδο (Hybrid Approximation). Χρησιμοποιώντας το αριθμητικό σχήμα επίλυσης Crank-Nicolson, η εξίσωση (3.20) γίνεται:

$$\Omega(H^{n+1}) + \theta \sum_j a_j H_j^{n+1} = d - (1 - \theta) \sum_j a_j H_j^n \quad (3.21)$$

όπου:

$\Omega(H^{n+1})$ = ο όγκος του κελιού στο χρονικό βήμα $n + 1$, ως συνάρτηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

H_j^{n+1}, H_j^n = η στάθμη του νερού στην οποία οι εκθέτες υποδεικνύουν το χρονικό βήμα

a_j = συνάρτηση των όρων Δt και α από την εξίσωση (3.20)

$d = \Omega(H^n) - \Delta t Q$

θ = συντελεστής διακριτοποίησης

n = χρονικό βήμα

και τα αθροίσματα $\sum_j a_j H_j^{n+1}, \sum_j a_j H_j^n$ περιλαμβάνουν όλα τα κελιά γύρω από το κελί στο οποίο επιλύεται η εξίσωση.

Η εξίσωση (3.21) επιλύεται για κάθε κελί στο πεδίο. Προκύπτει η διανυσματική εξίσωση για όλα τα κελιά:

$$\Omega(H) = \Psi H = b \quad (3.22)$$

όπου:

Ω = το διάνυσμα του όγκου για όλα τα κελιά

H = το διάνυσμα της στάθμης του νερού για όλα τα κελιά

Ψ = ο συντελεστής πίνακα του συστήματος των εξισώσεων

b = διάνυσμα δεξιού σκέλους

Η Jacobian παράγωγος του Ω σε σχέση με το H δίνεται από τη βαθυμετρική σχέση $P(H)$, όπου $P(H)$ ο διαγώνιος πίνακας της υγρής επιφάνειας των κελιών. Προκύπτει έτσι ο επαναληπτικός τύπος:

$$H^{m+1} = H^m - (P(H^m) + \Psi)^{-1}(\Omega(H^m) + \Psi H^m - b) \quad (3.23)$$

όπου το m δηλώνει τον δείκτη επανάληψης, H = το διάνυσμα της στάθμης του νερού, Ω = το διάνυσμα του όγκου, Ψ = ο συντελεστής πίνακα του συστήματος των εξισώσεων, b = διάνυσμα δεξιού σκέλους.

II. Αριθμητική επίλυση με τις εξισώσεις ρηχών υδάτων (SW)

Για την αριθμητική επίλυση με τις εξισώσεις αβαθών υδάτων, διακριτοποιείται η εξίσωση συνέχειας με βάση την μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Approximation). Για την εξίσωση ορμής η διακριτοποίηση ποικίλει ανάλογα με τον όρο.

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας (3.14) διακριτοποιείται ως εξής:

$$\frac{\Omega(H^{n+1}) - \Omega(H^n)}{\Delta t} + \sum_k \pm A_k(H) ((1 - \theta)(u_N)_k^n + \theta(u_N)_k^{n+1}) + Q = 0 \quad (3.24)$$

όπου:

$\Omega(H^n)$ = ο όγκος του κελιού στο χρονικό βήμα n , ως συνάρτηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

$A_k(H)$ = το εμβαδόν του ορίου (face) k ως συνάρτηση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

Δt = η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών χρονικών βημάτων

H^{n+1} , H^n = η στάθμη του νερού στην οποία οι εκθέτες υποδεικνύουν το χρονικό βήμα

Q = η παροχή που περνά μέσω του εδάφους (διήθηση) ή πάνω από το έδαφος στο πεδίο Ω (εξάτμιση ή βροχή)

θ = συντελεστής διακριτοποίησης

u_N = κάθετος προς τα έξω στο όριο k

Για τις ταχύτητες, ακολουθείται η ίδια προσέγγιση όπως στην επίλυση με τις εξισώσεις διάχυσης, οπότε εκφράζονται ως ένας γραμμικός συνδυασμός της στάθμης της επιφάνειας του ύδατος στα γειτονικά κελιά και οι όροι ομαδοποιούνται με βάση τους χωρικούς και χρονικούς δείκτες. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει μία εξίσωση στην μορφή της σχέσης (3.17).

Στην εξίσωση ορμής (3.22), μόνο οι όροι της επιτάχυνσης, της κλίσης της βαρομετρικής πίεσης και της τριβής πυθμένα περιλαμβάνουν μεταβλητές για τις οποίες επιλύεται η εξίσωση. Οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης επιλύονται με βάση την παρακάτω μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα η διακριτοποίηση των προαναφερθεισών όρων είναι ως εξής:

- Επιτάχυνση:

$$\frac{DV}{Dt} \approx \frac{V^{n+1} - V_X^n}{\Delta t} \quad (3.25)$$

όπου η ταχύτητα V^{n+1} υπολογίζεται στο όριο (face) του κελιού ενώ η ταχύτητα V_X η στο σημείο X , το οποίο βρίσκεται ολοκληρώνοντας την ταχύτητα με οπίσθιες διαφορές ξεκινώντας από τη θέση του υπολογιστικού ορίου.

- Κλίση της βαρομετρικής πίεσης:

$$-g\nabla H \approx g \sum_j c_j \left((1 - \theta)H_j^n + \theta H_j^{n+1} \right) \quad (3.26)$$

όπου c_j είναι διανυσματικές σταθερές, θ = συντελεστής διακριτοποίησης, g = η επιτάχυνση της βαρύτητας, H_j^{n+1} , H_j^n : η στάθμη του νερού στην οποία οι εκθέτες υποδεικνύουν το χρονικό βήμα, ∇H = η κλίση της επιφάνειας της στάθμης του νερού.

- Τριβή πυθμένα:

$$c_f = \frac{n^2 g |V|}{R^{4/3}} \quad (3.27)$$

όπου n = ο συντελεστής Manning, R = η υδραυλική ακτίνα, g = η επιτάχυνση της βαρύτητας και $V = (u, v)$ = το διάνυσμα της ταχύτητας.

- Διάνυσμα της ταχύτητας $V = (u, v)$:

$$V_*^{n+1} = \begin{pmatrix} u_*^{n+1} \\ v_*^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\theta \Delta t f \\ \theta \Delta t f & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} u_X^n + (1 - \theta \Delta t f) v_X^n \\ v_X^n + (1 - \theta \Delta t f) u_X^n \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

όπου f η παράμετρος Coriolis, θ = συντελεστής διακριτοποίησης, η ταχύτητα u_X^n , v_X^n στο σημείο X , το οποίο βρίσκεται ολοκληρώνοντας την ταχύτητα με οπίσθιες διαφορές ξεκινώντας από τη θέση του υπολογιστικού ορίου.

Ο προσδιορισμός της άγνωστης στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις διάχυσης (DSW) γίνεται με επαναληπτική διαδικασία ως εξής:

1. Η γεωμετρία και τα δεδομένα του κανάβου δίδονται ή υπολογίζονται
2. Η επίλυση ξεκινά για H^0 ως αρχική συνθήκη για το χρονικό βήμα $n = 0$
3. Υπολογίζονται οι οριακές συνθήκες για το επόμενο χρονικό βήμα $n + 1$
4. Γίνεται η αρχική υπόθεση $H^{n+1} + 1 = H^n$
5. Υπολογίζεται η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας $H = (1 - \theta)H_j^n + \theta H_j^{n+1}$ και οι υπόλοιπες μεταβλητές του κανάβου που είναι συναρτήσεις του H , όπως το εμβαδόν των ορίων των κελιών, το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας, η υδραυλική ακτίνα, ο συντελεστής Manning, κτλ.
6. Υπολογίζονται οι συντελεστές α_j
7. Επιλύεται η εξίσωση (3.26) με τις δοσμένες οριακές συνθήκες και δίνεται μία λύση για το H^{n+1}
8. Η ευρεθείσα τιμή του H^{n+1} συγκρίνεται με την τιμή από την αρχική υπόθεση (βήμα 4). Αν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από μία δοσμένη απόκλιση (και δεν έχει επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων), τότε επαναλαμβάνεται το βήμα 5. Διαφορετικά συνεχίζουμε στο επόμενο βήμα.
9. Με βάση την τιμή H^{n+1} υπολογίζεται η ταχύτητα V^{n+1} από την εξίσωση (3.18)
10. Προχωράμε στο επόμενο χρονικό βήμα $(n + 2)$ μέχρι το τέλος των υπολογισμών.

Αντίστοιχα για την επίλυση με τις εξισώσεις των ρηχών υδάτων (SW) ακολουθείται η ανωτέρω διαδικασία, υιοθετώντας επιπλέον στο βήμα 2 και την αρχική ταχύτητα u_N^0 ως αρχική συνθήκη και υποθέτοντας ότι $u_N^{n+1} = u_N^n$ η για το βήμα 4. Η ταχύτητα u_N^{n+1} υπολογίζεται στο βήμα 9 από την

εξίσωση (3.28). Επιπλέον, πριν το βήμα 5 και τον υπολογισμό της ελεύθερης επιφάνειας, υπολογίζονται οι όροι της εξίσωσης ορμής που παραμένουν σταθεροί ανεξάρτητα του χρονικού βήματος.

3.3.3.2. Εισαγόμενα Στοιχεία

Ο κύριος στόχος του HEC-RAS είναι να υπολογισθεί η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας σε όλα τα σημεία ενός πεδίου για δοσμένα υδρολογικά στοιχεία. Για την λειτουργία του λογισμικού απαιτούνται δεδομένα τα οποία σχετίζονται τόσο με την γεωμορφολογία της περιοχής διερεύνησης, όσο και με τις εκάστοτε συνθήκες ροής του υδατορεύματος. Αναλυτικότερα σε κάθε περίπτωση η πορεία που ακολουθείται ούτως ώστε να προσδιοριστεί το μέγιστο εύρος κατάκλυσης, περιλαμβάνει την εισαγωγή και επεξεργασία του γεωγραφικού υποβάθρου, καθώς και επιπρόσθετων μορφολογικών στοιχείων, την εισαγωγή και επεξεργασία των συνθηκών ροής, την προσομοίωση και τέλος την εξαγωγή και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων.

Τα βασικά γεωμετρικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στο περιβάλλον του HEC-RAS περιλαμβάνουν στοιχεία όπως η γεωμετρία του ποταμού και οι συμβολές με παραποτάμους, οι διατομές των ποταμών, τυχόν υπάρχουσες υδραυλικές κατασκευές, πχ. γέφυρες, οχετοί, φράγματα, αναχώματα, υδατοφράχτες, κτλ., αντλίες, περιοχές αποθήκευσης (λίμνες ή δεξαμενές), και δισδιάστατες πλημμυρικές περιοχές. Τα προαναφερθέντα στοιχεία μπορούν είτε να σχεδιασθούν στο περιβάλλον του προγράμματος, είτε να εισαχθούν έτοιμα μέσω μίας επέκτασης του προγράμματος ArcGIS, συμβατή με το HEC-RAS, του HEC Geo-RAS. Για την μελέτη των πλημμυρικών εκτάσεων είναι απαραίτητη η εισαγωγή γεωγραφικού υπόβαθρου (Terrain) με υψομετρικά δεδομένα από το GIS. Για την υδραυλική προσομοίωση ορίζεται, αρχικά, το σύστημα των ποταμών (κλάδος κύριου ποταμού με τους παραποτάμους του – River System Schematic) και δίνονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία, όπως οι άξονες και τα ονόματα των ρευμάτων, η κατεύθυνση της ροής και τα δεδομένα των συνδέσεων (junction). Στη συνέχεια, εισάγονται οι διατομές των ποταμών, περιλαμβάνοντας πληροφορίες όπως η χιλιομετρική θέση και η γεωμετρία της διατομής, καθώς και οι απώλειες που συντελούνται σε αυτήν (συντελεστής Manning, συντελεστές για την μείωση και αύξηση της υγρής διατομής -contraction & expansion coefficients). Έπειτα δίδονται ως υπόβαθρο εικόνες ή γεωγραφικά δεδομένα, μέσω του HEC-RAS Mapper. Το γεωγραφικό υπόβαθρο είναι απαραίτητο για τη δισδιάστατη ανάλυση, καθώς χρησιμοποιείται για να προσδιορισμό των γεωγραφικών και υδραυλικών στοιχείων των κελιών του υπολογιστικού δισδιάστατου κανάβου. Επιπρόσθετα, μπορούν να εισαχθούν ξεχωριστοί συντελεστές Manning σε όλο το εύρος του δισδιάστατου πεδίου (Land Cover), διακρίνοντας περιοχές με διαφορετική μορφολογία εδάφους (οικισμοί, δάση, καλλιεργήσιμες εκτάσεις, κτλ.).

Απαραίτητα επιπρόσθετα στοιχεία για την γεωμετρική απεικόνιση της εκάστοτε υπό μελέτης περιοχής είναι οι υδραυλικές κατασκευές που αυτή περιλαμβάνει. Τέτοιου είδους κατασκευές συνηθέστερα είναι οι γέφυρες. Το HEC-RAS υπολογίζει τις ενεργειακές απώλειες που συντελούνται στις γέφυρες σε τρία διαφορετικά σημεία: ανάντη, κατάντη και στη θέση της γέφυρας, και σε συνθήκες χαμηλής παροχής (low flow), παροχής υπό πίεση (όταν η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας έρχεται σε επαφή με την κρέμαση του φορέα –pressure flow), υπερπήδησης (weir flow) και συνδυασμός αυτών. Τα στοιχεία των γεφυρών που χρησιμοποιούνται για τους υπολογισμούς είναι η γεωμετρία της στέψης, τα ακρόβαθρα και τα μεσόβαθρα (εφόσον υπάρχουν) και παράμετροι που αφορούν την υδραυλική επίλυση των γεφυρών. Άλλου είδους υδραυλικές κατασκευές είναι οι πλευρικοί εκχειλιστές (Lateral Structures). Οι πλευρικοί εκχειλιστές είναι στοιχεία που αναπτύσσονται παράλληλα με την ροή του ποταμού. Μπορεί να αντιπροσωπεύουν μια ποικιλία έργων όπως πλευρικά τοιχεία με ή χωρίς θυροφράγματα, οχετούς κλπ. Επίσης μπορούν να

συνδέονται με άλλο τμήμα ποταμού (reach), με κάποια περιοχή αποθήκευσης/λίμνης (Storage Area) ή δισδιάστατη περιοχή (2D Flow Area). Ανάλογες κατασκευές που μπορούν να προσομοιωθούν από το HEC-RAS, πέρα των προαναφερθέντων, είναι εγκάρσια ή πλευρικά έργα στη ροή, πχ. οχετοί, φράγματα, υδατοφράχτες, αυλάκια εκτροπής, κτλ.

Στο αριθμητικό μοντέλο HEC-RAS, το πλημμυρικό πεδίο απεικονίζεται με δύο τρόπους: με περιοχές αποθήκευσης (Storage Areas) ή με δισδιάστατες περιοχές (2D Flow Areas). Οι περιοχές αποθήκευσης είναι περιοχές συγκέντρωσης νερού στις οποίες εκτρέπεται προς ή από αυτές το νερό. Μπορούν να βρίσκονται στο ανάντη ή κατόντη τμήμα ενός ποταμού ή να συνδέονται με αυτόν πλευρικά. Επίσης, μπορούν δύο ή παραπάνω περιοχές να συνδέονται μεταξύ τους υδραυλικά (SA/2D Area Connection) με κάποιο τεχνικό έργο, πχ. υδατοφράχτη. Ανάλογο στοιχείο είναι και οι δισδιάστατες περιοχές, στις οποίες το HEC-RAS χρησιμοποιεί τον δισδιάστατο αλγόριθμο επίλυσης και σε αυτές ορίζεται ο υπολογιστικός κλίμακός. Ομοίως με τις περιοχές αποθήκευσης, τοποθετούνται στο ανάντη ή κατόντη τμήμα ενός ποταμού ή συνδέονται με αυτόν πλευρικά και μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους (ή/και με άλλες περιοχές αποθήκευσης) με τεχνικό έργο. Προκειμένου να προσομοιωθούν τα δύο είδη περιοχών σχεδιάζονται τα όριά τους χρησιμοποιώντας πολύγωνα, στα οποία εισάγονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία.

Ύστερα από την ολοκλήρωση της επεξεργασίας του γεωμετρικού υποβάθρου ακολουθεί η εισαγωγή των συνθηκών ροής. Η ροή μπορεί να είναι μόνιμη (Steady Flow) ή μη μόνιμη (Unsteady Flow). Στην πρώτη περίπτωση, εισάγεται μία μόνιμη παροχή σε κάθε κλάδο του ποταμού και οι οριακές του συνθήκες. Στην δεύτερη περίπτωση, εισάγεται μια οριακή συνθήκη σε κάθε εξωτερικό όριο του υπολογιστικού πεδίου, καθώς και σε οποιαδήποτε επιθυμητή θέση μέσα σε αυτό. Επίσης, ορίζεται η αρχική παροχή και οι αρχικές συνθήκες για κάθε περιοχή αποθήκευσης/δισδιάστατη πριν την έναρξη της προσομοίωσης. Το είδος της οριακής συνθήκης ποικίλει ανάλογα με τη θέση που εισάγεται και μπορεί να είναι: 1) Υδρογράφημα παροχών ή στάθμης ή συνδυασμός και των δύο, 2) καμπύλες rating curves και 3) κλίση της τριβής (Normal Depth).

Εφόσον έχουν εισαχθεί όλα τα γεωμετρικά δεδομένα και οι συνθήκες ροής, είναι εφικτή στη συνέχεια η αριθμητική προσομοίωση και η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

3.3.3.3. Εξαγόμενα Αποτελέσματα

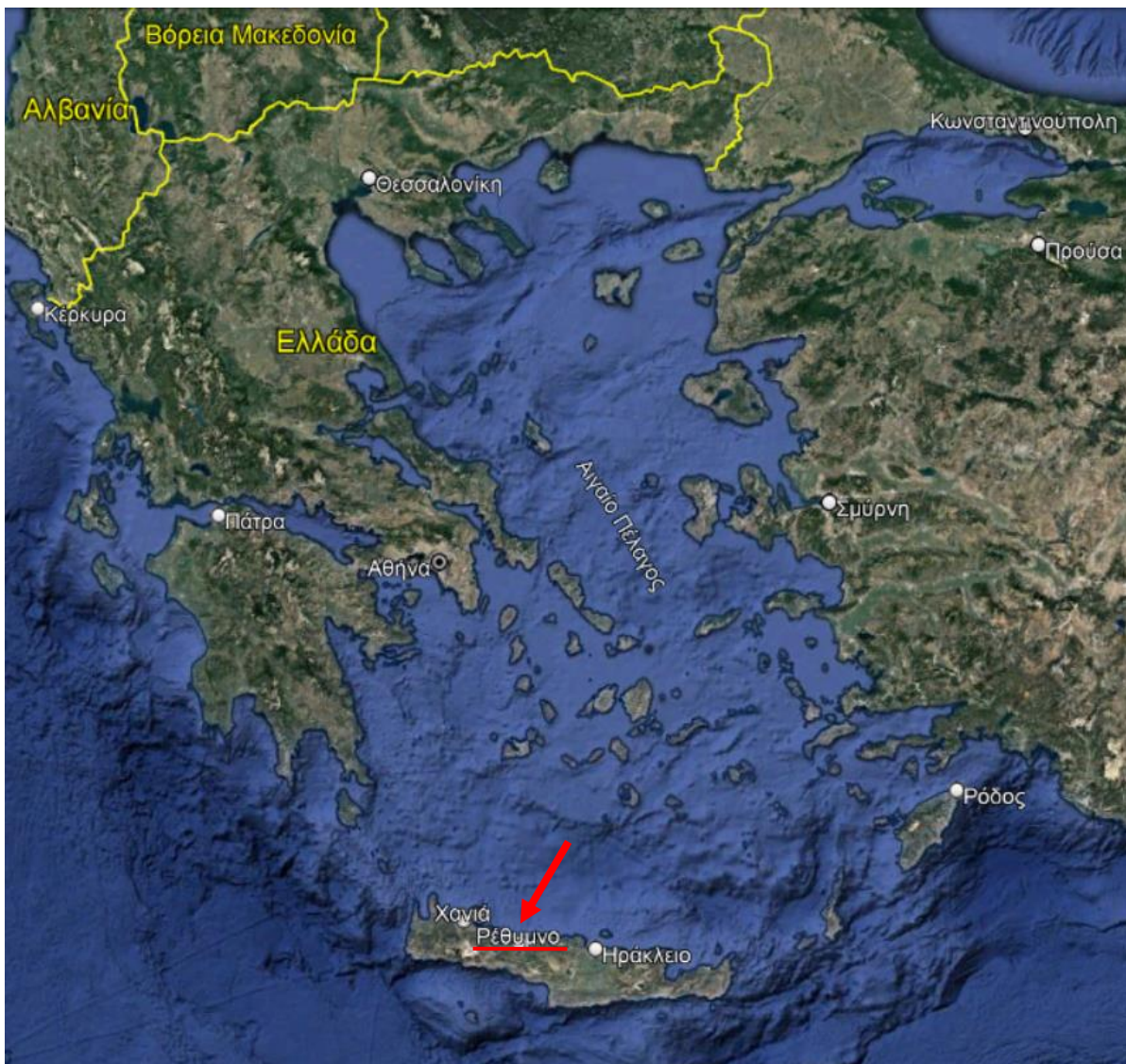
Τα αποτελέσματα από τους υδραυλικούς υπολογισμούς στο HEC-RAS δίδονται σε μορφή γραφημάτων και πινάκων, στα οποία απεικονίζονται σταθμηγραφήματα και υδρογραφήματα σε κάθε διατομή, προφίλ των υδραυλικών στοιχείων, όπως πχ. η στάθμη του ύδατος, το βάθος ροής, η ταχύτητα κ.α., καθώς και αναλυτικοί και συνοπτικοί πίνακες όλων των υδραυλικών αποτελεσμάτων. Επίσης δίνεται η δυνατότητα για τρισδιάστατη απεικόνιση του υδατορεύματος με τα εξαγόμενα υδραυλικά στοιχεία. Τέλος, με την χρήση γεωγραφικού υποβάθρου, μπορούν να εξαχθούν πλημμυρικοί χάρτες (δυναμικοί και στατικοί) και να γίνει αναπαράσταση των ζωνών κατάκλυσης μέσω του HEC-RAS Mapper.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

4.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ

Η περιοχή διερεύνησης, στην οποία εφαρμόζεται η προτεινόμενη μεθοδολογία, είναι η παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου στο νησί της Κρήτης, στην Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα (Εικόνα 4-1, Εικόνα 4-2). Βρίσκεται στο Νομό Ρεθύμνου, ο οποίος είναι ένας από τους τέσσερις Νομούς της Κρήτης στην Ελλάδα.

Ο πληθυσμός της πόλης του Ρεθύμνου ανέρχεται στους 32.468 κατοίκους, που την χαρακτηρίζουν ως την τρίτη σε πληθυσμό αστική περιοχή στην Κρήτη. Το Ρέθυμνο είναι το κέντρο εμπορικών, διοικητικών και πολιτιστικών δραστηριοτήτων της ομώνυμης Περιφερειακής Ενότητας στην οποία, μάλιστα, οι περισσότερες ανθρώπινες δραστηριότητες αναπτύσσονται στην περιοχή του λιμανιού.



Εικόνα 4-1: Θέση περιοχής διερεύνησης σε σχέση με την Ελλάδα [Πηγή: Google Earth]



Εικόνα 4-2: Θέση περιοχής διερεύνησης σε σχέση με την Κρήτη [Πηγή: Google Earth]

Ο λιμένας Ρεθύμνου όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4-1 είναι εκτεθειμένος όσον αφορά το κυματικό κλίμα προς τη βορεία διεύθυνση. Το ανάπτυγμα πελάγους προς την εκτεθειμένη αυτή πλευρά είναι πολύ μεγάλο καθώς η απόσταση από την πλησιέστερη ξηρά είναι μεγαλύτερη των 100 χιλιομέτρων. Η θέση επομένως του λιμένα επιτρέπει την εμφάνιση έντονων κυματικών φαινομένων.

Στην παρούσα Μ.Δ.Ε. διερευνώνται οι θέσεις της ακτογραμμής του Ρεθύμνου οι οποίες έχουν κριθεί ως επιρρεπείς σε πλημμυρικά φαινόμενα αλλά και οι περιοχές πίσω από την ακτογραμμή, στο παραλιακό τμήμα της πόλης οι οποίες επηρεάζονται σημαντικά από τα πλημμυρικά γεγονότα. Οι περιοχές επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις στοιχεία που συλλέχθηκαν σχετικά με κατακλύσεις του παρελθόντος. Ο ακόλουθος χάρτης (Εικόνα 4-6) δημιουργήθηκε σύμφωνα με μαρτυρίες των κατοίκων και καταγραφές από οπτικοακουστικό υλικό (φωτογραφίες και βίντεο) και σύμφωνα με καταγεγραμμένα έντονα πλημμυρικά γεγονότα του παρελθόντος στην περιοχή.

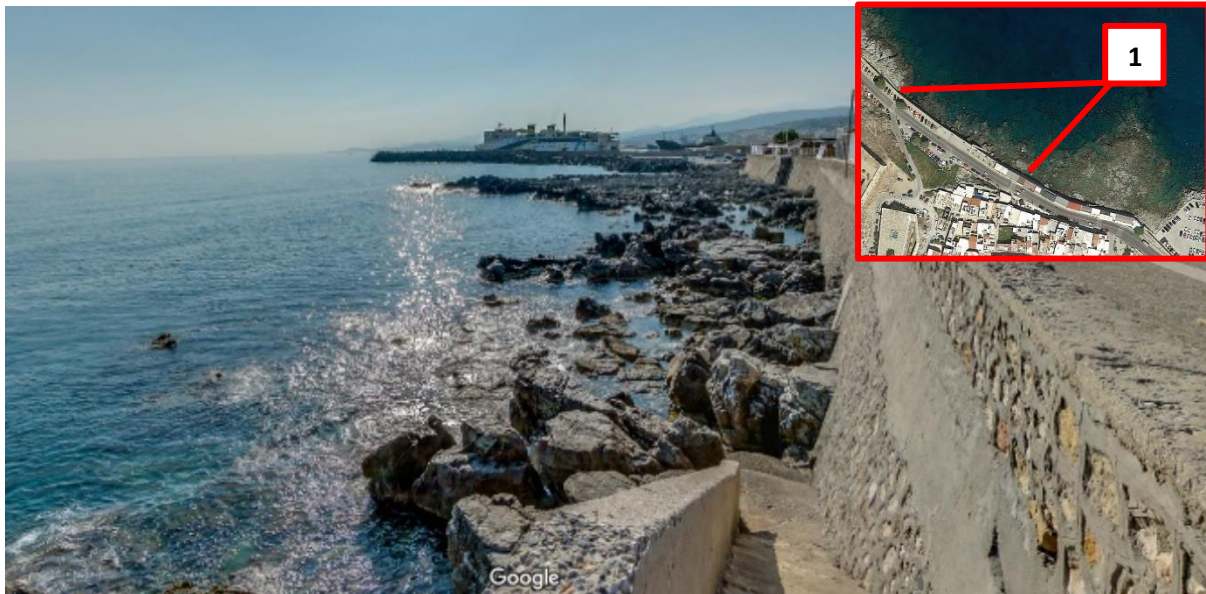
Τα μέτωπα κατά μήκος της ακτογραμμής τα οποία διερευνώνται καθώς κρίθηκαν ως περισσότερο ευαίσθητα έναντι των πλημμυρικών φαινομένων σε σχέση με την υπόλοιπη ακτογραμμή είναι τα εξής τρία (3) :

- 1) **Μέτωπο 1.** Το χερσαίο όριο μπροστά από τον παραλιακό δρόμο στην θέση όπου απεικονίζεται στην (Εικόνα 4-6) με κίτρινο χρώμα,
- 2) **Μέτωπο 2.** Η ακτογραμμή μπροστά από το χώρο στάθμευσης και σε επαφή με αυτόν με κόκκινο χρώμα και
- 3) **Μέτωπο 3.** Το όριο της εξωτερικής πλευράς του προσήνεμου μώλου του λιμένα με πορτοκαλί χρώμα

και περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους.

Το πρώτο τμήμα αφορά την ακτογραμμή βόρεια του παραλιακού δρόμου. Στο μεγαλύτερο μήκος του, στο οποίο εκτείνεται ο παραλιακός δρόμος, η απόσταση του από την θάλασσα είναι αρκετά μεγάλη, καθώς βόρεια του υπάρχουν έξαλοι βραχώδεις σχηματισμοί, πλάτους της τάξεως των 20 – 60 μέτρων. Μόνη εξαίρεση αποτελεί η περιοχή διερεύνησης, μήκους περίπου 120 μέτρων, στην οποία ο παραλιακός δρόμος έρχεται σχεδόν σε επαφή με την ακτογραμμή, οι βραχώδεις σχηματισμοί έχουν πολύ μικρότερο πλάτος και θεωρούνται οριακά ίσαλοι. Ο παραλιακός δρόμος έχει κατασκευασθεί επί κρηπιδώματος από φυσικούς ογκολίθους και σκυρόδεμα με έντονη κλίση

και είναι αρκετά υπερυψωμένος σε σχέση με την ακτογραμμή αλλά και σε σχέση με τις άλλες δύο περιοχές, οι οποίες περιγράφονται ακολούθως.



Εικόνα 4-3: Πρώτη θέσει διερεύνησης επί της ακτογραμμής – βόρεια του παραλιακού δρόμου [Πηγή: Google Maps]

Το δεύτερο μέτωπο εντοπίζεται βόρεια του υφιστάμενου χώρου στάθμευσης του Λιμένα Ρεθύμνου. Είναι θωρακισμένο έναντι των κυματικών φαινομένων με Τεχνητούς Ογκόλιθους τύπου Tetrapod και διαθέτει προφυλακτήριο τοίχο με ύψος στέψης ίδιο με εκείνο των Tetrapod, το οποίο υπερβαίνει κατά πολύ το επίπεδο του χώρου στάθμευσης του λιμένα. Η έκταση της είναι περίπου 120 μέτρα. Η περιοχή του παραλιακού χώρου στάθμευσης έχει το χαμηλότερο ύψος στάθμης μεταξύ των τριών περιοχών.



Εικόνα 4-4: Δεύτερη θέση διερεύνησης επί της ακτογραμμής – βόρεια του χώρου στάθμευσης [Πηγή: Google Maps]

Το τρίτο και τελευταίο μέτωπο διερεύνησης αποτελεί την εξωτερική πλευρά του προσήνεμου μώλου του λιμένα Ρεθύμνου στο τμήμα το οποίο είναι κάθετο στην ακτή. Είναι και αυτή θωρακισμένη έναντι των κυματικών φαινομένων με Τεχνητούς Ογκόλιθους τύπου Tetrapod και διαθέτει προφυλακτήριο τοίχο με ύψος στέψης ίδιο με εκείνο των Tetrapod, όπως και η Περιοχή 2. Η θωράκιση προστατεύει τμήμα της χερσαία ζώνης του λιμένα με πλάτος περίπου 45 μέτρα και μήκος και πλάτος 200 περίπου μέτρα. Το μήκος της τρίτης περιοχής είναι περίπου 200 μέτρα. Η περιοχή της χερσαίας ζώνης του προσήνεμου μώλου είναι κατασκευασμένη σε στάθμη εργασίας υψηλότερη από εκείνη του χώρου στάθμευσης (δεύτερη περιοχή) αλλά χαμηλότερη από εκείνη του παραλιακού δρόμου (πρώτη περιοχή).



Εικόνα 4-5: Τρίτη θέση διερεύνησης επί της ακτογραμμής – προσήνεμος μώλος λιμένα Ρεθύμνου [Πηγή: Google Maps]

Πίσω από την ακτογραμμή, η περιοχή χωρίσθηκε σε τέσσερις (4) υποπεριοχές οι οποίες, θεωρήθηκε ότι κινδυνεύουν περισσότερο από κατάκλυση θαλασσινού νερού κατά τη διάρκεια καταιγίδας, αποτυπώνονται στο χάρτη της **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** με έντονο γαλάζιο χρώμα και περιγράφονται ως εξής :

Υποπεριοχή 1. Παραλιακός δρόμος δυτικά του λιμανιού (Coastal Road). Συγκεκριμένα εξετάζεται η παραλιακή Λεωφόρος Εμμανουήλ Κεφαλογιάννη στο ύψος που βρίσκεται πίσω από την πρώτη ευαίσθητη ζώνη της ακτογραμμής.

Υποπεριοχή 2. Χώρος στάθμευσης (Parking Area). Αφορά την περιοχή του χώρου στάθμευσης του λιμένα Ρεθύμνου, η οποία βρίσκεται στη βόρεια πλευρά της ρίζας του προσήνεμου μώλου, πίσω από τη δεύτερη ευαίσθητη ζώνη της ακτογραμμής.

Υποπεριοχή 3. Περιοχή Λιμένα (Port Area). Η έκταση αυτή αφορά την περιοχή των κρηπιδωμάτων και της χερσαίας ζώνης του κεντρικού λιμένα Ρεθύμνου και του βόρειου τμήματος του παλαιού Ενετικού λιμένα. Ένα τμήμα της βρίσκεται πίσω από την τρίτη ευαίσθητη ζώνη της ακτογραμμής, αυτό επί του προσήνεμου μώλου.

Υποπεριοχή 4. Αστική ζώνη (Urban Area). Ως αστική ζώνη ορίζεται η κατοικημένη περιοχή πλησίον του λιμένα η οποία όπως προκύπτει από τις μαρτυρίες κατακλύεται συχνά από πλημμυρικά συμβάντα. Η θέση της εντοπίζεται νότια του χώρου στάθμευσης και νοτιοανατολικά της χερσαίας ζώνης του λιμένα Ρεθύμνου.

Στον ακόλουθο χάρτη απεικονίζονται, τα τρία μέτωπα και οι τέσσερις υποπεριοχές που διερευνώνται στην παρούσα διπλωματική.



Εικόνα 4-6: Παράκτιες περιοχές του Ρεθύμνου με τάσεις πλημμύρας

Σημαντικά γεγονότα παράκτιων πλημμυρών έχουν παρατηρηθεί όλα αυτά τα χρόνια στην περιοχή, κυρίως λόγω των συνδυασμένων επιπτώσεων της μετεωρολογική παλίρροιας και της υπερπήδησης των κυματισμών (κυρίως στις περιοχή της θωράκισης έμπροσθεν του χώρου στάθμευσης, με αποτέλεσμα σοβαρές ζημιές και αποτελώντας σοβαρή απειλή για την ασφάλεια των κατοίκων όσον αφορά την παράκτια ζώνη. Σύμφωνα με μαρτυρίες των κατοίκων, το νερό μπορεί να διεισδύσει στην αστική περιοχή σε λιγότερο από μισή ώρα, από την έναρξη του γεγονότος (δηλαδή τα πρώτα κύματα ξεπερνούν τα έργα θωράκισης που πραστατεύουν το χώρο στάθμευσης και το λιμένα), και η διάρκεια μπορεί να φτάσει έως και μερικές ώρες. Η συχνή εμφάνιση αυτών των σύνθετων γεγονότων εντείνει την ανάγκη μελέτη τους και διερεύνηση των αιτιών πρόκλησής τους.

4.2. ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΠΛΗΜΜΥΡΙΚΑ ΓΕΓΟΝΟΤΑ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΩΝΤΑΙ

Όπως προαναφέρεται και στο κεφάλαιο 3.2 για την αξιολόγηση της ορθότητας και ακρίβειας των αποτελεσμάτων του προτεινόμενου πλαισίου προσομοιώσεων χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα από πλημμύρες οι οποίες έχουν εξελιχθεί στο παρελθόν. Στην περιοχή του Ρεθύμνου έχουν καταγραφεί πληθώρα πλημμυρικών φαινομένων. Τα μεγαλύτερα εξ αυτών, για την περίοδο από το 2006 έως το 2020. Κατά τη διάρκεια αυτών των συμβάντων, η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας λόγω της μετεωρολογικής παλίρροιας και η κυματική υπερπήδηση οδήγησαν στην εμφάνιση ισχυρών παράκτιων πλημμυρών, με σοβαρές συνέπειες στην παράκτια ζώνη. Ανάμεσα, στα πλημμυρικά γεγονότα του παρελθόντος τα οποία έλαβαν χώρα στις παράκτιες περιοχές είναι Ρεθύμνου, επιλέχθηκαν τέσσερα (4) για την εφαρμογή της μεθοδολογίας της παρούσας έρευνας.

Τα γεγονότα αυτά επιλέχθηκαν βάσει του επάρκειας των διαθέσιμων στοιχείων και καταγραφών (βίντεο και εικόνες) που συλλέχθηκαν για κάθε ένα και είναι τα εξής:

Πίνακας 4-1: Πλημμυρικά γεγονότα του παρελθόντος για τα οποία θα εφαρμοσθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία

Παράκτιο Πλημμυρικό Συμβάν:	S1	S2	S3	S4
Ημερομηνία Συμβάντος:	11/12/2010	28/02/2012	01/01/2015	13/01/2015

Στις ακόλουθες εικόνες (Εικόνα 4-7, Εικόνα 4-8, Εικόνα 4-9, Εικόνα 4-10, Εικόνα 4-11) παρουσιάζονται στιγμιότυπα από το οπτικοακουστικό υλικό το οποίο συλλέχθηκε τις ημέρες των τεσσάρων αυτών πλημμυρών. Εμφανής και στις τέσσερις περιπτώσεις είναι η υπερπήδηση των κυματισμών από την πλευρά της θωράκισης με τεχνητούς ογκολίθους και η κατάκλυση του μεγαλύτερου μέρους της περιοχής του λιμένα Ρεθύμνου, με το νερό να εισέρχεται από την περιοχή του χώρου στάθμευσης και του προσήνεμου μώλου και να καταλήγει εντός της λιμενολεκάνης του παλαιού Ενετικού Λιμένα.



Εικόνα 4-7: Περιοχή Ρεθύμνου (11.12.2010). «Το νερό έχει κατακλύσει όλη την περιοχή του λιμένα Ρεθύμνου» [Πηγή: https://www.youtube.com/watch?v=JM_hC0lOyT0]



Εικόνα 4-8: Περιοχή Ρεθύμνου (11.12.2010). «Κυματική υπερπήδηση στην περιοχή του χώρου στάθμευσης και του προσήνεμου μώλου του λιμένα Ρεθύμνου» [Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=jdY8qKaZS5w>]



Εικόνα 4-9: Περιοχή Ρεθύμνου (28.02.2012). «Η θάλασσα κάλυψε το χώρο στάθμευσης και το λιμάνι» [Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=1HEGUwHsnGg>]



Εικόνα 4-10: Περιοχή Ρεθύμνου (01.01.2015). «Ολόκληρη η περιοχή του λιμένα καλύφθηκε από νερό» [Πηγή: www.Rethemosnews.gr, <https://www.youtube.com/watch?v=PwWlUKMhPvU>]



Εικόνα 4-11: Περιοχή Ρεθύμνου (13.01.2015). «Τα κύματα υπερπηδούν τη θωράκιση και πλημμυρίζει η περιοχή του λιμένα Ρεθύμνου» [Πηγή: <https://www.youtube.com/watch?v=dq6R24HSA1s>]

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Η μεθοδολογία, όπως προαναφέρεται, θα εφαρμοστεί σε πραγματική περιοχή για να αναδείξει την ευκολία εφαρμογής και τη σημαντικότητα των αποτελεσμάτων που προσφέρει. Στην παρούσα ΜΔΕ επιλέχθηκε η περιοχή του Ρεθύμνου της Κρήτης γιατί είναι μια περιοχή που πλήττεται σφοδρά και συχνά από παράκτιες πλημμύρες, ενώ ταυτόχρονα εξαιτίας της έντονης τουριστικής, οικιστικής και εμπορικής δραστηριότητας πολύ κοντά στην ακτογραμμή όπως προαναφέρθηκε, τίθενται σε κίνδυνο η ασφάλεια των κατοίκων, οι ιδιοκτησίες και οι υποδομές. Επισημαίνεται εδώ ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να βρει εφαρμογή σε οποιαδήποτε παράκτια περιοχή. Στα ακόλουθα υποκεφάλαια περιγράφεται αναλυτικά η εφαρμογή της μεθοδολογίας στην παράκτια περιοχή δυτικά του λιμένα Ρεθύμνου.

5.1. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΑΝΟΙΧΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ

Το πρώτο βήμα είναι η συλλογή και ανάλυση ιστορικών δεδομένων θαλάσσιας κατάστασης. Προκειμένου να ευρεθούν αξιόπιστα δεδομένα, αξιοποιούνται ανοιχτές βάσεις δεδομένων. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η μεθοδολογία συλλογής και ανάλυσης αυτών των δεδομένων.

5.1.1. ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΚΛΙΜΑ ΣΤΑ ΑΝΟΙΧΤΑ

Τα χαρακτηριστικά του κυματικού κλίματος ελήφθησαν από την ανοιχτή βάση δεδομένων Copernicus και συγκεκριμένα από το πακέτο με τίτλο MEDSEA_MULTIYEAR_WAV για το χρονικό διάστημα 01/01/1993 έως 31/12/2019, δηλαδή για διάστημα είκοσι επτά (27) ετών.

Αυτό το πακέτο δεδομένων παράγεται από το σύστημα πρόβλεψης των κυμάτων της Μεσογείου, το οποίο είναι ένα κυματικό μοντέλο βασισμένο στο WAM Cycle 4.5.4 και έχει αναπτυχθεί ως σύνθετη ακολουθία δύο υπολογιστικών πλεγμάτων (χονδροειδών και λεπτομερών) για να διασφαλιστεί ότι η διάδοση της αποθάλασσας (swell) από το Βόρειο Ατλαντικό προς το στενό του Γιβραλτάρ εισέρχεται ορθά στη Μεσόγειο Θάλασσα (MED). Το χονδροειδές πλέγμα καλύπτει τον Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό από 75 ° Δ έως 10 ° Α και από 70 ° Β έως 10 ° Ν σε ανάλυση 1/6 °, ενώ το εσωτερικό λεπτομερές πλέγμα καλύπτει τη Μεσόγειο Θάλασσα από 18,125 ° Δ έως 36,2917 ° Α και από 30.1875 ° Β έως 45.9792 ° Β με ανάλυση 1/24 ° (~ 4.6km).

Το σύστημα προσομοίωσης Med-Waves επιλύει το προγνωστικό μέρος του φάσματος των κυμάτων με είκοσι τέσσερις (24) κατευθύνσεις και τριάντα δύο (32) λογαριθμικά κατανεμημένες ομάδες συχνοτήτων. Από αυτό το πακέτο δεδομένων εξήχθησαν χαρακτηριστικά κύματος στη θέση 35.399849 ° Β, 24.478480 ° Α (Εικόνα 5-1, περίπου σε απόσταση 3 χιλιομέτρων βόρειας από τον προσήνεμο μώλο του λιμένα Ρεθύμνου), συμπεριλαμβανομένου του σημαντικού ύψους κύματος, H_s (m), της περιόδου κορυφής T_p (s) και της μέσης διεύθυνσης κύματος (MWD) σε ωριαία βάση.



Εικόνα 5-1. Σημείο εξαγωγής δεδομένων θαλάσσιας κατάστασης από τη βάση Copernicus (περίοδου 1993-2019) στα ανοιχτά του Λιμένα Ρεθύμνου.

Για την ταξινόμηση των κυματικών χαρακτηριστικών κατασκευάστηκε κώδικας (σε γλώσσα Fortran) που ταξινομεί τους κυματισμούς σε ομάδες ύψους κύματος με βήμα 0.5m, σε 12 μέσες διευθύνσεις κύματος ανά τριάντα μοίρες (30°). Εδώ επισημαίνεται ότι ως μέση διεύθυνση κύματος (Mean Wave Direction ή MWD) ορίζουμε την διεύθυνση από την οποία έρχεται ο κυματισμός, μετρούμενη δεξιόστροφα σε μοίρες από το Βορρά, δηλαδή Β (0° ως προς το βορά), ΒΒΑ (30°), ΑΒΑ (60°), Α (90°), ΑΝΑ (120°), ΝΝΑ (150°), Ν (180°), ΝΝΔ (210°), ΔΝΔ (240°), Δ (270°), ΔΒΔ (300°), ΒΒΔ (330°). Στον Πίνακα 5-1 δίνονται οι μέσες ετήσιες συχνότητες εμφάνισης ανά ομάδα ύψους κυματισμού και ανά διεύθυνση. Στον Πίνακα 5-2 δίνονται οι μέσες περίοδοι κορυφής ανά ομάδα ύψους κυματισμού και ανά διεύθυνση.

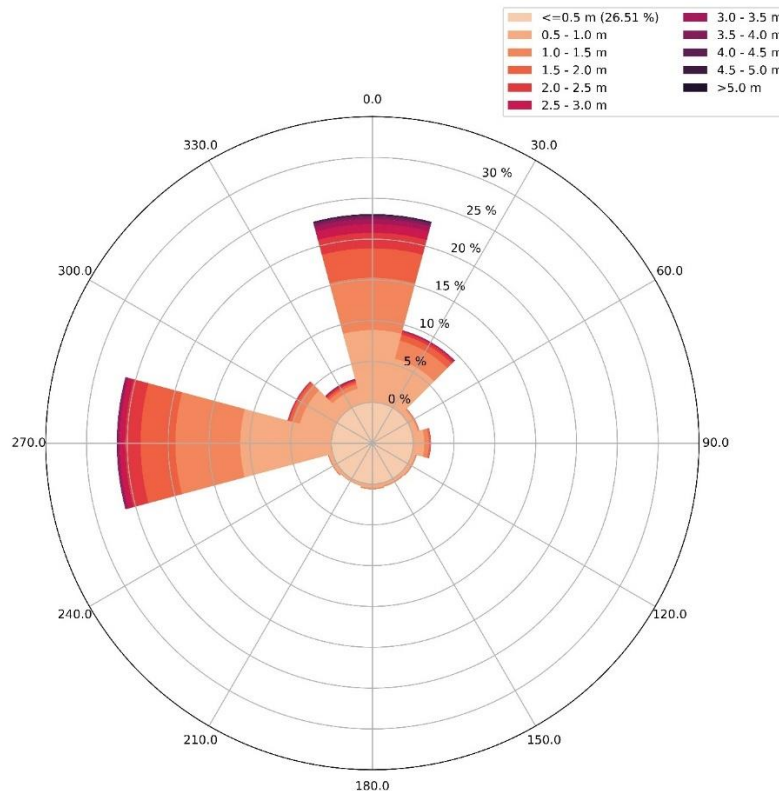
Για την καλύτερη επισκόπηση του κυματικού κλίματος κατασκευάστηκε (μέσω εργαλείου Python) και κυματικό ροδόγραμμα που δίνεται στην Εικόνα 5-2. Το ακτινικό μήκος κάθε στοιχείου στο ροδόγραμμα αντιπροσωπεύει τη συχνότητα εμφάνισης του κυματισμού και η κατανομή των χρωμάτων σε κάθε ράβδο αντιπροσωπεύει ομάδες ύψους κύματος όπως αναγράφονται στην πινακίδα του ροδογράμματος.

Πίνακας 5-1. Μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης σημαντικού ύψους κυματισμού, Hs (m), ανά διεύθυνση [Επεξεργασία δεδομένων βάσης Copernicus, περίοδος 1993-2019].

Ομάδες Hs (m)	Διεύθυνση												Ποσοστό	
	B	BBA	ABA	A	ANA	NNA	N	NNΔ	ΔΝΔ	Δ	ΔΒΔ	ΒΒΔ		
[0-0.5]														26.509%
(0.5-1)	8.862%	5.712%	0.746%	1.376%	0.454%	0.370%	0.474%	0.338%	0.477%	11.173%	4.180%	1.908%	36.069%	
(1-1.5)	6.406%	2.282%	0.158%	0.547%	0.122%	0.111%	0.126%	0.059%	0.108%	7.948%	1.002%	0.561%	19.430%	
(1.5-2)	3.616%	0.751%	0.044%	0.183%	0.034%	0.027%	0.031%	0.005%	0.022%	4.262%	0.339%	0.281%	9.595%	
(2-2.5)	1.891%	0.328%	0.014%	0.041%	0.004%	0.002%	0.000%	0.000%	0.008%	1.883%	0.137%	0.195%	4.503%	
(2.5-3)	1.056%	0.127%	0.005%	0.022%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.662%	0.049%	0.105%	2.025%	
(3-3.5)	0.623%	0.053%	0.001%	0.006%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.230%	0.015%	0.049%	0.976%	
(3.5-4)	0.330%	0.026%	0.001%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.091%	0.006%	0.032%	0.486%	
(4-4.5)	0.151%	0.014%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.038%	0.002%	0.016%	0.220%	
(4.5-5)	0.081%	0.003%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.016%	0.002%	0.009%	0.110%	
(5-5.5)	0.039%	0.002%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.001%	0.001%	0.007%	0.049%	
(5.5-6)	0.017%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.002%	0.000%	0.003%	0.022%	
(6-6.5)	0.005%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.000%	0.005%	
	23.076%	9.299%	0.969%	2.174%	0.613%	0.510%	0.631%	0.402%	0.616%	26.304%	5.732%	3.165%	100.000%	

Πίνακας 5-2. Μέση (ανά ομάδα ύψους) περίοδος κορυφής, Tr (s), ανά διεύθυνση [Επεξεργασία δεδομένων βάσης Copernicus, περίοδος 1993-2019].

Ομάδες Hs (m)	Διεύθυνση											
	B	BBA	ABA	A	ANA	NNA	N	NNΔ	ΔΝΔ	Δ	ΔΒΔ	ΒΒΔ
[0-0.5]												
(0.5-1)	5.18	5.13	4.51	5.19	5.41	4.37	4.27	5.84	6.90	5.62	5.56	5.60
(1-1.5)	5.94	5.91	5.32	6.34	6.67	5.22	5.24	7.76	7.81	6.14	6.70	6.43
(1.5-2)	6.53	6.47	6.20	7.09	6.88	5.52	5.27	8.99	9.04	6.85	7.32	6.74
(2-2.5)	7.03	6.97	6.67	7.54	8.42	6.01	0.00	9.23	9.90	7.53	7.96	7.20
(2.5-3)	7.53	7.45	7.44	8.28	0.00	0.00	0.00	0.00	11.17	8.20	8.31	7.67
(3-3.5)	7.98	7.86	7.40	8.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.94	8.77	8.18
(3.5-4)	8.37	8.28	7.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.35	9.70	8.33
(4-4.5)	8.69	8.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.70	9.08	8.76
(4.5-5)	9.12	8.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.68	9.25	9.11
(5-5.5)	9.26	8.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	9.88	9.23	9.46
(5.5-6)	9.62	10.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.41	0.00	9.54
(6-6.5)	10.15	10.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Εικόνα 5-2: Ροδόγραμμα μέσου ετήσιου σημαντικού ύψους κύματος, Hs (m), ανοιχτά του Ρεθύμνου [Επεξεργασία δεδομένων βάσης Copernicus, περίοδος 1993-2019].

Σύμφωνα με τα παραπάνω, προκύπτει ότι η επικρατέστερη διεύθυνση (με μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης 26.304%) είναι η δυτική, ωστόσο λόγω ευρύτερης γεωμορφολογίας η παράκτια περιοχή είναι προστατευμένη από κυματισμούς αυτής της διεύθυνσης. Η παράκτια περιοχή είναι εκτεθειμένη σε κυματισμούς που προσιπτούν από ΔΒΔ, ΒΒΔ, Β και ΒΒΑ. Συνεπώς, η επικρατέστερη διεύθυνση προσιπτόντος κυματισμού, που επηρεάζει σημαντικά την περιοχή διερεύνησης και παρουσιάζει και τα υψηλότερα ύψη κύματος τα οποία φθάνουν έως την ομάδα των (6.0-6.5) m, είναι η Βόρεια, όπως αναμενόταν λόγω των μεγαλύτερων αναπτυγμάτων πελάγους (>120 km). Η συγκεκριμένη διεύθυνση έχει μέση ετήσια συχνότητα εμφάνισης ίση με 23.076%. Ακολουθούν οι διευθύνσεις ΒΒΑ και ΔΒΔ με συχνότητες 9.299% και 5.732% αντίστοιχα, ενώ η ΒΒΔ έχει εμφάνιση 3.165%. Το μεγαλύτερο ύψος κύματος εμφανίστηκε στις 10 Φεβρουαρίου του 2015, ίσο με 6.37 m, με περίοδο κορυφής ίση με 10.15 s, και διεύθυνση από το βόρειο τομέα 351.39°.

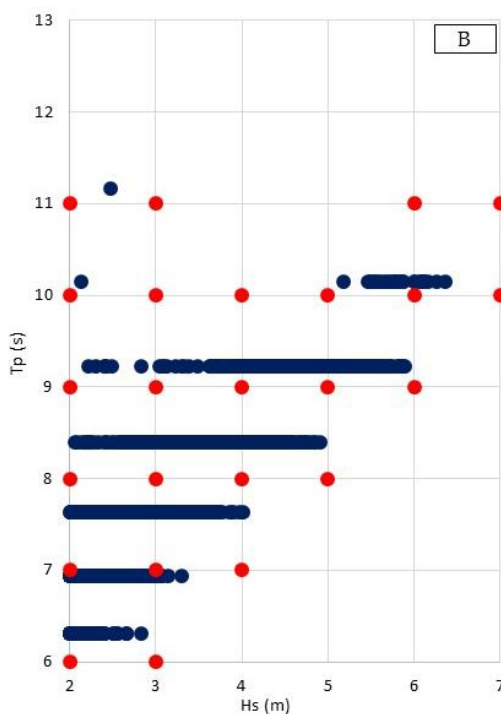
Από τη συγκεκριμένη χρονοσειρά αναζητήθηκαν τα κυματικά δεδομένα που επικρατούσαν κατά την ώρα που εξελίσσονταν τα τέσσερα υπό διερεύνηση παράκτια πλημμυρικά γεγονότα σύμφωνα με τις καταγραφές. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 5-3. Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια των γεγονότων αυτών οι κυματισμοί που είχαν αναπτυχθεί ανοιχτά της περιοχής μελέτης είχαν υψηλή ενέργεια με ύψη κυματισμών περίπου ίσα ή μεγαλύτερα των 5 m και περιόδους κορυφής περίπου 10 s. Κάτι που επιβεβαιώνεται και από τις μαρτυρίες των κατοίκων, ότι δηλαδή κυματισμοί με μεγάλα ύψη προσέπυταν στο παράκτιο μέτωπο. Εδώ αναφέρεται ότι οι βάσεις δεδομένων μπορούν να προσφέρουν hindcast κυματικά δεδομένα που παραμένουν κοντά στις πραγματικές συνθήκες.

Πίνακας 5-3. Κυματικά χαρακτηριστικά στα ανοιχτά της περιοχής κατά την ώρα που εξελίσσονταν τα τέσσερα υπό διερεύνηση παράκτια πλημμυρικά γεγονότα.

Παράκτιο Πλημμυρικό Συμβάν:		S1	S2	S3	S4
Ημερομηνία Συμβάντος:		11/12/2010	28/02/2012	01/01/2015	13/01/2015
Κυματικά χαρακτηριστικά “ανοιχτά” της περιοχής	H_s (m)	5.24	5.19	4.98	5.79
	T_p (s)	9.23	9.23	9.23	10.15
	MWD	338.52°	356.9°	346.09°	358.77°

Επιπρόσθετα των παραπάνω δεδομένων, ακολούθως γίνεται μια ανάλυση των προσιπτόντων κυματικών χαρακτηριστικών για τη βόρεια διεύθυνση, καθώς είναι αυτή η οποία εμφανίζει τα μεγαλύτερα ύψη κυματισμών καθώς και τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης, ανάμεσα στις τέσσερις διευθύνσεις (ΔΒΔ, ΒΒΔ, Β και ΒΒΑ) στις οποίες είναι εκτεθειμένη η παράκτια περιοχή του Ρεθύμνου. Στην Εικόνα 5-3 δίνονται τα ζεύγη υψών (μεγαλύτερα ή ίσα των 2 m) και περιόδου κορυφής (μεγαλύτερης ή ίσης των 6 s) κυματισμού στα ανοιχτά της παράκτιας ζώνης Ρεθύμνου για τη βόρεια διεύθυνση (345° έως 15°). Οι μπλε κουκίδες απεικονίζουν τα δεδομένα όπως προκύπτουν από την ανοιχτή βάση δεδομένων Copernicus. Παρατηρείται ότι ύψη κυματισμών 2 m εμφανίζονται με περιόδους κορυφής από 6.5 s υπ μέχρι 10.5 s, ύψη κυματισμών 3 m εμφανίζονται με περιόδους κορυφής από περίπου 6.5 s μέχρι 9.5 s, ύψη κυματισμών 4 m εμφανίζονται με περιόδους κορυφής από 7.5 s μέχρι 9.5 s, ύψη κυματισμών 5 m εμφανίζονται με περιόδους κορυφής από 8.5 s μέχρι 9.5 s και τέλος ύψη κυματισμών 6 m εμφανίζονται με περιόδους κορυφής από 9.5 s μέχρι 10.5s.

Με βάση αυτή την κατανομή των κυματικών χαρακτηριστικών, επιλέγονται εδώ συγκεκριμένα ζεύγη ύψους-περιόδου κυματισμών που αντιπροσωπεύουν αυτές τις κατανομές με βήμα 1 m για τα ύψη και 1 s για τις περιόδους. Για αυτά τα διακριτά ζεύγη (κόκκινες κουκίδες, Εικόνα 5-3) κυματικών χαρακτηριστικών «αντιπροσώπων» θα γίνει διερεύνηση στα ακόλουθα υποκεφάλαια εάν δύνανται σε συνδυασμό με διάφορες στάθμες θάλασσας να οδηγήσουν σε παράκτια πλημμύρα.



Εικόνα 5-3. Ζεύγη υψών, H_s (m), και περιόδου κορυφής T_p (s), κυματισμού στα ανοιχτά της παράκτιας περιοχής του Ρεθύμνου για τη Βόρεια διεύθυνση. Οι μπλε κουκίδες απεικονίζουν τα δεδομένα όπως προκύπτουν από την ανοιχτή βάση δεδομένων Copernicus, ενώ οι κόκκινες απεικονίζουν τους αντιπροσώπους που λαμβάνονται υπόψη για περαιτέρω διερεύνηση.

5.1.2. ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΣΤΑΘΜΗ

Τα δεδομένα ανύψωσης/ταπείνωσης της θαλάσσιας στάθμης λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας (storm surge) αντλήθηκαν επίσης από τη βάση δεδομένων Copernicus και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το πακέτο με τίτλο MEDSEA_MULTITYEAR_PHY, για χρονικό διάστημα από το 01/01/1987 έως 31/12/2019, σε ωριαία διαστήματα. Η υψηλότερη στάθμη του νερού που έχει καταγραφεί σε αυτό το σύνολο δεδομένων είναι περίπου +0.4 m και η χαμηλότερη -0.5 m, από τη Μέση Στάθμη της Θάλασσας (ΜΣΘ).

Πίνακας 5-4. Μεταβολή θαλάσσιας στάθμης σύμφωνα με τα δεδομένα της βάσης Copernicus (περιόδου 1987 - 2019).

Χαμηλότερη στάθμη σε σχέση με τη ΜΣΘ	Υψηλότερη στάθμη σε σχέση με τη ΜΣΘ
- 0.5 m	+ 0.4 m

Τέλος, τα δεδομένα σχετικά με την αστρονομική παλίρροια (astronomical tide), για τη χρονική περίοδο είκοσι έξι (26) ετών, από το 01/01/1980 έως το 22/12/2017, ελήφθησαν από την βάση δεδομένων AVISO Satellite Altimetry Data (aviso.altimetry.fr) και συγκεκριμένα από το προϊόν της με το όνομα FES 2014b. Το FES2014 είναι η τελευταία έκδοση του παγκόσμιου μοντέλου παλίρροιας FES (Finite Element Solution) που παρέχεται από την AVISO. Εκμεταλλεύεται μεγαλύτερες χρονοσειρές και καλύτερα πρότυπα υψομέτρου, βελτιωμένες τεχνικές προσομοίωσης και αφομοίωσης δεδομένων, ακριβέστερη βαθυμετρία του ωκεανού και λεπτομερές πλέγμα στις περισσότερες περιοχές με ρηχά νερά. Οι υπολογισμοί εκτελούνται σε παγκόσμιο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (~2,9 εκατομμύρια κόμβοι) παρέχοντας τη γεωκεντρική (ελαστική) παλίρροια σε κάθε υπολογιστικό κόμβο. Τα αποτελέσματα των μοντέλων αφορούν 34 παλιρροϊκά φαινόμενα, καταναμημένα σε πλέγμα 1/16°. Τα διαθέσιμα δεδομένα δίνονται σε ωριαία διαστήματα. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πακέτο δεδομένων στους ακόλουθους πίνακες δίνονται τα χαρακτηριστικά της θαλάσσιας στάθμης λόγω επίδρασης της.

Πίνακας 5-5. Μεταβολή θαλάσσιας στάθμης λόγω αστρονομικής παλίρροιας σύμφωνα με τα δεδομένα της βάσης AVISO (περιόδου 1980 - 2017).

Υψηλότερη στάθμη	Μέση Πλήμμη	Μέση Στάθμη	Μέση Ρηχία	Χαμηλότερη Στάθμη
0.05 m	0.02 m	0.00 m	-0.02 m	-0.05 m
Μέγιστο εύρος		Μέσο εύρος		Ελάχιστο εύρος
0.10 m		0.04 m		0.0 m

Στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 5-6) δίνονται τα δεδομένα θαλάσσιας κατάστασης, για κάθε ένα από τα τέσσερα (4) συμβάντα παράκτιας πλημμύρας του παρελθόντος τα οποία εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική, για τις ώρες κατά τις οποίες έχουν γίνει καταγραφές (βιντεοσκοπήσεις). Παρατηρείται ότι η αστρονομική παλίρροια έχει μικρό εύρος και συνεπώς έχει και μικρή συμβολή ως αίτιο πρόκλησης παράκτιας πλημμύρας, ενώ η μετεωρολογική παλίρροια παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στην ανύψωση της θαλάσσιας στάθμης.

Πίνακας 5-6: Δεδομένα θαλάσσιας κατάστασης κατά τη διάρκεια των τεσσάρων υπό μελέτη παράκτιων πλημμυρικών γεγονότων

Παράκτιο Πλημμυρικό Συμβάν:		S1	S2	S3	S4
Ημερομηνία Συμβάντος:		11/12/2010	28/02/2012	01/01/2015	13/01/2015
Κυματικά χαρακτηριστικά “ανοιχτά” της περιοχής .	H_s (m)	5.24	5.19	4.98	5.79
	T_p (s)	9.23	9.23	9.23	10.15
	MWD	338.52°	356.9°	346.09°	358.77°
Άνοδος από τη ΜΣΘ	Μετ. Παλιρ. (m)	+0.15	+0.30	+0.26	+0.23
	Αστρ. Παλιρ. (m)	+0.03	+0.02	+0.02	+0.01
	Συνολικά (m)	+0.18	+0.32	+0.28	+0.24

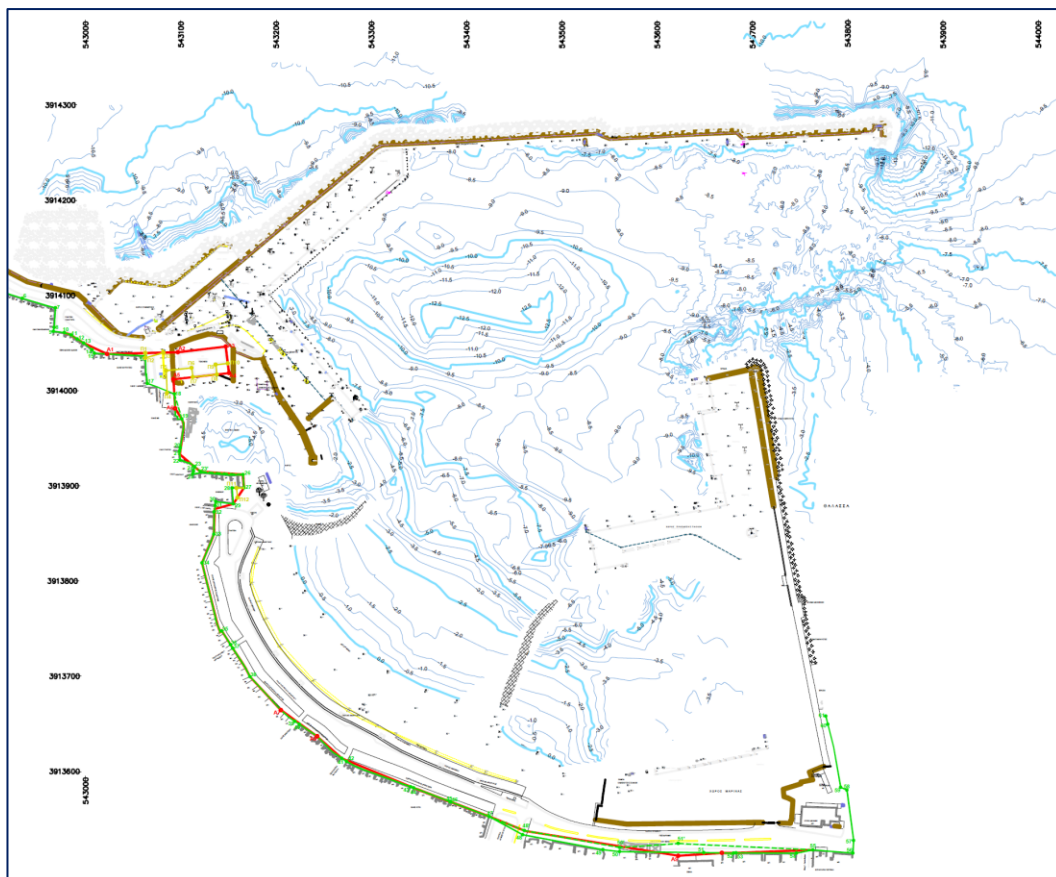
5.1.3. ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΠΡΟΣ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Τα δεδομένα του Πίνακα 5-6, απαρτίζουν τα αρχικά σενάρια (S1-S4) προς προσομοίωση και θα τροφοδοτήσουν τα επόμενα βήματα της μεθοδολογίας με τελικό στόχο την προσομοίωση της παράκτιας κατάκλυσης και τη σύγκριση των περιοχών που κατακλύζονται με τις αντίστοιχες περιοχές που προκύπτουν από τις καταγραφές.

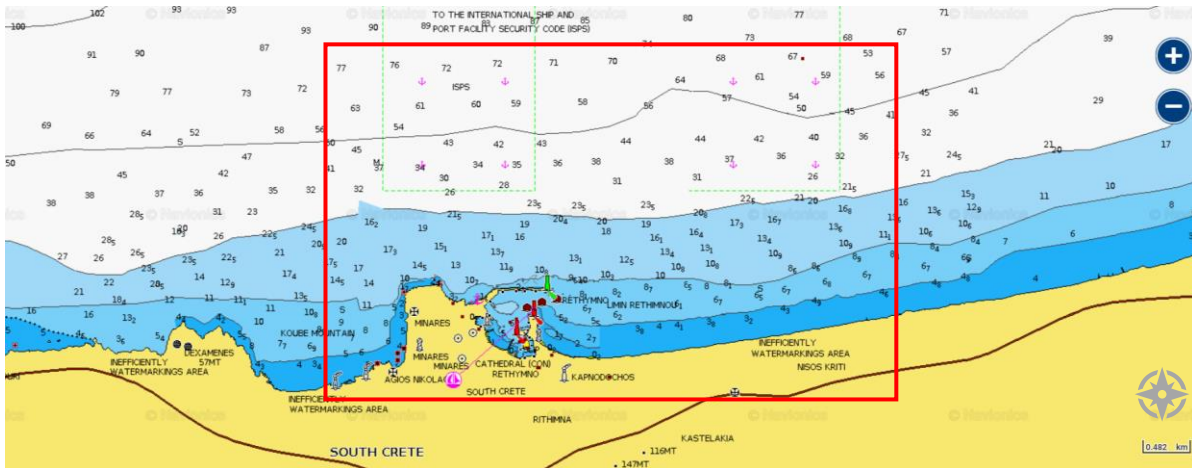
Πέραν όμως αυτών των τεσσάρων σεναρίων (S1-S4), για την περαιτέρω διερεύνηση της συμβολής κάθε μηχανισμού (κυματισμοί, άνοδος θαλάσσιας στάθμης) στην εκδήλωση παράκτιας πλημμύρας, καταστρώνονται στην παρούσα ΜΔΕ, 72 πρόσθετα σενάρια (N1-N72) προς περαιτέρω διερεύνηση. Τα σενάρια αυτά βασίζονται στα κυματικά χαρακτηριστικά «αντιπροσώπους» όπως προσδιορίστηκαν παραπάνω (Εικόνα 5-3) με ύψη κύματος από 2 m έως 7 m, περιόδους από 6 s έως 11 s, και σε τρεις επιλεγθείσες διακριτές στάθμες θάλασσας, την ελάχιστη στάθμη (-0.5 m από τη ΜΣΘ), τη ΜΣΘ και τη μέγιστη στάθμη (+0.5 m από τη ΜΣΘ) συμπεριλαμβανομένης και αστρονομικής και μετεωρολογικής παλίρροιας. Στον πίνακα του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ δίνονται αναλυτικά όλες οι τιμές των παραμέτρων για κάθε σενάριο (N1-N72).

5.2. ΒΥΘΟΜΕΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Για την προσομοίωση του μετασχηματισμού των κυματικών χαρακτηριστικών είναι απαραίτητη η γνώση της μορφολογίας του πυθμένα, ούτως ώστε να κατασκευαστεί ο βυθομετρικός κάρναβος που ορίζει το αριθμητικό πεδίο προσομοίωσης. Στην περιοχή του λιμένα υπήρχαν διαθέσιμες βυθομετρικές αποτυπώσεις (Εικόνα 5-4), ενώ στην ευρύτερη περιοχή (Εικόνα 5-5) ψηφιοποιήθηκαν δεδομένα από την πλατφόρμα [navionics \(navionics.com\)](http://navionics.com).

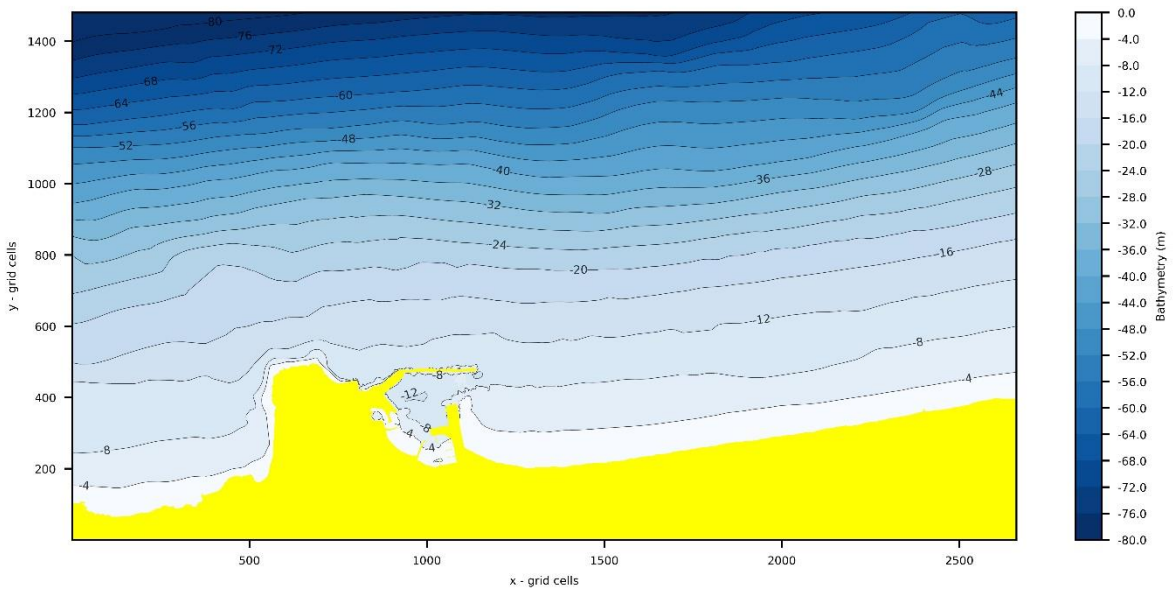


Εικόνα 5-4. Διαθέσιμα βυθομετρικά δεδομένα στο Λιμένα Ρεθύμνου.



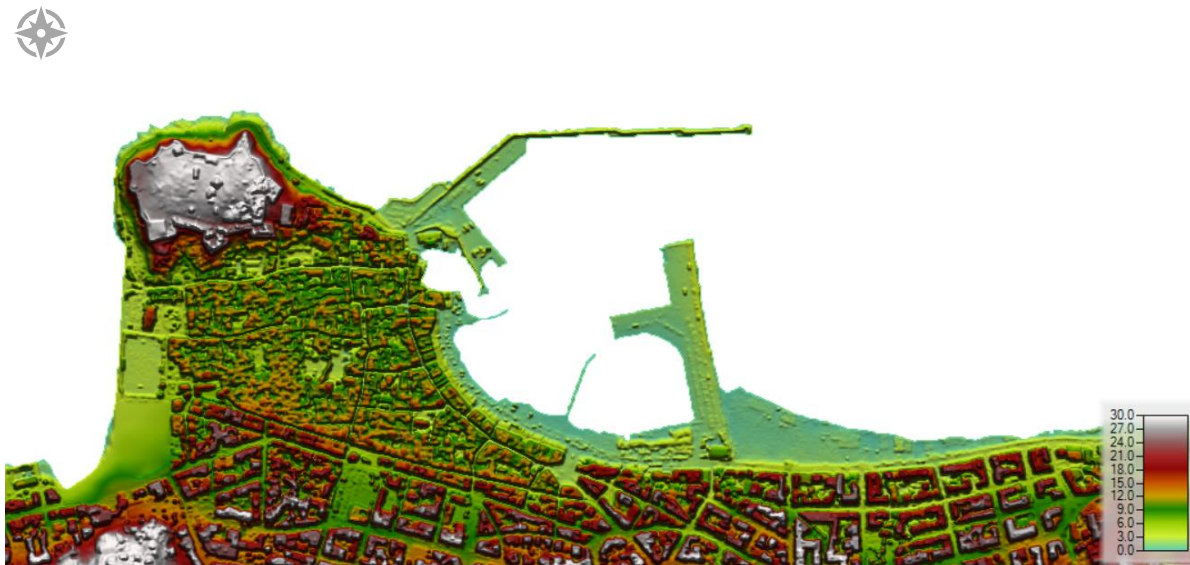
Εικόνα 5-5. Βυθομετρικά δεδομένα που ψηφιοποιήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή του Ρεθύμνου (navionics) και όρια (κόκκινο ορθογώνιο) αριθμητικού καννάβου.

Με βάση τα παραπάνω βυθομετρικά δεδομένα, στο πλαίσιο της παρούσας ΜΔΕ κατασκευάστηκε κάναβος με ίσο στις δυο οριζόντιες διαστάσεις χωρικό βήμα $dx = dy = 2.5 \text{ m}$. Ο κάναβος έχει διαστάσεις 2660 (x) x 1480 (y) κελιά ή 6.650 (x) x 3.700 (y) m. Κάθε κελί αντιπροσωπεύει βάθος (από τη ΜΣΘ) ή περιοχή της ξηράς. Η κλίση του πυθμένα είναι απότομη στο μέτωπο της ρίζας του προσήνεμου μώλου αλλά και δυτικά αυτής, ενώ στις παρακείμενες ακτές του λιμένα (δυτικά και ανατολικά) η κλίση του πυθμένα είναι πολύ πιο ήπια. Κάτι που θα παίξει σημαντικό ρόλο όπως θα φανεί ακολούθως.



Εικόνα 5-6. Βυθομετρικός κάναβος (από τη ΜΣΘ) παράκτιας περιοχής διερεύνησης που κατασκευάστηκε με χωρικό βήμα $dx = dy = 2.5 \text{ m}$.

Επιπλέον, για την προσομοίωση της κατάκλυσης της παράκτιας περιοχής αξιοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) το οποίο υπήρχε διαθέσιμο από το ερευνητικό πρόγραμμα "Pearl - Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions" (pearl-fr7.eu) με χωρική ανάλυση 0.8 m στις δυο οριζόντιες διαστάσεις.



Εικόνα 5-7. Διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους που αξιοποιείται ως δεδομένο εισόδου για την προσομοίωση της παράκτιας κατάκλυσης.

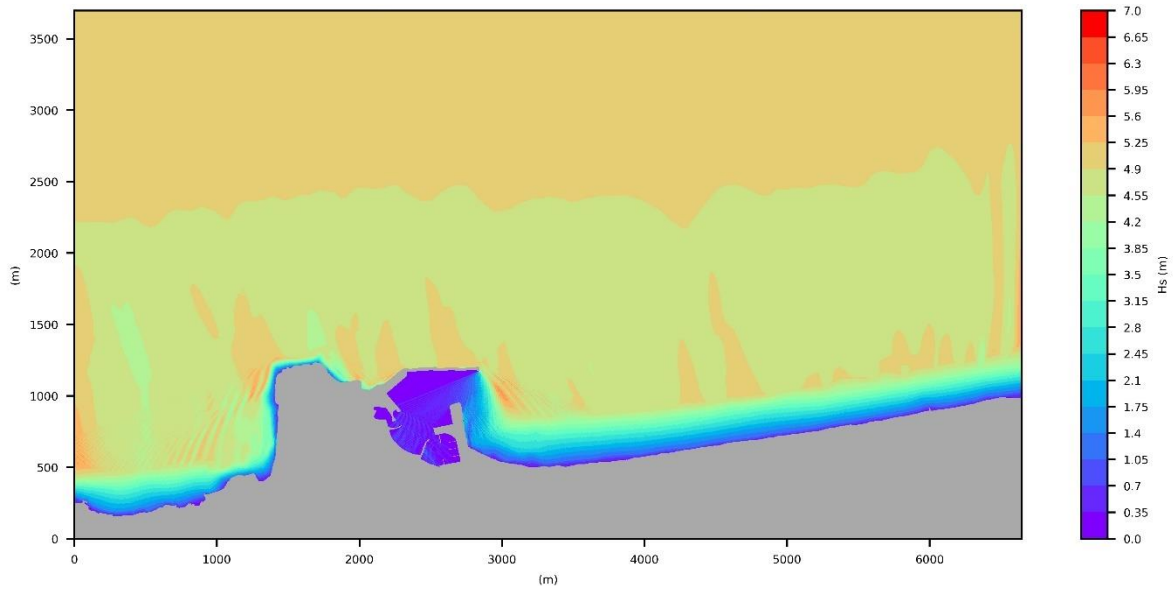
5.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Μετά τη συλλογή όλων των δεδομένων που αφορούν τη θαλάσσια κατάσταση στα ανοιχτά της περιοχής καθώς και της απαραίτητης τοπογραφίας και βυθομετρίας, ακολουθεί η αριθμητική προσομοίωση του μετασχηματισμού του κύματος από τα βαθιά στα ρηχά νερά με στόχο τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών στον πόδα των παράκτιων έργων για να υπολογιστεί η κυματική υπερπήδηση στο επόμενο βήμα. Η μαθηματική προσομοίωση εκτελείται εφαρμόζοντας το μη γραμμικό κυματικό μοντέλο παραβολικής προσέγγισης ήπιας κλίσης, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το μοντέλο αυτό προσομοιώνει όλα τα κυρίαρχα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη, δηλαδή τη ρήχωση, τη διάθλαση, την περίθλαση, την απώλεια ενέργειας λόγω θραύσης και τριβής πυθμένα. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτεί είναι:

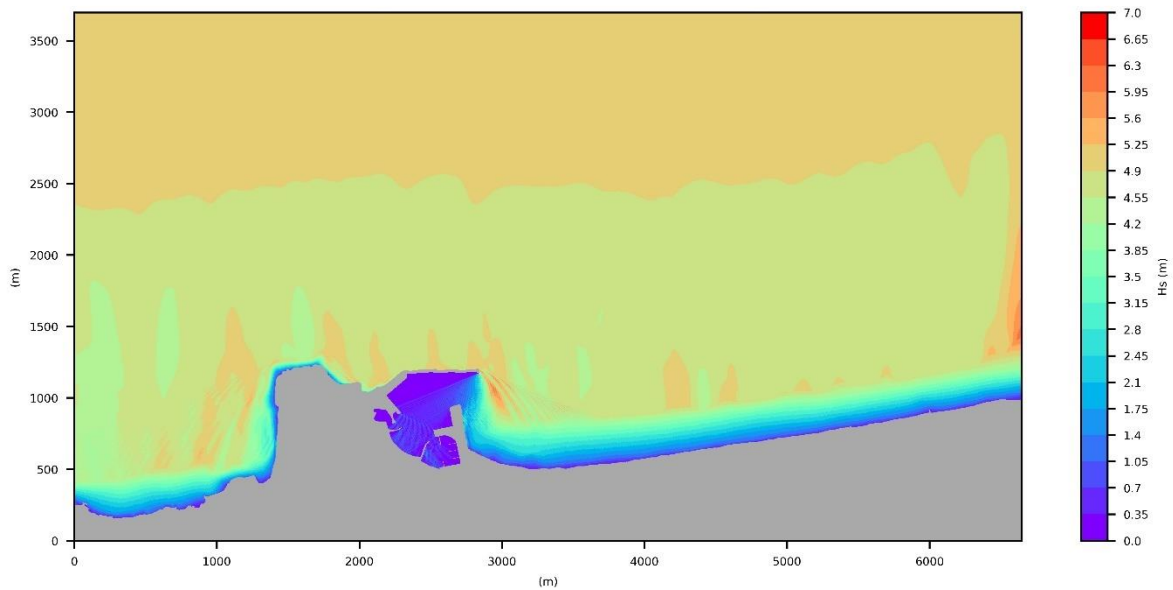
- ο βυθομετρικός κάρναβος (Εικόνα 5-6),
- η ανύψωση/ ταπείνωση της θαλάσσιας στάθμης σε σχέση με τη ΜΣΘ,
- τα κυματικά χαρακτηριστικά (ύψος, περίοδο και διεύθυνση) στο όριο του καννάβου στα βαθιά νερά.

Στις εικόνες Εικόνα 5-8 έως Εικόνα 5-11 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της χωρικής κατανομής του ύψους κύματος στην παράκτια ζώνη για τα σενάρια S1-S4 αντίστοιχα, που αντιπροσωπεύουν δεδομένα των ιστορικών συμβάντων παράκτιας πλημμύρας. Ενώ στις εικόνες Εικόνα 5-12 έως Εικόνα 5-15 δίνονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα των σεναρίων N1, N24, N47 και N72 (τα αποτελέσματα για όλα τα σενάρια δίνονται στο).

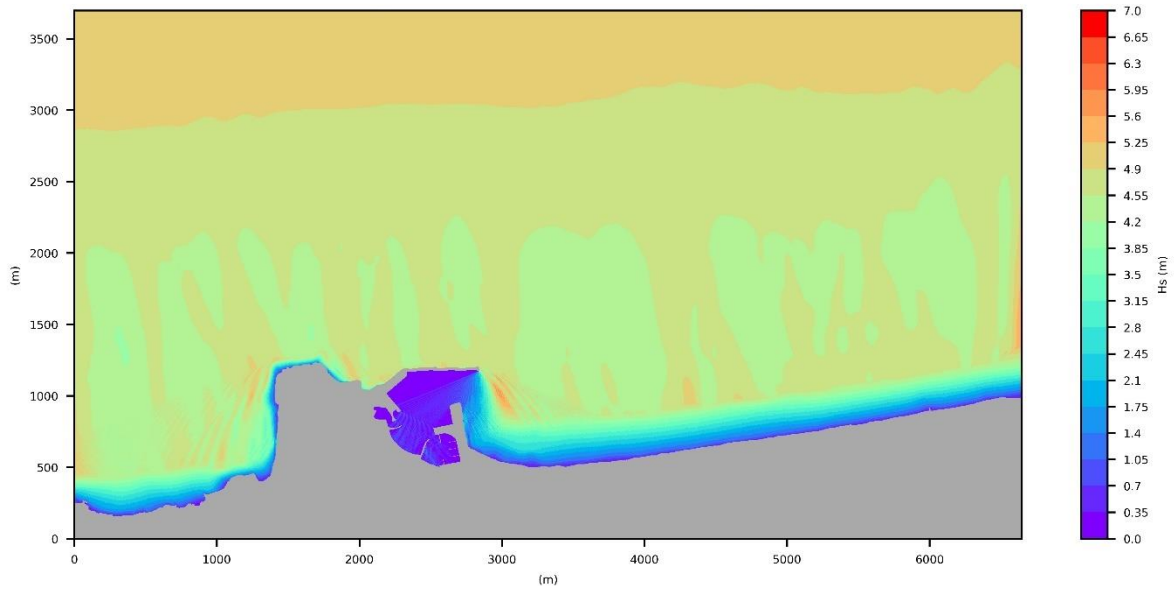
Από την επισκόπηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ένα σημαντικό συμπέρασμα. Οι κυματισμοί διατηρούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που έχουν στα βαθιά νερά, όταν προσεγγίζουν το ευάλωτο σε πλημμύρα παράκτιο μέτωπο, σε αντίθεση με τις παρακείμενες ακτές όπου εμφανίζεται μια ευρεία ζώνη θραύσης και τα κύματα φτάνουν στην ακτογραμμή με σημαντική απώλεια της ενέργειας τους (όπως εμφανίζεται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 5-11). Αυτό αποδίδεται στην μορφολογία του πυθμένα έμπροσθεν αυτού του μετώπου, δηλαδή στην ύπαρξη απότομων κλίσεων του πυθμένα σε αντίθεση με τις παρακείμενες ακτές που εμφανίζουν ηπιότερη κλίση.



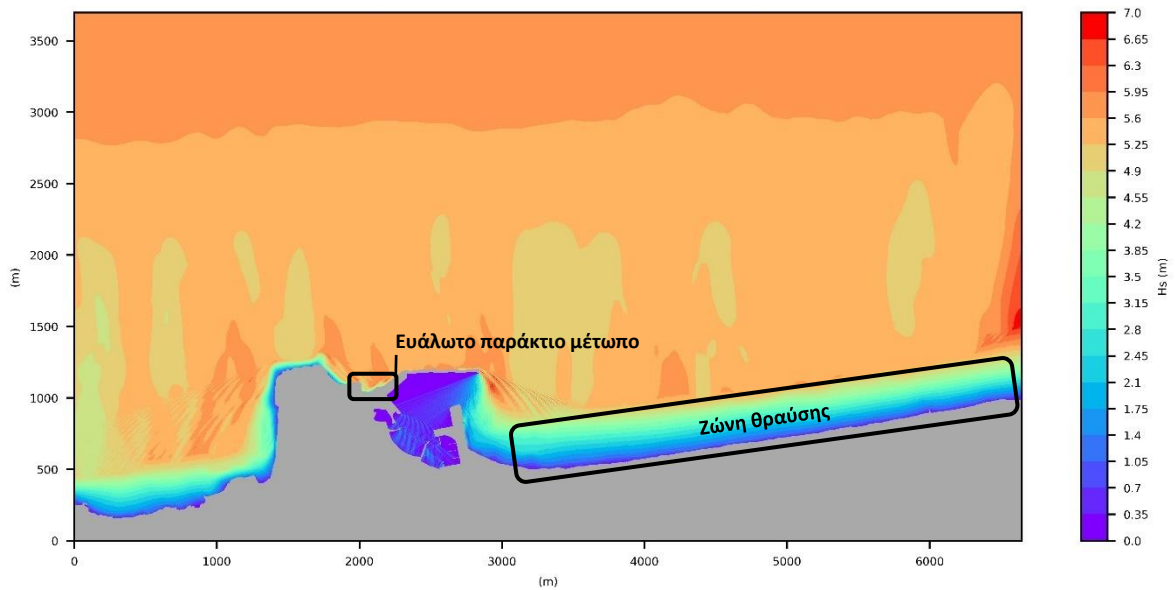
Εικόνα 5-8. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο S1** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=5.24$ m, $T_p=9.23$ s, διεύθυνση 338.52° και στάθμη θάλασσας $+0.18$ ΜΣΘ).



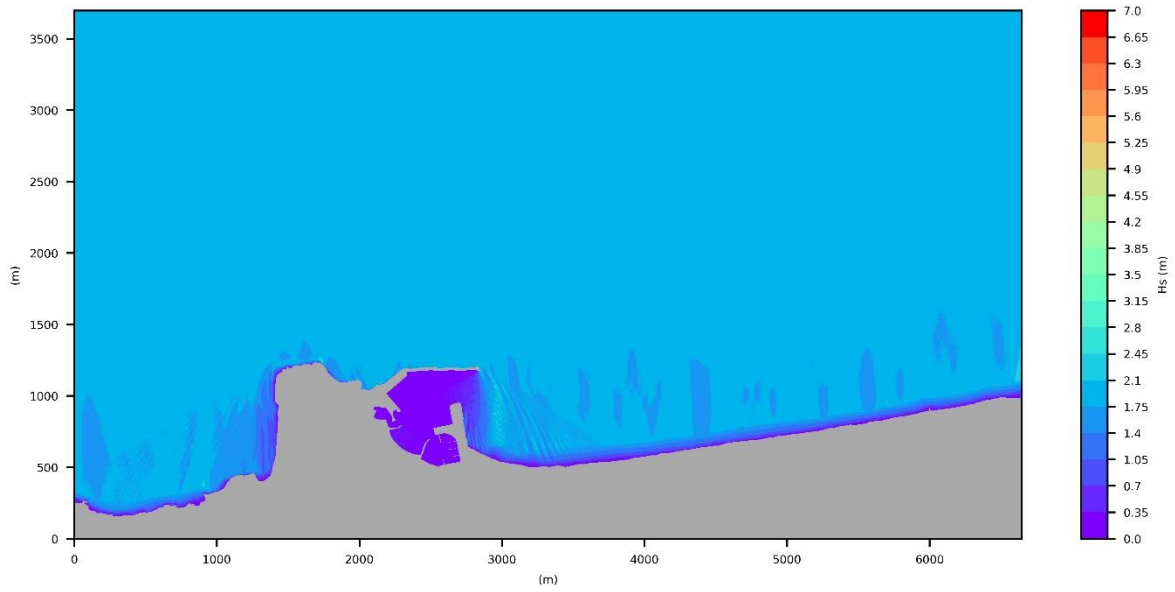
Εικόνα 5-9. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο S2** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=5.19$ m, $T_p=9.23$ s, διεύθυνση 356.9° και στάθμη θάλασσας $+0.32$ ΜΣΘ).



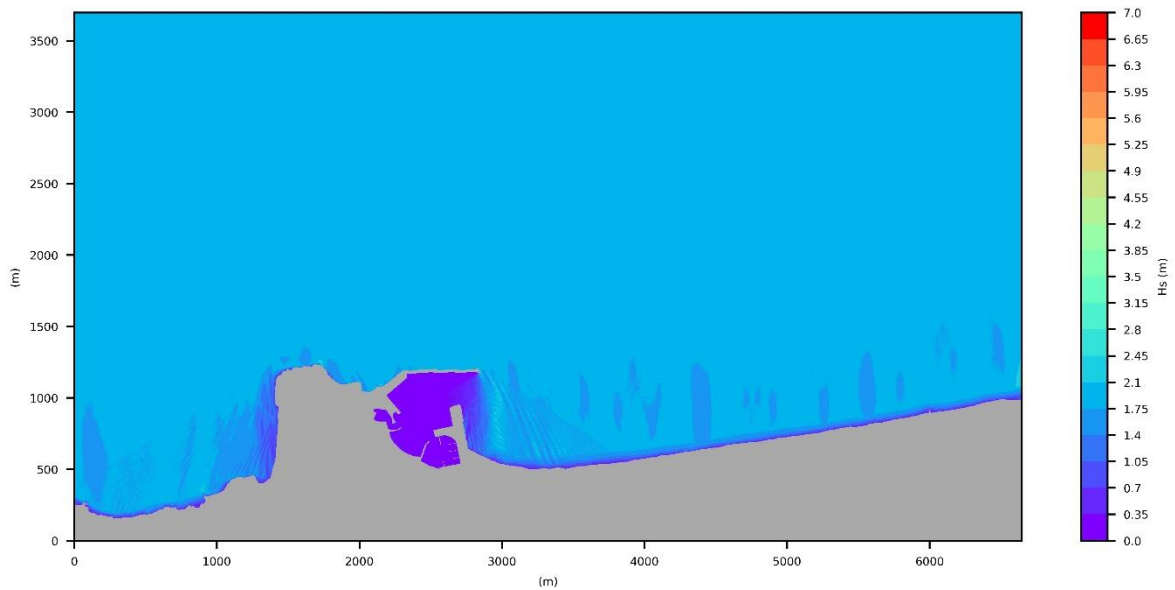
Εικόνα 5-10. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο S3** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=4.98$ m, $T_p=9.23$ s, διεύθυνση 346.09° και στάθμη θάλασσας $+0.28$ ΜΣΘ).



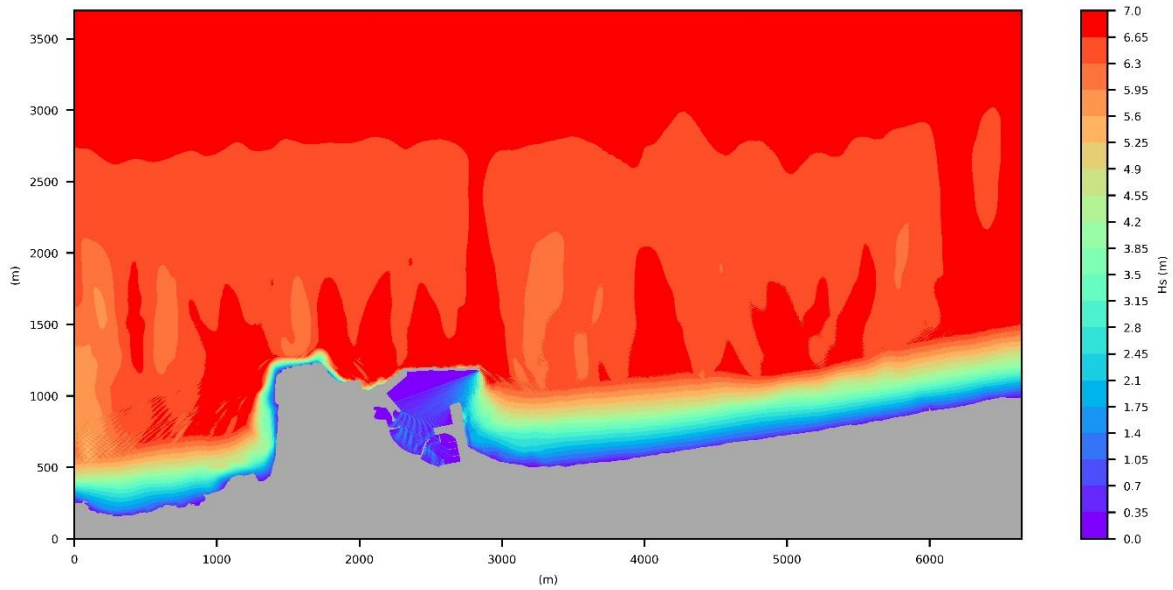
Εικόνα 5-11. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο S4** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=5.79$ m, $T_p=10.15$ s, διεύθυνση 346.09° και στάθμη θάλασσας $+0.24$ ΜΣΘ).



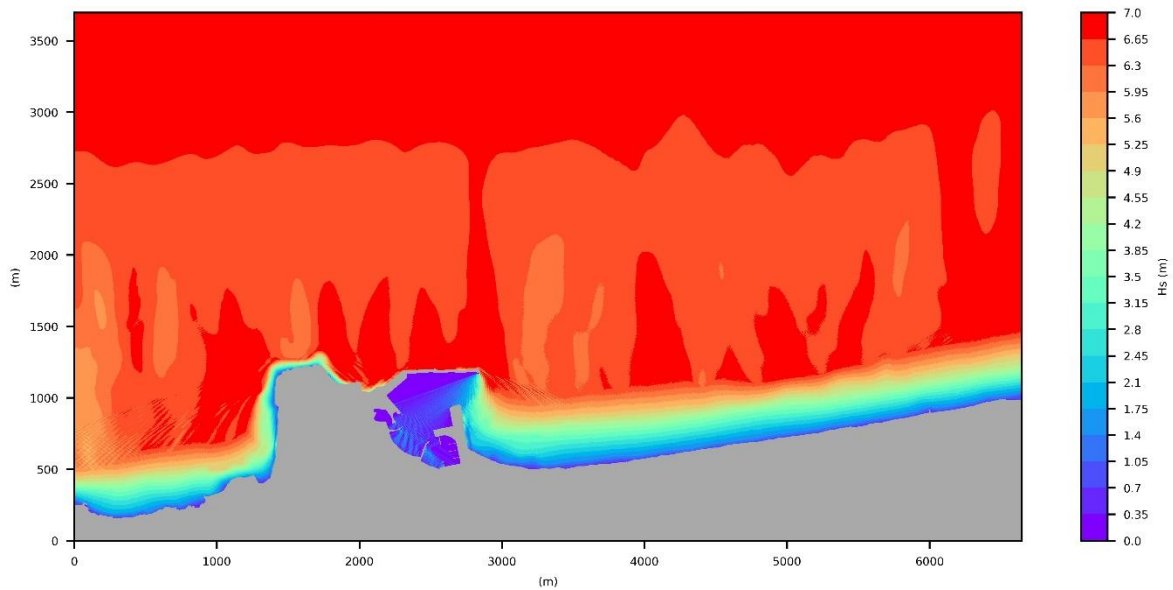
Εικόνα 5-12. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο N1** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=2.0$ m, $T_p=6.0$ s, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας -0.50 ΜΣΘ).



Εικόνα 5-13. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο N49** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=2.0$ m, $T_p=6.0$ s, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας $+0.50$ ΜΣΘ).



Εικόνα 5-14. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο N24** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=7.0$ m, $T_p=11.0$ s, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας - 0.50 ΜΣΘ).



Εικόνα 5-15. Αποτελέσματα προσομοίωσης ύψους κυματισμού στην παράκτια ζώνη Ρεθύμνου για το **σενάριο N72** (εισερχόμενα κυματικά χαρακτηριστικά: $H_s=7.0$ m, $T_p=11.0$ s, διεύθυνση 360° και στάθμη θάλασσας +0.50 ΜΣΘ).

5.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ

Όπως έχει καταγραφεί από ιστορικά συμβάντα παράκτια πλημμύρας οι υποπεριοχές αυτές κατακλύζονται με θαλάσσια ύδατα που διεισδύουν από τα τρία μέτωπα που εμφανίζονται με χρώμα κίτρινο, κόκκινο και πορτοκαλί στην Εικόνα 5-16.

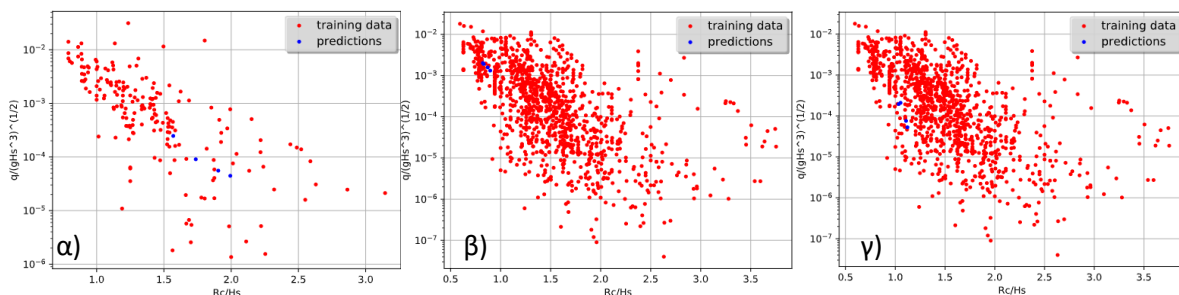
Έχοντας προσδιορίσει το παράκτιο κυματικό πεδίο από το προηγούμενο βήμα και άρα τα ύψη κύματος στον πόδα των υφιστάμενων έργων παράκτιας προστασίας επιλέγονται τρεις (3) διατομές

(Εικόνα 5-16) κατά μήκος της ακτογραμμής των ορίων εκ των οποίων διεισδύει το νερό στον αστικό ιστό, με στόχο τον υπολογισμό της υπερπήδησης σε αυτές τις θέσεις.



Εικόνα 5-16: Τέσσερις υποπεριοχές (με γαλάζιο χρώμα) διερεύνησης και τρία μέτωπα (κίτρινο, κόκκινο και πορτοκαλί) από τα οποία διεισδύουν τα θαλάσσια ύδατα και κατακλύζουν την παράκτια περιοχή του Ρεθύμνου. Διατομές (1-2-3) υπολογισμού υπερπήδησης.

Η παροχή υπερπήδησης q ($l/s/m$), υπολογίζεται στις τρεις διατομές μέσω της εφαρμογής του Νευρωνικού Δικτύου (EurOtop, 2018) το υπόβαθρο του οποίου παρουσιάστηκε στο υποκεφάλαιο 3.3.2. Τα δεδομένα εισόδου αλλά και τα αποτελέσματα δίνονται αναλυτικά στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (EUROTOP, 2018). Οι προβλέψεις του Νευρωνικού Δικτύου βρίσκονται εντός των ορίων εκπαίδευσης του και για τις τρεις διατομές όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-17, προσφέροντας συνεπώς αποτελέσματα με μικρό περιθώριο σφάλματος. Στον Πίνακα 5-7 δίνονται τα ύψη κυματισμών στον πόδα των διατομών (όπως υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις του προηγούμενου βήματος) καθώς και τα αποτελέσματα της παροχής κυματικής υπερπήδησης για τις τρεις διατομές (1-2-3) και για τα σενάρια S1 - S4.



Εικόνα 5-17. Προβλέψεις (μπλε κουκίδες) και δεδομένα εκπαίδευσης (κόκκινες κουκίδες) κυματικής υπερπήδησης Νευρωνικού Δικτύου (EurOtop, 2018) για την α) Διατομή 1, β) Διατομή 2 και γ) Διατομή 3.

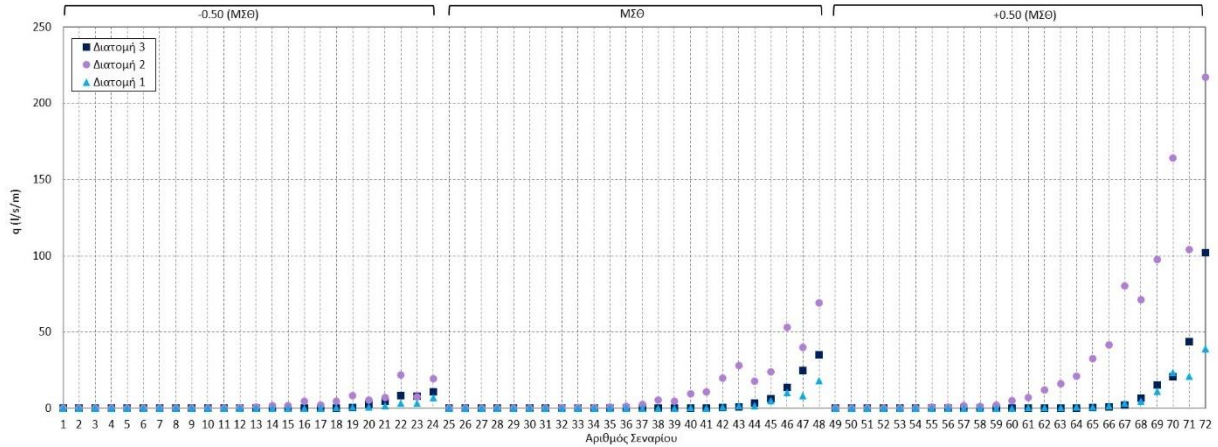
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 5-7 προκύπτει ένα σημαντικό συμπέρασμα. Οι μεγαλύτερες παροχές υπερπήδησης προκύπτουν στην Διατομή 2, δηλαδή στο μέτωπο της Υποπεριοχής 2 την περιοχή του πάρκινγκ. Όντως, σύμφωνα και με τις μαρτυρίες κατοίκων οι μεγαλύτεροι όγκοι θαλασσινού νερού διεισδύουν από αυτό το μέτωπο κατακλύοντας αρχικά την περιοχή του πάρκινγκ και ακολούθως την Υποπεριοχή 4 δηλαδή μέρος του αστικού ιστού.

Πίνακας 5-7: Ύψη κυματισμών στον πόδα των διατομών και αποτελέσματα παροχής κυματικής υπερπήδησης για τις τρεις διατομές και τα σενάρια S1-S4.

	Διατομή	S1	S2	S3	S4
Ύψος κύματος στον πόδα της διατομής H_s (m) όπως υπολογίστηκε από τις προσομοιώσεις του προηγούμενου βήματος	1	3.42	3.85	3.53	4.31
	2	4.15	4.31	4.16	4.45
	3	5.48	4.93	5.03	5.33
Παροχή υπερπήδησης q (l/s/m)	1	1.00	2.14	1.15	6.92
	2	34.90	53.30	41.70	58.90
	3	7.85	1.82	2.68	8.09

Οι ίδιοι υπολογισμοί έγιναν και για τα σενάρια N1-N72. Τα δεδομένα εισόδου αλλά και τα αποτελέσματα δίνονται αναλυτικά επίσης στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΜΕΣΩ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ (EUROTOP, 2018). Με βάση αυτά τα αποτελέσματα δημιουργήθηκε το διάγραμμα που δίνεται στην Εικόνα 5-18. Αυτό το διάγραμμα δίνει αρκετή πληροφορία για τις συνθήκες υπερπήδησης. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι:

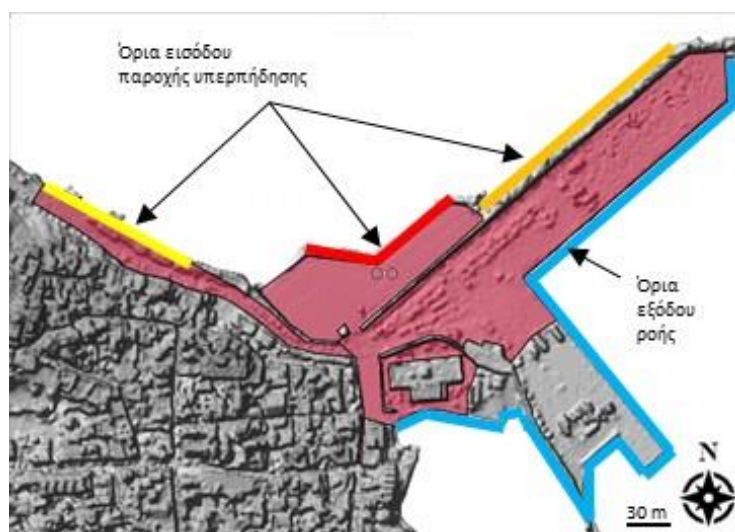
- Η άνοδος της θαλάσσιας στάθμης για τα ίδια κυματικά χαρακτηριστικά μπορεί μέχρι και να δεκαπλασιάσει περίπου την παροχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σενάριο N24 (-0.50 m ΜΣΘ) σε σύγκριση με το σενάριο N72 (+0.50 m ΜΣΘ) για τη Διατομή 2.
- Η αύξηση του ύψους κύματος με σταθερή την περίοδο και για την ίδια στάθμη θάλασσας οδηγεί όχι σε γραμμική αλλά σε εκθετική αύξηση της παροχής υπερπήδησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι παροχές των σεναρίων N64, N67, N69 και N71. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και για αύξηση της περιόδου κορυφής με σταθερό το ύψος κύματος και ίδια στάθμη θάλασσας (N61-64).
- Οι μεγαλύτερης ενέργειας (ύψους και περιόδου) κυματισμοί, ως αναμενόταν οδηγούν σε μεγαλύτερες παροχές υπερπήδησης για την ίδια στάθμη θάλασσας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σύγκριση των σεναρίων N49 και N72 για τη Διατομή 2, με παροχές 0.1 l/s/m και 217 l/s/m αντίστοιχα.
- Οι μεγαλύτερες παροχές υπερπήδησης προκύπτουν από τη Διατομή 2 κάτι που συνάδει και με τα προαναφερόμενα, ότι δηλαδή οι μεγαλύτερες ποσότητες νερού κατά τη διάρκεια πραγματικών συμβάντων διεισδύουν από το μέτωπο του πάρκινγκ. Ακολουθεί η Διατομή 3 και έπεται η Διατομή 1.



Εικόνα 5-18. Παροχή κυματικής υπερπήδησης στις Διατομές 1 (γαλάζια τρίγωνα), 2 (μωβ κουκίδες) και 3 (μπλε τετράγωνα) όπως υπολογίστηκαν μέσω του Νευρωνικού Δικτύου (EurOtop, 2018) για τα σενάρια N1-N72.

5.5. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ

Οι παροχές υπερπήδησης που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο βήμα μαζί με το ψηφιακό μοντέλο εδάφους λειτουργούν ως δεδομένα εισόδου στο υδροδυναμικό μοντέλο HEC-RAS 2D (US Army Corps of Engineers, 2016) προσομοίωσης της παράκτιας κατάκλυσης, το επιστημονικό υπόβαθρο του οποίου αναλύθηκε σε παραπάνω κεφάλαιο. Στην Εικόνα 5-19 απεικονίζεται το αριθμητικό πεδίο που χρησιμοποιήθηκε για το υδροδυναμικό μοντέλο καθώς και τα όρια εισόδου και εξόδου της ροής. Όρια εισόδου αποτελούν τα τρία μέτωπα από όπου διεισδύει το νερό όπως προσδιορίστηκαν παραπάνω (Εικόνα 5-16). Όρια εξόδου αποτελούν τα κρηπιδώματα των εσωτερικών λιμνολεκανών του Λιμένα Ρεθύμνου όπου η ροή του νερού εκβάλλει ξανά μέσα στη θάλασσα. Επίσης, στην ίδια Εικόνα 5-19, με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται η περιοχή που κατακλύστηκε σύμφωνα με τις καταγραφές και τις μαρτυρίες των κατοίκων κατά τη διάρκεια των τεσσάρων συμβάντων που θα χρησιμοποιηθεί και ως υπόβαθρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα της υδροδυναμικής προσομοίωσης ακολούθως.



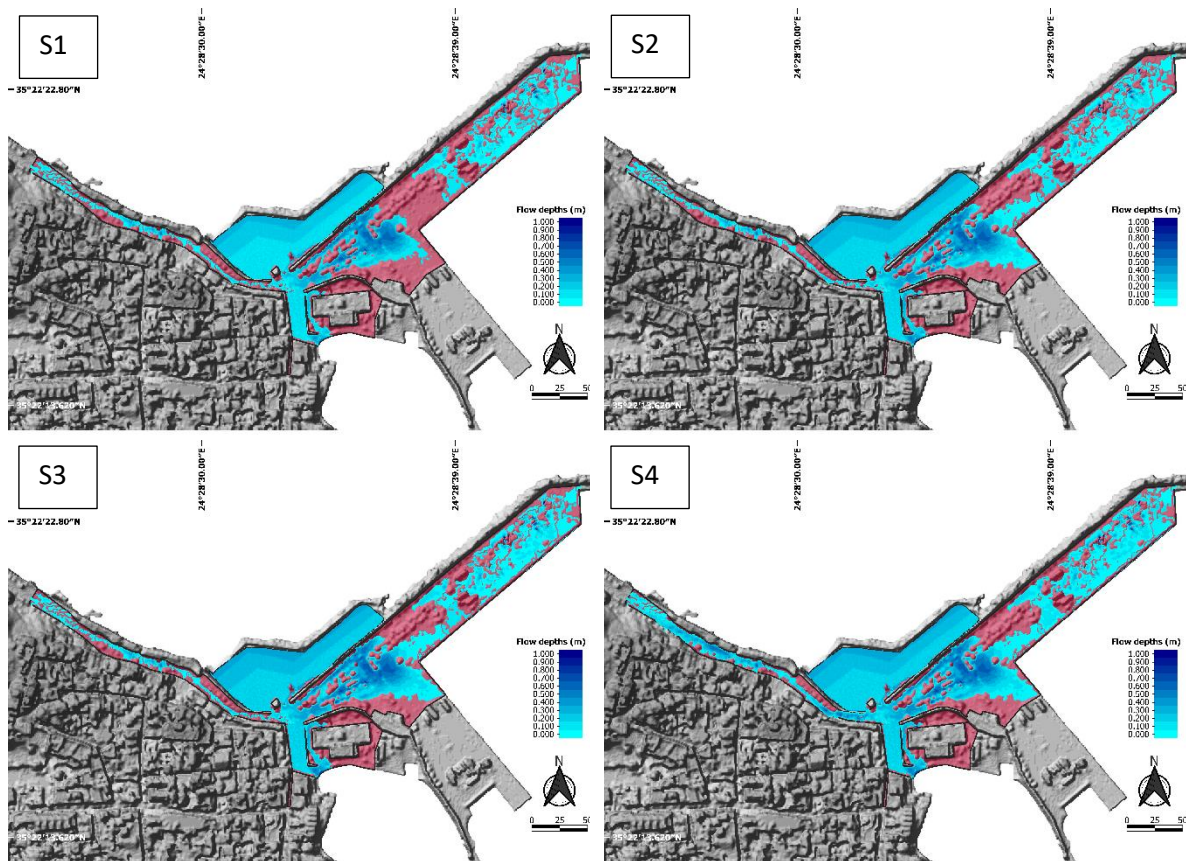
Εικόνα 5-19. Αριθμητικό πεδίο υδροδυναμικού μοντέλου και όρια εισόδου και εξόδου ροής. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνεται η περιοχή που κατακλύστηκε σύμφωνα με τις καταγραφές και τις μαρτυρίες κατά τη διάρκεια των τεσσάρων συμβάντων.

Το αριθμητικό πλέγμα που κατασκευάστηκε περιέχει περίπου 235.000 κελιά με χωρικό βήμα 1 m. Ο χρόνος προσομοίωσης ήταν περίπου μια ώρα, με χρονικό βήμα ίσο με 1 s, δεδομένου ότι, σύμφωνα και με τις μαρτυρίες των κατοίκων αλλά και τις οπτικοακουστικές καταγραφές, οι εισερχόμενοι όγκοι θαλασσινού νερού κατακλύουν την παράκτια περιοχή διερεύνησης σε μικρότερο χρονικό διάστημα της μίας ώρας από την έναρξη της καταιγίδας. Σημαντικός παράγοντας στην προσομοίωση της πλημμύρας σε κατοικημένες περιοχές είναι και η αναπαράσταση των κτιρίων και άλλων εμποδίων. Η μέθοδος αναπαράστασης κτιριακών κατασκευών που χρησιμοποιείται υποθέτει ότι κάθε κελί του πλέγματος που βρίσκεται μέσα σε μια περιοχή οικοδομικού τετραγώνου αντιπροσωπεύεται με μια τοπική αύξηση του υψόμετρου. Έτσι, κάθε κατασκευή τροποποιείται για να έχει μεγαλύτερο υψόμετρο από το υψόμετρο της καθαρής γης και με αυτό τον τρόπο δεν δύναται να καλυφθεί με νερό. Η τιμή του συντελεστή τραχύτητας του Manning εκτιμήθηκε με τυπικούς πίνακες συντελεστών τραχύτητας Manning και ορίστηκε ίσος με $0,02 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$ σε ολόκληρη την υπολογιστική περιοχή.

Στην Εικόνα 5-20 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου για κάθε σενάριο S1 – S4. Συγκεκριμένα απεικονίζονται οι περιοχές κατάκλυσης που προέκυψαν σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (με παλέτα διαβάθμισης μπλε χρώματος ανάλογα με το βάθος ροής) σε σύγκριση με την περιοχή που κατακλύστηκε στην πραγματικότητα κατ' εκτίμηση από καταγραφές βίντεο και μαρτυρίες κατοίκων (περιοχή με κόκκινο χρώμα).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προκύπτουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Οι όγκοι νερού που διεισδύουν από το μέτωπο του παραλιακού δρόμου ακολουθούν κατηφορική ροή προς την είσοδο του παρκινγκ, μιας και ο δρόμος έχει κλίση προς εκείνη την περιοχή, αυξάνοντας περαιτέρω τα βάθη ροής στον αστικό ιστό.
- Η περιοχή του πάρκινγκ κατακλύεται ολόκληρη και το νερό βρίσκει δίοδο προς τον αστικό ιστό και την νοτιοδυτική περιοχή του λιμένα από την περιοχή εισόδου/ εξόδου του παρκινγκ. Τελικώς η ροή βρίσκει έξοδο προς τις δυο εσωτερικές λιμενολεκάνες του λιμένα Ρεθύμνου.
- Σαν γενική εικόνα, συγκρίνοντας την χωρική ανάπτυξη της κατάκλυσης που προκύπτει από την προσομοίωση σε σχέση με την κατ' εκτίμηση (από καταγραφές) περιοχή που κατακλύστηκε στην πραγματικότητα, μπορεί να ειπωθεί ότι υπάρχει μια ικανοποιητική σύγκλιση δεδομένου μάλιστα ότι αυτές οι καταγραφές δεν βασίζονται σε πραγματικές μετρήσεις βαθών ή/ και ταχυτήτων ροής αλλά σε βίντεο και αυτοψίες.



Εικόνα 5-20: Περιοχές κατάκλυσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων (με παλέτα διαβάθμισης μπλε χρώματος ανάλογα με το βάθος ροής) σε σύγκριση με την περιοχή που κατακλύστηκε στην πραγματικότητα κατ' εκτίμηση από καταγραφές βίντεο και μαρτυρίες κατοίκων (επισημασμένες με κόκκινο χρώμα).

Προσομοιώσεις έγιναν επίσης και για τα υπόλοιπα σενάρια N1-N72 και τα αποτελέσματα δίνονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ.

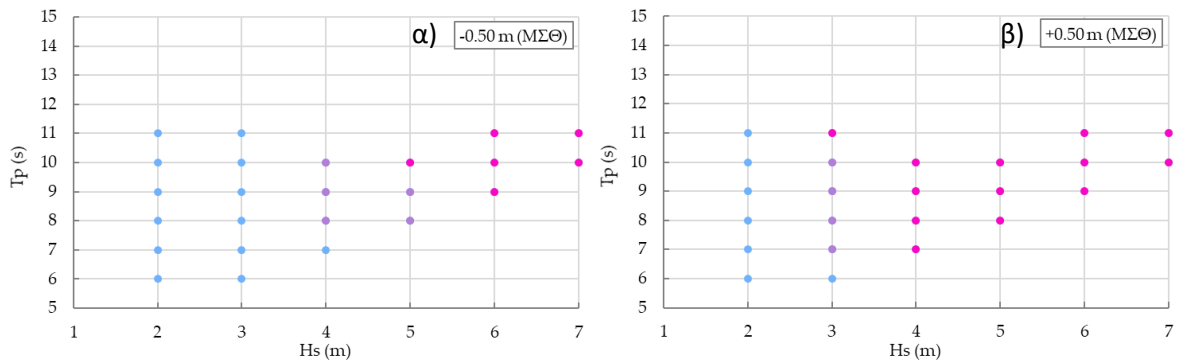
5.6. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των σεναρίων N1 - N72 επιχειρείται στην παρούσα ΜΔΕ μια προκαταρκτική ταξινόμηση της επικινδυνότητας της παράκτιας πλημμύρας με βάση το κριτήριο βάθους ροής. Συγκεκριμένα, για κάθε υποπεριοχή διερεύνησης βρέθηκε το μέγιστο βάθος ροής για όλα τα σενάρια. Η ταξινόμηση των βαθών ροής έγινε στις ακόλουθες τρεις κλάσεις:

1. Χαμηλή επικινδυνότητα, βάθη ροής $d \leq 0.15$ m.
2. Μέτρια επικινδυνότητα, βάθη ροής $0.15 < d \leq 0.35$ m.
3. Υψηλή επικινδυνότητα, βάθη ροής $d > 0.35$ m.

Σημειώνεται εδώ ότι ο βαθμός επικινδυνότητας μπορεί να εξαρτηθεί πρόσθετα και από τις ταχύτητες ροής, την επιφάνεια κατάκλυσης και την τρωτότητα της κάθε υποπεριοχής. Ο συνδυαστικός αυτός βαθμός μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.

Στην Εικόνα 5-21 παρουσιάζονται οι κλάσεις επικινδυνότητας για την περιοχή του πάρκινγκ (όπως δίνονται και στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ), σε συνάρτηση με τη μέγιστη και ελάχιστη θαλάσσια στάθμη και σε σχέση με τα ζεύγη κυματικών χαρακτηριστικών στα ανοιχτά που επιλέχθηκαν για διερεύνηση στην παρούσα ΜΔΕ.



Εικόνα 5-21. Κλάσεις επικινδυνότητας (1. Χαμηλή: γαλάζιες κουκίδες, 2. Μέτρια: μωβ, 3. Υψηλή: ροζ) για την περιοχή του πάρκινγκ σε συνάρτηση με τα ζεύγη κυματικών χαρακτηριστικών στα ανοιχτά και την α) ελάχιστη και β) μέγιστη θαλάσσια στάθμη.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα γίνονται οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 5-21β, που αντιπροσωπεύει τη μέγιστη διερευνηθείσα στάθμη θάλασσας, κυματισμοί στα ανοιχτά μικρότεροι από 3 m δεν δύνανται να προκαλέσουν παράκτια πλημμύρα με κλάση επικινδυνότητας μέτρια ή υψηλή. Κυματισμοί ύψους 3 m και περιόδου μεγαλύτερης των 6 s δύνανται να προκαλέσουν πλημμύρες μέτριου έως υψηλού κινδύνου. Ενώ κυματισμοί ύψους >3 m, με τις συνήθεις περιόδους που εμφανίζονται (7-11s), οδηγούν σε πλημμύρες υψηλής επικινδυνότητας.
- Στην κατώτατη (διερευνηθείσα) χαμηλή στάθμη (Εικόνα 5-21α), η εικόνα είναι πιο ευνοϊκή καθώς υψηλής επικινδυνότητας παράκτια πλημμύρα δύνανται να προκληθεί από κυματισμούς ύψους ίσου ή μεγαλύτερου των 6 m, ή 5 m με μεγάλη περίοδο κορυφής (> 10 s).
- Συγκρίνοντας το κάθε διάγραμμα ξεχωριστά, είναι προφανές ότι μεγαλύτερης ενέργειας (ύψους και περιόδου) κυματισμοί αυξάνουν την επικινδυνότητα. Ενώ συγκρίνοντας τα δυο διαγράμματα μεταξύ τους είναι προφανής η σημαντική συμβολή της αύξησης της θαλάσσιας στάθμης, εν προκειμένω στην παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου κυρίως λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας, στην εμφάνιση και στην κλάση επικινδυνότητας παράκτιας πλημμύρας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα ΜΔΕ αναπτύσσεται και προτείνεται μια μεθοδολογία για την προσομοίωση της παράκτιας πλημμύρας λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των φαινομένων και των μηχανισμών που συντελούν στην εμφάνισή της. Η εν λόγω μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε πολυάριθμες παράκτιες περιοχές, βασίζεται στην αξιοποίηση ανοιχτών βάσεων δεδομένων θαλάσσιας κατάστασης και στην εφαρμογή προηγμένων και κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων. Η μεθοδολογία αυτή εφαρμόστηκε στην παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου στο νησί της Κρήτης, στην Ανατολική Μεσόγειο Θάλασσα, η οποία είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στην εκδήλωση τέτοιων φαινομένων και τα αποτελέσματα της συγκρίθηκαν με καταγραφές συμβάντων στο παρελθόν με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Επίσης, πέραν αυτών των γεγονότων διερευνήθηκαν και διακριτά σενάρια θαλάσσιας κατάστασης με διαφορετικά κυματικά χαρακτηριστικά και διαφορετικές θαλάσσιες στάθμες με στόχο τη βαθύτερη κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν στην παράκτια κατάκλυση. Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν τόσο για τη μεθοδολογία γενικότερα όσο και για την παράκτια περιοχή του Ρεθύμνο αναλύονται ακολούθως.

6.1.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικά με την προτεινόμενη μεθοδολογία είναι τα εξής:

- Μέσα από τη βιβλιογραφική αναδίφηση που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας ΜΔΕ προκύπτει ότι δεν υπάρχει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για την προσομοίωση παράκτιων πλημμυρικών γεγονότων που έλαβαν χώρα στο παρελθόν, λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των μηχανισμών που συμβάλουν, αξιοποιώντας δεδομένα από τις ανοιχτές βάσεις και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με καταγραφές και αυτοψίες. Συνεπώς, η παρούσα ΜΔΕ προτείνει μια καινοτόμο μεθοδολογία, αλληλουχίας και σύζευξης εξελιγμένων μαθηματικών μοντέλων κυματικής διάδοσης, αναρρίχησης, υπερπήδησης και υδροδυναμικής κατάκλυσης ως ένα ενιαίο υπολογιστικό σύστημα.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε παράκτια περιοχή μέχρι το σημείο όπου η διάβρωση μεταβάλλει σημαντικά τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του παράκτιου μετώπου και οι παρακείμενες εκροές ποταμών αρχίζουν να έχουν σημαντική συμβολή στην άνοδο της θαλάσσιας στάθμης στην παράκτια ζώνη ενδιαφέροντος.
- Επιπλέον, επισημαίνεται ότι η μεθοδολογία είναι κυρίως κατάλληλη για τοπικές κλίμακες και προφανώς βασίζεται στην χωροχρονική ανάλυση και στην ακρίβεια των δεδομένων των ανοιχτών βάσεων που χρησιμοποιούνται.
- Οι βάσεις δεδομένων μπορούν να προσφέρουν κυματικά δεδομένα και δεδομένα θαλάσσιας κατάστασης παρελθόντων ετών, που παραμένουν κοντά στις πραγματικές συνθήκες.

6.1.2. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικά με την παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου είναι τα εξής:

- Στην παρούσα ΜΔΕ επιλέχθηκε η περιοχή του Ρεθύμνου της Κρήτης γιατί είναι μια περιοχή που πλήττεται σφοδρά και συχνά από παράκτιες πλημμύρες, ενώ ταυτόχρονα εξαιτίας της έντονης τουριστικής, οικιστικής και εμπορικής δραστηριότητας πολύ κοντά στην ακτογραμμή, τίθενται σε κίνδυνο η ασφάλεια των κατοίκων, οι ιδιοκτησίες και οι υποδομές.

- Η παράκτια περιοχή είναι εκτεθειμένη σε κυματισμούς που προσπίπτουν από ΔΒΔ, ΒΒΔ, Β και ΒΒΑ. Η επικρατέστερη διεύθυνση προσπίπτοντος κυματισμού, που επηρεάζει σημαντικά την περιοχή διερεύνησης και παρουσιάζει και τα υψηλότερα ύψη κύματος τα οποία φθάνουν έως την ομάδα των (6.0-6.5) m, είναι η Βόρεια, όπως αναμενόταν λόγω των μεγαλύτερων αναπτυγμάτων πελάγους (>120 km).
- Παρατηρείται ότι η αστρονομική παλίρροια έχει μικρό εύρος και συνεπώς έχει και μικρή συμβολή ως αίτιο πρόκλησης παράκτιας πλημμύρας, ενώ η μετεωρολογική παλίρροια παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στην ανύψωση της θαλάσσιας στάθμης.
- Οι κυματισμοί διατηρούν το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που έχουν στα βαθιά νερά, όταν προσεγγίζουν το ευάλωτο σε πλημμύρα παράκτιο μέτωπο, σε αντίθεση με τις παρακείμενες ακτές όπου εμφανίζεται μια ευρεία ζώνη θραύσης και τα κύματα φτάνουν στην ακτογραμμή με σημαντική απώλεια της ενέργειας τους. Αυτό αποδίδεται στην μορφολογία του πυθμένα εμπροσθεν αυτού του μετώπου, δηλαδή στην ύπαρξη απότομων κλίσεων του πυθμένα σε αντίθεση με τις παρακείμενες ακτές που εμφανίζουν ηπιότερη κλίση.
- Σύμφωνα με τα αποτελέσματα οι μεγαλύτερες παροχές υπερπήδησης προκύπτουν στο παράκτιο μέτωπο της περιοχής του πάρκινγκ. Όντως, σύμφωνα και με τις μαρτυρίες κατοίκων οι μεγαλύτεροι όγκοι θαλασσινού νερού διεισδύουν από αυτό το μέτωπο κατακλύοντας αρχικά την περιοχή του πάρκινγκ και ακολούθως την Υποπεριοχή 4 δηλαδή μέρος του αστικού ιστού. Η περιοχή του πάρκινγκ κατακλύεται ολόκληρη και το νερό βρίσκει δίοδο προς τον αστικό ιστό και την νοτιοδυτική περιοχή του λιμένα από την περιοχή εισόδου/ εξόδου του παρκινγκ. Τελικώς η ροή βρίσκει έξοδο προς τις δυο εσωτερικές λιμενολεκάνες του λιμένα Ρεθύμνου.
- Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των διακριτών σεναρίων που επιλέχθηκαν για διερεύνηση, για τη μέγιστη στάθμη θάλασσας, κυματισμοί στα ανοιχτά μικρότεροι από 3 m δεν δύνανται να προκαλέσουν παράκτια πλημμύρα με κλάση επικινδυνότητας μέτρια ή υψηλή. Κυματισμοί ύψους 3 m και περιόδου μεγαλύτερης των 6 s δύνανται να προκαλέσουν πλημμύρες μέτριου έως και υψηλού κινδύνου. Ενώ κυματισμοί ύψους >3 m, με τις συνήθεις περιόδους που εμφανίζονται (7-11s), οδηγούν σε πλημμύρες υψηλής επικινδυνότητας.
- Στην κατώτατη (διερευνηθείσα) χαμηλή στάθμη, η εικόνα είναι πιο ευνοϊκή καθώς υψηλής επικινδυνότητας παράκτια πλημμύρα δύνανται να προκληθεί από κυματισμούς ύψους ίσου ή μεγαλύτερου των 6 m, ή 5 m με μεγάλη όμως περίοδο κορυφής (> 10 s).
- Τέλος, σημειώνεται ότι σύμφωνα με τα αποτελέσματα είναι προφανής η σημαντική συμβολή της αύξησης της θαλάσσιας στάθμης, εν προκειμένω στην παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου κυρίως λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας, στην εμφάνιση και στην κλάση επικινδυνότητας παράκτιας πλημμύρας.

6.2. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα τόσο για την εξέλιξη της προτεινόμενης εδώ μεθοδολογίας όσο και την παράκτια περιοχή του Ρεθύμνου παρουσιάζονται ακολούθως.

6.2.1. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ

Οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα εξέλιξης της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι οι εξής:

- Επόμενο πεδίο έρευνας για να ενισχυθεί περαιτέρω η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να αποτελέσει η ενσωμάτωση του φαινομένου της διάβρωσης καθώς και η συμβολή των ποταμών στην άνοδο της θαλάσσιας στάθμης στην παράκτια ζώνη ενδιαφέροντος.
- Η κατηγοριοποίηση της επικινδυνότητας σε κλάσεις μπορεί να ενσωματώσει και τις ταχύτητες ροής, την επιφάνεια κατάκλυσης και την τρωτότητα της κάθε υποπεριοχής.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία αλλά και τα αποτελέσματά της μπορούν να βοηθήσουν στην κατάστρωση ενός Συστήματος Έγκαιρης Πρόγνωσης Παράκτιων Πλημμυρών με στόχο την έγκαιρη προειδοποίηση των κατοίκων.

6.2.2. ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΖΩΝΗ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

Οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την παράκτια ζώνη του Ρεθύμνου είναι οι εξής:

- Προσομοίωση όλων των υπόλοιπων εισερχόμενων κυματικών διευθύνσεων, πέραν της βόρειας που διερευνήθηκε στην παρούσα ΜΔΕ και μπορούν να προκαλέσουν παράκτια πλημμύρα, δηλαδή ΔΒΔ, ΒΒΔ και ΒΒΑ.
- Κατηγοριοποίηση επικινδυνότητας για όλες τις εισερχόμενες κυματικές διευθύνσεις αλλά και για κάθε μία από τις τέσσερις υποπεριοχές μελέτης

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

➤ Διεθνής και Ελληνική Βιβλιογραφία

- Athanassoulis, G. B. (2014). Application of SWAN wave model for climatic simulation of sea condition at coastal areas of the Mediterranean. In: 6th Panhellenic Conf. Coastal Zones Manage. Improvement, 24—27 November 2014, Athens, Greece, 345—364.
- Barnard, P., Ormond, M. v., Erikson, L., Eshleman, J., Hapke, C., Ruggiero, P., . . . Foxgrover, A. (2014). Development fo the Coastal Storm Modeling System (CoSMoS) for predicting the impact of storms on high - energy, active - margin coasts. [[doi:10.1007/S11069-014-1236-Υ](https://doi.org/10.1007/S11069-014-1236-Υ)].
- Battjes, J. A. (1974). “Surf Similarity,” Proceedings of the 14th Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, pp 466-480.
- Bogaard, T., Kleermaeker, S. D., Jaeger, W., & van Dongeren, A. (2016). Development of Generic Tools for Coastal Early Warning and Decision Support, Proceedings of the 3rd European Conference on Flood Risk Management.
- CEM, Chapter 4, Surf Zone Hydrodynamics. (2003).
- Chondros, M., Metallinos, A., Memos, C., Karambas, T. V., & Papadimitriou, A. (2021). Concerted nonlinear mild-slope wave models for enhanced simulation of coastal processes. [[doi:10.1016/j.apm.2020.08.027](https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.08.027)].
- de Kleermaeker, S., Verlaan, M., Kroos, J., & Zijl, F. (2012). A new coastal flood forecasting system for the Netherlands, Proceedings of the HYDRO12 - Taking care of the sea.
- Dee, D., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., . . . al., e. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. [<https://doi.org/10.1002/qj.828>].
- Doong, D., Chuang, L., Wu, L., Fan, Y., Kao, C., & Wang, J. (2012). Development of an operational coastal flooding early warning system. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. . [[doi:10.5194/NHESS-12-379-2012](https://doi.org/10.5194/NHESS-12-379-2012)].
- Dreier, N., & Fröhle, P. (2018). Operational wave forecast in the German Bight as part of a sensor- and risk based early warning system.
- Escudier, R., Clementi, E., Drudi, M., Pistoia, J., Grandi, A., Cipollone, A., . . . Pinardi, N. (2020). A high resolution reanalysis for the Mediterranean Sea.
- EurOtop, V. d. (2018). EurOtop Manual on wave overtopping of sea defences and related structures.
- Gad, F.-K., Chatzinaki, M., Vandarakis, D., Kyriakidou, C., & Kapsimalis, V. (2020). Assessment of Wave Storm-Induced Flood Vulnerability in Rhodes Island, Greece. Water. [<https://doi.org/10.3390/w12112978>].
- Gallien, T., Sanders, B., & Flick, R. (2014,). Urban coastal flood prediction: Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage. [[doi:10.1016/J.COASTALENG.2014.04.007](https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2014.04.007)].
- Holman, R. A. (1985). “Setup and Swash on a Natural Beach,” Journal of Geophysical Research, Vol 90, No. C1, pp 945-953.

- Holman, R. A. (1986). "Extreme Value Statistics for Wave Run-up on a Natural Beach," Coastal Engineering, Vol 9, No. 6, pp 527-544.
- Hunt, I. A. (1959). "Design of Seawalls and Breakwaters," Journal of the Waterways and Harbors Division, Vol 85, No. WW3, pp 123-152.
- IPCC. (2012).
- IPCC Report, M. O. (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate - Chapter 4: Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. USA/New Zealand/South Africa.
- IPCC, M. J. (2018). IPCC Glossary. France/UK.
- Jones, C., Brøker, I., Coulton, P., Gangai, J., Hatheway, D., Lowe, J., . . . Srinivas. (2015). P.E.R. WAVE RUNUP AND OVERTOPPING FOCUSED STUDY REPORTS Wave Runup and Overtopping FEMA Coastal Flood Hazard Analysis and Mapping Guidelines Focused Study Report Focused Study Leader Team Members WAVE RUNUP AND OVERTOPPING i FEMA COASTAL FLOOD HAZARD AN.
- Keller, J. B. (1961). "Tsunamis -- Water Waves Produced by Earthquakes," Proceedings of the Tsunami Meetings Associated with the 10th Pacific Science Congress, International Union of Geodesy and Geophysics, pp 154-166.
- Kirby, J. (1986). A general wave equation for waves over rippled beds. [doi:10.1017/S0022112086001994].
- Kirby, J. (1986). On the gradual reflection of weakly nonlinear Stokes waves in regions with varying topography. [doi:10.1017/S0022112086002008].
- Kirby, J., & Dalrymple, R. (1983). A parabolic equation for the combined refraction diffraction of Stokes waves by mildly varying topography. [doi:10.1017/S0022112083002232].
- Longuet-Higgins, M. S. (1963). A Note on Wave Setup," Journal of Marine Research, Vol 21, No. 1, pp 4-10.
- Manual, U. H.-R. (2006).
- Mase, H. (1989). "Random Wave Runup Height on Gentle Slope," Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol 115, No. 5, pp 649-661.
- Memos, C., Makris, C., Metallinos, A., Karambas, T., Zissis, D., Chondros, M., . . . Tsoukala, V. (2019). Accu-Waves: A decision support tool for navigation safety in ports, Proceedings of the 1st International Conference Design and Management of Port, Coastal and Offshore works (DMPCO).
- Mendoza, E., & Jiménez, J. (2015). Regional vulnerability analysis of Catalan beaches to storms, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Maritime Engineering. [doi:10.1680/MAEN.2009.162.3.127].
- Merrifield, M., Johnson, M., Guza, R., Fiedler, J., Young, A., Henderson, C., . . . Terril, E. (2021). An early warning system for wave-driven coastal flooding at Imperial Beach.
- Miche, M. (1951). "Le Pouvoir Réfléchissant des Ouvrages Maritimes Exposés à l'Action de la Houle," Annals des Ponts et Chaussées, 121e Année, pp 285-319 .

- Mihu-Pintilie, A., Cîmpianu, C., Stoleriu, C., Pérez, M., & Paveluc, L. (2019). Using High-Density LiDAR Data and 2D Streamflow Hydraulic Modeling to Improve Urban Flood Hazard Maps: A HEC-RAS Multi-Scenario Approach. [<https://doi.org/10.3390/w11091832>].
- Nielsen, P. a. (1991). "Wave Runup Distributions on Natural Beaches," *Journal of Coastal Research*, Vol 7, No. 4, pp 1139-1152.
- PEARL. (2021). Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions . [<http://www.pearl-fp7.eu/>].
- Petroliagkis, T., Voukouvalas, E., Disperati, J., & Bidlot, J. (2016). Joint Probabilities of Storm Surge, Significant Wave Height and River Discharge Components of Coastal Flooding Events.
- Prinos, P. (2014). Climate change effects on the Greek seas and coastal areas — the research project THALIS-CCSEAWAVS. In: 6th Panhellenic Conference on Coastal Zones Management and Improvement.
- Ravdas, M., Zacharioudaki, A., & Korres, G. (2018). Implementation and validation of a new operational wave forecasting system of the Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre in the framework of the Copernicus Marine Environment Monitoring Service. [<http://dx.doi.org/10.5194/nhess-18-2675-2018>].
- Robert G. Dean, R. A. (2000). *Waver Wave Mechanics for Engineers and Scientists*.
- Savage, R. P. (1958). "Wave Run-Up on Roughened and Permeable Slopes," *Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers*, Vol 84, No. WW3, Paper 1640.
- Saville, T. J. (1956). "Wave Runup on Shore Structures," *Journal of the Waterways and Harbors Division, American Society of Civil Engineers*, Vol 82, No. WW2, Paper 925.
- SPM. (1977). *Shore Protection Manual*.
- Teng, J., Jakeman, A., Vaze, J., Croke, B., Dutta, D., & Kim, S. (2017). Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. . [[doi:10.1016/J.ENVSOF.2017.01.006](https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2017.01.006)].
- Tsoukala, V., Chondros, M., Kapelonis, Z., Martzikos, N., Lykou, A., Belibassakis, K., & Makropoulos, C. (2016). An integrated wave modelling framework for extreme and rare events for climate change in coastal areas – the case of Rethymno, Crete. *Oceanologia*. [[doi:10.1016/J.OCEANO.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/J.OCEANO.2016.01.002)].
- Van der Meer, J., Allsop, N., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., . . . Zanuttigh, B. (2016). *EurOtop: Manual on wave overtopping of sea defences and related structures*. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application.
- van Gent, M., van den Boogaard, H., Pozueta, B., & Medina, J. (2007). Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures. [[doi:10.1016/J.COASTALENG.2006.12.001](https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2006.12.001)].
- VanDorn, W. (1953). Wind stress on an artificial pond.
- Velikou, K. T. (2014). High resolution climate over Greece: assessment and future projections. In: 12th International Conference on Meteorology, Heraklion.

- Verhaeghe, H., De Rouck, J., & van der Meer, J. (2008). Combined classifier–quantifier model: A 2-phases neural model for prediction of wave overtopping at coastal structures. [doi:10.1016/J.COASTALENG.2007.12.002].
- Vousdoukas, M. M. (2018). Climatic and socioeconomic controls on coastal flooding impacts in Europe, *Nature Climate Change* 8, pages 776–780.
- Vousdoukas, M.I., Mentaschi L., Voukouvalas E., Feyen L. (2018). Climatic and socioeconomic controls on coastal flooding impacts in Europe, *Nature Climate Change*.
- Walton, T. L. (1989). “Criteria for Evaluating Coastal Flood-Protection Structures,” Technical Report CERC-89-15, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Walton, T. L. (1992). “Interim Guidance for Prediction of Wave Run-up on Beaches,” *Ocean Engineering*, Vol 19, No. 2, pp 199-207.
- Winter, G., Storlazzi, C., Vitousek, S., van Dongeren, A., McCall, R., Hoeke, R., . . . Wandres, M. (2020). Steps to Develop Early Warning Systems and Future Scenarios of Storm Wave-Driven Flooding Along Coral Reef-Lined Coasts.
- Γιάννης Ν. Κρεστενίτης, Κ. Δ. (2015). Παράκτια Μηχανική - Θαλάσσια Περιβαλλοντική Υδραυλική.
- Δημόπουλος, Κ. (2019). ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ EdGCM ΓΙΑ 4 ΣΕΝΑΡΙΑ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.
- Κρεστενίτης, Γ. Ν. (2017). Διερεύνηση των επιδράσεων των έντονων μετεωρολογικών παλιρροιών στις παράκτιες ζώνες της Μεσογείου.
- Μέμος, Κ. (2016). Θαλάσσια Υδροδυναμική.
- Παπαδόπουλος, Α. (2013). Πειραματική Διερεύνηση Ανάκλασης τοίχου επιστροφής σε κυματική δράση.
- Υδρογραφική Υπηρεσία. (2013). Στατιστικά Στοιχεία της Στάθμης της Θάλασσας Ελληνικών Λιμένων.
- ΥΠΕΝ. (2018). ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΔΥΤΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΕΛΛΑΔΑΣ. Ειδική Γραμματεία Υδάτων.
- ΥΠΕΝ. (2021). Κλιματική Αλλαγή.

➤ **Πηγές δικτύου**

<https://www.ipcc.ch>

www.bbc.com

<https://www.dailymail.co.uk>

<https://seagrant.noaa.gov>

www.nytimes.com

www.messinialive.gr

<https://city.sigmalive.com>

<https://www.thetoc.gr>

<https://marine.copernicus.eu>

<https://www.aviso.altimetry.fr/en/home.html>

<https://www.youtube.com>

<https://www.navionics.com/fin>

<http://www.pearl-fp7.eu>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

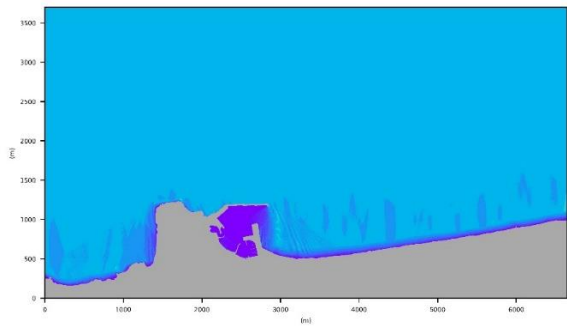
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

α/α	Ύψος κύματος στα ανοιχτά Hs (m)	Περίοδος κορυφής στα ανοιχτά T _p (s)	Μέση διεύθυνση διάδοσης (MWD)	Στάθμη Θάλασσας (από ΜΣΘ)
N1	2	6	360°	-0.5
N2	2	7	360°	-0.5
N3	2	8	360°	-0.5
N4	2	9	360°	-0.5
N5	2	10	360°	-0.5
N6	2	11	360°	-0.5
N7	3	6	360°	-0.5
N8	3	7	360°	-0.5
N9	3	8	360°	-0.5
N10	3	9	360°	-0.5
N11	3	10	360°	-0.5
N12	3	11	360°	-0.5
N13	4	7	360°	-0.5
N14	4	8	360°	-0.5
N15	4	9	360°	-0.5
N16	4	10	360°	-0.5
N17	5	8	360°	-0.5
N18	5	9	360°	-0.5
N19	5	10	360°	-0.5
N20	6	9	360°	-0.5
N21	6	10	360°	-0.5
N22	6	11	360°	-0.5
N23	7	10	360°	-0.5
N24	7	11	360°	-0.5
N25	2	6	360°	0
N26	2	7	360°	0
N27	2	8	360°	0
N28	2	9	360°	0
N29	2	10	360°	0
N30	2	11	360°	0
N31	3	6	360°	0

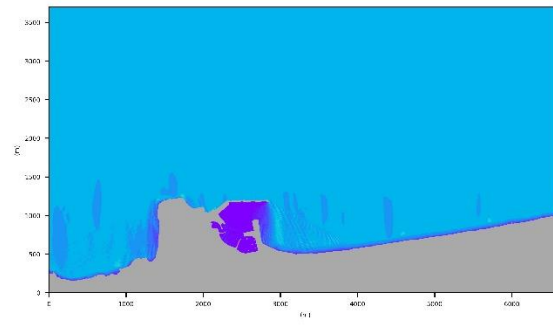
α/α	Ύψος κύματος στα ανοιχτά Hs (m)	Περίοδος κορυφής στα ανοιχτά Tp (s)	Μέση διεύθυνση διάδοσης (MWD)	Στάθμη Θάλασσας (από ΜΣΘ)
N32	3	7	360°	0
N33	3	8	360°	0
N34	3	9	360°	0
N35	3	10	360°	0
N36	3	11	360°	0
N37	4	7	360°	0
N38	4	8	360°	0
N39	4	9	360°	0
N40	4	10	360°	0
N41	5	8	360°	0
N42	5	9	360°	0
N43	5	10	360°	0
N44	6	9	360°	0
N45	6	10	360°	0
N46	6	11	360°	0
N47	7	10	360°	0
N48	7	11	360°	0
N49	2	6	360°	+0.5
N50	2	7	360°	+0.5
N51	2	8	360°	+0.5
N52	2	9	360°	+0.5
N53	2	10	360°	+0.5
N54	2	11	360°	+0.5
N55	3	6	360°	+0.5
N56	3	7	360°	+0.5
N57	3	8	360°	+0.5
N58	3	9	360°	+0.5
N59	3	10	360°	+0.5
N60	3	11	360°	+0.5
N61	4	7	360°	+0.5
N62	4	8	360°	+0.5
N63	4	9	360°	+0.5
N64	4	10	360°	+0.5
N65	5	8	360°	+0.5

α/α	Ύψος κύματος στα ανοιχτά Hs (m)	Περίοδος κορυφής στα ανοιχτά Tp (s)	Μέση διεύθυνση διάδοσης (MWD)	Στάθμη Θάλασσας (από ΜΣΘ)
N66	5	9	360°	+0.5
N67	5	10	360°	+0.5
N68	6	9	360°	+0.5
N69	6	10	360°	+0.5
N70	6	11	360°	+0.5
N71	7	10	360°	+0.5
N72	7	11	360°	+0.5

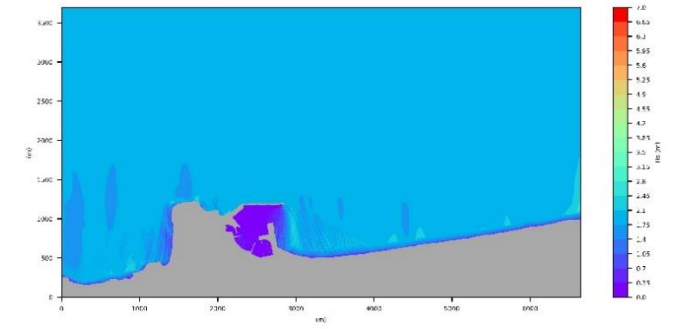
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ



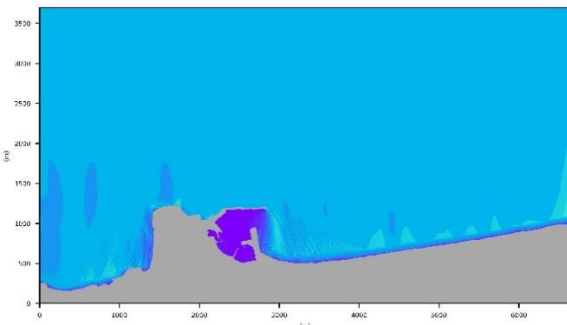
N1



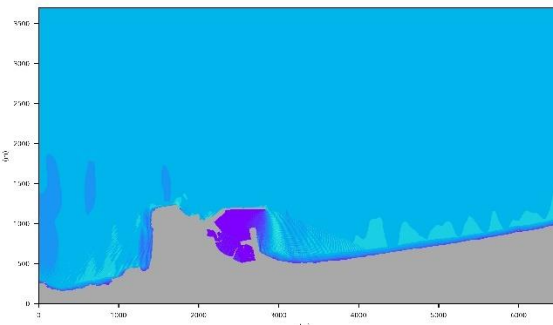
N2



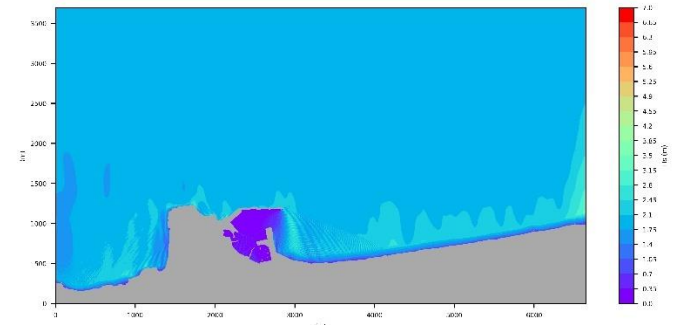
N3



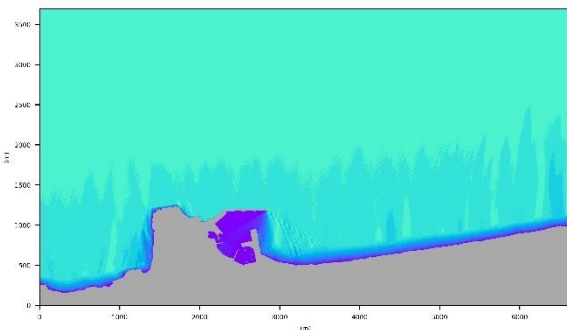
N4



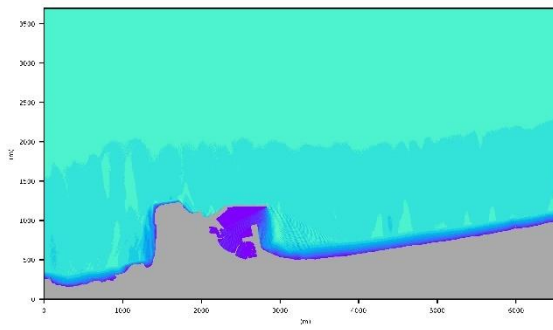
N5



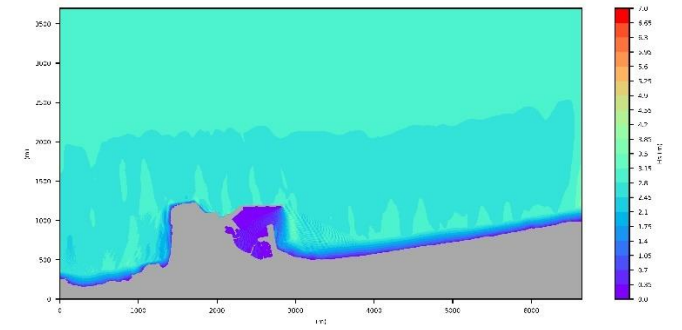
N6



N7

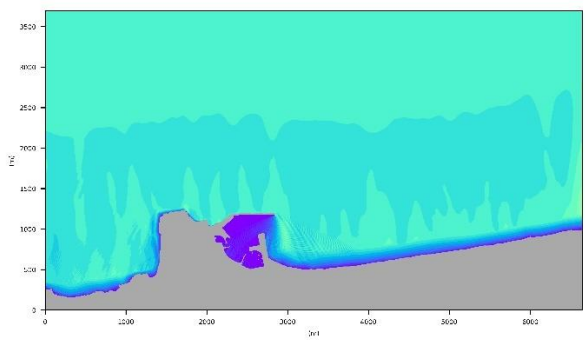


N8

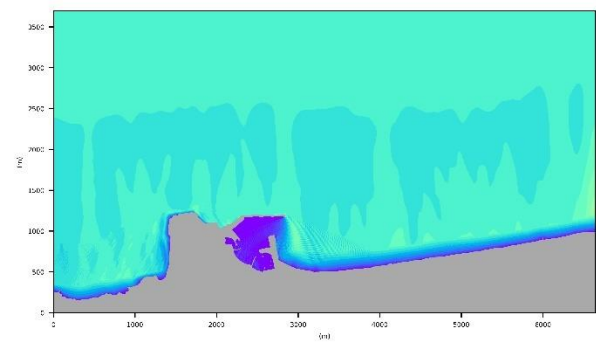


N9

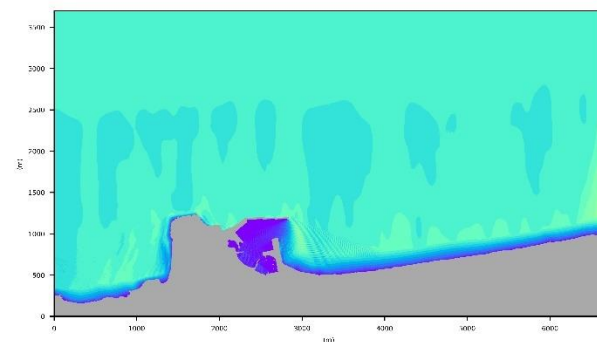
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



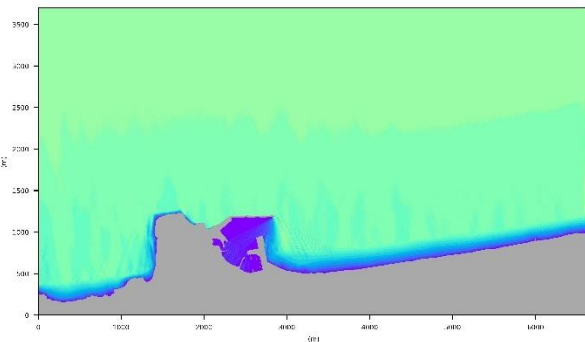
N10



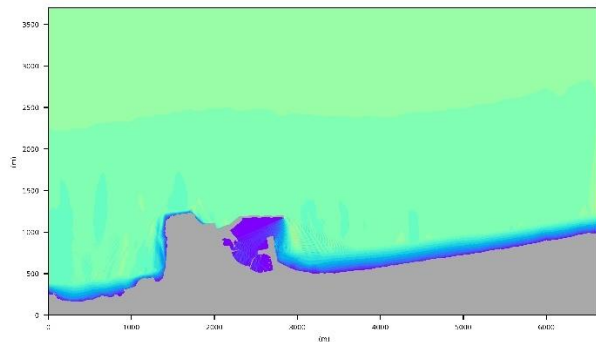
N11



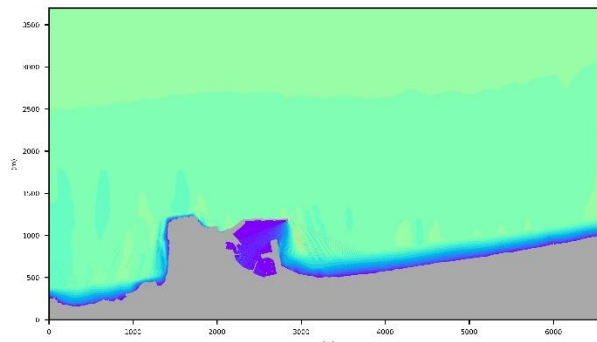
N12



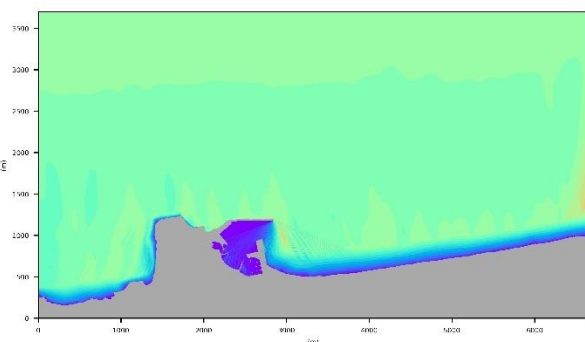
N13



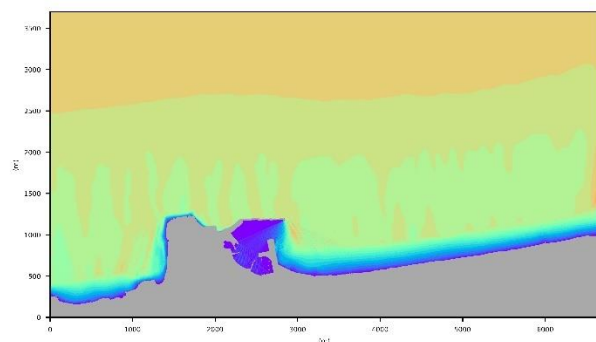
N14



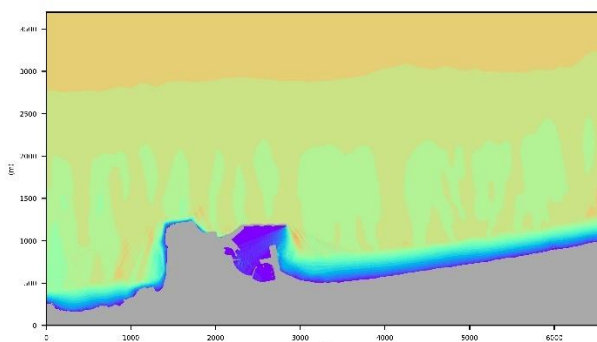
N15



N16

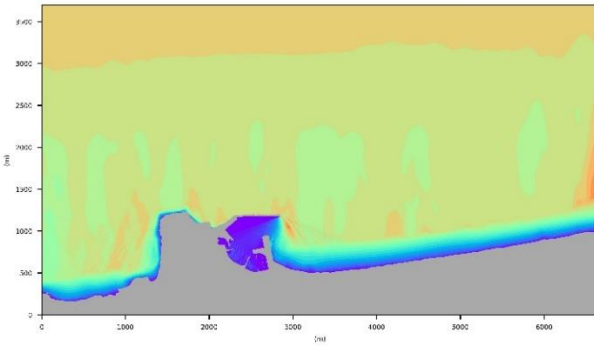


N17

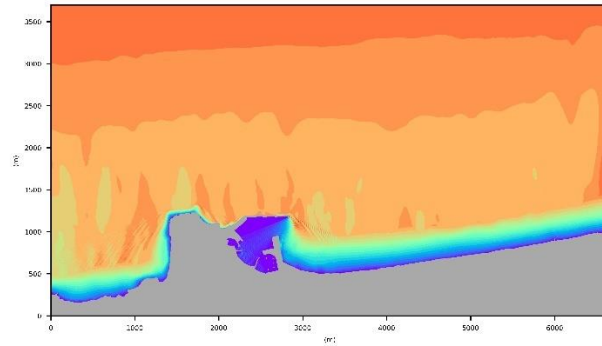


N18

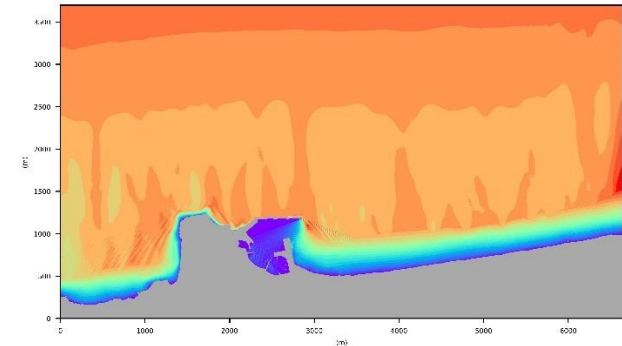
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



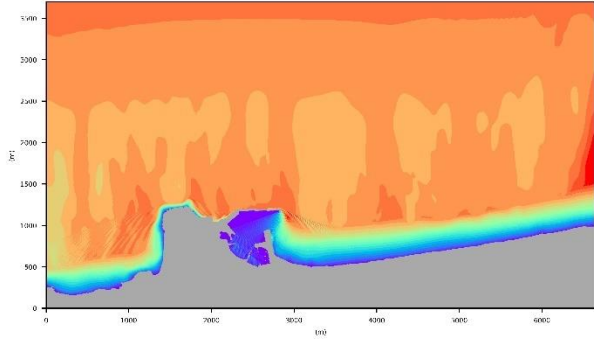
N19



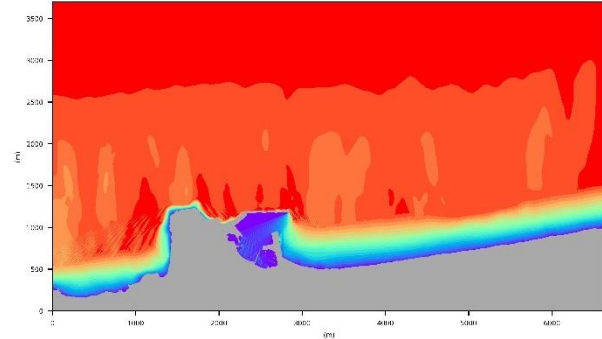
N20



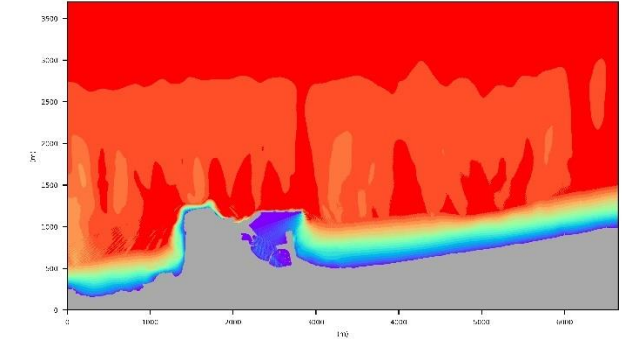
N21



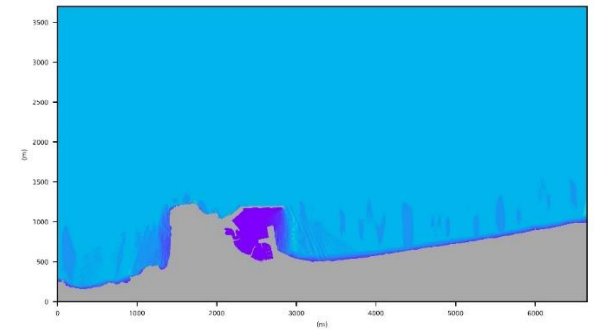
N22



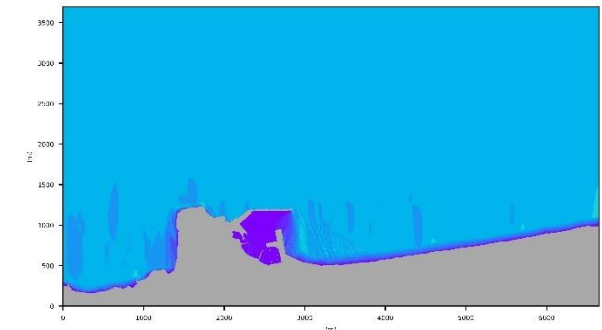
N23



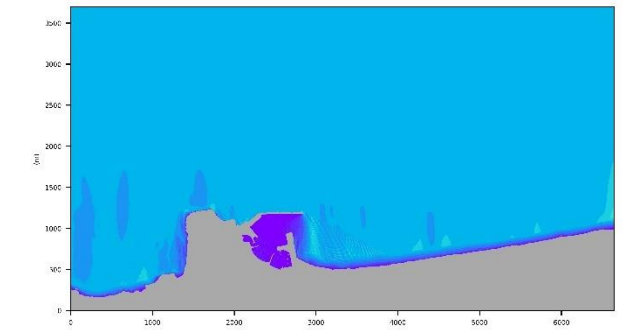
N24



N25

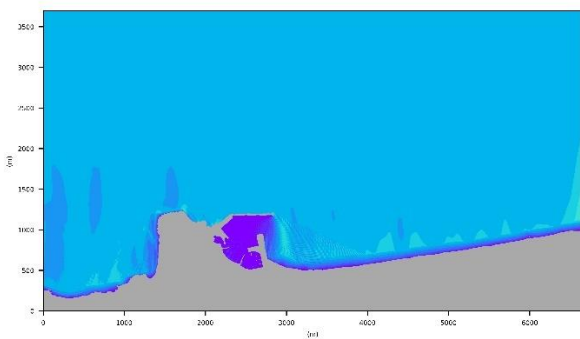


N26

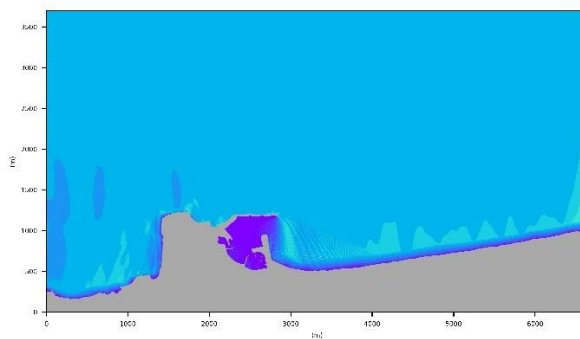


N27

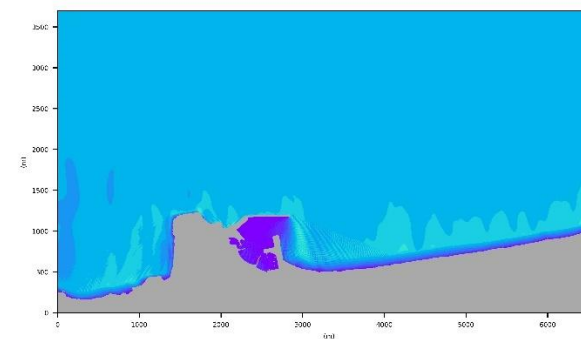
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



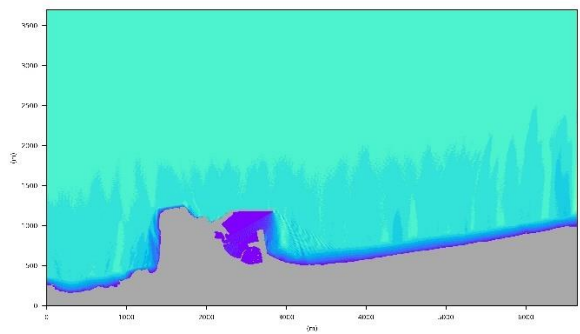
N28



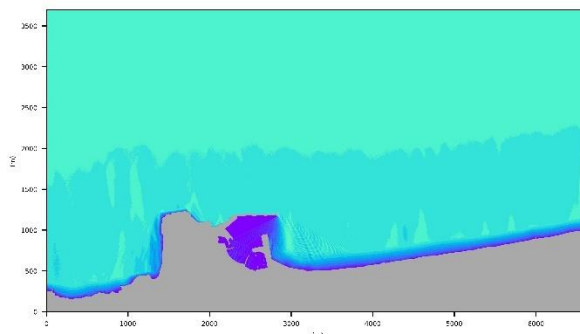
N29



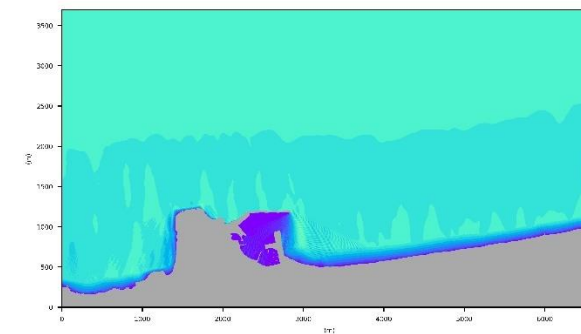
N30



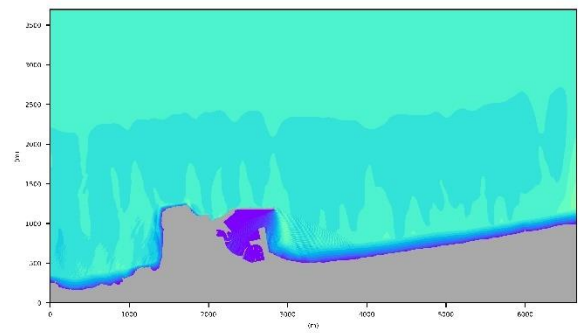
N31



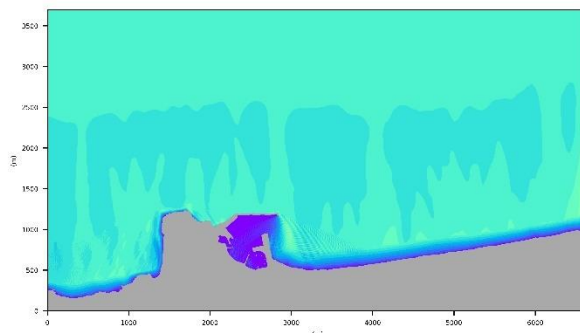
N32



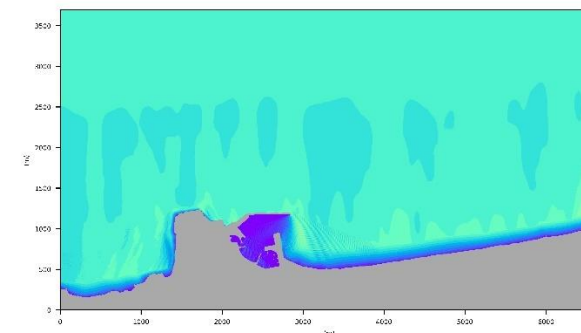
N33



N34

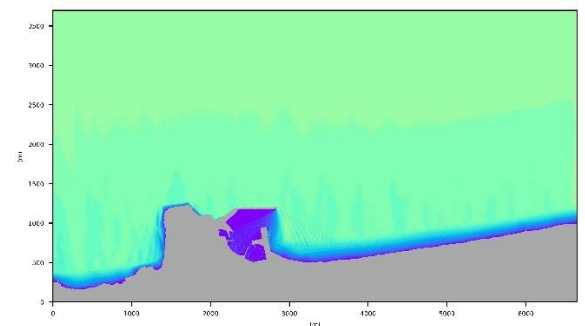


N35

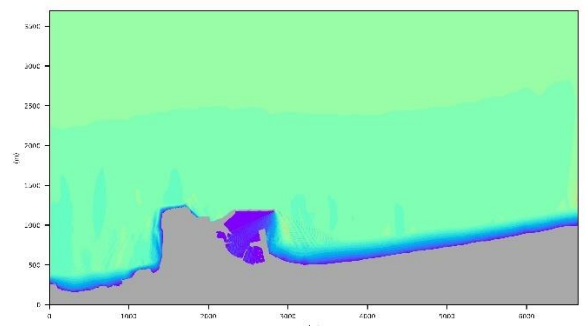


N36

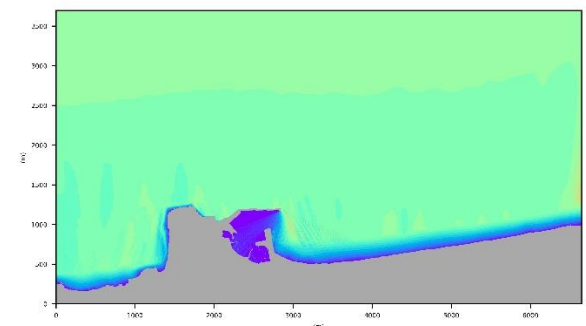
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



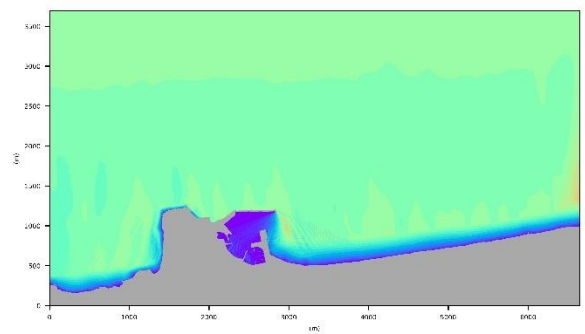
N37



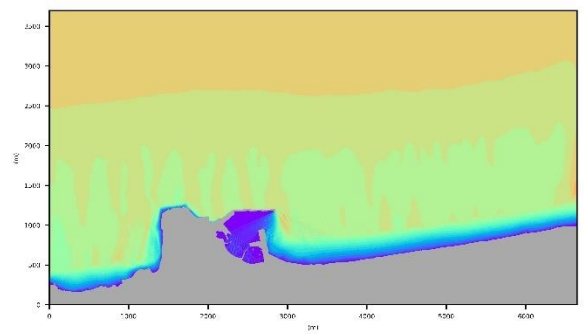
N38



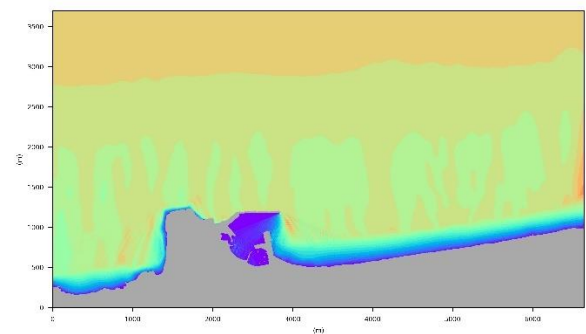
N39



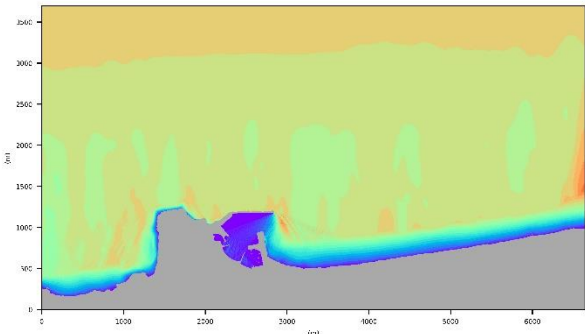
N40



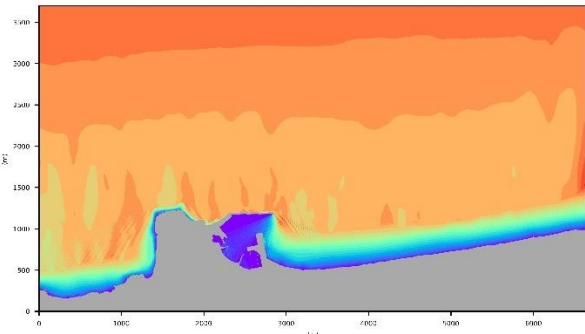
N41



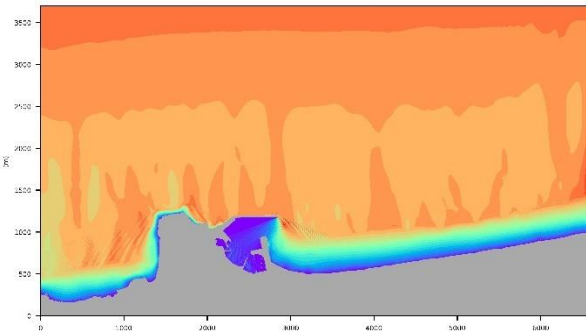
N42



N43

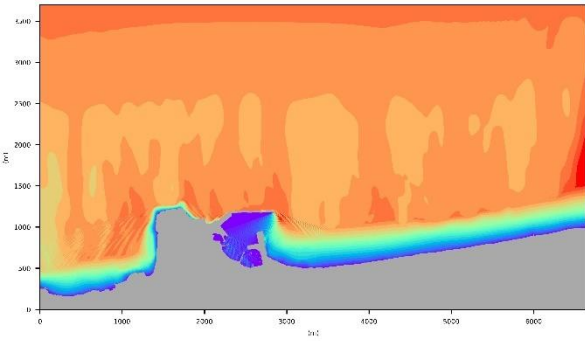


N44

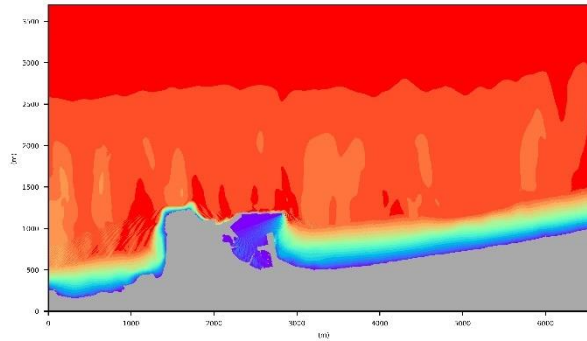


N45

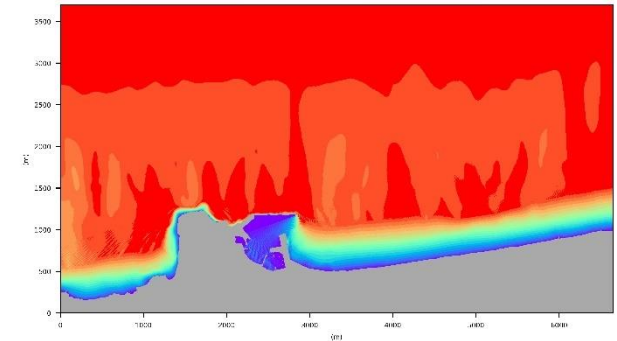
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



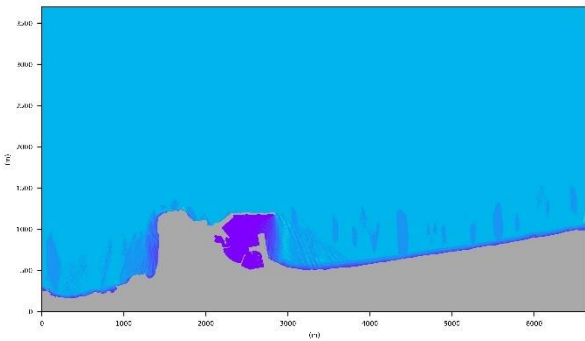
N46



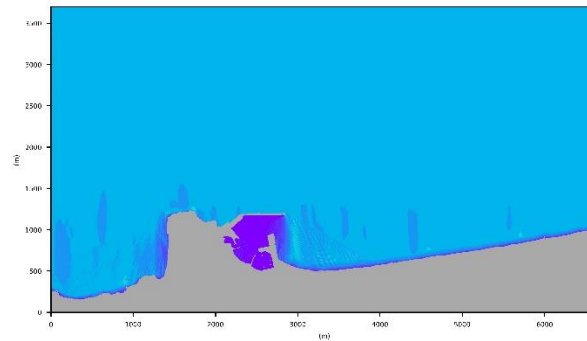
N47



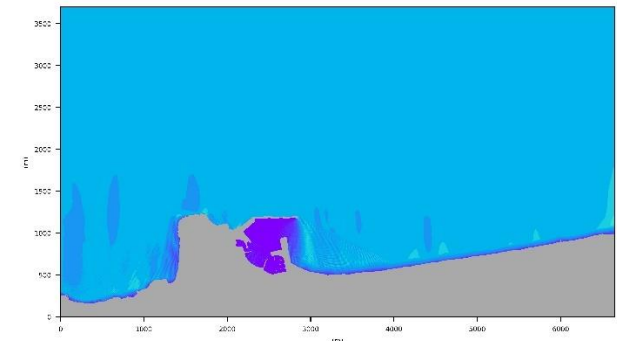
N48



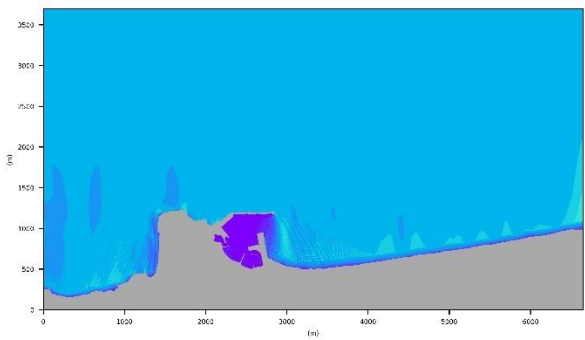
N49



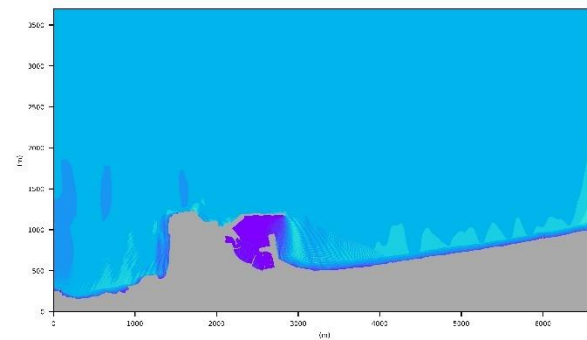
N50



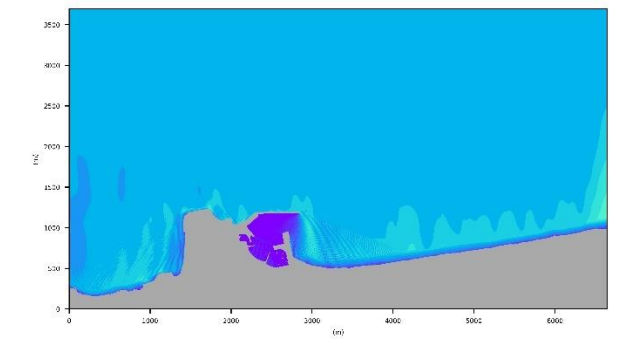
N51



N52

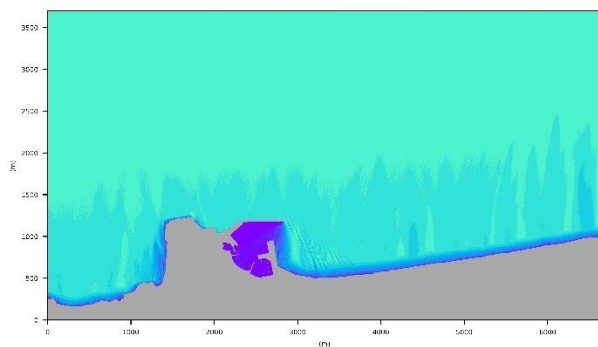


N53

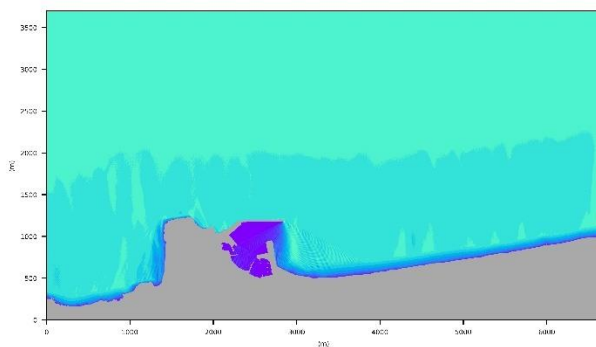


N54

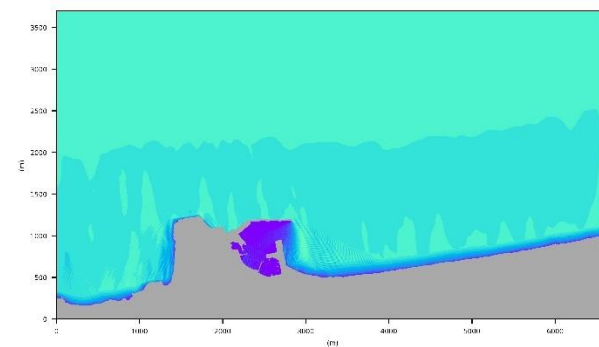
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



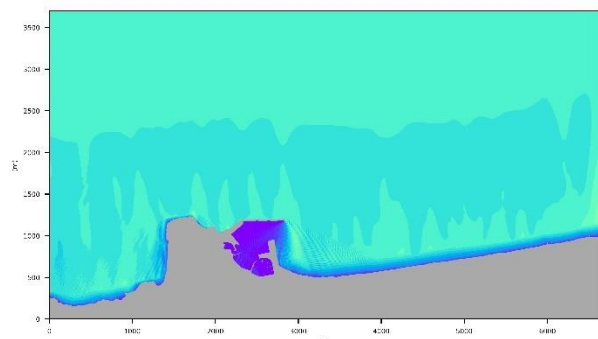
N55



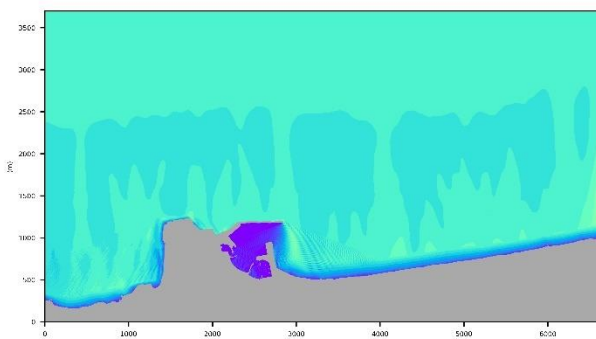
N56



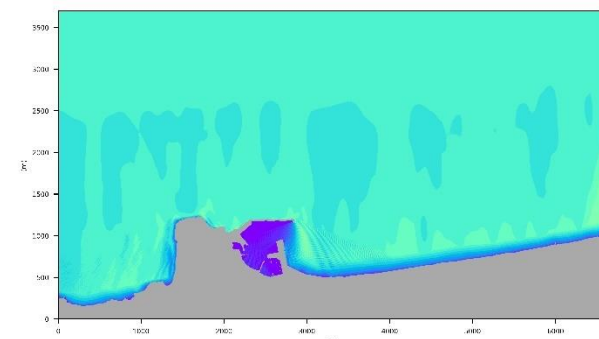
N57



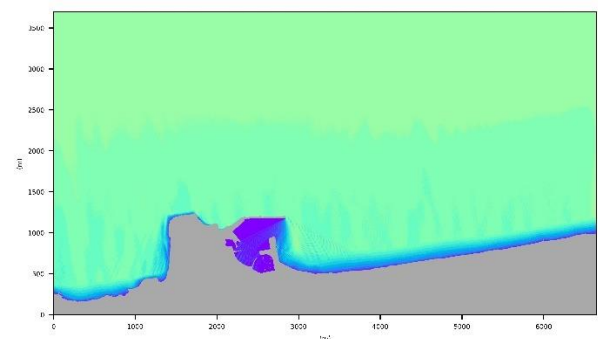
N58



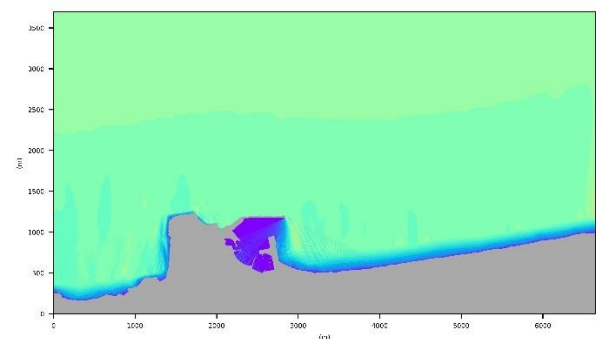
N59



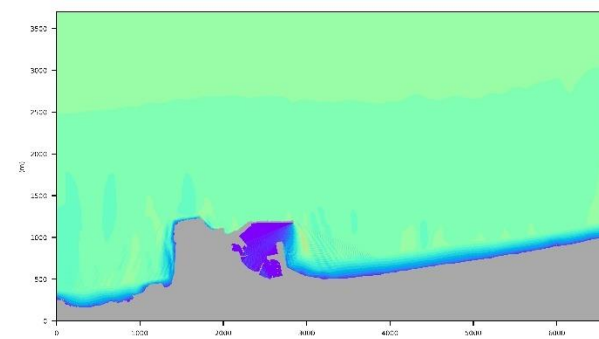
N60



N61

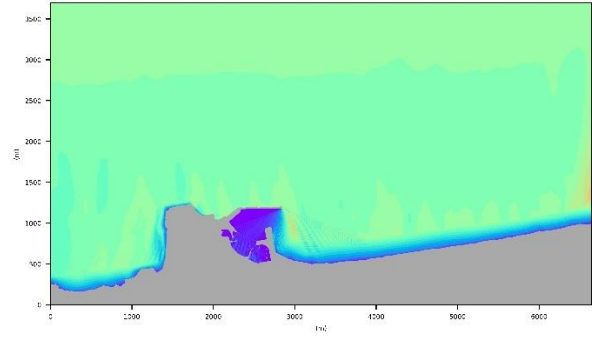


N62

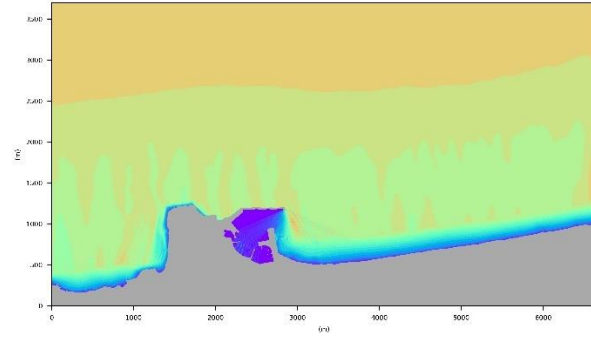


N63

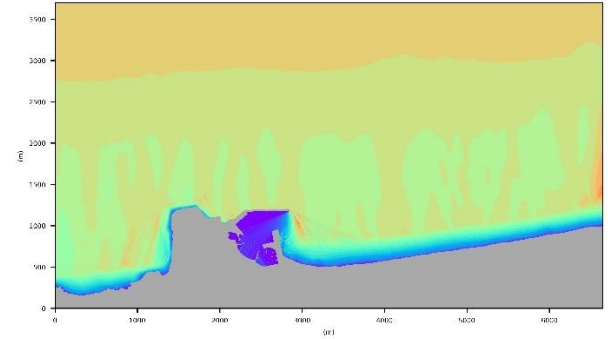
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΖΩΝΗΣ ΤΟΥ ΡΕΥΜΝΟΥ ΚΡΗΤΗΣ



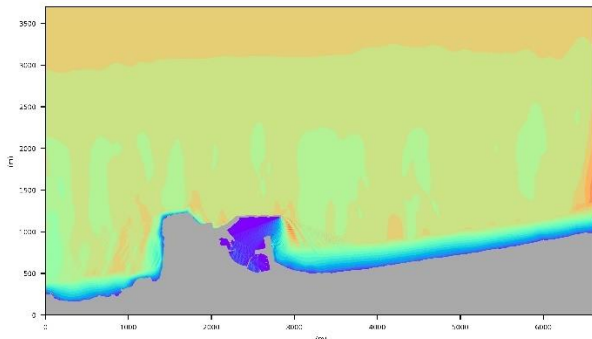
N64



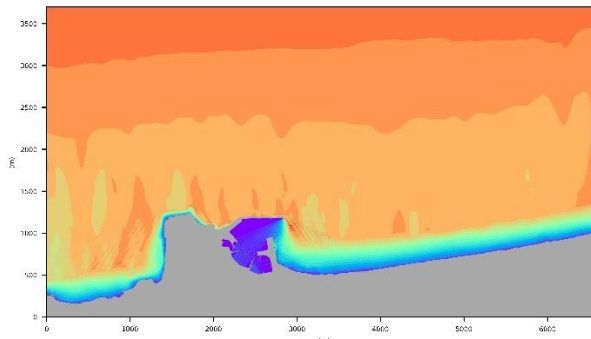
N65



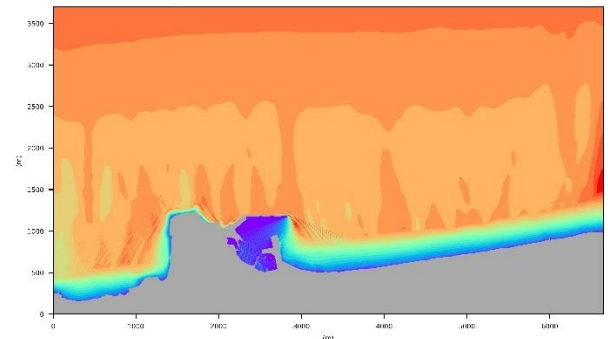
N66



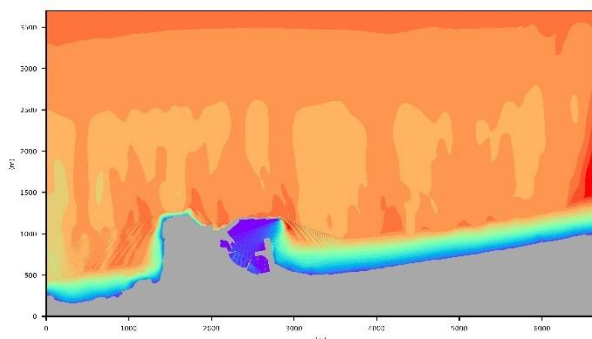
N67



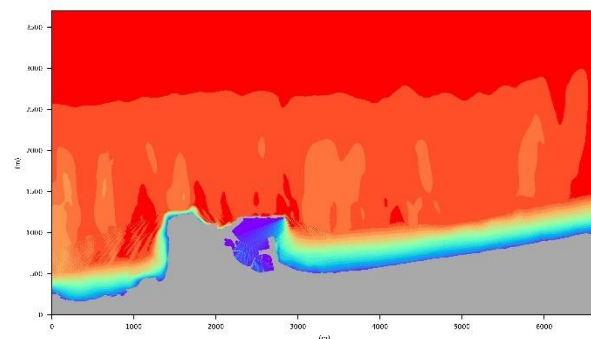
N68



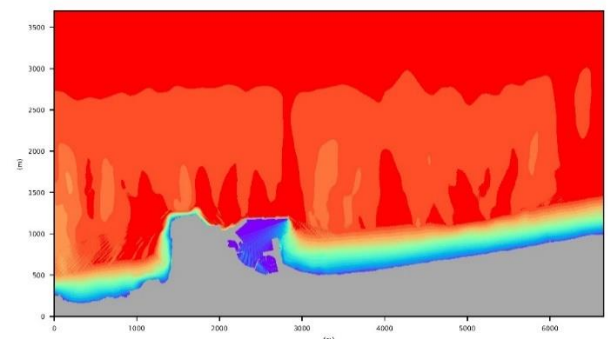
N69



N70



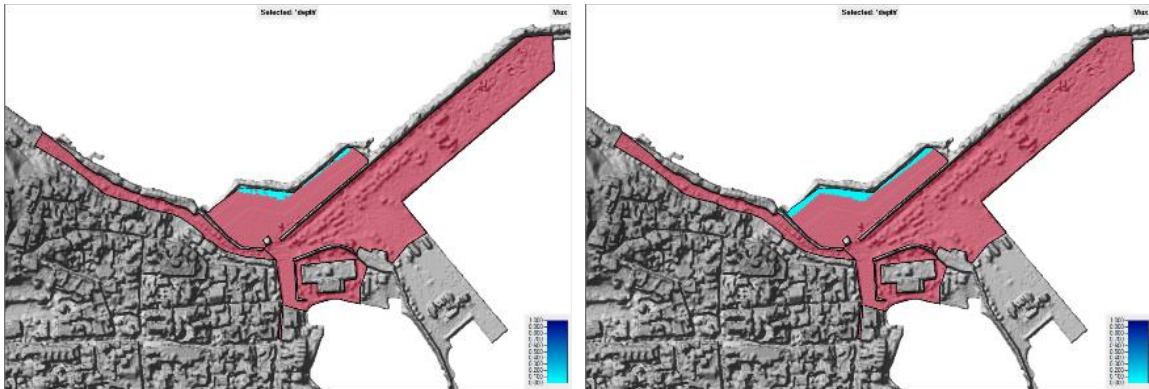
N71



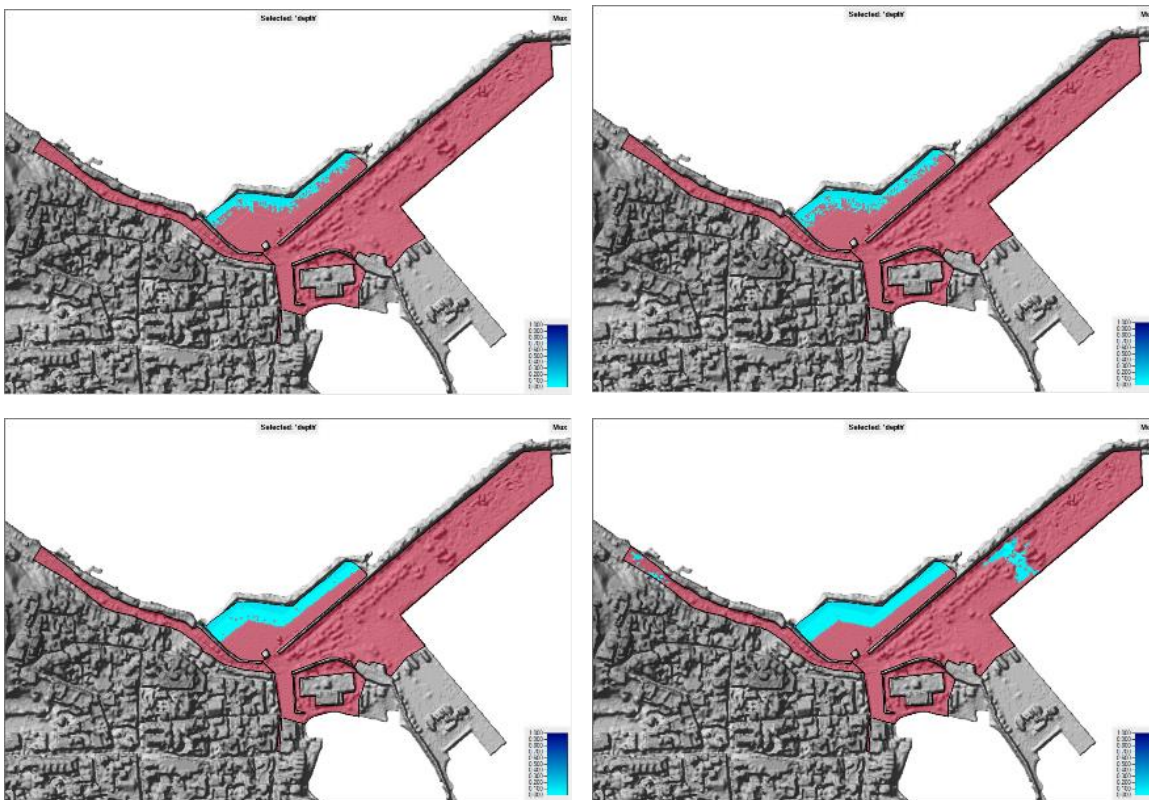
N72

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΚΑΤΑΚΛΥΣΗΣ

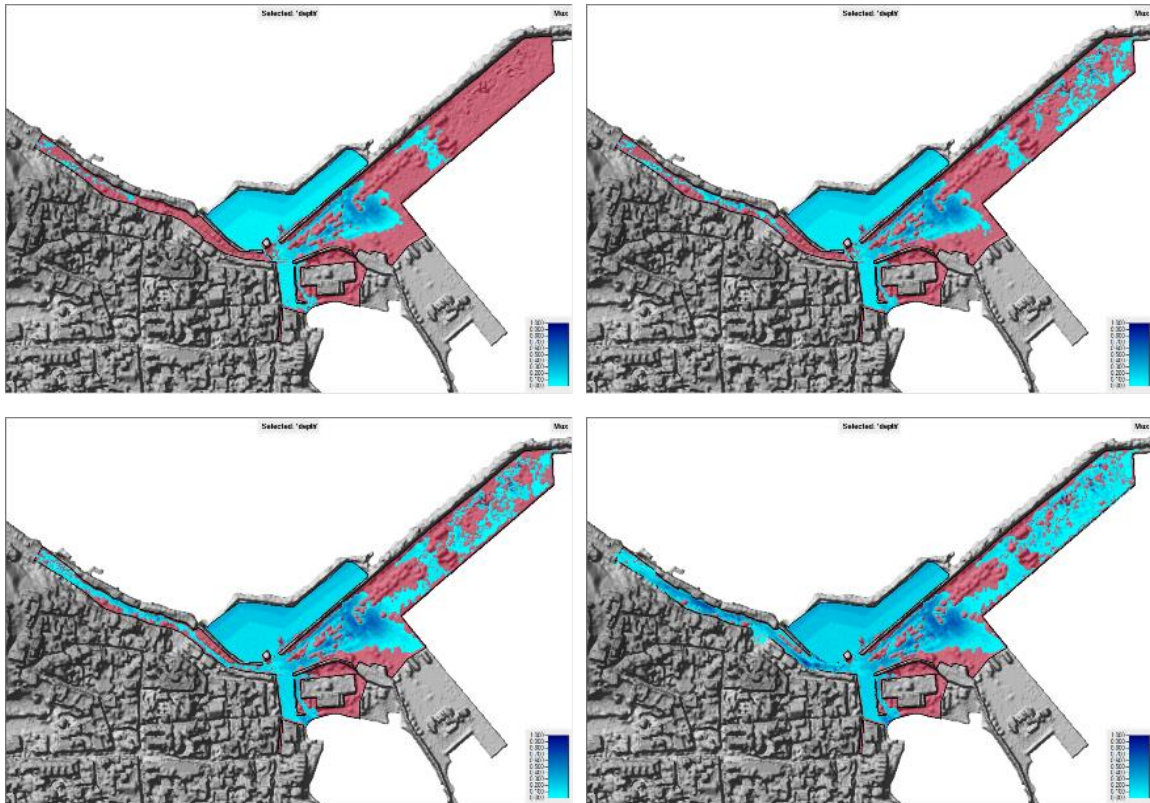
Ενδεικτικές εικόνες αποτελεσμάτων για τα σενάρια N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8, N9, N10, N11, N12, N13, N25, N26, N27, N28, N29, N30, N31, N32, N33, N34, N49, N50, N51, N52, N53, N54, N55:



Ενδεικτικές εικόνες αποτελεσμάτων για τα σενάρια N35, N56, N14, N15, N36, N57, N58, N17, N37, N59, N16, N18, N39:



Ενδεικτικές εικόνες αποτελεσμάτων για τα σενάρια N19, N20, N21, N22, N23, N24, N38, N40, N41, N42, N43, N44, N45, N46, N47, N48, N60, N61, N62, N63, N64, N65, N66, N67, N68, N69, N70, N71, N72:



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ V: ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΑΡΑΚΤΙΑΣ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ

α/α σεναρίου	Μέγιστο βάθος ροής d (m)	Κλάση επικινδυνότητας
N1	≤0.05	1
N2	≤0.05	1
N3	≤0.05	1
N4	≤0.05	1
N5	≤0.05	1
N6	≤0.05	1
N7	≤0.05	1
N8	≤0.05	1
N9	≤0.05	1
N10	≤0.05	1
N11	≤0.05	1
N12	0.11	1
N13	0.15	1
N14	0.22	2
N15	0.23	2
N16	0.34	2
N17	0.25	2
N18	0.33	2
N19	0.38	3
N20	0.37	3
N21	0.38	3
N22	0.43	3
N23	0.38	3
N24	0.42	3
N25	≤0.05	1
N26	≤0.05	1
N27	≤0.05	1
N28	≤0.05	1
N29	≤0.05	1
N30	≤0.05	1
N31	≤0.05	1
N32	0.07	1
N33	0.10	1
N34	0.10	1
N35	0.19	2
N36	0.21	2

α/α σεναρίου	Μέγιστο βάθος ροής d (m)	Κλάση επικινδυνότητας
N37	0.26	2
N38	0.37	3
N39	0.35	2
N40	0.38	3
N41	0.39	3
N42	0.42	3
N43	0.45	3
N44	0.41	3
N45	0.44	3
N46	0.54	3
N47	0.49	3
N48	0.60	3
N49	≤0.05	1
N50	≤0.05	1
N51	≤0.05	1
N52	≤0.05	1
N53	≤0.05	1
N54	≤0.05	1
N55	0.12	1
N56	0.19	2
N57	0.22	2
N58	0.21	2
N59	0.25	2
N60	0.37	3
N61	0.38	3
N62	0.39	3
N63	0.41	3
N64	0.43	3
N65	0.47	3
N66	0.50	3
N67	0.64	3
N68	0.61	3
N69	0.70	3
N70	0.94	3
N71	0.72	3
N72	1.13	3