



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΜΕ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΤΙΜΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ**



Θεοδώρα Χ. Πυρπιρή

**Δ.Π.Μ.Σ.
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:
Β. Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2016

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΜΕ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΡΑΙΩΝ ΥΨΩΝ ΚΥΜΑΤΟΣ**

Το Περιεχόμενο της ανά χείρας μεταπτυχιακής εργασίας αποτελεί προϊόν 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.

Θεοδώρα Χ. Πυρπιρή

tpyrpiri@gmail.com

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Βασιλική Κ. Τσουκαλά, Επ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2016

«A goal without a plan is just a wish»

Antoine de Saint-Exupéry, French writer (1900 - 1944)

Ευχαριστίες

Με το πέρας της μεταπτυχιακής μου εργασίας ολοκληρώνεται επίσημα και ο κύκλος των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κυρία Βασιλική Τσουκαλά για τη βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές της, κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Νικόλα Μαρτζίκο, υποψήφιο διδάκτορα του Ε.Μ.Π. για τη συστηματική καθοδήγησή του και το συνεχές ενδιαφέρον που μου παρείχε για την εξέλιξη της εργασίας μου.

Τις ευχαριστίες μου επίσης θέλω να εκφράσω και στους φίλους μου Ιζαμπέλα Χαλκιάδακη και Δήμο Μασούρο και στον ξάδερφό μου Χάρη Μερτή, για τη συνεισφορά τους στη διεκπεραίωση της εργασίας, αλλά και για την ηθική τους συμπαράσταση.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου καθώς και την αδερφή μου που με στήριξαν και με στηρίζουν σε κάθε μου νέα προσπάθεια.

Θεοδώρα Πυρπιρή

Αθήνα

Ιούνιος 2016

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περιεχόμενα.....	iii
Κατάλογος Σχημάτων	vii
Κατάλογος Πινάκων	ix
Περίληψη	1
Extended abstract.....	3
Introduction	3
The PEARL Project.....	4
The Rethymno Case study.....	4
Methodology	6
Findings	6
Wave hindcasting	6
Extreme value theory	8
Simulation of wave field	10
Wave overtopping	12
Discussion	19
1 Εισαγωγή.....	21
1.1 Αντικείμενο της εργασίας.....	21
1.2 Πρωτότυπα σημεία	22

1.3	Διάρθρωση εργασίας	22
2	Κλιματική Αλλαγή.....	25
2.1	Κλίμα και Κλιματική Αλλαγή.....	25
2.2	Δείκτες που μαρτυρούν την Κλιματική Αλλαγή	26
2.3	Ο κίνδυνος από την Κλιματική Αλλαγή.....	31
2.4	Παράκτιες πλημμύρες.....	33
2.4.1	Ορισμός και χαρακτηριστικά παράκτιων πλημμυρών.....	33
2.4.2	Μέτρα προστασίας απέναντι στις παράκτιες πλημμύρες	33
2.4.3	Πρόβλεψη παράκτιων πλημμυρών και ολοκληρωμένη διαχείριση παράκτιας ζώνης	36
2.5	Το ερευνητικό πρόγραμμα «PEARL»	37
3	Μέθοδος της ανάλυσης των Ακραίων Τιμών	41
3.1	Θεωρία ακραίων τιμών - Εισαγωγή.....	42
3.2	Στατιστική ανάλυση ακραίων παρατηρήσεων – Block Maxima	43
3.2.1	Μέθοδος των L – ροπών.....	44
3.2.2	Μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (MLE)	45
3.3	Στατιστική ανάλυση σε μετεωρολογικά δεδομένα – το λογισμικό πακέτο «extRemes».....	46
4	Πρόγνωση κυματισμών	47
4.1	Γένεση κυματισμών.....	47
4.2	Μέθοδος πρόγνωσης κυματισμών στα βαθιά.....	47
4.2.1	Μέθοδος CEM.....	47
4.2.2	Μέθοδος SMB.....	49
4.3	Επίδραση του πυθμένα στους κυματισμούς	50
4.3.1	Ρήγωση.....	51
4.3.2	Διάθλαση	51
4.3.3	Θραύση	52
4.4	Κυματισμοί στην περιοχή μελέτης	52
4.4.1	Το μοντέλο MIKE 21 – PMS	52

4.4.2	Θεωρητικό υπόβαθρο του PMS	53
4.4.3	Εφαρμογή του PMS	53
5	Κυματική υπερπήδηση	57
5.1	Ορισμός της κυματικής υπερπήδησης.....	57
5.2	Επιτρεπόμενα όρια υπερπήδησης.....	58
5.3	Πρόβλεψη της κυματικής υπερπήδησης	61
5.3.1	Εμπειρικές σχέσεις.....	61
5.3.2	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα	66
6	Περιοχή μελέτης	69
6.1	Γεωγραφική θέση Ρεθύμνου	69
6.2	Λιμένας Ρεθύμνου	71
6.3	Ανεμολογικά στοιχεία	72
6.3.1	Ανεμολογικό κλίμα της περιοχής μελέτης	75
6.4	Ιστορικό πλημμυρών Ρεθύμνου	79
7	Αποτελέσματα	83
7.1	Πρόγνωση κυματισμών στο Ρέθυμνο	83
7.2	Ανάλυση ακραίων κυματισμών	84
7.2.1	Συλλογή δεδομένων	84
7.2.2	Προσαρμογή σε κατανομή GEV.....	85
7.2.3	Προσαρμογή σε κατανομή Gumbel.....	86
7.3	Προσομοίωση των κυματισμών στα ρηχά του λιμένα του Ρεθύμνου	88
7.4	Κυματική υπερπήδηση	91
7.4.1	Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω εμπειρικών σχέσεων	95
7.4.2	Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων	97
7.5	Σύνοψη αποτελεσμάτων.....	102
8	Συμπεράσματα - Προτάσεις.....	103
8.1	Γενικά Συμπεράσματα	103
8.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	106

Βιβλιογραφία	107
Παράρτημα Α: Πρόγνωση κυματισμών στα βαθιά	117
Παράρτημα Β: Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω του EurOtop – Calculation Tool (Διατομή Α-Α', Διατομή Γ-Γ')	119
Παράρτημα Γ: Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω του Deltares Neural Network – Calculator (Διατομή Α-Α', Διατομή Β-Β', Διατομή Γ-Γ', Διατομή Δ-Δ').....	125
Παράρτημα Δ: Πίνακας τιμών Λιμενικών Έργων (ΦΕΚ 63Β/19-2-2013)	135

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Ιστορικές παρατηρήσεις και προβλέψεις των εκπομπών CO ₂ έως το 1990 έως το 2035 (Πηγή: IPCC, AR5).....	27
Σχήμα 2.2 Η εξέλιξη της μέσης επιφανειακής αύξησης της θερμοκρασίας 2012 και η πρόβλεψη της εξέλιξής της έως το 2100 (Πηγή: IPCC, AR5)	28
Σχήμα 2.3 Ιστορικές παρατηρήσεις της παγκόσμιας αύξησης της μέσης στάθμης της θάλασσας έως το 1990 και προβλέψεις έως το 2035 (Πηγή: IPCC, AR5).....	29
Σχήμα 2.4 Τα κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων ομάδων όπως συγκεντρώνονται στο SRES (Πηγή: IPCC Special Report Working Group III, 2000)	30
Σχήμα 2.5 Η πορεία που ακολουθεί η παράκτια πλημμύρα από την πηγή στο δέκτη	33
Σχήμα 2.6 Εναλλακτικές προτάσεις για την προστασία της παράκτιας ζώνης απέναντι στην άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας (Πηγή: Shoreline Management Guide, EuroSION Project, 2004)	34
Σχήμα 2.7 Τεχνητή αναπλήρωση ακτής στην Ολλανδία (Πηγή: www.jandenui.com).....	35
Σχήμα 2.8 Ενδεικτικά παραδείγματα κυματοθραύστη με προστασία (αριστερά) (Πηγή: www.xblox.com) και ομάδας προβόλων (δεξιά) (Πηγή: www.cbi.tamouc.edu)	36
Σχήμα 2.9 Συγκεντρωτικά τα πακέτα εργασιών του PEARL (Πηγή: www.pearl-fp7.eu).....	38
Σχήμα 2.10 Οι εξεταζόμενες περιοχές μελέτης του PEARL (Πηγή: www.pearl-fp7.eu)	39
Σχήμα 4.1 Χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά – μέθοδος SMB.....	50
Σχήμα 4.2 Η πορεία κυματισμού προς την ακτή όταν υφίσταται ρήχωση (Πηγή: science.kennesaw.edu).....	51
Σχήμα 4.3 Θραύση κυματισμού (Πηγή: http://adventure.howstuffworks.com).....	52
Σχήμα 5.1 Τυπική διατομή παράκτιου έργου προστασίας με κεκλιμένο πρανές	58
Σχήμα 5.2 Παράγοντες που επιδρούν στο ποσοστό της παροχής της κυματικής υπερπήδησης	61
Σχήμα 5.3 Χαρακτηριστική διατομή κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο και προστασία στον πόδα (Πηγή: EurOtop, 2007)	63
Σχήμα 5.4 Χαρακτηριστική διατομή κυματοθραύστη με κεκλιμένο πρανές - σύνθετη κλίση (Πηγή: EurOtop, 2007).....	63
Σχήμα 5.5 Χαρακτηριστική διατομή κυματοθραύστη με πρανές θωρακισμένο με ογκολίθους και προστατευτικό τοιχίο (Πηγή: EurOtop, 2007)	64
Σχήμα 5.6 Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων εισόδου του TNΔ (Πηγή: NN Manual)	66

Σχήμα 5.7 Διαχωρισμός διατομής παράκτιας κατασκευής σε τρία μέρη: κορυφή, μέτωπο, πόδας ...	68
Σχήμα 6.1 Περιοχή μελέτης, Ρέθυμνο (Πηγή: Google Earth)	69
Σχήμα 6.2 Το λιμάνι του Ρεθύμνου και η γύρω παράκτια περιοχή σε κάτοψη (Πηγή: Google Earth).	70
Σχήμα 6.3 Σχηματική απεικόνιση και διαχωρισμός των τμημάτων του λιμένα του Ρεθύμνου	71
Σχήμα 6.4 Μέσες ετήσιες τιμές των ανέμων για την περιοχή του Ρεθύμνου (Πηγή: Ε.Μ.Υ)	73
Σχήμα 6.5 Ροδόγραμμα έντασης ανέμου 12 τομέων, για την περιοχή του Ρεθύμνου	74
Σχήμα 6.6 Εξέλιξη της μέσης και της μέγιστης ετήσιας έντασης του ανέμου για τις κρίσιμες διευθύνσεις (B, BA, ΒΔ) της περιοχής του Ρεθύμνου για την περίοδο 1957-2004.....	75
Σχήμα 6.7 Πλημμύρα στο λιμένα του Ρεθύμνου (αριστερά) και στην αμμώδη παραλία (δεξιά), κατά τη διάρκεια καταιγίδας το έτος 1991 (Πηγή: Archodakis D.).....	80
Σχήμα 6.8 Κατάκλυση θαλασσινού νερού λόγω κυματικής υπερπήδησης, στις εγκαταστάσεις του λιμένα του Ρεθύμνου το 2010.....	81
Σχήμα 6.9 Πλημμύρες εντός των λιμενικών εγκαταστάσεων του Ρεθύμνου (δεξιά) και στην αμμώδη παραλία (αριστερά), από κυματική καταιγίδα που συνέβη το 2012.....	81
Σχήμα 6.10 Εμφάνιση κυματικής υπερπήδησης λόγω κυματικής καταιγίδα το 2013 (αριστερά) και καταστροφές στη βάση του προσήνεμου μόλου (δεξιά) την ίδια χρονιά (Πηγή: Drygiannakis P.).....	81
Σχήμα 6.11 Πρόσφατη πλημμύρα στο λιμένα του Ρεθύμνου το 2015. Στο βάθος διακρίνεται η υπερπήδηση της κατασκευής λόγω των υψηλών κυματισμών	82
Σχήμα 7.1 Μέγιστες τιμές του ύψους κύματος που εμφανίστηκαν από το 1957 έως το 2014	84
Σχήμα 7.2 Διαγράμματα προσαρμογής της χρονοσειράς στη GEV κατανομή	85
Σχήμα 7.3 Διαγράμματα προσαρμογής της χρονοσειράς στην Gumbel κατανομή	87
Σχήμα 7.4 Κάναβος της βαθυμετρίας της περιοχής του Ρεθύμνου.....	88
Σχήμα 7.5 Κατανομή του ύψους κύματος στην περιοχή του Ρεθύμνου για τα διάφορα σενάρια εισερχόμενων κυματισμών.....	90
Σχήμα 7.6 Διατομή A-A' και διατομή B-B', που θα χρησιμοποιηθούν για την κυματική υπερπήδηση	91
Σχήμα 7.7 Σκαρίφημα διατομής A-A' του προσήνεμου μόλου.....	92
Σχήμα 7.8 Σκαρίφημα προτεινόμενης διατομής B-B' στη γένεση του προσήνεμου μόλου.....	92
Σχήμα 7.9 Προτεινόμενη διατομή Γ-Γ' – προσθήκη ογκολίθων θωράκισης.....	94
Σχήμα 7.10 Προτεινόμενη διατομή Δ-Δ' – προσθήκη αναβαθμού.....	95
Σχήμα 7.11 Η διατομή στο EurOtop που χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης (Πηγή: Eurotop Manual, 2007).....	96

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Φυσικές διεργασίες που πλήττουν τα παράκτια συστήματα και οι επιπτώσεις τους (Πηγή: Sierra and Casa-Prat, 2014).....	32
Πίνακας 5.1 Επιτρεπόμενα όρια της μέσης παροχής κυματικής υπερπήδησης (Πηγή: EurOtop, 2007).....	59
Πίνακας 5.2 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της κυματικής υπερπήδησης (Πηγή: CEM, 2008).....	62
Πίνακας 5.3 Μεταβλητές του τύπου του Owen, για μέτωπα με ενιαία κλίση.....	64
Πίνακας 5.4 Τιμές για το συντελεστή τραχύτητας γf για διαπερατές κατασκευές, με κλίση πρανούς 1:1.5 (Πηγή: EurOtop, 2007)	65
Πίνακας 6.1 Σύντομη περιγραφή του (Πηγή: Μέμος, 2008).....	73
Πίνακας 6.2 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1957-1960).....	76
Πίνακας 6.3 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1961-1965).....	76
Πίνακας 6.4 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1966-1973).....	76
Πίνακας 6.5 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1979-1984).....	77
Πίνακας 6.6 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1985-1991).....	77
Πίνακας 6.7 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1992-1994).....	77
Πίνακας 6.8 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1995-2000).....	78
Πίνακας 6.9 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (2001-2004).....	78
Πίνακας 6.10 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1957-2004).....	79
Πίνακας 7.1 Πρόγνωση κυματισμών για τις τρεις διευθύνσεις στην περιοχή του Ρεθύμνου	83
Πίνακας 7.2 Οι τιμές των παραμέτρων της κατανομής GEV (L-moments).....	85
Πίνακας 7.3 Το ύψος κύματος συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς (GEV).....	86
Πίνακας 7.4 Οι τιμές των παραμέτρων της κατανομής Gumbel (MLE)	87
Πίνακας 7.5 Το ύψος κύματος συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς (Gumbel).....	88
Πίνακας 7.6 Προϋπολογισμός μελέτης προτεινόμενης διατομής από Λιμενικό Ταμείο Ρεθύμνου	93
Πίνακας 7.7 Προϋπολογισμός μελέτης προτεινόμενης διατομής με προσθήκη ογκολίθων θωράκισης	94
Πίνακας 7.8 Προϋπολογισμός μελέτης προτεινόμενης διατομής με προσθήκη αναβαθμού	95

Πίνακας 7.9	Δεδομένα εισόδου και εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για τη διατομή A-A'	96
Πίνακας 7.10	Δεδομένα εισόδου και εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για τη διατομή Γ-Γ'	97
Πίνακας 7.11	Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή A-A'	98
Πίνακας 7.12	Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή A-A'	98
Πίνακας 7.13	Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή A-A'	98
Πίνακας 7.14	Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή B-B'	99
Πίνακας 7.15	Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή B-B'	99
Πίνακας 7.16	Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή B-B'	99
Πίνακας 7.17	Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή Γ-Γ'	100
Πίνακας 7.18	Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή Γ-Γ'	100
Πίνακας 7.19	Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή Γ-Γ'	100
Πίνακας 7.20	Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή Δ-Δ'	100
Πίνακας 7.21	Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή Δ-Δ'	101
Πίνακας 7.22	Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή Δ-Δ'	101
Πίνακας 7.23	Η εκτιμώμενη μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης για κάθε διατομή	102

Περίληψη

Οι παράκτιες πλημμύρες αποτελούν ένα φυσικό φαινόμενο, το οποίο εμφανίζεται στην παράκτια ζώνη, εκδηλώνεται μέσω της κυματικής υπερπήδησης στα θαλάσσια μέτωπα και τις περισσότερες φορές ακολουθείται από αρνητικές επιπτώσεις για το περιβάλλον, για διάφορες οικονομικές ή κοινωνικές δραστηριότητες, ακόμα και για την ανθρώπινη ζωή. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια τα φαινόμενα των παράκτιων πλημμυρών έχουν αυξηθεί και μελετώνται από διάφορα ερευνητικά προγράμματα: «CCSEAWAVS - Estimating the effects of climate change on sea level and wave climate of the Greek seas, coastal vulnerability and safety of coastal and marine structures», «PEARL - Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions», «MICORE – Morphological Impacts and Coastal Risks induced by Extreme storm events», «STARFLOOD – Strengthening And Redesigning European FLOOD risk practices» και «RISC-KIT – Resilience Increasing Strategies for coasts - toolKIT», τα οποία στοχεύουν στην ολοκληρωμένη διαχείριση των παράκτιων ζωνών απέναντι στους κινδύνους που αναμένονται από τις επιπτώσεις των επερχόμενων κατακλίσεων.

Εστιάζοντας στην περιοχή του Ρεθύμνου και πιο συγκεκριμένα στο λιμένα του, παρατηρείται από τις ιστορικές καταγραφές ότι εμφανίζονται ολοένα και συχνότερα φαινόμενα παράκτιων πλημμυρών παρά τη βελτίωση και την ανακατασκευή της προστασίας του προσήνεμου μόλου ανά τμήματα. Στο πλαίσιο της αντιμετώπισης λοιπόν σχετικών φαινομένων, κρίνεται αναγκαία η μελέτη και η εκτίμηση των ακραίων γεγονότων που οδηγούν στην εμφάνισή τους καθώς και μέσω σύγχρονων εργαλείων, η εκτίμηση των συνεπειών που αναμένονται.

Το κυματικό κλίμα που έχει καταγραφεί και χρησιμοποιείται ως βάση για την ανάλυση των ακραίων τιμών του ύψους κύματος της περιοχής του Ρεθύμνου, προκύπτει από τα πρωτογενή δεδομένα των μετεωρολογικών σταθμών της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας και του METEO, δηλαδή από τις τρίωρες και τις δεκάλεπτες αντίστοιχα μετρήσεις του ανέμου στην περιοχή του Ρεθύμνου, για τα έτη 1957 έως και 2014. Με τη χρήση της μεθόδου SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider) αντιστοιχίζονται οι άνεμοι στα κύματα που προκαλούν στα βαθιά και τα οποία απαιτούνται για τη συγκεκριμένη μελέτη. Συγκεντρώνονται έτσι στο τέλος, οι μέγιστοι κυματισμοί στα βαθιά κάθε μίας από τις κρίσιμες για το Ρέθυμνο διευθύνσεις (Βόρεια, Βορειοδυτική, Βορειοανατολική), για να επιλεχθεί η δυσμενέστερη (Βόρεια) για την οποία και αναλύονται στατιστικά.

Η στατιστική ανάλυση των ακραίων τιμών χρησιμοποιείται συχνά σε κλιματικά και μετεωρολογικά δεδομένα κατά την εξέταση των ακραίων υψών κύματος. Για την εφαρμογή

της θεωρίας των ακραίων τιμών στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιείται το μοντέλο Block Maxima της Γενικευμένης κατανομής (GEV) και η κατανομή Gumbel, ενώ για τον υπολογισμό των παραμέτρων του μοντέλου επιλέγεται η καταλληλότερη από διαφορετικές μεθόδους, όπως η μέθοδος της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (MLE) ή η μέθοδος των L – ροπών. Οι δύο αυτές μέθοδοι, εφαρμόζονται και εξετάζονται αναφορικά με την καλή προσαρμοστικότητά τους στο εκτιμώμενο μοντέλο. Μέσω του λογισμικού πακέτου «extRemes» προσδιορίζονται τα διάφορα επίπεδα επαναφοράς, δηλαδή η τιμή του μέγιστου ύψους κύματος που θα εμφανιστεί σε 25, 50, 75 έτη. Στόχο των παραπάνω, αποτελεί κυρίως ο συνυπολογισμός της μη στασιμότητας των ακραίων τιμών κατά την ανάλυση του φαινομένου της κυματικής υπερπήδησης.

Τελικά, μέσω της εφαρμογής του μοντέλου PMS του προγράμματος MIKE 21, λαμβάνονται υπόψη διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την πορεία του κυματισμού από τα βαθιά, προς τα ρηχά (ρήχωση, διάθλαση). Οπότε μέσω του μοντέλου, αποτυπώνεται το ύψος κύματος σε κάθε σημείο του έργου και άρα και στις περιοχές που μας ενδιαφέρουν κατά μήκος του προσήνεμου μόλου. Υπολογίζεται μέσω του νομογραφήματος SMB η νέα περίοδος κυματισμού που αντιστοιχεί στο «νέο» ύψος κύματος, ώστε αυτά να εισαχθούν ως δεδομένα εισόδου στα εργαλεία εκτίμησης της κυματικής υπερπήδησης. Το πρώτο εργαλείο πρόβλεψης, λειτουργεί μέσω της εφαρμογής τεχνητών νευρωνικών δικτύων και αναπτύχθηκε από το WL | Delft Hydraulics (πλέον Deltares) και παρέχει τη δυνατότητα μέσω των 12 παραμέτρων εισόδου του, μίας σχεδόν ακριβούς αποτύπωσης των περισσότερων παράκτιων κατασκευών και άρα μίας ικανοποιητικής εκτίμησης της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης. Το δεύτερο εργαλείο πρόβλεψης παρέχεται από την ιστοσελίδα του EuroTop και βασίζεται στη συμπεριφορά των διαθέσιμων εμπειρικών τύπων που περιγράφουν το φαινόμενο όπως εμφανίζεται σε διάφορες διατομές. Η εκτιμώμενη παροχή της κυματικής υπερπήδησης, αξιολογείται αναφορικά με τα ευρωπαϊκά επιτρεπόμενα όρια της κυματικής υπερπήδησης όπως συγκεντρώνονται στο EuroTop (2007) και εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα.

Extended abstract

Introduction

According to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), and its previous Assessments, there are multiple indicators proving that the climate is changing across the planet. Observations of the surface temperature, precipitation, severe events and sea level, provide evidence of climate change. Natural or human factors, lead to changes not only in the global climate, but also in the strength of extreme weather events; an extreme weather event is one that is rare at a particular place or rarer than the most of the observations. The IPCC comes to the conclusion that during the 21st century the appearance of extreme climate events could have particularly strong impacts on the coastal ecosystems and population (McLean *et al.*, 2001).

More than 1/3 of the global population lives within the coastal regions, so the vulnerability of these regions due to the climate change and its effects captures the interest of the scientists. Civil engineers are responsible for the appropriate protection of the coastal zone. The combination of the sea level rise and the extreme weather events makes their work uncertain and complex. In other words, a coastal structure that is supposed to last 50 to 100 years may be not adequate against a coastal flood that will occur in 70 years, because of the affection of the climate change. So, while designing a structure, engineers should be aware of the future changes and stop using stationary hypothesis of the future weather conditions (Milly *et al.*, 2008). The application of mathematical models is required, in order to estimate extreme weather events associated with high return periods and the uncertainty of this estimation. By applying such models into the design of a coastal structure, the resilience of them will be ensured during a future storm surge. Several national and EU funded projects focus on the flood risk management in coastal regions such as: «CCSEAWAVS - Estimating the effects of climate change on sea level and wave climate of the Greek seas, coastal vulnerability and safety of coastal and marine structures», «PEARL - Preparing for Extreme And Rare events in coastaL regions», «MICORE – Morphological Impacts and Coastal Risks induced by Extreme storm events», «STARFLOOD – Strengthening And Redesigning European FLOOD risk practices» and «RISC-KIT – Resilience Increasing Strategies for coasts - toolKIT». The present work incorporates the framework of PEARL research of Tsoukala *et al.* (2015), which was completed for the research European project «PEARL» - Preparing for Extreme And Rare events in coastaL regions. The main goal of PEARL is to link the technical measures and the social aspects in order to address some of the most pressing problems

that arise during a flood event in several regions of the planet, and in Rethymno too. According to the above study, an integrated methodology was proposed for a long term prediction of climate changes and their impacts on coastal zones. At the end of the study the wave run – up and the wave overtopping in selected profiles along the coastal zone was estimated using an improved Boussinesq type model and empirical models respectively. The present study focuses on the region of Rethymno in the island of Crete and the impacts of its problems associated with coastal floods as well. Due to extreme meteorological events, the coastal structures of the harbor are exposed to larger waves and hence to greater wave overtopping, which is estimated using empirical models and a neural network tool.

The PEARL Project

The PEARL project focuses on the early warning capabilities and on lowering the risk through the improvement of forecasting, in order to enhance the resilience of the coastal structures. The project is organized in eight work packages. Within the first three packages, the risk of each scenario is attempted to be analyzed; the formation of vulnerabilities and hazards that appear under extreme events. Furthermore, the fourth package contains the systems that are relevant to the flood forecasting of a coastal region and the fifth package entails the support development that should be arisen by the government. In the end, the sixth package comprehends the case study and after that the other two remaining packages (seventh and eighth), deal with the project management and the project outputs. The project examines six case studies from Europe and Rethymno region is one among them. According to Makropoulos *et al.* (2015) study, Rethymno has always been facing up the problem of flooding events, causing an outrageous threat against the residents, homes and businesses of the region. Through the PEARL program, the Greek researchers are trying to reduce the threat that appears due to the extreme hydro meteorological events, through the several strategies. The enhancement of existing facilities combined with the strategic alignment, which constitute the actionable roadmaps, will mitigate the consequences of a flood event. The strategies refer also to the development of means that could help the stakeholders to determine the areas that are vulnerable to an upcoming flood event and to other environmental and socioeconomic measures.

The Rethymno Case study

The study area, as is shown in Figure 1, is located at Rethymno city, on the island of Crete. Rethymno is the 3rd largest city in Crete with a population of 32,468 and a center of many activities, such as commercial or recreation or cultural activities. The area of interest includes the Port of Rethymno, in the Northern of Crete and the adjacent coastal zone. The Port consists of the following parts: the western part that is used for commercial purposes and the eastern part that is accessible to ferry and passenger ship docking.

The north side of the Port is mainly exposed to northern winds that show variable performance throughout the past 50 years, probably due to climate change. Figure 2 contains the raw data of the annual evolution of mean and max North, Northeast and Northwest wind direction throughout the years. The data were obtained by the Hellenic National Meteorological Service and the examined period is 1957 - 2004.



Figure 1 Rethymno area of interest including the Port and the adjacent coastal zone.

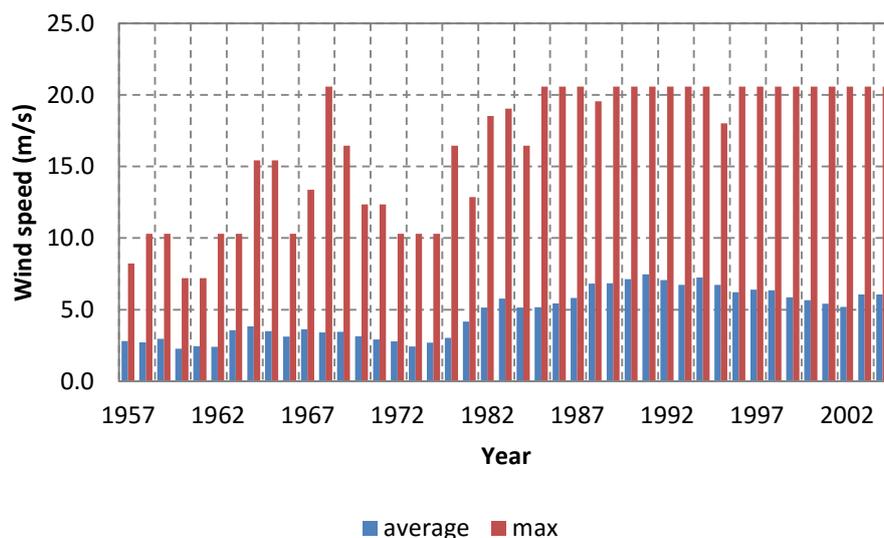


Figure 2 Rethymno recorded annual mean and max wind speed.

The variation in wind conditions combined with the great fetches, lead to the development of great waves and subsequently storm events, more frequently than in the past years. Specifically, the extreme weather conditions that act on the area are responsible for the creation of coastal floods and the wave overtopping above the breakwaters of the harbor, bringing about flooding of the harbor’s basin (Figure 3). After the harbor’s surface area flood, the seawater that got into it is responsible for the damages to the structures of the port and problems relative to the loading procedures.



Figure 3 Coastal Flood at the harbor of Rethymno, in the year of 2013 and 2015.

Methodology

The main goal of the present study is the computation of wave overtopping in selected sections along the breakwater at the north of the harbor. The SMB model is used to simulate the offshore wave characteristics depending on the wind speed and frequency among the year, the wind direction and the fetch. Additionally, the Extreme Value Theory (EVT) is used to develop the offshore wave characteristics taking into account the changes of wind climate throughout the past 50 years. Furthermore MIKE 21 PMS model is applied to the offshore wave characteristics in order to get them transformed to nearshore wave characteristics. Finally, the combination of empirical formulas (EurOtop) and an artificial neural network (Deltares | Delft Hydraulics) are used for the estimation of the mean wave overtopping.

Findings

Wave hindcasting

Several empirical and numerical models have been developed during the past years, in order to transform the wind characteristics of an area to waves. According to Etemad – Shahidi, *et al.* (2009), the SMB method (Figure 4) is one of the several simplified wind wave prediction methods and most commonly used. Firstly, it is necessary to calculate the fetch length, as it is shown in Table 1, for each one of the area's crucial directions (North, Northeast, Northwest), by drawing 30 radials from the area of interest (Figure 5). Furthermore, the wind speed at 10 m above the sea surface and the minimum wind duration are collected for each wind direction. Finally, the significant wave height and the peak spectral period are predicted (Table 2).

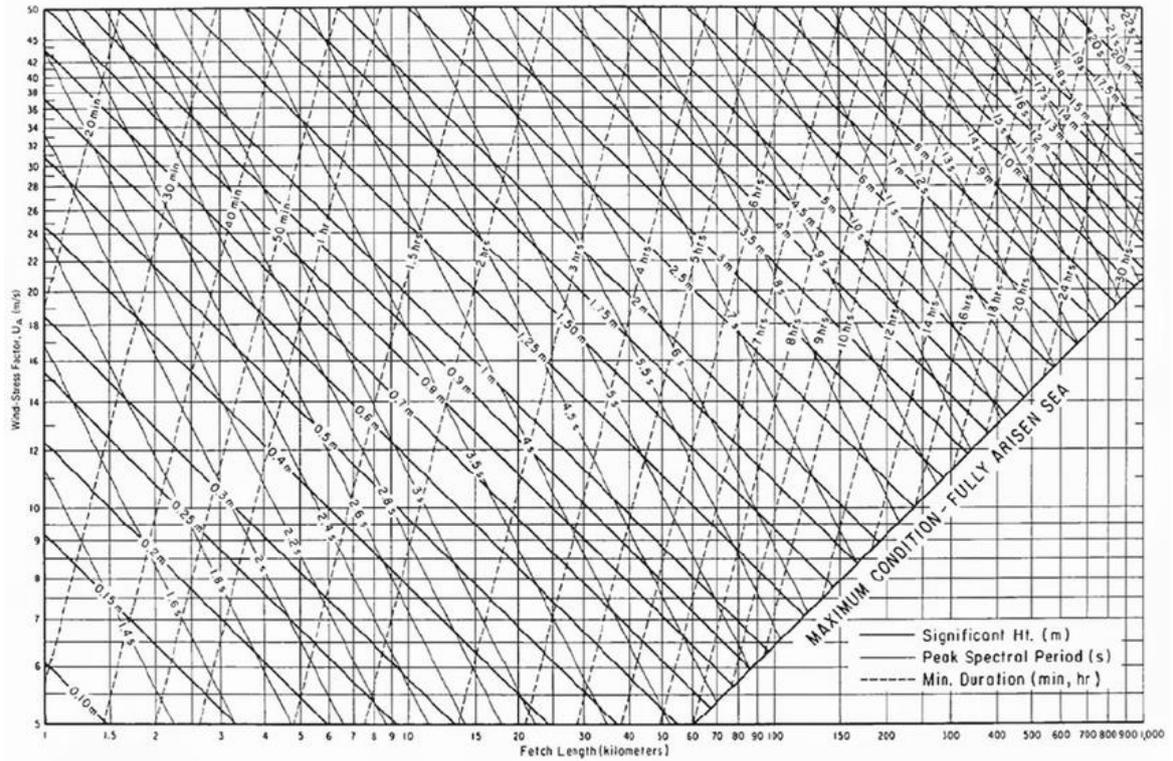


Figure 4 SMB method - fetch graph for deep waters.

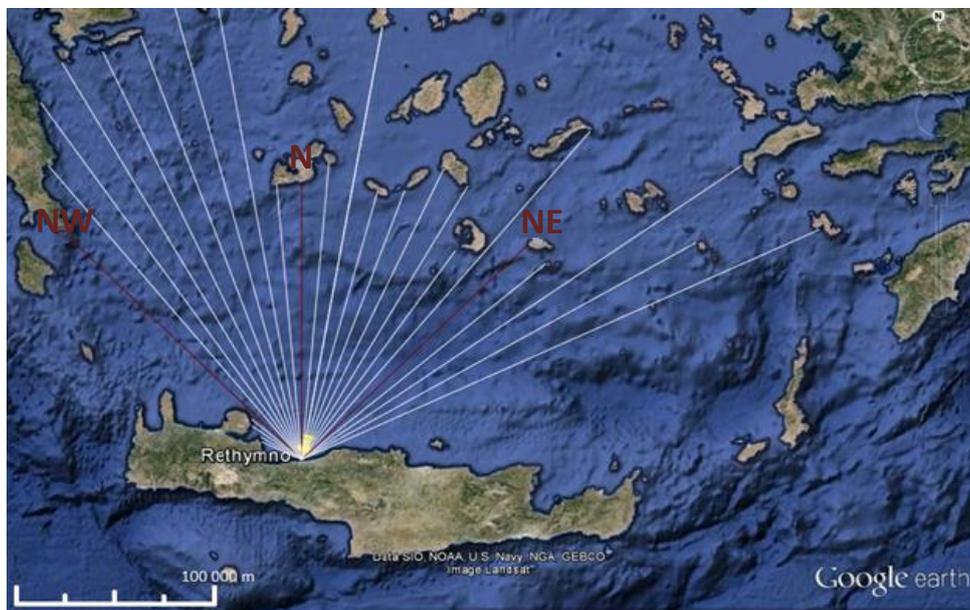


Figure 5 Fetch length from the point of interest.

Table 1 Calculation of the fetch length.

a_i (°)	$\cos a_i$	NORTH		NORTHEAST		NORTHEAST	
		F_i (km)	F_i (km)* $(\cos a_i)^2$	F_i (km)	F_i (km)* $(\cos a_i)^2$	F_i (km)	F_i (km)* $(\cos a_i)^2$
-45	0.707	172.70	86.35	147.77	73.89	0.00	0.00
-40	0.766	202.87	119.05	158.79	93.18	0.00	0.00
-35	0.819	231.99	155.67	233.99	157.01	0.00	0.00
-30	0.866	280.97	210.72	147.97	110.98	20.07	15.05
-25	0.906	239.95	197.09	154.82	127.17	21.72	17.84
-20	0.940	240.13	212.04	170.65	150.69	22.38	19.76
-15	0.966	251.91	235.03	169.32	157.98	24.23	22.60
-10	0.985	247.08	239.63	140.12	135.89	31.21	30.27
-5	0.996	146.86	145.75	229.21	227.47	33.08	32.83
0	1.000	147.77	147.77	161.58	161.58	172.70	172.70
5	0.996	158.79	157.58	161.61	160.38	202.87	201.33
10	0.985	233.99	226.94	272.76	264.53	231.99	225.00
15	0.966	147.97	138.06	231.31	215.82	280.97	262.14
20	0.940	154.82	136.71	290.21	256.27	239.95	211.88
25	0.906	170.65	140.17	299.48	245.99	240.13	197.24
30	0.866	169.32	126.99	0.00	0.00	251.91	188.93
35	0.819	140.12	94.02	0.00	0.00	247.08	165.79
40	0.766	229.21	134.50	0.00	0.00	146.86	86.18
45	0.707	161.58	80.79	0.00	0.00	147.77	73.89
SUM	16.903		2984.87		2538.81		1923.44
F_{eff} (km)			176.59		150.20		113.80

Table 2 The significant wave height and the peak spectral period for each direction.

Direction	F_{eff} (m)	t_d (s)	U_{10} (m/s)	H_s (m)	T_p (s)
NE	150208	46043	19.10	4.08	8.03
N	176593	90508	19.10	4.33	8.28
NW	113795	23967	19.10	3.57	7.49

The re – examination of the aforementioned Table 2, has shown that the North direction is the most crucial of the three directions (North, Northeast, Northwest), according to the fetch length and the significant wave height.

Extreme value theory

EVT is used to this project, in order to analyse extreme wind wave heights of the region of Rethymno and estimate levels that are more extreme than the observed. The datasets analysed in the project were given by the block maxima approach (Friederichs & Thorarinsdottir, 2012) and therefore consist of the annual maxima of north wave heights for a period of 57 years (1957-2014) and they are shown in Figure 6.

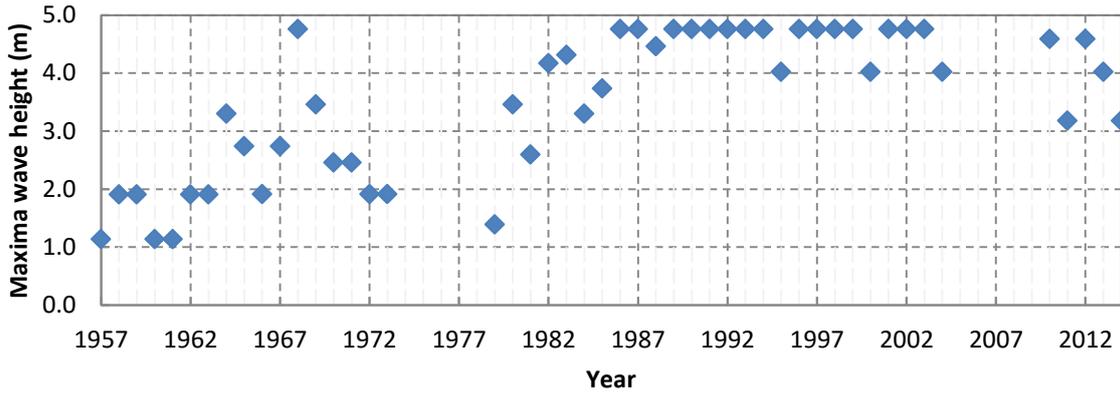


Figure 6 Annual maxima of wave heights for a period of 57 years.

The behavior of the observations throughout the period can be modeled by the Generalized Extreme Value distribution (GEV). In order to estimate the parameters of the GEV function (Table 3), the L- moments estimation procedure is followed. After that procedure, using the «extRemes» package, the statistical analysis of extreme values dataset is completed. Figure 6 shows the fitting of the GEV distribution to the annual maxima of north wave heights. From Figure 7a and Figure 7b, derives that GEV distribution shows a good fit, as the observations seem to lay close enough to the diagonal - the diagonal in each plot represents the perfect fit. Figure 7c, contains the density plot which displays the more than adequate relation between the model and the data (observations). The last Figure 7d, illustrates the return level estimations of annual extremes. The estimations lay within the 95% confidence intervals up to the value of 75 return period years and they collect in Table 4.

Table 3 The estimated parameters coming from L – moments.

Parameters	
location μ	3.3414815
scale σ	1.4062398
shape ξ	-0.7044277

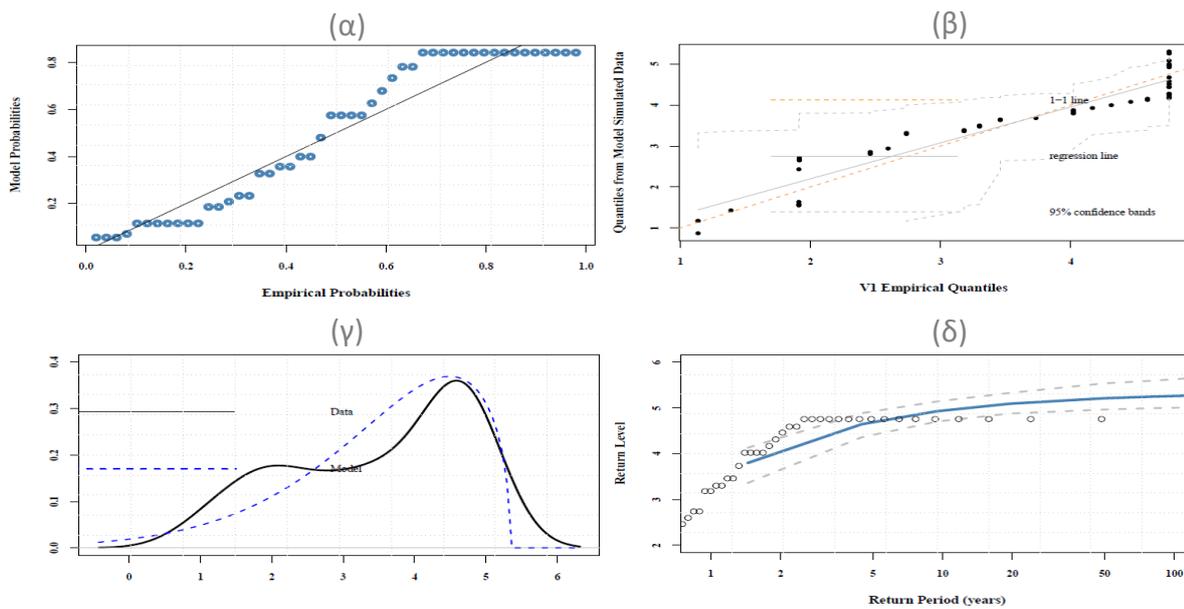


Figure 7 Plots for GEV fit to the annual maxima of north wave height.

Table 4 Return level estimations applying the GEV distribution.

Return Period (years)	GEV (L - moments)	
	H_s (m)	T_p (s)
25	5.13	8.98
50	5.21	9.06
75	5.24	9.08

Simulation of wave field

The linear refraction – diffraction wave model MIKE 21 PMS, is used for the transformation of offshore windwaves in nearshore areas, according to the bathymetry of Rethymno coastal area, as is shown in Figure 8. The model takes into account the effects of several procedures that occur due to the depth’s variation, such as the refraction and shoaling and describes the spatial evolution of significant wave height all over the given grid. After setting the boundary conditions, the wave parameters are imported to the model. The available «waves» that are imported to the MIKE 21 PMS are the following:

- (1) $H_s= 4.33$ m, $T_p= 8.28$ s
- (2) $H_s= 5.13$ m, $T_p= 8.98$ s
- (3) $H_s= 5.21$ m, $T_p= 9.06$ s
- (4) $H_s= 5.24$ m, $T_p= 9.06$ s

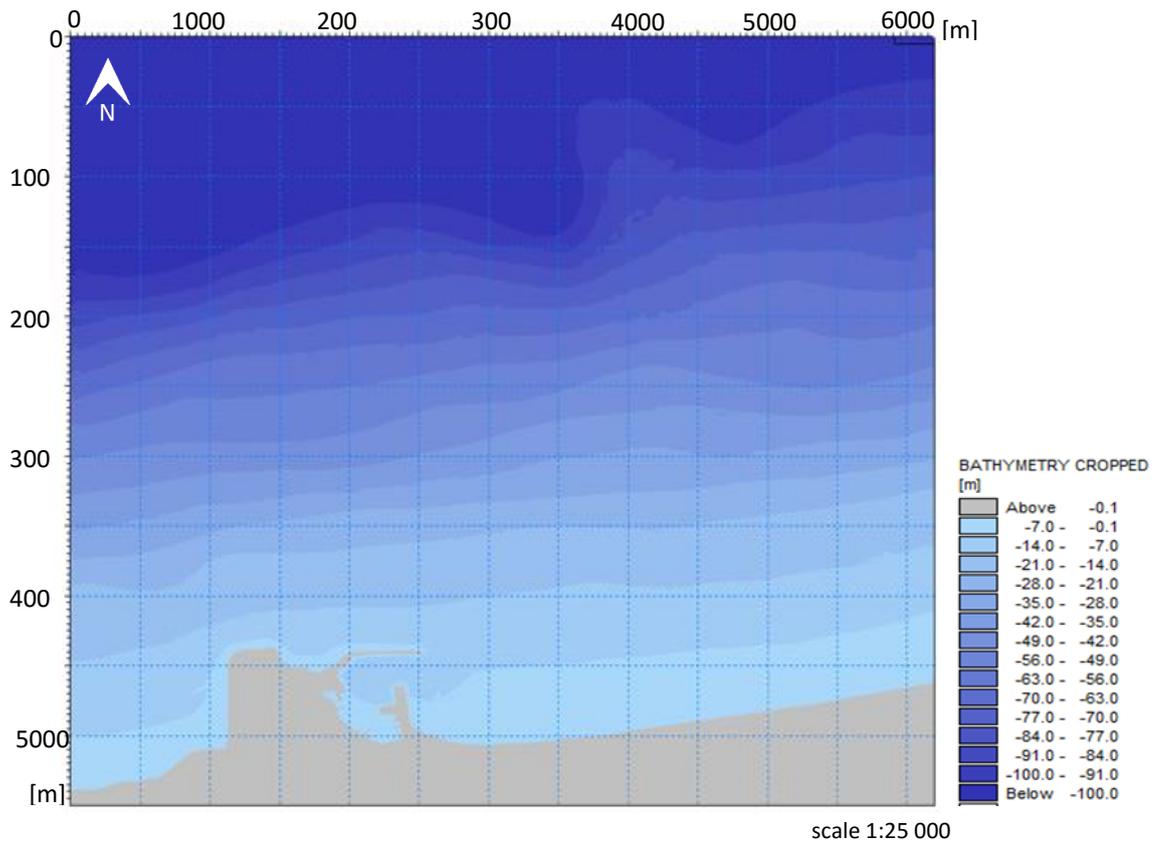


Figure 8 Bathymetry of Rethymno coastal area.

After the import of all the demanded input datasets which are: the bathymetry, the boundary conditions, the bottom dissipation factor and the offshore wave characteristics, the output simulation is derived. In Figure 9 the plots with the information of the wave field in the whole area are shown. As the the offshore wave height increases, the wave heights in the whole grid are shown higher. Also, due to the bottom friction, the wave heights near the coastal line are 0.25 m and below.

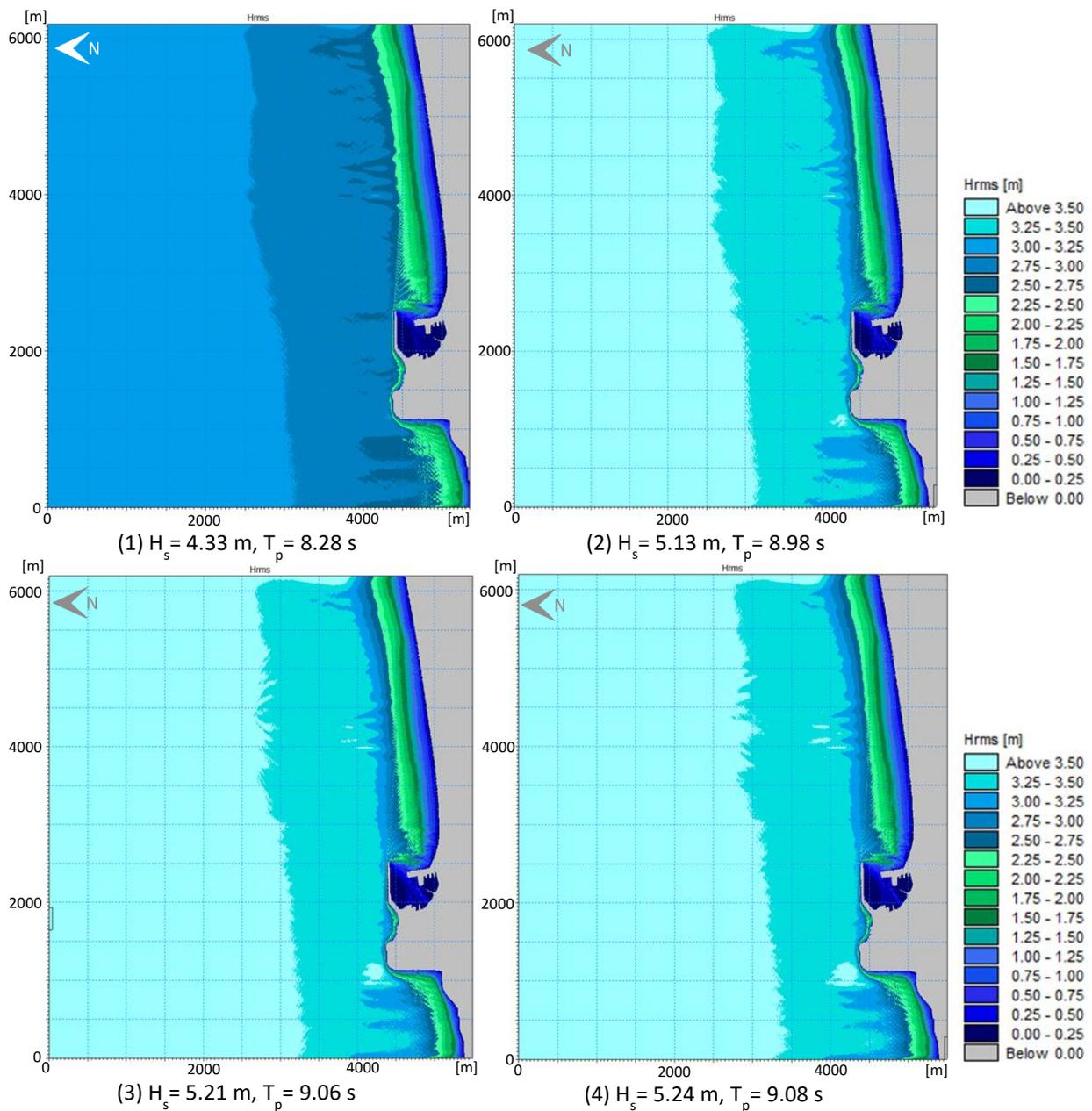


Figure 9 Output from the application of MIKE 21 PMS.

Wave overtopping

The wave overtopping q is considered as the mean overtopping discharge per width and it is mainly determined by the crest freeboard (R_c) of a coastal structure. In the present project, the mean wave overtopping is estimated in two known structure sections (Figure 10), according to the simulated wave characteristics in the nearshore.



Figure 10 The two known sections of the breakwater used for the estimation of wave overtopping.

In Figure 10, the section A-A' is the typical section of the breakwater construction (Figure 11) and the section B-B' is a proposed section (Figure 12), coming out the report of the Municipal Port Authority Fund of Rethymno (2015) that concerns the enhancement of the structures' resilience.

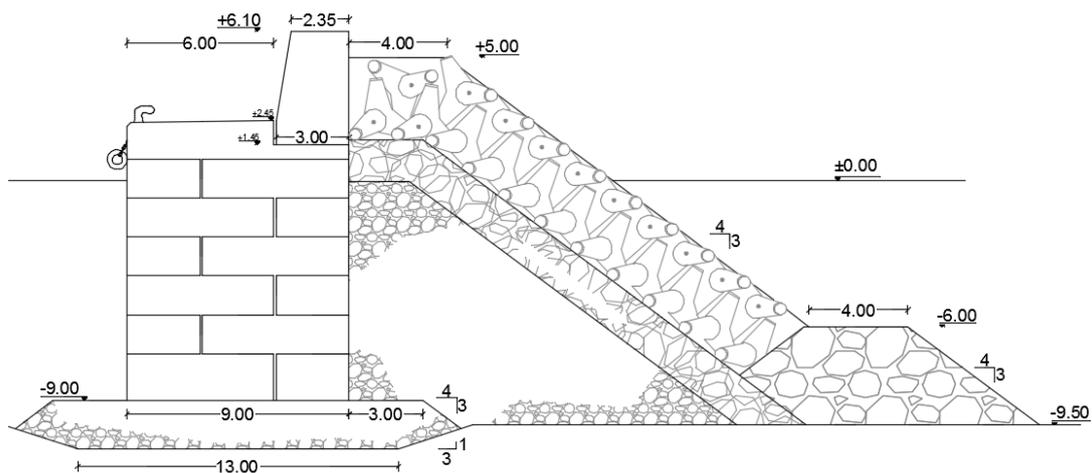


Figure 11 Sketch of breakwater section A-A'.

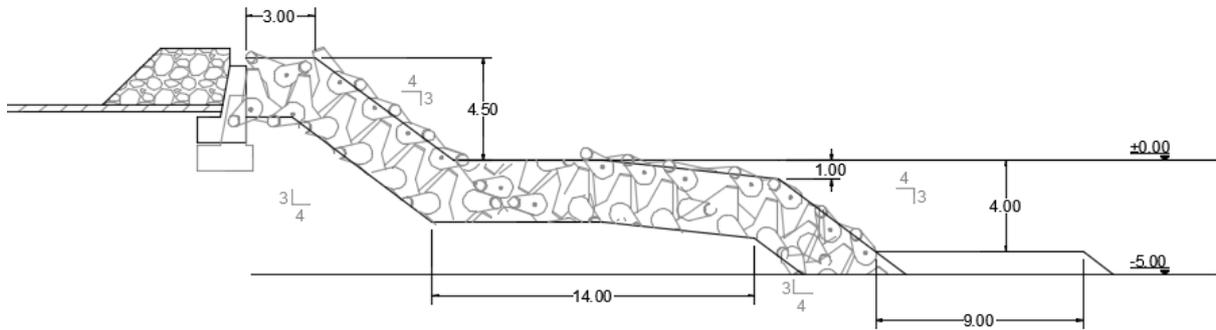


Figure 12 Sketch of breakwater section B-B'.

Two more alternative cross sections which are derived from Plavoukou's dissertation, consist an improvement of the cross section A-A'. The section C-C' is one of the proposed sections, that contains an additional layer of protection along the rear slope (Figure 13) and the other proposed section D-D', contains the addition of a berm (Figure 14).

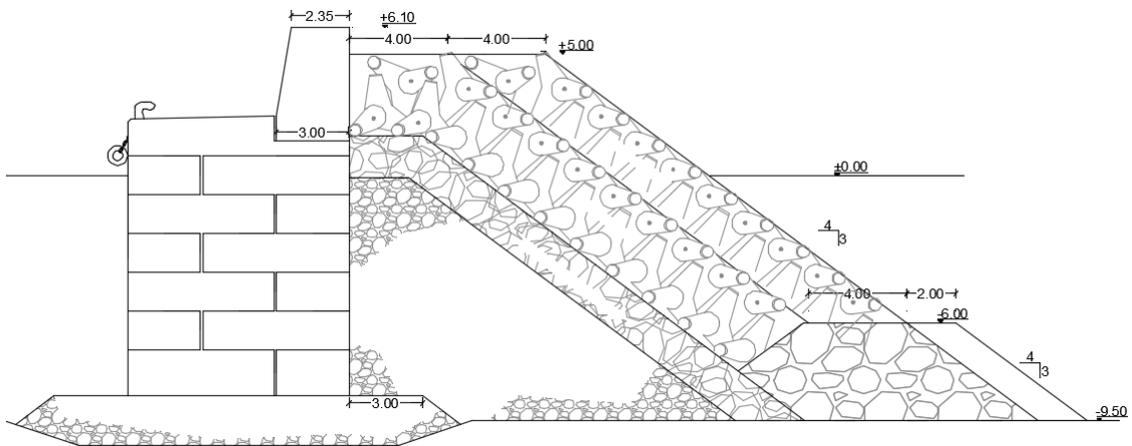


Figure 13 Sketch of breakwater section C-C'.

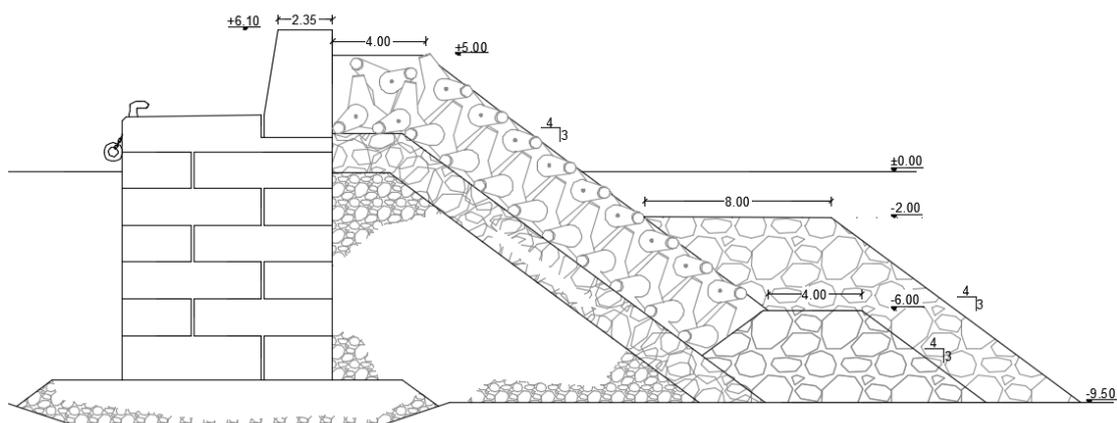


Figure 14 Sketch of breakwater section D-D'.

Empirical Methods

In the EurOtop tools (http://www.overtopping-manual.com/calculation_empirical.html) there is a calculation tool that enables the prediction of the mean wave overtopping discharge Q and the overtopping volumes in several structure types, by adding the dimensions of the structure and the incident's wave characteristics.

(1) The input dataset and the output mean discharge rate for the cross section A-A' are shown in Table 5.

Table 5 Mean wave overtopping discharge (section A-A').

	Input data					Output data
	H_{m0} (m)	T_p (s)	R_c (m)	G_c (m)	γ	Q (l/s/m)
(1)	3.96	7.9	6.1	4	0.55	2.284
(2)	4.64	8.5	6.1	4	0.55	10.514
(3)	4.67	8.6	6.1	4	0.55	11.140
(4)	4.70	8.6	6.1	4	0.55	11.796

(2) Among the available structure types in the calculation tool, there is no one to represent with accuracy the section B-B'.

(3) The input and the output dataset for the cross section C-C' are shown in Table 6.

Table 6 Mean wave overtopping discharge (section C-C').

	Input data					Output data
	H_{m0} (m)	T_p (s)	R_c (m)	G_c (m)	γ	Q (l/s/m)
(1)	3.96	7.9	6.1	8	0.38	0.019
(2)	4.64	8.5	6.1	8	0.38	0.179
(3)	4.67	8.6	6.1	8	0.38	0.195
(4)	4.70	8.6	6.1	8	0.38	0.211

(4) Likewise the cross section B-B', there is no one available structure type in the calculation tool that represents the cross section D-D'.

Artificial Neural Networks

The artificial neural network that developed by Deltares | Delft Hydraulics, is available online (<http://nn-overtopping.deltares.nl/default.aspx>) and it is capable of estimating the mean overtopping discharges at several structure types as well. The input data consist of the 15 parameters as they are demonstrated in Figure 15.

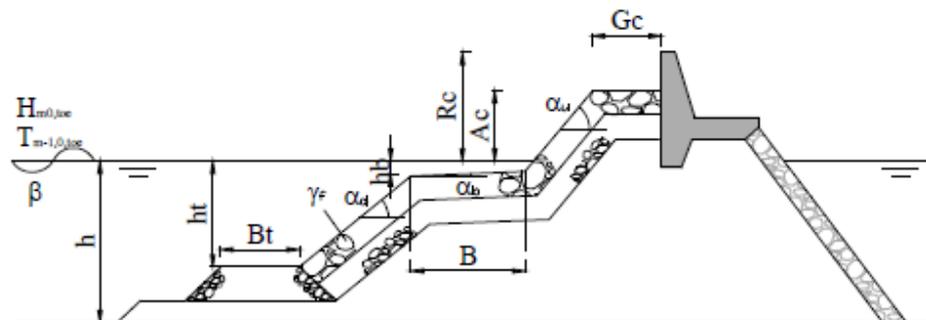


Figure 15 Definition sketch of the 15 input ANN's parameters.

(1) The input hydraulic parameters of the cross section A-A', are shown in Table 7 and the input structure parameters are shown in Table 8.

Table 7 Hydraulic parameters that set as input data at the ANN (section A-A').

	Input data			
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Table 8 Structure parameters that set as input data at the ANN (section A-A').

	Input data										
	h_t (m)	Bt (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_C (m)	A_C (m)	G_C (m)
(1)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(2)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(3)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(4)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0

The mean discharge rate Q (l/s/m) is calculated after the import of the dataset into the neural network tool, and the output data are shown in Table 9.

Table 9 The mean overtopping discharge predicted by the ANN model (section A-A').

	Output data
	Q (l/s/m)
(1)	7.85
(2)	21.00
(3)	22.86
(4)	23.34

(2) As well as the previous section, the input hydraulic parameters and the structure parameters of the cross section B-B' are shown in Table 10 and Table 11.

Table 10 Hydraulic parameters that set as input data at the ANN (section B-B').

	Input data			
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.17	6.36	5.0
(2)	0	3.34	6.64	5.0
(3)	0	3.40	6.73	5.0
(4)	0	3.41	6.73	5.0

Table 11 Structure parameters that set as input data at the ANN (section B-B').

	Input data										
	h_t (m)	Bt (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_C (m)	A_C (m)	G_C (m)
(1)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(2)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(3)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(4)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0

The calculation of the mean discharge rate Q (l/s/m) for each case is shown in Table 12.

Table 12 The mean overtopping discharge predicted by the ANN model (section B-B').

Output data	
Q (l/s/m)	
(1)	0.37
(2)	0.58
(3)	0.68
(4)	0.69

(3) The input hydraulic and structure parameters of the cross section C-C' are shown in Table 13 and Table 14. Furthermore the estimated mean discharge rate is shown in Table 15.

Table 13 Hydraulic parameters that set as input data at the ANN (section C-C').

Input data				
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Table 14 Structure parameters that set as input data at the ANN (section C-C').

Input data											
	h_t (m)	B_t (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(2)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(3)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(4)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0

Table 15 The mean overtopping discharge predicted by the ANN model (section C-C').

Output data	
Q (l/s/m)	
(1)	0.31
(2)	1.36
(3)	1.51
(4)	1.57

(4) The input and the output dataset of the cross section D-D' are shown in Table 16, Table 17 and Table 18.

Table 16 Hydraulic parameters that set as input data at the ANN (section D-D').

Input data				
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Table 17 Structure parameters that set as input data at the ANN (section D-D').

Input data											
	h_t (m)	Bt (m)	Y_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(2)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(3)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(4)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0

Table 18 The mean overtopping discharge predicted by the ANN model (section D-D').

Output data	
	Q (l/s/m)
(1)	2.72
(2)	-
(3)	-
(4)	-

Discussion

In the present project, a non-stationary approach is proposed to calculate the wave overtopping by using numerical tools. By focusing on the necessity of the estimation of extreme weather events a mathematical approach is used in order to estimate some potential future scenarios. Results show several useful conclusions about the whole procedure.

- Observing the annual evolution of mean and max wind velocities throughout the period 1957 – 2004, due to the climate change that affects their performance, the magnitude of wave heights and the frequency of storm surge events are justified.
- The estimations that came after the fitting of the annual maxima in a GEV distribution seem to be considerably divergent comparing to the SMB method's results.

- Comparing the required input dataset between the Empirical Methods' tool and the ANN's tool, it is noticed that in the second case there is a much better description of the coastal structure and there is a variable that represents the depth of the area of interest.
- The estimations that were produced by both tools (Empirical Methods and ANN) for the cross section A-A', are compared with the suggested limits of overtopping flows that derived from the CLASH research project. All of the estimations appear to exceed the lower limit of $Q= 1 \text{ l/s/m}$, that corresponds to damages against to the structure elements. Furthermore, the estimations that derived from the dataset as calculated by the EVT method, appear to provoke sinking to small boats and damages to larger yachts, as they are larger than their limit of $Q= 10 \text{ l/s/m}$.
- As well as the previous cross section, the estimations that concern the section B-B', are compared with the same limits of overtopping flows. In this case, the estimations do not appear to exceed the lower limits about the structure's stability, so the proposed cross section appears to be efficient against any potential coastal flood event.
- The cross section C-C' and the cross section D-D' demonstrate a satisfactory performance against the wave overtopping phenomenon. Both of the proposed cross sections, seem to enhance the stability of the structure and reduce the wave overtopping volumes.
- Comparing the three proposed cross sections, the section B-B' appears more efficient but also more expensive to be accomplished. And between the other two cross sections, the cross section C-C' seems to be better regarding to its stability.
- Overall, the usage of mathematical models for the estimation of extreme weather events is considered crucial and necessary. By using such methods the coastal structures to be, may correspond efficiently against a potential coastal flood event.

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της εργασίας

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η πρόβλεψη των φαινομένων που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή καθώς και η σωστή ενημέρωση των ενδιαφερόμενων μελών που εμπλέκονται. Δεδομένου ότι το 1/3 του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε απόσταση μέχρι 60 km από την ακτή, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην παράκτια ζώνη. Η πρόβλεψη των ανεμολογικών και κυματικών στοιχείων, η αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας, είναι μερικοί από τους τομείς που επικεντρώνεται η επιστημονική κοινότητα και επιχειρεί να αποκτήσει περαιτέρω γνώσεις για τις επικείμενες συνέπειές τους.

Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, είναι δυνατόν να επηρεάσει διάφορους τομείς στο πεδίο των κατασκευών, στους οποίους εμπεριέχονται οι υδατικοί πόροι και η παράκτια ζώνη. Εστιάζοντας στην ολοκληρωμένη διαχείριση της παράκτιας ζώνης λοιπόν και στα έργα προστασίας της από τις διαβρώσεις ή τις πλημμύρες, από την IPCC είναι γνωστό ότι το λιώσιμο των πάγων και η αλλαγή στους παράκτιους ανέμους, αναμένεται να αυξήσουν την ανάγκη για τη σωστή κατασκευή τέτοιων έργων. Οι μηχανικοί που ασχολούνται με αυτές τις κατασκευές, αντιμετωπίζουν ιδιαίτερες προκλήσεις απέναντι στην αβεβαιότητα των φαινομένων αυτών και χρειάζονται τη βοήθεια μαθηματικών μοντέλων προκειμένου να προσεγγίσουν καλύτερα μία επικείμενη πλημμύρα που θα εμφανιστεί κατά τη διάρκεια ακραίων γεγονότων. Με δεδομένο όμως, ότι οι περισσότερες παράκτιες κατασκευές μέχρι σήμερα έχουν κατασκευαστεί χωρίς την πρόβλεψη των επικείμενων κλιματικών αλλαγών, ενδεχομένως να αντιμετωπίζουν μία ακόμα πρόκληση. Η ανάγκη για αναβάθμιση των υφιστάμενων εγκαταστάσεων, ώστε να διασφαλίζεται η όσο το δυνατόν μικρότερη οικονομική ή κοινωνική ζημιά, αποτελεί την επιπλέον πρόκληση, αφού ταυτόχρονα πρέπει να εξασφαλισθεί η οικονομικότερα αποδεκτή βελτίωση στην κατασκευή.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, εστιάζει κυρίως στις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στην περιοχή του Ρεθύμνου και πως συγκεκριμένα η μεταβολή του κυματικού κλίματος με τα χρόνια έχει επηρεάσει τη μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης που προκαλείται. Αυτόπτες μάρτυρες και ιστορικές καταγραφές της εξεταζόμενης περιοχής, αποδεικνύουν την αύξηση των φαινομένων των παράκτιων πλημμυρών, οι οποίες οφείλονται κυρίως στην αύξηση του όγκου του θαλασσινού νερού που υπερπηδά από τις κατασκευές. Σαν αποτέλεσμα αυτού προκύπτει και πάλι η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη των μηχανικών που ασχολούνται με τις παράκτιες κατασκευές, να γνωρίζουν καλά το κλίμα

της περιοχής μελέτης κατά τη σχεδίαση ή την υλοποίηση ενός καινούριου έργου, ώστε να αποφεύγονται τέτοιου είδους αστοχίες ή ζημιές. Και στην περίπτωση που συμβούν, να υπάρχει η δυνατότητα έγκαιρης ενημέρωσης και προετοιμασίας της κοινωνίας και του εμπλεκόμενου πληθυσμού στην περιοχή που θα επηρεαστεί. Το πρόγραμμα «PEARL», *Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions*, το οποίο είναι χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση και αναφέρεται εκτενώς στην παρούσα εργασία, έχει ως στόχο την εκπλήρωση της ανάγκης για τη βελτίωση των προβλέψεων για την ανάπτυξη στρατηγικών για τη μείωση των επικείμενων κινδύνων σε διάφορες περιοχές μελέτης, και στο Ρέθυμνο.

1.2 Πρωτότυπα σημεία

Η παρούσα εργασία μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρωτότυπη, καθώς προτείνεται η ενσωμάτωση μίας χρονοσειράς ακραίων υψών κύματος σε κατανομή GEV, προκειμένου να προβλεφθεί το κυματικό κλίμα της περιοχής μέσω των επιπέδων επαναφοράς. Ξεκινώντας από την αλλαγή στο ανεμολογικό κλίμα και άρα στο κυματικό κλίμα της περιοχής του Ρεθύμνου, επιχειρείται η ολοκληρωμένη μεθοδολογία πρόβλεψης της κυματικής υπερπήδησης. Μέσω των διαθέσιμων εμπειρικών σχέσεων αλλά και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων του WL | Delft Hydraulics, πραγματοποιείται μία εκτίμηση της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης στον προσήνεμο μόλο του λιμένα του Ρεθύμνου. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η συγκέντρωση χρήσιμων δεδομένων και πληροφοριών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις αρχές της περιοχής για τη βελτίωση των υφιστάμενων διατομών και τη λήψη κατάλληλων μέτρων για την ομαλή συνέχιση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει, εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1), στο οποίο εισάγεται για πρώτη φορά η σημασία της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στις παράκτιες περιοχές συγκεκριμένα, επτά ακόμα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2, διαχωρίζεται η έννοια του κλίματος από την κλιματική αλλαγή και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μη φυσικές κλιματικές αλλαγές που συμβαίνουν στην τρέχουσα κλιματική περίοδο. Έπειτα συγκεντρώνονται οι δείκτες που μαρτυρούν την ύπαρξη της κλιματικής αλλαγής, μέσω των ιστορικών παρατηρήσεών τους και των μελλοντικών προβλέψεών τους και διατυπώνονται οι επιπτώσεις από τις αλλαγές αυτές. Εστιάζοντας στην παράκτια ζώνη, περιγράφεται εκτενώς το φαινόμενο των παράκτιων πλημμυρών, οι οποίες πλήττουν και την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας, το Ρέθυμνο. Με τις επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές λόγω της κλιματικής αλλαγής γενικότερα, έχουν ασχοληθεί αρκετά ευρωπαϊκά προγράμματα, ενώ με την ολοκληρωμένη διαχείριση των παράκτιων πλημμυρών στην περιοχή του Ρεθύμνου, έχει ασχοληθεί το πρόγραμμα «PEARL», το οποίο και παρουσιάζεται συνοπτικά.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζεται η μέθοδος της ανάλυσης των Ακραίων Τιμών, σαν εργαλείο πρόβλεψης και στον υδρολογικό τομέα. Αφού παρουσιαστούν οι βασικές έννοιες προσέγγισης της αριθμητικής μεθόδου, περιγράφεται η διαδικασία ανάλυσης, ώστε να προκύψουν τα επιθυμητά επίπεδα επαναφοράς. Μέσω του λογισμικού πακέτου «extRemes», επιτυγχάνεται η εκτίμηση των επιπέδων επαναφοράς, σε συνάρτηση με την αβεβαιότητά τους, δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης ακραίων φαινομένων και η έντασή τους.

Στο Κεφάλαιο 4, αφού περιγραφούν συνοπτικά οι μηχανισμοί γένεσης των κυματισμών, συγκεντρώνεται η διαδικασία πρόβλεψής τους στα ανοιχτά της περιοχής μελέτης μέσω της μεθόδου CEM αλλά και SMB. Στη συνέχεια και ακολουθώντας την πορεία ενός κυματισμού προς τα ρηχά μιας περιοχής, αναλύονται τα φαινόμενα που εμφανίζονται λόγω της επίδρασης του πυθμένα και πώς αυτά προσομοιώνονται μέσω του γραμμικού μοντέλου MIKE 21 PMS. Αφού καταγραφεί το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου, περιγράφεται η διαδικασία εφαρμογής του και τα αποτελέσματά του.

Στο Κεφάλαιο 5, ορίζεται και περιγράφεται το φαινόμενο της κυματικής υπερπήδησης. Συγκεντρώνονται σε πίνακες τα επιτρεπόμενα όρια της υπερπήδησης που επιτρέπονται για την ομαλή λειτουργία των διαδικασιών που σχετίζονται με τις παράκτιες κατασκευές, όπως συγκεντρώνονται στο EurOtop. Πιο συγκεκριμένα, τα επιτρεπόμενα όρια αφορούν τους πεζούς, τα οχήματα, την ίδια την κατασκευή αλλά και τις διαδικασίες που πραγματοποιούνται πίσω από αυτήν. Κλείνοντας το κεφάλαιο, γίνεται αναφορά στο πώς είναι δυνατόν να προβλεφθεί ο βαθμός της κυματικής υπερπήδησης πίσω από τους διάφορους τύπους των παράκτιων κατασκευών. Συγκεντρώνονται οι εμπειρικές σχέσεις που αποτυπώνουν την εμφάνιση του φαινομένου αυτού σε έργα με κατακόρυφο μέτωπο, κεκλιμένο πρανές με ή χωρίς θωράκιση. Επιπλέον, περιγράφεται και το μοντέλο των τεχνητών νευρωνικών δικτύων που προτείνεται από το WL | Delft Hydraulics, ένας αλγόριθμος πρόβλεψης της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης της διατομής που περιγράφεται στα δεδομένα εισόδου του δικτύου.

Στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Αφού δοθούν μερικά δημογραφικά και γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής του Ρεθύμνου, δίνεται έμφαση στο λιμένα του Ρεθύμνου και τη διάταξή του. Συνεχίζοντας, δίνονται τα ανεμολογικά στοιχεία της περιοχής, η εξέλιξη του ανεμολογικού κλίματος από το 1957 έως και το 2014 και οι μέγιστες τιμές της έντασης του ανέμου στις τρεις κρίσιμες διευθύνσεις που επηρεάζουν την περιοχή (βόρεια, βορειοδυτική, βορειοανατολική). Τέλος, γίνεται αναφορά στο ιστορικό των παράκτιων πλημμυρών που έχουν εμφανιστεί στην περιοχή του Ρεθύμνου κατά τη διάρκεια καταιγίδων όπως έχουν προκύψει από τον τοπικό τύπο και ανθρώπινες μαρτυρίες των κατοίκων της περιοχής.

Στο Κεφάλαιο 7, εφαρμόζεται η μεθοδολογία των προηγούμενων κεφαλαίων με στόχο την εκτίμηση της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης, σε τέσσερις διατομές του προσήνεμου μόλου του λιμένα του Ρεθύμνου, μία χαρακτηριστική και τρεις προτεινόμενες. Αρχικά υπολογίζεται το χαρακτηριστικό ύψος κύματος στα βαθιά της περιοχής μελέτης,

μέσω της μεθόδου SMB. Έπειτα, συλλέγονται οι μέγιστες ετήσιες τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος από το 1957 έως το 2004, οι οποίες προσαρμόζονται σε κατανομή GEV ως χρονοσειρά, και δίνουν το χαρακτηριστικό ύψος κύματος στα βαθιά για διάφορες περιόδους επαναφοράς. Τα ύψη όπως προέκυψαν από την ανάλυση των ακραίων κυματισμών και τη μέθοδο SMB, εισάγονται στο μοντέλο MIKE 21 PMS, οπότε και αποτυπώνεται η χωρική εξέλιξη των διαφόρων υψών κύματος στην περιοχή του λιμένα του Ρεθύμνου και γύρω από αυτόν, άρα και στις τέσσερις εξεταζόμενες διατομές. Με δεδομένα εισόδου τα ύψη κύματος του PMS, εκτιμάται η κυματική υπερπήδηση μέσω των εμπειρικών σχέσεων και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων για κάθε περίπτωση και κάθε διατομή.

Στο Κεφάλαιο 8, συνοψίζεται η πορεία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, και εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την εξέλιξη του κυματικού κλίματος της περιοχής, την στατιστική ανάλυση των ακραίων υψών κύματος και τις δύο μεθόδους πρόβλεψης της κυματικής υπερπήδησης. Τελικά, διατυπώνονται ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα, βασισμένα στην παρούσα μελέτη.

2 Κλιματική Αλλαγή

2.1 Κλίμα και Κλιματική Αλλαγή

Το κλίμα της γης, κατά τον Παγκόσμιο Οργανισμό Μετεωρολογίας (World Meteorological Organization – WMO) αποτελεί ουσιαστικά τη μέση τιμή των παραμέτρων που ορίζουν τον καιρό (θερμοκρασία, αέρας, βροχόπτωση, άνεμος, πλημμύρες, καταιγίδες). Λόγω της μακρόχρονης σταθερότητας της ατμόσφαιρας, το κλίμα, δε φαίνεται να παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές σε σχέση με το χρόνο, αλλά βέβαια μεταβάλλεται έντονα ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και τις τοπικές συνθήκες. Αναφορικά με το χρόνο, το κλίμα μεταβάλλεται παγκοσμίως σύμφωνα με την κλιματική περίοδο που εξετάζεται. Η κάθε περίοδος διαρκεί περίπου 125000 χρόνια και οφείλεται σε μικρές αλλαγές της τροχιάς της γης γύρω από τον ήλιο. Σε βάθος 420000 χρόνων, η γη έχει περάσει από τέσσερις κλιματικές περιόδους, οι οποίες διακρίνονται σε παγετώδεις ή θερμές. Η τελευταία παγετώδης περίοδος ξεκίνησε πριν από 120000 χρόνια η οποία ακολουθήθηκε από μία θερμή περίοδο πριν από 16000 χρόνια περίπου, η οποία υπάρχει μέχρι σήμερα και ονομάζεται Ολόκαινος (Gudmundsson, 1997). Η Ολόκαινος θεωρητικά βρίσκεται στο τέλος της, οπότε είναι πιθανό να ακολουθήσει περίοδος παγετώνων, χωρίς όμως να είναι δυνατόν αυτό να προβλεφθεί.

Ακολουθώντας την ιστορική αναδρομή του Δουκάκη (2015), κατά τη διάρκεια της τρέχουσας θερμής περιόδου και σε συνδυασμό με τη βιομηχανική επανάσταση (18^{ος} και 19^{ος} αιώνας), παρουσιάστηκε μεγάλη άνοδος στην παγκόσμια θερμοκρασία. Ο συνδυασμός των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου με την υποβάθμιση και τη ρύπανση του περιβάλλοντος οδήγησαν στο να θεωρηθεί η θερμοκρασιακή περίοδος στο Βόρειο Ημισφαίριο η πιο θερμή της τελευταίας χιλιετίας. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Hansen *et al.* (2016), η παγκόσμια θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης το 2015 εμφανίστηκε αυξημένη κατά 1.5°C συγκριτικά με την περίοδο 1880-1920, ενώ σύμφωνα με τις μετρήσεις της NASA το 2015 παρουσιάζεται ως το πιο θερμό έτος (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>), γεγονός που μαρτυρά την ύπαρξη της παγκόσμιας κλιματολογικής αλλαγής. Κατά τον Bobrowsky (2013), η κλιματική αλλαγή είναι η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες και διαφοροποιείται από την κλιματική μεταβλητότητα, η οποία οφείλεται σε φυσικά αίτια. Η κλιματική αλλαγή κατά την IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), ορίζεται ως η αλλαγή στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να εμφανιστεί μέσω αλλαγών στη μέση τιμή των παραμέτρων που ορίζουν τον καιρό, για εκτεταμένη χρονική περίοδο (συνήθως δεκαετίας ή παραπάνω). Αναφέρεται λοιπόν, σε

οποιαδήποτε διαχρονική αλλαγή στο κλίμα, είτε οφείλεται σε φυσική μεταβολή (κλιματικές περιόδους) είτε σαν αποτέλεσμα ανθρώπινης δραστηριότητας (βιομηχανική επανάσταση). Η IPCC αποτελεί μία Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή, απαρτίζεται από τουλάχιστον 3000 επιστήμονες υπό την αιγίδα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών (United Nations) και του Παγκόσμιου Οργανισμού Μετεωρολογίας και στοχεύει στη συλλογή δεδομένων για την κλιματική αλλαγή και την εξαγωγή προτάσεων σχετικά με τις επιπτώσεις και τα μέτρα πρόληψης και περιορισμού του φαινομένου.

Για την αντιμετώπιση των μη φυσικών λοιπόν κλιματικών αλλαγών, πραγματοποιούνται ανά διαστήματα σε ευρωπαϊκή και παγκόσμια κλίμακα, συζητήσεις για τα προβλήματα που εμφανίζονται σήμερα στον πλανήτη λόγω της κλιματικής αλλαγής αλλά και για τα μέτρα που πρέπει να επιτευχθούν για την αντιμετώπισή της ή καλύτερα για τη μη επιδείνωση της όλης κατάστασης. Σημαντικό ρόλο στη δραστηριότητα αυτή έχει αποτελέσει με το έργο της εκτός από την IPCC και τα Ηνωμένα Έθνη μέσω του Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (United Nations Framework convention on Climate Change – UNFCCC), το οποίο στοχεύει στη μείωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και την αντιμετώπιση των συνεπειών της γενικότερης κλιματικής αλλαγής. Επιπλέον επιτροπές και οργανισμοί προβληματίζονται σχετικά με το νέο αυτό πεδίο ενδιαφέροντος και επιχειρούν τη διεξαγωγή έρευνας με κύριο στόχο την ενημέρωση και την ευαισθητοποίηση των πολιτών. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι εξής οργανισμοί:

- Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής: World Climate Research Programme (WCRP), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Center for Atmospheric Research (NCAR)
- Γαλλία: Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
- Ηνωμένο Βασίλειο: Natural Environmental Research Council (NERC)
- Αυστραλία: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO)

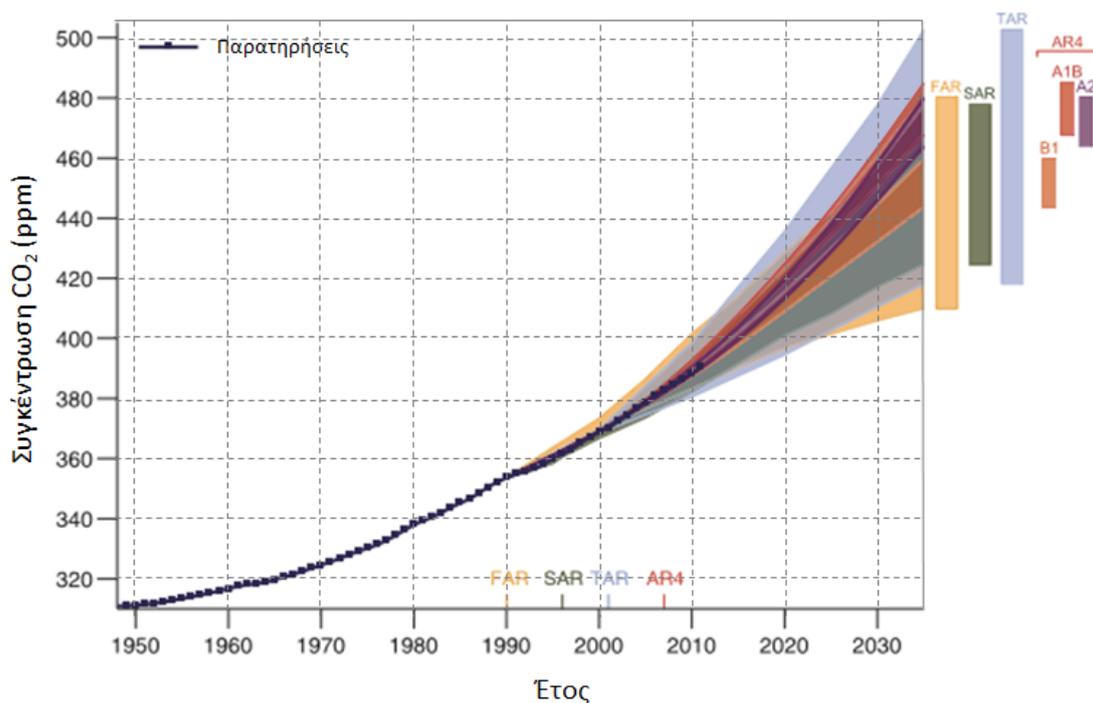
Ωστόσο, σύμφωνα με τον Koutsoyiannis (2010), η πολυπλοκότητα στο σύστημα και την κλιματική μεταβλητότητα, αυξάνει την αβεβαιότητα και δυσκολεύει τέτοιου είδους προγνώσεις, ώστε να μην θεωρούνται πάντα αξιόπιστες.

2.2 Δείκτες που μαρτυρούν την Κλιματική Αλλαγή

Η αλλαγή του κλίματος της γης, εκτός της αύξησης της θερμοκρασίας της αποτυπώνεται και μέσω άλλων αλλαγών, όπως είναι το λιώσιμο των πάγων και η αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας, καθώς και η εμφάνιση ακραίων καιρικών φαινομένων. Για την ποσοτικοποίηση των δεικτών που μαρτυρούν την κλιματική αλλαγή, ιδιαίτερο ρόλο αποτελεί η ανάπτυξη των αριθμητικών μοντέλων, τα οποία επιχειρούν να αποτυπώσουν τη συμπεριφορά του συστήματος. Σύμφωνα με τους Lowe and Gregory (2005) μέσω της μοντελοποίησης είναι δυνατόν να επιτευχθεί η πρόγνωση της συμπεριφοράς διαφόρων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία της θάλασσας και της ατμόσφαιρας, οι άνεμοι, η πίεση, η βροχόπτωση και άλλα. Σε όλες βέβαια τις περιπτώσεις, στα μοντέλα εμπεριέχεται και ο

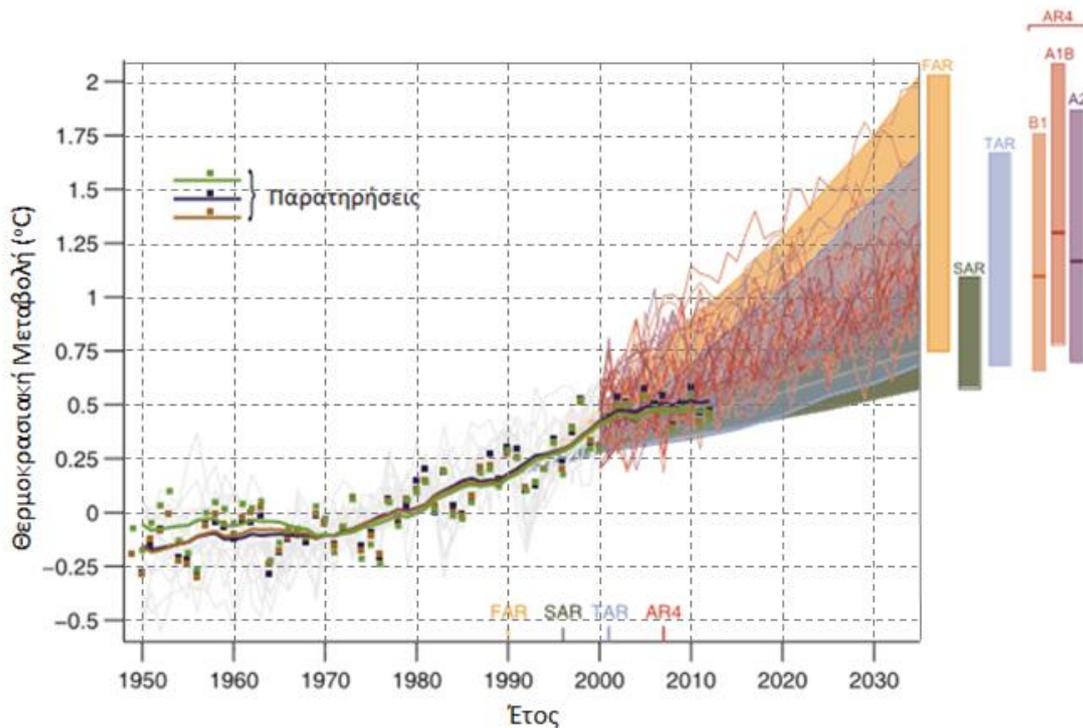
παράγοντας της αβεβαιότητας των προβλέψεων, κυρίως λόγω της φυσικής μεταβλητότητας του συστήματος.

Ο αρχικός παράγοντας και βασικός δείκτης που μαρτυρά την κλιματική αλλαγή, είναι η συγκέντρωση του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Στο Σχήμα 2.1 της 5^{ης} και τελευταίας συνόδου της IPCC το 2014 (AR5), καταγράφονται οι ιστορικές παρατηρήσεις των εκπομπών CO₂ έως το 1990 και οι προβλέψεις διαφόρων σεναρίων έως το 2035, τα οποία αντιστοιχούν στις προβλέψεις της πρώτης (FAR), της δεύτερης (SAR), της τρίτης (TAR) και της τελευταίας (AR4) έκθεσης της διακυβερνητικής επιτροπής. Οι πρόσφατες καταγραφές των συγκεντρώσεων CO₂ συγκλίνουν στη μέση τιμή των σεναρίων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προβλέψεις. Τα προηγούμενα 20 έτη (1995 – 2015) παρατηρείται μία αύξηση της τάξης του 8.33% περίπου της συγκέντρωσης του CO₂ σε σχέση με την προηγούμενη 20ετία, ενώ για τα επόμενα 20 έτη (2015 – 2035) αναμένεται ακόμα μεγαλύτερη αύξηση περίπου 12.82% θεωρώντας ότι θα εμφανιστεί και πάλι η μέση των τιμών πρόβλεψης των σεναρίων. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί εδώ είναι ότι, οι ποσότητες CO₂ που εκπέμπονται στην πραγματικότητα είναι τριπλάσιες από τις καταγεγραμμένες, ωστόσο απορροφώνται (κατά τα 2/3 περίπου) από τη θάλασσα και τη βλάστηση και να τονιστεί το πόσο αναμένεται να επιβαρυνθεί επιπλέον το περιβάλλον.



Σχήμα 2.1 Ιστορικές παρατηρήσεις έως το 2012 και προβλέψεις των εκπομπών CO₂ έως το 2035 (Πηγή: IPCC, AR5).

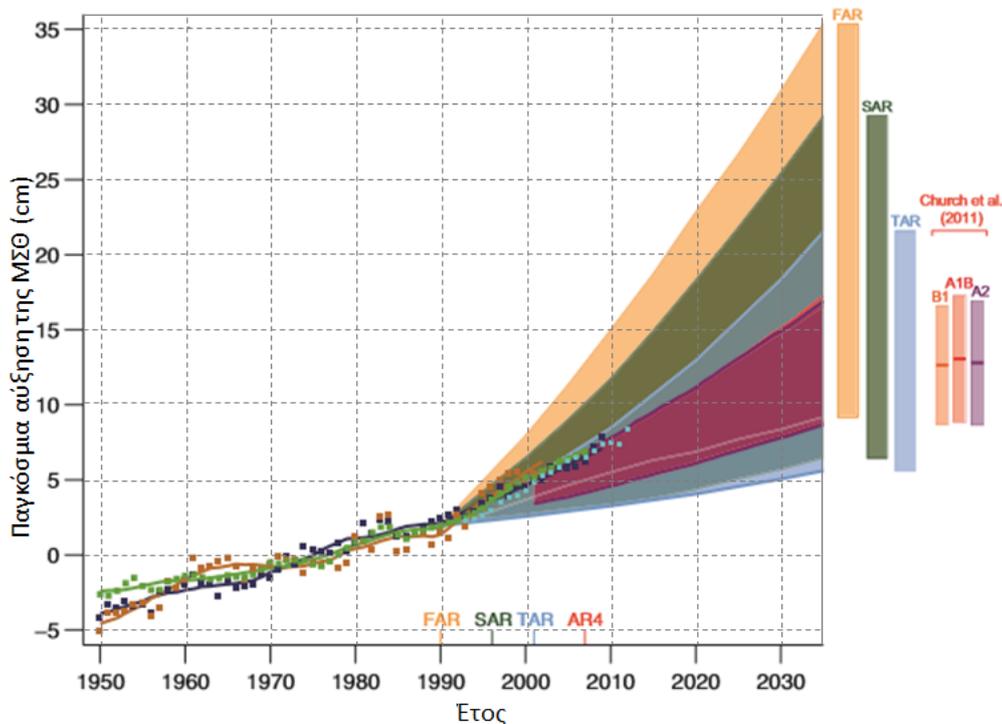
Συνεχίζοντας, στο Σχήμα 2.2 καταγράφεται η παγκόσμια μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας της γης. Τα σενάρια που εξετάστηκαν και σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν από τις προηγούμενες εκθέσεις της IPCC (FAR, SAR, TAR) και από την τελευταία (AR4). Οι προβλέψεις μέχρι το 2012 συμπίπτουν με τις προβλέψεις που έγιναν από πραγματικές παρατηρήσεις και πιο συγκεκριμένα για την περίοδο 1990 – 2012 φαίνεται ότι οι παρατηρήσεις συμπίπτουν με τις άνω προβολές προηγούμενων εκτιμήσεων (IPCC, 2000). Από το παρακάτω σχήμα λοιπόν εκτιμάται ότι θα ακολουθήσει αύξηση της μέσης επιφανειακής θερμοκρασίας της γης από 0.5°C έως 1.75°C μέχρι το 2035.



Σχήμα 2.2 Η εξέλιξη της μέσης επιφανειακής αύξησης της θερμοκρασίας 2012 και η πρόβλεψη της εξέλιξής της έως το 2100 (Πηγή: IPCC, AR5).

Η εκτίμηση της παγκόσμιας κοινότητας των επιστημόνων, όπως επισημαίνει και ο Benestad (2016) στην εργασία του, έγκειται στο ότι τα υψηλά επίπεδα της εκπομπής του CO₂ εκτός από την ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την αύξηση της θερμοκρασίας, είναι δυνατόν να προκαλέσουν μαζικό αφανισμό των δασών. Επιπλέον θα έπρεπε να συμπεριληφθεί και ο κίνδυνος της ανόδου της μέσης στάθμης της θάλασσας και η εμφάνιση των ακραίων καιρικών φαινομένων, στις συνέπειες της αύξησης των συγκεντρώσεων του CO₂. Η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας, αποτελεί έναν ακόμα σημαντικό δείκτη της κλιματικής αλλαγής. Από προηγούμενες εκτιμήσεις της IPCC, οι οποίες βασίζονται σε παρατηρήσεις μετρητών παλίρροιας και δορυφορικών ραντάρ για έως και 150 χρόνια, επιβεβαιώνεται η άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας (IPCC, AR5). Ο μέγιστος καταγεγραμμένος μάλιστα ρυθμός της ανόδου αυτής σε παγκόσμιο επίπεδο αντιστοιχεί σε 1.7 ± 0.2 mm/έτος κατά τον 20^ο αιώνα το οποίο αυξήθηκε σε 3.2 ±

0.2 mm/έτος από το 1990 κυρίως λόγω της συνεισφοράς της τήξης των πάγων. Στο Σχήμα 2.3 αποτυπώνεται η παρατηρούμενη μέτρηση της στάθμης της θάλασσας από το 1950 με τις προβολές προηγούμενων εκτιμήσεων από την IPCC (FAR, SAR, TAR). Τέλος, προβλέπεται αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας από 15 έως 25 cm μέχρι το 2035 (20 έτη), όταν από το 1950 έως το 2010 (60 έτη) περίπου καταγράφηκε αύξηση 15 cm.



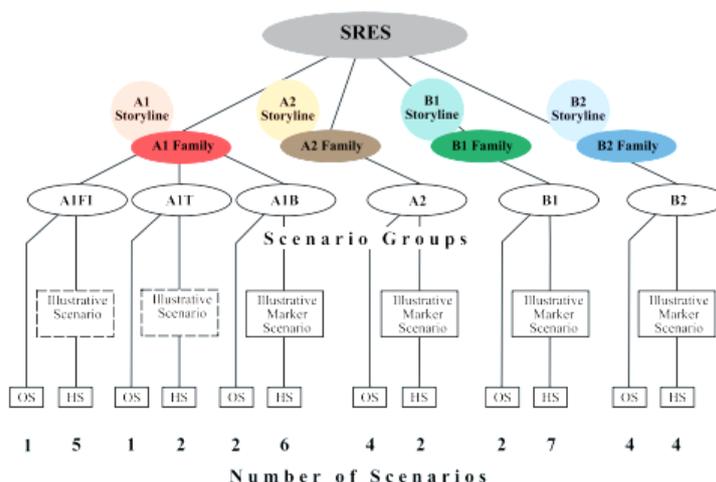
Σχήμα 2.3 Ιστορικές παρατηρήσεις της παγκόσμιας αύξησης της μέσης στάθμης της θάλασσας έως το 2012 και προβλέψεις έως το 2035 (Πηγή: IPCC, AR5).

Σε όλα τα παραπάνω σχήματα (Σχήμα 2.1, Σχήμα 2.2, Σχήμα 2.3), τα σενάρια εκπομπών που αφορούν στην τελευταία έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής AR4, παρουσιάζονται πιο αναλυτικά και διακρίνονται σε τρεις διαφορετικές ομάδες, τις B1, A1B, A2. Σύμφωνα με τους Church *et al.* (2011), όπως προκύπτει και από την η Ειδική Έκθεση για τα Σενάρια Εκπομπών (Special Report on Emissions Scenarios - SRES), η πρόβλεψη των μελλοντικών κλιματικών καταστάσεων πρέπει να διαχωρίζεται ανάλογα με τα κοινωνικά, οικονομικά και τεχνολογικά κριτήρια των διαφόρων περιοχών αλλά και με κοινή παραδοχή ότι δε θα πραγματοποιηθεί μείωση των εκπεμπόμενων αερίων που συντελούν στην κλιματική αλλαγή σε παγκόσμιο επίπεδο. Τελικά προκύπτουν οι τέσσερις βασικές ομάδες διαχωρισμού των σεναρίων: A1, A2, B1, B2, οι οποίες διαχωρίζονται χωρικά (παγκόσμιο ή τοπικό επίπεδο) και ανάλογα με την οικονομική η περιβαλλοντική τους σημασία. Και σε κάθε ομάδα διακρίνονται δύο επιμέρους τύποι:

- (1) HS: τα σενάρια είναι εναρμονισμένα στον παγκόσμιο πληθυσμό, το ακαθάριστο παγκόσμιο προϊόν (GWP) και την κατανάλωση της τελικής ενέργειας

- (2) OS: τα σενάρια τα οποία διερευνούν τις αβεβαιότητες στις κινητήριες δυνάμεις πέρα από τα HS σενάρια.

Τελικά, από τις οικογένειες σεναρίων για κάθε περίπτωση, συγκεντρώνονται συνολικά 40 διαφορετικά σενάρια όπως αποτυπώνονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Τα κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων ομάδων όπως συγκεντρώνονται στο SRES (Πηγή: IPCC Special Report Working Group III, 2000).

Τα σενάρια της ομάδας A1, αφορούν σε μία ιδανική κατάσταση, όπου παρατηρείται ταχεία οικονομική ανάπτυξη, ενίσχυση διαπολιτισμικής και κοινωνικής αλληλεπίδρασης, σύγκλιση μεταξύ των περιοχών, αποδοτική και αποτελεσματική ανάπτυξη στην τεχνολογία και χαμηλή αύξηση του πληθυσμού μετά το δεύτερο μισό του 21^{ου} αιώνα. Η ομάδα A1, αναπτύσσεται σε τρεις επιμέρους ομάδες: A1F1, A1T, A1B, οι οποίες περιγράφουν εναλλακτικές κατευθύνσεις στο είδος της ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί. Ειδικότερα, η ομάδα A1F1, αντιπροσωπεύει την περίπτωση όπου θα γίνεται η χρήση ορυκτών πρώτων υλών, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, η ομάδα A1T την περίπτωση όπου θα γίνεται χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η ομάδα A1B μία ενδιάμεση περίπτωση όπου θα πραγματοποιείται η χρήση και των δύο πηγών ενέργειας.

Η ομάδα A2, αφορά μία ετερογενή κατάσταση, στην οποία απουσιάζει η διεθνής συνεργασία και η οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη είναι πιο περιορισμένη συγκριτικά με τις υπόλοιπες ομάδες. Επιπλέον πραγματοποιείται μία συνεχής αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού.

Η ομάδα B1, δίνει έμφαση ουσιαστικά σε λύσεις που αφορούν το παγκόσμιο επίπεδο και σχετίζονται με την οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Τέλος, η ομάδα B2, εστιάζει σε μία κατάσταση στην οποία δίνεται έμφαση στις λύσεις που σχετίζονται με την τοπική κοινωνία και αφορούν όπως στην ομάδα B1 στην οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Στο σενάριο αυτό εμφανίζεται συνεχής αύξηση

του πληθυσμού, σε βαθμό μικρότερο της ομάδας A2 και το επίπεδο της οικονομικής ανάπτυξης παραμένει μέτριο όπως και ο ρυθμός της τεχνολογικής εξέλιξης.

Συνοψίζοντας λοιπόν και ακολουθώντας τις εκτιμήσεις της IPCC (AR5) η μέση επιφανειακή θερμοκρασία της γης σε βάθος 100 χρόνων αναμένεται να αυξηθεί από 1.5°C έως 6°C. Η Επιτροπή επιπλέον, προβλέπει ότι η μέση τιμή της ανόδου της μέσης παγκόσμιας στάθμης θα ξεπεράσει τα 2 mm/έτος, καθώς θα αυξηθεί η μάζα των ωκεανών από το λιώσιμο των παγετώνων. Μέσω της 5^{ης} και τελευταίας έκθεσής της, αναφέρεται ότι η μέση στάθμη μπορεί να αυξηθεί έως και 2 m στα επόμενα 100 χρόνια, ενώ θα αυξηθεί η συχνότητα και η ένταση των ακραίων καιρικών φαινομένων. Ως ακραίο γεγονός κατά την IPCC, ορίζεται ένα φαινόμενο (ξηρασία ή πλημμύρα) το οποίο θεωρείται σπάνιο για μία συγκεκριμένη περιοχή ή μία περίοδο χρονική και όμοια κατά τους Seneviratne *et al.* (2012) ορίζεται σύμφωνα με την πιθανότητα εμφάνισής του και των ορίων του.

2.3 Ο κίνδυνος από την Κλιματική Αλλαγή

Σύμφωνα με τα παραπάνω, πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα, για την ενημέρωση και την πρόβλεψη των φαινομένων της κλιματικής αλλαγής. Ωστόσο, η θερμική αδράνεια της θάλασσας, ο βαθμός απόκρισης του κλίματος στην αύξηση της συγκέντρωσης της ακτινοβολίας και η ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου, αποτελούν παράγοντες αβεβαιότητας απέναντι στην ακριβέστερη πρόβλεψή της. Οι ιστορικές καταγραφές πάντως, μαρτυρούν τη σταδιακή μεταβολή στις κλιματικές παραμέτρους και τη συνδέουν με την ανθρώπινη παρέμβαση. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί εδώ, είναι ότι η μεταβολή αυτή συμβαίνει αργότερα (χρονικά) από την αύξηση των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου, λόγω της θερμικής αδράνειας της θάλασσας. Υπάρχει συνεχώς διαφορά μεταξύ της κλιματικής μεταβολής που παρατηρείται και της κλιματικής μεταβολής που εκτίθεται η ατμόσφαιρα την ίδια χρονική στιγμή και για την ισορροπία τους πρέπει να περάσει αρκετός χρόνος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα κατά τους Hansen *et al.* (2016), αποτελεί η υπόθεση ότι αν οι συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου παρέμεναν σταθερές στις τιμές του 1990, η θερμοκρασία της επιφάνειας του πλανήτη αναμένεται να ανέβει 0.3°C έως 1.9°C μέχρι την κατάσταση ισορροπίας.

Οι αλλαγές των κλιματικών παραμέτρων λοιπόν, αναμένεται να έχουν ανομοιόμορφη κατανομή ανά τον πλανήτη και με πρωτοφανή ρυθμό. Με την υπόθεση ότι η θερμοκρασία θα αυξηθεί έως και 6°C μέσα στα επόμενα 100 έτη, οι επιπτώσεις απέναντι στο περιβάλλον αλλά και την ανθρώπινη ζωή αναμένονται σοβαρές (Jones, 2007). Η αποσταθεροποίηση του κλίματος και ιδιαίτερα ένα θερμότερο κλίμα, εκτός από διαταραχές στα φυσικά οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα θα επηρεάσει κυρίως τη γεωργία και τις καλλιέργειες. Τα κύματα καύσωνα που πρόκειται να εμφανίζονται και με μεγαλύτερη συχνότητα, επηρεάζουν τον κύκλο του νερού και είναι δυνατόν να οδηγήσουν στην ερημοποίηση και τη διάβρωση του εδάφους (δημιουργία ζωνών λειψυδρίας). Επιπλέον, η

υγρασία και η ζέστη προκαλούν δυσφορία στους ανθρώπους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση επιπτώσεων και στην υγεία. Κυρίως όμως, οι αλλαγές στη θερμοκρασία, προκαλούν μεγάλες αλλαγές στις κατακρημνίσεις και γενικότερα στους υδατικούς πόρους. Σε συνδυασμό με το λιώσιμο των πάγων αναμένεται αύξηση των ζημιών των παράκτιων περιοχών και του κατακλυσμού λιμένων και άλλων παράκτιων κατασκευών. Ιδιαίτερη έμφαση για την εμφάνιση πλημμυρών στις παράκτιες περιοχές, δίνεται στην αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας, η οποία σύμφωνα με τους Bindoff *et al.* (2007), αυξάνεται με ρυθμό 1-2 mm/year και σύμφωνα με τους Church *et al.* (2011) αναμένεται να αυξηθεί με την αύξηση της μάζας των ωκεανών.

Ο βαθμός στον οποίο ένα σύστημα αδυνατεί να προσαρμοστεί τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής που αναφέρθηκαν και παραπάνω, αναφέρεται στη βιβλιογραφία με τον όρο ευπάθεια (IPCC, 2012). Κατά τον Sahin (2011), η ευπάθεια εκφράζεται σαν συνάρτηση του ρυθμού της κλιματικής αλλαγής και της προσαρμοστικότητας του συστήματος. Έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς οι οποίες επικεντρώνονται στις επιπτώσεις που θα εμφανιστούν έπειτα από τις αλλαγές στη στάθμη της θάλασσας, τη συχνότητα και την ένταση των κατακρημνίσεων ή των φαινομένων πλημμύρας. Το 2014 οι Sierra and Casas-Prat, συγκέντρωσαν τις κύριες φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με την παράκτια ζώνη και οι οποίες ενδεχομένως να μεταβληθούν λόγω μελλοντικών αλλαγών στα κυματικά χαρακτηριστικά, σαν αποτέλεσμα της κλιματικής αλλαγής (Πίνακας 2.1). Η εργασία τους εξετάζει τρία ξεχωριστά συστήματα (παραλίες, λιμάνια, παράκτιες κατασκευές) ως προς τις φυσικές διαδικασίες που τα επηρεάζουν και καταλήγουν στις ενδεχόμενες επιπτώσεις που μπορούν να προκληθούν.

Πίνακας 2.1 Τα κύρια χαρακτηριστικά των τεσσάρων ομάδων όπως συγκεντρώνονται στο SRES (Πηγή: IPCC Special Report Working Group III, 2000).

ΣΥΣΤΗΜΑ που εξετάζεται	ΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
Παραλίες	Στερεομεταφορά Κυματική αναρρίχηση	Διάβρωση/Αποθέσεις Πλημμύρα
Λιμάνια	Κυματική διάδοση (εντός του λιμένα) Στερεομεταφορά	Διαταραχή της ηρεμίας της λιμενολεκάνης Πορσώσεις
Παράκτιες κατασκευές	Κυματική δράση Ανάκλαση κυματισμών	Αστάθεια Κυματική υπερπήδηση Διάβρωση Διάβρωση/Αποθέσεις

Επιπλέον εργασίες σχετικές με τις επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές έχουν πραγματοποιήσει παλιότερα ο Stive (2004), οι Nicholls and Cazenave (2010). Πιο

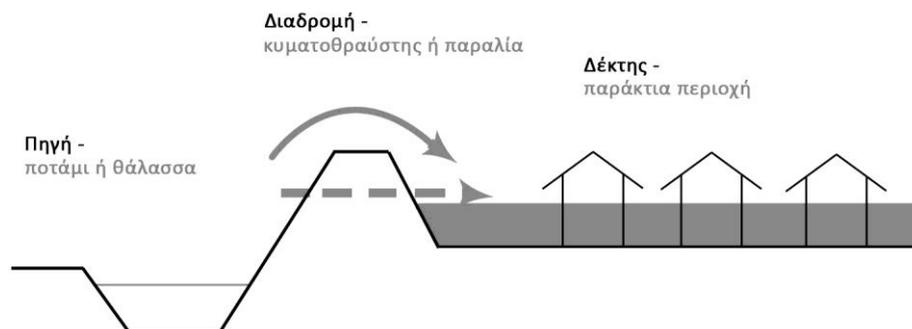
συγκεκριμένα με τη διάβρωση των ακτών και τις επιπτώσεις των κατασκευών έχουν ασχοληθεί και οι Coelho *et al.* (2009), Galiatsatou and Prinos (2011), Karambas (2015).

2.4 Παράκτιες πλημμύρες

2.4.1 Ορισμός και χαρακτηριστικά παράκτιων πλημμυρών

Ως πλημμύρα ορίζεται μία κατάσταση στην οποία «στεγνές» περιοχές πληρούνται από νερό για κάποια συγκεκριμένη περίοδο. Οι όγκοι του νερού που κατακλύζουν την περιοχή προέρχονται είτε από την τοπική βροχόπτωση, την υπερχειλίση ποταμού ή την εισροή θαλάσσιας μάζας σε παράκτιες περιοχές (Μαμάσης, 2013). Οι πλημμύρες δηλαδή, προκαλούνται από μετεωρολογικές καταστάσεις και άρα θεωρούνται φυσικά φαινόμενα, που όμως συμβαίνουν όταν η χωρητικότητα του συστήματος αποστράγγισης δεν μπορεί να διοχετεύσει όσο όγκο νερού δέχεται.

Ειδικότερα, η πλημμύρα που συμβαίνει στις παράκτιες περιοχές μπορεί να προκληθεί από θαλάσσιες καταιγίδες (πηγή) λόγω των ανέμων, εκδηλώνεται μέσω της αναρρίχησης στην ακτή ή της κυματικής υπερπήδησης σε μέτωπα (διαδρομή) για να καταλήξει στον αστικό ιστό (δέκτης), προκαλώντας πολλές φορές εκτεταμένες ζημιές (Σχήμα 2.5). Οι επιπτώσεις αυτές που αναμένονται αφορούν στην εμφάνιση στάσιμων νερών ή νερών σε ροή πίσω από την ακτογραμμή ή / και στην υφαλμύριση αγροτικών εκτάσεων (EXCIMAP, 2007).



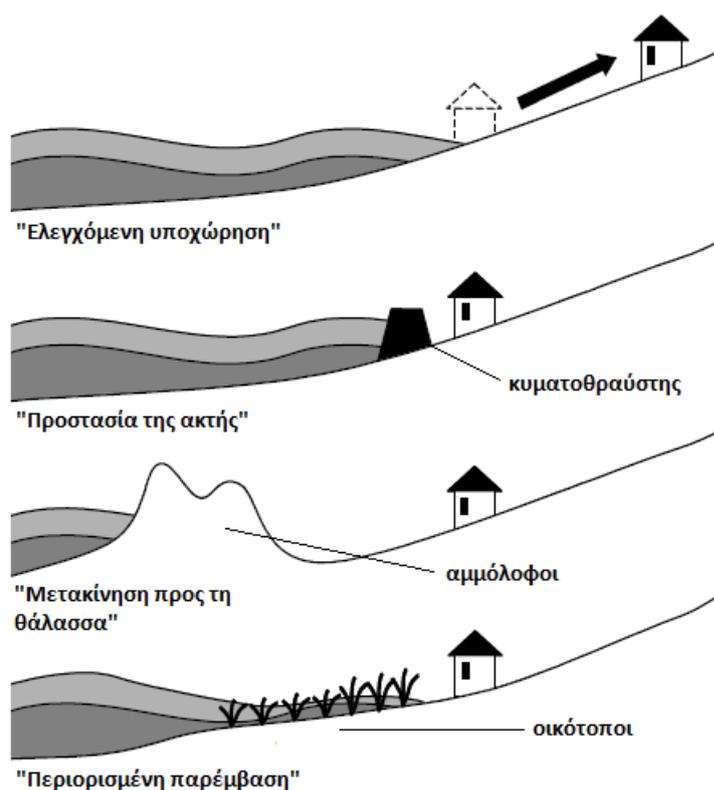
Σχήμα 2.5 Η πορεία που ακολουθεί η παράκτια πλημμύρα από την πηγή στο δέκτη.

2.4.2 Μέτρα προστασίας απέναντι στις παράκτιες πλημμύρες

Η κατανόηση της δυναμικότητας της παράκτιας ζώνης, αποτελεί το βασικότερο παράγοντα για τη σωστή αντιμετώπιση της διάβρωσης ή της πλημμύρας που εμφανίζεται εκεί. Λόγω του ότι μεγάλο μέρος του πληθυσμού προτιμά να ζει κατά μήκος της παράκτιας ζώνης σύμφωνα και με τη μελέτη των Salman *et al.* (2004), κρίνεται επιτακτική η ανάγκη ένταξης προστασίας των παράκτιων περιοχών στα σχέδια διαχείρισης της παράκτιας ζώνης. Επιπλέον, ένα μεγάλο μέρος των παράκτιων ζωνών της Ευρώπης κάθε χρόνο παρά τα μέτρα προστασίας που αναπτύσσονται διαβρώνεται ή κατακλύζεται με θαλασσινό νερό. Το EuroSION Project – Part I (2004), συγκεντρώνει κάποιες προτάσεις αναφορικά με τα μέτρα προστασίας της παράκτιας περιοχής, ώστε να εξασφαλισθεί η προστασία του θαλάσσιου

και παράκτιου ενδιαιτήματος, των υφιστάμενων θαλάσσιων κατασκευών αλλά και της ανθρώπινης ζωής, ακόμα και μετά τις επερχόμενες αλλαγές του κλίματος, στην εμφάνιση ακραίων γεγονότων και στην άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας.

Αρχικά στο Σχήμα 2.6 αποτυπώνονται οι εναλλακτικές που προτείνονται για την αντιμετώπιση της ανόδου της μέσης στάθμης της θάλασσας και αφορούν στην δημιουργία καινούριων για την περιοχή έργων – λύσεων.



Σχήμα 2.6 Εναλλακτικές προτάσεις για την προστασία της παράκτιας ζώνης απέναντι στην άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας (Πηγή: Shoreline Management Guide, EuroSION Project, 2004).

Κατά την περίπτωση της «Ελεγχόμενης υποχώρησης», τα έργα προστασίας κατασκευάζονται προς το εσωτερικό της ακτής, όπου ουσιαστικά επιτρέπεται η ελεγχόμενη πλημμύρα της περιοχής μέχρι να επέλθει σταθεροποίηση του φαινομένου της διάβρωσης και ισορροπία της παράκτιας περιοχής χωρίς να έχει πληγεί ουσιαστικά η λειτουργική ζώνη της περιοχής. Συνεχίζοντας τις προτάσεις του EuroSION Project, η αναφορά στην «Προστασία της ακτής», συνδέεται με την κατασκευή θαλάσσιων έργων, όπως οι κυματοθραύστες. Η λύση αυτή συμπεριλαμβάνεται στα «σκληρά» μέτρα προστασίας, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα μιας πιο «ήπιας» λύσης που να προστατεύει την ακτή, όπως η διαδικασία τεχνητής αναπλήρωσης (Σχήμα 2.7). Με τον όρο «Μετακίνηση προς τη θάλασσα» αποτυπώνεται η εναλλακτική λύση κατασκευής νέων έργων προστασίας ανάντη των υφιστάμενων και λειτουργεί σαν μία πρώτη προστασία. Τέλος, επιχειρείται η δημιουργία οικότοπων μέσω τοποθέτησης αμμόλοφων στην ακτογραμμή, ώστε να

επιτυγχάνεται η προστασία μέσω της εκτόνωσης της κυματικής ενέργειας με φυσικούς τρόπους.



Σχήμα 2.7 Τεχνητή αναπλήρωση ακτής στην Ολλανδία (Πηγή: www.jandenul.com).

Επιπλέον, συγκεντρώνονται αναλυτικότερα κάποια από τα προτεινόμενα έργα προστασίας, μαζί με τη χρησιμότητά τους αλλά και τα κυριότερα μειονεκτήματά τους. Τα έργα διαχωρίζονται σε δύο ομάδες, τα συμβατικά και τα ήπια έργα προστασίας.

Κύριοι εκπρόσωποι της ομάδας των συμβατικών έργων είναι οι κυματοθραύστες και οι πρόβολοι (Σχήμα 2.8). Οι κυματοθραύστες λειτουργούν ως το μέσο απορρόφησης της κυματικής ενέργειας πριν να φτάσει την ακτή και προκειμένου να ενισχυθεί η λειτουργία τους και ταυτόχρονα να εξασφαλισθεί η προστασία τους, συνήθως ενισχύονται από μία εξωτερική προστασία. Το προστατευτικό σώμα, συνήθως κεκλιμένο, μπορεί να αποτελείται από ογκολίθους φυσικούς ή τεχνητούς ή από έτοιμα τετράποδα ή ακρόποδα από σκυρόδεμα. Το κυριότερο μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αλλά και της ενίσχυσης της κατασκευής, αποτελεί η αισθητική παρέμβαση στο φυσικό περιβάλλον, καθώς κατασκευάζονται έξαλλα για μεγαλύτερη απόδοση. Οι πρόβολοι συνήθως κατασκευάζονται σε ομάδες, τοποθετούνται κάθετα στην ακτή με κύριο σκοπό την αναστολή των θαλάσσιων ρευμάτων παράλληλων προς την ακτή. Κύριο μειονέκτημα του συστήματος των προβόλων, αποτελεί η εμφάνιση διάβρωσης στα κατάντη.

Στα ήπια μέτρα προστασίας της παράκτιας ζώνης περιλαμβάνεται ο εμπλουτισμός της ακτής μέσω άντλησης ή τοποθέτησης ιζημάτων στην παραλία επιφανειακά ή κάτω από την επιφάνεια του νερού, με σεβασμό φυσικά στους οργανισμούς που ενδημούν στην περιοχή. Επίσης, η προστασία του πόδα όπου υπάρχουν βράχοι ως φυσική προστασία της ακτής, αποτελεί μία ακόμα μορφή ήπιας προστασίας και εμποδίζει την πιθανή κατάρρευση της επιφάνειας, αλλά όχι σε κάθε περίπτωση. Τέλος, η κάλυψη του παράκτιου εδάφους με φυτά των οποίων οι ρίζες συγκρατούν τους αμμόλοφους που δημιουργεί ο άνεμος δημιουργεί μία φυσική προστασία της παράκτιας ζώνης, με το μόνο μειονέκτημα την ευαισθησία του συστήματος σε ακραία γεγονότα.



Σχήμα 2.8 Ενδεικτικά παραδείγματα κυματοθραύστη με προστασία (αριστερά) (Πηγή: www.xblox.com) και ομάδας προβόλων (δεξιά) (Πηγή: www.cbi.tamouc.edu).

2.4.3 Πρόβλεψη παράκτιων πλημμυρών και ολοκληρωμένη διαχείριση παράκτιας ζώνης

Η πρόβλεψη παράκτιων πλημμυρών είναι υψίστης σημασίας για τους κατοίκους τέτοιων περιοχών, δεδομένου ότι το 1/3 του ανθρώπινου πληθυσμού ζει σε απόσταση μέχρι 60 km από την ακτή (Δουκάκης, 2015) και ιδιαίτερα στις μέρες μας, όπου πλέον επιδεινώνονται και λόγω της επίδραση της κλιματικής αλλαγής. Έρευνες ανά καιρούς, όπως τα προγράμματα «CCSEAWAVS - Estimating the effects of climate change on sea level and wave climate of the Greek seas, coastal vulnerability and safety of coastal and marine structures», «PEARL - Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions», «MICORE – Morphological Impacts and Coastal Risks induced by Extreme storm events», «STARFLOOD – Strengthening And Redesigning European FLOOD risk practices» και «RISC-KIT – Resilience Increasing Strategies for coasts - toolKIT», εκπονούνται ώστε να επιτυγχάνεται μία ολοκληρωμένη διαχείριση παράκτιων ζωνών απέναντι στους κινδύνους που αναμένονται από τις επιπτώσεις των επερχόμενων κατακλίσεων. Και άλλα επιστημονικά προγράμματα ασχολούνται με τις επιπτώσεις στην τρωτότητα των παράκτιων περιοχών όπως το πρόγραμμα «THESEUS - Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate», το οποίο στοχεύει στην παροχή μιας ολιστικής μεθοδολογίας για το σχεδιασμό βιώσιμων στρατηγικών για τη διαχείριση της διάβρωσης των ακτών και των πλημμυρών και η επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ολοκληρωμένη διαχείριση των παράκτιων ζωνών «Integrated Coastal Zone Management (ICZM) – The European Commission». Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα ελληνικά δεδομένα και συγκεκριμένα για την περιοχή του Ρεθύμνου, παρουσιάζει η μελέτη των Tsoukala *et al.* (2016), η οποία έχει πραγματοποιηθεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «PEARL». Η μελέτη περιγράφει τα φαινόμενα της κυματικής αναρρίχησης και υπερπήδησης γύρω από το λιμένα του Ρεθύμνου, κατά τη διάρκεια κυματικών καταιγίδων.

2.5 Το ερευνητικό πρόγραμμα «PEARL»

Το ερευνητικό πρόγραμμα PEARL - Preparing for Extreme And Rare events in coastal regions, ξεκίνησε το 2014 και οφείλεται στη συνεργασία 24 μελών από 13 χώρες σε Ευρώπη και Ασία, με εμπειρία στην αντιμετώπιση των πλημμυρών στις παράκτιες περιοχές. Ειδικότερα το PEARL, θέτει ως στόχο την ανάπτυξη τεχνικών αλλά και κοινωνικών μέτρων διαχείρισης των κινδύνων που εμφανίζονται λόγω ακραίων υδρομετεωρολογικών γεγονότων λόγω της κλιματικής αλλαγής στις παράκτιες περιοχές στην Ευρώπη. Επιχειρεί την ελαχιστοποίηση των οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων μέσω της βελτίωσης των προβλέψεων με τη βοήθεια διαφόρων μεθόδων και τεχνολογιών, και την βελτίωση της ανθεκτικότητας των παράκτιων περιοχών μέσω της έγκαιρης ενημέρωσης απέναντι στους φορείς πολιτικής χάραξης και τελικά μία ισχυρή στρατηγική για τη μείωση των κινδύνων (Makrogiorgos *et al.*, 2015). Επιπλέον, κατά το PEARL εξίσου σημαντική θεωρείται και η έγκαιρη προειδοποίηση του ίδιου του πληθυσμού των ευαίσθητων περιοχών, οπότε και επικεντρώνεται εκτός από τα τεχνικά μέτρα και στις κοινωνικές πτυχές (πολιτική, οργανωτική και κοινωνική δομή) μιας περιοχής, στοχεύοντας στην ενίσχυση της αλληλεπίδρασής τους για την επίλυση των προβλημάτων που αφορούν στις πλημμύρες και τις καταστροφές τους.

Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος του προγράμματος PEARL, υιοθετείται μία σφαιρική προσέγγιση της διαχείρισης των κινδύνων, με βάση τις εξής προϋποθέσεις:

- (α) Η διαχείριση του κινδύνου είναι μία κοινωνική και τεχνική διαδικασία και θα πρέπει να μελετάται συναρτηθεί και των δύο αυτών παραγόντων και όχι απομονωμένα ως μία κοινωνική ή τεχνική διαδικασία.
- (β) Οι σχέσεις μεταξύ των μελών είναι αμοιβαίες, δυναμικές και μη γραμμικές και καθοδηγούνται από τις αυτό – οργανώσεις των δυνατοτήτων του κάθε μέρους.
- (γ) Η διαδικασία της ενίσχυσης των μεθόδων πρόβλεψης, πρόγνωσης και έγκαιρης προειδοποίησης του κινδύνου εμφάνισης παράκτιων πλημμυρών, πρέπει να μελετηθεί στο πλαίσιο της ευρύτερης διαδικασίας διαχείρισης των πλημμυρών, η οποία εξαρτάται από τις αλληλεπιδράσεις με άλλες διεργασίες σε διαφορετικά επίπεδα.

Για την επίτευξη των στόχων του PEARL, έχουν δημιουργηθεί οκτώ πακέτα εργασιών (work packages), τα οποία περιλαμβάνουν επτά ευρωπαϊκές περιοχές μελέτης, οι οποίες καλύπτουν διαφορετικούς τύπους παράκτιων πλημμυρών (από ακραία υδρομετεωρολογικά φαινόμενα μέχρι τσουνάμι) (Σχήμα 2.9).

Εν συντομία, πρώτο από τα 8 πακέτα, (WP1), περιλαμβάνει την κατανόηση των γενεσιουργών παραγόντων της τρωτότητας των παράκτιων περιοχών και την ανάπτυξη ενός αντίστοιχου πλαισίου αξιολόγησης της τρωτότητας. Το δεύτερο πακέτο (WP2), περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός πλαισίου χαρακτηρισμού των ακραίων γεγονότων, της εκτίμησης των επιπτώσεων και των μελλοντικών καταστροφών καθώς και η εφαρμογή τους στην περιοχή ενδιαφέροντος. Συνεχίζοντας, το τρίτο πακέτο (WP3), στοχεύει στην

ανάπτυξη ενός πλαισίου για τη σφαιρική αξιολόγηση των κινδύνων (στρατηγικών και λειτουργικών), ενώ το τέταρτο (WP4), στην ανάπτυξη ενός πλαισίου συστημάτων και μεθοδολογιών για την έγκαιρη προειδοποίηση των παράκτιων περιοχών, αναφορικά με την υπέρβαση των ανεκτών ορίων κάθε περίπτωσης. Το πέμπτο πακέτο (WP5), επιδιώκει την ανάπτυξη μίας διαδραστικής πλατφόρμας στο διαδίκτυο, στην οποία όλοι οι ενδιαφερόμενοι θα αλληλεπιδρούν με τις διαδικασίες, τα εργαλεία και τις μεθόδους του PEARL, αφού πρώτα αναπτυχθούν ανθεκτικές στρατηγικές απέναντι στη διαχείριση των κινδύνων. Επιπλέον, επιδιώκει τη συνεργασία της επιστήμης με την πολιτική απέναντι στους κινδύνους αυτούς. Το έκτο πακέτο εργασιών WP6, επικεντρώνεται στο να καταστήσει δυνατή την αποτελεσματική διαχείριση και διεξαγωγή των εργασιών στην περιοχή ενδιαφέροντος και στο να αξιολογήσει την όλη μεθοδολογία του PEARL που αφορά στη σφαιρική διαχείριση της επικινδυνότητας. Τέλος, στα δύο τελευταία πακέτα WP6 και WP7 περιέχονται πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση και το συντονισμό του όλου έργου, καθώς και πληροφορίες αναφορικά με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα.



Σχήμα 2.9 Συγκεντρωτικά τα πακέτα εργασιών του PEARL (Πηγή: www.pearl-fp7.eu).

Οι περιοχές μελέτης (Σχήμα 2.10) οι οποίες εξετάζονται και θα εφαρμοστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία βρίσκονται στην Ευρώπη (6), την Ασία (5) και την Καραϊβική (2). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση της περιοχής του Ρεθύμνου στην Ελλάδα, περιοχή η οποία ταυτίζεται με την μελέτη της παρούσας εργασίας.

Το Ρέθυμνο από πάντα καλείται να αντιμετωπίσει το πρόβλημα των πλημμυρών και τις συνέπειές τους απέναντι στις επιχειρήσεις και τις ιδιοκτησίες των κατοίκων, τις δημόσιες υποδομές αλλά και τα εξωτερικά έργα προστασίας της παράκτιας περιοχής, όταν πρόκειται για την εμφάνιση παράκτιας πλημμύρας. Το αποτύπωμα όλων των πλημμυρικών γεγονότων στην περιοχή, φαίνεται στην παλιά πόλη του Ρεθύμνου και τις περιοχές που βρίσκονται στα ανατολικά. Ακολουθώντας την περιγραφή που δίνεται στον ιστότοπο του PEARL, ο λόγος που η πόλη του Ρεθύμνου είναι επιρρεπής σε τέτοιου είδους φαινόμενα, είναι ότι το Ρέθυμνο βρίσκεται στην υδρολογική λεκάνη τμήματος του όρους Βρύσινα, κάνοντας αναπóτρεπτη τη ροή υδάτων εντός του ιστού. Επιπλέον, στην παράκτια ζώνη γύρω από το λιμένα του Ρεθύμνου, επικρατούν οι Βόρειοι, Βορειοανατολικοί και Βορειοδυτικοί άνεμοι, οι οποίοι εμφανίζουν ένταση έως και 9 Beaufort, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη μεγάλων κυματισμών. Επιπλέον, η αλλαγή στη συχνότητα και την ένταση πνοής των ανέμων με αυτές τις διευθύνσεις σε σχέση με το παρελθόν, έχουν οδηγήσει στην αύξηση της συχνότητας γεγονότων καταιγίδας και άρα της συχνότητας των φαινομένων κυματικής υπερπήδησης και αναρρίχησης στην παράκτια περιοχή. Για το λόγο αυτό, το Ρέθυμνο επιλέχθηκε ως μία από τις περιοχές ενδιαφέροντος ανά τον κόσμο και εντάχθηκε στο πρόγραμμα PEARL.



Σχήμα 2.10 Οι εξεταζόμενες περιοχές μελέτης του PEARL (Πηγή: www.pearl-fp7.eu).

3 Μέθοδος της ανάλυσης των Ακραίων Τιμών

Στατιστικές τεχνικές σε διάφορα προβλήματα επιτρέπουν τη χρήση μέσων τιμών για την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων (στα οικονομικά ή στη βιολογία). Ωστόσο, στον υδρολογικό τομέα, οι ακραίες παρατηρήσεις είναι αυτές που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον (άνεμοι, κύματα, βροχοπτώσεις, παλίρροια) καθώς η χρήση των μέσων τιμών δεν επιτρέπει την σωστή αποτύπωση των ακραίων συμπεριφορών (Gilleland & Katz, 2011). Όπου λοιπόν, η κανονική κατανομή (Gauss distribution) θεωρείται μη αντιπροσωπευτική, χρησιμοποιούνται άλλες κατανομές όπως η Γενικευμένη κατανομή Ακραίων Τιμών (GEV), η γενικευμένη κατανομή Pareto (GPD), η κατανομή των υπερβάσεων κατάλληλων ορίων με το μοντέλο Peaks over Threshold (POT), για την ανάλυση ακραίων τιμών (μέγιστες ή ελάχιστες ετήσιες παρατηρήσεις). Μέσω μίας τέτοιας ανάλυσης, στη συνέχεια είναι δυνατόν να προβλέπεται το πώς θα συμπεριφερθεί μία κατανομή ακραίων τιμών με βάση την ιστορική της συμπεριφορά.

- Η κατανομή GEV έχει αρχίσει να χρησιμοποιείται από τη δεκαετία του 1950 με τους von Mises (1954) και Jenkinson (1955) και εφαρμόζεται σε τομείς όπως η κλιματολογία (Diebolt *et al.*, 2008), η ωκεανογραφία (Tawn, 1992· Robinson & Tawn, 1997) και η υδρολογία (Katz *et al.*, 2002). Επιπλέον οι Walshaw & Anderson (2000), χρησιμοποίησαν την κατανομή GEV προκειμένου να προσομοιώσουν το πεδίο ανέμου και οι Guedes Soares (2003), προκειμένου να προσομοιώσουν το χαρακτηριστικό ύψος κύματος.
- Η γενικευμένη κατανομή Pareto, προτάθηκε το 1975 από τον Pickands, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορα επιστημονικά πεδία από τότε. Πιο πρόσφατα, οι Morton *et al.* (1997), χρησιμοποίησαν τη γενικευμένη κατανομή Pareto, για την μοντελοποίηση του μεγέθους καταιγίδων, το 1999 οι Holmes and Moriarty για τη στατιστική ανάλυση ακραίων ταχυτήτων ανέμου και το 2005 οι Egozcue *et al.* για την ανάλυση των κινδύνων από τα εμφανιζόμενα ύψη κύματος στην ανατολική ακτή της Ισπανίας.
- Το μοντέλο POT, σύμφωνα με τον Wang (1991), ξεκίνησε να χρησιμοποιείται από τους Shane and Lynn το 1964, ενώ ο ίδιος το χρησιμοποίησε προκειμένου να αναλύσει μία χρονοσειρά ετήσιων συχνοτήτων πλημμύρας. Το 1996 οι Simiu and Heckert, εφάρμοσαν τη μέθοδο αυτή για την εκτίμηση της χαρακτηριστικής ταχύτητας του ανέμου σε περιοχή της Αμερικής και όμοια το 2005 οι An and Pandey μαζί και με άλλες μεθόδους προκειμένου να τις συγκρίνουν μεταξύ τους. Το 2006 οι

Méndez *et al.*, κατασκεύασαν ένα μοντέλο POT με ένα σύνολο δεδομένων χαρακτηριστικών υψών κύματος στον βορειοανατολικό Ατλαντικό Ωκεανό και το 2015 οι Zhang *et al.*, με δεδομένα κατακρημνίσεων για μία περιοχή στη νοτιοδυτική Κίνα.

Στην υδρολογία, οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται συνήθως χωρίς την παραδοχή της κλιματικής αλλαγής (δηλαδή η πιθανότητα εμφάνισης ακραίων γεγονότων πλημμύρας θεωρείται η ίδια από το ένα έτος στο άλλο). Σήμερα, η επιστημονική κοινότητα έχει συναινέσει στο ότι το κλίμα δεν είναι κάτι σταθερό, αλλά εμφανίζει έντονη μεταβλητότητα στα ακραία μετεωρολογικά γεγονότα (Kunkel *et al.* 1999, Meehl *et al.*, 2000). Η μεταβλητότητα αυτή εκφράζεται μέσω των περιόδων επαναφοράς ή όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια εμφανίζεται σαν εξωτερικός παράγοντας που συμπληρώνει τις στατιστικές αναλύσεις.

3.1 Θεωρία ακραίων τιμών - Εισαγωγή

Αντικείμενο της θεωρίας ακραίων τιμών (Extreme Value Theory) αποτελεί η ανάπτυξη μοντέλων με σκοπό της επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την εμφάνιση «πολύ μεγάλων» ή «πολύ μικρών» τιμών σε τυχαία πειράματα (Μπούτσικας, 2008). Εφαρμογές της θεωρίας των ακραίων τιμών βρίσκονται σε πολλές ερευνητικές περιοχές και αφορούν στη μοντελοποίηση και μακροπρόθεσμη εκτίμηση της εμφάνισης ακραίων συμβάντων, όπως για παράδειγμα για τα ακραία καιρικά φαινόμενα (μετεωρολογία). Η θεωρία αυτή μπορεί να χωριστεί στο πιθανοθεωρητικό μέρος (μελέτη της στοχαστικής συμπεριφοράς ακραίων παρατηρήσεων) και στο στατιστικό μέρος (μοντέλα εκτιμήσεων και προβλέψεων συμβάντων με βάση πραγματικά δεδομένα).

Σύμφωνα με τη θεωρία ακραίων τιμών, για δεδομένο αριθμό n ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών Y_1, Y_2, \dots, Y_n , η μεγαλύτερη από αυτές $X = \max\{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ ακολουθεί συνάρτηση πιθανότητας:

$$H_n(x) = P(X \leq x) = P[\max(Y_1, Y_2, \dots, Y_n) \leq x] = P(Y_1 \leq x, \dots, Y_n \leq x) = [F(x)]^n \quad (3.1)$$

όπου $F(x) = P(Y_i \leq x)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας για κάθε Y_i (Koutsoyiannis, 2004).

Οι Von Mises (1936) και Jenkinson (1955), ανέπτυξαν μία θεωρία κατανομών ακραίων τιμών η οποία καλείται GEV – Generalized Extreme Value distribution, δηλαδή Γενικευμένη Κατανομή Ακραίων Τιμών και περιγράφεται από τη Σχέση 3.2:

$$H(x) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\xi}} \right] \right\}, x: 1 + \xi \frac{(x-\mu)}{\sigma} > 0, \mu \in \mathbb{R}, \sigma > 0, \xi \in \mathbb{R} \quad (3.2)$$

όπου μ, σ, ξ ορίζονται ως παράμετροι θέσης, κλίμακας και σχήματος αντίστοιχα.

Η GEV ανάλογα με το συντελεστή σχήματος διακρίνεται σε τρεις περιπτώσεις:

(α) $\xi \rightarrow 0$: κατανομή Gumbel

$$H(x) = \exp \left[-\exp \left\{ -\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right) \right\} \right], x \in \mathbb{R} \quad (3.3)$$

(β) $\xi > 0, \xi = \frac{1}{\alpha}$: κατανομή Fréchet

$$H(x) = \exp \left[-\left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{-\alpha} \right], x \geq \mu \quad (3.4)$$

(γ) $\xi < 0, \xi = -\frac{1}{\alpha}$: κατανομή Weibull

$$H(x) = \exp \left[-\left(-\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^{-\alpha} \right], x < \mu \quad (3.5)$$

Βασικός στόχος της παραπάνω κατανομής είναι ο προσδιορισμός της συχνότητας εμφάνισης μιας ακραίας τιμής ενός γεγονότος, και πιο συγκεκριμένα της συχνότητας που μίας τιμή ενός μεγέθους μπορεί τουλάχιστον να εξισωθεί (ή και να υπερβληθεί). Η συχνότητα αυτή αναφέρεται συνήθως ως περίοδος επαναφοράς και εκφράζεται κατά κύριο λόγο σε χρόνια. Μέσω της διαδικασίας της ανάλυσης των ακραίων τιμών, αυτό που επιτυγχάνεται είναι η εκτίμηση του επιπέδου επαναφοράς T χρόνων, $u(T)$, δηλαδή του ορίου για το οποίο ο μέσος αριθμός των υπερβάσεων εντός ενός χρονικού διαστήματος μήκους T , είναι ίσος με τη μονάδα (Γαλιατσάτου, 2009). Εάν X_1, X_2, \dots, X_T είναι τυχαίες μεταβλητές, με συνάρτηση κατανομής F , τότε το $u(T)$ είναι η λύση της:

$$u(T) = F^{-1} \left(1 - \frac{1}{T} \right) \quad (3.6)$$

δηλαδή η πιθανότητα να υπερβληθεί το επίπεδο των T χρόνων, $u(T)$, είναι ίση προς $\frac{1}{T}$. Και συνοψίζοντας, ως επίπεδο επαναφοράς T χρόνων ορίζεται το $u(T)$, και ως περίοδος επαναφοράς, η περίοδος T . Η εκτίμηση των κυμάτων, των κατακρημνίσεων, των απορροών και άλλων σχετικών μεταβλητών, σύμφωνα ξανά με τη Γαλιατσάτου (2009), είναι της τάξης των 50 με 1000 χρόνων. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τους Ferreira and Guedes Soares (2000), κατά την εκτίμηση του σημαντικού ύψους κύματος το οποίο σχετίζεται με περιόδους επαναφοράς της τάξης των 100 χρόνων, κρίνεται επαρκής για τη σχεδίαση μιας ασφαλούς παράκτιας κατασκευής.

3.2 Στατιστική ανάλυση ακραίων παρατηρήσεων – Block Maxima

Για τη μελέτη της κατανομής της μέγιστης παρατήρησης, σύμφωνα με τη Νεραντζάκη (2012) χρησιμοποιείται η ανάλυση Block Maxima, η οποία αποτελεί ουσιαστικά εφαρμογή της Θεωρίας Ακραίων Τιμών και προτάθηκε από τον Gumbel το 1958. Σύμφωνα με τη μέθοδο Block Maxima και τον Μπούτσικα (2008), αρχικά χωρίζονται οι διαθέσιμες παρατηρήσεις X_1, X_2, \dots, X_{kn} σε k ομάδες (blocks) και λαμβάνονται οι μέγιστες τιμές σε κάθε ομάδα (block maxima) $Y_i = M_n^{(i)}, i = 1, 2, \dots, k$. Έπειτα, προσδιορίζεται η κατανομή

ακροτάτων από την οποία προέρχονται τα block maxima, συνήθως επιλέγεται η κατανομή GEV και γίνεται η εκτίμηση των παραμέτρων σχήματος, θέσης και κλίμακας (μ_n, σ_n, ξ) . Όταν πρόκειται για συγκεκριμένο σύνολο παρατηρήσεων και το n θεωρείται σταθερό, τότε παραλείπεται από τις παραμέτρους.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων μ, σ, ξ , από τη βιβλιογραφία, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι:

- (α) η μέθοδος των L-ροπών (L-moments) (Gubareva & Gartsman, 2010)
- (β) γραφήματα (Q-Q plots) (Shukla *et al.*, 2010)
- (γ) η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (MLE) (Dombry, 2013)
- (δ) συναρτήσεις διατεταγμένων παρατηρήσεων (order statistics) (Wong & Li, 2007)

Από τις παραπάνω μεθόδους οι πιο διαδεδομένες, είναι η μέθοδος των L – ροπών και η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας.

3.2.1 Μέθοδος των L – ροπών

Η μέθοδος η οποία εξετάστηκε και στην παρούσα εργασία, είναι η μέθοδος των L-ροπών και σύμφωνα με τους Gubareva & Gartsman (2010), προτάθηκαν από τον J.R.M. Hosking το 1990 και σήμερα έχουν ευρεία χρήση στην εκτίμηση διαφόρων υδρομετεωρολογικών μεταβλητών.

Οι L-ροπές εκφράζονται ως συνάρτηση των πιθανολογικά σταθμισμένων ροπών (probability weighted moments), οι οποίες ορίζονται για μια τυχαία μεταβλητή X , αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας $F(x)$ και για τάξη r :

$$\beta_r = \int_0^1 x(F)F(x)^r dF, r = 1, 2, \dots \quad (3.7)$$

Και πρακτικά για την εκτίμηση της r τάξης των πιθανοτικά σταθμισμένων ροπών:

$$\beta_r = n^{-1} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_{j:n} \quad (3.8)$$

Φαίνεται ότι οι L-ροπές λ_r για μια τυχαία μεταβλητή X μπορούν να εκφραστούν σε όρους πιθανολογικά σταθμισμένων ροπών:

$$\lambda_1 = \beta_0 \quad (3.9)$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0 \quad (3.10)$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0 \quad (3.11)$$

Και στη γενική μορφή:

$$\lambda_{r+1} = (-1)^r \sum_{k=0}^r \frac{(-1)^{r-k}(r+k)!}{(k!)^2(r-k)!} \beta_k \quad (3.12)$$

Κάθε ένα από τα $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ σχετίζεται και με μία παράμετρο. Σύμφωνα με τον Hosking (1990) η λ_1 σχετίζεται με την παράμετρο θέσης (ροπή πρώτης τάξης), η λ_2 με την παράμετρο κλίμακας (χρησιμεύει ως κλίμακα της κατανομής), η λ_3 με την ασυμμετρία και η

λ_4 με την κύρτωση. Οι ροπές ανώτερης τάξης ($\lambda_3, \lambda_4, \dots, \lambda_n$) ανάγονται στην κλίμακα αυτή, μέσω των λόγων των L ροπών:

$$\tau_2 = \lambda_2 / \lambda_1 \quad (3.13)$$

$$\tau_r = \lambda_r / \lambda_2, r = 3, 4, \dots \quad (3.14)$$

Μέσω των L – ροπών τρίτης τάξης, προσδιορίζονται οι παράμετροι σχήματος, θέσης και κλίμακας (μ_n, σ_n, ξ) της κατανομής GEV (Gubareva & Gartsman, 2010):

$$\mu \approx 7.8590c + 2.9554c^2 \quad (3.15)$$

$$\text{όπου } c = \frac{2}{3+\tau_3} - \frac{\log 2}{\log 3}$$

$$\xi = \frac{\lambda_2 \mu}{(1-2^{-\mu})\Gamma(1+\mu)} \quad (3.16)$$

$$\sigma = \lambda_1 - \frac{\xi\{1-\Gamma(1+\mu)\}}{\mu} \quad (3.17)$$

όπου $\Gamma = \eta$ συνάρτηση Γάμμα

3.2.2 Μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας (MLE)

Η μέθοδος της μέγιστης πιθανοφάνειας, δίνει την εκτίμηση που έχει τη μέγιστη πιθανοφάνεια, δηλαδή την τιμή μίας παραμέτρου η οποία είναι πιο πιθανή με βάση το εξεταζόμενο δείγμα. Σύμφωνα με τον Coles (2001), η συνάρτηση της πιθανοφάνεια εκφράζει τη σχετική πιθανοφάνεια των εξεταζόμενων παρατηρήσεων ως συνάρτηση των παραμέτρων θ :

$$L(\theta, x) = \prod f(x_i, \theta) \quad (3.18)$$

Μέσω της μεθόδου αυτής, επιλέγεται η τιμή των παραμέτρων θ , ώστε να μεγιστοποιείται η παραπάνω συνάρτηση $L(\theta, x)$. Επιπλέον, σύμφωνα με την έρευνα του Van Gelder (1999), έχει αποδειχθεί ότι παρέχει αμερόληπτες εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου που χρησιμοποιείται με το μικρότερο δυνατό μέσο τετραγωνικό σφάλμα.

Για αριθμητικούς λόγους, χρησιμοποιείται καλύτερα η συνάρτηση λογαριθμικής πιθανοφάνειας (log – likelihood function):

$$l(\theta) = \log L(\theta) = \sum_{i=1}^n \log f(x_i, \theta) \quad (3.19)$$

Για την περίπτωση της GEV, η συνάρτηση λογαριθμικής πιθανοφάνειας δίνεται από τη σχέση (Coles, 2001):

$$l(\mu, \sigma, \xi) = -n \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\xi}\right) \sum_{i=1}^n \log \left\{1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma}\right)\right\} - \sum_{i=1}^n \left\{1 + \xi \left(\frac{z_i - \mu}{\sigma}\right)\right\}^{-1/\xi} \quad (3.20)$$

3.3 Στατιστική ανάλυση σε μετεωρολογικά δεδομένα – το λογισμικό πακέτο

«extRemes»

Οι προβλέψεις που αφορούν στις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών γενικά, σε συνδυασμό με τις προβλέψεις της IPCC, που αφορούν στην άνοδο της στάθμης της θάλασσας ενδεχομένως έως και 2 m έως το 2100, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη κατά το σχεδιασμό των παράκτιων έργων (ιδιαίτερα στις περιοχές που εμφανίζουν μεγάλη επικινδυνότητα κατακλυσμού), να λαμβάνονται υπόψη ενδεχόμενες αλλαγές στην πιθανότητα εμφάνισης ακραίων υδρολογικών γεγονότων (όπως για παράδειγμα η άνοδος της στάθμης της θάλασσας). Σύμφωνα με τους Gilleland & Katz (2011), μέσω του πακέτου λογισμικού «extRemes» εμφανίζεται η δυνατότητα να συνυπολογιστούν αυτές οι αλλαγές. Το λογισμικό αυτό, σχεδιάστηκε ώστε να χρησιμοποιηθεί στη στατιστική ανάλυση γεωφυσικών, μετεωρολογικών, ωκεανογραφικών φαινομένων, συμπεριλαμβάνοντας και τις ενδεχόμενες μακροπρόθεσμες αλλαγές τους. Επιτρέπει στο χρήστη να εισάγει δεδομένα στις ιστορικές χρονοσειρές (για παράδειγμα της ετήσιας μέγιστης ή ελάχιστης ροής ενός ποταμού), ώστε να εκτιμηθεί το επίπεδο επαναφοράς κάτω από στατικές συνθήκες, αλλά και να καθοριστεί πώς και πόσο αυτό το επίπεδο έχει μεταβληθεί κατά την ιστορική καταγραφή. Το λογισμικό βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού R, η οποία χρησιμοποιείται ιδιαίτερα κατά την ανάλυση δεδομένων και την εφαρμογή στατιστικών μοντέλων. Η γλώσσα R είναι διαθέσιμη από το διαδίκτυο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε με κατευθείαν εντολές ή μέσω προγραμμάτων.

Το λογισμικό «extRemes» παρέχει τη δυνατότητα προσαρμογής μίας χρονοσειράς μέγιστων τιμών σε κάποια κατανομή (για παράδειγμα GEV), και επιπλέον επιτρέπει την εκτίμηση επιπέδων επαναφοράς, σε συνάρτηση όμως με την αβεβαιότητά τους. Επιπλέον, επιτρέπει μία πιο ισχυρή προσέγγιση κατά την οποία, η εμφάνιση ενός ακραίου γεγονότος και η έντασή του διαμορφώνονται ταυτόχρονα. Το πακέτο «extRemes» μπορεί να εφαρμοστεί για την στατιστική μελέτη ενός ευρέως φάσματος φυσικών φαινομένων, όπως στις πλημμύρες (υδρολογία), στον άνεμο και τη θερμοκρασία (μετεωρολογία) αλλά και στα ύψη κύματος και στη στάθμη της θάλασσας (ωκεανογραφία). Το λογισμικό πακέτο «extRemes», έχει χρησιμοποιηθεί πρόσφατα στην εργασία των Towler *et al.* (2010), κατά τη μοντελοποίηση ακραίων χαρακτηριστικών που υποβαθμίζουν την ποιότητα του πόσιμου νερού σε περιοχές του βορειοδυτικού Ειρηνικού καθώς και στη μελέτη των Northrop and Jonathan (2011), κατά την ανάλυση ακραίων υψών κύματος 72 πόλεων στον Κόλπο του Μεξικού.

4 Πρόγνωση κυματισμών

4.1 Γένεση κυματισμών

Βασικό αίτιο κατά τη δημιουργία κυματισμών στη θαλάσσια επιφάνεια, αποτελεί η τυρβώδης ροή του ανέμου, ο οποίος προκαλεί συντονισμό μεταξύ των διαταραχών της θαλάσσιας επιφάνειας και των παλμών της πίεσεως στο πεδίο του ανέμου και τελικά προκαλεί την εμφάνιση ανωμαλιών. Οι δύο μηχανισμοί αυτοί προκαλούν ουσιαστικά τη μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο στην επιφάνεια της θάλασσας. Κατά την εξέλιξη των κυματισμών, οι επιφανειακές ανωμαλίες του νερού διαρκώς μεγαλώνουν με τη ροή του ανέμου και τα υδάτινα σωματίδια αποκτούν ενέργεια κατά την κίνησή τους ίδιας φοράς με του ανέμου, οπότε και προκαλείται κυματισμός (Μουτζούρης, 2009).

4.2 Μέθοδος πρόγνωσης κυματισμών στα βαθιά

Όπως είναι γνωστό, στα πραγματικά ρευστά, η παρουσία ενός στερεού ορίου επηρεάζει τη ροή κοντά σε αυτό, επιβάλλοντας το μηδενισμό της ταχύτητας ροής στο όριο και επιβραδύνοντας το ρευστό εξαιτίας των τριβών. Η επίδραση αυτή περιορίζεται στο χώρο που καλείται οριακό στρώμα (Στάμου, 2009). Έτσι και στην περίπτωση της κίνησης του ατμοσφαιρικού αέρα πάνω από την επιφάνεια της γης και άρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας δημιουργείται οριακό στρώμα με έντονη κλίση της ταχύτητας κοντά στη διεπιφάνεια. Μία καλή προσέγγιση της μεταβολής αυτής για τα πρώτα 20 m (ιδιαίτερα στη ζώνη 8 – 12 m) πάνω από την επιφάνεια δίνεται από τη σχέση:

$$U(10) = U(z) \left(\frac{10}{z} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (4.1)$$

όπου $U(10)$ η ταχύτητα σε ύψος 10 m, $U(z)$ η ταχύτητα σε ύψος z , z το ύψος σε m.

Ο νόμος αυτός βασίζεται στο νόμο κατανομής της ταχύτητας των Prandtl & Von Karman (Μέμος, 2008).

4.2.1 Μέθοδος CEM

Σύμφωνα με το Coastal Engineering Manual (C.E.M 2008, Part II, Chapter 2), η επίδραση του ανέμου συγκεκριμένης κατεύθυνσης προκαλεί κύμα σε ένα εύρος $\pm 45^\circ$. Οπότε και σύμφωνα με αυτό προτείνεται η μεθοδολογία πρόγνωσης κυματικού κλίματος στα ανοιχτά της περιοχής (εκτίμηση σημαντικού ύψους κύματος H_0 και της περιόδου αιχμής T_p), όπως

περιγράφεται στη συνέχεια (Μέμος, 2007). Αρχικά γίνεται μία πρώτη εκτίμηση των μεταβλητών F_{eff} , t_D , U_{10} , όπου:

(α) F_{eff} το ενεργό μήκος στο οποίο αναπτύσσεται ο κυματισμός: $F_{eff} = \frac{\sum_i F_i (\cos a_i)^2}{\sum_i \cos a_i}$

(β) t_D η διάρκεια πνοής του ανέμου

(γ) U_{10} η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας

Έπειτα με γνώμονα τη διάρκεια πνοής του ανέμου (t_D) καθορίζουμε την ανάπτυξη του κύματος σε τρεις περιπτώσεις:

(α) Fetch – limited συνθήκες, όταν ο άνεμος πνέει για χρονικό διάστημα t_D ικανό να επιτρέψει την εμφάνιση των μέγιστων δυνατών κυματισμών

(β) Time – limited συνθήκες, όταν ο άνεμος πνέει για μικρό διάστημα και δεν προλαβαίνει να αναπτυχθεί ο μέγιστος δυνατός κυματισμός

(γ) Συνθήκες πλήρους ανεπτυγμένης θάλασσας, όταν ο άνεμος δεν περιορίζεται ούτε από τη διάρκεια πνοής ούτε από το ανάπτυγμα

Πιο συγκεκριμένα, ο ελάχιστος χρόνος για να αναπτυχθούν συνθήκες fetch – limited, είναι:

$$t_{x,u} = 77.23 \frac{F_{eff}^{0.67}}{U_{10}^{0.34} g^{0.33}} \quad (4.2)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Οπότε εάν $t_D > t_{x,u}$ (fetch – limited συνθήκες), υπολογίζονται:

$$\frac{gH_o}{u_*} = 4.13 * 10^{-2} \left(\frac{gF_{eff}}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = 0.751 \left(\frac{gF_{eff}}{u_*^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.4)$$

όπου

$$u_* = C_D^{\frac{1}{2}} U_{10} \quad (4.5)$$

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035U_{10}) \quad (4.6)$$

H_o η μέση τιμή του 1/3 των μεγαλύτερων κυμάτων, C_D ο συντελεστής σύρσεως, u_* η ταχύτητα τριβής του ανέμου

Εάν $t_D < t_{x,u}$ (time – limited συνθήκες), τότε αντικαθιστώντας το fetch με το ισοδύναμο F' :

$$\frac{gF'}{u_*^2} = 5.23 * 10^{-3} \left(\frac{gt_D}{u_*} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (4.7)$$

Ενώ για συνθήκες πλήρους ανεπτυγμένης θάλασσας:

$$\frac{gH_o}{u_*} = 2.115 * 10^2 \quad (4.8)$$

$$\frac{gT_p}{u_*} = 2.398 * 10^2 \quad (4.9)$$

4.2.2 Μέθοδος SMB

Σύμφωνα με τους Sverdrup and Munk (1949), η μέθοδος Sverdrup- Munk- Bretschneider (SMB), είναι ένα από τα πιο απλοποιημένα και διαδεδομένα μοντέλα πρόβλεψης του θαλάσσιου κυματισμού στα ανοιχτά μιας περιοχής. Κατά αναλογία της μεθόδου CEM που αναφέρθηκε προηγουμένως, μέσω της μεθόδου SMB υπολογίζεται το χαρακτηριστικό ύψος κύματος H_s και η αντίστοιχη περίοδος του T_s , το οποίο προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ως το πραγματικό κύμα.

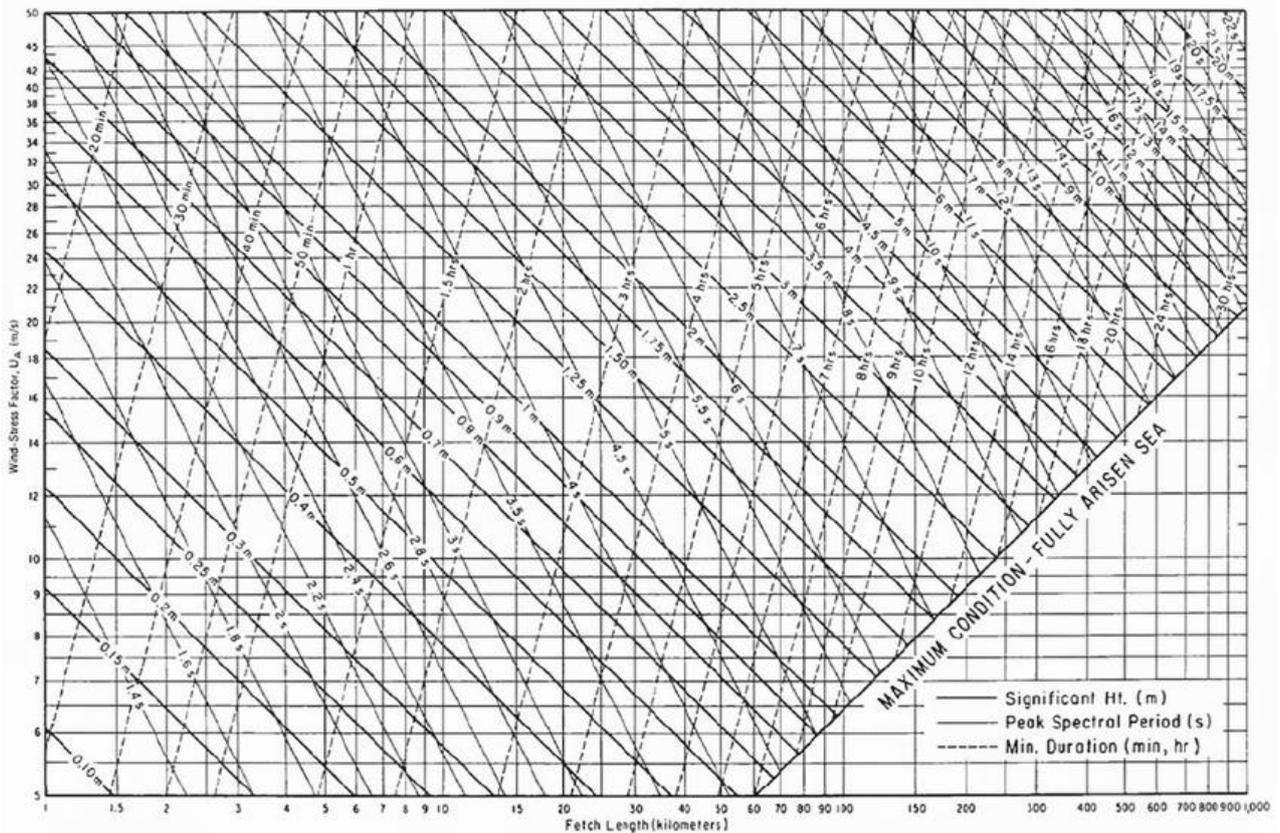
Οι χαρακτηριστικές τιμές του ύψους και της περιόδου του κυματισμού, υπολογίζονται ως συνάρτηση τριών παραμέτρων, όπως και στην προηγούμενη μέθοδο: της ταχύτητας του ανέμου U_{10} , του αναπτύγματος πελάγους F_{eff} και της διάρκειας πνοής του ανέμου t_D . Οι σχέσεις που αποτυπώνουν τη συσχέτιση αυτή, είναι οι εξής:

$$\frac{gH_s}{u_{10}^2} = 0.283 \tanh\left(0.0125 \frac{gF_{eff}}{u_{10}^2}^{0.42}\right) \quad (4.10)$$

$$\frac{gT_s}{u_{10}} = 7.540 \tanh\left(0.077 \frac{gF_{eff}}{u_{10}^2}^{0.25}\right) \quad (4.11)$$

$$\frac{gt_D}{u_{10}} = 6.588 \exp\left[\left\{0.0161 \left(\ln \frac{gF_{eff}}{u_{10}^2}\right)^2 - 0.369 \left(\ln \frac{gF_{eff}}{u_{10}^2}\right) + 2.2024\right\}^{0.5} + 0.8798 \left(\ln \frac{gF_{eff}}{u_{10}^2}\right)\right] \quad (4.12)$$

Οι παραπάνω σχέσεις αποτυπώνονται στο αντίστοιχο διάγραμμα SMB (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Χαρακτηριστικά κύματος στα βαθιά – μέθοδος SMB.

Από την εργασία των Etemad – Shahidi, Kazeminezhad and Mousaviz (2012), οι οποίοι σύγκριναν την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία διαφόρων απλοποιημένων μεθόδων που προβλέπουν τα χαρακτηριστικά ανεμογενών κυματισμών, προέκυψε ότι περισσότερο αντιπροσωπευτική στην πραγματικότητα είναι η μέθοδος SMB. Οι μέθοδοι που σύγκριναν στην εργασία τους εκτός από τις δύο που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή την CEM και την SMB, σύγκριναν και την μέθοδο Wilson. Τελικά και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η μέθοδος SMB και λόγω της μεγαλύτερης απλούστευσης των πράξεων μέχρι το επιθυμητό αποτέλεσμα.

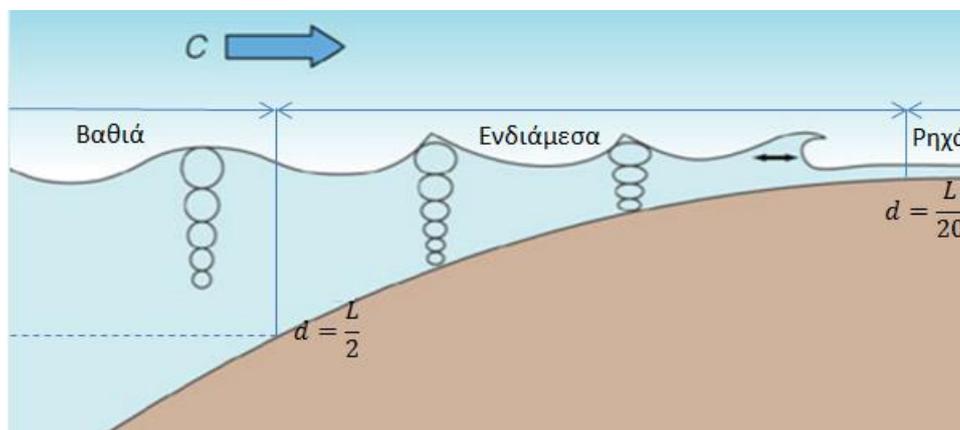
4.3 Επίδραση του πυθμένα στους κυματισμούς

Κατά τη διάδοσή του οι κυματισμοί ενδεχομένως να συναντήσουν κάποιο εμπόδιο, ρεύματα ή μεταβολή του πυθμένα, οπότε και μερικές από τις κυματικές παραμέτρους ενδεχομένως να αλλάξουν. Στην περίπτωση της διάδοσής τους προς τα ρηχά, δέχονται παραμορφώσεις κυρίως λόγω της επίδρασης του πυθμένα, με αποτέλεσμα την αύξηση του ύψους κύματος και της καμπυλότητας. Σύμφωνα με τον Μουτζούρη (2009), η επίδραση του πυθμένα, γίνεται αντιληπτή μετά την μετάβαση του κυματισμού στη ζώνη μεταξύ των

ενδιάμεσων νερών και ρηχών νερών (όταν το σχετικό βάθος $\frac{d}{L} \leq 0.50$), όπου και αρχίζουν να εμφανίζονται τα φαινόμενα της ρήχωσης, της θραύσης ή/και της διάθλασης.

4.3.1 Ρήχωση

Κατά τον Wiegel (2013), ως ρήχωση, ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία οι κυματισμοί που μεταδίδονται σε επικλινή πυθμένα και διεύθυνση κάθετη στις ισοβαθείς, οδηγούνται σε αλλαγή του ύψους και του μήκους τους. Πρακτικά, καθώς εισέρχονται στην περιοχή των ενδιάμεσων νερών, οι τροχιές των σωματιδίων από κυκλικές γίνονται ελλειπτικές (Σχήμα 4.2), η περίοδος του κυματισμού διατηρείται σταθερή και καθώς η ενέργειά του δεν αλλάζει, με τη μείωση του μήκους κύματός του, προκαλείται αύξηση του ύψους του.



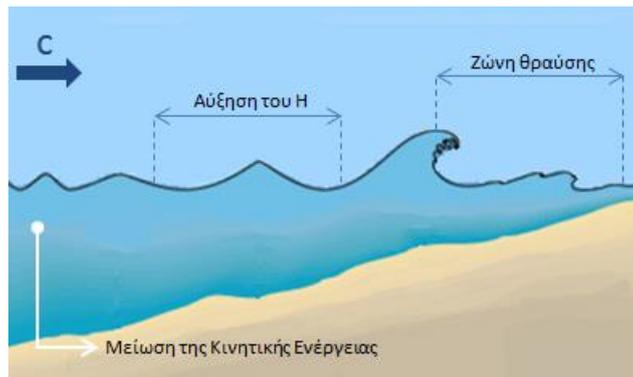
Σχήμα 4.2 Η πορεία κυματισμού προς την ακτή όταν υφίσταται ρήχωση (Πηγή: science.kennesaw.edu).

4.3.2 Διάθλαση

Κατά τον Norton (2000), ως διάθλαση ορίζεται το φαινόμενο το οποίο προκαλεί αλλαγή στη διεύθυνση μεταδόσεως των θαλάσσιων κυματισμών και είναι ανάλογο άλλων τύπων διάθλασης (φωτός). Πιο συγκεκριμένα, η γωνία μεταξύ των καθέτων στο μέτωπο του κυματισμού και στις ισοβαθείς του πυθμένα συνεχώς μειώνεται και το μέτωπο του κυματισμού τείνει να γίνει παράλληλο στις ισοβαθείς. Αυτό που συμβαίνει στην πραγματικότητα, είναι ότι η ανισότητα στις ταχύτητες της κίνησης κατά μήκος ενός μετώπου παρατηρείται ανισότητα στις ταχύτητες κίνησης των σωματιδίων - από δύο σημεία του κινείται ταχύτερα προς την ακτή αυτό που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος πυθμένα - με αποτέλεσμα την καμπύλωση του μετώπου. Θεωρείται ότι οι κυματισμοί διαδίνονται ευθύγραμμα στα βαθιά ($\frac{d}{L} \geq 0.50$) και αρχίζουν να υφίστανται διάθλαση από τα ενδιάμεσα βάθη. Κατά τη μελέτη παράκτιων έργων, πάντα στους υπολογισμούς υπεισέρχεται το φαινόμενο της διάθλασης καθ' ότι μαζί με τη ρήχωση, συμβάλλουν ιδιαίτερα στο τελικό ύψος του κυματισμού σε καθορισμένο βάθος πυθμένα (για δεδομένο προσπίπτοντα κυματισμό στα βαθιά).

4.3.3 Θραύση

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, όταν ο κυματισμός κινείται προς την ακτή, η κινητική του ενέργεια μειώνεται, αφού μειώνεται η ταχύτητά του (λόγω της μείωσης του βάθους του πυθμένα). Προκειμένου να ισχύει η αρχή διατήρησης της ενέργειας, η μείωση της κινητικής ενέργειας του κυματισμού επιφέρει αύξηση στη δυναμική ενέργειά του, αυξάνοντας το ύψος του H (Galvin, 1972). Η αύξηση αυτή συμβαίνει μέχρι κάποιο όριο, οπότε και το κύμα θραύεται στην περιοχή που ορίζεται ως ζώνη θραύσης (Σχήμα 4.3).



Σχήμα 4.3 Θραύση κυματισμού (Πηγή: <http://adventure.howstuffworks.com>).

Για τον προσδιορισμό του βάθους του πυθμένα στη γραμμή θραύσης, είναι ευρεία διαδεδομένη η χρήση της σχέσης (Μουτζούρης, 2009):

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.8 \quad (4.13)$$

όπου H_b το ύψος κύματος στη θραύση και h_b το βάθος πυθμένα στη θραύση. Η σχέση αυτή έχει προκύψει από πειραματικές μετρήσεις και τη θεωρία του μοναχικού κύματος και έχει επικρατήσει για μία πρώτη εκτίμηση του κύματος σε θραύση.

4.4 Κυματισμοί στην περιοχή μελέτης

4.4.1 Το μοντέλο MIKE 21 – PMS

Το μοντέλο PMS (Parabolic Mild Slope), είναι ένα γραμμικό μοντέλο του προγράμματος MIKE 21 του Danish Hydraulic Institute, το οποίο λαμβάνει υπόψη διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την πορεία του κυματισμού προς τα ρηχά για τον υπολογισμό των κυματικών χαρακτηριστικών. Για παράδειγμα, τη διάθλαση και τη ρήχωση, λόγω της διακύμανσης του πυθμένα, την απώλεια της ενέργειας λόγω της θραύσης των κυματισμών και της τριβής των κυματικών σωματιδίων στον πυθμένα και της περίθλασης. Το PMS βασίζεται σε μια παραβολική προσέγγιση της ελλειπτικής εξίσωσης της ήπιας κλίσης, η οποία επιλύεται μέσω του σχήματος πεπερασμένων διαφορών Crank- Nicholson και αυτά που προκύπτουν από την εφαρμογή του εκτός από τη μέση τετραγωνική ρίζα του ύψους

κύματος H_{rms} , είναι η περίοδος αιχμής του φάσματος T_p , η μέση κατεύθυνση των κυματισμών MWD και οι τάσεις ακτινοβολίας.

Το PMS χρησιμοποιείται κυρίως σε περιοχές που υπάρχουν τεχνικά έργα, όπως κυματοθραύστες ή πρόβολοι, αλλά και στη μελέτη του κυματικού πεδίου μιας ανοιχτής παράκτιας περιοχής. Τα φαινόμενα που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του μοντέλου, είναι η ρήγωση κατά τη μεταβολή του βάθους, η διάθλαση, η περίθλαση, η ανάκλαση, η τριβή στον πυθμένα, η θραύση, η διασπορά συχνοτήτων κ.ά. Ωστόσο, τα φαινόμενα της περίθλασης και της ανάκλασης, δεν αποτυπώνονται με ακρίβεια (η περίθλαση κατά την οριζόντια διεύθυνση θεωρείται αμελητέα) και γι' αυτό δεν προτείνεται σε περιπτώσεις όπου η περίθλαση αποτελεί το πιο σημαντικό από τα υπόλοιπα φαινόμενα (όπως για παράδειγμα εντός της λιμενολεκάνης).

4.4.2 Θεωρητικό υπόβαθρο του PMS

Η ελλειπτική εξίσωση της ήπιας κλίσης, η οποία περιγράφει τα φαινόμενα μετασχηματισμού του κυματισμού (ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση), έχει τη μορφή (Panchang *et al.*, 1991):

$$\nabla^2 \varphi + K^2(x, y)\varphi = 0 \quad (4.14)$$

όπου:

$$\varphi = \Phi(C C_g)^{0.5} \quad (4.15)$$

$$K^2 = k^2 - \frac{\nabla^2(C C_g)^{0.5}}{(C C_g)^{0.5}} \quad (4.16)$$

Στις σχέσεις (4.10), (4.11), (4.12): $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ ο διδιάστατος τελεστής κλίσης, $\Phi(x, y)$ το δυναμικό, $C(x, y)$ η ταχύτητα φάσης κύματος, C_g η ταχύτητα ομάδας κύματος, $k = \frac{2\pi}{L}$ ο κυματαριθμός, L το μήκος κύματος.

4.4.3 Εφαρμογή του PMS

Κατά την εφαρμογή του PMS, συμπληρώνονται τα στοιχεία της βαθυμετρίας της περιοχής, των οριακών συνθηκών και των παραμέτρων του μοντέλου. Αρχικά, εισάγεται η βαθυμετρία της περιοχής μελέτης, ο προσανατολισμός της και τα όρια της ξηράς. Επιπλέον, ορίζεται η περίοδος προσαρμογής, που στη συγκεκριμένη μελέτη λόγω θεώρησης ενός κυματικού γεγονότος κάθε φορά, η περίοδος προσαρμογής επιλέγεται στατική. Αναφορικά έπειτα με τις οριακές συνθήκες, συμπληρώνονται τα κυματικά χαρακτηριστικά στα βαθιά (ύψος κύματος H_{rms} , περίοδος αιχμής T_p κυματισμού και διεύθυνση πρόσπτωσης MWD) και το είδος των κυματισμών (μονοχρωματικοί κυματισμοί). Κατά σύμβαση, ο κυματισμός εισέρχεται από το δυτικό όριο πάντα, το οποίο είναι το ανοιχτό ενώ για τα πλευρικά όρια δίνονται οι επιλογές να θεωρούνται συμμετρικά, απορροφητικά ή ανακλαστικά (εδώ συμμετρικά, αφού οι ισοβαθείς κοντά στα όρια θεωρούνται ίσες και παράλληλες). Τέλος, παρέχεται και η επιλογή για το συνυπολογισμό της παλίρροιας στην ανύψωση της

ελεύθερης επιφάνειας, που όμως λόγω της ανεμογενούς κυκλοφορίας των υδάτων (εδώ) αγνοείται.

Τελικά, εισάγονται οι παράμετροι του μοντέλου, δηλαδή ο τύπος της παραβολικής προσέγγισης (στη συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε το απλό μοντέλο για μικρές γωνίες), η τριβή του πυθμένα και οι παράμετροι για τη θραύση. Για το απλό μοντέλο της παραβολικής προσέγγισης της ελλειπτικής εξίσωσης ήπιας κλίσης, θεωρείται μία κύρια διεύθυνση κύματος και αγνοείται η διασπορά λόγω ανάκλασης. Εκφράζεται μέσω της εξίσωσης (Johnson and Poulin, 2000):

$$A_x - i(k_0 - \beta_1 k)A + \frac{A}{2C_g}(C_g)_x + \frac{\sigma_1}{\omega C_g}(C C_g A_y)_y + \frac{\sigma_2}{\omega C_g}(C C_g A_y)_{yx} + A \frac{W}{2C_g} = 0 \quad (4.17)$$

όπου

$$\sigma_1 = i \left(\beta_2 - \beta_3 \frac{k_0}{k} \right) + \beta_3 \left(\frac{k_x}{k^2} + \frac{(C_g)_x}{2k C_g} \right) \quad (4.18)$$

$$\sigma_2 = -\frac{\beta_3}{k} \quad (4.19)$$

$\beta_1 = 1, \beta_2 = -0.5, \beta_3 = 0$ οι συντελεστές για το απλό μοντέλο παραβολικών εξισώσεων μικρών γωνιών, W όρος απωλειών, $\omega = 2\pi f$ η γωνιακή συχνότητα

Επιπλέον κατά την επίλυση της εξίσωσης της ήπιας κλίσης, συνυπολογίζεται και η απώλεια ενέργειας, λόγω τριβών του πυθμένα αλλά και λόγω της θραύσης των κυματισμών. Η τριβή του πυθμένα αποδίδεται από το συντελεστή Nikuradse k_N , ο οποίος υπολογίζεται από τον τύπο που πρότεινε ο Nielsen (1979):

$$k_N = 2.5 d_{50} \quad (4.20)$$

όπου d_{50} η μέση διάμετρος των κόκκων του πυθμένα.

Αναφορικά με τη θραύση, η όλη διαδικασία απώλειας ενέργειας, μπορεί να εκφραστεί είτε με ένα (περιοδικό) κινηματικό κύμα (bore) ή με ένα αντίφορο υδραυλικό άλμα (Μέμος, 2007). Η απώλεια ενέργειας περιγράφεται ποιοτικά σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{\alpha}{4} Q_b f_m H_{max}^2 \quad (4.21)$$

όπου

$$H_{max} = \gamma_1 k^{-1} \tanh \left(\frac{\gamma_2 k d}{\gamma_1} \right) \quad (4.22)$$

f_m η μέση κυματική συχνότητα, E η συνολική κυματική ενέργεια, d το βάθος της θάλασσας, k ο κυματαριθμός, Q_b το ποσοστό των κυμάτων που θραύονται:

$$\frac{1-Q_b}{\ln Q_b} = -\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}} \right)^2 \quad (4.23)$$

$H_{rms} = \sqrt{8E}$, H_{max} η μέγιστη τιμή του ύψους κύματος πριν από τη θραύση.

Οι παράμετροι για τη θραύση (4.21) είναι αυτοί που προτείνονται από τους Battjes & Jansen (1978) και από τους Holthuijsen *et al.* (1989): $\alpha = 1.0, \gamma_1 = 1.0, \gamma_2 = 0.8$. Η

παράμετρος γ_1 αντιπροσωπεύει τον παράγοντα που ρυθμίζει τη μέγιστη τιμή κλίσης του κύματος ακριβώς πριν επέλθει η θραύση του, ενώ η παράμετρος γ_2 είναι η παράμετρος που ρυθμίζει τη μέγιστη τιμή του λόγου H/d ακριβώς πριν επέλθει η θραύση. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι, με την αύξηση των δύο αυτών παραμέτρων (γ_1, γ_2) αναμένεται μείωση του φαινομένου της θραύσης, άρα αύξηση του μέγιστου κυματισμού που εμφανίζεται ακριβώς πριν τη θραύση. Η παράμετρος a τέλος, ελέγχει το ρυθμό καταστροφής ενέργειας.

Το μοντέλο MIKE 21 PMS, δίνει τη δυνατότητα επιλογής και άλλων μεθόδων εκτίμησης των απωλειών ενέργειας λόγω θραύσης των κυματισμών [Battjes & Stive (1985), Nelson (1987), Johnson (2006)]. Στην παρούσα εργασία και έπειτα από δοκιμές και μέσω των υπολοίπων μεθόδων, φαίνεται ότι η μέθοδος Battjes & Janssen (1978), και οι συντελεστές που επιλέχθηκαν δίνουν ύψη κύματος ελαφρώς μεγαλύτερα, οπότε και εξετάζεται συνολικά η δυσμενέστερη περίπτωση. Για αυτό το λόγο και παραπάνω αναφέρονται μόνο οι συντελεστές της συγκεκριμένης μεθόδου.

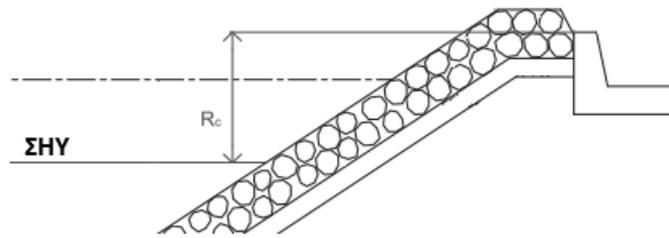
5 Κυματική υπερπήδηση

5.1 Ορισμός της κυματικής υπερπήδησης

Μία από τις κυριότερες ανησυχίες, κατά την κατασκευή λιμενικών έργων, έργων που παρέχουν προστασία έναντι διαβρώσεως των ακτών ή παράκτιων κατασκευών που εξυπηρετούν στην προστασία έναντι πλημμύρας περιοχών, αποτελεί το φαινόμενο της κυματικής υπερπήδησης. Όταν ένας κυματισμός αναρριχήσει τόσο ώστε να φτάσει και να περάσει όγκος νερού πάνω από τη στέψη του τεχνικού έργου (κυματοθραύστη), τότε δημιουργείται το φαινόμενο της κυματικής υπερπήδησης (EurOtop, 2007). Στην περίπτωση όπου ένα συνεχές στρώμα νερού, περνά πάνω από την κορυφή, επιτρέπει σε αρκετά μεγάλο όγκο νερού να υπερπηδήσει πάνω από το έργο. Ωστόσο κυματική υπερπήδηση μπορεί να συμβεί και κατά τη θραύση κυματισμών στο προσήνεμο μέτωπο του έργου (οπότε και μεταφέρεται μικρότερος όγκος νερού), αλλά και όταν ο άνεμος παρασύρει τις κορυφές των κυμάτων (δημιουργία ενός σύννεφου σταγονιδίων). Ο δείκτης της υπερπήδησης, δηλαδή το πόσος όγκος νερού έχει υπερπηδήσει ένα μέτωπο, υπάρχει η δυνατότητα να περιγραφεί μέσω εμπειρικών τύπων, αλλά και με τη χρήση νευρωνικών δικτύων, για τις δύο πρώτες περιπτώσεις (δεν καλύπτεται δηλαδή η περίπτωση της επίδρασης του ανέμου πάνω στον κυματισμό). Η κυματική υπερπήδηση, εκφράζεται μέσω του λόγου της μέσης παροχής ανά μέτρο πλάτους (l/s/m) και σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, είναι συνάρτηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κυματοθραύστη και των κυματικών χαρακτηριστικών. Η μαθηματική έκφραση της κυματικής υπερπήδησης, την οποία ακολουθούν οι διάφοροι εμπειρικοί τύποι που έχουν προταθεί, είναι η ακόλουθη:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \exp\left(-bR_c/H_{m0}\right) \quad (5.1)$$

όπου q η παροχή υπερπήδησης, g η επιτάχυνση της βαρύτητας, H_{m0} το σημαντικό ύψος κύματος στον πόδα της κατασκευής, R_c το ύψος της στέψης του κυματοθραύστη, όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1 Τυπική διατομή παράκτιου έργου προστασίας με κεκλιμένο πρανές.

Στην πραγματικότητα, η παροχή πάνω από την κατασκευή δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της υπερπήδησης, αλλά είναι μία διαδικασία τυχαία στο χώρο και στο χρόνο, ενώ γενικά ισχύει ότι μεγάλοι κυματισμοί παρέχουν αρκετό όγκο νερού σε μικρό χρονικό διάστημα (μικρότερο από μία περίοδο του κυματισμού), ενώ μικρά κύματα δεν παρουσιάζουν καθόλου υπερπήδηση. Σύμφωνα με το EurOtop (2007), και τα στοιχεία που συγκεντρώνονται από τους Allsop *et al.* (2008) που αφορούν την κυματική υπερπήδηση, προκύπτει ότι η κυματική υπερπήδηση μειώνεται με τη μείωση του ύψους κύματος και την πλάγια πρόσπτωση των εισερχόμενων κυματισμών και αναφορικά με τη γεωμετρία του κυματοθραύστη, μειώνεται με την αύξηση της τραχύτητας και της κλίσης του μετώπου. Η πιο σημαντική όμως παράμετρος που επηρεάζει τον όγκο του νερού που θα υπερπηδήσει, είναι το ύψος της στέψης της κατασκευής.

5.2 Επιτρεπόμενα όρια υπερπήδησης

Τα περισσότερα από τα θαλάσσια έργα, κατασκευάζονται ώστε να επιτευχθεί κυρίως ο περιορισμός της κυματικής υπερπήδησης και άρα ενδεχόμενης πλημμύρας. Κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος καταιγίδας (ή παλίρροιας), ο όγκος του νερού που επιτρέπεται να υπερπηδήσει από την κατασκευή και άρα είναι ανεκτός, εξαρτάται από τη χρησιμότητα της. Από το στάδιο ήδη της κατασκευής των θαλάσσιων προστατευτικών τοίχων, ένα από τα βασικότερα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται, είναι ο επιτρεπτός βαθμός κυματικής υπερπήδησης και έπειτα και η αποφυγή αισθητικής όχλησης (περιβαλλοντική επίπτωση). Τα όρια του βαθμού της κυματικής υπερπήδησης, ιδιαίτερα για τις θαλάσσιες κατασκευές, βασίζονται στο ότι αυτές κατασκευάζονται για την προστασία ανθρώπων ή δρόμων ή για την εξασφάλιση της ασφαλούς ναυσιπλοΐας, οπότε και καθορίζονται με βάση τους δυνητικούς κινδύνους που θα προκαλούνταν. Οι κίνδυνοι αυτοί αναλύονται σύμφωνα με τους Allsop *et al.* (2008) με βάση τις εξής κατηγορίες:

- (α) τη χρήση της ίδιας της κατασκευής
- (β) τη χρήση της περιοχής που προστατεύει η κατασκευή
- (γ) τις τοπικές διοικητικές προδιαγραφές
- (δ) την οικονομική και κοινωνική εκτίμηση κατά τη χρηματοδότηση της κατασκευής

Τα όρια σχετικά με την καταστροφή που μπορεί να προκαλέσει ο όγκος που υπερπηδά μία κατασκευή στην κατασκευή, ή στα οχήματα και τους πεζούς που μπορεί να εμπλέκονται, σχετίζεται συνήθως με τη μέση τιμή του και όχι με τη μέγιστη. Κατά τους Allsop *et al.* (2008) σύμφωνα με πειράματα τα οποία έχουν διεξαχθεί στην Ιαπωνία, προκύπτουν τα προτεινόμενα όρια ώστε η υπερπήδηση πάνω από ένα λιμενικό έργο να θεωρείται ασφαλής.

Ο εμπειρικός κανόνας που προβλέπει την επίδραση της υπερπήδησης σε απόσταση x μέτρων πίσω από την κορυφή του κυματοθραύστη, $q_{effective}$, μέχρι ενός εύρους 5 – 25 m, δίνεται από τη σχέση:

$$q_{effective} = q_{seawall} / x \quad (5.2)$$

Τα όρια τα οποία προτείνονται στην ίδια εργασία χωρίζονται ανά κατηγορία και δίνονται στον επόμενο Πίνακα 5.1.

Πιο συγκεκριμένα, στον Πίνακα 5.1, τα επιτρεπόμενα όρια της μέσης παροχής υπερπήδησης που αναφέρονται στους πεζούς, δείχνουν μία λογική συσχέτιση μεταξύ της παροχής υπερπήδησης και της δυνατότητας του παραλήπτη να ανταπεξέλθει στον κίνδυνο. Ένα προληπτικό όριο της τάξης του $q=0.03$ l/s/m ενδείκνυται για τις περιπτώσεις όπου οι πεζοί δεν έχουν σαφή εικόνα του εισερχόμενου κυματισμού, δεν είναι κατάλληλα ενδεδυμένοι, περπατούν σε στενό πεζόδρομο ή φοβούνται εύκολα. Από την εργασία των Allsop *et al.* (2008), προκύπτει ότι το όριο αυτό είναι κατάλληλο για συγκεκριμένες περιπτώσεις και δε θα έπρεπε να χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Για τα οχήματα, αντίστοιχα, τα όρια που προτείνονται απέχουν αρκετά μεταξύ τους, αλλά σύμφωνα με το EurOtop (2007), το κατώτατο όριο της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης προέρχεται από σχετικά απαισιόδοξες αλλά και λίγες μελέτες. Ακόμα λιγότερες μελέτες είναι διαθέσιμες αναφορικά με τις επιδράσεις της υπερπήδησης επάνω στις κατασκευές και τα κτίρια, ωστόσο αυτό που είναι βέβαιο είναι ότι οι πιέσεις που ασκούνται διαφέρουν ανάλογα τον τύπο της υπερπήδησης αλλά και του τύπου της κατασκευής, όπως φαίνεται και στον πίνακα. Τέλος, σύμφωνα με την εργασία του Goda (1985), δίνεται μία πρώτη ένδειξη ότι είναι απαραίτητη η προστασία των κατασκευών απέναντι σε μεγάλους όγκους κυματικής υπερπήδησης, έτσι ώστε να αντιστέκονται στη διάβρωση που μπορεί να προκληθεί. Όπως ήταν αναμενόμενο, ο πίνακας δείχνει ότι τα επιτρεπόμενα όρια κυματικής υπερπήδησης για ένα καλά προστατευμένο παράκτιο έργο είναι αρκετά μεγαλύτερα συγκριτικά με μία απλή κατασκευή χωρίς προστασία.

Πίνακας 5.1 Επιτρεπόμενα όρια της μέσης παροχής κυματικής υπερπήδησης (Πηγή: EurOtop, 2007).

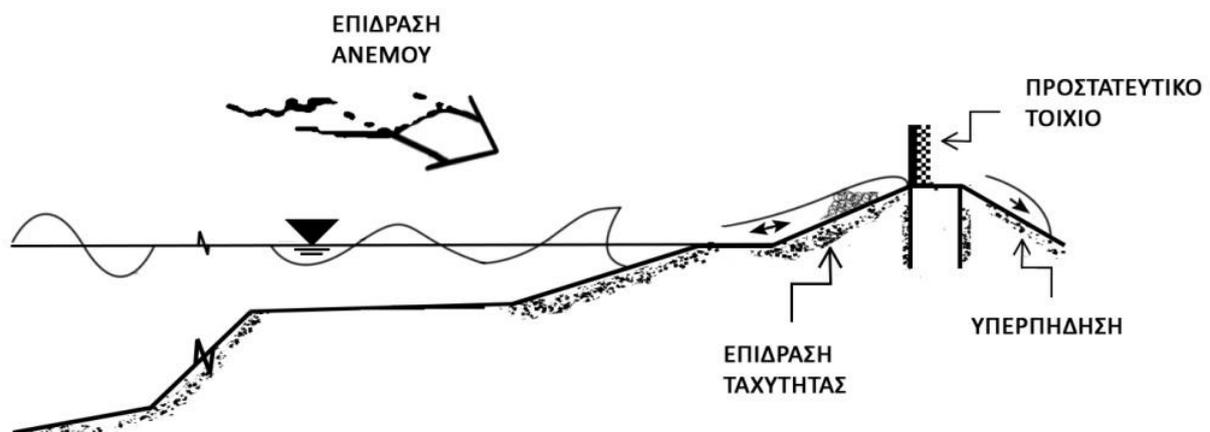
	Τύπος κινδύνου και αιτία	Μέση παροχή q (l/m/s)
Επιτρεπόμενα όρια υπερπήδησης για πεζούς	Εκπαιδευμένο προσωπικό, με σωστή ένδυση και προστασία έναντι διαβροχής, επίπεδο υπερπήδησης χαμηλό, μικρός κίνδυνος πτώσης στο πέρασμα	1 - 10
	Ενήμεροι πεζοί, με δυνατότητα να βραχούν, χωρίς να φοβούνται σαφής θέα της θάλασσας, φαρδύτερο πέρασμα	0.1
Επιτρεπόμενα όρια υπερπήδησης για οχήματα	Οδήγηση με χαμηλή ταχύτητα, υπερπήδηση από παλλόμενες ροές σε χαμηλής ροής βάθη, το όχημα όχι βυθισμένο	10 - 50
	Οδήγηση με μέτρια ή υψηλή ταχύτητα, παρορμητική υπερπήδηση που προκαλεί υψηλούς πίδακες	0.01 - 0.05
Επιτρεπόμενα όρια υπερπήδησης για την περιοχή πίσω από την κατασκευή	Σημαντική ζημιά ή βύθισμα μεγαλύτερων ιστιοφόρων	50
	Βύθιση μικρών σκαφών σε απόσταση 5 - 10 m από την κατασκευή - ζημιά σε μεγαλύτερα ιστιοφόρα	10
	Ζημιά σε στοιχεία της κατασκευής	1
	Βύθιση μικρών σκαφών σε απόσταση 5 - 10 m από την κατασκευή - ζημιά στον εξοπλισμό σε απόσταση 5 - 10 m	0.4
Επιτρεπόμενα όρια υπερπήδησης για τα παράκτια έργα	Κρηπιδώματα σε επίχωση / αναχώματα Καμία ζημιά στη στέψη και στην πίσω πλευρά - καλή προστασία	50 - 200
	Καμία ζημιά στη στέψη και στην πίσω πλευρά - η χωμάτινη επίχωση είναι καλυμμένη με γρασίδι	1 - 10
	Καμία ζημιά στη στέψη και στην πίσω πλευρά - καμία προστασία	0.1
Επιτρεπόμενα όρια υπερπήδησης για τα παράκτια έργα	Παραλιακός πεζόδρομος ή επενδεδυμένο μέτωπο Ζημιά στον πλακόστρωτο δρόμο ή προστατευμένο πεζόδρομο πίσω από την κατασκευή	200
	Ζημιά στο γρασίδι ή στον ελαφρά προστατευμένο πεζόδρομο ή στην επίχωση	50

5.3 Πρόβλεψη της κυματικής υπερπήδησης

Αρκετές μέθοδοι είναι διαθέσιμες και αφορούν στην πρόβλεψη του υπολογισμού της κυματικής υπερπήδησης, συγκεκριμένης μορφής κατασκευών υπό δεδομένων κυματικών συνθηκών. Σύμφωνα με το ευρωπαϊκό πρόγραμμα CLASH, προτείνεται η μέθοδος πρόβλεψης μέσω Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων, η οποία βασίζεται σε πραγματικές μετρήσεις πειραμάτων, σχετικά με την υπερπήδηση, ενώ έχουν αναπτυχθεί κατά καιρούς και εμπειρικές σχέσεις οι οποίες και είναι δυνατόν να εφαρμοστούν σχετικά εύκολα μέσω μιας εφαρμογής του EurOtop - manual.

5.3.1 Εμπειρικές σχέσεις

Λόγω της στοχαστικής φύσης των κυματισμών, δεν είναι δυνατή μία ακριβής μαθηματική περιγραφή της πορείας τους και άρα και του φαινομένου της κυματικής υπερπήδησης. Γι' αυτό το λόγο, η κυματική υπερπήδηση θαλάσσιων κατασκευών, μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά μέσω διαφόρων εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες έχουν προκύψει από τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων. Όπως φαίνεται στη σχέση (5.1), η επιρροή της τραχύτητας της κατασκευής, της κλίσης του πρανού της κατασκευής, των κυματικών συνθηκών, της τοποθέτησης προστατευτικών τοιχίων (Σχήμα 5.2), στο ποσοστό της κυματικής υπερπήδησης, λαμβάνονται υπόψη στο γενικό τύπο, αλλά και στις σχέσεις που έχουν προταθεί και απεικονίζονται μέσω των αντίστοιχων συντελεστών.



Σχήμα 5.2 Παράγοντες που επιδρούν στο ποσοστό της παροχής της κυματικής υπερπήδησης.

Το CEM (2008), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.2, συγκεντρώνει αρκετές, από τις σχέσεις που έχουν προκύψει κατά καιρούς για την πρόβλεψη της κυματικής υπερπήδησης των κατασκευών. Μέσω αυτών, περιγράφεται η συμπεριφορά της κυματικής υπερπήδησης για διάφορες γεωμετρικές κυματοθραυστών (έργα με πρηνή αλλά και με κατακόρυφο μέτωπο) σε συνάρτηση κυρίως με το ύψος στέψης τους και το κυματικό κλίμα που επικρατεί.

Πίνακας 5.2 Εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της κυματικής υπερπήδησης (Πηγή: CEM, 2008).

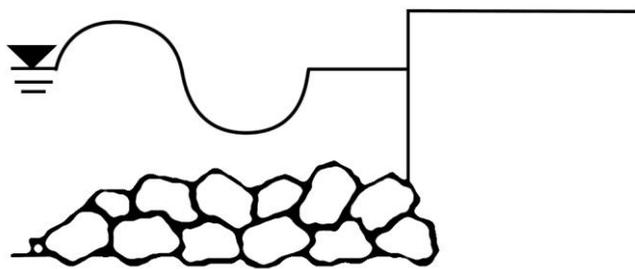
Μελετητής	Κατασκευή	Σχέση υπερπήδησης	Αδιάστατη παροχή Q	Αδιάστατο ελεύθερο περιθώριο R
Owen (1980,1982)	αδιαπέρατος, λείος, με ή χωρίς αναβαθμό κυματοθραύστης με πρηνή και κατακόρυφος	$Q = a * exp(-bR)$	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\frac{R_c}{H_s} \left(\frac{S_m}{2\pi}\right)^{0.5} \frac{1}{\gamma}$
Bradbury and Allsop (1988)	αδιαπέρατος κυματοθραύστης με πρηνή, με θωράκιση ογκολίθων	$Q = a * R^{-b}$	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\left(\frac{R_c}{H_s}\right)^2 \left(\frac{S_m}{2\pi}\right)^{0.5}$
Aminti and Franco (1988)	διπλής θωράκισης ογκολίθων, κύβων, με τετράποδα αδιαπέρατος κυματοθραύστης με πρηνή	$Q = a * R^{-b}$	$\frac{q}{gH_s T_m}$	$\left(\frac{R_c}{H_s}\right)^2 \left(\frac{S_m}{2\pi}\right)^{0.5}$
Ahrens and Heimburg (1988b)	κυματοθραύστες 7 διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών	$Q = a * exp(-bR)$	$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$\frac{R_c}{(H_s^2 L_p)^{1/3}}$
Pedersen and Burcharth (1992)	αδιαπέρατος, με θωράκιση ογκολίθων κυματοθραύστης με πρηνή	$Q = a * R$	$\frac{qT_m}{L_m^2}$	$\frac{H_s}{R_c}$
Franco, de Gerloni, and van der Meer (1994)	κατακόρυφος κυματοθραύστης με ή χωρίς διαπερατότητα	$Q = a * exp(-bR)$	$\frac{q}{\sqrt{gH_s^3}}$	$\frac{R_c}{H_s} \frac{1}{\gamma}$
Pedersen (1996)	διαπερατός κυματοθραύστης με θωράκιση ογκολίθων	$Q = R$	$\frac{qT_m}{L_m^2}$	$3.2 * 10^{-5} \frac{H_s^5 \tan \alpha}{R_c^3 A_c B}$

Όμοια, οι εμπειρικές σχέσεις συγκεντρώνονται και στο EurOtop, το οποίο θα αναλυθεί εκτενέστερα. Για τη διευκόλυνση των ενδιαφερομένων, πέρα από το εγχειρίδιο, έχει δημιουργηθεί και μία σελίδα (<http://www.overtopping-manual.com>), στην οποία περιλαμβάνεται ένα εργαλείο πρόβλεψης της υπερπήδησης, το οποίο βασίζεται στους διαθέσιμους εμπειρικούς τύπους. Στην πραγματικότητα, συγκεντρώνει όλους τους εμπειρικούς τύπους που έχουν προταθεί δίνοντας στο χρήστη τη δυνατότητα να επιλέξει μεταξύ ορισμένων τυποποιημένων διατομών κυματοθραυστών προκειμένου να υπολογιστεί η παροχή της κυματικής υπερπήδησης. Στην περίπτωση που η διατομή δεν αντιπροσωπεύεται από καμία από τις διαθέσιμες (περίπλοκη κατασκευή), τότε προτείνεται

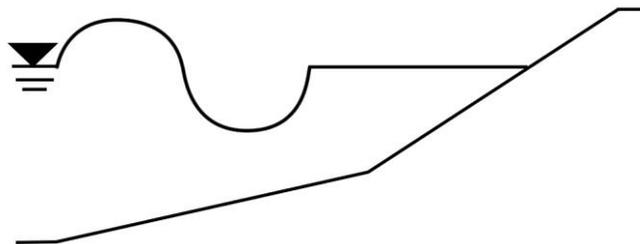
η χρήση του λογισμικού PC Overtop ή η χρήση του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, τα οποία βρίσκονται επίσης στη σελίδα αυτή.

Το εργαλείο που εμπεριέχει τους εμπειρικούς τύπους, καλύπτει ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών διατομών και συνεπώς τους περισσότερους τύπους που είναι διαθέσιμοι σήμερα:

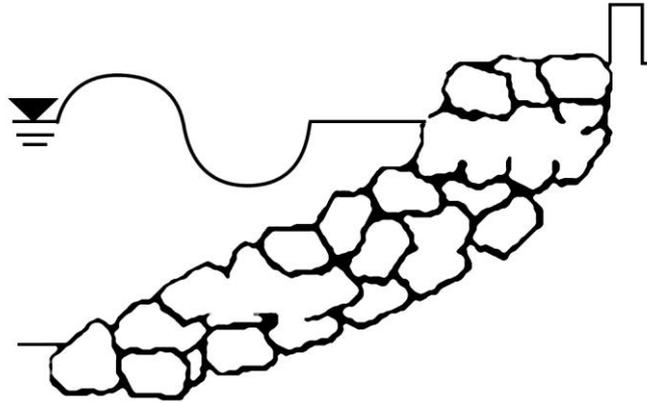
- (α) κυματοθραύστης με κατακόρυφο και απότομο μέτωπο (Σχήμα 5.3)
- (β) κυματοθραύστης με πρανές (κλίση) (Σχήμα 5.4)
- (γ) κυματοθραύστης με κλίση και θωράκιση ογκολίθων, με ή χωρίς προστατευτικό τοιχίο (Σχήμα 5.5)



Σχήμα 5.3 Χαρακτηριστική διατομή κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο και προστασία στον πόδα (Πηγή: EurOtop, 2007).



Σχήμα 5.4 Χαρακτηριστική διατομή κυματοθραύστη με κεκλιμένο πρανές - σύνθετη κλίση (Πηγή: EurOtop, 2007).



Σχήμα 5.5 Χαρακτηριστική διατομή κυματοθραύστη με πρανές θωρακισμένο με ογκολίθους και προστατευτικό τοίχιο (Πηγή: EurOtop, 2007).

Φυσικά κάθε μία από τις τρεις αυτές περιπτώσεις περιγράφεται αναλυτικά σε ξεχωριστά κεφάλαια, καθώς παρατίθενται και οι αντίστοιχες εμπειρικές σχέσεις αναλυτικά και για διάφορες διατομές. Εδώ, για κάθε μία περίπτωση καταγράφονται οι βασικοί τύποι κάθε κατηγορίας, οι οποίοι τροποποιούνται για κάθε νέα περίπτωση.

Για την απλούστερη περίπτωση κατακόρυφου τεχνικού έργου λοιπόν, προτείνεται η σχέση:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.04 \exp\left(-1.8 \frac{R_C}{H_{m0}}\right), 0.1 < \frac{R_C}{H_{m0}} < 3.5 \quad (5.3)$$

Η σχέση αυτή εμπεριέχει συντελεστή ασφαλείας με τυπική απόκλιση αυτή της μέσης πρόβλεψης (ντετερμινιστικός σχεδιασμός).

Στην περίπτωση κυματοθραύστη με πρανές, για την πιο απλή περίπτωση και πάλι (πρανές με ενιαία κλίση), προτείνεται η σχέση του Owen (1980):

$$\frac{q}{T_m g H_s} = Q_0 \exp\left(-b \frac{R_C}{T_m \sqrt{g H_s}}\right) \quad (5.4)$$

Όπου οι μεταβλητές Q_0 , b προκύπτουν εμπειρικά (Πίνακας 5.3).

Πίνακας 5.3 Μεταβλητές του τύπου του Owen, για μέτωπα με ενιαία κλίση.

Κλίση πρανούς	Q_0	b
1:1	0.00794	20.1
1:2	0.00939	21.6
1:3	0.01090	28.7
1:4	0.01160	41.0
1:5	0.01310	55.6

Τέλος, η ασφαλής πρόβλεψη σχετικά με την πιο απλή περίπτωση κυματοθραύστη με πρανές και θωράκιση, βασίζεται στην ντετερμινιστική σχέση:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.2 \exp\left(-2.3 \frac{R_C}{H_{m0}\gamma_f\gamma_\beta}\right) \quad (5.5)$$

όπου γ_f, γ_β οι συντελεστές τραχύτητας (Πίνακας 5.4) και επιρροής της γωνίας πρόσπτωσης των κυματισμών.

Πίνακας 5.4 Τιμές για το συντελεστή τραχύτητας γ_f για διαπερατές κατασκευές, με κλίση πρανούς 1:1.5 (Πηγή: EurOtop, 2007).

Τύπος θωράκισης	γ_f
λεία, αδιαπέρατη επιφάνεια	1.00
ογκόλιθοι (1 στρώση, αδιαπέρατος πυρήνας)	0.60
ογκόλιθοι (1 στρώση, διαπερατός πυρήνας)	0.45
ογκόλιθοι (2 στρώσεις, αδιαπέρατος πυρήνας)	0.55
ογκόλιθοι (2 στρώσεις, διαπερατός πυρήνας)	0.40
ακρόποδα	0.46
τετράποδα	0.38

Κατά την πρόσπτωση του κυματισμού επάνω στο μέτωπο του έργου, ενδεχομένως να αλλάζει λίγο η γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού και αυτό είναι που εκφράζει ο συντελεστής επιρροής γ_β . Για κυματισμούς πλάγιας πρόσπτωσης, η γωνία πρόσπτωσης β ($^\circ$), ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της διάδοσης του κυματισμού και του κάθετου στη διατομή του έργου άξονα (για κάθετη πρόσπτωση $\beta=0^\circ$). Η σχέση μεταξύ της γωνίας πρόσπτωσης και του συντελεστή γ_β είναι γραμμική και εκφράζεται:

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0063|\beta|, \quad 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ$$

$$\text{ενώ αν } |\beta| > 80^\circ, \quad |\beta| = 80^\circ \quad (5.6)$$

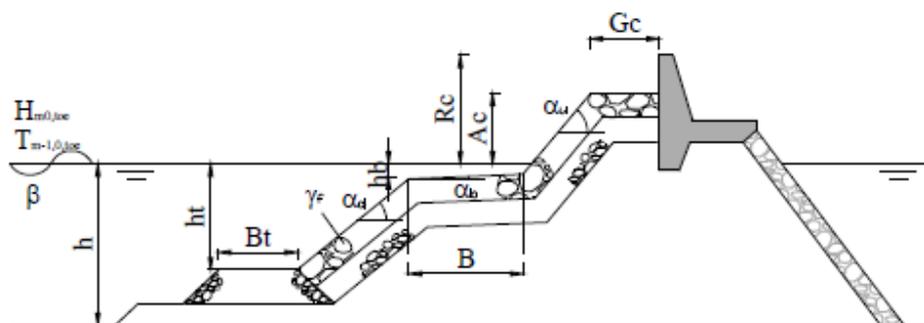
Για τον υπολογισμό της υπερπήδησης, απαιτούνται οι μεταβλητές εισόδου στο εργαλείο υπολογισμού. Κάθε τύπος διατομής, απαιτεί διαφορετικές μεταβλητές εισόδου, όλες όμως απαιτούν σαν δεδομένο την περίοδο και το ύψος του κυματισμού καθώς και το ύψος της στέψης του κυματοθραύστη. Αναφορικά με την περίοδο του κυματισμού, μπορεί να εισαχθεί είτε η μέση περίοδος του κυματισμού (T_m) ή η περίοδος αιχμής (T_p) ή η φασματική περίοδος ($T_{m-1,0}$), η οποία αντιπροσωπεύει τις μεγαλύτερες περιόδους. Το ύψος της στέψης του κυματοθραύστη (R_C) είναι η απόσταση της κορυφής του τοιχείου πάνω από την επιφάνεια του νερού σε ηρεμία, ενώ του κυματισμού που εισέρχεται στις δοκιμές είναι το ύψος στον πόδα του έργου (H_{m0}). Οι κυματοθραύστες με κεκλιμένο μέτωπο απαιτούν επίσης και τον παράγοντα απομείωσης (γ), ενώ οι θωρακισμένοι

κυματοθραύστες περιέχουν μία μεταβλητή η οποία αντιπροσωπεύει το υλικό προστασίας τους (ογκόλιθοι, τετράποδα κ.ά.). Σαν αποτέλεσμα από την εφαρμογή αυτή, προκύπτει ο βαθμός υπερπήδησης, σαν λόγος της παροχής υπερπήδησης ανά μέτρο πλάτους της κατασκευής ($m^3/s/m$).

5.3.2 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Το εργαλείο πρόβλεψης μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων σχετικά με τη μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης, έχει αναπτυχθεί από το Deltares | Delft Hydraulics, μία συμβουλευτική και ερευνητική εταιρία η οποία εξειδικεύεται στη διαχείριση των υδάτινων πόρων, την υδραυλική μηχανική, την ποιότητα των υδάτων και την οικολογία. Οι λεπτομέρειες για την ανάπτυξη του αλγορίθμου πρόβλεψης, περιγράφονται στην εργασία των Van Gent *et al.* (2004), ενώ πρέπει να αναφερθεί ότι η όλη μελέτη ανάπτυξης συγχρηματοδοτείται από την Επιτροπή Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος CLASH (Crest Level Assessment of Coastal Structures). Το δίκτυο αυτό προτείνεται κυρίως για την πρόβλεψη κατά το στάδιο μιας προκαταρκτικής μελέτης κατασκευής ενός παράκτιου τεχνικού έργου και πάντα πρέπει να επαληθεύεται μέσω δοκιμών βασισμένων στο πραγματικό κυματικό κλίμα της περιοχής μελέτης καθώς και στην πραγματική γεωμετρία της διατομής που πρόκειται να κατασκευαστεί. Αν και οι προβλέψεις βασίζονται σε μικρό σχετικά αριθμό πειραμάτων, από την αξιολόγηση της απόδοσής του φαίνεται αρκετά αξιόπιστο σε ένα νέο για το δίκτυο σενάριο.

Για την πρόβλεψη της μέσης παροχής κυματικής υπερπήδησης λοιπόν, το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο προκύπτει από 8372 συνδυασμούς δεδομένων εισόδου – εξόδου. Τα δεδομένα προέρχονται από πειράματα διαφόρων ερευνών και ιδρυμάτων (WL | Delft Hydraulics - The Netherlands, Hydraulic Research Wallingford - UK, Danish Hydraulic Institute – Denmark και άλλα στην Ιαπωνία, Ισπανία, Νορβηγία). Η είσοδος του δικτύου αποτελείται από 15 παραμέτρους όπως απεικονίζονται σχηματικά στην Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων εισόδου του ΤΝΔ (Πηγή: NN Manual).

Σε κάθε δυνατό συνδυασμό των παραμέτρων εισόδου του δικτύου $[H_{m0}, T_{m-1,0}, \beta, h, h_t, B_t, \gamma_f, cota_d, cota_u, B, h_b, tana_b, R_C, A_C, G_C]$, αντιστοιχεί μία παράμετρος εξόδου, δηλαδή μία τιμή της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης (q) και επτά ακόμα τιμές από την κατανομή της πρόβλεψης, που αντιστοιχούν σε διάφορα διαστήματα εμπιστοσύνης ($q_{2.5\%}, q_{5\%}, q_{25\%}, q_{50\%}, q_{75\%}, q_{95\%}, q_{97.5\%}$).

Πιο συγκεκριμένα για τα δεδομένα εισόδου: H_{m0} (m) το φασματικό ύψος κύματος στον πόδα της κατασκευής, $T_{m-1,0}$ (s) η αντίστοιχη φασματική περίοδος κυματισμού, β ($^\circ$) η γωνία πρόσπτωσης των κυματισμών, h (m) το βάθος του νερού ακριβώς ανάντη της κατασκευής, h_t (m) το βάθος του νερού πάνω από τον πόδα της κατασκευής, B_t (m) το πλάτος του πόδα της κατασκευής, γ_f ο συντελεστής τραχύτητας της κατασκευής (TAW, 2002a), $cota_d/cota_u$ η κλίση του πρανούς προς τα πάνω και προς τα κάτω (από τη Στάθμη Ηρεμίας Ύδατος), B (m) το πλάτος του αναβαθμού (εάν υπάρχει), h_b (m) το ύψος του αναβαθμού, $tana_b$ η κλίση του αναβαθμού, R_C (m) το ύψος στέψης του τοίχου προστασίας, A_C (m) το ύψος στέψης του πρανούς προστασίας, G_C (m) το πλάτος στέψης της κατασκευής.

Στην εργασία των Van der Meer *et al.* (2004), περιγράφονται αναλυτικά οι παραπάνω παράμετροι που απαιτούνται. Στις περιπτώσεις όπου κάποιες από τις υδραυλικές παραμέτρους δεν είναι άμεσα διαθέσιμες, τότε προτείνονται οι σχέσεις προσαρμογής τους στον αλγόριθμο. Για παράδειγμα, αναφορικά με το ύψος κύματος, απαιτείται η τιμή του στον πόδα της κατασκευής. Εφ' όσον διατίθεται μόνο η τιμή του χαρακτηριστικού ύψους κύματος (H_s), τότε για τον υπολογισμό του H_{m0} , δηλαδή του ύψους κύματος στον πόδα της κατασκευής, χρησιμοποιείται ο τύπος που προκύπτει από τους Battjes and Groenendijk (2000):

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (5.7)$$

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0} \quad (5.8)$$

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (5.9)$$

όπου $m_0 = E_1 = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f, \theta) d\theta df$, η μηδενική ροπή του φάσματος κυματισμού.

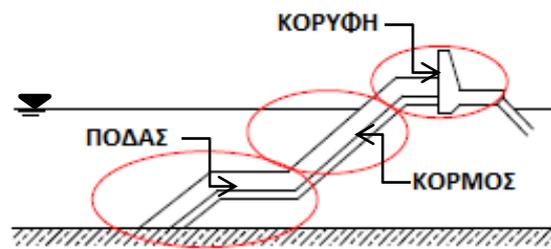
Επίσης, στην περίπτωση που διατίθεται η περίοδος του κυματισμού από ανάλυση χρονοσειράς, η εκτίμηση της φασματικής περιόδου $T_{m-1,0}$ ή της περιόδου T_p μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω εμπειρικών κατανομών, όπως προτείνεται και στους Goda and Nagai (1974) και Goda (1985):

$$T_p \approx 1.05 T_{1/3} \quad (5.10)$$

$$T_p = 1.2 T_m \quad (5.11)$$

$$T_{m-1,0} \approx T_p / 1.1 \quad (5.12)$$

Συμπερασματικά, οι περισσότερες από τις παράκτιες κατασκευές μπορούν να αποτυπωθούν αρκετά ικανοποιητικά μέσω των 12 παραμέτρων εισόδου του νευρωνικού δικτύου. Κάθε κατασκευή είναι δυνατόν να χωριστεί σε τρία μέρη: το κατώτερο μέρος (πόδας), το κεντρικό (ακόμα και με αναβαθμό) και το υψηλότερο (ή κορυφή) (Σχήμα 5.7) και σε κάθε μέρος σημειώνεται η αντίστοιχη παράμετρος. Ο διαχωρισμός, δεν είναι πάντα σαφής και εξαρτάται εκτός από το σχήμα της κατασκευής και από τις υδραυλικές συνθήκες που επικρατούν (η ίδια διατομή, θα μπορούσε να έχει διαφορετικό σχηματισμό για διαφορετικό ύψος της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας).



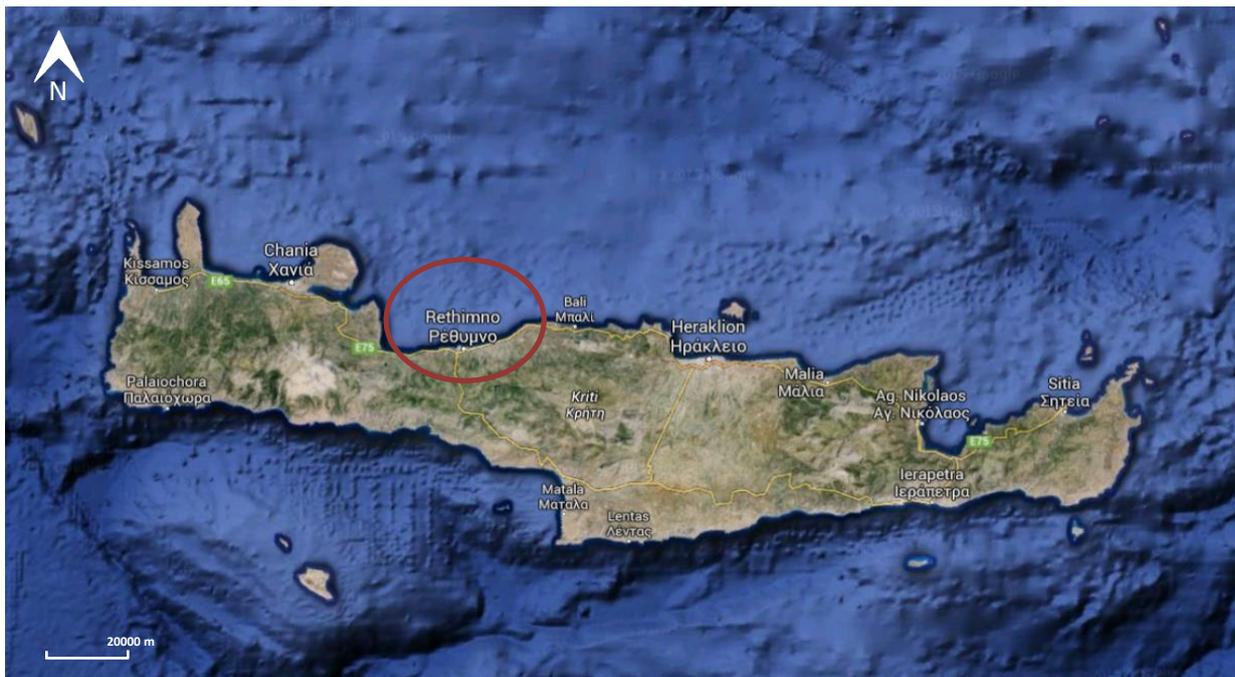
Σχήμα 5.7 Διαχωρισμός διατομής παράκτιας κατασκευής σε τρία μέρη: κορυφή, μέτωπο, πόδας.

Η πρόβλεψη μέσω του εργαλείου των νευρωνικών δικτύων, προσφέρει μία πιο λεπτομερή περιγραφή της θαλάσσιας κατασκευής, επάνω στην οποία ζητείται ο καθορισμός της παροχής υπερπήδησης συγκριτικά με τους διαθέσιμους εμπειρικούς τύπους. Ωστόσο, η εφαρμογή προτείνεται μόνο για μία αρχική εκτίμηση του όλου φαινομένου, ενώ συστήνεται επιπλέον η διεξαγωγή πειραμάτων με ένα διαφορετικό ομοίωμα για κάθε νέα περίπτωση.

6 Περιοχή μελέτης

6.1 Γεωγραφική θέση Ρεθύμνου

Η εξεταζόμενη περιοχή βρίσκεται στο νομό Ρεθύμνου, ο οποίος είναι ένας από τους τέσσερις νομούς της Κρήτης. Ο νομός Ρεθύμνου συνορεύει ανατολικά με το νομό Ηρακλείου και δυτικά με το νομό των Χανίων (Σχήμα 6.1). Στο οικιστικό δίκτυο της περιφερειακής ενότητας του Ρεθύμνου, κυριαρχεί ο Δήμος Ρεθύμνης, ο οποίος συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος του πληθυσμού και των διαφόρων δραστηριοτήτων, ενώ συναντώνται και οι εξής Δήμοι: ο Δήμος Μυλοποτάμου, Αμαρίου, Αγίου Βασιλείου και ο Δήμος Ανωγείων.



Σχήμα 6.1 Περιοχή μελέτης, Ρέθυμνο (Πηγή: Google Earth).

Ο πληθυσμός του Δήμου Ρεθύμνου ανέρχεται στους 55 525 κατοίκους, ενώ της πόλης του Ρεθύμνου στους 32 468 κατοίκους (τρίτη μεγαλύτερη πόλη της Κρήτης, μετά το Ηράκλειο και τα Χανιά) σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Στην περιοχή εμφανίζεται ιδιαίτερα μεγάλη τουριστική κίνηση κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ καθ' όλη τη διάρκεια του έτους φιλοξενούνται οι 10 500 και πλέον ενεργοί φοιτητές.

Πιο συγκεκριμένα, η πρωτεύουσα του νομού, το Ρέθυμνο, αποτελεί και το σημαντικότερο αστικό κέντρο. Συγκοινωνιακά η πόλη συνδέεται με το Ηράκλειο και τα Χανιά μέσω του Εθνικού δρόμου, με όλες τις περιοχές του νομού μέσω επαρχιακού δικτύου και με το λιμάνι του Πειραιά μέσω του λιμένα της. Οι περισσότερες από τις ανθρώπινες δραστηριότητες της πόλης, αναπτύσσονται κατά μήκος των ακτών και άρα στο λιμάνι του Ρεθύμνου και στην τριγύρω παράκτια ζώνη (Σχήμα 6.2).

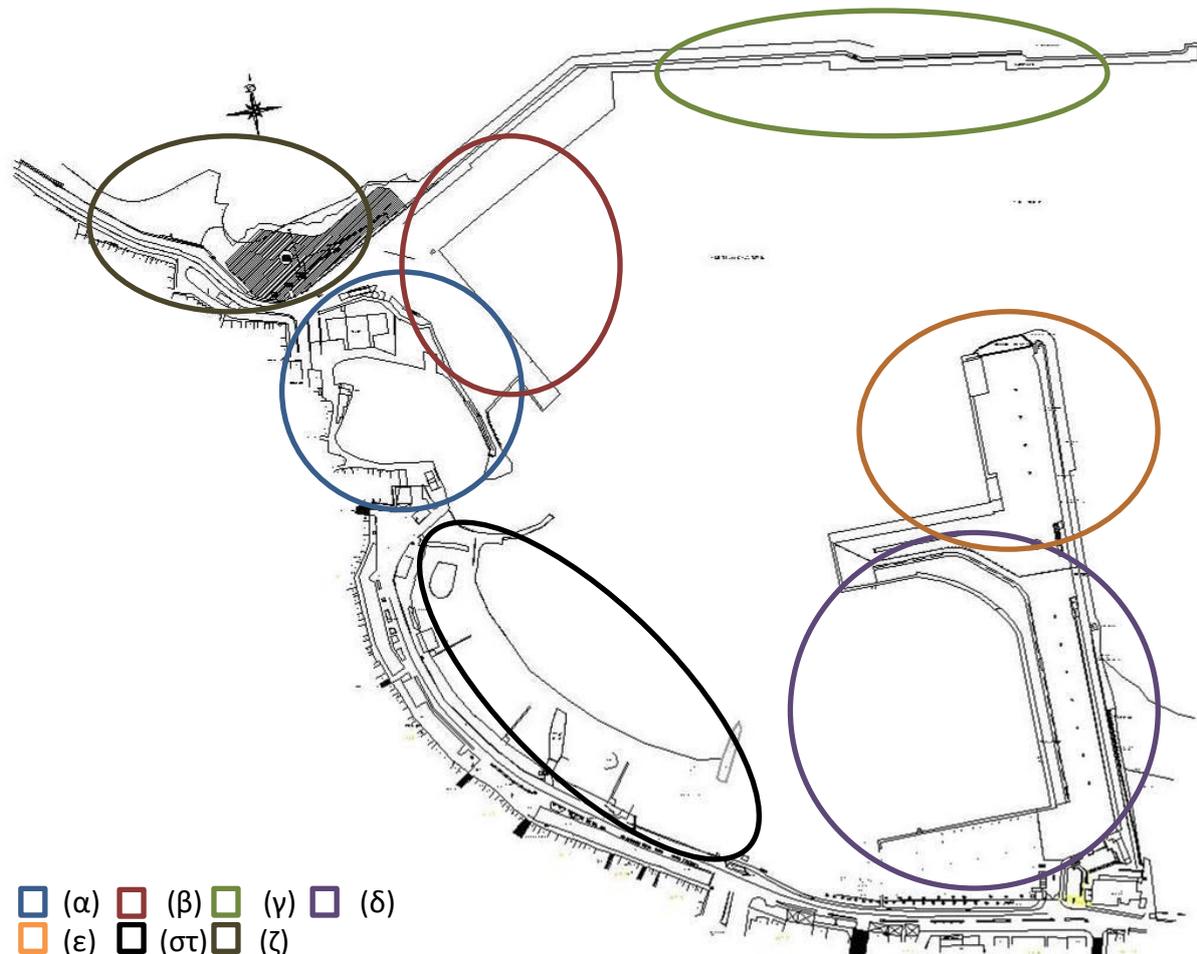


Σχήμα 6.2 Το λιμάνι του Ρεθύμνου και η γύρω παράκτια περιοχή σε κάτοψη (Πηγή: Google Earth).

Πράγματι, η αναπτυξιακή φυσιογνωμία του Δήμου Ρεθύμνης χαρακτηρίζεται κυρίως από την κυριαρχία του τριτογενή τομέα παραγωγής, στον οποίο περιλαμβάνονται οι δραστηριότητες που σχετίζονται με τον τουρισμό (ξενοδοχεία, εστιατόρια, εμπόριο) και εκτείνονται σε όλο το μήκος του θαλάσσιου μετώπου.

6.2 Λιμένας Ρεθύμνου

Το λιμάνι του Ρεθύμνου βρίσκεται στη Βόρεια Κρήτη εντός του ομώνυμου κόλπου, ενώ δυτικά και ανατολικά απλώνεται αμμώδης παραλία. Προστατεύεται από δύο κυματοθραύστες (εξωτερικά έργα), τον προσήνεμο (βόρειο) και τον υπήνεμο (ανατολικό) με τον δίαυλο εισόδου να έχει διεύθυνση ανατολική – βορειοανατολική. Διακρίνεται στα εξής τμήματα (Σχήμα 6.3):



Σχήμα 6.3 Σχηματική απεικόνιση και διαχωρισμός των τμημάτων του λιμένα του Ρεθύμνου.

- (α) Τον Ενετικό λιμένα στη νότια πλευρά του προσήνεμου μόλου, στον οποίο προσδένουν αλιευτικά σκάφη αλλά και σκάφη αναψυχής
- (β) Τα κρηπιδώματα στη γένεση του προσήνεμου μόλου (δυτικό τμήμα) όπου φιλοξενούν οχηματαγωγά – επιβατικά και τουριστικά πλοία
- (γ) Τα κρηπιδώματα του προσήνεμου μόλου, ο οποίος ορίζει τη βόρεια περίμετρο της λιμενολεκάνης και φιλοξενεί όλες τις φορτοεκφορτώσεις κάθε είδους εμπορεύματος, ενώ υπάρχει η δυνατότητα προσωρινής πρόσδεσης και τουριστικών σκαφών

- (δ) Τη μαρίνα, στη νοτιοανατολική γωνία του υπήνεμου μόλου, η οποία διαθέτει 174 θέσεις πρόσδεσης τουριστικών σκαφών σε πλωτούς προβλήτες
 - (ε) Το αρχικό τμήμα του υπήνεμου μόλου, το οποίο ορίζει και το ανατολικό άκρο της λιμενολεκάνης και διαθέτει δύο θέσεις παραβολής που προορίζονται για πρόσδεση τουριστικών σκαφών καθώς και των επιβατικών πλοίων που φτάνουν στην περιοχή
- Επιπλέον, περιλαμβάνει και τους χερσαίους χώρους:
- (στ) Την παραλία, στο νότιο τμήμα της λιμενολεκάνης, η οποία έχει διαμορφωθεί από φυσικές προσαμμώσεις και φιλοξενεί αναψυκτήρια και υπαίθριους χώρους για αθλοπαιδιές
 - (ζ) Έναν δημόσιο χώρο στάθμευσης, στα δυτικά, ο οποίος παρουσιάζει προβλήματα υπερπήδησης των κυματισμών

6.3 Ανεμολογικά στοιχεία

Τα τοπικά χαρακτηριστικά του ανέμου, είναι η πιο σημαντική παράμετρος κατά τη δημιουργία παράκτιων πλημμυρών, λόγω της δημιουργίας ανεμογενών κυματισμών. Οπότε και η ανάγκη απόκτησης γνώσης της συμπεριφοράς του ανέμου είναι επιτακτική για τη μελέτη των κάθε είδους λιμενικών έργων. Συγκεκριμένα για την περιοχή ενδιαφέροντος, αντλούνται πληροφορίες σχετικά με τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά όπως καταγράφονται στο σταθμό του Ρεθύμνου από την Ε.Μ.Υ. Ο σταθμός του Ρεθύμνου (24°31'N 35°21'E) βρίσκεται σε υψόμετρο 7 m και η περίοδος λειτουργίας αφορά τις χρονιές 1957-2009. Ωστόσο από το 2004 ήδη οι μετρήσεις των διαφόρων μετεωρολογικών χαρακτηριστικών δεν καταγράφονταν με συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ οι καταγραφές του ανέμου για τα τελευταία 5 έτη έχουν εμφανίσει σημαντικές ελλείψεις.

Η ένταση του ανέμου εκφράζεται σε βαθμούς της κλίμακας Beaufort και παίρνει το όνομά του τομέα προέλευσης. Τα δεδομένα του ανέμου εδώ καταγράφονται σε m/s και στον Πίνακα 6.1 δίνονται οι αντιστοιχίες με την κλίμακα Beaufort καθώς και μία υποτυπώδης περιγραφή του ανέμου. Οι αντιστοιχίσεις στον Πίνακα έχουν προκύψει από τον τύπο μετατροπής από m/s σε Beaufort:

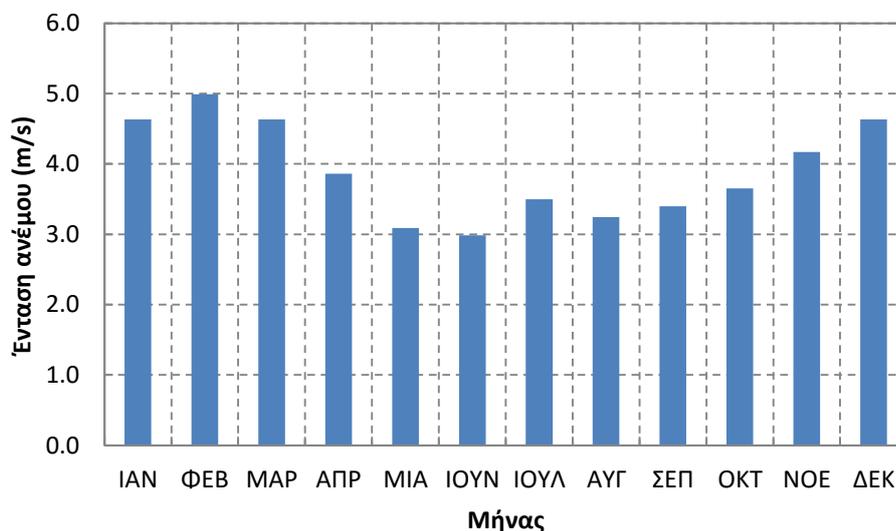
$$W = 0.836B^{3/2} \quad (6.1)$$

όπου W η ταχύτητα του ανέμου σε m/s και B είναι η τιμή σε Beaufort.

Πίνακας 6.1 Σύντομη περιγραφή του (Πηγή: Μέμος, 2008).

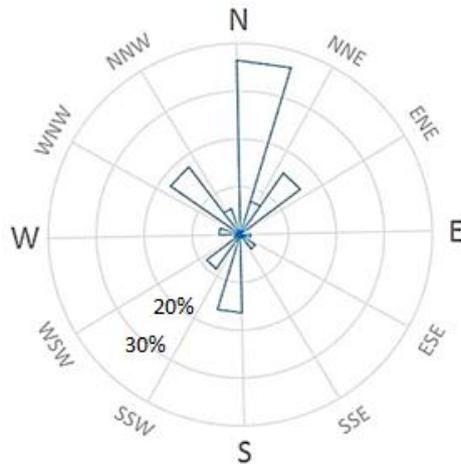
Κλίμακα Beaufort	Περιγραφή	Ταχύτητα ανέμου m/s
0	Άπνοια	<0.5
1	Υποπνέων	0.5-1.5
2	Ασθενής αύρα	2.1-3.1
3	Λεπτή αύρα	3.6-5.1
4	Μέτρια αύρα	5.7-8.2
5	Λαμπρή αύρα	8.7-10.8
6	Ισχυρή αύρα	11.3-13.9
7	Ισχυρός άνεμος	14.4-17.0
8	Σφοδρός άνεμος	17.5-20.6
9	Ορμητικός άνεμος	21.1-24.2
10	Θύελλα	24.7-28.3
11	Σφοδρή θύελλα	28.8-32.4
>12	Τυφώνας	32.9-36.5

Αρχικά, δίνονται οι καταγραφές που αντιστοιχούν στη χρονική περίοδο 1957-1997, όπως προκύπτουν από την Ε.Μ.Υ. και αφορούν στις μέσες ετήσιες τιμές των ανέμων διαφόρων εντάσεων σε m/s (Σχήμα 6.4). Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι η μέση διεύθυνση ανέμου για κάθε μήνα είναι η Βόρεια, ενώ η μεγαλύτερη τιμή της μέσης ταχύτητας του ανέμου εμφανίζεται τον Φεβρουάριο (5.0 m/s).



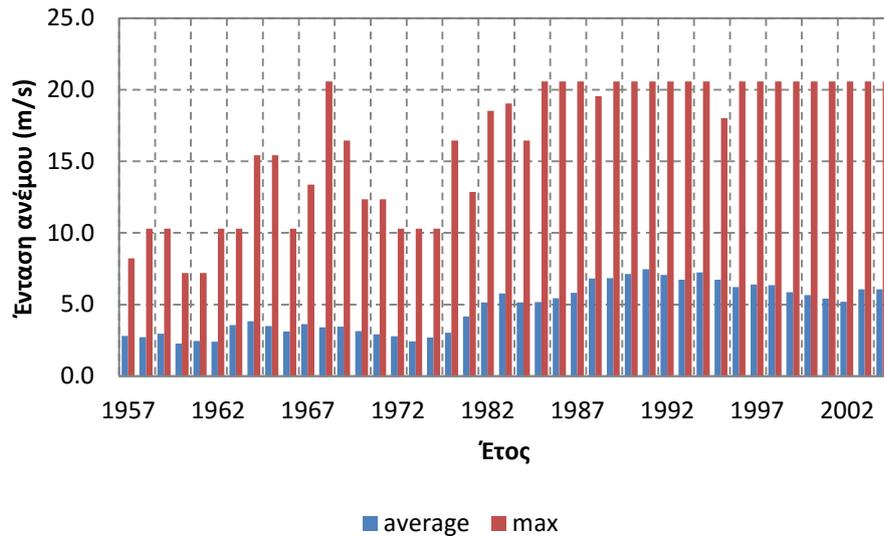
Σχήμα 6.4 Μέσες ετήσιες τιμές των ανέμων για την περιοχή του Πεθύμνου (Πηγή: Ε.Μ.Υ).

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ακόμα η διακύμανση των ταχυτήτων και διευθύνσεων του ανέμου με την πάροδο των χρόνων. Για το λόγο αυτό, συγκεντρώθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα μετρήσεων της έντασης του ανέμου για το σταθμό του Ρεθύμνου από το 1957 έως και το 2004 (Ε.Μ.Υ.), διάστημα ικανοποιητικό για να δώσει μία ολοκληρωμένη εικόνα της διαίτας των ανέμων που επικρατούν στην περιοχή. Τα ανεμολόγια παρέχουν σαν πληροφορία την ένταση του ανέμου ανά κατεύθυνση, πληροφορία η οποία επεξεργάστηκε και έδωσε τη συχνότητα πνοής του ανέμου για την περίοδο αυτή, απ' όπου προκύπτει ότι κυριαρχεί η βόρεια διεύθυνση πνοής (Σχήμα 6.5).



Σχήμα 6.5 Ροδόγραμμα έντασης ανέμου 12 τομέων, για την περιοχή του Ρεθύμνου.

Για την περιοχή του Ρεθύμνου, οι επικρατέστερες διευθύνσεις ανέμου, λόγω του προσανατολισμού της, είναι η Βόρεια, Βορειοδυτική και Βορειοανατολική (Β, ΒΔ, ΒΑ) και έτσι συγκεντρώνονται από τα πρωτογενή δεδομένα στο παρακάτω Σχήμα 6.6 για κάθε έτος (1957-2004) η μέση και η μέγιστη ένταση ανέμου (σε m/s) που αντιστοιχούν στις διευθύνσεις αυτές.



Σχήμα 6.6 Εξέλιξη της μέσης και της μέγιστης ετήσιας έντασης του ανέμου για τις κρίσιμες διευθύνσεις (B, BA, ΒΔ) της περιοχής του Ρεθύμνου για την περίοδο 1957-2004.

Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι με το πέρασμα των χρόνων, παρατηρείται αύξηση των τιμών αυτών και ενδεικτικά αναφέρεται ότι για τη χρονιά 1957 η μέση ταχύτητα ανέμου αντιστοιχεί σε 2.8 m/s όταν η μέγιστη είναι 8.2 m/s και αντίστοιχα για το 2004 οι τιμές αυξάνονται στα 6.1 m/s και 20.6 m/s αντίστοιχα.

Τελικά, από τη συγκέντρωση των πρωτογενών δεδομένων, δηλαδή όλων των τρίωρων μετρήσεων των τιμών των ανέμων, από το σταθμό του Ρεθύμνου, προκύπτει ο Πίνακας 4, ο οποίος περιέχει αναλυτικά τις συχνότητες πνοής για κάθε διεύθυνση και ένταση του ανέμου, εκφρασμένη σε Beaufort, για το χρονικό διάστημα 1957-2004.

6.3.1 Ανεμολογικό κλίμα της περιοχής μελέτης

Για την παρακολούθηση της εξέλιξης του ανεμολογικού κλίματος της περιοχής του Ρεθύμνου, χωρίστηκαν τα πρωτογενή δεδομένα των σταθμών της Ε.Μ.Υ. ανά εξαετία ή λιγότερο (όπου υπήρχε έλλειψη δεδομένων). Πιο συγκεκριμένα συγκεντρώθηκαν σε πίνακες συχνότητας διεύθυνσης και έντασης οι τρίωρες μετρήσεις για κάθε μία από τις εξής περιπτώσεις: 1957 - 1960, 1961 - 1965, 1966 - 1973, 1979 - 1984, 1985 - 1991, 1992 - 1994, 1995 - 2000, 2001 - 2004 (Πίνακας 6.2 - 6.4). Τελικά κατασκευάστηκε και ένας συγκεντρωτικός πίνακας συχνότητας από το 1957 - 2004.

Πίνακας 6.2 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1957-1960).

1957 - 1960							
ΒΕΑUF	Β	ΒΑ	Α	Ν	Δ	ΒΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							14.511
1	12.531	2.671	0.734	5.141	0.957	1.157	
2	25.618	4.54	0.445	8.791	0.69	2.604	
3	6.187	0.801	0.022	4.429	0.2	0.467	
4	1.781	0.111		3.45	0.089	0.267	
5	0.156			0.868			
6				0.49			
7				0.178			
8				0.111			
≥9							

Πίνακας 6.3 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1961-1965).

1961-1965							
ΒΕΑUF	Β	ΒΑ	Α	Ν	Δ	ΒΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							7.241
1	9.554	1.056	0.599	4.396	0.761	1.561	
2	20.021	2.236	0.952	10.391	1.494	3.825	
3	8.212	0.799	0.181	5.595	0.894	2.322	
4	3.740	0.276	0.019	5.443	0.657	1.503	
5	0.752	0.029	0.010	2.969	0.067	0.162	
6	0.143			1.266	0.010	0.057	
7	0.019			0.504		0.019	
8				0.266			
≥9							

Πίνακας 6.4 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1966-1973).

1966-1973							
ΒΕΑUF	Β	ΒΑ	Α	Ν	Δ	ΒΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							11.432
1	10.746	1.225	0.714	8.576	0.812	3.570	
2	13.218	0.868	0.504	9.010	1.001	5.349	
3	6.672	0.189	0.056	5.181	0.518	4.502	
4	3.066	0.049	0.021	4.600	0.406	1.890	
5	0.581	0.007		2.100	0.077	0.336	
6	0.203	0.007		1.484	0.000	0.063	
7	0.035			0.777	0.000	0.014	
8	0.021			0.112	0.007		
≥9							

Πίνακας 6.5 Πίνακας συχνотήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1979-1984).

1979 - 1984							
BEAUF	B	BA	A	N	Δ	BΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							14.905
1	2.319	1.009	0.173	2.437	0.246	4.583	
2	7.83	5.02	0.764	8.412	0.864	9.713	
3	5.147	3.583	0.164	3.247	0.427	3.183	
4	4.865	2.355	0.082	4.593	0.255	2.192	
5	2.146	1.119	0.018	2.419	0.118	0.746	
6	1.046	0.755	0	1.61	0.064	0.273	
7	0.246	0.3	0.018	0.446	0.018	0.091	
8	0.091			0.109			
≥9							

Πίνακας 6.6 Πίνακας συχνотήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1985-1991).

1985-1991							
BEAUF	B	BA	A	N	Δ	BΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							10.978
1	0.434	0.710	0.058	0.751	0.050	0.384	
2	6.670	12.898	1.294	6.662	1.060	2.504	
3	4.508	5.894	0.275	2.087	0.534	1.703	
4	6.061	3.565	0.125	3.498	0.459	2.120	
5	3.489	1.603	0.042	2.738	0.225	1.528	
6	3.590	1.620		1.970	0.117	1.620	
7	2.162	0.860		1.261	0.042	0.735	
8	0.618	0.109		0.250	0.008	0.134	
≥9							

Πίνακας 6.7 Πίνακας συχνотήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1992-1994).

1992-1994							
BEAUF	B	BA	A	N	Δ	BΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							14.738
1	0.056	0.019	2.606	0.019	2.531	1.538	
2	4.219	12.263	0.694	5.044	1.894	1.688	
3	3.656	6.638	0.244	1.463	1.313	2.269	
4	3.806	3.825	0.169	2.700	1.219	2.194	
5	2.869	2.175	0.000	1.763	1.013	1.425	
6	2.475	2.888	0.000	1.538	0.150	0.881	
7	1.200	2.888	0.019	0.488	0.056	0.019	
8	0.431	0.788		0.131			
≥9							

Πίνακας 6.8 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1995-2000).

1995 - 2000							
BEAUF	B	BA	A	N	Δ	ΒΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							21.89
1	0.021	0.072	0.031	0.164	0.021	0.01	
2	6.158	13.516	2.638	2.576	4.115	1.765	
3	3.684	4.885	0.831	1.406	1.755	1.765	
4	3.089	2.535	0.277	2.145	1.273	1.447	
5	3.089	1.847	0.01	2.124	0.944	1.365	
6	3.058	2.186		1.509	0.606	0.893	
7	1.488	1.19		0.595	0.154	0.205	
8	0.441	0.164		0.041		0.021	
≥9							

Πίνακας 6.9 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (2001-2004).

2001-2004							
BEAUF	B	BA	A	N	Δ	ΒΔ	ΑΠΝΟΙΑ
0							28.559
1	0.000	0.022	0.378	0.489	0.000	0.022	
2	6.773	15.812	0.089	0.711	4.508	2.665	
3	3.109	5.396	0.000	0.822	2.021	3.820	
4	1.443	1.910	0.022	1.177	0.866	2.465	
5	1.266	1.532	0.000	1.110	1.110	2.532	
6	1.488	1.355	0.000	0.844	0.489	0.999	
7	0.688	0.955	0.022	0.222	0.333	0.777	
8	0.333	0.289			0.022	0.555	
≥9							

Η μεγαλύτερη αλλαγή, η οποία παρατηρείται στους παραπάνω πίνακες και επηρεάζει άμεσα την περιοχή μελέτης, το Ρέθυμνο, είναι η αύξηση της έντασης και της συχνότητας των ανέμων που πνέουν βόρεια. Οι μετρήσεις τα πρώτα έτη λειτουργίας του σταθμού μέχρι και το 1960, δείχνουν ότι η μέγιστη ένταση του βόρειου ανέμου αντιστοιχεί σε 5 Beaufort, όταν τα διαστήματα 1979 - 1984 και αργότερα 1995 - 2000, η αντίστοιχη μέγιστη ένταση αντιστοιχεί σε 8 Beaufort. Μάλιστα, την τελευταία περίοδο η συχνότητα εμφάνισης ανέμων έντασης 8 Beaufort, είναι μεγαλύτερη από την περίοδο 1979-1984 (συχνότητες εμφάνισης 0.091% και 0.441% αντίστοιχα). Όμοια, αλλαγές τόσο στην ένταση όσο και στη συχνότητα πνοής παρατηρούνται και για τις άλλες δύο κρίσιμες διευθύνσεις βορειοανατολική και βορειοδυτική με το πέρασμα των χρόνων. Ενδεικτικά αναφέρεται η αύξηση της έντασης της πνοής των δύο αυτών διευθύνσεων από τα 4 στα 8 Beaufort. Τελικά, συγκεντρώνονται τα στοιχεία από όλα τα χρονικά διαστήματα σε έναν, τον τελικό και αποτυπώνονται στον Πίνακα 6.10.

Πίνακας 6.10 Πίνακας συχνοτήτων πνοής ανέμου για την περιοχή του Ρεθύμνου (1957-2004).

	Beaufort	B	BA	A	N	Δ	ΒΔ	ΑΠΝΟΙΑ	ΑΘΡΟΙΣΜΑ
ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΕΜΥ - μετρήσεις ανά 3hr (1957-2004)	0							14.89	14.89
	1	3.26	0.76	0.22	1.86	0.27	1.33		7.70
	2	10.50	9.07	1.34	6.52	2.00	3.93		33.35
	3	5.11	3.98	0.34	2.85	1.00	2.18		15.46
	4	4.00	2.18	0.11	3.55	0.68	1.80		12.33
	5	2.17	1.19	0.03	2.26	0.44	1.12		7.21
	6	1.84	1.22		1.47	0.27	0.76		5.57
	7	0.92	0.78		0.67	0.08	0.35		2.80
	8	0.29	0.15		0.17	0.01	0.08		0.69
≥9									
ΑΘΡΟΙΣΜΑ		28.09	19.33	2.05	19.33	4.75	11.55	14.89	100

6.4 Ιστορικό πλημμυρών Ρεθύμνου

Αναφορικά με τα προηγούμενα, και εστιάζοντας στην περιοχή της Κρήτης, παρατηρείται ότι εμφανίζονται συχνότερα φαινόμενα πλημμυρών παρά τη βελτίωση των αντιπλημμυρικών έργων. Ειδικότερα το Ρέθυμνο, έχει πληγεί αρκετές φορές από σημαντικές πλημμύρες στην Παλιά Πόλη, στην κεντρική περιοχή αλλά και προς τα ανατολικά στις πεδινές περιοχές. Τα γεγονότα που εμφανίστηκαν όλα τα χρόνια, προέρχονται από τα όμβρια ύδατα της ανάντη περιοχής για την πόλη του Ρεθύμνου αλλά και από τη δημιουργία κυμάτων καταιγίδας. Αποτέλεσμα των τελευταίων, είναι η δημιουργία κυματικών υπερπηδήσεων στην περιοχή του λιμένα του Ρεθύμνου και εμφάνιση πλημμύρας στο εσωτερικό του και στην ευρύτερη παράκτια περιοχή. Σε συνδυασμό με το θαλασσινό νερό που εισέρχεται στα δυτικά εμφανίζονται προβλήματα στη θέση του χώρου στάθμευσης, πλημμυρίζει η επιφάνεια του λιμανιού και άρα εμφανίζονται προβλήματα στις διαδικασίες του (στο εμπορικό τμήμα του λιμένα – φόρτωσης και εκφόρτωσης) καθώς και κυκλοφορικά προβλήματα, ζημιές σε παράκτια καταστήματα αλλά και φαινόμενα διάβρωσης στις παραλίες τριγύρω.

Από αυτόπτες μάρτυρες ή από τα μέσα μαζικής ενημέρωσης έχουν καταγραφεί κάποια πλημμυρικά γεγονότα που σχετίζονται με το λιμάνι και άρα με κύματα καταιγίδας μέχρι σήμερα. Πιο συγκεκριμένα:

- (α) Στις 19 - 20 Νοεμβρίου 1964 βόρειοι και βορειοδυτικοί άνεμοι έπληξαν το νησί, οι οποίοι προκάλεσαν θαλασσοταραχή ικανή να προξενήσει μεγάλες ζημιές στα λιμενικά έργα του Ρεθύμνου
- (β) Στις 29 Φεβρουαρίου 1968 προκλήθηκε κακοκαιρία κυρίως στη δυτική Κρήτη και κατέστρεψε μέρος και του λιμανιού του Ρεθύμνου
- (γ) Στις 5 Φεβρουαρίου 1989 σημειώθηκε σφοδρή καταιγίδα με λίγη βροχή και ανεμοθύελλα από δυτικά και βορειοδυτικά που προκάλεσε αρκετές ζημιές στην πόλη του Ρεθύμνου, ακόμα και σε κατοικίες, καθώς και μικροναυάγια και ζημιές στα γύρω παράλια

- (δ) Στις 10 - 13 Δεκεμβρίου 1991 κύματα κακοκαιρίας εμφανίστηκαν πάλι αρχικά με νοτιοδυτικούς και στη συνέχεια με βόρειους ανέμους, με αποτέλεσμα να προκληθούν ζημιές αρχικά στη νότια και έπειτα στη βόρεια Κρήτη και άρα και στο λιμάνι του Ρεθύμνου και την αμμώδη παραλία (Σχήμα 6.7)
- (ε) Στις 30 Ιανουαρίου 1994 σημειώθηκε έντονη κακοκαιρία με βόρειους – βορειοδυτικούς ανέμους που προκάλεσαν ζημιές στα δίκτυα και έντονη θαλασσοταραχή με ζημιές στο λιμάνι του Ρεθύμνου και τα γύρω καταστήματα
- (στ) Στις 26 - 29 Νοεμβρίου 2000 δημιουργήθηκαν ζημιές και πάλι στο λιμάνι του Ρεθύμνου λόγω σφοδρών βόρειων ανέμων
- (ζ) Στις 1-5 Δεκεμβρίου 2001 σημειώθηκε συνεχής κακοκαιρία με βόρειους – βορειοδυτικούς ανέμους που προκάλεσαν ζημιές στο Ρέθυμνο
- (η) Στις 27 Ιανουαρίου 2003 σφοδροί βορειοανατολικοί άνεμοι προκάλεσαν θαλασσοταραχή στη δυτική Κρήτη με μικροζημιές στο λιμάνι του Ρεθύμνου



Σχήμα 6.7 Πλημμύρα στο λιμένα του Ρεθύμνου (αριστερά) και στην αμμώδη παραλία (δεξιά), κατά τη διάρκεια καταιγίδας το έτος 1991 (Πηγή: Archodakis D.).

Πιο πρόσφατα γεγονότα έχουν καταγραφεί από μαρτυρίες και αφορούν στην κυματική καταιγίδα στις 11 Δεκεμβρίου 2010 (Σχήμα 6.8) όπου παρασύρθηκαν οχήματα στο χώρο στάθμευσης στη γένεση του προσήνεμου μόλου, στις 28 Φεβρουαρίου 2012 (Σχήμα 6.9) και στις 3 Δεκεμβρίου 2013 όπου εμφανίστηκαν ακραίες κυματικές υπερπηδήσεις με εμφανείς ζημιές στα λιμενικά έργα (Σχήμα 6.10) και στις 13 Ιανουαρίου 2015 με τον κατακλυσμό των εγκαταστάσεων του λιμένα (Σχήμα 6.11).



Σχήμα 6.8 Κατάκλυση θαλασσινού νερού λόγω κυματικής υπερπήδησης, στις εγκαταστάσεις του λιμένα του Ρεθύμνου το 2010.



Σχήμα 6.9 Πλημμύρες εντός των λιμενικών εγκαταστάσεων του Ρεθύμνου (δεξιά) και στην αμμώδη παραλία (αριστερά), από κυματική καταιγίδα που συνέβη το 2012.



Σχήμα 6.10 Εμφάνιση κυματικής υπερπήδησης λόγω κυματικής καταιγίδα το 2013 (αριστερά) και καταστροφές στη βάση του προσήνεμου μόλου (δεξιά) την ίδια χρονιά (Πηγή: Drygiannakis P.).



Σχήμα 6.11 Πρόσφατη πλημμύρα στο λιμένα του Ρεθύμνου το 2015. Στο βάθος διακρίνεται η υπερπήδηση της κατασκευής λόγω των υψηλών κυματισμών.

7 Αποτελέσματα

7.1 Πρόγνωση κυματισμών στο Ρεθύμνο

Για το κυματικό κλίμα στα ανοιχτά της περιοχής του Ρεθύμνου, υπολογίζεται το σημαντικό ύψος κύματος H_0 και η περίοδος αιχμής T_p σύμφωνα με τη μεθοδολογία όπως περιγράφηκε προηγουμένως (Κεφάλαιο 4.2). Η περιοχή του Ρεθύμνου εκτίθεται σε βόρειους, βορειοανατολικούς και βορειοδυτικούς ανέμους και υπολογίζεται το ενεργό μήκος αναπτύγματος των κυματισμών μέσω του χάρτη από το Google Earth κλίμακας 1:100000 (Σχήμα 7.1). Χαράσσονται από το σημείο αναφοράς ευθείες ανά 5° και για εύρος $\pm 45^\circ$ από την εξεταζόμενη διεύθυνση, μέχρι να τμήσουν στεριά, οπότε και προσδιορίζεται το μήκος τους R_i . Και τελικά το ενεργό μήκος ανάπτυξης του κυματισμού για κάθε διεύθυνση (Παράρτημα Α).

Συγκεντρώνοντας λοιπόν, τις παραμέτρους F_{eff} , t_D , U_{10} , και ακολουθώντας τη μεθοδολογία όπως περιγράφεται στην ενότητα 4.2.2 (μεθοδολογία πρόγνωσης κυματισμών SMB), προκύπτει η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει το ύψος H_s και η περίοδος T_p του κύματος στα βαθιά για κάθε διεύθυνση ανέμου που επιδρά στην περιοχή (B, BA, ΒΔ άνεμος), με γνώμονα τα ανεμολογικά δεδομένα του σταθμού του Ρεθύμνου (και του συγκεντρωτικού πίνακα συχνοτήτων, κεφάλαιο 6).

Πίνακας 7.1 Πρόγνωση κυματισμών για τις τρεις διευθύνσεις στην περιοχή του Ρεθύμνου.

Διεύθυνση	F_{eff} (m)	t_d (s)	U_{10} (m/s)	H_s (m)	T_p (s)
BA	150208	46043	19.10	4.08	8.03
B	176593	90508	19.10	4.33	8.28
ΒΔ	113795	23967	19.10	3.57	7.49

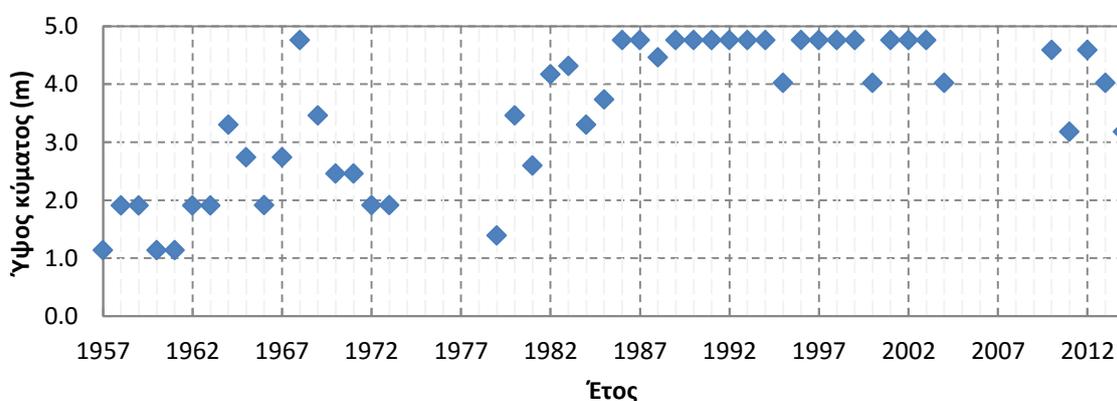
Κατά τη βιβλιογραφία, μεγαλύτερο βαθμό υπερπήδησης προκαλεί κυματισμός ο οποίος προσεγγίζει κάθετα το παράκτιο μέτωπο. Στα πλαίσια λοιπόν της παρούσας εργασίας και εφ' όσον εκτιμάται η δυσμενέστερη περίπτωση της κυματικής υπερπήδησης, δίνεται έμφαση στους κυματισμούς της βόρειας διεύθυνσης. Εξ' άλλου όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.1, πρόκειται το χαρακτηριστικό ύψος κύματος της βόρειας διεύθυνσης έχει τη μεγαλύτερη τιμή από τις άλλες δύο (βορειοανατολική και βορειοδυτική), καθώς και τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης και άρα τη μεγαλύτερη διάρκεια πνοής.

7.2 Ανάλυση ακραίων κυματισμών

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μέσω της Θεωρίας των Ακραίων Τιμών, είναι δυνατόν ωκεανογραφικά στοιχεία (ύψος κύματος, περίοδος κύματος, ένταση ανέμου), τα οποία εμφανίζουν φαινόμενα συσχέτισης, να εξεταστούν πιθανοτικά. Στόχο αυτού, αποτελεί η εκτίμηση των οριακών συνθηκών ώστε να βελτιστοποιηθούν παράκτιες κατασκευές με βάση την επικινδυνότητα. Οι Towler, *et al.* (2011) ασχολήθηκαν με την ανάλυση ακραίων φαινομένων που εμφανίζονται κατά τον υδρολογικό κύκλο λόγω της επίδρασης της Κλιματικής Αλλαγής και με τις επιπτώσεις στην ποιότητα των υδάτων, ενώ πιο πρόσφατα οι Rueda, *et al.* (2016), δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία αφορά στην στατιστική ανάλυση ακραίων υψών κύματος σε τρεις περιοχές του Βόρειου Ατλαντικού ωκεανού. Παρόμοιες περιβαλλοντικές αναλύσεις ακραίων φαινομένων πραγματοποίησαν οι Northrop and Jonathan (2011), οι Galiatsatou *et al.* (2012) για τις πλημμύρες στη Βάρνα της Βουλγαρίας και οι Kokkinos *et al.* (2014), για την τρωτότητα δύο παράκτιων περιοχών στο Αιγαίο. Ακολουθώντας τα παραπάνω, η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάλυση ακραίων τιμών του κυματικού κλίματος της παράκτιας περιοχής του Ρεθύμνου και πιο συγκεκριμένα της περιοχής του λιμένα. Εξετάστηκαν διάφορες κατανομές (GEV, Gumbel, Pareto) καθώς και διάφορες μέθοδοι για την εκτίμηση των παραμέτρων κλίμακας, σχήματος και θέσης (L-moments, MLE). Σύμφωνα με την προσαρμογή της χρονοσειράς των ακραίων τιμών ύψους κύματος στην καμπύλη συχνότητας επιλέγονται οι βέλτιστες (GEV, Gumbel), όπως και στην εργασία των Galiatsatou *et al.* (2012).

7.2.1 Συλλογή δεδομένων

Από το σταθμό λειτουργίας της Ε.Μ.Υ. στο Ρέθυμνο συγκεντρώθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα έντασης και διεύθυνσης του ανέμου από το 1957 – 2004, με μία μικρή παύση από το 1973 – 1979 λόγω βλάβης του σταθμού. Επιπλέον, από το σταθμό λειτουργίας του ΜΕΤΕΟ στο Ρέθυμνο συγκεντρώθηκαν όλα τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα από το 2010 – 2014. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε και αναλύθηκε στατιστικά στην παρούσα εργασία προέκυψε από τα παραπάνω δεδομένα και αφορά στις μέγιστες ετήσιες τιμές του χαρακτηριστικού ύψους κύματος που εμφανίστηκε στην περιοχή μελέτης για τη βόρεια διεύθυνση (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1 Μέγιστες τιμές του ύψους κύματος που εμφανίστηκαν από το 1957 έως το 2014.

Τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος (και οι αντίστοιχες περίοδοι), υπολογίστηκαν μέσω της μεθόδου SMB. Για τη βόρεια διεύθυνση, το ισοδύναμο ανάπτυσμα αντιστοιχεί σε 176.593 km, η ταχύτητα πνοής του ανέμου ανάγεται στα 10 m, και σαν διάρκεια πνοής για την κάθε περίπτωση $t_a \geq 35700 \text{ s} \approx 10 \text{ hr}$ (η ελάχιστη διάρκεια που αρχίζουν να εμφανίζονται fetch – limited συνθήκες), ώστε να επιτευχθεί μία πιο κρίσιμη προσέγγιση. Τελικά συγκεντρώνονται τα 48 στο σύνολό τους, δεδομένα ύψη κύματος τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή της μεθόδου Block – Maxima. Από την εργασία των Galitsastou *et al.* (2012), προκύπτει ότι ο αριθμός των δεδομένων της χρονοσειράς είναι ικανοποιητικός εφ’ όσον πρόκειται για ομάδες ετήσιων ακραίων τιμών.

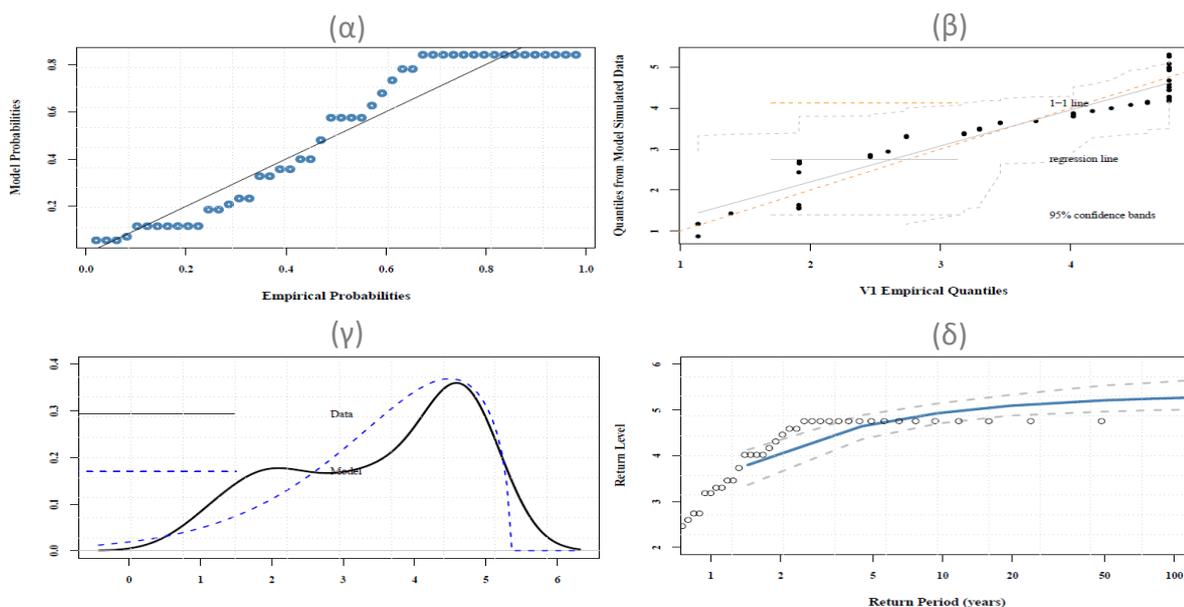
7.2.2 Προσαρμογή σε κατανομή GEV

Στη χρονοσειρά των υψών κύματος, εφαρμόστηκε η Γενικευμένη Ακραία Κατανομή (Generalized Extreme Value), η οποία υποθέτει μία ομοιογενή κατανομή των ακραίων τιμών κάθε έτος, ενώ η εκτίμηση των παραμέτρων έγινε με τη μέθοδο των L - ροπών (L-moments) ακολουθώντας τις σχέσεις 3.15 – 3.17 (Πίνακας 7.2).

Πίνακας 7.2 Οι τιμές των παραμέτρων της κατανομής GEV (L-moments).

Παράμετροι	
location μ	3.3414815
scale σ	1.4062398
shape ξ	-0.7044277

Η προσαρμογή της χρονοσειράς στην GEV κατανομή, πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού «extRemes», και αποτυπώνεται μέσω των τεσσάρων διαγραμμάτων που συγκεντρώνονται στο Σχήμα 7.2.



Σχήμα 7.2 Διαγράμματα προσαρμογής της χρονοσειράς στη GEV κατανομή.

Στο πρώτο από τα τέσσερα διαγράμματα (α), εμφανίζεται η σχέση μεταξύ των παρατηρήσεων (δεδομένα εισόδου) και του μοντέλου. Παρατηρείται μία σχετικά καλή σχέση μεταξύ των δύο, κατά την προσαρμογή τους στην κατανομή. Για εύρος διαστημάτων εμπιστοσύνης ίσο με 95%, παρατηρείται ότι όλες οι εμπειρικές παρατηρήσεις περιέχονται εντός του χωρίου, ενώ στο διάγραμμα πυκνότητας (γ), παρατηρείται ότι η κατανομή των παρατηρήσεων προσεγγίζει σχεδόν καλά αυτή του μοντέλου, παρουσιάζοντας ανάλογη ουρά. Τελικά, από τα παραπάνω κατασκευάζεται το τελευταίο διάγραμμα (δ), το οποίο αποτυπώνει τα επίπεδα επαναφοράς. Η συνεχής γραμμή αποτυπώνει το μέσο επίπεδο και οι διακεκομμένες εμπεριέχουν το 95% διάστημα εμπιστοσύνης με τη μέθοδο των L – ροπών. Οι παρατηρήσεις αντιπροσωπεύονται από τους κύκλους. Οι εκτιμήσεις οι οποίες μπορούν να γίνουν αποδεκτές, είναι εκείνες οι οποίες περιέχονται εντός των ορίων των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%. Σύμφωνα με το τελευταίο διάγραμμα (δ), αυτό που παρατηρείται είναι ότι συντηρητικά, μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές οι τιμές που αντιστοιχούν σε περίοδο επαναφοράς μέχρι τα 75 έτη. Από το χρονικό διάστημα των 20 ετών οι εκτιμώμενες τιμές ξεφεύγουν από το μέσο επίπεδο, αλλά και από τα όρια των διαστημάτων εμπιστοσύνης, ωστόσο για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, εκμεταλλεύτηκαν τα αποτελέσματα έως τα 75 έτη.

Τελικά, στον Πίνακα 7.3, παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις του χαρακτηριστικού ύψους κύματος, που προκύπτουν μέσω του «extRemes» και αντιστοιχούν σε περιόδους επαναφοράς των 25, 50, 75 χρόνων.

Πίνακας 7.3 Το ύψος κύματος συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς (GEV).

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	GEV (L - moments)	
	Hs (m)	Tp (s)
25	5.13	8.98
50	5.21	9.06
75	5.24	9.08

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 7.3, ο μέγιστος κυματισμός που μπορεί να εμφανιστεί σε διάστημα 75 ετών, εμφανίζει χαρακτηριστική τιμή του ύψους κύματος $H_s = 5.24$ m και αντίστοιχη περίοδο $T_p = 9.08$ s.

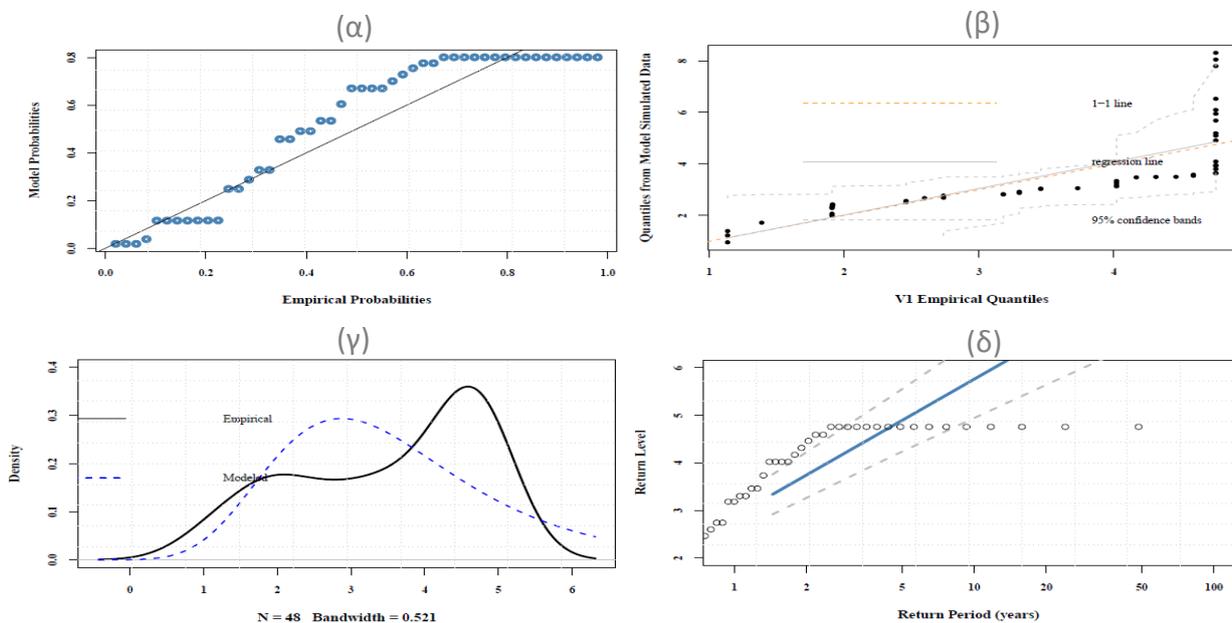
7.2.3 Προσαρμογή σε κατανομή Gumbel

Σε αυτή την περίπτωση, η χρονοσειρά των μέγιστων ετήσιων τιμών του χαρακτηριστικού ύψους κύματος προσαρμόζεται σε κατανομή Gumbel, η οποία αποτελεί υποπερίπτωση της Γενικευμένης Κατανομής (GEV) (βλ. Κεφάλαιο 3.1). Εδώ, η εκτίμηση των παραμέτρων της κατανομής πραγματοποιείται μέσω της μεθόδου της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (MLE), για τις παραμέτρους θέσης και κλίμακας μόνο σύμφωνα με τη σχέση 3.20, αφού για την παράμετρο σχήματος, ισχύει ότι $\xi \rightarrow 0$ (Πίνακας 7.4).

Πίνακας 7.4 Οι τιμές των παραμέτρων της κατανομής Gumbel (MLE).

Παράμετροι	
location μ	2.873257
scale σ	1.253212

Εφαρμόζοντας και πάλι το λογισμικό «extRemes», προκύπτουν τα διαγράμματα του Σχήματος 7.3. Αυτό που παρατηρείται είναι απόκλιση μεταξύ της κατανομής του μοντέλου (Gumbel) και των δεδομένων. Ενώ πρόκειται για μία κεντρική κατανομή, το μοντέλο εμφανίζει ελαφριά ουρά, σε αντίθεση με τη βαριά ουρά των μετρήσεων στο διάγραμμα της πυκνότητας της κατανομής (γ). Επιπλέον, στο (δ) διάγραμμα οι προβλεπόμενες τιμές επαναφοράς, ξεφεύγουν των ορίων των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% αρκετά χωρίς να ακολουθούν το μέσο επίπεδο αναφοράς (συνεχής γραμμή).



Σχήμα 7.3 Διαγράμματα προσαρμογής της χρονοσειράς στην Gumbel κατανομή.

Πράγματι, οι εκτιμήσεις του μέγιστου ύψους κύματος που προκύπτουν (Πίνακας 7.6), παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση συγκριτικά με την προηγούμενη εφαρμογή (GEV). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για περίοδο αναφοράς τα 75 έτη, εκτιμάται μέγιστο ύψος κύματος το οποίο αντιστοιχεί σε 8.28 m της κατανομής Gumbel, και είναι αυξημένο περισσότερο από 1.5 φορά συγκριτικά με την GEV.

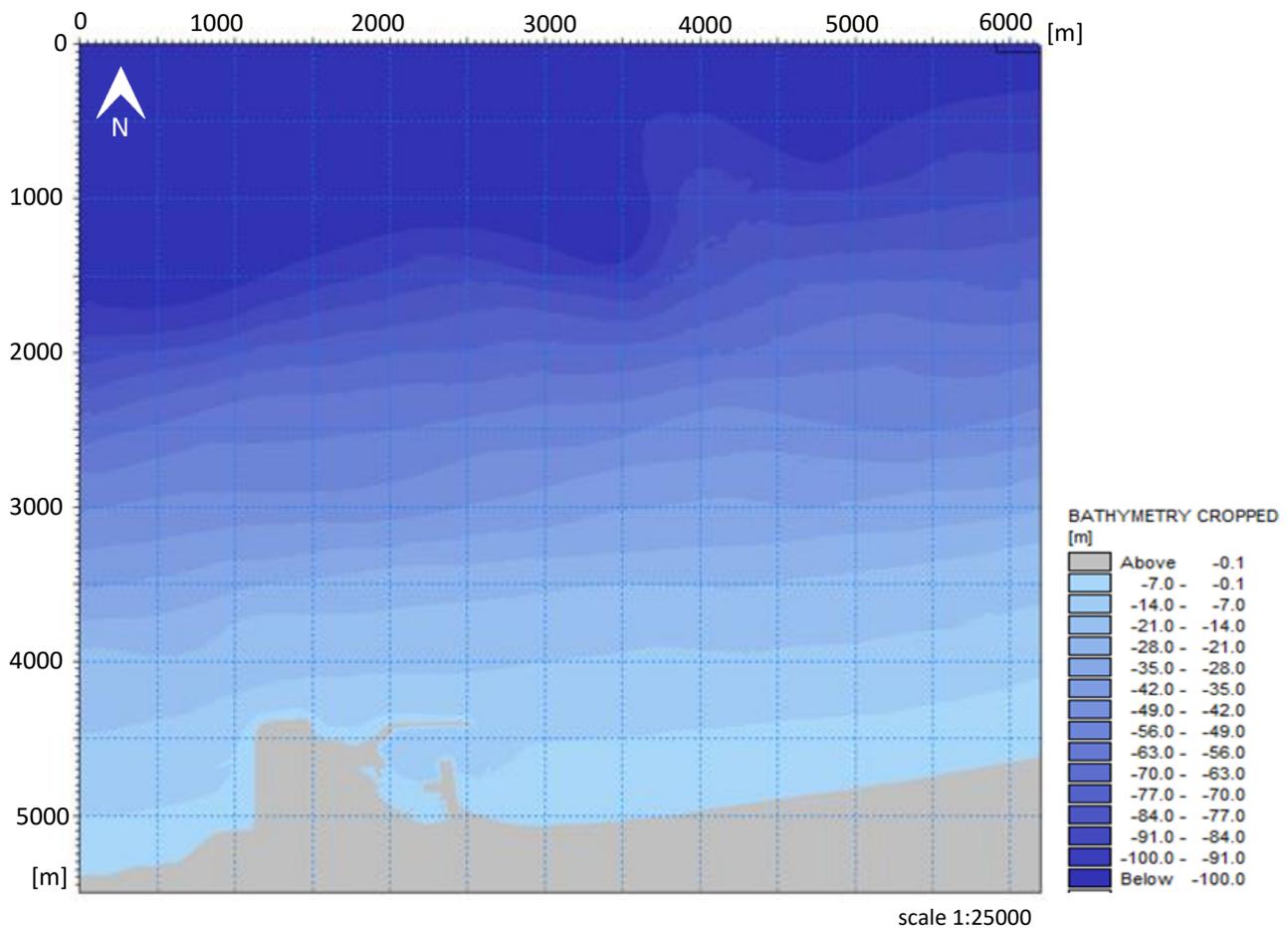
Πίνακας 7.5 Το ύψος κύματος συναρτήσει της περιόδου επαναφοράς (Gumbel).

Περίοδος επαναφοράς (έτη)	Gumbel (MLE) Hs (m)
25	6.88
50	7.76
75	8.28

Συμπερασματικά, από τις δύο εφαρμόσιμες μεθόδους της χρονοσειράς των ακραίων παρατηρήσεων των ετήσιων υψών κύματος της περιοχής του Ρεθύμνου, θεωρείται πιο αξιόπιστη και εφαρμόσιμη η προσαρμογή σε GEV και τα αποτελέσματα που περιέχονται στον Πίνακα 7.4.

7.3 Προσομοίωση των κυματισμών στα ρηγά του λιμένα του Ρεθύμνου

Η βαθυμετρία της ευρύτερης περιοχής του λιμένα του Ρεθύμνου, κατασκευάστηκε στα πλαίσια της μελέτης των Tsoukala *et al.* (2016) και χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Αποτυπώνεται σε κানাβο διαστάσεων 6.2x5.5 km (x, γ άξονες), με χωρικό βήμα $\Delta x = \Delta y = 5$ m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.5.

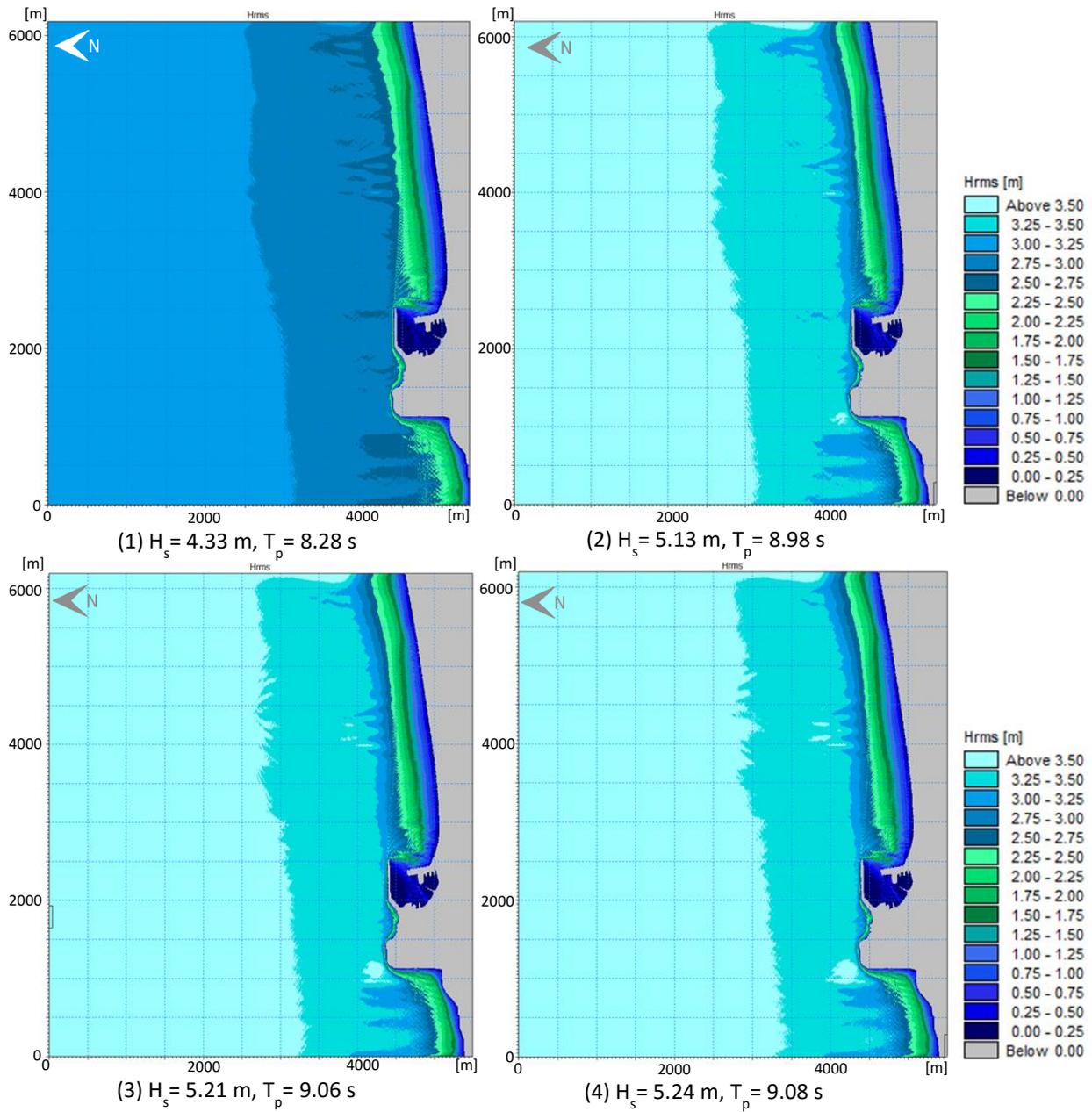


Σχήμα 7.4 Κানাβος της βαθυμετρίας της περιοχής του Ρεθύμνου.

Κατά σύμβαση, στο μοντέλο MIKE 21 PMS, ο κυματισμός εισέρχεται από το δυτικό όριο του κανάβου πάντα, το οποίο είναι ανοιχτό οπότε και η βαθυμετρία του Σχήματος 7.4 πρέπει να περιστραφεί κατά 90° αριστερά, ώστε να εισέρχεται ο βόρειος κυματισμός σωστά. Οι χαρακτηριστικές τιμές του ύψους κύματος και της αντίστοιχης περιόδου για τη βόρεια διεύθυνση και για κάθε μία από τις περιπτώσεις που προέκυψαν από την προσαρμογή της ακραίας χρονοσειράς κυματισμών σε κατανομή GEV (για τις διάφορες περιόδους επαναφοράς), εισάγονται ως δεδομένα εισόδου στο πρόγραμμα. Επιπλέον, εισάγεται σαν δεδομένο εισόδου και το ζευγάρι (H_s, T_p) το οποίο προκύπτει μέσω της μεθόδου SMB και αφορά στο χαρακτηριστικό ύψος κύματος για την περίοδο 1957 - 2004. Συγκεντρωτικά τα ζεύγη κυματισμών που εισάγονται σαν δεδομένα στο μοντέλο:

- (1) $H_s = 4.33 \text{ m}$, $T_p = 8.28 \text{ s}$
- (2) $H_s = 5.13 \text{ m}$, $T_p = 8.98 \text{ s}$
- (3) $H_s = 5.21 \text{ m}$, $T_p = 9.06 \text{ s}$
- (4) $H_s = 5.24 \text{ m}$, $T_p = 9.06 \text{ s}$

Τελικά προκύπτουν το μέσο ύψος κύματος (H_{rms}) και η αντίστοιχη περίοδος του κυματισμού (T_p), σε όλη την παράκτια περιοχή (Σχήμα 7.6) και άρα και στις θέσεις του έργου που χρειάζονται για την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης (βλ. Κεφάλαιο 7.4).



Σχήμα 7.5 Κατανομή του ύψους κύματος στην περιοχή του Ρεθύμνου για τα διάφορα σενάρια εισερχόμενων κυματισμών.

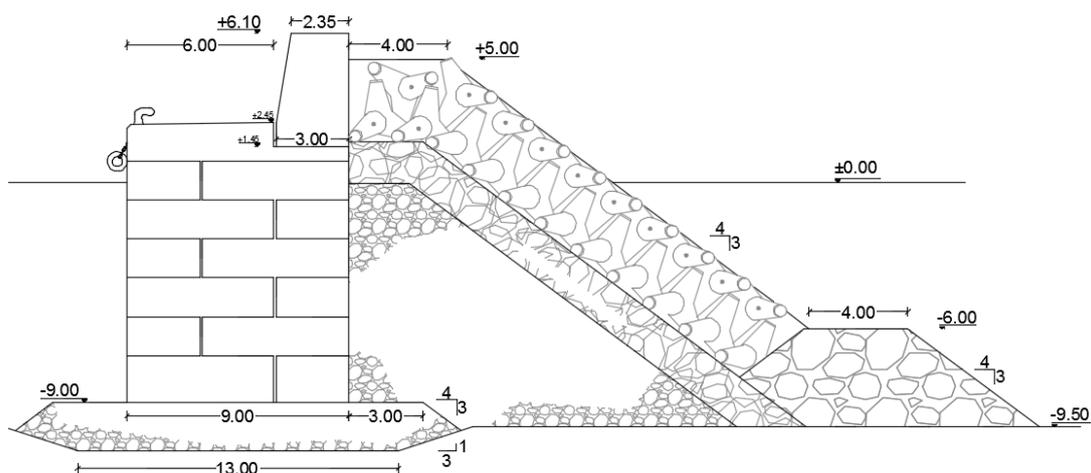
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.5 και στις τέσσερις περιπτώσεις είναι εμφανής η επίδραση του πυθμένα στην πορεία του κυματισμού προς τα ρηχά, όπως επίσης και η επίδραση της παράκτιας κατασκευής εντός της λιμενολεκάνης, η οποία εκδηλώνεται με το φαινόμενο της περίθλασης. Επιπλέον και όπως είναι αναμενόμενο, μεγαλύτερο ύψος εισερχόμενου κυματισμού, δημιουργεί μεγαλύτερα ύψη κύματος σε ολόκληρο το πεδίο. Οι πληροφορίες από την εφαρμογή του μοντέλου τελικά συλλέγονται και αξιοποιούνται για την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης στον προσήνεμο μόλο και δυτικά αυτού, όπως αναλύεται στην επόμενη ενότητα (7.4).

7.4 Κυματική υπερπήδηση

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται η εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης σε τέσσερις διατομές στο λιμένα του Ρεθύμνου. Από τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν από το μοντέλο MIKE 21 PMS, παρέχεται η εικόνα των κυματισμών στα ρηχά και συνεπώς και στην περιοχή μελέτης και τα σημεία ενδιαφέροντος όπως αποτυπώνονται στο Σχήμα 7.6. Η διατομή Γ-Γ' και Δ-Δ', δεν αναγράφονται στο σχήμα, καθώς η θέση τους ταυτίζεται με τη διατομή Α-Α'.

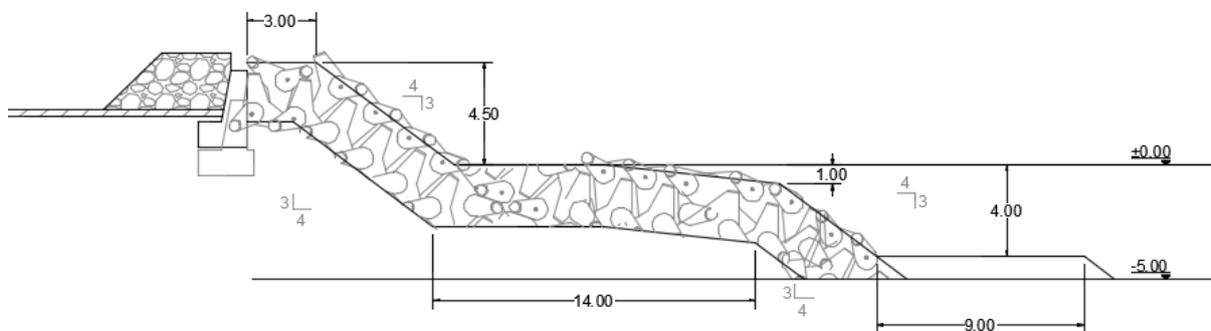


Σχήμα 7.6 Διατομή Α-Α' και διατομή Β-Β', που θα χρησιμοποιηθούν για την κυματική υπερπήδηση.



Σχήμα 7.7 Σκαρίφημα διατομής A-A' του προσήνεμου μόλου.

Αναλυτικότερα, η διατομή A-A' (Σχήμα 7.7) αφορά στην τυπική διατομή του προσήνεμου μόλου και η διατομή B-B' (Σχήμα 7.8), αποτελεί την προτεινόμενη από τη μελέτη του Λιμενικού Ταμείου Ρεθύμνου (2015), προκειμένου να βελτιωθεί προσωρινά η θωράκιση στη γένεση του προσήνεμου μόλου του λιμένα του Ρεθύμνου, μέχρι την οριστική μελέτη. Πιο συγκεκριμένα, η διατομή B-B', βρίσκεται στο χώρο στάθμευσης στη γένεση του προσήνεμου μόλου, όπου λόγω ανεπαρκούς κυρίως στέψης, επιτρέπει την εμφάνιση φαινομένων κυματικής υπερπήδησης και τελικά την κατάκλιση του χώρου. Έτσι μέσω του Λιμενικού Ταμείου του Ρεθύμνου, προτείνεται η προσωρινή αποκατάσταση της θωράκισης στον προφυλακτήριο τοίχο για την αποκατάσταση των ζημιών και την προστασία απέναντι στα φαινόμενα της κυματικής υπερπήδησης. Η μελέτη περιλαμβάνει εκτός από την επισκευή του δαπέδου στο χώρο στάθμευσης, την ανακατασκευή της θωράκισης με ακκρόποδα (accropodes) και του πόδα με φυσικούς ογκολίθους.



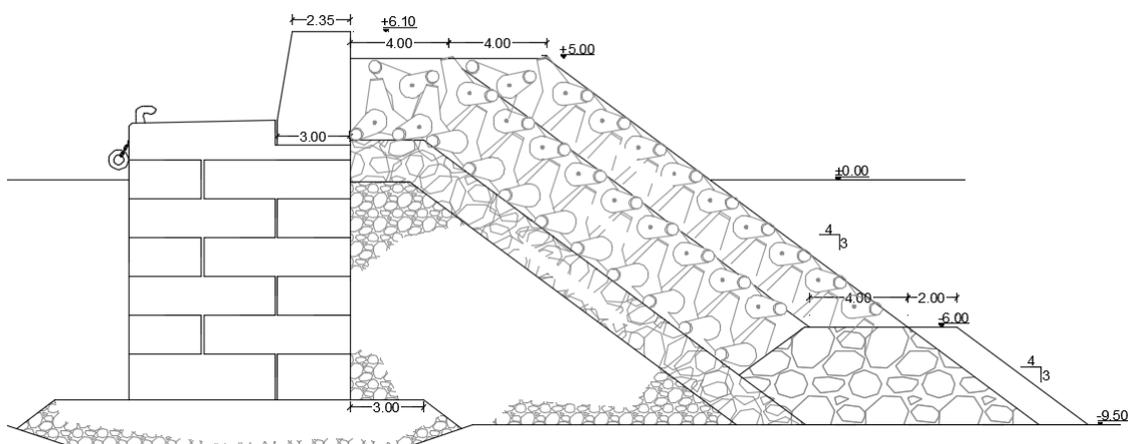
Σχήμα 7.8 Σκαρίφημα προτεινόμενης διατομής B-B' στη γένεση του προσήνεμου μόλου.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένας πρόχειρος προϋπολογισμός, ο οποίος αφορά στη δαπάνη των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν για την ενίσχυση της διατομής. Δεν περιλαμβάνονται οι δαπάνες που αφορούν τους μισθούς, τη λειτουργία των εργοταξιακών εγκαταστάσεων, τη διάθεση των μηχανολογικών εξοπλισμών ή άλλων πρόσθετων υλικών εκτός των υλικών θωράκισης. Για την εκτίμηση των δαπανών αυτών λοιπόν, χρησιμοποιήθηκε το τιμολόγιο που αφορά στα λιμενικά έργα, περιέχει τις τιμές μονάδος των εργασιών που είναι απαραίτητες για την ολοκλήρωση ενός λιμενικού έργου και περιλαμβάνεται στο ΦΕΚ 63B/19-2-2013. Η οικονομική δαπάνη σε €/m μήκους της Διατομής Β-Β', αναγράφεται στον Πίνακα 7.6.

Πίνακας 7.6 Προϋπολογισμός μελέτης προτεινόμενης διατομής από Λιμενικό Ταμείο Ρεθύμνου.

Είδος Εργασιών	Κωδικός Άρθρου	Κωδικός Αναθεώρησης	Μον. Μετρ.	Όγκος (m ³ /m)	Τιμή Μονάδας (€)	Δαπάνη (€/m)
ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ						
Θωράκιση με accropodes - ειδικό τεχνητό ογκόλιθοι θωράκισης	ΝΑΛΙΜ 5.03	ΛΙΜ 3400	m ³	77.02	120.00	9242.40
Θωράκιση πόδα με φυσικούς ογκόλιθους προέλευσης λατομείου ατομικού βάρους 2.5 - 4.0 tn	ΝΑΛΙΜ 4.08.03	ΛΙΜ 2320	m ³	8.90	16.00	142.40
ΣΥΝΟΛΟ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ						9384.80

Από τη διπλωματική εργασία της Πλαβούκου (2016) εξετάστηκε μία ακόμα εναλλακτική διατομή αναβάθμισης της χαρακτηριστικής διατομής του προσήνεμου μόλου (Διατομή Α-Α') με στόχο την βελτίωση της υφιστάμενης προστασίας απέναντι στις ζημιές αλλά και τη μείωση της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης. Προτάθηκε λοιπόν έπειτα από την εφαρμογή του τύπου του Hudson (Μέμος, 2008) ώστε να επιβεβαιωθεί η ευστάθεια των ογκολίθων θωράκισης, η προσθήκη τετραπόδων στο μέτωπο, οπότε προκύπτει η Διατομή Γ-Γ' (Σχήμα 7.9). Επίσης, προτείνει τη διαμόρφωση του πόδα με φυσικούς ογκολίθους, αφού ελέγξει την ευστάθειά τους, ώστε να βελτιώσει την ευστάθεια του συνόλου της κατασκευής, ενώ η κλίση του πρηνούς του κορμού και του πόδα, παραμένει ίδια. Όμοια με προηγουμένως, επιχειρείται επιπλέον ένας πρόχειρος προϋπολογισμός των υλικών θωράκισης του κορμού και του πόδα της προτεινόμενης διατομής σύμφωνα με το τιμολόγιο λιμενικών έργων του ΦΕΚ 63B/19-2-2013. Η θωράκιση του κορμού αποτελείται από τετράποδα (tetrapods), ενώ η θωράκιση του πόδα από φυσικούς ογκολίθους 1.5 – 2.5 tn. Η οικονομική δαπάνη της προτεινόμενης διατομής σε €/m μήκους της Διατομής Γ-Γ', αναγράφεται στον Πίνακα 7.7.

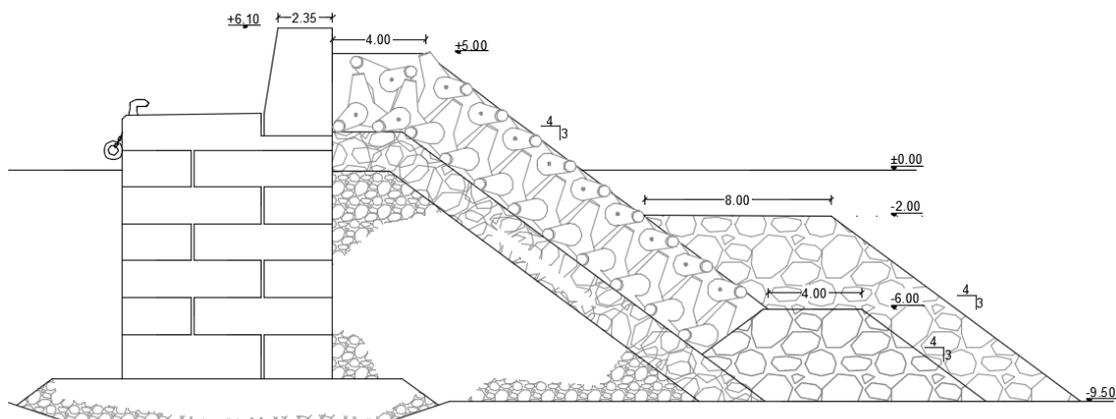


Σχήμα 7.9 Προτεινόμενη διατομή Γ-Γ' – προσθήκη ογκολίθων θωράκισης.

Πίνακας 7.7 Προϋπολογισμός μελέτης προτεινόμενης διατομής με προσθήκη ογκολίθων θωράκισης.

Είδος Εργασιών	Κωδικός Άρθρου	Κωδικός Αναθεώρησης	Μον. Μετρ.	Όγκος (m ³ /m)	Τιμή Μονάδας (€)	Δαπάνη (€/m)
ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ						
Θωράκιση με tetrapods - ειδικοί τεχνητοί ογκόλιθοι θωράκισης	NAΛΙΜ 5.03	ΛΙΜ 3400	m ³	42.80	120.00	5136.00
Θωράκιση πόδα με φυσικούς ογκόλιθους προέλευσης λατομείου ατομικού βάρους 1.5 – 2.5 tn	NAΛΙΜ 4.08.02	ΛΙΜ 2320	m ³	8.00	14.50	116.00
ΣΥΝΟΛΟ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ						5252.00

Επιπλέον, προτείνεται και η προσθήκη αναβαθμού ανάντη της χαρακτηριστικής διατομής με φυσικούς ογκολίθους, ώστε να ενισχυθεί η ευστάθεια του πόδα της κατασκευής, οπότε και προκύπτει η Διατομή Δ-Δ' (Σχήμα 7.10). Και στην περίπτωση αυτή, έχει παραμείνει ίδια η κλίση του πρανούς με αυτή της χαρακτηριστικής διατομής. Η θωράκιση του αναβαθμού είναι η ίδια με την χαρακτηριστική διατομή, δηλαδή αποτελείται από φυσικούς ογκόλιθους 1.5 – 2.5 tn. Και σε αυτήν την περίπτωση, εκτιμάται η οικονομική δαπάνη των απαιτούμενων για τον πόδα φυσικών ογκολίθων σε €/m μήκους, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7.8.



Σχήμα 7.10 Προτεινόμενη διατομή Δ-Δ' – προσθήκη αναβαθμού.

Πίνακας 7.8 Προϋπολογισμός μελέτης προτεινόμενης διατομής με προσθήκη αναβαθμού.

Είδος Εργασιών	Κωδικός Άρθρου	Κωδικός Αναθεώρησης	Μον. Μετρ.	Όγκος (m ³ /m)	Τιμή Μονάδας (€)	Δαπάνη (€/m)
ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ						
Θωράκιση πόδα με φυσικούς ογκόλιθους προέλευσης λατομείου ατομικού βάρους 1.5 – 2.5 tn	ΝΑΛΙΜ 4.08.02	ΛΙΜ 2320	m ³	48.40	14.50	701.80
ΣΥΝΟΛΟ ΛΙΜΕΝΙΚΑ ΕΡΓΑ						701.80

Γενικά, η εκτίμηση της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την περαιτέρω εκτίμηση μιας επικείμενης παράκτιας πλημμύρας και των επιπτώσεών της. Αυτό πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία, για κάθε μία από τις παραπάνω διατομές. Τα διαθέσιμα εργαλεία για την πρόβλεψή της, είναι μέσω των εμπειρικών σχέσεων όπως συγκεντρώνονται στο EurOtop, καθώς επίσης και μέσω του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου, όπως καταστρώθηκε στο Deltares | Delft Hydraulics (Κεφάλαιο 5).

7.4.1 Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω εμπειρικών σχέσεων

Στα εργαλεία του EurOtop (http://www.overtopping-manual.com/calculation_empirical.html), συγκεντρώνονται λοιπόν οι διαθέσιμοι εμπειρικοί τύποι, που αφορούν σε διάφορες διατάξεις παράκτιων διατομών. Αφού επιλεγεί η πιο αντιπροσωπευτική διατομή από τις διαθέσιμες, εισάγονται τα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής (H_{m0}, T_p) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, δηλαδή το ύψος και το πλάτος της στέψης της κατασκευής καθώς και ο συντελεστής που

αντιπροσωπεύει τη διαπερατότητα της κατασκευής (R_c, G_c, γ) και τελικά προκύπτει η μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης Q (l/s/m).

(1) Διατομή A-A'

Τα διαθέσιμα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής που βρίσκεται η χαρακτηριστική διατομή A-A' όπως προκύπτουν από τη μέθοδο SMB και την ανάλυση ακραίων τιμών είναι τα εξής:

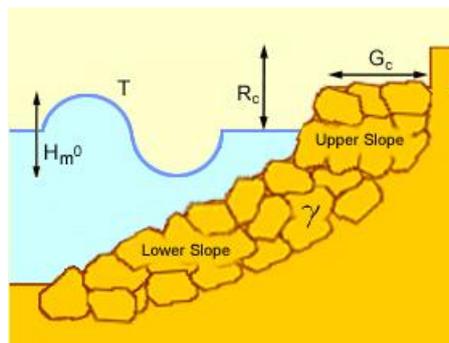
- (1) $H_{m0} = 3.96$ m, $T_p = 7.9$ s
- (2) $H_{m0} = 4.64$ m, $T_p = 8.5$ s
- (3) $H_{m0} = 4.67$ m, $T_p = 8.6$ s
- (4) $H_{m0} = 4.70$ m, $T_p = 8.6$ s

Και συγκεντρωτικά τα δεδομένα εισόδου και τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 7.9:

Πίνακας 7.9 Δεδομένα εισόδου και εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για τη διατομή A-A'.

	Δεδομένα Εισόδου				Αποτελέσματα	
	H_{m0} (m)	T_p (s)	R_c (m)	G_c (m)	γ	Q (l/s/m)
(1)	3.96	7.9	6.1	4	0.55	2.284
(2)	4.64	8.5	6.1	4	0.55	10.514
(3)	4.67	8.6	6.1	4	0.55	11.140
(4)	4.70	8.6	6.1	4	0.55	11.796

Η διατομή που επιλέχθηκε είναι αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 7.11 και πλησιάζει αρκετά την τυπική διατομή A-A' του προσήνεμου μόλου (Σχήμα 7.17).



Σχήμα 7.11 Η διατομή στο EurOtop που χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης (Πηγή: Eurotop Manual, 2007).

(2) Διατομή B-B'

Στα εργαλεία του EurOtop, η κυματική υπερπήδηση σε παρόμοιες διατομές σαν την προτεινόμενη διατομή B-B' στη γένεση του προσήνεμου μόλου, δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί μέσω των εμπειρικών σχέσεων. Αντί αυτού προτείνεται η χρήση άλλων μέσων

για την πρόβλεψη της παροχής της κυματικής υπερπήδησης, όπως είναι η χρήση των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (βλ. Ενότητα 7.4.2)

(3) Διατομή Γ-Γ'

Με κάποιες αλλαγές στη διαπερατότητα της χαρακτηριστικής διατομής και το πλάτος στέψης της, προκύπτει ο Πίνακας 7.10 της προτεινόμενης Διατομής Γ-Γ', στον οποίο εμπεριέχονται και τα αποτελέσματα από την εκτίμηση της μέσης κυματικής υπερπήδησης μέσω των διαθέσιμων εμπειρικών σχέσεων. Τα δεδομένα εισόδου που αφορούν στα κυματικά χαρακτηριστικά είναι τα ίδια με τη Διατομή Α-Α'.

Πίνακας 7.10 Δεδομένα εισόδου και εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για τη διατομή Γ-Γ'.

	Δεδομένα Εισόδου				Αποτελέσματα	
	H_{m0} (m)	T_p (s)	R_c (m)	G_c (m)	γ	Q (l/s/m)
(1)	3.96	7.9	6.1	8	0.38	0.019
(2)	4.64	8.5	6.1	8	0.38	0.179
(3)	4.67	8.6	6.1	8	0.38	0.195
(4)	4.70	8.6	6.1	8	0.38	0.211

(4) Διατομή Δ-Δ'

Για τη Διατομή Δ-Δ', οι προτεινόμενες αλλαγές στη χαρακτηριστική διατομή αφορούν στον πόδα της κατασκευής οι οποίες δεν είναι δυνατόν να αποτυπωθούν στο εργαλείο του EurOtop, οπότε και δεν εκτιμάται μέσω αυτού του εργαλείου η μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης. Αντίθετα η λεπτομερέστερη περιγραφή της κατασκευής από το εργαλείο των νευρωνικών δικτύων (βλ. Ενότητα 7.4.2), καταγράφει τη διαφορά της διατομής Δ-Δ' σε σχέση με την χαρακτηριστική διατομή Α-Α'.

7.4.2 Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5.3.2), μέσω του WL | Delft Hydraulics (πλέον Deltares), παρέχεται η δυνατότητα πρόβλεψης της κυματικής υπερπήδησης με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (<http://nn-overtopping.deltares.nl/default.aspx>). Σαν δεδομένα στο εργαλείο υπολογισμού, εισάγονται τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου κυματισμού ($H_{m0}, T_{m-1,0}, \beta$), το βάθος του πυθμένα (h) και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της παράκτιας κατασκευής ($h_t, B_t, \gamma_f, cota_d, cota_w, B, h_b, tana_b, R_C, A_C, G_C$). Έτσι, εισάγεται λεπτομερώς η γεωμετρία της κατασκευής, αλλά και τα χαρακτηριστικά της θωράκισής της, προκειμένου τελικά να εκτιμηθεί η μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης Q (l/s/m).

(1) Διατομή Α-Α'

Στον Πίνακα 7.11 συγκεντρώνονται τα δεδομένα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο πρόβλεψης της κυματικής υπερπήδησης, που αφορούν στα χαρακτηριστικά των κυματισμών στην περιοχή και στο βάθος της περιοχής για τη διατομή Α-Α' του προσήνεμου μόλου. Η

φασματική περίοδος του κυματισμού σε αυτή την περίπτωση εισάγεται στο δίκτυο και αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση:

- (1) $H_s = 3.96 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 7.18 \text{ s}$
- (2) $H_s = 4.64 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 7.73 \text{ s}$
- (3) $H_s = 4.67 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 7.82 \text{ s}$
- (4) $H_s = 4.70 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 7.82 \text{ s}$

Συμπληρωματικά, στον Πίνακα 7.12, περιέχονται όλα τα χαρακτηριστικά της διατομής καθώς επίσης και ο συντελεστής που αντιπροσωπεύει τη διαπερατότητά της. Και τελικά στον Πίνακα 7.13, περιέχονται οι εκτιμήσεις του δικτύου για τη μέση παροχή κυματικής υπερπήδησης που μπορεί να εμφανιστεί σε κάθε περίπτωση, σε κάθε διαφορετικό προσπίπτοντα κυματισμό.

Πίνακας 7.11 Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή A-A'.

	Δεδομένα Εισόδου			
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Πίνακας 7.12 Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή A-A'.

	Δεδομένα Εισόδου										
	h_t (m)	B_t (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(2)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(3)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(4)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0

Πίνακας 7.13 Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή A-A'.

	Αποτελέσματα
	Q (l/s/m)
(1)	7.85
(2)	21.00
(3)	22.86
(4)	23.34

(2) Διατομή Β-Β'

Όμοια με προηγουμένως ο Πίνακας 7.14 και ο Πίνακας 7.15, περιέχουν τα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής καθώς και το βάθος της περιοχής μελέτης, που εισάγονται ως δεδομένα εισόδου στο νευρωνικό δίκτυο. Τα διαθέσιμα κυματικά χαρακτηριστικά της περιοχής που βρίσκεται η προτεινόμενη Διατομή Β-Β' όπως προκύπτουν από τη μέθοδο SMB και την ανάλυση ακραίων τιμών είναι τα εξής:

(1) $H_{m0} = 3.17 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 6.36 \text{ s}$

(2) $H_{m0} = 3.34 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 6.64 \text{ s}$

(3) $H_{m0} = 3.40 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 6.73 \text{ s}$

(4) $H_{m0} = 3.41 \text{ m}$, $T_{m-1,0} = 6.73 \text{ s}$

Ο Πίνακας 7.16 περιέχει τα αποτελέσματα του δικτύου, δηλαδή τη μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης που προκαλείται στην προτεινόμενη από το Λιμενικό Ταμείο διατομή Β-Β' στη βάση του προσήνεμου μόλου.

Πίνακας 7.14 Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή Β-Β'.

	Δεδομένα Εισόδου			
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.17	6.36	5.0
(2)	0	3.34	6.64	5.0
(3)	0	3.40	6.73	5.0
(4)	0	3.41	6.73	5.0

Πίνακας 7.15 Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή Β-Β'.

	Δεδομένα Εισόδου										
	h_t (m)	B_t (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(2)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(3)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(4)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0

Πίνακας 7.16 Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή Β-Β'.

Αποτελέσματα	
Q (l/s/m)	
(1)	0.37
(2)	0.58
(3)	0.68
(4)	0.69

(3) Διατομή Γ-Γ'

Και στην προτεινόμενη Διατομή Γ-Γ' πραγματοποιείται η εκτίμηση της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης μέσω του εργαλείου των νευρωνικών δικτύων. Στον Πίνακα 7.17 περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά του εισερχόμενου κυματισμού και του βάθους της περιοχής και στον Πίνακα 7.18 τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης διατομής (κλίση πρανών, διαπερατότητα και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής). Τελικά στον Πίνακα 7.19 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του εργαλείου πρόβλεψης αναφορικά με τη μέση παροχή.

Πίνακας 7.17 Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή Γ-Γ'.

Δεδομένα Εισόδου				
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Πίνακας 7.18 Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή Γ-Γ'.

Δεδομένα Εισόδου											
	h_t (m)	B_t (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(2)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(3)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(4)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0

Πίνακας 7.19 Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή Γ-Γ'.

Αποτελέσματα	
Q (l/s/m)	
(1)	0.31
(2)	1.36
(3)	1.51
(4)	1.57

(4) Διατομή Δ-Δ'

Τελικά και για τη Διατομή Δ-Δ' εισάγονται τα δεδομένα όπως απεικονίζονται στον Πίνακα 7.20 και στον Πίνακα 7.21 και τελικά εκτιμάται η μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης για την πρώτη μόνο περίπτωση του εισερχόμενου κυματισμού (Πίνακας 7.22). Για τις υπόλοιπες τρεις περιπτώσεις, το εργαλείο νευρωνικών δικτύων φαίνεται ανεπαρκές στο να προβλέψει τα αποτελέσματα.

Πίνακας 7.20 Χαρακτηριστικά εισερχόμενου κυματισμού και βάθος περιοχής - διατομή Δ-Δ'.

Δεδομένα Εισόδου				
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Πίνακας 7.21 Χαρακτηριστικά κατασκευής - διατομή Δ-Δ'.

Δεδομένα Εισόδου											
	h_t (m)	Bt (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(2)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(3)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(4)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0

Πίνακας 7.22 Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης για κάθε περίπτωση - διατομή Δ-Δ'.

Αποτελέσματα	
Q (l/s/m)	
(1)	2.72
(2)	-
(3)	-
(4)	-

7.5 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Έπειτα από την εκτίμηση της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης μέσω του εργαλείου των εμπειρικών σχέσεων και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων για κάθε διατομή, συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 7.23. Στην προτεινόμενη Διατομή B-B' και στη Διατομή Δ-Δ' δεν υπάρχουν οι εκτιμήσεις από το εργαλείο του EurOtop με τις εμπειρικές σχέσεις, αφού δεν υπάρχει κάποια αντιπροσωπευτική διατομή.

Πίνακας 7.23 Η εκτιμώμενη μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης για κάθε διατομή.

H_{m0} (m)	Διατομή A-A'		Διατομή Γ-Γ'		Διατομή Δ-Δ'		H_{m0} (m)	Διατομή B-B'	
	$Q_{i,empirical}$	$Q_{i,nn}$	$Q_{i,empirical}$	$Q_{i,nn}$	$Q_{i,empirical}$	$Q_{i,nn}$		$Q_{i,empirical}$	$Q_{i,nn}$
3.96	2.28	7.85	0.019	0.31	2.72	-	3.17	0.37	
4.64	10.51	21.00	0.179	1.36	-	-	3.34	0.58	
4.67	11.14	22.86	0.195	1.51	-	-	3.40	0.68	
4.70	11.80	23.34	0.211	1.57	-	-	3.41	0.69	

Επιπλέον, συγκεντρώνονται οι εκτιμώμενες οικονομικές δαπάνες των υλικών θωράκισης για κάθε μία από τις προτεινόμενες διατομές. Για την προτεινόμενη από το λιμενικό ταμείο του Ρεθύμνου διατομή (Διατομή B-B'), εκτιμάται δαπάνη ίση με 9384.80 €/m μήκους, για την προτεινόμενη διατομή με προσθήκη ογκολίθων θωράκισης στον κορμό (Διατομή Γ-Γ') ίση με 5252.00 €/m, ενώ για την προτεινόμενη διατομή με προσθήκη αναβαθμού (Διατομή Δ-Δ'), ίση με 701.80 €/m.

8 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, διερευνάται το φαινόμενο της κυματικής υπερπήδησης, το οποίο εμφανίζεται στην περιοχή του λιμένα του Ρεθύμνου, κατά τη διάρκεια καταιγίδων. Η αλλαγή στο κατά τόπους κλίμα, αλλά και στην παγκόσμια κλίμακα, φαίνεται να είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες, οι οποίοι προκαλούν την ενίσχυση του φαινομένου αυτού μαζί με μια σειρά άλλων επιπτώσεων. Η συχνότερη εμφάνιση παράκτιων πλημμυρών, τα μεγαλύτερα ύψη κύματος και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας θεωρούνται οι κυριότερες από τις επιπτώσεις αυτές. Με δεδομένο ότι το 1/3 του ανθρώπινου πληθυσμού ζει σε απόσταση μέχρι 60 km από την ακτή, κρίνεται ολοένα και πιο απαραίτητη η ανάπτυξη αξιόπιστων σεναρίων, ώστε να προβλέπεται η συμπεριφορά του κυματικού κλίματος των παράκτιων περιοχών, με απώτερο σκοπό την έγκαιρη ενημέρωση όλων των ενδιαφερόμενων μερών, την προστασία και τη βελτίωση των παράκτιων κατασκευών, που μπορούν να αναστείλουν κάποιες από τις επικείμενες επιπτώσεις.

Για την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης, στον προσήνεμο μόλο του λιμένα του Ρεθύμνου, αναλύεται στατιστικά η συμπεριφορά των μέγιστων ετήσιων υψών κύματος που έχουν εμφανιστεί κατά την περίοδο 1957-2014, που προέκυψαν από το ανεμολογικό κλίμα της περιοχής. Μέσω της Θεωρίας των Ακραίων Τιμών λοιπόν και με τη χρήση του λογισμικού πακέτου «extRemes», εκτιμάται το σημαντικό ύψος κύματος για περιόδους επαναφοράς 25, 50, 75 έτη, ενώ μέσω του μοντέλου SMB, εκτιμάται το χαρακτηριστικό ύψος κύματος όπως προκύπτει καθ' όλη την περίοδο. Τελικά, για τη βόρεια διεύθυνση κυματισμών, η οποία κρίνεται η πιο κρίσιμη, εισάγεται κάθε κυματισμός στο μοντέλο MIKE 21 PMS, ώστε να προκύψει η χωρική εξέλιξή του μέχρι την περιοχή ενδιαφέροντος. Με δεδομένα λοιπόν, τα κυματικά χαρακτηριστικά και τη βαθυμετρία ακριβώς ανάντη του προσήνεμου μόλου, εκτιμάται η κυματική υπερπήδηση για κάθε περίπτωση, μέσω εμπειρικών σχέσεων (EurOtop) και τεχνητών νευρωνικών δικτύων (WL | Delft Hydraulics) στον προσήνεμο μόλο του λιμένα.

8.1 Γενικά Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 7, εξάγονται κάποια χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με το κυματικό κλίμα της περιοχής, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική ανάλυση της χρονοσειράς των μέγιστων ετήσιων υψών κύματος, αλλά και τα μοντέλα πρόβλεψης της κυματικής υπερπήδησης στην περιοχή του Ρεθύμνου καθώς και για τις επικείμενες επιπτώσεις της. Πιο συγκεκριμένα:

- Αντιπαραβάλλοντας τις συχνότητες εμφάνισης αλλά και την ένταση των ανέμων στην περιοχή του Ρεθύμνου από το 1957 έως το 2014, δικαιολογείται η αύξηση της συχνότητας εμφάνισης φαινομένων παράκτια πλημμύρας, όπως προκύπτει από τις ιστορικές καταγραφές, αλλά και τις μαρτυρίες των κατοίκων της περιοχής.
- Από την μέθοδο SMB, που χρησιμοποιήθηκε για την πρόγνωση του χαρακτηριστικού ύψους κύματος στην περιοχή μελέτης, για τις τρεις διευθύνσεις που είναι κρίσιμες για το Ρέθυμνο (βόρεια, βορειοανατολική, βορειοδυτική), βρέθηκε δυσμενέστερη η βόρεια, λόγω μεγαλύτερου αναπτύγματος πελάγους, και άρα μεγαλύτερου ύψους κύματος. Επιπλέον, κατά την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης, η κάθετη στο μέτωπο της κατασκευής διεύθυνση πρόσπτωσης του κυματισμού, είναι η δυσμενέστερη, οπότε και οι κυματισμοί που αναλύονται και στατιστικά αφορούν στη βόρεια διεύθυνση.
- Αναφορικά με τη στατιστική ανάλυση της χρονοσειράς των μέγιστων ετήσιων υψών κύματος, η προσαρμογή της σε GEV κατανομή, φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη ομοιομορφία συγκριτικά με την προσαρμογή σε Gumbel κατανομή. Γι' αυτό άλλωστε τα αποτελέσματα της πρώτης προσαρμογής (GEV), εισήχθησαν σαν δεδομένα εισόδου στο μοντέλο MIKE 21 PMS.
- Όπως ήταν αναμενόμενο, το ύψος του κυματισμού που αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς τα 75 έτη, προκύπτει αρκετά μεγαλύτερο συγκριτικά με το ύψος του κυματισμού όπως προέκυψε από τη μέθοδο SMB, και αντιστοιχεί στο χαρακτηριστικό ύψος κυματισμού της περιοχής μελέτης ($H_{s,SMB} = 4.33 \text{ m}$, $H_{s,75\text{έτη}} = 5.24 \text{ m}$).
- Επιπλέον κατά τη στατιστική ανάλυση της χρονοσειράς, σαφώς υπάρχουν αποκλίσεις αναφορικά με την εκτίμηση του μέγιστου ύψους κύματος, λόγω ελλείψεων στα δεδομένα, αλλά και λόγω του ότι το κυματικό κλίμα έχει προκύψει έπειτα από μαθηματικούς υπολογισμούς μέσω του ανεμολογικού κλίματος. Ωστόσο, κρίνεται ως ένα καλό πρώτο βήμα για την εκτίμηση μελλοντικών ακραίων συμπεριφορών, για τη σωστή προστασία των κυρίως της ανθρώπινης ζωής αλλά και των ίδιων των κατασκευών, απέναντι σε ακραία γεγονότα.
- Για την εκτίμηση της παροχής της κυματικής υπερπήδησης στον προσήνεμο μόλο του λιμένα του Ρεθύμνου, όπως αναφέρθηκε χρησιμοποιούνται οι εμπειρικές σχέσεις και τα νευρωνικά δίκτυα. Συγκρίνοντας τα δεδομένα εισόδου που τροφοδοτούν το εργαλείο πρόβλεψης μέσω εμπειρικών σχέσεων και το νευρωνικό δίκτυο, προκύπτει το συμπέρασμα ότι στη δεύτερη περίπτωση (νευρωνικό δίκτυο), περιγράφεται πιο λεπτομερώς η παράκτια κατασκευή μέσω των δεδομένων, καθώς επίσης και η περιοχή ενδιαφέροντος (εισάγεται το βάθος). Οπότε, αναμένεται μία πιο ολοκληρωμένη πρόβλεψη μέσω του δεύτερου εργαλείου αναφορικά με τη μέση παροχή της κυματικής υπερπήδησης.
- Για τη χαρακτηριστική διατομή A-A', του προσήνεμου μόλου, συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εμπειρικές σχέσεις αλλά και το νευρωνικό δίκτυο, με τα επιτρεπόμενα όρια που συγκεντρώνονται στο EurOtop. Οι προβλέψεις

όπως προκύπτουν και από τους τέσσερις κυματισμούς και από τις δύο μεθόδους ($Q_{1,empirical}= 2.28 \text{ l/s/m}$ - $Q_{1,nn}= 7.85 \text{ l/s/m}$, $Q_{2,empirical}= 10.51 \text{ l/s/m}$ - $Q_{2,nn}= 21.00 \text{ l/s/m}$, $Q_{3,empirical}= 11.14 \text{ l/s/m}$ - $Q_{3,nn}= 22.86 \text{ l/s/m}$, $Q_{4,empirical}= 11.80 \text{ l/s/m}$ - $Q_{4,nn}= 23.34 \text{ l/s/m}$), φαίνεται να ξεπερνούν το όριο $Q_{επ}= 1 \text{ l/s/m}$ (Πίνακας 5.1), οπότε αναμένονται ζημιές σε στοιχεία της κατασκευής. Επιπλέον, για τις περιπτώσεις του κυματισμού όπως προέκυψαν έπειτα από την ανάλυση ακραίων τιμών ($Q_{2,empirical}$, $Q_{2,nn}$, $Q_{3,empirical}$, $Q_{3,nn}$, $Q_{4,empirical}$, $Q_{4,nn}$), αναμένεται να εμφανίζεται βύθιση μικρών σκαφών και ζημιά σε μεγαλύτερα ιστιοφόρα, αφού υπερβαίνεται το όριο την μέσης επιτρεπόμενης κυματικής υπερπήδησης στα $Q_{επ}= 10 \text{ l/s/m}$ (Πίνακας 5.1).

- Όμοια για την προτεινόμενη από το Λιμενικό Ταμείο Ρεθύμνου διατομή B-B', συγκρίνονται οι προβλέψεις με τα προτεινόμενα όρια του EurOtop. Αυτό που πρέπει να αναφερθεί εδώ είναι ότι, δεν προτείνεται για τη συγκεκριμένη διατομή κάποια εμπειρική σχέση επίλυσης, προκειμένου να εκτιμηθεί η παροχή της κυματικής υπερπήδησης, οπότε το μόνο διαθέσιμο εργαλείο εκτίμησης αποτελούν τα νευρωνικά δίκτυα. Οι εκτιμήσεις όπως προκύπτουν λοιπόν από το εργαλείο των νευρωνικών δικτύων ($Q_{1,nn}= 0.37 \text{ l/s/m}$, $Q_{2,nn}= 0.58 \text{ l/s/m}$, $Q_{3,nn}= 0.68 \text{ l/s/m}$, $Q_{4,nn}= 0.69 \text{ l/s/m}$), δεν υπερβαίνουν το επιτρεπόμενο όριο για το πέρασμα εκπαιδευμένου προσωπικού με την κατάλληλη προστασία πίσω από την κατασκευή ($Q_{επ}= 1-10 \text{ l/s/m}$) σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1, αλλά ούτε και το όριο ζημιάς σε στοιχεία της κατασκευής ($Q_{επ}= 1 \text{ l/s/m}$) ή το όριο βύθισης μικρών σκαφών ή ζημιάς σε μεγαλύτερα ιστιοφόρα ($Q_{επ}= 10 \text{ l/s/m}$). Οπότε σαν μία πρώτη αξιολόγηση της προτεινόμενης διατομής B-B', φαίνεται ότι μπορεί να λειτουργήσει σωστά, ώστε να αποφευχθεί η αναστολή της λειτουργίας των εργασιών του λιμένα, κατά τη διάρκεια καταιγίδων.
- Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις εμπειρικές σχέσεις για τη διατομή Γ-Γ', η οποία προέρχεται από την εργασία της Πλαβούκου, δεν υπερβαίνουν σε καμία περίπτωση ($Q_{1,empirical}= 0.019 \text{ l/s/m}$, $Q_{2,empirical}= 0.179 \text{ l/s/m}$, $Q_{3,empirical}= 0.195 \text{ l/s/m}$, $Q_{4,empirical}= 0.211 \text{ l/s/m}$) το όριο $Q_{επ}= 1 \text{ l/s/m}$, το οποίο αναφέρεται σε αναμενόμενες ζημιές σε στοιχεία της κατασκευής. Ωστόσο, από το εργαλείο των νευρωνικών δικτύων οι προβλέψεις που αφορούν στις διάφορες περιόδους επαναφοράς ($Q_{2,nn}= 1.36 \text{ l/s/m}$, $Q_{3,nn}= 1.51 \text{ l/s/m}$, $Q_{4,nn}= 1.57 \text{ l/s/m}$) φαίνεται να ξεπερνούν μόλις το όριο αυτό, οπότε ενδεχομένως να αναμένονται κάποιες μικρές ζημιές στην κατασκευή.
- Για την προτεινόμενη από την Πλαβούκου Διατομή Δ-Δ', η εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης από το εργαλείο των νευρωνικών δικτύων για το χαρακτηριστικό κυματισμό της περιοχής, αντιστοιχεί σε $Q_{1,nn}= 2.72 \text{ l/s/m}$. Σύμφωνα με τα επιτρεπόμενα όρια που ορίζει το EurOtop, ενδεχομένως να εμφανιστούν μικρές ζημιές στην κατασκευή, αλλά κανένα πρόβλημα στη λειτουργία των σκαφών εντός της λιμενολεκάνης.
- Συγκρίνοντας τις τρεις προτεινόμενες διατομές μεταξύ τους, αυτό που παρατηρείται είναι ότι την καλύτερη απόδοση παρουσιάζει η προτεινόμενη από το Λιμενικό Ταμείο διατομή, η οποία ωστόσο αναμένεται να είναι και η πιο δαπανηρή (9384.80

€/m). Από τις άλλες δύο μεγαλύτερη προστασία απέναντι στο φαινόμενο της κυματικής υπερπήδησης παρέχει η Διατομή Γ-Γ', μέσω της προσθήκης ογκολίθων στη θωράκιση της διατομής με κόστος των υλικών θωράκισης ίσο με 5252.00 €/m.

- Σαν τελικό συμπέρασμα από την αξιολόγηση της όλης διαδικασίας εκτίμησης της μέσης παροχής της κυματικής υπερπήδησης, για το λιμένα του Ρεθύμνου, προκύπτει η αναγκαιότητα χρήσης των ακραίων εκτιμήσεων των χαρακτηριστικών που συντελούν στη σωστή σχεδίαση των λιμενικών έργων. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται πως το χαρακτηριστικό ύψος κυματισμού στην περιοχή του λιμένα του Ρεθύμνου, αποκλίνει αρκετά από τα ύψη κύματος που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια καταιγίδων στην περιοχή, αλλά και από τα ακραία ύψη κύματος. Είναι γνωστό για αυτά ότι θα εμφανιστούν πιο σπάνια, αλλά θα αποτελέσουν ουσιαστικό κίνδυνο απέναντι στην ακεραιότητα της κατασκευής προστασίας, ή και στην ανθρώπινη ζωή.

8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, εξήχθησαν τα συμπεράσματα που συγκεντρώθηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο. Ωστόσο, αναφορικά με την επίτευξη μιας περισσότερο λεπτομερούς μελέτης, ή εξέλιξης της παρούσας, προτείνονται τα ακόλουθα:

- Η εφαρμογή της Θεωρίας των Ακραίων Τιμών, όμοια σε χρονοσειρά ακραίων υψών κύματος, τα οποία όμως έχουν προέλθει από πρωτογενή δεδομένα μέτρησης απευθείας ύψους κύματος, θα είχε σαν αποτέλεσμα την ελαχιστοποίηση σφαλμάτων που οφείλονται στην μαθηματική μετατροπή του ανέμου σε κυματισμό.
- Ενδεχομένως, η εφαρμογή της στατιστικής ανάλυσης της χρονοσειράς δύο ή τριών μέγιστων ετήσιων τιμών ύψους κύματος, ώστε να υπάρχει μία λεπτομερέστερη εικόνα στην ιστορική εξέλιξη του κυματικού κλίματος της περιοχής.
- Ο συνυπολογισμός της εκτιμώμενης αύξησης της μέσης στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας, λόγω της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής κατά την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης, θα παρείχε μία πιο αντιπροσωπευτική μελλοντική εκτίμηση της μέσης παροχής.
- Η συγκέντρωση όλων των παραπάνω εκτιμήσεων, προκειμένου να ενισχυθεί ο προσήνεμος μόλος του λιμένα του Ρεθύμνου και να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις από τα επικείμενα φαινόμενα καταιγίδων.
- Τέλος, η καταγραφή των απαραίτητων οδηγιών για τη διαχείριση των αναμενόμενων πλημμυρικών κινδύνων της παράκτιας περιοχής, με βάση και πάλι τις παραπάνω εκτιμήσεις.

Βιβλιογραφία

- Allsop, N. W. H., Besley, P., & Madurini, L. (1995). Overtopping performance of vertical and composite breakwaters, seawalls and low reflection alternatives. In Final Proceedings MCS Project Workshop, Alderney, United Kingdom.
- Allsop, W. I. L. L. I. A. M., Bruce, T., Pullen, T. A., & Van der Meer, J. E. N. T. S. J. E. (2008). Direct hazards from wave overtopping-the forgotten aspect of coastal flood risk assessment?.
- Archontakis, D. (2013). The Old Town of Rethymno: from a run down gheto to growth leverage of Rethymno. 12-18.
- Battjes, J. A., & Groenendijk, H. W. (2000). Wave height distributions on shallow foreshores. Coastal engineering, 40(3), 161-182.
- Benestad, R. E. (2016). A mental picture of the greenhouse effect.Theoretical and Applied Climatology, 1-10.
- Bindoff, N. L., Willebrand, J., Artale, V., Cazenave, A., Gregory, J. M., Gulev, S., Hanawa, K., Le Quéré, C., Levitus, S., Nojiri, Y. & Shum, C. K. (2007). Observations: oceanic climate change and sea level.
- Bobrowsky, P. (2013). Encyclopedia of natural hazards. Encyclopedia Encyclopedia of Earth Sciences Series Dordrecht: Springer.
- Bretschneider, C. L. (1965). Generation of waves by wind. State of the art(No. NESCO-SN-134-6). NATIONAL ENGINEERING SCIENCE CO WASHINGTON DC.
- Change, I. P. O. C. (2000). IPCC. Emissions Scenarios – Summary for Policymakers.- IPCC Special Report Working Group III, 20 S ;o.
- Change, I. P. O. C. (2007). IPCC. Aspectos Regionais e Setoriais da Contribuição do Grupo de Trabalho II ao 4º Relatório de Avaliação “Mudança Climática 2007” do IPCC.

- Church, J. A., White, N. J., Konikow, L. F., Domingues, C. M., Cogley, J. G., Rignot, E., Gregory, J.M., van den Broeke, M.R., Monaghan, A.J. & Velicogna, I. (2011). Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to 2008. *Geophysical Research Letters*, 38(18).
- Coastal Engineering Manual. (2008). Coast. Eng. Res. Centre, US Army Corps Eng., Vicksburg, Mississippi (2008) Part II, Chapter 2; Chapter 4.
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., & Taveira-Pinto, F. (2009). Potential effects of climate change on northwest Portuguese coastal zones. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 66(7), 1497-1507.
- Danish Hydraul. Instit. (2007). MIKE 21 Parabolic Mild Slope module: Scientific doc, pp 1-22.
- De Rouck, J., Van de Walle, B., & Geeraerts, J. (2004). Crest level assessment of coastal structures by full scale monitoring, neural network prediction and hazard analysis on permissible wave overtopping. In *European Conference on Marine Science & Ocean Technology* (p. 261).
- De Waal, J. P., & Van der Meer, J. W. (1992). Wave runup and overtopping on coastal structures. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(23).
- Diebolt, J., Guillou, A., Naveau, P. & Ribereau, P. (2008). Improving probability-weighted moment methods for the Generalized Extreme Value distribution. *REVSTAT-Statistical Journal*, 6(1), 33-50.
- Dombry, C. (2013). Maximum likelihood estimators for the extreme value index based on the block maxima method. *arXiv preprint arXiv:1301.5611*.
- Doukakis, E. (2005). Risks in coastal zone by climate change and tsunami. In *Working Meeting Risk assessment in the Corinthian Gulf, Derverni, Greece*.
- Doukakis, E. (2007). Natural disasters and coastal zone, *Prevention-Management of natural disasters, The role of Rural and Surveying Engineering*.
- Etemad-Shahidi, A., Kazeminezhad, M. H., & Mousavi, S. J. (2009). On the prediction of wave parameters using simplified methods. *Journal of Coastal Research*, 505-509.
- EuroSION Study. (2004). *Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability: Results from the EUROSION Study*. Office for Official Publications of the European Communities (2004) Part I, *Shoreline Management Guide*.

- Ferreira, A., & de Haan, L. (2015). On the block maxima method in extreme value theory: PWM estimators. *The Annals of Statistics*, 43(1), 276-298.
- Ferreira, J. A., & Soares, C. G. (2000). Modelling distributions of significant wave height. *Coastal Engineering*, 40(4), 361-374.
- Friederichs, P., & Thorarinsdottir, T. L. (2012). Forecast verification for extreme value distributions with an application to probabilistic peak wind prediction. *Environmetrics*, 23(7), 579-594.
- Galiatsatou, P., & Prinos, P. (2011). Modeling non-stationary extreme waves using a point process approach and wavelets. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(2), 165-183.
- Galiatsatou, P., & Prinos, P. (2016). Regional frequency analysis of extreme waves.
- Galiatsatou, P., Prinos, P., Valchev, N., & Trifonova, E. (2012). Analysis of extreme marine events causing flooding in Varna region. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 12, 523-531.
- Galvin, C. J. (1972). Wave breaking in shallow water. *Waves on beaches and resulting sediment transport*, 413-456.
- Gilleland, E., & Katz, R. W. (2006). Analyzing seasonal to interannual extreme weather and climate variability with the extremes toolkit. In 18th Conference on Climate Variability and Change, 86th American Meteorological Society (AMS) Annual Meeting (Vol. 29).
- Goda, Y. (1979). A review on statistical interpretation of wave data. Report of the Port and Harbour Research Institute, Japan, 18, 5-32.
- Goda, Y. (1985). *Random seas and design of maritime structures*, University of Tokyo Press.
- Gubareva, T. S., & Gartsman, B. I. (2010). Estimating distribution parameters of extreme hydrometeorological characteristics by L-moments method. *Water resources*, 37(4), 437-445.
- Gudmundsson, H. J. (1997). A review of the Holocene environmental history of Iceland. *Quaternary Science Reviews*, 16(1), 81-92.
- Hallegatte, S. (2009). Strategies to adapt to an uncertain climate change. *Global*

- Environmental Change, 19(2), 240-247.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Schmidt, G. A., & Lo, K. (2016). Global Temperature in 2015.
- Hollweg, H. D., Böhm, U., Fast, I., Hennemuth, B., Keuler, K., Keup-Thiel, E., ... & Schubert, M. (2008). Ensemble simulations over Europe with the regional climate model CLM forced with IPCC AR4 global scenarios. M & D Technical Report, 3, 2008.
- IPCC, A. W. I. (2014). Field, CB, *et al.*, ed., Climate Change (2014): Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II (WG2) to the Fifth Assessment Report (AR5) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Jenkinson, A. F. (1955). The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 81(348), 158-171.
- Johnson, H. K., & Poulin, S. (1998). On the accuracy of parabolic wave models. In COASTAL ENGINEERING CONFERENCE (Vol. 1, pp. 352-365). ASCE AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.
- Jones, P. D., Trenberth, K. E., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein, T., ... & Zhai, P. (2007). Observations: surface and atmospheric climate change. IPCC, Climate change, 235-336.
- Karambas, T. V. (2015). Modelling of climate change impacts on coastal flooding/erosion, ports and coastal defence structures. Desalination and Water Treatment, 54(8), 2130-2137.
- Kokkinos, D., Prinos, P., & Galiatsatou, P. (2011). Assessment of coastal vulnerability for present and future climate conditions in coastal areas of the Aegean Sea. In 11th International Conference on Hydrosience & Engineering: Hydro-Engineering for Environmental Challenges, Hamburg, Laudier *et al.*
- Koutsoyiannis, D. (2004). Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: I. Theoretical investigation/Statistiques de valeurs extrêmes et estimation de précipitations extrêmes: I. Recherche théorique. Hydrological sciences journal, 49(4).
- Koutsoyiannis, D. (2010). A random walk on water. Hydrology and Earth System Sciences,

14, 558-601.

- Kunkel, K. E., Andsager, K., & Easterling, D. R. (1999). Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada. *Journal of climate*, 12(8), 2515-2527.
- Lowe, J. A., Gregory, J. M. (2005). The effects of climate change on storm surges around the United Kingdom. *Phil. Trans. R. Soc. A* 363, 1313-1328.
- Mai, S., Wilhelmi, J., & Barjenbruch, U. (2011). Wave height distributions in shallow waters. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 63.
- Makropoulos, Ch., Tsoukala, V.K., Belibassakis, K., Lykou, A., Chondros, M., Gougoura., P. (2015). Managing flood risk in coast cities through an integrated modelling framework supporting stakeholders' involvement: the case study of Rethymno. In 36th IAHR World Conference, The Hague, the Netherlands
- Makropoulos, Ch., Tsoukala, V.K., Lykou, A., Chondros, M., Manojlovic, N., Vojinovic, Z. (2014). Extreme and rare events in coastal regions due to climate change – a case study application in Rethymno. In Conf. ADAPTto CLIMATE, Nicosia, Cyprus.
- Mallor, F. (2009). An introduction to statistical modelling of extreme values.
- McCarthy, J. J. (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- McLean, R. F., Tsyban, A., Burkett, V., Codignotto, J. O., Forbes, D. L., Mimura, N., ... & Ittekkot, V. (2001). Coastal zones and marine ecosystems. *Climate change*, 343-379.
- Meehl, G. A., Karl, T., Easterling, D. R., Changnon, S., Pielke Jr, R., Changnon, D., ... & Mearns, L. O. (2000). An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 81(3), 413-416.
- Mendoza, E. T., & Jiménez, J. A. (2006). Storm-induced beach erosion potential on the Catalan coast. *Journal of Coastal Research*, 81-88.
- Millington, N., Das, S., & Simonovic, S. P. (2011). The comparison of GEV, log-Pearson type 3 and Gumbel distributions in the Upper Thames River watershed under global climate

models.

- Milly, P. C. D., Julio, B., Malin, F., Robert, M., Zbigniew, W., Dennis, P., & Ronald, J. (2007). Stationarity is dead. *Ground Water News & Views*, 4(1), 6-8.
- Morton, I. D., Bowers, J., & Mould, G. (1997). Estimating return period wave heights and wind speeds using a seasonal point process model. *Coastal Engineering*, 31(1), 305-326.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., De Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., ... & La Rovere, E. L. (2000). Special report on emissions scenarios, working group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, 595pp. ISBN 0, 521(80493), 0.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *science*, 328(5985), 1517-1520.
- Northrop, P. J., & Jonathan, P. (2011). Threshold modelling of spatially dependent non-stationary extremes with application to hurricane-induced wave heights. *Environmetrics*, 22(7), 799-809.
- Norton, A. (Ed.). (2000). *Dynamic fields and waves* (Vol. 6). CRC Press.
- Owen, M. W. (1980). Design of seawalls allowing for wave overtopping, HR-Wallingford. UK., Technical Report EX-924.
- Panchang, V. G., Pearce, B. R., Wei, G., & Cushman-Roisin, B. (1991). Solution of the mild-slope wave problem by iteration. *Applied Ocean Research*, 13(4), 187-199.
- Park, H. W., & Sohn, H. (2006). Parameter estimation of the generalized extreme value distribution for structural health monitoring. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21(4), 366-376.
- Pozueta, B. E. A. T. R. I. Z., van Gent, M. R., Van den Boogaard, H. F. P., & Medina, J. R. (2004). Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures. Proc. ASCE, 29th ICCE, Lisbon, Portugal.
- Prinos, P. (2014). Climate change effects on the Greek seas and coastal areas – the research project THALIS-CCSEAWAVS. 6th Panhellenic Conference on Coastal Zones Management and Improvement, Athens, 315-324

- Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Sch, H., & Van der Meer, J. W. (2007). Wave overtopping of sea defences and related structures: assessment manual.
- Rossouw, J. (1988). Design waves and their probability density functions. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(21).
- Salman, A., Lombardo, S., & Doody, P. (2004). Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability. EUCC. Van der Meer, J. W. (2002). Technical report wave run-up and wave overtopping at dikes. Rijkswaterstaat, DWW.
- Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M. & Reichstein, M. (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*, 109-230.
- Shukla, R. K., Trivedi, M., & Kumar, M. (2012). On the proficient use of GEV distribution: a case study of subtropical monsoon region in India. arXiv preprint arXiv:1203.0642.
- Sierra, J. P., & Casas-Prat, M. (2014). Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions. *Climatic change*, 124(4), 861-876.
- Solomon, S. (Ed.). (2007). *Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC(Vol. 4)*. Cambridge University Press.
- Stive, M. J. (2004). How important is global warming for coastal erosion?. *Climatic Change*, 64(1), 27-39.
- Sverdrup, H. U., & Munk, W. H. (1946). Theoretical and empirical relations in forecasting breakers and surf. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 27(6), 828-836.
- Towler, E., Rajagopalan, B., Gilleland, E., Summers, R. S., Yates, D., & Katz, R. W. (2010). Modeling hydrologic and water quality extremes in a changing climate: A statistical approach based on extreme value theory. *Water Resources Research*, 46(11).
- Tsoukala, V. K., Chondros, M., Kapelonis, Z. G., 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*, 58(2), 71-89.

- van der Meer, J. W., & Janssen, J. P. F. M. (1994). Wave run-up and wave overtopping at dikes and revetments. Delft Hydraulics.
- van Gent, M. R., van den Boogaard, H. F., Pozueta, B., & Medina, J. R. (2007). Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures. *Coastal Engineering*, 54(8), 586-593.
- Von Mises, R. (1936). La distribution de la plus grande de n valeurs. *Rev. math. Union interbalcanique*, 1(1).
- Wiegel, R. L. (2013). *Oceanographical engineering*. Courier Corporation, 150-173.
- Wong, T. S. T., & Li, W. K. (2006). A note on the estimation of extreme value distributions using maximum product of spacings. In *Time Series and Related Topics* (pp. 272-283). Institute of Mathematical Statistics.
- Zhang, Y., Ge, Q., & Liu, M. (2015). Extreme Precipitation Changes in the Semiarid Region of Xinjiang, Northwest China. *Advances in Meteorology*, 2015.
- Zones, H. (2005). *FEMA Coastal Flood Hazard Analysis and Mapping Guidelines Focused Study Report*.
- Γαλιατσάτου, Π. (2009). Στατιστικές μέθοδοι προσομοίωσης ακραίων γεγονότων: επιμέρους εφαρμογές σε μετεωρολογική παλίρροια, βροχόπτωση και κύμα. (Διδακτορική διατριβή).
- Γαλιατσάτου, Π., Πρίνος, Π. (2014). “Εκτίμηση Ακραίων Τιμών Ύψους Κύματος και Μετεωρολογικής Παλίρροιας με Συνεκτίμηση της Κλιματικής Αλλαγής”, Παραδοτέο 3.2 για το Ερευνητικό Πρόγραμμα ΘΑΛΗΣ CCSEAWAVS.
- Δουκάκης, Ε. (2007). Μέθοδοι Προσδιορισμού του Ρυθμού Μεταβολής των Ακτογραμμών. Πρόχειρες σημειώσεις για το μάθημα Παράκτιο Περιβάλλον του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του Ε.Μ.Π.
- Κουτσογιάννης, Δ., Πόρων, Τ. Υ., & Πολυτεχνείο, Ε. Μ. (2006). Συστήματα υποστήριξης αποφάσεων στη διαχείριση υδατικών πόρων: Η περίπτωση του υδροδοτικού συστήματος της Αθήνας. Διαλέξεις μαθήματος VII εξαμήνου του Τμήματος Μηχανικών Σχεδίασης Προϊόντων και Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Μαμάσης Ν. (2007). Πλημμύρες και αντιπλημμυρικά έργα – Διαχείριση πλημμυρικού

κινδύνου. Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων

Μέμος Κ., (2008). Εισαγωγή στα Λιμενικά Έργα. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 15-25.

Μέμος, Κ. (2007). Θαλάσσια Υδροδυναμική. Πρόχειρες σημειώσεις για το μάθημα
Θαλάσσια Υδροδυναμική του ΔΠΜΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» του
Ε.Μ.Π. 193-201.

Μουτζούρης, Κ. Ι. (2009). Θαλάσσια Υδραυλική. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 9-18.

Μπούτσικας, Μ. (2013). Θεωρία Ακραίων Τιμών. Πρόχειρες σημειώσεις για το μάθημα
Ζημιοκατανομές και Θεωρία ακραίων τιμών του ΠΜΣ στην «Αναλογιστική Επιστήμη
και Διοικητική κινδύνου» του Πανεπιστημίου Πειραιώς.

Πλαβούκου, Μ. (2016). Η κλιματική αλλαγή και οι συνέπειές της στον σχεδιασμό των
παράκτιων έργων – πρόβλεψη και αντιμετώπιση. (Μεταπτυχιακή εργασία).

Στάμου, Α. (2009). Εφαρμοσμένη Υδραυλική – Ροή υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς.
Εκδοσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, 20-21.

<http://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

<http://ec.europa.eu/environment/iczm/home.htm/>

<http://ncar.ucar.edu/>

<http://newsroom.unfccc.int/about/>

<http://nn-overtopping.deltares.nl/overtopping.aspx>

<http://thalis-ccseawavs.web.auth.gr/>

<http://unfccc.int/2860.php>

<http://www.cnrs.fr/>

<http://www.csiro.au/>

<http://www.emy.gr/hnms/greek/index.html>

<http://www.euroSION.org/>

<http://www.floodsite.net/>

<http://www.ipcc.ch/index.htm/>

<http://www.ipcc.ch/index.html>

<http://www.meteo.gr/meteoplus/index.cfm>

<http://www.micore.eu/>

<http://www.nerc.ac.uk/>

<http://www.noaa.gov/>

http://www.overtopping-manual.com/calculation_empirical.html

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

<http://www.risckit.eu/>

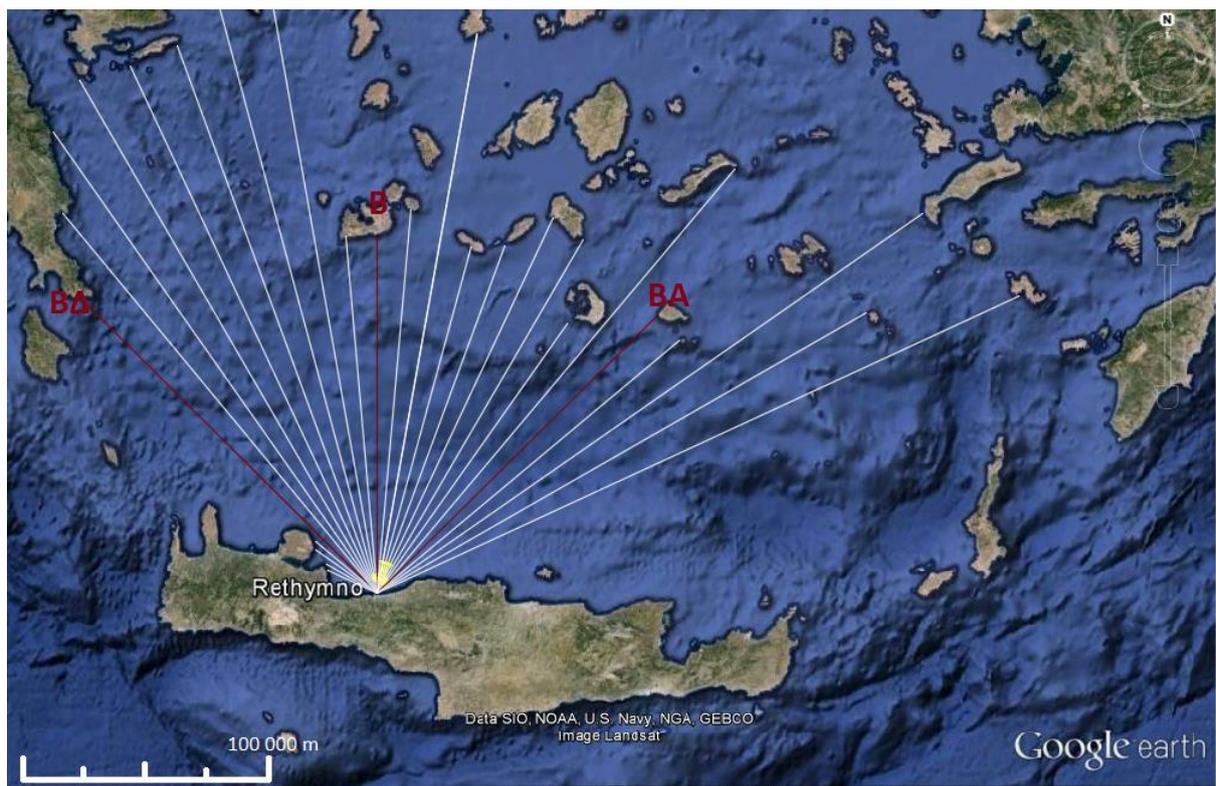
<http://www.starflood.eu>

<http://www.theseusproject.eu/>

<http://www.unesco.org/new/en/natural-sciences/special-themes>

<https://www.wmo.int/>

Παράρτημα Α: Πρόγνωση κυματισμών στα βαθιά

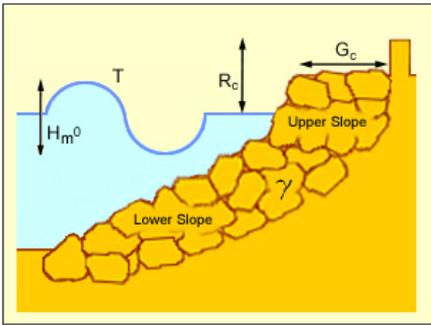


a_i (°)	$\cos a_i$	ΒΟΡΕΙΟΣ		ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟΣ		ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΟΣ	
		F_i (km)	F_i (km)* $(\cos a_i)^2$	F_i (km)	F_i (km)* $(\cos a_i)^2$	F_i (km)	F_i (km)* $(\cos a_i)^2$
-45	0.707	172.70	86.35	147.77	73.89	0.00	0.00
-40	0.766	202.87	119.05	158.79	93.18	0.00	0.00
-35	0.819	231.99	155.67	233.99	157.01	0.00	0.00
-30	0.866	280.97	210.72	147.97	110.98	20.07	15.05
-25	0.906	239.95	197.09	154.82	127.17	21.72	17.84
-20	0.940	240.13	212.04	170.65	150.69	22.38	19.76
-15	0.966	251.91	235.03	169.32	157.98	24.23	22.60
-10	0.985	247.08	239.63	140.12	135.89	31.21	30.27
-5	0.996	146.86	145.75	229.21	227.47	33.08	32.83
0	1.000	147.77	147.77	161.58	161.58	172.70	172.70
5	0.996	158.79	157.58	161.61	160.38	202.87	201.33
10	0.985	233.99	226.94	272.76	264.53	231.99	225.00
15	0.966	147.97	138.06	231.31	215.82	280.97	262.14
20	0.940	154.82	136.71	290.21	256.27	239.95	211.88
25	0.906	170.65	140.17	299.48	245.99	240.13	197.24
30	0.866	169.32	126.99	0.00	0.00	251.91	188.93
35	0.819	140.12	94.02	0.00	0.00	247.08	165.79
40	0.766	229.21	134.50	0.00	0.00	146.86	86.18
45	0.707	161.58	80.79	0.00	0.00	147.77	73.89
ΑΘΡΟΙΣΜΑ	16.903		2984.87		2538.81		1923.44
F_{eff} (km)			176.59		150.20		113.80

Παράρτημα Β: Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω του EurOtop – Calculation Tool (Διατομή Α-Α', Διατομή Γ-Γ')

Διατομή Α-Α'

	Input data					Output data
	H_{m0} (m)	T_p (s)	R_c (m)	G_c (m)	γ	Q (l/s/m)
(1)	3.96	7.9	6.1	4	0.55	2.284
(2)	4.64	8.5	6.1	4	0.55	10.514
(3)	4.67	8.6	6.1	4	0.55	11.140
(4)	4.70	8.6	6.1	4	0.55	11.796



Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

2.284

T (wave period) s Tm Tp 1,0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

G_c (The width of the structure crest) m

Lower Slope in 

(e.g. 1 in 2)

Upper Slope in 

(e.g. 1 in 2)

γ (coefficient for reduction factors) ▼

Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

10.514

T (wave period) 8.5 s Tm Tp 1.0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) 4.64 m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) 6.1 m

G_c (The width of the structure crest) 4 m

Lower Slope 3 in 4
(e.g. 1 in 2)

Upper Slope 3 in 4
(e.g. 1 in 2)

γ (coefficient for reduction factors) Rocks (2 layers, impermeable core) (0.55) ▼

Calculate Overtopping Rate

Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

11.14

T (wave period) 8.6 s Tm Tp 1.0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) 4.67 m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) 6.1 m

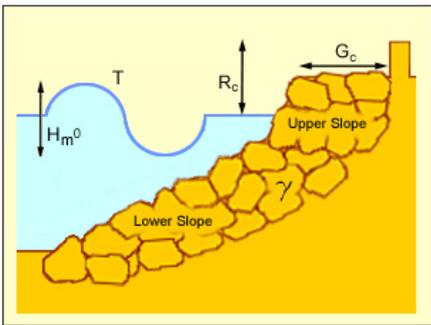
G_c (The width of the structure crest) 4 m

Lower Slope 3 in 4
(e.g. 1 in 2)

Upper Slope 3 in 4
(e.g. 1 in 2)

γ (coefficient for reduction factors) Rocks (2 layers, impermeable core) (0.55) ▼

Calculate Overtopping Rate



Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

T (wave period) s Tm Tp 1,0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

G_c (The width of the structure crest) m

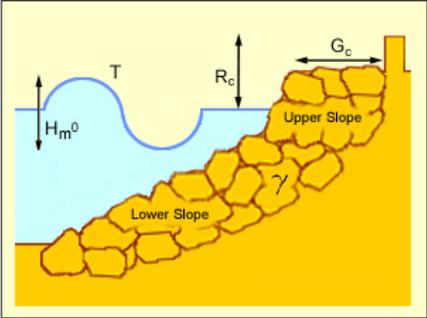
Lower Slope  in
(e.g. 1 in 2)

Upper Slope  in
(e.g. 1 in 2)

V (coefficient for reduction factors) ▼

Διατομή Γ-Γ'

	Input data					Output data
	H_{m0} (m)	T_p (s)	R_c (m)	G_c (m)	γ	Q (l/s/m)
(1)	3.96	7.9	6.1	8	0.38	0.019
(2)	4.64	8.5	6.1	8	0.38	0.179
(3)	4.67	8.6	6.1	8	0.38	0.195
(4)	4.70	8.6	6.1	8	0.38	0.211



Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

0.019

T (wave period) s Tm Tp 1.0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

G_c (The width of the structure crest) m

Lower Slope in  (e.g. 1 in 2)

Upper Slope in  (e.g. 1 in 2)

γ (coefficient for reduction factors) ▼

Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

0.179

T (wave period) s Tm Tp 1,0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

G_c (The width of the structure crest) m

Lower Slope in (e.g. 1 in 2)

Upper Slope in (e.g. 1 in 2)

V (coefficient for reduction factors) ▼

Calculate Overtopping Rate

Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

0.195

T (wave period) s Tm Tp 1,0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

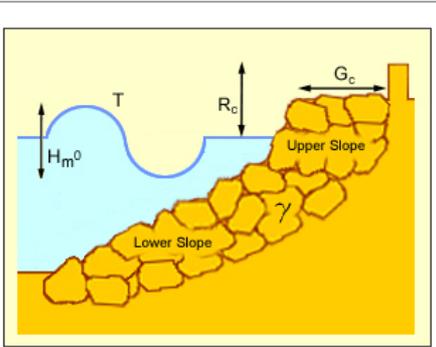
G_c (The width of the structure crest) m

Lower Slope in (e.g. 1 in 2)

Upper Slope in (e.g. 1 in 2)

V (coefficient for reduction factors) ▼

Calculate Overtopping Rate



Beta Results

Breaking Type / Other Info

Mean overtopping discharge rate per metre run of seawall (l/s/m)

T (wave period) s Tm Tp 1.0 Tm-

H_{m0} (Wave Height at the Toe of the Structure) m

R_c (Freeboard - The height of the crest of the wall above still water level) m

G_c (The width of the structure crest) m

Lower Slope  in
(e.g. 1 in 2)

Upper Slope  in
(e.g. 1 in 2)

Y (coefficient for reduction factors) ▼

Παράρτημα Γ: Εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης μέσω του Deltares Neural Network – Calculator (Διατομή A-A', Διατομή B-B', Διατομή Γ-Γ', Διατομή Δ-Δ')

Type of armour layer	γ_r
Smooth impermeable surface	1
Rocks	0.5
Cubes (2 layers, random)	0.5
Cubes (1 layer, random)	0.52
Antifers	0.5
Accropods	0.49
X-blocks	0.49
Core-locs	0.47
HARO's	0.47
Tetrapods	0.4
Bermbreakwater (reshaping)	0.45
Dolosse	0.43
Icelandic bermbreakwater (not reshaping)	0.4
Seabeas	0.5

Διατομή A-A'

	Input data			
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Input data											
	h_t (m)	B_t (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(2)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(3)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(4)	6.0	4.0	0.55	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0

Output data	
Q (l/s/m)	
(1)	7.85
(2)	21.00
(3)	22.86
(4)	23.34

Scenarios

Input
Output

Scenario Name	β [deg]	h [m]	Hm0 [m]	Tm-1.0 [s]	h_t [m]	B_t [m]	γ_f [-]	$\cot\alpha_{down}$ [-]	$\cot\alpha_{up}$ [-]	R_c [m]	B [m]	h_b [m]	$\tan\alpha_B$ [-]	A_c [m]	G_c [m]
<input type="checkbox"/> scen 1	0	9.5	3.96	7.18	8	4	0.55	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	4
<input type="checkbox"/> scen 2	0	9.5	4.64	7.73	8	4	0.55	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	4
<input type="checkbox"/> scen 3	0	9.5	4.67	7.82	8	4	0.55	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	4
<input type="checkbox"/> scen 4	0	9.5	4.7	7.82	8	4	0.55	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	4

[Add scenario](#)

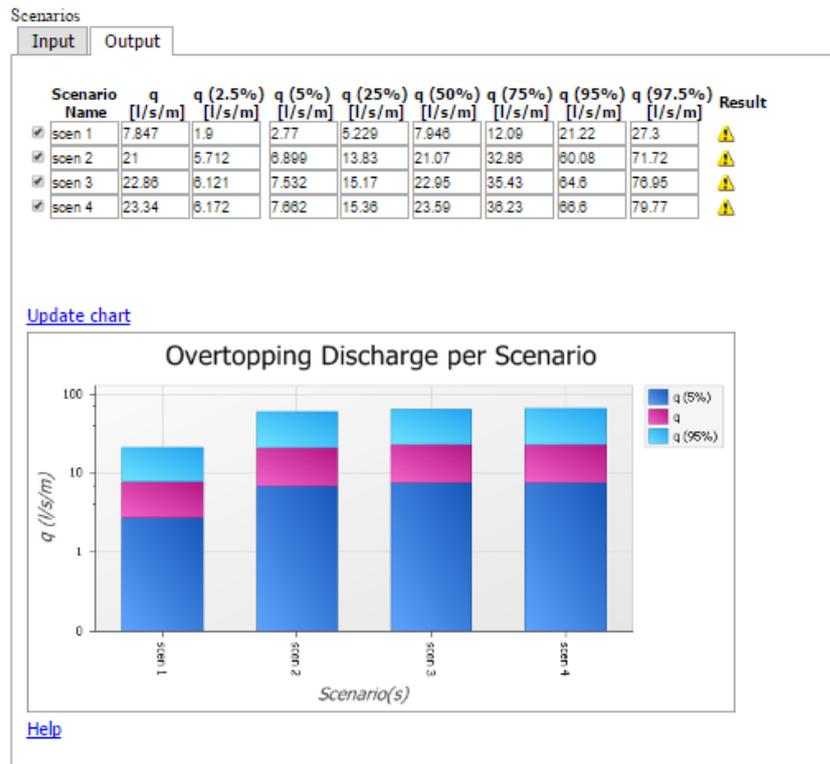
Remove selected scenario(s)

[Calculate all scenarios](#)

[Help](#)

Calculation finished Session249

Click tab Output to see the results



Διατομή Β-Β'

Input data				
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.17	6.36	5.0
(2)	0	3.34	6.64	5.0
(3)	0	3.40	6.73	5.0
(4)	0	3.41	6.73	5.0

Input data											
	h_t (m)	B_t (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_C (m)	A_C (m)	G_C (m)
(1)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(2)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(3)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0
(4)	4.0	9.0	0.55	14.0	0.071	1.0	1.33	1.33	4.5	4.5	3.0

Output data	
Q (l/s/m)	
(1)	0.37
(2)	0.58
(3)	0.68
(4)	0.69

Scenarios

Input Output

Scenario Name	β [deg]	h [m]	Hm0 [m]	Tm-1.0 [s]	ht [m]	Bt [m]	γ [-]	$\cot \alpha$ [-]	$d \cot \alpha$ [-]	Rc [m]	B [m]	hb [m]	$\frac{\tan \alpha}{B}$ [-]	Ac [m]	Gc [m]
<input type="checkbox"/> scen 1	0	5	3.17	8.38	4	9	0.55	1.33	1.33	4.5	14	1	0.071	4.5	3
<input type="checkbox"/> scen 2	0	5	3.34	8.64	4	9	0.55	1.33	1.33	4.5	14	1	0.071	4.5	3
<input type="checkbox"/> scen 3	0	5	3.4	8.73	4	9	0.55	1.33	1.33	4.5	14	1	0.071	4.5	3
<input type="checkbox"/> scen 4	0	5	3.41	8.73	4	9	0.55	1.33	1.33	4.5	14	1	0.071	4.5	3

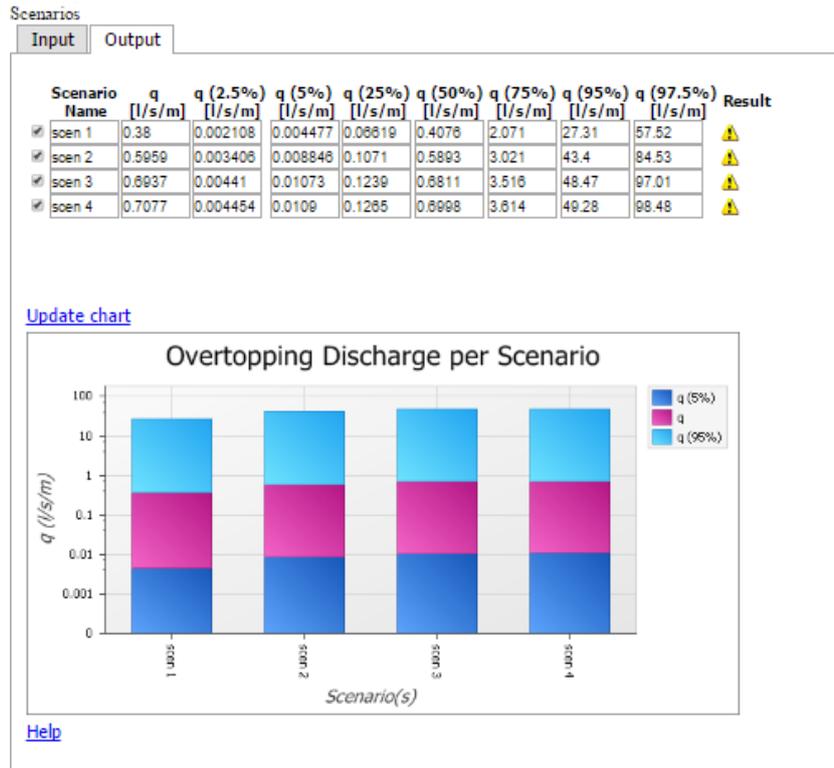
[Add scenario](#)

Remove selected scenario(s)

[Calculate all scenarios](#)

[Help](#)

Calculation finished Session251
Click tab Output to see the results



Διατομή Γ-Γ'

	Input data			
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

	Input data										
	h_t (m)	Bt (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(2)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(3)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0
(4)	6.0	2.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	8.0

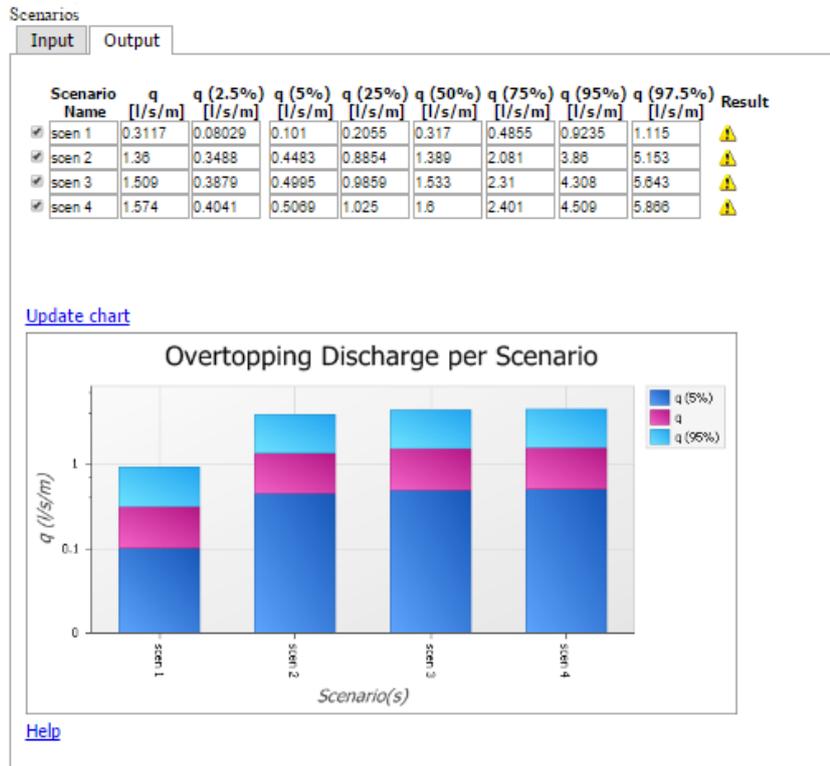
Output data	
Q (l/s/m)	
(1)	0.31
(2)	1.36
(3)	1.50
(4)	1.57

Input
Output

	Scenario Name	β [deg]	h [m]	Hm0 [m]	Tm-1.0 [s]	ht [m]	Bt [m]	γf [-]	cot α [-]	d cot α u [-]	Rc [m]	B [m]	hb [m]	$\frac{\tan \alpha}{B}$ [-]	Ac [m]	Gc [m]
<input type="checkbox"/>	scen 1	0	9.5	3.96	7.18	8	2	0.4	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	8
<input type="checkbox"/>	scen 2	0	9.5	4.64	7.73	8	2	0.4	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	8
<input type="checkbox"/>	scen 3	0	9.5	4.67	7.82	8	2	0.4	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	8
<input type="checkbox"/>	scen 4	0	9.5	4.7	7.82	8	2	0.4	1.33	1.33	6.1	0	0	0	5	8

[Add scenario](#)
 Remove selected scenario(s)
[Calculate all scenarios](#)
[Help](#)

Calculation finished Session191
 Click tab Output to see the results



Διατομή Δ-Δ'

Input data				
	β (°)	H_{m0} (m)	$T_{m-1,0}$ (s)	h (m)
(1)	0	3.96	7.18	9.5
(2)	0	4.64	7.73	9.5
(3)	0	4.67	7.82	9.5
(4)	0	4.70	7.82	9.5

Input data											
	h_t (m)	B_t (m)	γ_f	B (m)	$\tan\alpha_\beta$	h_b (m)	$\cot\alpha_{down}$	$\cot\alpha_{up}$	R_c (m)	A_c (m)	G_c (m)
(1)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(2)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(3)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0
(4)	2.0	4.0	0.4	0	0	0	1.33	1.33	6.1	5.0	4.0

Output data	
Q (l/s/m)	
(1)	2.72
(2)	-
(3)	-
(4)	-

Scenarios

Input Output

Scenario Name	β [deg]	h [m]	Hm0 [m]	Tm-1.0 [s]	ht [m]	Bt [m]	γf [-]	$\cot \alpha_d$ [-]	$\cot \alpha_u$ [-]	Rc [m]	B [m]	hb [m]	$\tan \alpha_B$ [-]	Ac [m]	Gc [m]
<input type="checkbox"/> scen 1	0	9.5	3.98	7.18	2	4	0.4	1.33	1.33	8.1	0	0	0	5	4
<input type="checkbox"/> scen 2	0	9.5	4.64	7.73	2	4	0.4	1.33	1.33	8.1	0	0	0	5	4
<input type="checkbox"/> scen 3	0	9.5	4.67	7.82	2	4	0.4	1.33	1.33	8.1	0	0	0	5	4
<input type="checkbox"/> scen 4	0	9.5	4.7	7.82	2	4	0.4	1.33	1.33	8.1	0	0	0	5	4

[Add scenario](#)

Remove selected scenario(s)

[Calculate all scenarios](#)

[Help](#)

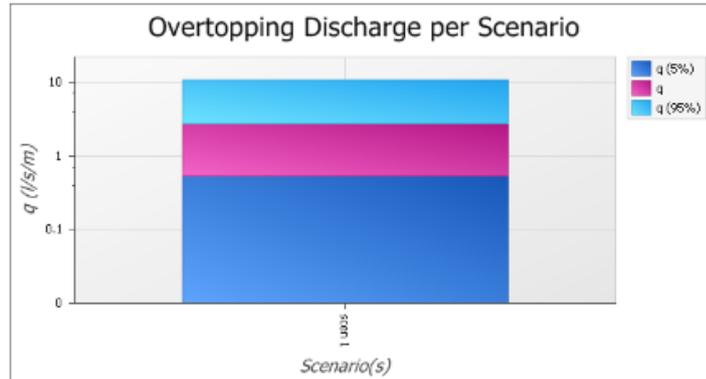
Calculation finished Session191
Click tab Output to see the results

Scenarios

Input Output

Scenario Name	q [l/s/m]	q (2.5%) [l/s/m]	q (5%) [l/s/m]	q (25%) [l/s/m]	q (50%) [l/s/m]	q (75%) [l/s/m]	q (95%) [l/s/m]	q (97.5%) [l/s/m]	Result
<input checked="" type="checkbox"/> scen 1	2.719	0.3911	0.5338	1.425	2.915	5.302	10.86	14.68	⚠
scen 2	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	❌
scen 3	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	❌
scen 4	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000	❌

[Update chart](#)



[Help](#)

Παράρτημα Δ: Πίνακας τιμών Λιμενικών Έργων (ΦΕΚ 63B/19-2-2013)

4. ΝΘΟΡΡΙΠΕΣ - ΦΥΣΙΚΟΙ ΟΓΚΟΙ - ΣΤΡΩΣΕΙΣ ΕΞΥΓΙΑΝΣΗΣ - ΓΕΩΦΑΣΜΑΤΑ					
Άρθρο 4.01	Διάστρωση λιθουστρώματος 5-10 kg	LIM 2210	m ³	11,00	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.02	Λιθορριπές ατομικού βάρους λίθων 0,5 έως 100 kg	LIM 2210	m ³	12,00	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.03	Λιθορριπή φίλτρου 0,50 - 20 kg	LIM 2230	m ³	12,50	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.04	Λιθορριπές εδράσεως ατομικού βάρους λίθων 0,50 - 50 kg	LIM 2210	m ³	12,00	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.05	Λιθορριπές πλήρωσης κιμελών κιμελωτών ογκολίθων	LIM 2240	m ³	12,50	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.06	Λιθορριπές ατομικού βάρους 100 έως 200 kg	LIM 2220	m ³	14,00	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.07	Λιθορριπές ανακουφιστικού πρίσματος ατομικού βάρους 20 - 100 kg	LIM 2230	m ³	11,50	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.08	Θωράκιση λιμενικών έργων με φυσικούς ογκολίθους προέλευσης λατομείου				
4.08.01	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 200 - 1500 kg	LIM 2310	m ³	13,00	+ ΜΤΦ
4.08.02	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 1500 - 2500 kg	LIM 2320	m ³	14,50	+ ΜΤΦ
4.08.03	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 2500 - 4000 kg	LIM 2320	m ³	16,00	+ ΜΤΦ
4.08.04	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 4000 - 8000 kg	LIM 2330	m ³	17,00	+ ΜΤΦ
4.08.05	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους 8000 - 10000 kg	LIM 2340	m ³	23,00	+ ΜΤΦ
4.08.06	Με φυσικούς ογκολίθους ατομικού βάρους άνω των 10000 kg	LIM 2350	m ³	28,00	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.09	Κατασκευή ύψους εξοπλιστικής στρώσης από σκόρα	LIM 2140	m ³	13,00	+ ΜΤΦ
Άρθρο 4.10	Προμήθεια και διάστρωση υφαντού γεωφάσματος σε ύψους τμήματα θαλασσίων έργων				
4.10.01	Εφελκυστικής αντοχής (κατά την κύρια διεύθυνση) 20,0 kN/m	ΥΔΡ 6361	m ²	6,00	
4.10.02	Εφελκυστικής αντοχής (κατά την κύρια διεύθυνση) 30,0 kN/m	ΥΔΡ 6361	m ²	7,00	
4.10.03	Εφελκυστικής αντοχής (κατά την κύρια διεύθυνση) 40,0 kN/m	ΥΔΡ 6361	m ²	8,50	
4.10.04	Εφελκυστικής αντοχής (κατά την κύρια διεύθυνση) 50,0 kN/m	ΥΔΡ 6361	m ²	10,00	
4.10.05	Εφελκυστικής αντοχής (κατά την κύρια διεύθυνση) 80,0 kN/m	ΥΔΡ 6361	m ²	12,00	
Άρθρο 4.12	Κατασκευές με φυσικούς ογκολίθους εξ' ανελκυσίας				
4.12.01	Κατασκευές με φυσ. ογκολίθους στ. βάρους 200 - 1500 kg	LIM 2310	m ³	8,50	+ ΜΤΦ
4.12.02	Κατασκευές με φυσ. ογκολίθους στ. βάρους 1500 - 2500 kg	LIM 2320	m ³	9,50	+ ΜΤΦ
4.12.03	Κατασκευές με φυσ. ογκολίθους στ. βάρους 2500 - 4000 kg	LIM 2320	m ³	10,50	+ ΜΤΦ
4.12.04	Κατασκευές με φυσ. ογκολίθους στ. βάρους άνω των 4000 kg	LIM 2330	m ³	12,00	+ ΜΤΦ
5. ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΙ ΑΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΚΥΦΕΛΩΤΑ ΚΙΒΩΤΙΑ					
Άρθρο 5.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα				
5.01.01	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι βάρους μέχρι 35 ton	LIM 3110	m ³	95,00	
5.01.02	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι βάρους 35 μέχρι 80 τόνων	LIM 3110	m ³	100,00	
5.01.03	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι βάρους άνω των 80 τόνων	LIM 3120	m ³	105,00	
Άρθρο 5.02	Συμπαγείς τεχνητοί ογκολίθοι προετοιμασίας ποδός	LIM 3110	m ³	90,00	
Άρθρο 5.03	Ειδικά τεχνητοί ογκολίθοι θωράκισης	LIM 3400	m ³	120,00	
Άρθρο 5.04	Προκατασκευασμένα στοιχεία ανυψωμένων από σπλισμένο σκυρόδεμα				
5.04.01	Προκατασκευασμένα στοιχεία από σπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	LIM 4240	m ³	150,00	
5.04.02	Προκατασκευασμένα στοιχεία από σπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30	LIM 4240	m ³	155,00	
5.04.03	Προκατασκευασμένα στοιχεία από σπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37	LIM 4240	m ³	160,00	
Άρθρο 5.05	Κιμελωτοί τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα				
5.05.01	Κιμελωτοί τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	LIM 3300	m ³	110,00	
5.05.02	Κιμελωτοί τεχνητοί ογκολίθοι από σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30	LIM 3300	m ³	115,00	
Άρθρο 5.06	Προκατασκευασμένα κιμελωτά κβώτια (saisons) από σπλισμένο σκυρόδεμα				
5.06.01	Κιμελωτά κβώτια από σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25	LIM 3300	m ³	170,00	
5.06.02	Κιμελωτά κβώτια από σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30	LIM 3300	m ³	180,00	
5.06.03	Κιμελωτά κβώτια από σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37	LIM 3300	m ³	190,00	
Άρθρο 5.07	Άρση και επανατοποθέτηση υψισταμένων συμπαγών τεχνητών ογκολίθων				
5.07.01	Άρση / επανατοποθέτηση τεχνητών ογκολίθων βάρους μέχρι 35 τόνων	LIM 3110	m ³	20,00	
5.07.02	Άρση / επανατοποθέτηση τεχνητών ογκολίθων βάρους 35 < B < 80 τόνων	LIM 3110	m ³	25,00	
5.07.03	Άρση / επανατοποθέτηση τεχνητών ογκολίθων βάρους άνω των 80 τόνων	LIM 3110	m ³	30,00	
Άρθρο 5.08	Άρση και επανατοποθέτηση ειδικών τεχνητών ογκολίθων θωράκισης	LIM 3110	m ³	25,00	