



ΠΡΑΞΗ

«Γαλάζια Ανάπτυξη με Καινοτομία και εφαρμογή στις
Ελληνικές Θάλασσες - ΓΛΑΥΚΗ»

κωδικός ΟΠΣ (MIS) 5002438

Υποέργο 2

*«Ανάπτυξη της Βάσης Δεδομένων και Γεωχωρικών
Πληροφοριών του ΥΣ Ρόδου/ΕΛΚΕΘΕ για το Θαλάσσιο
Χωροτακτικό Σχεδιασμό και την Ολοκληρωμένη Διαχείριση
της Παράκτιας Ζώνης στη ν. Ρόδο»*

Πακέτο εργασίας 2 : Εκτίμηση της Τρωτότητας και της
Επικινδυνότητας των Ακτών της Ν. Ρόδο

Υπεύθυνος Πακέτου Εργασίας: Δρ. Β. Καψιμάλης

Παραδοτέο:

(α) Εκτίμηση αναρρίχησης κυματισμών και υποχώρηση ακτογραμμής.

Υλοποίηση :

**Φραγκίσκα-Καρμέλα Γαδ, Μαρία Χατζηνάκη, Δημήτρης
Βανδαράκης, Χαρά Κυριακίδου, Βασίλης Καψιμάλης**

Μάρτιος 2021

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
2	Περιοχή Μελέτης.....	3
2.1	Γενικά Στοιχεία για τη Ν. Ρόδο	3
2.1.1	Γεωμορφολογία.....	4
2.1.2	Κλίμα.....	4
2.1.3	Στάθμη Θάλασσας.....	6
3	Ανάλυση των Κυματικών Καταιγίδων	8
3.1	Δεδομένα Ανάλυσης.....	8
3.2	Μεθοδολογία Ανάλυσης Κυματικών Καταιγίδων	8
3.3	Εκτίμηση Κινδύνου Πλημμύρας	9
3.3.1	Εμπειρική σχέση υπολογισμού της αναρρίχηση κυματισμών.....	9
3.3.2	Αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της αναρρίχηση κυματισμών.....	10
3.3.3	Μετεωρολογική παλίρροια (storm surge)	13
3.4	Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI).....	13
4	Αποτελέσματα	14
4.1	Αποτελέσματα Ανάλυσης Κυματικών Καταιγίδων.....	14
4.2	Εκτίμηση Κίνδυνων και Τρωτότητας σε Πλημμύρα	22
4.2.1	Υπολογισμός αναρρίχησης με εμπειρική σχέση	22
4.2.2	Υπολογισμός αναρρίχησης με αριθμητικό μοντέλο	26
4.2.3	Μετεωρολογική παλίρροια κατά τη διάρκεια γεγονότων καταιγίδας	28
4.2.4	Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI).....	28
5	Συμπεράσματα	34
6	Αναφορές.....	36

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Γεωγραφική θέση περιοχής μελέτης, Ρόδος, οι θέσεις των σημείων (P2-P9) με τα κυματικά δεδομένα και τα γεωγραφικά τμήματα του νησιού στα οποία έγινε η ανάλυση.....	3
Εικόνα 2. Ροδόγραμμα ταχύτητας ανέμου στην περιοχή μελέτης για τη χρονική περίοδο 1995-2004.	5
Εικόνα 3. Ροδόγραμμα σημαντικού ύψους κύματος στην περιοχή μελέτης για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	6
Εικόνα 4. Χρονοσειρά σημαντικού ύψους κύματος κατά τη διάρκεια (α) ενός έτους (1995) και (β) μιας κυματικής καταιγίδας (με δύο κορυφές και $H_s > 1.4$ m (threshold), $dt=93$ hrs και διάρκεια μεταξύ των δύο γεγονότων 9 hrs).	9
Εικόνα 5. Βαθυμετρία ευρύτερης περιοχής Ν. Ρόδου.....	12
Εικόνα 6. Εκτίμηση του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) σε σχέση με την ενδιάμεση παράμετρο πλημμύρας FIP (Mendoza and Jiménez, 2009).	13
Εικόνα 7. Συχνότητα εμφάνισης κλάσεων καταιγίδων ανά γεωγραφική περιοχή της Ρόδου.	15
Εικόνα 8. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (H_s , T_p , E , dt) των ασθενών καταιγίδων (Class I-weak) ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.	19
Εικόνα 9. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (H_s , T_p , E , dt) των καταιγίδων κλάσης II-moderate ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.....	19
Εικόνα 10. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (H_s , T_p , E , dt) των καταιγίδων κλάσης III-significant ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.	20
Εικόνα 11. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (H_s , T_p , E , dt) των καταιγίδων κλάσης IV-severe ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.....	20
Εικόνα 12. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (H_s , T_p , E , dt) των ακραίων καταιγίδων (Class V-extreme) ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.	21
Εικόνα 13. Θέσεις εγκάρσιων διατομών κατά μήκος της ακτογραμμής της Ρόδου.....	23
Εικόνα 14. Αναρρίχηση και μορφολογικά χαρακτηριστικά σε κάθε εξεταζόμενη διατομή ανά κλάση καταιγίδων.	24
Εικόνα 15. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση ασθενών καταιγίδων, Class-I.	29
Εικόνα 16. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση καταιγίδων Class-II.	30
Εικόνα 17. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση καταιγίδων Class-III.	31
Εικόνα 18. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση καταιγίδων Class-IV.....	32
Εικόνα 19. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση ακραίων καταιγίδων, Class-V.....	33

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Στατιστικά στοιχεία στάθμης θάλασσας περιόδου 2010 – 2012 (Υδρογραφική Υπηρεσία, 2013).	7
Πίνακας 2. Πλήθος κυματικών καταιγίδων ανά γεωγραφική περιοχή της Ρόδου κατά τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	14
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο βόρειο τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	16
Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο βορειοανατολικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	16
Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο ανατολικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	16
Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο νοτιοανατολικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	17
Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο νότιο τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	17
Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο νοτιοδυτικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	17
Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο δυτικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	18
Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο βορειοδυτικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.....	18
Πίνακας 11. Αντιπροσωπευτική τιμή αναρρίχησης ανά κλάση καταιγίδας για κάθε εξεταζόμενη διατομή στο βόρειο, βορειοανατολικό και ανατολικό τμήμα του νησιού.....	25
Πίνακας 12. Αντιπροσωπευτική τιμή αναρρίχησης ανά κλάση καταιγίδας για κάθε εξεταζόμενη διατομή στο βόρειο, βορειοανατολικό και ανατολικό τμήμα του νησιού.....	26
Πίνακας 13. Μέγιστη κατακόρυφη αναρρίχηση ανά προφίλ για κάθε κλάση καταιγίδας.....	27
Πίνακας 14. Ποσοστό εξεταζόμενων διατομών ανά κλάση καταιγίδας και ο αντίστοιχος χαρακτηρισμός της τρωτότητας.....	28

Λίστα Συμβόλων

B_{max}	Μέγιστο ύψος χερσαίου τμήματος παραλίας
d	Βάθος
dt	Διάρκεια κυματικών καταιγίδων
E	Ενεργειακό περιεχόμενο κυματικών καταιγίδων
FIP	Ενδιάμεση Παράμετρος Πλημμύρας (Flood Intermediate Parameter)
FIV	Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (Flood Vulnerability Index)
H_0	Ύψος κύματος στα βαθιά
H_s	Σημαντικό ύψος κύματος
L_0	Μήκος κύματος στα βαθιά
MWD	Μέση κατεύθυνση κυματισμών
R	Αναρρίχηση κυματισμών (wave run-up)
T_p	Περίοδος αιχμής κυματισμών
θ_f	Κλίση μετώπου ακτής
ϑ	Κατεύθυνση διάδοσης κυματισμών
ξ	Μετεωρολογική παλίρροια (storm surge)
σ	Σχετική συχνότητα

1 Εισαγωγή

Οι παράκτιες ζώνες αποτελούν ιδιαίτερα σύνθετα συστήματα, με μεγάλη σημασία από περιβαλλοντική και κοινωνικοοικονομική άποψη, καθώς χαρακτηρίζονται από υψηλή βιοποικιλότητα και μεγάλη συγκέντρωση πληθυσμού και ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την προστασία τους από τις φυσικές και ανθρωπογενείς πιέσεις που δέχονται. Τις τελευταίες δεκαετίες ακραία φαινόμενα, όπως οι κυματικές καταιγίδες, προκαλούν σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές, θέτοντας σε κίνδυνο τόσο τις παραλίες όσο και τις παράκτιες κατασκευές (λιμένες, κλπ).

Για την εκτίμηση των πιθανών κινδύνων που προκαλούνται από τις κυματικές καταιγίδες στις παράκτιες περιοχές, έχει προταθεί η κατάταξη των γεγονότων αυτών με βάση την έντασή τους. Πρώτοι οι Dolan and Davis (1992) πρότειναν την ταξινόμηση των κυματικών καταιγίδων σε πέντε (5) κλάσεις (I-weak, II-moderate, III-significant, IV-severe and V-extreme) ανάλογα με την ενέργειά τους που εκφράζεται από το ύψος κύματος και τη διάρκεια τους. Η μεθοδολογία αυτή έχει εφαρμοστεί σε διάφορες περιοχές του Ατλαντικού Ωκεανού (Dolan and Davis, 1992; Rangel-Buitrago and Anfuso, 2011, Mendoza et al, 2013) αλλά και της Μεσογείου Θάλασσας (Mendoza et al., 2011; Kokkinos et al., 2014; Tsoukala et al., 2016, Martzikos et al., 2017) για την εκτίμηση των κινδύνων σε πλημμύρα ή/και διάβρωση.

Οι κυματικές καταιγίδες προκαλούν παράκτιες πλημμύρες μέσω της αναρρίχησης των κυματισμών στις ακτών (wave run-up) και της μετεωρολογικής παλίρροιας (storm surge). Η αναρρίχηση των κυματισμών αποτελεί μια σημαντική παράμετρο για τους μηχανικούς και τους φορείς λήψης αποφάσεων για τον προσδιορισμό του ορίου μια ακτής στην ξηρά. Για τον προσδιορισμό της αναρρίχησης χρησιμοποιούνται τόσο εμπειρικές σχέσεις (Holman, 1986, Nielsen and Hanslow, 1991, Stockdon et al., 2006) όσο και αριθμητικά μοντέλα (Hubbard and Dodd, 2002, Yamazaki et al., 2009, Roelvink et al., 2009) και εξαρτάται από τις κυματικές παραμέτρους και την γεωμορφολογία της ακτής. Από την άλλη η μετεωρολογική παλίρροια υπολογίζεται με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων (Westerink, 1992, Hubbert and McInnes, 1999). Οι Mendoza and Jimenez (2009) έχουν αναπτύξει το Συντελεστή Τρωτότητας σε Πλημμύρα (Flood Vulnerability Index, FVI) για την εκτίμηση του πιθανού κινδύνου πλημμύρας των παράκτιων περιοχών, ο οποίος βασίζεται στην αναρρίχηση, τη μετεωρολογική παλίρροια και τη μορφολογία της ακτής (ήτοι το ύψος του έξαλλου αναβαθμού της παραλίας). Ο FVI ομοίως ταξινομείται σε πέντε (5) κλάσεις και κυμαίνεται από πολύ χαμηλός έως πολύ υψηλός.

Η μεθοδολογία που συνδυάζει την ταξινόμηση των καταιγίδων σε κλάσεις ανάλογα με την ενέργειά τους καθώς και τον υπολογισμό της τρωτότητας σε πλημμύρα, μέσω του FVI, αποτελεί ένα εργαλείο για τους μηχανικούς και τις αρμόδιες αρχές προκειμένου να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα για τον περιορισμό των επιπτώσεων των κυματικών καταιγίδων και την προστασία των παράκτιων περιοχών. Η ανάγκη για την πρόβλεψη, την εκτίμηση και τη διαχείριση των πιθανών κινδύνων υπογραμμίζεται στο Πρωτόκολλο για την Ολοκληρωμένη Διαχείριση των Παρακτίων Ζωνών της Μεσογείου (UNEP/MAP/PAP, 2008) καθώς και στην Οδηγία 2007/60/EK για τις πλημμύρες.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα μελέτη αφορά στην ανάλυση του κυματικού κλίματος, τον προσδιορισμό και την ταξινόμηση των κυματικών καταιγίδων στη Ν. Ρόδο καθώς και στην εκτίμηση των πιθανών κινδύνων που προκύπτουν από αυτά στις παράκτιες περιοχές του νησιού. Για την ταξινόμηση των κυματικών καταιγίδων σε πέντε (5) κλάσεις ανάλογα με την έντασή τους εφαρμόστηκε η ανάλυση κατά συστάδες (cluster analysis). Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός της αναρρίχησης των κυματισμών κάθε κλάσης καταιγίδας στις ακτές της Ρόδου προκειμένου να εκτιμηθεί ο Συντελεστής Τρωτότητας σε Πλημμύρα (Flood Vulnerability Index, FVI). Ο υπολογισμός της αναρρίχησης έγινε με τη χρήση εμπειρικής εξίσωσης και αριθμητικών μοντέλων. Για την προσομοίωση των κυματισμών στις παράκτιες περιοχές και για την εκτίμηση των επιπτώσεων τους σε αυτές έγινε εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων MIKE 21 SW και MIKE 21 BW

του λογισμικού πακέτου MIKEZero του Danish Hydraulic Institute (DHI) που διαθέτει το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών, στο βόρειο και βορειοδυτικό τμήμα του νησιού όπου εκτιμήθηκε η μεγαλύτερη τρωτότητα σε πλημμύρα και το οποίο παρουσιάζει ενδιαφέρον μελέτης εξαιτίας της έντονης οικιστικής ανάπτυξης.

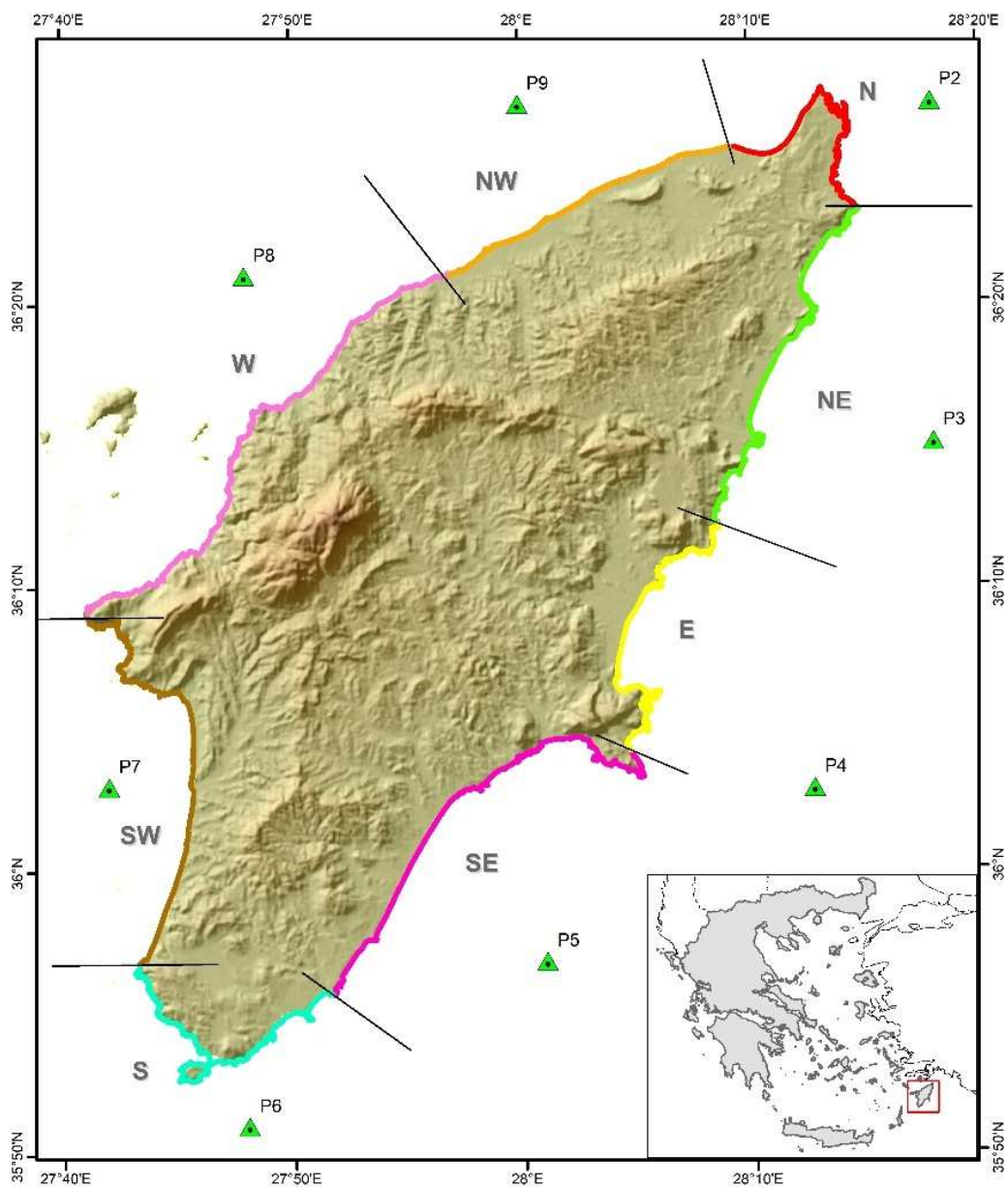
Στις παρακάτω ενότητες γίνεται αρχικά μια περιγραφή της περιοχής μελέτης και του ανεμολογικού και κυματικού κλίματος αυτής. Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό και την ταξινόμηση των κυματικών καταιγίδων. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των καταιγιδικών γεγονότων και των επιπτώσεων τους στις παράκτιες περιοχές καθώς επίσης και χάρτες της Ρόδου με τον FVI για κάθε κλάση καταιγίδας.

2 Περιοχή Μελέτης

2.1 Γενικά Στοιχεία για τη Ν. Ρόδο

Η Ν. Ρόδος βρίσκεται στο νοτιοανατολικό Αιγαίο, περίπου 350 km νοτιοανατολικά της Αθήνας και 18 km νοτιοδυτικά της Τουρκίας (Εικόνα 1). Με έκταση περί τα 1 400 km² αποτελεί το μεγαλύτερο νησί του συμπλέγματος των Δωδεκανήσων και το τέταρτο μεγαλύτερο της Ελλάδας. Διαθέτει ακτογραμμή μήκους 253 km και το υψηλότερο σημείο της είναι η κορυφή του όρους Αττάβυρος με υψόμετρο 1 215 m.

Το νησί αποτελεί ομώνυμο δήμο και διοικητικά ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα Ρόδου της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής από την απογραφή του 2011, ο πληθυσμός του νησιού ανέρχεται σε 115 490 μόνιμους κατοίκους. Η πρωτεύουσα, η πόλη της Ρόδου, βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο του νησιού και αποτελεί το μεγαλύτερο οικισμό, με πληθυσμό περίπου 50 000 κατοίκους. Άλλοι μεγάλοι οικισμοί είναι ο Ιαλυσός και η Κρεμαστή στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού και τα Αφάντου και ο Αρχάγγελος στην ανατολική Ρόδο.



Εικόνα 1. Γεωγραφική θέση περιοχής μελέτης, Ρόδος, οι θέσεις των σημείων (P2-P9) με τα κυματικά δεδομένα και τα γεωγραφικά τμήματα του νησιού στα οποία έγινε η ανάλυση.

2.1.1 Γεωμορφολογία

Το ανάγλυφο της Ρόδου είναι κατά βάση ορεινό ή ημιορεινό, ενώ υπάρχουν πεδιάδες και κοιλάδες τόσο στα δυτικά όσο και στα ανατολικά. Η ορεινή ραχοκοκαλιά του νησιού εκτείνεται κατά μήκος της δυτικής ακτής με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και υψηλότερη κορυφή τα 1 215 m του όρους Αττάβυρος στο κεντρικό τμήμα. Η διεύθυνση αυτή συμπίπτει με τη διεύθυνση του κύριου υδροκρίτη του νησιού χωρίζοντας το υδρογραφικό δίκτυο σε δυτικό και ανατολικό.

Η ακτογραμμή, με μήκος περί τα 253 km, παρουσιάζει οριζόντιο διαμελισμό με εναλλαγές βραχιδών ακτών, με παραλίες με άμμο, βότσαλα και αμμοθίνες (Βερυκίου - Παπασπυριδάκου et al, 2004).

Η κλίση των ακτών της Ρόδου είναι της τάξης του 7%-8% στο βόρειο τμήμα του νησιού και περίπου 4% στο βορειοδυτικό τμήμα (Gad et al., 2018). Οι παραλίες στο βορειοανατολικό τμήμα έχουν μέση κλίση περίπου 6%, ενώ είναι πιο απότομες στο ανατολικό, νοτιοανατολικό και νοτιοδυτικό τμήμα, με μέση κλίση περίπου 7%. Στο κεντρικό δυτικό τμήμα επικρατούν οι βραχώδεις ακτές, ενώ οι ελάχιστες αμμώδεις ακτές ένα μέση κλίση μεγαλύτερη από 15%.

2.1.2 Κλίμα

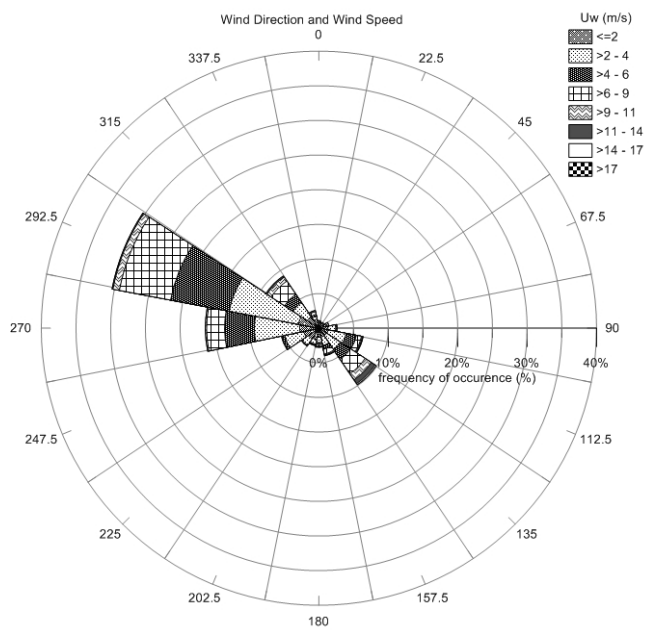
Το κλίμα της Ρόδου χαρακτηρίζεται ως εύκρατο και τυπικό μεσογειακό νησιώτικο, με ήπιους και σχετικά υγρούς χειμώνες και ξηρά καλοκαίρια. Η υγρή περίοδος διαρκεί από τον Οκτώβριο έως και τον Μάιο, με τις περισσότερες βροχοπτώσεις να παρατηρούνται το Δεκέμβριο και τον Ιανουάριο. Οι πιο θερμοί μήνες είναι από τον Μάιο μέχρι τον Οκτώβριο.

2.1.2.1 Ανεμολογικό και κυματικό κλίμα

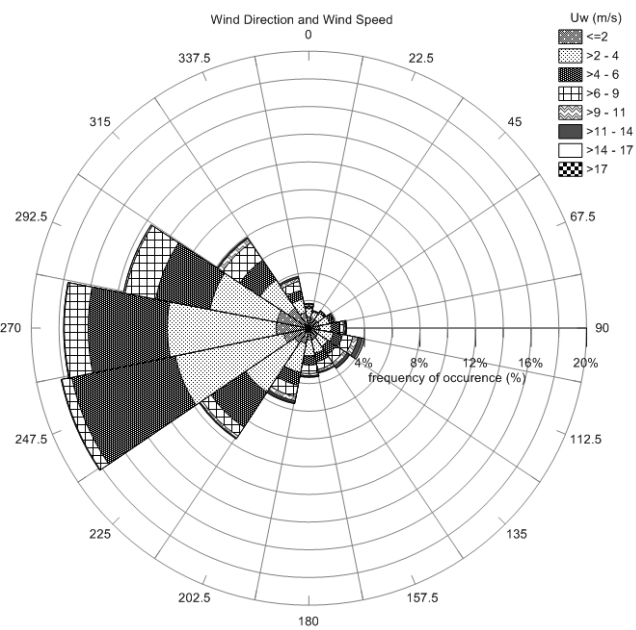
Οι επικρατούντες άνεμοι στην περιοχή πνέουν από δυτικά, δυτικά-βορειοδυτικά και δυτικά-νοτιοδυτικά. Ωστόσο, οι ισχυρότεροι άνεμοι προέρχονται από νοτιοανατολικές και ανατολικές-νοτιοανατολικές διευθύνσεις, με ταχύτητα που μπορεί να υπερβεί τα 15 m/s.

Όσον αφορά τις κυματικές συνθήκες στην περιοχή της Ρόδου, οι επικρατούσες διευθύνσεις είναι η δυτική, οι δυτική-νοτιοδυτική και οι δυτική-βορειοδυτική με συχνότητα εμφάνισης μεγαλύτερη από 25%. Στο βόρειο και ανατολικό τμήμα οι μεγαλύτεροι κυματισμοί προέρχονται από νότια-νοτιοανατολικά και νότια-νοτιοδυτικά, ενώ στο νότιο και δυτικό τμήμα τα ισχυρότερα κυματικά γεγονότα διαδίδονται από δυτικά-βορειοδυτικά και δυτικά. Στην νότια Ρόδο κατά τη διάρκεια πνοής ισχυρών ανέμων το σημαντικό ύψος κύματος (H_s) μπορεί να ξεπεράσει τα 6.5 m, ενώ στο βόρειο τμήμα του νησιού φτάνει έως 4.3 m. Οι ανεμογενείς κυματισμοί είναι οι πιο συχνοί στην περιοχή μελέτης, με συνήθεις τιμές περιόδου αιχμής (T_p) από 3 έως 6 s. Μόνο ένα μικρό ποσοστό των κυματικών γεγονότων (<0.01%) είναι αποθάλασσα (swell), με περίοδο αιχμής μεγαλύτερη από 15 s.

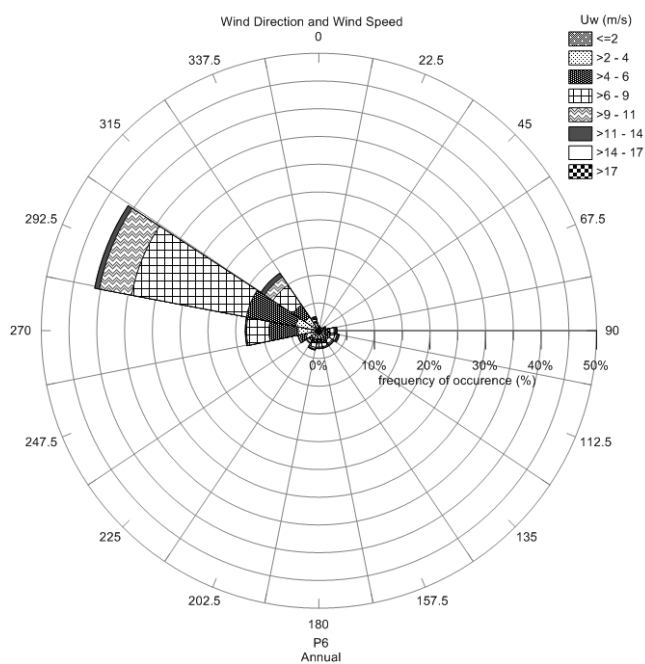
Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα ροδογράμματα ανέμου και κύματος στο βόρειο, το ανατολικό, το νότιο και το δυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Τα γραφήματα αυτά προέκυψαν από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων του «Ατλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών», (Soukissian et al., 2007). και αναφέρονται σε χρονική περίοδο 10 ετών (1995-2004).



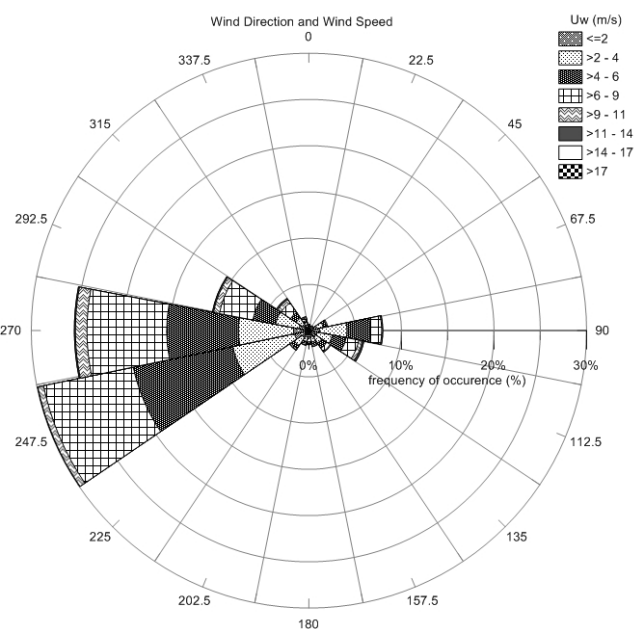
(α) βόρεια περιοχή



(β) ανατολική περιοχή

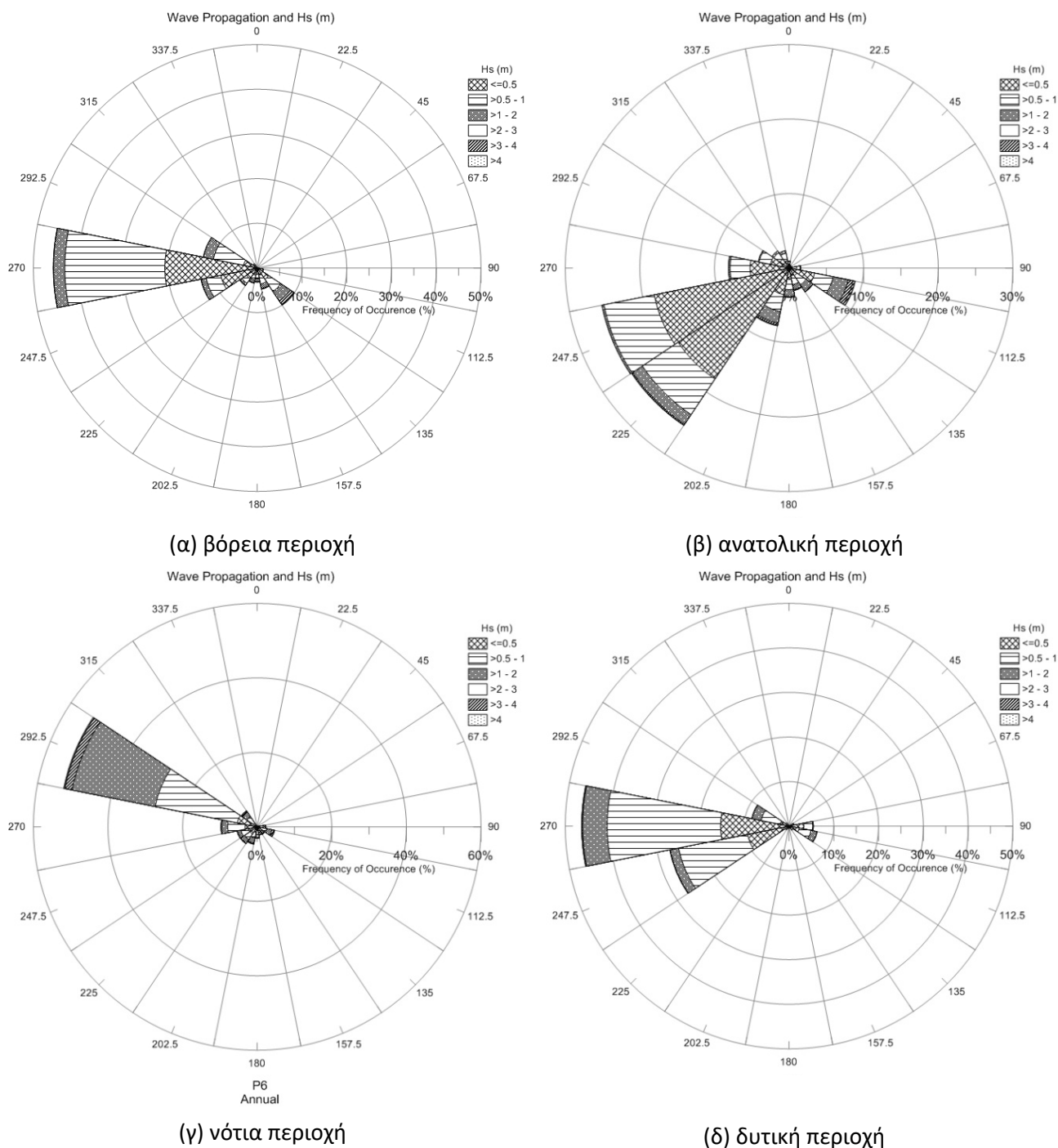


(γ) νότια περιοχή



(δ) δυτική περιοχή

Εικόνα 2. Ροδόγραμμα ταχύτητας ανέμου στην περιοχή μελέτης για τη χρονική περίοδο 1995-2004.



Εικόνα 3. Ροδόγραμμα σημαντικού ύψους κύματος στην περιοχή μελέτης για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

2.1.3 Στάθμη Θάλασσας

Τα δεδομένα της θαλάσσιας στάθμης προήλθαν από τον παλιρροιογράφο του λιμένα της Ρόδου (γεωγραφικό πλάτος: 36°26'30.18"B και γεωγραφικό μήκος: 28°14'11.18"A), τα οποία καλύπτουν τη χρονική περίοδο 2010-2012.

Το παλιρροϊκό εύρος στην περιοχή της Ρόδου είναι τύπου μικροπαλίρροιας (micro-tidal). Σύμφωνα με τα δεδομένα από την Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού η διαφορά μεταξύ της Κατώτατης Ρηχίας (Κ.Ρ.) και της Μέσης Στάθμης Θάλασσας (Μ.Σ.Θ.) είναι 0.70 m, ενώ μεταξύ της Μέγιστης Πλήμμης (Μ.Π.) και της Μ.Σ.Θ είναι 0.42 m (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Στατιστικά στοιχεία στάθμης θάλασσας περιόδου 2010 – 2012 (Υδρογραφική Υπηρεσία, 2013).

Στοιχεία Παλίρροιας	Μέτρηση (m)¹
Μέγιστη Πλήμμη (Μ.Π.)	1.12
Μέση Πλήμμη	0.77
Μέση Στάθμη Θάλασσας (Μ.Σ.Θ.)	0.70
Μέση Ρηχία	0.64
Κατώτατη Ρηχία (Κ.Ρ.)	0.00

¹ Ως προς το μηδέν του παλιρροιομέτρου.

3 Ανάλυση των Κυματικών Καταιγίδων

3.1 Δεδομένα Ανάλυσης

Τα κυματικά δεδομένα για την ανάλυση των κυματικών καταιγίδων προήλθαν από τον «Άτλαντα Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών», εφεξής Άτλας, που έχει δημιουργηθεί από το ΕΛΚΕΘΕ (Σουκισιάν et al., 2007). Τα δεδομένα προσομοίωσης του Άτλαντα έχουν διάρκεια δέκα (10) ετών (1995 - 2004) με χρονικό βήμα τριών (3) ωρών και χωρική ανάλυση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Οι χρονοσειρές των κυματικών παραμέτρων (H_s , T_p , MWD) που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση των καταιγίδων, προήλθαν από οκτώ (8) θέσεις ανοικτά των ακτών της Ρόδου (Εικόνα 1).

Τα δεδομένα που αφορούν τη μετεωρολογική παλίρροια (storm surge) στην ευρύτερη περιοχή της Ρόδου προήλθαν από τη βάση δεδομένων Copernicus, η οποία περιλαμβάνει χρονοσειρές ιστορικών δεδομένων και προβλέψεων μελλοντικών γεγονότων (μέχρι το 2100) με υψηλή χωρική ανάλυση (από $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ στην παράκτια ζώνη έως $1^\circ \times 1^\circ$ στην ανοιχτή θάλασσα) και χρονικό βήμα 10 λεπτών (Copernicus Climate Change Service, 2020).

Τα βαθυμετρικά δεδομένα προήλθαν από μετρήσεις του ΕΛΚΕΘΕ καθώς και από τη βάση δεδομένων EMODnet (2018), ενώ τα τοπογραφικά δεδομένα προήλθαν από το Ελληνικό Κτηματολόγιο.

3.2 Μεθοδολογία Ανάλυσης Κυματικών Καταιγίδων

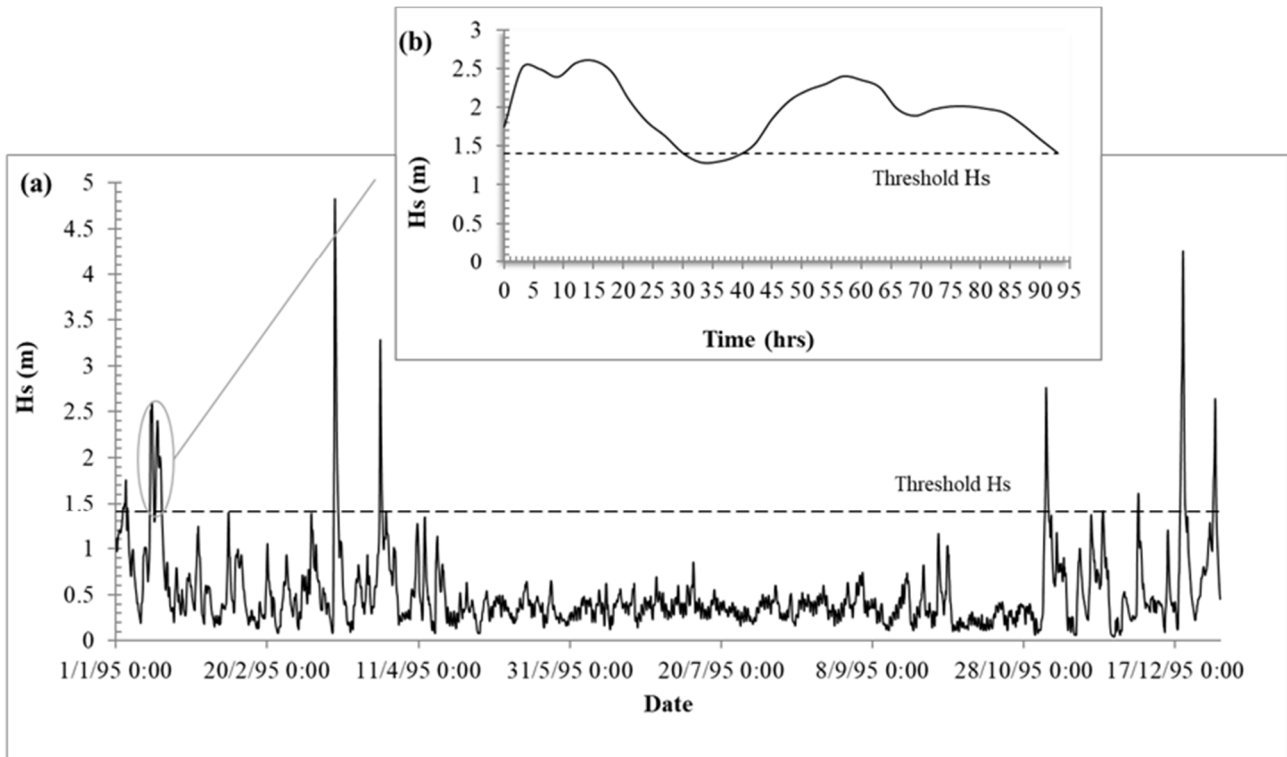
Γενικά, ως κυματική καταιγίδα ορίζεται ένα γεγονός του οποίου το ύψος κύματος ξεπερνά μια συγκεκριμένη τιμή (threshold) για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από μια ελάχιστη διάρκεια. Στη διεθνή βιβλιογραφία τόσο η τιμή του threshold του ύψους κύματος όσο και η ελάχιστη διάρκεια της καταιγίδας ποικίλουν. Στη συγκεκριμένη μελέτη ως κυματική καταιγίδα ορίζεται ένας γεγονός του οποίου το σημαντικό ύψος κύματος (H_s) ξεπερνά το 95ο ποσοστημόριο του δείγματος (Martzikos et al., 2018) για χρονικό διάστημα (dt) τουλάχιστον 6 ωρών (De Michele et al., 2007; Mendoza et al., 2011). Επιπλέον, προκειμένου να προσδιοριστεί αν δύο καταιγίδες είναι στατιστικά ανεξάρτητα γεγονότα τίθεται ως κριτήριο η χρονική διάρκεια μεταξύ αυτών να είναι μεγαλύτερη από 24 ώρες (Rangel-Buitrago and Anfuso, 2011). Σε αντίθετη περίπτωση τα γεγονότα αυτά θεωρούνται ως μια καταιγίδα με δύο κορυφές (όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4). Ένα επιπλέον κριτήριο που ελήφθη υπόψη είναι η μέση κατεύθυνση των καταιγίδων σε σχέση με τον προσανατολισμό των υπό μελέτη ακτών και έτσι συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση μόνο τα γεγονότα που μεταδίδονται προς τις ακτές του νησιού. Για τον υπολογισμό της μέσης κατεύθυνσης μιας καταιγίδας χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις στατιστικής ανάλυσης κυκλικών δεδομένων (Soukissian, 2014).

Μετά τον προσδιορισμό των κυματικών καταιγίδων στη χρονοσειρά των δεδομένων ακολούθησε η ταξινόμησή τους σε κλάσεις με τη μέθοδο της ανάλυσης συστάδων (cluster analysis), χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές το ενεργειακό περιεχόμενο (E) κάθε καταιγίδας και την περίοδο αιχμής (T_p) των κυματισμών, οι οποίες εκφράζουν την ένταση κάθε γεγονότος (Martzikos et al, 2017). Η ενέργεια μιας καταιγίδας έχει οριστεί από τους Dolan and Davis (1992, 1994) από τη σχέση:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} H_s^2 dt \quad (1)$$

όπου H_s είναι το σημαντικό ύψος κύματος και $dt=t_2-t_1$ η διάρκεια της καταιγίδας. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι ομαδοποίησης Μέσου Δεσμού (Average Linkage) και κατά Ward's και σαν μέτρο απόστασης η Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των επιλεγμένων μεταβλητών (E και T_p) και δημιουργήθηκαν πέντε (5) κλάσεις καταιγίδων (I-weak, II-moderate, III-significant, IV-severe, V-extreme). Αυτές οι μέθοδοι ομαδοποίησης χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους (με διαφορετικούς συντελεστές στάθμισης) για τον υπολογισμό της απόστασης μεταξύ δύο παρατηρήσεων ή δύο ομάδων (Σιάρδος, 1998, Hardle and Simar, 2007, Hahs-Vaughn, 2016). Για την επαλήθευση των δύο μεθόδων υπολογίστηκαν οι δείκτες Dunn και Silhouette (Martzikos et al., 2017). Ο δείκτης Dunn ορίζει την πυκνότητα των συστάδων και πόσο καλά

διαχωρισμένες είναι (υψηλή τιμή του δείκτη Dunn συνεπάγεται ικανοποιητική ομαδοποίηση των παρατηρήσεων). Ο δείκτης Silhouette προσδιορίζει το βαθμό εμπιστοσύνης μιας ομάδας (όταν η τιμή του δείκτη Silhouette τείνει στη μονάδα συνεπάγεται ικανοποιητική ομαδοποίηση των παρατηρήσεων). Στη συγκεκριμένη μελέτη λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των παραπάνω δεικτών προκύπτει ότι η βέλτιστη μέθοδος ομαδοποίησης είναι του Μέσου Δεσμού (Average Linkage), η οποία έχει επίσης χρησιμοποιηθεί και σε άλλες αναλύσεις κλιματικών δεδομένων (Dolan and Davis, 1992, 1994; Mendoza et al., 2011).



Εικόνα 4. Χρονοσειρά σημαντικού ύψους κύματος κατά τη διάρκεια (α) ενός έτους (1995) και (β) μιας κυματικής καταιγίδας (με δύο κορυφές και $H_s > 1.4$ m (threshold), $dt=93$ hrs και διάρκεια μεταξύ των δύο γεγονότων 9 hrs).

Η ομαδοποίηση των κυματικών καταιγίδων με τις παραπάνω μεθόδους εφαρμόστηκε σε οκτώ (8) γεωγραφικές περιοχές της Ρόδου (Εικόνα 1) όπου υπάρχουν διαθέσιμα κυματικά δεδομένα από τον «Άτλαντα».

3.3 Εκτίμηση Κινδύνου Πλημμύρας

Ο πιθανός κίνδυνος πλημμύρας των παράκτιων περιοχών εξαρτάται από την αναρρίχηση των κυματισμών στις ακτές καθώς και από τη μετεωρολογική παλίρροια που μπορεί να προκαλέσει σημαντική άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Η αστρονομική παλίρροια δεν ελήφθη υπόψη στη συγκεκριμένη ανάλυση καθώς το εύρος της είναι πολύ μικρό στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

3.3.1 Εμπειρική σχέση υπολογισμού της αναρρίχηση κυματισμών

Ο πιθανός κίνδυνος πλημμύρας εκτιμήθηκε υπολογίζοντας την αναρρίχηση των κυματισμών σε αντιπροσωπευτικές εγκάρσιες διατομές κατά μήκος της ακτογραμμής της Ρόδου. Για τον υπολογισμό της αναρρίχησης χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική σχέση των Stockdon et al. (2006):

$$R = 1.1\{0.35\beta_f\sqrt{H_0L_0} + \frac{1}{2}[H_0L_0(0.563\beta_f^2 + 0.004)]^{1/2}\} \quad (2)$$

όπου βf είναι η κλίση του μετώπου της ακτής και H_0 και L_0 το ύψος και το μήκος κύματος αντίστοιχα στα βαθιά, τα οποία αντιστοιχούν στις πιο ακραίες συνθήκες κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος καταιγίδας. Η παραπάνω σχέση επιλέχθηκε καθώς χρησιμοποιείται τόσο στις απορροφητικές ακτές (dissipative beaches) που χαρακτηρίζονται από ήπια κλίση και λεπτόκοκκο ίζημα, όσο και στις ανακλαστικές (reflective) με έντονη κλίση και χονδρόκοκκο υλικό.

Στη συνέχεια, σε κάθε εγκάρσια διατομή υπολογίστηκε η αναρρίχηση λαμβάνοντας υπόψη τα δυσμενέστερα κυματικά χαρακτηριστικά (H_s και T_p) κατά τη διάρκεια κάθε καταιγίδας προκειμένου να γίνει εκτίμηση της μέγιστης τιμής της αναρρίχησης στην ακτή. Επιπλέον υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μέγιστων αναρρίχησης που προέκυψαν για όλες τις καταιγίδες μιας συγκεκριμένης κλάσης (Mendoza et al., 2011), αποτελώντας μια αντιπροσωπευτική τιμή της αναρρίχησης σε κάθε εξεταζόμενη διατομή.

3.3.2 Αριθμητικό μοντέλο για την προσομοίωση της αναρρίχηση κυματισμών

Για την προσομοίωση των κυματικών καταιγίδων και τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τους τόσο στην ανοιχτή θάλασσα, όπου δίνονται τα δεδομένα του «Ατλαντα», όσο και στην παράκτια ζώνη της Ρόδου επιλέχθηκε το φασματικό κυματικό μοντέλο MIKE 21 SW (Spectral Wave) του Danish Hydraulic Institute (DHI). Στη συνέχεια εφαρμόστηκε το κυματικό μοντέλο MIKE 21 BW (Boussinesq Wave) για τον υπολογισμό της αναρρίχησης στην ακτή.

Το διδιάστατο (2D) φασματικό κυματικό μοντέλο, MIKE 21 SW, προσομοιώνει την ανάπτυξη και το μετασχηματισμό ανεμογενών κυματισμών και αποθάλασσας σε υπεράκτιες και παράκτιες περιοχές. Τα φαινόμενα που λαμβάνονται υπόψη είναι (DHI, 2014a):

- Ανάπτυξη κυματισμών εξαιτίας της δράσης του ανέμου
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση μεταξύ κυματισμών
- Διάχυση ενέργειας λόγω θραύσης στην ανοιχτή θάλασσα
- Διάχυση ενέργειας λόγω τριβής στον πυθμένα
- Διάχυση ενέργειας λόγω θραύσης στα ρηχά νερά
- Διάθλαση και ρήχωση
- Αλληλεπίδραση κυματισμών-ρευμάτων
- Επίδραση χρονικά μεταβαλλόμενου βάθους.

Το MIKE 21 SW βασίζεται στην εξίσωση ισορροπίας της κυματικής δράσης (wave action balance equation) κατά την οποία το κυματικό πεδίο εκφράζεται από την φασματική πυκνότητα της κυματικής δράσης

$$N = \frac{E}{\sigma} \quad (3)$$

όπου $E(\sigma, \theta)$ η πυκνότητα της κυματικής ενέργειας, $\sigma = 2\pi f$ η σχετική συχνότητα και θ η κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Για τη διακριτοποίηση των εξισώσεων του μοντέλου στο γεωγραφικό και φασματικό χώρο χρησιμοποιείται η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων στο κέντρο του υπολογιστικού κελιού. Για τη χρονική ολοκλήρωση χρησιμοποιείται ένα ρητό σχήμα πολλαπλής ακολουθίας.

Η βαθυμετρία εισάγεται στο μοντέλο υπό μορφή ευέλικτου πλέγματος τριγωνικών ή ορθογωνικών στοιχείων (Flexible Mesh). Το πλέγμα αυτό δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να επιτύχει υψηλή ανάλυση σε περιοχές που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα δημιουργώντας στοιχεία μικρού εμβαδού. Σε περιοχές όπου δεν απαιτείται λεπτομερής ανάλυση διαμορφώνονται στοιχεία μεγαλύτερου εμβαδού και παράλληλα περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό ο χρόνος των υπολογισμών. Αυτό είναι και το βασικό πλεονέκτημα του ευέλικτου πλέγματος έναντι του ορθογωνικού κανάβου που χρησιμοποιείται σε άλλα μοντέλα.

Σε κάθε στοιχείο του υπολογιστικού πλέγματος υπολογίζονται:

- Το σημαντικό ύψος κύματος
- Η περίοδος αιχμής του κύματος
- Η μέση περίοδος του κύματος
- Η μέση περίοδος μηδενικής υπέρβασης
- Η περίοδος κυματικής ενέργειας
- Η κατεύθυνση κορυφής του κυματισμού
- Η μέση κατεύθυνση κυματισμού
- Η τυπική απόκλιση ανά κατεύθυνση
- Το ύψος κυματισμού ανά κατεύθυνση
- Οι τάσεις ακτινοβολίας

Το MIKE 21 BW είναι ένα αριθμητικό μοντέλο για την ανάλυση βραχέων και μακρών κυμάτων σε λιμενικές εγκαταστάσεις και παράκτιες ζώνες, με χρήση εξισώσεων τύπου Boussinesq (DHI, 2014b).

Οι εξισώσεις τύπου Boussinesq περιλαμβάνουν μη γραμμικά χαρακτηριστικά και διασπορά συχνοτήτων, η οποία εισάγεται στις εξισώσεις ποσότητας κίνησης λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση των κατακόρυφων επιταχύνσεων στην κατανομή των πιέσεων. Το MIKE 21 BW περιέχει ένα μονοδιάστατο (1DH) και ένα διδιάστατο (2DH) μοντέλο, τα οποία επιλύουν τις κλασσικές εξισώσεις τύπου Boussinesq χρησιμοποιώντας μια έκφραση ροής με βελτιωμένα χαρακτηριστικά γραμμικής διασποράς. Οι βελτιωμένες εξισώσεις τύπου Boussinesq τα καθιστούν ικανά για την προσομοίωση της διάδοσης κατευθυντικών κυματισμών από τα βαθιά προς τα ρηχά νερά. Ο μέγιστος λόγος βάθους προς μήκος κύματος στα βαθιά είναι $d/L_o \approx 0.5$ για τις βελτιωμένες εξισώσεις, και $d/L_o \approx 0.22$ για τις κλασσικές εξισώσεις. Οι εξισώσεις του μοντέλου έχουν επεκταθεί για να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της θραύσης των κυματισμών, καθώς και η αναρρίχσή τους στην ακτή.

Το MIKE 21 BW προσομοιώνει την συνδυασμένη επίδραση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην παράκτια ζώνη:

- Ρήχωση (shoaling)
- Διάθλαση (refraction)
- Περίθλαση (diffraction)
- Μερική ανάκλαση και μετάδοση (partial reflection and transmission)
- Τριβή στον πυθμένα (bottom dissipation)
- Θραύση κυματισμών (wave breaking)
- Αναρρίχηση (run-up)
- Διασπορά συχνοτήτων (frequency spreading)
- Κατευθυντική διασπορά (directional spreading)
- Μη γραμμική αλληλεπίδραση κυματισμών (non-linear wave-wave interaction).

Το μονοδιάστατο (1DH) μοντέλο MIKE 21 BW, το οποίο εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη, επιλύει τις βελτιωμένες εξισώσεις τύπου Boussinesq μέσω μίας μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων Galerkin με πεπλεγμένη παρεμβολή των μεταβλητών σε εναλλασσόμενο ή μη εναλλασσόμενο κάρναβο.

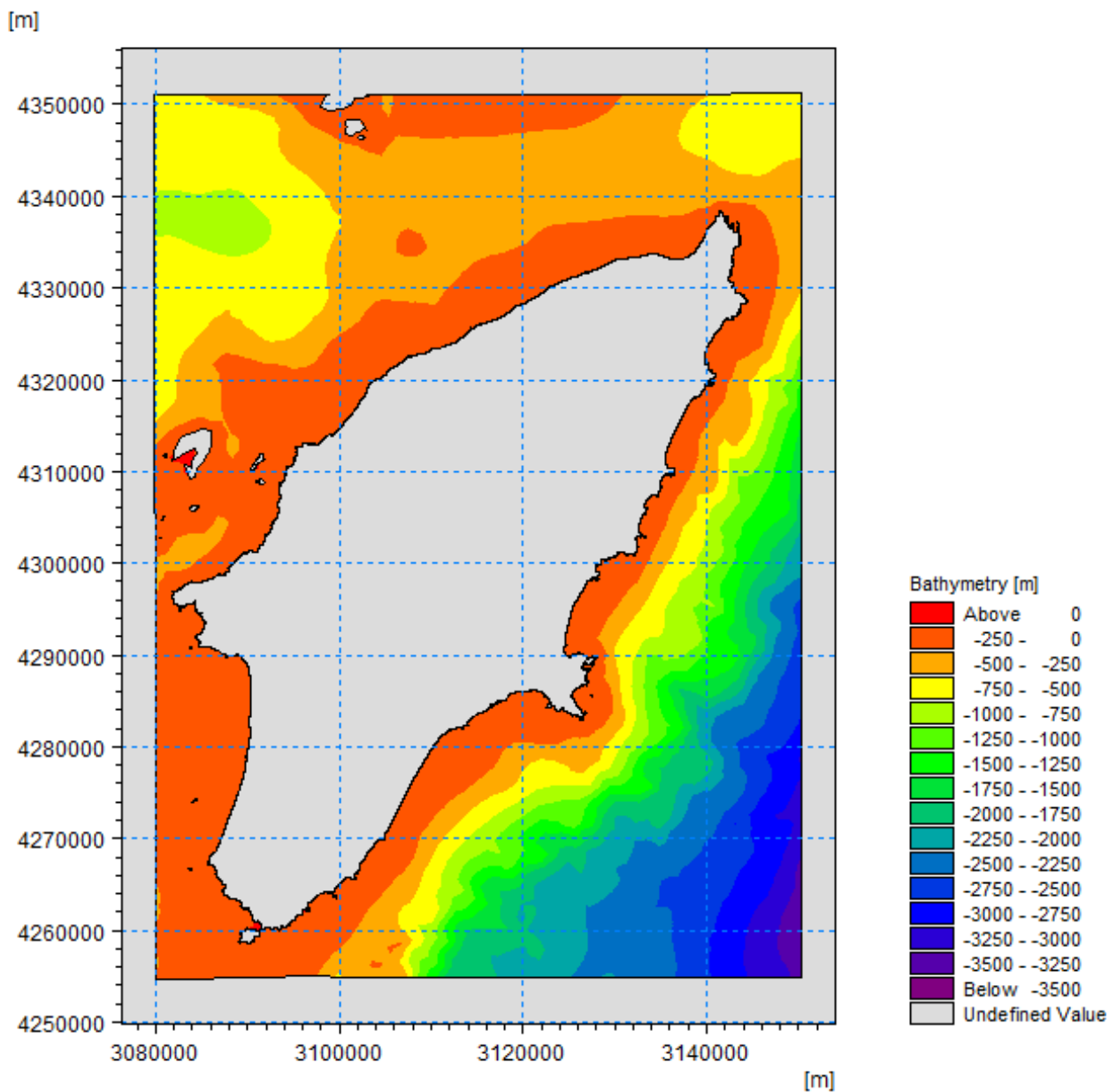
Για τον υπολογισμό της αναρρίχησης των κυματισμών στην ακτή ενσωματώνεται στο μοντέλο η κινούμενη ακτογραμμή (moving shoreline) η οποία βασίζεται στην εξής προσέγγιση: το υπολογιστικό πεδίο επεκτείνεται τεχνητά αντικαθιστώντας το όριο της ακτής με μία διαπερατή ζώνη με πολύ μικρό πορώδες. Κοντά στην κινούμενη ακτογραμμή η επιφάνεια του νερού εισχωρεί στον πορώδη πυθμένα κι έτσι η θέση της ακτογραμμής σε κάθε χρονικό βήμα καθορίζεται από αυτήν την αλληλεπίδραση. Ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης της αναρρίχησης προκύπτει μια χρονοσειρά με τιμές της οριζόντιας, της κατακόρυφης και της συνολικής αναρρίχησης στην ακτή.

Σε κάθε σημείο του προφίλ του 1DH μοντέλου υπολογίζονται οι εξής μεταβλητές:

- Ανύψωση επιφάνειας θάλασσας
- Συνολική στάθμη νερού
- Στάθμη ηρεμίας νερού
- Σημαντικό και μέγιστο ύψος κύματος
- Κατακόρυφη, οριζόντια και συνολική αναρρίχηση.

3.3.2.1 Σύνθεση κυματικών μοντέλων

Το αρχείο της βαθυμετρίας παίζει καθοριστικό ρόλο στην προσομοίωση των κυματικών συνθηκών μιας περιοχής με το μοντέλο MIKE 21 SW, καθώς περιλαμβάνει πληροφορίες που αφορούν το υπολογιστικό πλέγμα, τα βάθη του νερού στην περιοχή μελέτης και τα όρια του μοντέλου. Η βαθυμετρία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5. Ως σύστημα αναφοράς για τις οριζόντιες συντεταγμένες ορίστηκε το προβολικό σύστημα UTM35.



Εικόνα 5. Βαθυμετρία ευρύτερης περιοχής Ν. Ρόδου.

Ως οριακές συνθήκες στο MIKE 21 SW προσδιορίστηκαν οι χρονοσειρές των κυματικών καταιγίδων που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ύψη κύματος ανά κλάση προκειμένου να προσομοιωθεί η διάδοση των κυματισμών προς τις ακτές και να υπολογιστούν τα κυματικά χαρακτηριστικά στα ρηγά νερά.

Τα χαρακτηριστικά του κυματισμού με το μέγιστο σημαντικό ύψος αποτέλεσαν τα δεδομένα για το MIKE 21 BW προκειμένου να γίνει εκτίμηση της μέγιστης αναρρίχησης στην ακτή.

3.3.3 Μετεωρολογική παλίρροια (storm surge)

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν χρονοσειρές στάθμης θάλασσας από τη βάση δεδομένων Copernicus που αντιστοιχούν στη χρονική περίοδο της ανάλυσης και υπολογίστηκε η μέγιστη και η μέση τιμή του storm surge κατά τη διάρκεια κάθε γεγονότος καταιγίδας.

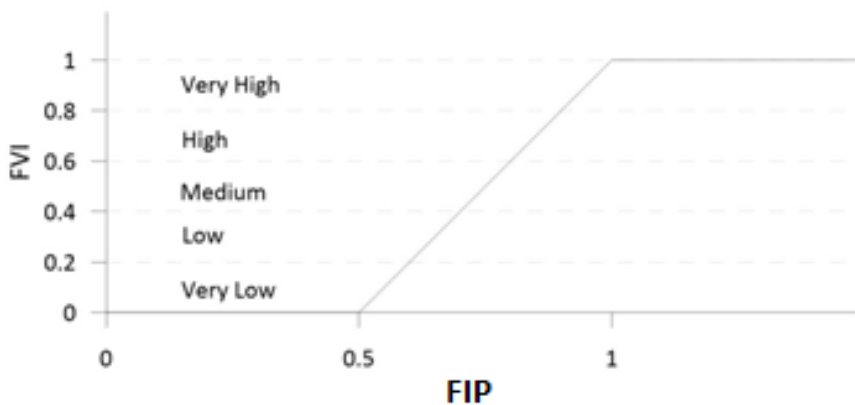
3.4 Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI)

Για την εκτίμηση του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (Flood Vulnerability Index, FVI) υπολογίζεται μια ενδιάμεση παράμετρος πλημμύρας (flood intermediate parameter, FIP) (Mendoza and Jiménez, 2009):

$$FIP = \frac{R + \xi}{B_{max}} \quad (4)$$

όπου R η αναρρίχηση των κυματισμών (wave run-up), ξ η μετεωρολογική παλίρροια (storm surge) και B_{max} το μέγιστο ύψος της παραλίας.

Ο FVI κατηγοριοποιείται σε (5) κλάσεις από Πολύ Χαμηλός έως Πολύ Υψηλός και υπολογίζεται από το παρακάτω γράφημα (Εικόνα 6) το οποίο προτάθηκε από τους Mendoza and Jiménez (2009). Έτσι, αν η αναρρίχηση των κυματισμών είναι μικρότερη από το μισό του ύψους του έξαλου αναβαθμού της ακτής η τρωτότητα σε πλημμύρα θεωρείται πολύ χαμηλή. Όταν η αναρρίχηση ξεπεράσει τη στάθμη του αναβαθμού τότε η τρωτότητα σε πλημμύρα θεωρείται πολύ υψηλή.



Εικόνα 6. Εκτίμηση του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) σε σχέση με την ενδιάμεση παράμετρο πλημμύρας FIP (Mendoza and Jiménez, 2009).

4 Αποτελέσματα

4.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης Κυματικών Καταιγίδων

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε κάθε μία από τις γεωγραφικές περιοχές της Ρόδου (Εικόνα 1), προκειμένου να γίνει η ταξινόμηση των κυματικών καταιγίδων σε πέντε (5) κλάσεις ανάλογα με την έντασή τους (I-weak, II-moderate, III-significant, IV-severe and V-extreme). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι τα περισσότερα και πιο ισχυρά γεγονότα καταιγίδων συμβαίνουν στο νότιο τμήμα της Ρόδου (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Πλήθος κυματικών καταιγίδων ανά γεωγραφική περιοχή της Ρόδου κατά τη χρονική περίοδο 1995-2004.

B	BA	A	NA	N	ΝΔ	Δ	ΒΔ
100	121	115	130	159	147	151	120

Καθώς η τιμή του threshold του σημαντικού ύψους κύματος (H_s) για τον ορισμό μιας καταιγίδας ισούται με το 95ο ποσοστημόριο του δείγματος των κυματικών δεδομένων, η τιμή του threshold διαφέρει σε κάθε γεωγραφική περιοχή της Ρόδου εξαιτίας των μεταβολών του κυματικού κλίματος. Έτσι η τιμή αυτή κυμαίνεται από 1.25 m στο βόρειο τμήμα του νησιού έως 2.0 m στο νότιο.

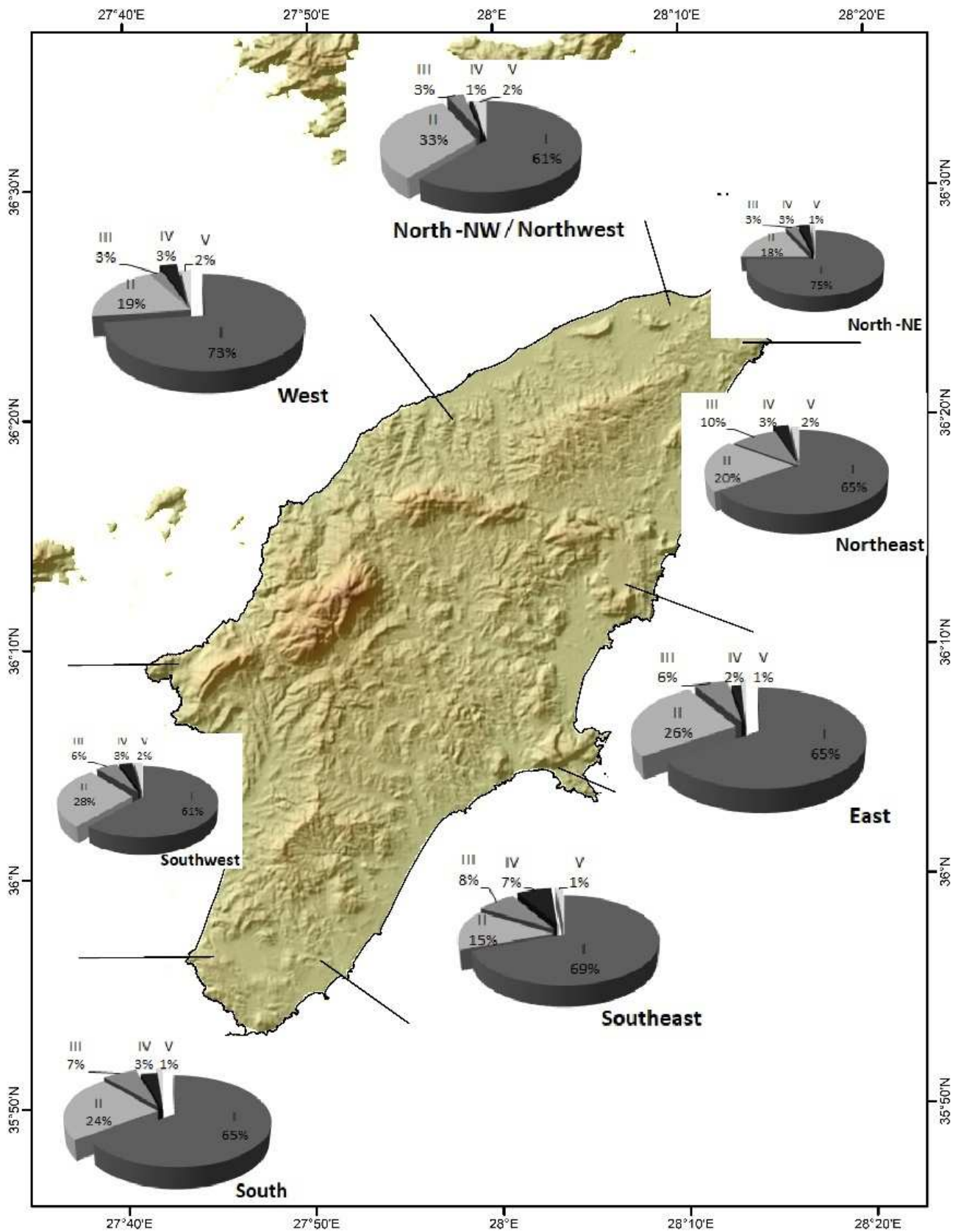
Οι τιμές των χαρακτηριστικών των καταιγίδων (δηλ. ύψος και περίοδος κύματος, ενεργειακό περιεχόμενο, διάρκεια καταιγίδας) γενικά αυξάνονται καθώς αυξάνεται η ένταση των γεγονότων. Όσον αφορά τα κυματικά χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος) κατά της διάρκεια ασθενών γεγονότων η μέση τιμή του σημαντικού ύψους κύματος κυμαίνεται από 1.4 m στο βόρειο και βορειοδυτικό τμήμα του νησιού έως 2.3m στο νότιο. Κατά τη διάρκεια των ακραίων γεγονότων η μέγιστη τιμή του σημαντικού ύψους κύματος ξεπερνά τα 4.0 m, ενώ η μέση τιμή του κυμαίνεται από 2.0 m στη βόρεια και βορειοδυτική περιοχή έως 3.3 m στη νότια. Η μέση τιμή του σημαντικού ύψους κύματος αυξάνεται από τις ασθενείς (Class I) στις ακραίες (Class V) καταιγίδες περίπου 1.3-1.7 φορές. Η μέση τιμή της περιόδου αιχμής των κυματισμών κατά τη διάρκεια ασθενών γεγονότων κυμαίνεται από 6.7 s στα νοτιοανατολικά έως 7.9 s στα δυτικά, ενώ κατά τη διάρκεια ακραίων καταιγίδων κυμαίνεται από 8.0 s στα ανατολικά έως 9.5 s στα δυτικά.

Η μέγιστη τιμή της κυματικής ενέργειας υπολογίστηκε 178.6 m^2h και 845.2 m^2h για τις ασθενείς (Class I-weak) και τις ακραίες (Class V-weak) καταιγίδες, αντίστοιχα. Η μέση τιμή της ενέργειας αυξάνεται από την Κλάση I στην Κλάση V περίπου 7-12 φορές στα διάφορα γεωγραφικά τμήματα του νησιού. Η μεγαλύτερη αύξηση υπολογίστηκε στο ανατολικό και το νότιο τμήμα όπου καταγράφηκαν και τα πιο έντονα γεγονότα. Η μέση τιμή της ενέργειας αυξάνεται περίπου 1.5-3 φορές από το δυτικό τμήμα όπου εμφανίζονται τα πιο ασθενή γεγονότα, στο ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα.

Η μέση διάρκεια των ασθενών καταιγίδων (Class I-weak) κυμαίνεται από 13 hrs στο βορειοδυτικό τμήμα έως 20.7 hrs στο βόρειο τμήμα, ενώ για τα ακραία γεγονότα κυμαίνεται από 57 hrs στα δυτικά έως 114 hrs στα ανατολικά.

Περισσότερα από τα μισά γεγονότα χαρακτηρίζονται ως ασθενή (Class I-weak), με συχνότητα εμφάνισης από 60.8% έως 75% στα βορειοδυτικά και βόρεια, αντίστοιχα, ενώ τα ακραία γεγονότα συμβαίνουν με συχνότητα εμφάνισης από 0.9% στα ανατολικά έως 2.5% στα βορειοδυτικά (Εικόνα 7).

Όσον αφορά τη μέση κατεύθυνση των καταιγίδων, τα γεγονότα στα βόρειο, το βορειοανατολικό, το ανατολικό και το νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού προέρχονται κυρίως από νοτιοανατολικές και νότιες διευθύνσεις. Στο νότιο, το νοτιοδυτικό, το δυτικό και το βορειοδυτικό τμήμα της Ρόδου οι καταιγίδες προέρχονται κυρίως από το δυτικό και νοτιοδυτικό τομέα.



Εικόνα 7. Συχνότητα εμφάνισης κλάσεων καταιγίδων ανά γεωγραφική περιοχή της Ρόδου.

Στους παρακάτω Πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των παραμέτρων των κυματικών καταγίδων (σημαντικό ύψος Hs, περίοδος αιχμής Tp, ενέργεια E, διάρκεια dt) και η συχνότητα εμφάνισης ανά κλάση σε κάθε γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταγίδων στο βόρειο τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	4.0	1.8	13.7	6.9	78.2 (12.6-178.6)	20.7	75	75.0
II- moderate	4.5	2.2	12.4	7.6	273.2 (206.7-325.1)	56.8	18	18.0
III- significant	3.7	2.1	10.3	8.1	373.2 (339.8-431.7)	79.0	3	3.0
IV- severe	4.6	2.5	13.7	8.4	530.8 (511.0-549.7)	73.0	3	3.0
V- extreme	4.4	2.9	10.3	8.6	681.2	69.0	1	1.0

Πίνακας 4. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταγίδων στο βορειοανατολικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	4.1	1.8	11.3	6.7	64.4 (13.0-153.6)	17.7	79	65.3
II- moderate	4.7	2.1	11.3	7.3	217.3 (161.8-280.2)	48.1	24	19.8
III- significant	4.8	2.4	13.7	7.6	359.5 (316.2-438.5)	62	12	9.9
IV- severe	4.6	2.5	15.0	8.2	529.1 (506.3-548.5)	79.5	4	3.3
V- extreme	5.1	2.9	11.3	8.7	644.2 (616.9-671.6)	66	2	1.7

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταγίδων στο ανατολικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	3.6	1.8	11.3	6.8	71.7 (14.3-157.7)	18.8	75	65.2
II- moderate	5.0	2.2	12.4	7.5	264.9 (178.7-394.1)	51	30	26.1
III- significant	4.4	2.4	15.0	8.1	483.0 (421.7-548.8)	82.7	7	6.1
IV- severe	4.7	2.9	10.3	8.7	610.4 (599.1-621.8)	67.5	2	1.7
V- extreme	5.5	2.4	11.3	8.0	845.2	114.0	1	0.9

Πίνακας 6. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο νοτιοανατολικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	3.5	1.8	12.4	7	69.9 (12.7-165.8)	19.8	90	69.2
II- moderate	4.9	2.1	10.3	7.4	215 (179.3-272.3)	47.8	19	14.6
III- significant	4.7	2.3	12.4	7.8	327.9 (295.3-369.5)	57.9	10	7.7
IV- severe	4.4	2.4	15	8.1	459.8 (392.2-530.4)	79.3	9	6.9
V- extreme	5.4	3.1	11.3	8.7	667.1 (643.2-691)	60	2	1.5

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο νότιο τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	3.7	2.3	12.4	7.3	75.8 (24.8-178.6)	14	103	64.8
II- moderate	4.8	2.7	12.4	7.9	259.7 (186.6-381.1)	35.7	38	23.9
III- significant	4.4	2.8	10.3	8.2	445.6 (394.7-501.1)	56.5	11	6.9
IV- severe	5.2	2.9	10.3	8.2	594.3 (532.4-644.8)	74.4	5	3.1
V- extreme	6.6	3.3	12.4	8.8	768.9 (741.7-796.0)	61.5	2	1.3

Πίνακας 8. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο νοτιοδυτικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	2.8	2.0	12.4	7.4	58.7 (19.8-126.2)	14.1	90	61.2
II- moderate	3.7	2.2	11.3	7.8	195.4 (132.9-296.5)	39.8	41	27.9
III- significant	4.1	2.6	11.3	8.2	360.6 (321.6-393.6)	52.5	8	5.4
IV- severe	4.1	2.6	11.3	8.5	466.3 (422.9-499.0)	72.0	5	3.4
V- extreme	6.6	2.8	13.7	8.7	573.7 (536.6-615.3)	67.0	3	2.0

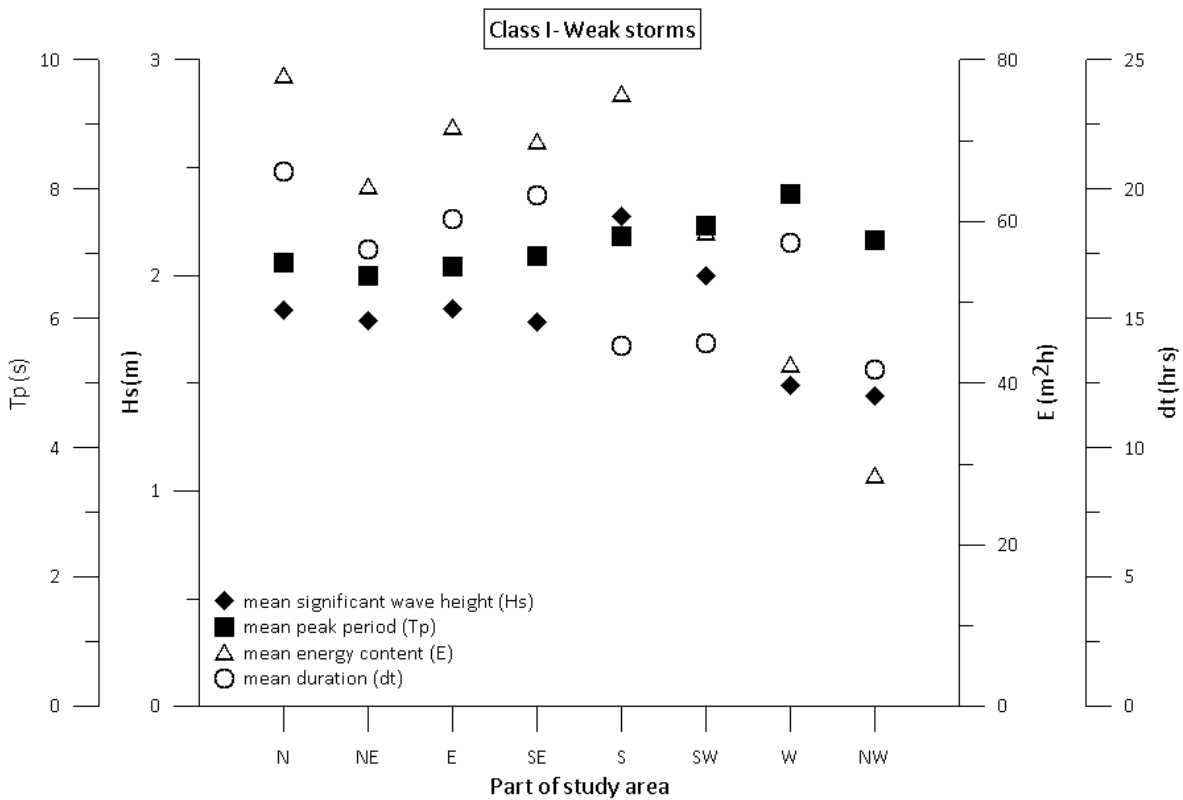
Πίνακας 9. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο δυτικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	2.6	1.5	12.4	7.9	42.4 (10.2-98.5)	17.9	110	72.8
II- moderate	2.7	1.7	12.4	8.5	133 (103.2-167.7)	46.8	29	19.2
III- significant	2.9	2.0	10.3	8.9	201.7 (187.6-213.4)	46.5	4	2.6
IV- severe	3.7	2.0	15.0	9.8	251.4 (228.5-272.6)	60.0	5	3.3
V- extreme	4.6	2.2	12.4	9.5	307.3 (290.9-334.8)	57.0	3	2

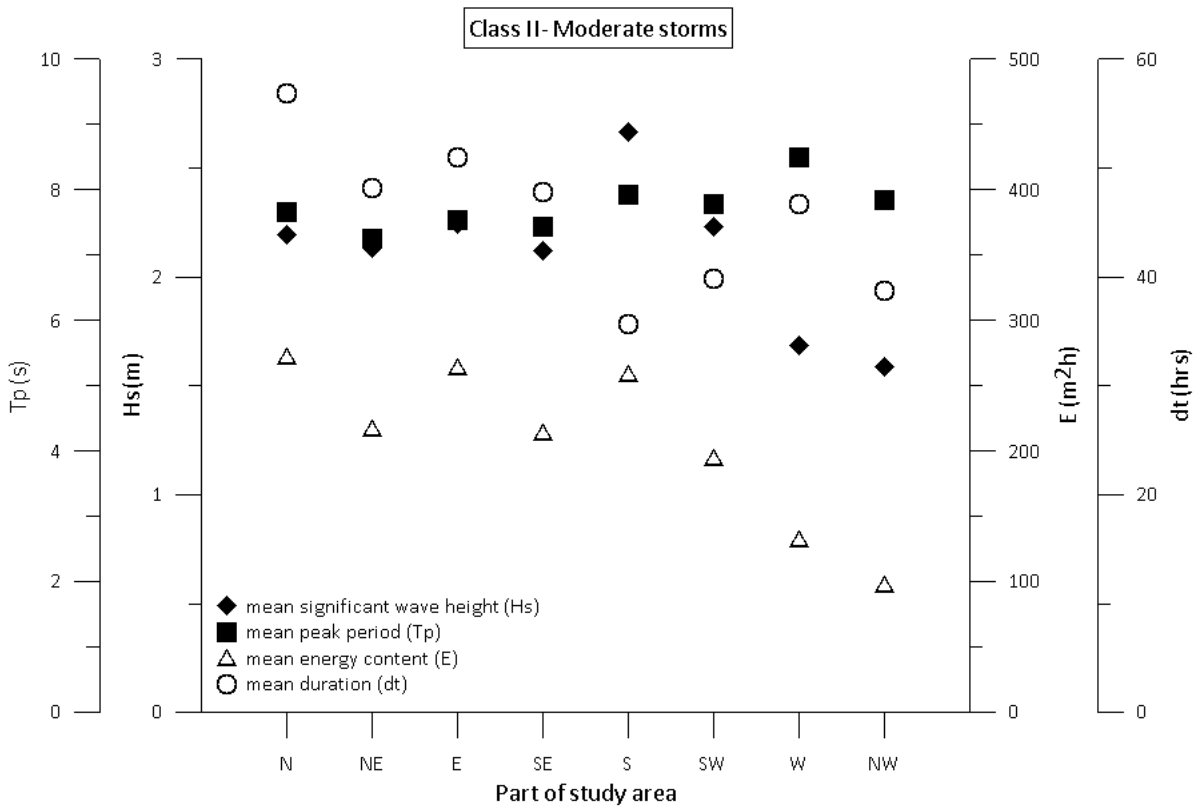
Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά κλάσεων καταιγίδων στο βορειοδυτικό τμήμα της Ρόδου, για τη χρονική περίοδο 1995-2004.

Κλάση	Μέγιστο Hs [m]	Μέσο Hs [m]	Μέγιστο Tp [s]	Μέσο Tp [s]	Μέση ενέργεια [m ² h] (range)	Διάρκεια [hrs]	Πλήθος γεγονότων	Συχνότητα [%]
I- weak	2.2	1.4	12.4	7.2	28.7 (9.5-58.7)	13.0	73	60.8
II- moderate	2.6	1.6	13.7	7.8	97.8 (63.2-148.5)	38.7	39	32.5
III- significant	2.8	1.8	11.3	8.9	190.2 (166.6-207.4)	54.8	4	3.3
IV- severe	2.7	1.8	11.3	10.2	227	66.0	1	0.8
V- extreme	4.0	2.0	15.0	9.3	281.4 (264.3-299.6)	65.0	3	2.5

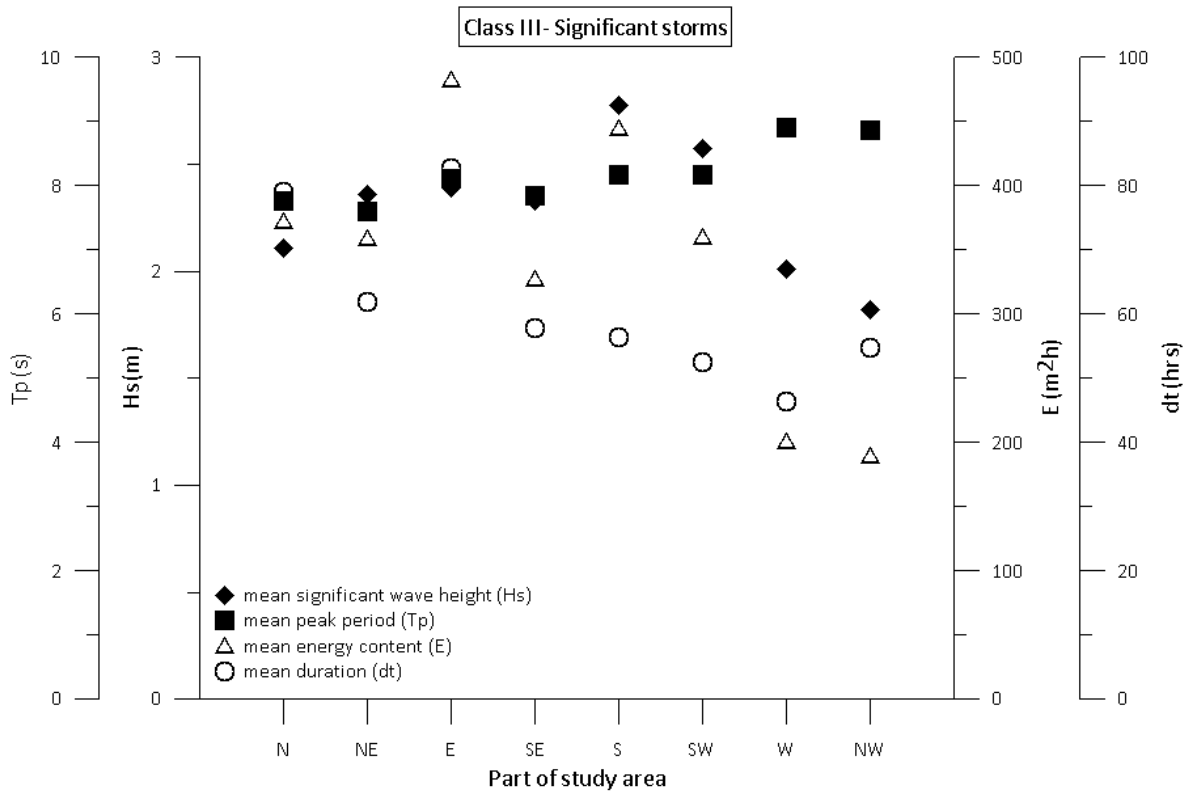
Στα παρακάτω γραφήματα (Εικόνα 8 έως Εικόνα 12) παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων των κυματικών καταιγίδων (σημαντικό ύψος, περίοδος αιχμής, ενέργεια, διάρκεια) ανά γεωγραφική περιοχή της Ρόδου για κάθε κλάση.



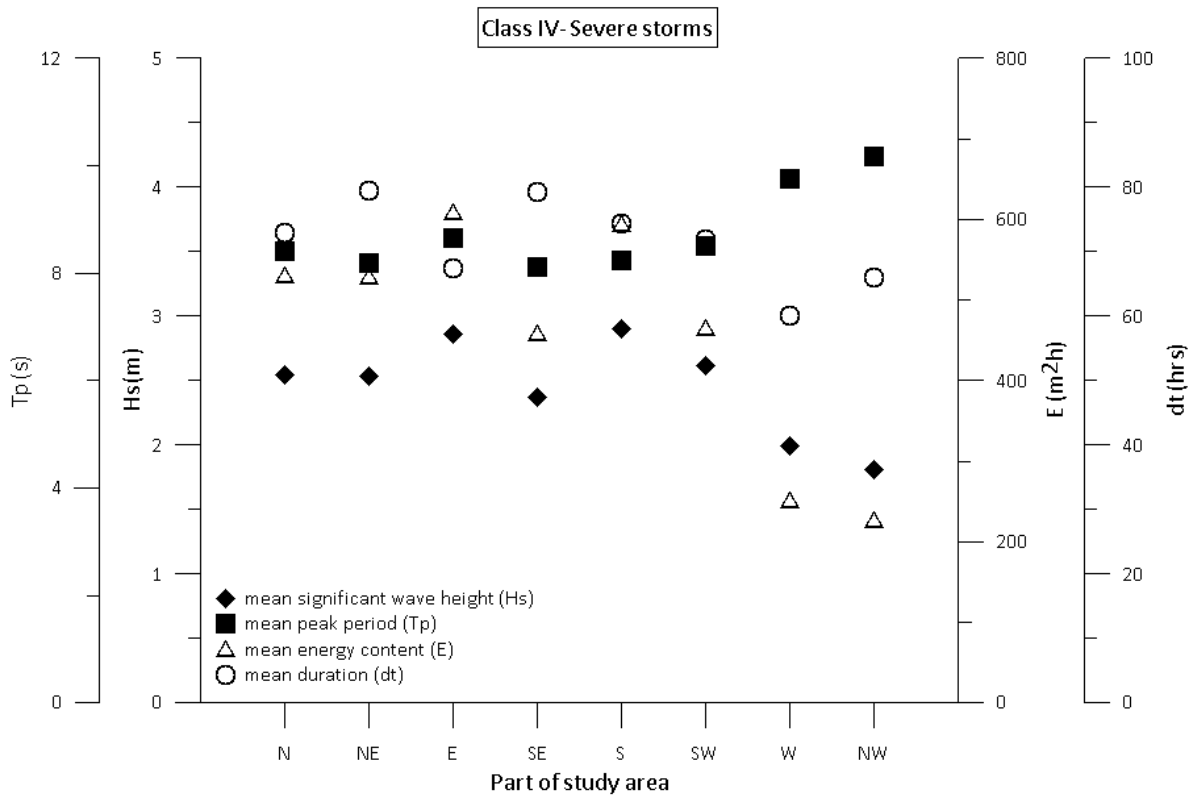
Εικόνα 8. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (Hs, Tp, E, dt) των ασθενών καταιγίδων (Class I-weak) ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.



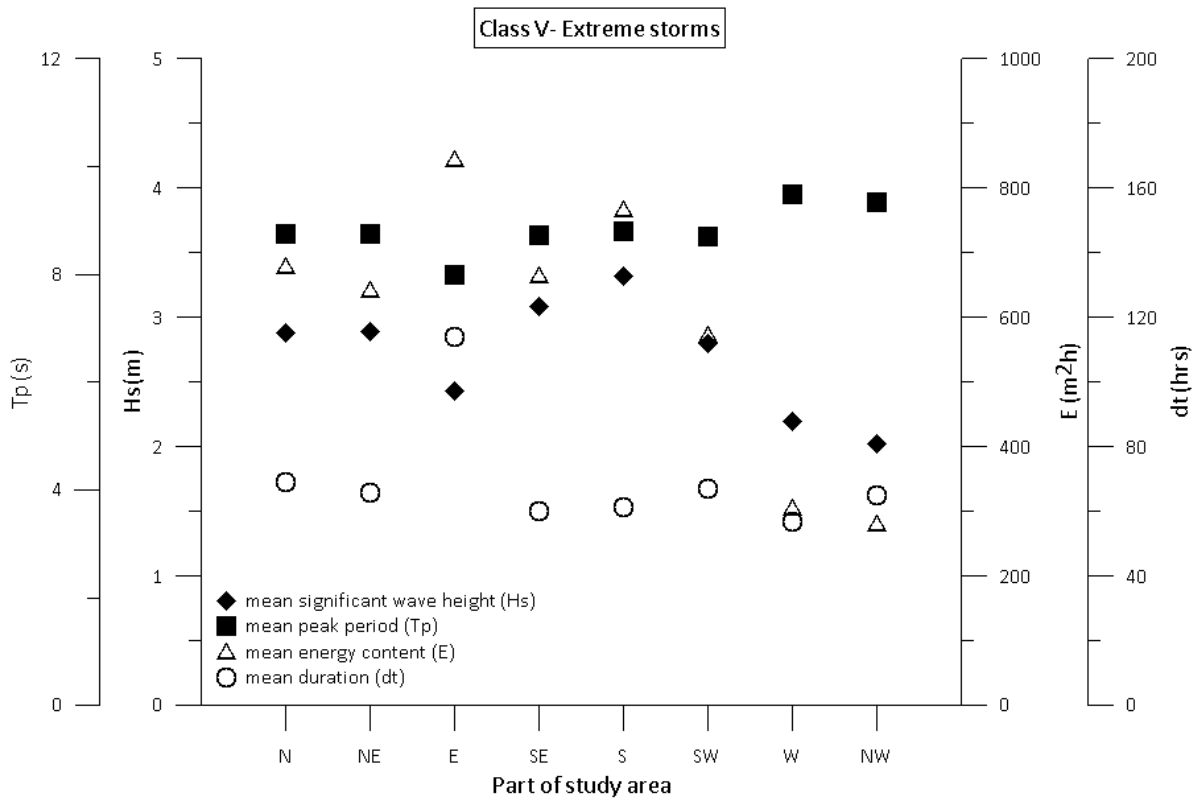
Εικόνα 9. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (Hs, Tp, E, dt) των καταιγίδων κλάσης II-moderate ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.



Εικόνα 10. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (Hs, Tp, E, dt) των καταιγίδων κλάσης III-significant ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.



Εικόνα 11. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (Hs, Tp, E, dt) των καταιγίδων κλάσης IV-severe ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.



Εικόνα 12. Μέσες τιμές των χαρακτηριστικών παραμέτρων (H_s , T_p , E , dt) των ακραίων καταιγίδων (Class V-extreme) ανά γεωγραφικό τμήμα της Ρόδου.

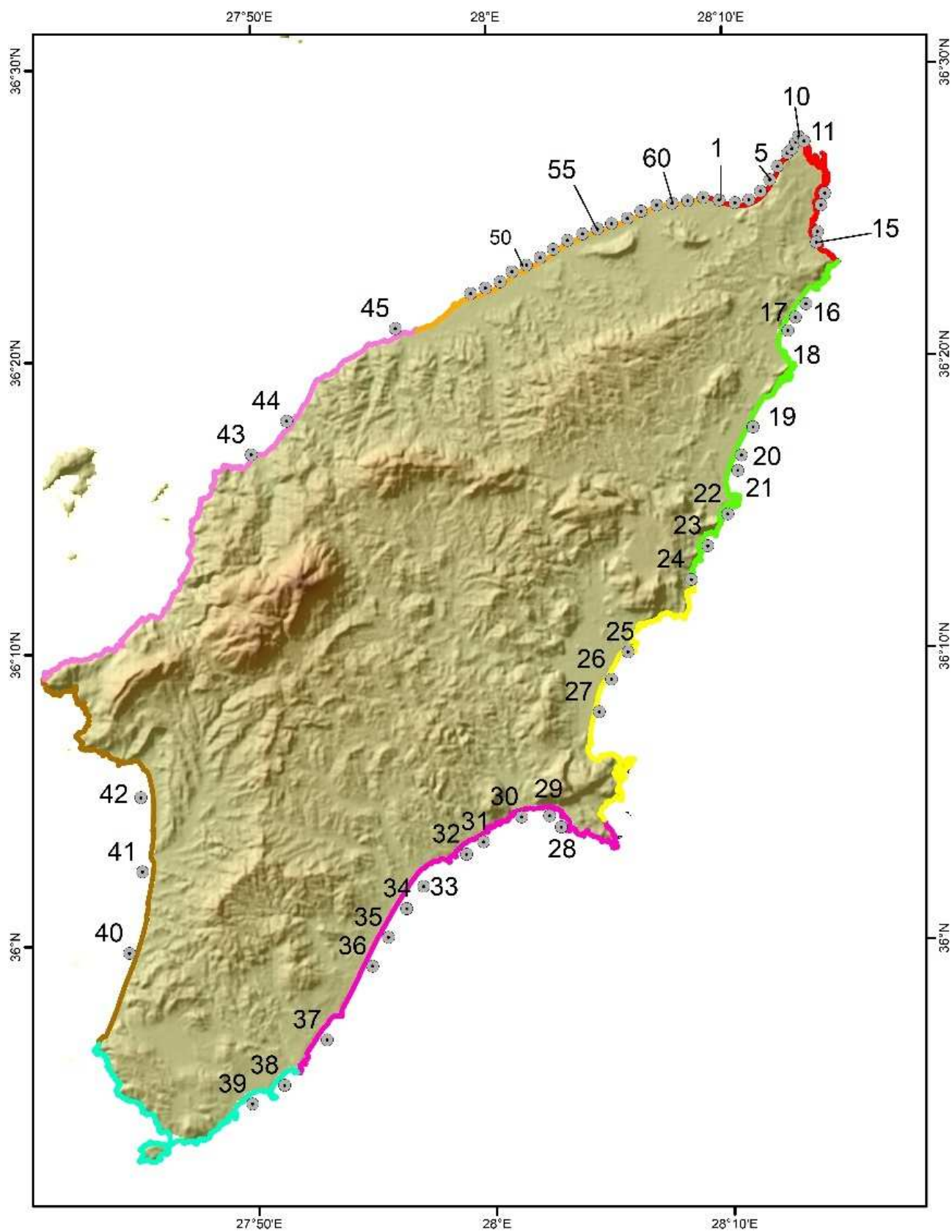
4.2 Εκτίμηση Κίνδυνων και Τρωτότητας σε Πλημμύρα

4.2.1 Υπολογισμός αναρρίχησης με εμπειρική σχέση

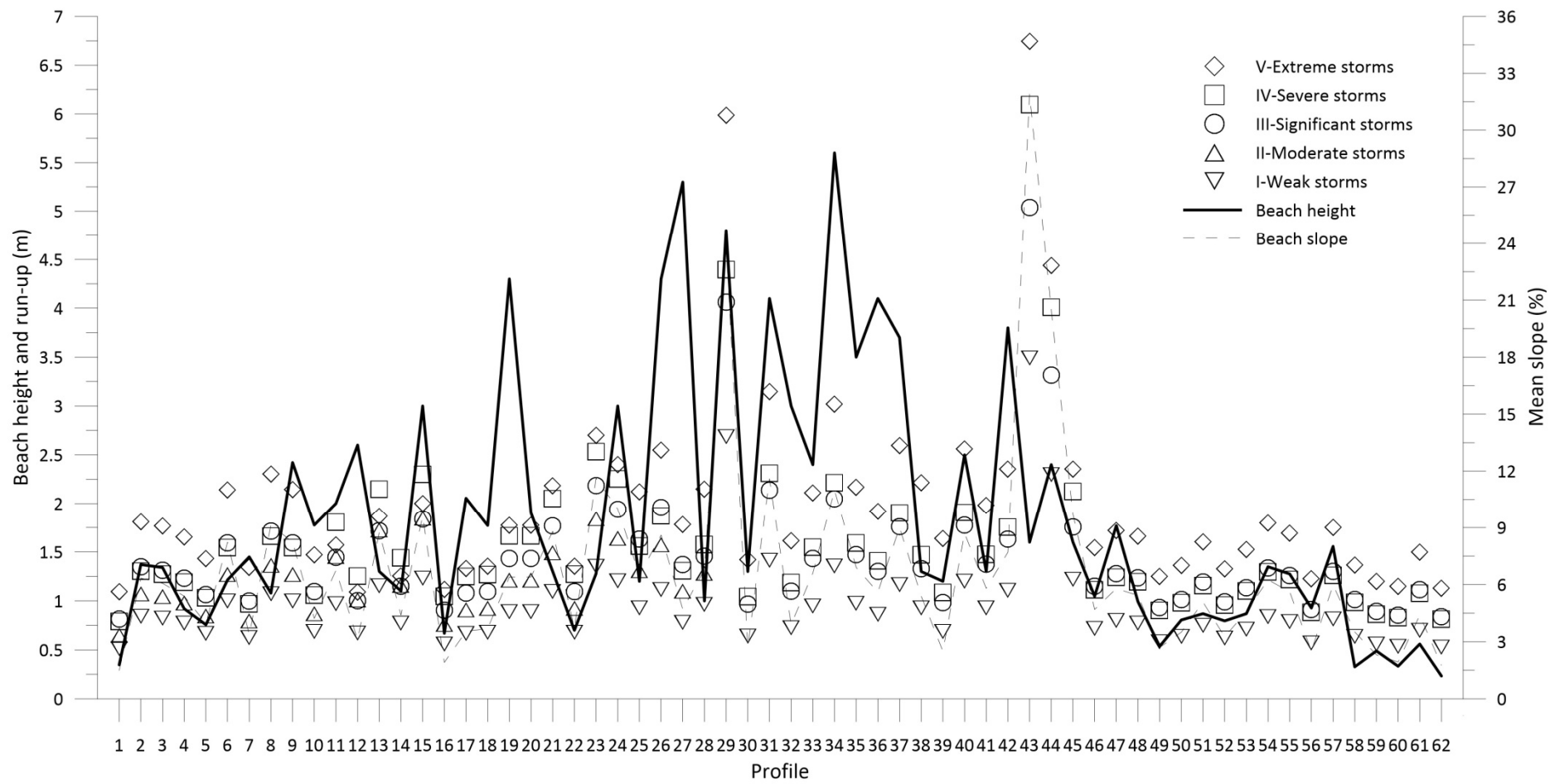
Στην παρούσα μελέτη η αναρρίχηση των κυματισμών στην ακτή υπολογίστηκε από την αναλυτική σχέση των Stockdon et al. (2006) η οποία εφαρμόστηκε σε εξήντα δύο (62) εγκάρσιες διατομές κατά μήκος της ακτογραμμής του νησιού. Οι θέσεις των διατομών αυτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 13. Οι διατομές που επιλέχθηκαν εκτείνονται από το βάθος των -25.0 m έως το χερσαίο όριο της παράκτιας ζώνης (το οποίο φτάνει έως το ύψος των +5.6 m πάνω από τη μέση στάθμη θάλασσας (ΜΣΘ) καθώς εξαρτάται από τη μορφολογία κάθε διατομής). Η επιλογή των διατομών έγινε λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία των ακτών του νησιού καθώς και το ενδιαφέρον μελέτης που παρουσιάζει κάθε υποπεριοχή ανάλογα με τη συγκέντρωση πληθυσμού και ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Έτσι, η απόσταση μεταξύ διαδοχικών διατομών κυμαίνεται από περίπου 300 m στο βορειότερο ακρωτήριο (Ακρωτήριο των Μύλων) έως 1000 m στο βορειοδυτικό τμήμα της περιοχής μελέτης, το οποίο παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον καθώς εκεί συγκεντρώνεται ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού του νησιού και ασκούνται σημαντικές οικονομικές δραστηριότητες, όπως ο τουρισμός. Στο βορειοανατολικό, ανατολικό και νοτιοανατολικό τμήμα η απόσταση μεταξύ των αντιπροσωπευτικών διατομών κυμαίνεται από 500 έως 5000 m. Μόνο έξι (6) διατομές επιλέχθηκαν στα νοτιοδυτικά και δυτικά όπου οι ακτές είναι βραχύδεις με απότομες κλίσεις και η περιοχή είναι αραιοκατοικημένη.

Γενικά, η αναρρίχηση των κυματισμών στην ακτή αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ένταση των καταιγίδων. Πιο συγκεκριμένα, η αναρρίχηση κατά τη διάρκεια των ακραίων καταιγίδων (Class V) αυξάνεται από 1.6 έως 2.4 φορές σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή κατά τη διάρκεια των ασθενών γεγονότων (Class I). Η μεγαλύτερη αύξηση υπολογίστηκε στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού όπου συμβαίνουν και τα πιο έντονα γεγονότα. Η μέγιστη αναρρίχηση κατά τη διάρκεια ασθενών καταιγίδων (Class I) κυμαίνεται από 0.8 m έως 5.5 m, ενώ η αντιπροσωπευτική τιμή της (μέσος όρος των μέγιστων τιμών ανά γεγονός) κυμαίνεται από 0.5 m έως 3.5 m (Εικόνα 14). Κατά τη διάρκεια ακραίων γεγονότων (Class V) η αντιπροσωπευτική τιμή της αναρρίχησης υπολογίστηκε έως 6.7 m. Επιπλέον, για ένα συγκεκριμένο κυματικό γεγονός όσο πιο απότομη είναι η κλίση της ακτής τόσο μεγαλύτερη είναι η αναρρίχηση των κυματισμών σε αυτή. Έτσι, οι μικρότερες τιμές της αναρρίχησης υπολογίστηκαν στο βόρειο, το βορειοανατολικό και το βορειοδυτικό τμήμα της Ρόδου (διατομές 1-12) όπου η κλίση των ακτών είναι ήπια (<4%).

Στην Εικόνα 14 και στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι αντιπροσωπευτικές τιμές της αναρρίχησης για κάθε κλάση καταιγίδας και το ύψος της παραλίας σε όλες τις εξεταζόμενες διατομές.



Εικόνα 13. Θέσεις εγκάρσιων διατομών κατά μήκος της ακτογραμμής της Ρόδου.



Εικόνα 14. Αναρρίχηση και μορφολογικά χαρακτηριστικά σε κάθε εξεταζόμενη διατομή ανά κλάση καταιγίδων.

Πίνακας 11. Αντιπροσωπευτική τιμή αναρρίχησης ανά κλάση καταιγίδας για κάθε εξεταζόμενη διατομή στο βόρειο, βορειοανατολικό και ανατολικό τμήμα του νησιού.

Περιοχή	Προφίλ	Ύψος (m)	Κλίση (%)	Αναρρίχηση ανά κλάση καταιγίδας (m)				
				I	II	III	IV	V
B	1	0.4	1.5	0.5	0.7	0.8	0.8	1.1
	2	1.4	6.3	0.8	1.1	1.4	1.3	1.8
	3	1.3	6.1	0.8	1.1	1.3	1.3	1.8
	4	0.9	5.4	0.8	1.0	1.2	1.2	1.7
	5	0.8	4.0	0.7	0.9	1.1	1.0	1.4
	6	1.2	8.2	1.0	1.3	1.6	1.6	2.1
	7	1.5	3.4	0.6	0.8	1.0	1.0	1.3
	8	1.1	9.1	1.1	1.4	1.7	1.7	2.3
	9	2.4	8.2	1.0	1.3	1.6	1.6	2.1
	10	1.8	4.2	0.7	0.9	1.1	1.1	1.5
	11	2.0	6.7	1.0	1.5	1.4	1.8	1.6
	12	2.6	3.1	0.7	1.0	1.0	1.3	1.1
	13	1.3	8.8	1.2	1.7	1.7	2.1	1.9
	14	1.1	4.4	0.8	1.2	1.2	1.4	1.3
	15	3	9.6	1.2	1.8	1.8	2.3	2.0
BA	16	0.7	1.9	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1
	17	2.1	3.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.3
	18	1.8	3.7	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4
	19	4.3	6.4	0.9	1.2	1.4	1.7	1.8
	20	1.9	6.4	0.9	1.2	1.4	1.7	1.8
	21	1.3	8.8	1.1	1.5	1.8	2.1	2.2
	22	0.7	3.7	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4
	23	1.3	11.6	1.4	1.8	2.2	2.5	2.7
	24	3	10.0	1.2	1.6	1.9	2.3	2.4
A	25	1.2	6.5	0.9	1.3	1.6	1.6	2.1
	26	4.3	8.6	1.1	1.6	2.0	1.9	2.5
	27	5.3	4.7	0.8	1.1	1.4	1.3	1.8
NA	28	1	6.8	1.0	1.3	1.5	1.6	2.1
	29	4.8	24.0	2.7	3.6	4.1	4.4	6.0
	30	1.3	2.7	0.6	0.8	1.0	1.0	1.4
	31	4.1	11.6	1.4	1.9	2.1	2.3	3.1
	32	3	3.9	0.7	1.0	1.1	1.2	1.6
	33	2.4	6.6	0.9	1.3	1.4	1.5	2.1
	34	5.6	11.0	1.4	1.8	2.0	2.2	3.0
	35	3.5	6.9	1.0	1.3	1.5	1.6	2.2
	36	4.1	5.6	0.9	1.1	1.3	1.4	1.9
	37	3.7	9.0	1.2	1.5	1.8	1.9	2.6

Πίνακας 12. Αντιπροσωπευτική τιμή αναρρίχησης ανά κλάση καταιγίδας για κάθε εξεταζόμενη διατομή στο βόρειο, βορειοανατολικό και ανατολικό τμήμα του νησιού.

Περιοχή	Προφίλ	Υψος (m)	Κλίση (%)	Αναρρίχηση ανά κλάση καταιγίδας (m)				
				I	II	III	IV	V
N	38	1.3	5.4	0.9	1.2	1.3	1.5	2.2
	39	1.2	2.5	0.7	0.9	1.0	1.1	1.6
NΔ	40	2.5	8.7	1.2	1.5	1.8	1.9	2.6
	41	1.3	5.8	0.9	1.1	1.4	1.5	2.0
	42	3.8	7.7	1.1	1.3	1.6	1.8	2.4
Δ	43	1.6	31.9	3.5	4.4	5.0	6.1	6.7
	44	2.4	20.5	2.3	2.9	3.3	4.0	4.4
	45	1.6	9.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
BΔ	46	1.1	4.7	0.7	0.9	1.1	1.1	1.5
	47	1.8	5.8	0.8	1.0	1.3	1.2	1.7
	48	1.0	5.4	0.8	1.0	1.2	1.2	1.7
	49	0.5	2.7	0.6	0.7	0.9	0.9	1.3
	50	0.8	3.5	0.6	0.8	1.0	1.0	1.4
	51	0.9	5.1	0.7	1.0	1.2	1.2	1.6
	52	0.8	3.3	0.6	0.8	1.0	1.0	1.3
	53	0.9	4.6	0.7	0.9	1.1	1.1	1.5
	54	1.4	6.3	0.8	1.1	1.3	1.3	1.8
	55	1.3	5.6	0.8	1.0	1.3	1.2	1.7
	56	0.9	2.5	0.6	0.7	0.9	0.9	1.2
	57	1.6	6.0	0.8	1.0	1.3	1.3	1.8
	58	0.3	3.5	0.6	0.8	1.0	1.0	1.4
	59	0.5	2.3	0.6	0.7	0.9	0.9	1.2
	60	0.3	1.9	0.5	0.7	0.9	0.8	1.2
	61	0.6	4.4	0.7	0.9	1.1	1.1	1.5
	62	0.2	1.8	0.5	0.7	0.8	0.8	1.1

4.2.2 Υπολογισμός αναρρίχησης με αριθμητικό μοντέλο

Για την προσομοίωση των κυματικών συνθηκών στην ανοιχτή θάλασσα και την παράκτια ζώνη της Ρόδου και τον υπολογισμό της αναρρίχησης στις ακτές έγινε χρήση των αριθμητικών μοντέλων MIKE 21 SW (2DH) και BW (1DH), αντίστοιχα.

Για την προσομοίωση με το αριθμητικό μοντέλο επιλέχθηκε η βόρεια και βορειοδυτική περιοχή της Ρόδου. Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε καθώς παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τρωτότητα σε πλημμύρα λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της αναρρίχησης με την εξίσωση των Stockdon et al. (2006) και επιπλέον παρουσιάζει ενδιαφέρον εξαιτίας της σημαντικής συγκέντρωσης πληθυσμού και οικονομικών δραστηριοτήτων. Το τμήμα που μελετήθηκε εκτείνεται από το βορειότερο άκρο της Ρόδου (Ακρωτήριο των Μύλων) έως τον οικισμό Φάνες (περίπου 22 km νοτιοδυτικά της πόλης της Ρόδου) με συνολικό μήκος ακτογραμμής μελέτης περίπου 26 km.

Για τον υπολογισμό της αναρρίχησης το MIKE 21 BW 1DH εφαρμόστηκε σε δεκαέξι (16) χαρακτηριστικές διατομές εγκάρσιες στην ακτογραμμή της περιοχής μελέτης. Στο βορειοδυτικό τμήμα επιλέχθηκαν δεκατρείς (13) διατομές σε απόσταση περί τα 2000 m μεταξύ τους, ενώ τρία (3) διατομές επιλέχθηκαν στο βόρειο ακρωτήριο. Το μέγιστο βάθος των διατομών είναι -25.0 m, ενώ στο χερσαίο τμήμα της ακτής

εκτείνονται έως το ύψος των +2.0 m (το μέγιστο ύψος διαφέρει μεταξύ των διατομών και εξαρτάται από τη μορφολογία της ακτής).

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα αποτελέσματα της μέγιστης κατακόρυφης αναρρίχησης ανά διατομή για κάθε κλάση καταιγίδας.

Πίνακας 13. Μέγιστη κατακόρυφη αναρρίχηση ανά προφίλ για κάθε κλάση καταιγίδας.

Διατομή	Μέγιστη κατακόρυφη αναρρίχηση (m)				
	I-weak	II-moderate	III-significant	IV-severe	V-extreme
11	0.46	1.24	1.29	1.30	1.34
10	0.94	1.03	1.06	1.05	1.14
9	0.87	1.09	1.16	1.16	1.24
8	0.97	1.15	1.15	1.16	1.18
6	0.79	0.85	0.86	0.86	0.86
4	0.60	0.67	0.66	0.68	0.69
2	0.56	0.82	0.82	0.87	1.01
62	0.14	0.15	0.15	0.15	0.17
60	0.15	0.16	0.16	0.16	0.17
58	0.39	0.40	0.41	0.42	0.44
56	0.52	0.55	0.55	0.55	0.58
54	0.98	1.06	1.08	1.08	1.08
52	0.42	0.43	0.43	0.44	0.45
50	0.42	0.45	0.46	0.45	0.46
48	0.69	0.79	0.77	0.80	0.78
46	0.64	0.69	0.69	0.69	0.70

Οι μεγαλύτερες τιμές της κατακόρυφης αναρρίχησης υπολογίστηκαν στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα στο Ακρωτήριο των Μύλων (διατομές 8-11). Μικρότερες τιμές της αναρρίχησης υπολογίστηκαν στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης (διατομές 56-62), όπου η κλίση της ακτής είναι πιο ήπια σε σχέση με το βορειότερο τμήμα. Η κατακόρυφη αναρρίχηση στην περίπτωση ασθενούς καταιγίδας είναι έως 94% της αναρρίχησης κατά τη διάρκεια ακραίας καταιγίδας. Συγκριτικά με τα αποτελέσματα από την εξίσωση των Stockdon et al (2006) το μοντέλο υποεκτιμά την αναρρίχηση των κυματισμών στην ακτή.

4.2.3 Μετεωρολογική παλίρροια κατά τη διάρκεια γεγονότων καταιγίδας

Από την ανάλυση των χρονοσειρών για την περίοδο που μελετάται προκύπτει χαμηλή έως μέτρια συσχέτιση μεταξύ της ανόδου της στάθμης της θάλασσας λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας και του σημαντικού ύψους κύματος. Ο συντελεστής συσχέτισης κυμαίνεται μεταξύ 0.081 και 0.086 στο δυτικό τμήμα και από 0.135 έως 0.181 στο ανατολικό τμήμα του νησιού.

Επίσης, υπολογίστηκαν οι μέγιστη και η μέση τιμή του storm surge κατά τη διάρκεια κάθε γεγονότος καταιγίδας. Ωστόσο, στον υπολογισμό του δείκτη FIP ελήφθη υπόψη η μέγιστη τιμή προκειμένου να διερευνηθεί η δυσμενέστερη περίπτωση.

4.2.4 Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI)

Ο Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) εξαρτάται από την αναρρίχηση των κυματισμών στην ακτή, την άνοδο της στάθμης της θάλασσας λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας και το ύψος του έξαλου αναβαθμού της παραλίας.

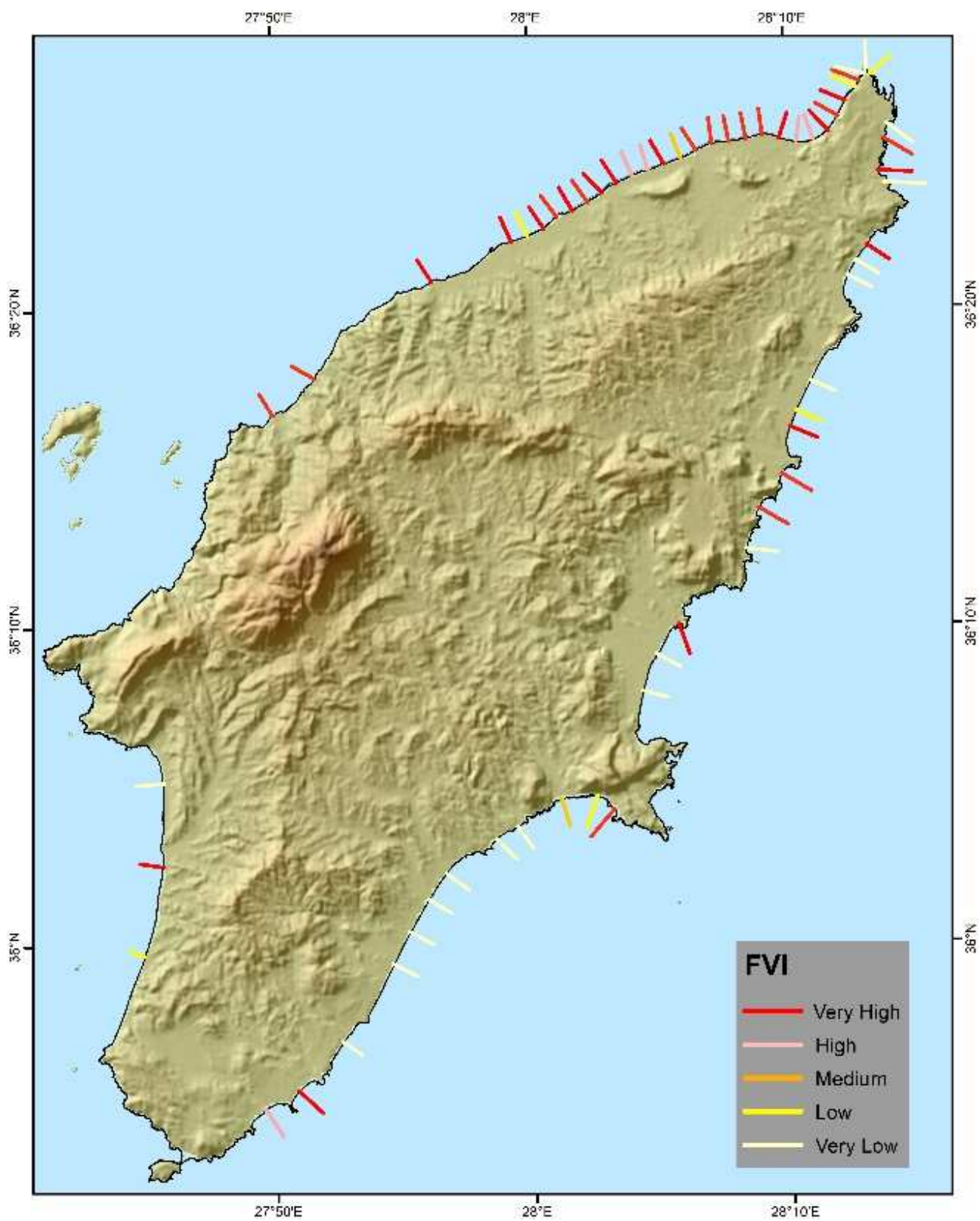
Κατά τη διάρκεια ασθενών καταιγίδων (Class-I) η τρωτότητα εκτιμήθηκε Πολύ Χαμηλή (Very Low) στο 29% των εξεταζόμενων διατομών, Χαμηλή (Low) στο 10%, Μεσαία (Medium) στο 3%, Υψηλή (High) στο 8% και Πολύ Υψηλή (Very High) στο 50% (Πίνακας 14). Η νοτιοανατολική περιοχή είναι η λιγότερο ευάλωτη σε πλημμύρα παρόλο που εκεί συμβαίνουν τα πιο έντονα γεγονότα εξαιτίας των ισχυρών νοτιοανατολικών κυματισμών. Από την άλλη, στη βορειοδυτική περιοχή (π.χ. στην Κρεμαστή, που αντιπροσωπεύεται από τις διατομές 58-62) όπου οι ακτές έχουν ήπια κλίση και είναι εκτεθειμένες σε λιγότερο ισχυρές καταιγίδες που προέρχονται από το δυτικό τομέα, παρουσιάζει μεγαλύτερη τρωτότητα σε πλημμύρα καθώς η αναρρίχηση των κυματισμών υπερβαίνει το ύψος του έξαλου αναβαθμού της παραλίας.

Στην περίπτωση των Κλάσεων II, III και IV ο FVI υπολογίστηκε Πολύ Υψηλός στο 58%, 61% και 66% των διατομών, αντίστοιχα. Κατά τη διάρκεια ακραίων καταιγίδων (Class-V) ο FVI εκτιμήθηκε Πολύ Υψηλός σε ένα σημαντικό τμήμα της περιοχής μελέτης, ήτοι στο 76% των εξεταζόμενων διατομών. Η τρωτότητα σε πλημμύρα υπολογίστηκε Πολύ Χαμηλή και Χαμηλή στο 12% των αντιπροσωπευτικών διατομών, κυρίως στη νοτιοανατολική Ρόδο.

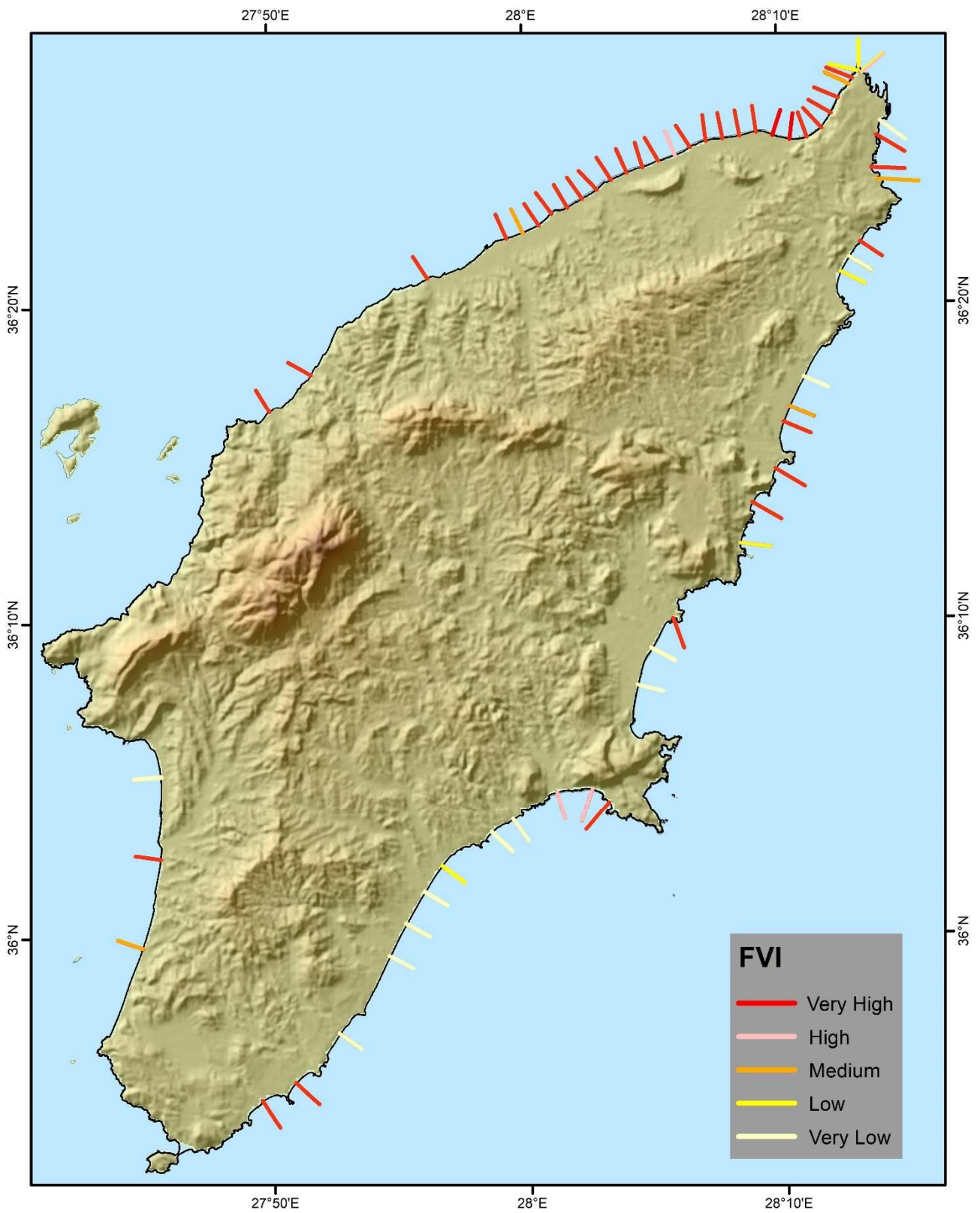
Η χωρική μεταβολή του FVI για κάθε κλάση καταιγίδας παρουσιάζεται στους παρακάτω χάρτες (Εικόνα 15 έως Εικόνα 19). Μικρές τιμές της αναρρίχησης δεν αντιστοιχούν πάντα σε χαμηλή τρωτότητα καθώς ο αντίστοιχος δείκτης (FVI) εξαρτάται και από το ύψος του αναβαθμού της υπό μελέτη ακτής. Επιπλέον, ο FVI μπορεί να διαφέρει σημαντικά μεταξύ διαδοχικών διατομών σε μια συγκεκριμένη παραλία εξαιτίας της μεταβολής του ύψους του αναβαθμού. Για παράδειγμα, στο νοτιοανατολικό τμήμα της Ρόδου ο FVI κυμαίνεται από Πολύ Υψηλός σε Πολύ Χαμηλός στις διατομές 33-36, καθώς το ύψος της παραλία μεταβάλλεται σημαντικά εξαιτίας της παρουσίας βραχωδών σχηματισμών στο χερσαίο τμήμα της.

Πίνακας 14. Ποσοστό εξεταζόμενων διατομών ανά κλάση καταιγίδας και επίπεδο τρωτότητας.

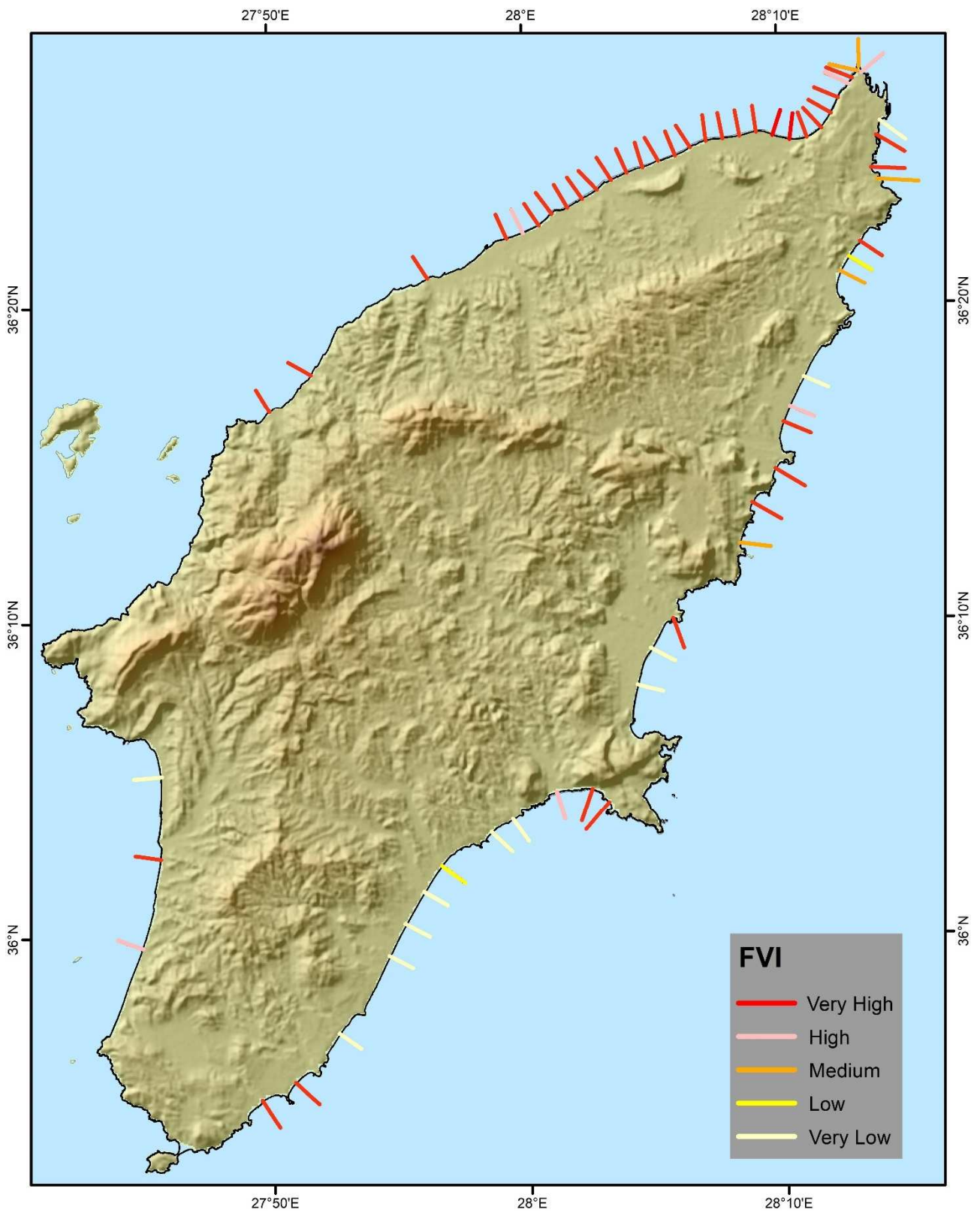
Ποσοστό διατομών ανά κλάση καταιγίδας και επίπεδο τρωτότητας					
FVI	I	II	III	IV	V
Πολύ Χαμηλός	29%	19%	18%	15%	6%
Χαμηλός	10%	8%	3%	3%	6%
Μεσαίος	3%	8%	8%	8%	6%
Υψηλός	8%	6%	10%	8%	5%
Πολύ Υψηλός	50%	58%	61%	66%	76%



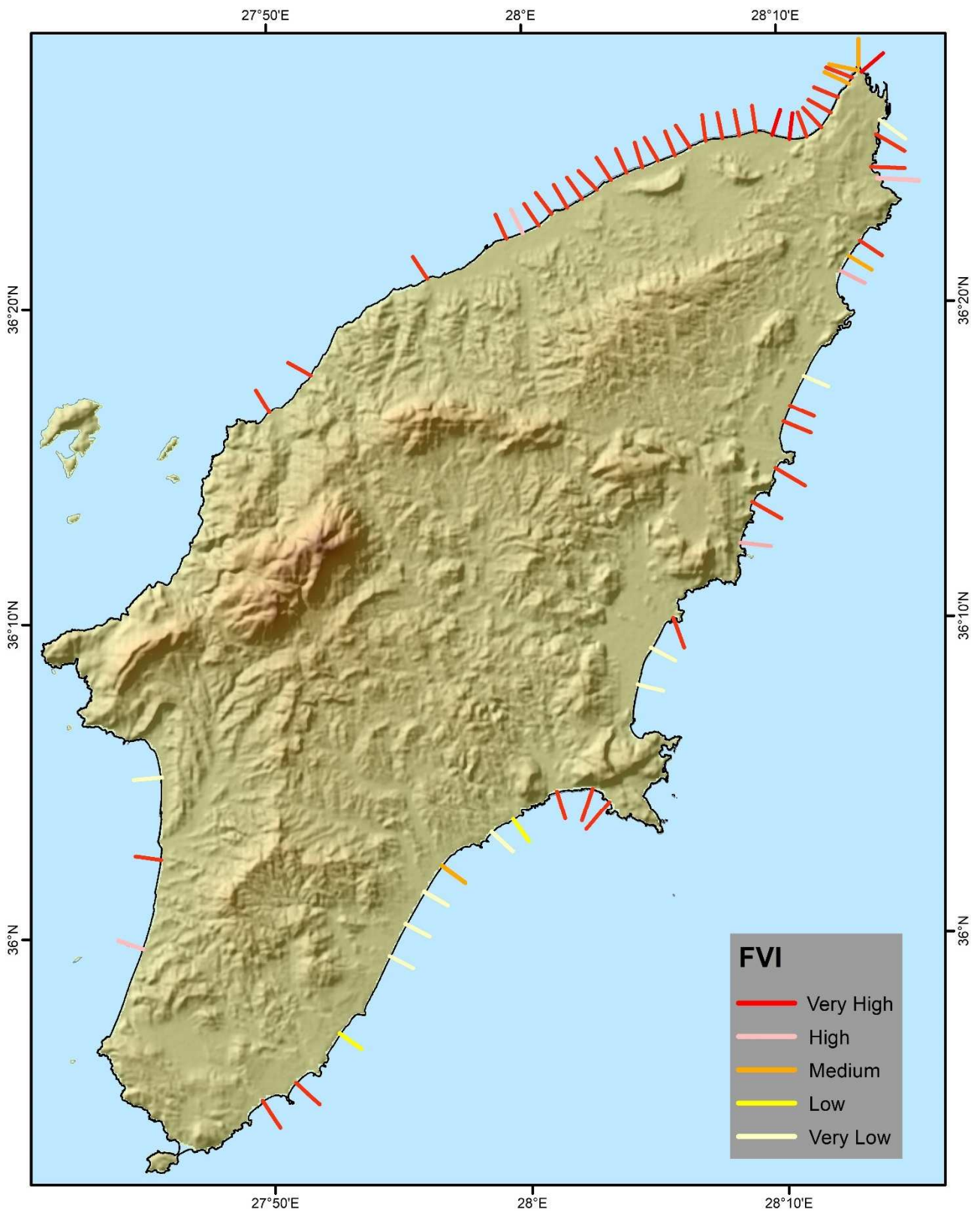
Εικόνα 15. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση ασθενών καταιγίδων, Class-I.



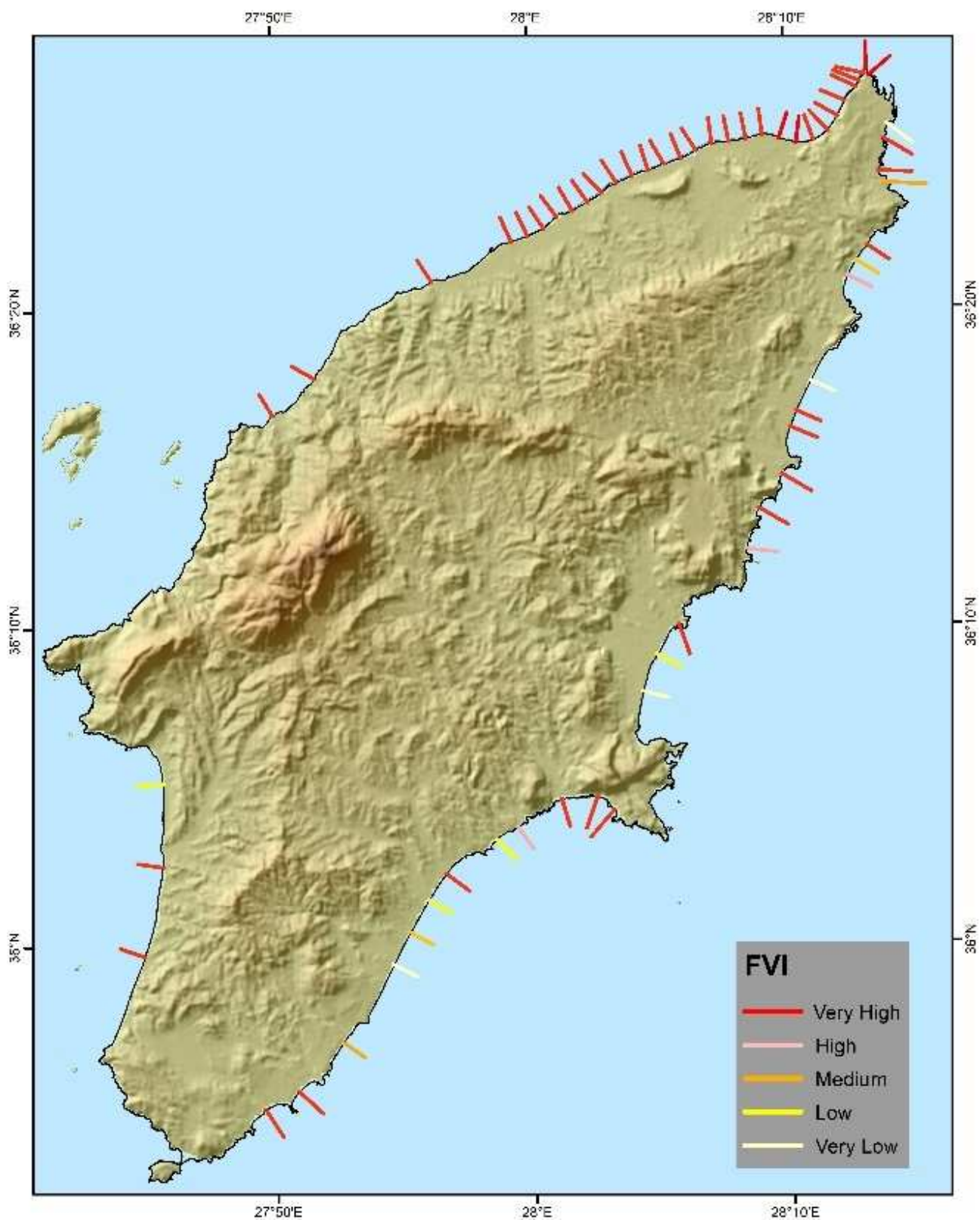
Εικόνα 16. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση καταιγίδων Class-II.



Εικόνα 17. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση καταιγίδων Class-III.



Εικόνα 18. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση καταιγίδων Class-IV.



Εικόνα 19. Χωρική μεταβολή του Δείκτη Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) στη Ρόδο στην περίπτωση ακραίων καταιγίδων, Class-V.

5 Συμπεράσματα

Η εκτίμηση της τρωτότητας των παράκτιων περιοχών σε πλημμύρα αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην ολοκληρωμένη διαχείριση της παράκτιας ζώνης. Καθώς τις τελευταίες δεκαετίες ακραία κυματικά γεγονότα έχουν προκαλέσει σοβαρές επιπτώσεις στις παράκτιες περιοχές, κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική η ανάλυση των καταιγίδων και των πιθανών κινδύνων που προκύπτουν από αυτές. Η παρούσα μελέτη προτείνει μια μεθοδολογία για την εκτίμηση της τρωτότητας σε παράκτιες πλημμύρες, με σκοπό να βοηθήσει τους φορείς λήψης αποφάσεων για μια προκαταρκτική ανάλυση σε περιφερειακό επίπεδο. Ο FVI αποτελεί ένα δείκτη εκτίμησης της τρωτότητας ο οποίος βασίζεται σε μορφολογικές και ωκεανογραφικές παραμέτρους.

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε σε οκτώ γεωγραφικές περιοχές της Ν. Ρόδου προκειμένου να γίνει εκτίμηση της τρωτότητας σε παράκτιες πλημμύρες, λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμορφολογία και το κυματικό κλίμα κάθε περιοχής.

Στην παρούσα μελέτη η βέλτιστη μέθοδος ταξινόμησης σε συστάδες είναι η μέθοδος Μέσου Δεσμού (Average Linkage), η οποία έχει επίσης εφαρμοστεί σε παρόμοιες μελέτες σε περιοχές του Ατλαντικού Ωκεανού (Dolan and Davis, 1992 & 1994) και της Μεσογείου (Mendoza and Jimenez, 2006).

Η ταξινόμηση των καταιγίδων εξαρτάται από την έντασή τους και στις υψηλότερες κλάσεις (εντονότερα γεγονότα) υπάρχει μια τάση αύξησης των τιμών των κυματικών χαρακτηριστικών (ύψος, περίοδος και ενέργεια), όπως έχει παρατηρηθεί και από τους Mendoza et al. (2011) και Tsooukala et al. (2016) σε διάφορες περιοχές της Μεσογείου. Σε κάποιες περιπτώσεις οι μέσες τιμές των χαρακτηριστικών των καταιγίδων μπορεί να είναι μικρότερες στις υψηλότερες κλάσεις και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα γεγονός μπορεί να έχει μεγάλη διάρκεια αλλά χαμηλές τιμές κυματικών παραμέτρων. Επίσης, το πλήθος των γεγονότων μειώνεται στις μεγαλύτερες κλάσεις καθώς τα πιο έντονα φαινόμενα έχουν μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης. Οι πιο έντονες καταιγίδες συμβαίνουν στο ανατολικό, νοτιοανατολικό και νότιο τμήμα της Ρόδου, που είναι εκτεθειμένα στους ισχυρούς νοτιοανατολικούς κυματισμούς.

Όσον αφορά την αναρρίχηση των κυματισμών στις ακτές γενικά η τιμή της αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ένταση των καταιγίδων. Οι αντιπροσωπευτικές τιμές της αναρρίχησης κατά τη διάρκεια ακραίων γεγονότων (Class V) υπολογίστηκαν σχεδόν διπλάσιες συγκριτικά με τις τιμές που αντιστοιχούν στις ασθενείς καταιγίδες (Class I), όπως έχει υπολογιστεί και από τους Mendoza et al. (2011) σε αντίστοιχη μελέτη σε μια παράκτια περιοχή της βορειοδυτικής Μεσογείου. Επιπλέον, η αναρρίχηση εξαρτάται από τη γεωμορφολογία μιας ακτής και πιο συγκεκριμένα από την κλίση της. Έτσι, για μια συγκεκριμένη κλάση οι μεγαλύτερες τιμές της αναρρίχησης υπολογίστηκαν στις ακτές με τις πιο απότομες κλίσεις, όπως στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού. Οι ελάχιστες τιμές της αναρρίχησης υπολογίστηκαν στο βόρειο, το βορειοανατολικό και το βορειοδυτικό τμήμα του νησιού όπου οι κλίσεις του μετώπου είναι μικρότερες από 4%. Ωστόσο, εξαιτίας του χαμηλού ύψους του έξαλου αναβαθμού των ακτών στο βορειοδυτικό τμήμα του νησιού ο Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) εκτιμήθηκε ως Πολύ Υψηλός τόσο για τα ασθενή γεγονότα όσο και για τα ακραία. Επιπλέον, όταν η κλίση του μετώπου της ακτής διπλασιάζεται η αναρρίχηση αυξάνεται κατά 1.2 έως 1.5 φορές.

Ο Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) γενικά εκτιμήθηκε μεγαλύτερος στις υψηλότερες κλάσεις. Στην περίπτωση των ακραίων γεγονότων το μεγαλύτερο τμήμα της Ρόδου χαρακτηρίστηκε με πολύ υψηλή τρωτότητα σε παράκτιες πλημμύρες. Το βορειοδυτικό τμήμα του νησιού και συγκεκριμένα στον οικισμό Κρεμαστή, όπου οι ακτή έχει ήπια κλίση και χαμηλό ύψος αναβαθμού, η τρωτότητα υπολογίστηκε πολύ υψηλή τόσο στα ακραία γεγονότα (Class-V) όσο και στις ασθενείς καταιγίδες (Class-I). Παρόμοια αποτελέσματα έχουν προκύψει στις μελέτες των Kokkinos et al. (2014) σε δύο περιοχές στο νότιο και βόρειο Αιγαίο και των Jimenez et al. (2012) σε τρεις διαφορετικές περιοχές της Μεσογείου. Από την άλλη στο νότιο τμήμα του νησιού, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλο ύψος παραλίας και απότομη κλίση, παρόλο που

προσβάλλεται από έντονους νοτιοανατολικούς κυματισμούς η τρωτότητα υπολογίστηκε Πολύ Χαμηλή έως Χαμηλή ακόμα και στην περίπτωση των ακραίων κυματικών καταιγίδων. Επίσης, στη συγκεκριμένη περιοχή, σε μια παραλία μεγάλου μήκους παρατηρήθηκε μεταβολή του FVI κατά μήκος αυτής εξαιτίας του διαφορετικού ύψους των διατομών.

Όπως έχει επισημανθεί από τους Garnier et al. (2018), σε περιοχές της Μεσογείου όπου το εύρος της παλίρροιας είναι μικρό, οι κυματισμοί αποτελούν τον κύριο παράγοντα στη διαμόρφωση της στάθμης της θάλασσας, και έτσι στην παρούσα μελέτη δεν ελήφθησαν υπόψη δεδομένα στάθμης θάλασσας λόγω αστρονομικής παλίρροιας. Ωστόσο, στην εκτίμηση του FVI συμπεριλήφθηκε η μετεωρολογική παλίρροια (storm surge), καθώς όπως έχει αναφερθεί και από τους Krestenitis et al. (2011) στην ευρύτερη περιοχή της Ρόδου έχει καταγραφεί σημαντική άνοδος της στάθμης της θάλασσας εξαιτίας αυτού του φαινομένου. Για τη διερεύνηση της δυσμενέστερης περίπτωσης, στους υπολογισμούς του FVI ελήφθη υπόψη η μέγιστη τιμή της μετεωρολογικής παλίρροιας κατά τη διάρκεια κάθε καταιγίδας. Η από κοινού εμφάνιση της ανόδου της στάθμης της θάλασσας λόγω μετεωρολογικής παλίρροιας και του ύψους κύματος εξετάστηκε υπολογίζοντας το συντελεστή συσχέτισης των δύο παραμέτρων στη χρονική περίοδο της ανάλυσης και η συσχέτιση υπολογίστηκε χαμηλή έως μέτρια, όπως και οι Petroliaogkis et al. (2016) επίσης έχουν υπολογίσει σε διάφορες παράκτιες περιοχές της Μεσογείου.

Τα κυματικά και μορφολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη προήλθαν κυρίως από βάσεις δεδομένων μεγάλης κλίμακας, όπως ο Άτλαντας, το Copernicus, το EMODnet, και το Ελληνικό Κτηματολόγιο, έτσι η συγκεκριμένη μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί για μια προκαταρκτική ανάλυση σε περιφερειακό επίπεδο. Στην περίπτωση που απαιτείται λεπτομερέστερη ανάλυση σε τοπικό επίπεδο είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν τοπογραφικές και βυθομετρικές αποτυπώσεις ή ακόμα και να χρησιμοποιηθούν δεδομένα κυματικά και στάθμης θάλασσας από επιτόπου μετρήσεις. Επίσης θα ήταν χρήσιμη η εφαρμογή αριθμητικού μοντέλου το οποίο θα μπορούσε να βαθμονομηθεί χρησιμοποιώντας δεδομένα επιτόπου μετρήσεων ώστε να επιτευχθεί μεγάλη ακρίβεια στα αποτελέσματα.

Στις περιοχές όπου ο Δείκτης Τρωτότητας σε Πλημμύρα (FVI) εκτιμήθηκε Υψηλός και Πολύ Υψηλός, ακόμα και στην περίπτωση ασθενών καταιγίδων, προτείνεται η περαιτέρω μελέτη σε τοπικό επίπεδο ώστε να διερευνηθούν και να προταθούν μέτρα προστασίας έναντι των πλημμυρών. Μεταξύ των μέτρων που προτείνονται διεθνώς για την προστασία έναντι των παράκτιων πλημμυρών είναι η κατασκευή κατάλληλων τεχνικών έργων, όπως οι παράκτιοι τοίχοι, η αποκατάσταση των αμμοθινών, ακόμα και η ρύθμιση των χρήσεων γης (CRS, 2019). Επιπλέον, είναι σημαντικό να δημιουργηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης των ακτών, και να γίνεται καταγραφή των επιπτώσεων που προκαλούνται κατά τη διάρκεια γεγονότων καταιγίδας.

6 Αναφορές

- Bosom García, E., and Jiménez Quintana, J. A., 2011. Probabilistic Coastal Vulnerability Assessment to Storms at Regional Scale: Application to Catalan Beaches (NW Mediterranean). *Nat. hazards Earth Syst. Sci.*, 11 (2), 475–484.
- EMODnet Bathymetry Consortium, 2018. EMODnet Digital Bathymetry (DTM). EMODnet Bathymetry.
- Copernicus Climate Change Service, 2020. Water Level Change Indicators for the European Coast From 1977 to 2100 Derived from Climate Projections. Available online: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-water-level-change-indicators?tab=overview> (accessed on 4 October 2020).
- CRS (Congressional Research Service), 2019. Flood Resilience and Risk Reduction: Federal Assistance and Programs.
- De Michele, C., Salvadori, G., Passoni, G., and Vezzoli, R., 2007. A Multivariate Model of Sea Storms Using Copulas. *Coast. Eng.*, 54 (10), 734–751.
- DHI, 2014a. *MIKE 21 SW, Spectral Waves FM Module, Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.
- DHI, 2014b. *MIKE 21 BW, Boussinesq Waves, Scientific Documentation*. Danish Hydraulic Institute, Water and Environment, Denmark.
- Dolan, R. and Davis, R. E., 1994. Coastal Storm Hazards. *J. Coast. Res.*, 103–114.
- Dolan, R. and Davis, R. E., 1992. An Intensity Scale for Atlantic Coast Northeast Storms. *J. Coast. Res.*, 840–853.
- Gad, F. K., Hatiris, G. A., Loukaidi, V., Dimitriadou, S., Drakopoulou, P., Sioulas, A., and Kapsimalis, V., 2018. Long-Term Shoreline Displacements and Coastal Morphodynamic Pattern of North Rhodes Island, Greece. *Water*, 10 (7), 849.
- Garnier, E., Ciavola, P., Spencer, T., Ferreira, O., Armaroli, C., and McIvor, A., 2018. Historical Analysis of Storm Events: Case Studies in France, England, Portugal and Italy. *Coast. Eng.*, 134, 10–23.
- Hahs-Vaughn, D. L., 2016. *Applied multivariate statistical concepts*. Routledge, New York.
- Härdle, W., and Simar, L., 2007. *Applied multivariate statistical analysis* (Vol. 22007, pp. 1051-8215). Springer, Berlin.
- Holman, R. A., 1986. Extreme Value Statistics for Wave Run-up on a Natural Beach. *Coast. Eng.*, 9 (6), 527–544.
- Hubbard, M. E., and Dodd, N., 2002. A 2D Numerical Model of Wave Run-up and Overtopping. *Coast. Eng.*, 47 (1), 1–26.
- Hubbert, G. D., and McInnes, K. L., 1999. A Storm Surge Inundation Model for Coastal Planning and Impact Studies. *J. Coast. Res.*, 168–185
- Jiménez, J. A., Sancho-García, A., Bosom, E., Valdemoro, H. I., and Guillén, J., 2012. Storm-Induced Damages along the Catalan Coast (NW Mediterranean) during the Period 1958-2008. *Geomorphology*, 143, 24-33.
- Kokkinos, D., Prinos, P., and Galiatsatou, P., 2014. Assessment of Coastal Vulnerability for Present and Future Climate Conditions in Coastal Areas of the Aegean Sea. In *ICHE 2014. Proceedings of the 11th International Conference on Hydrosience & Engineering*, 1043–1052.

- Krestenitis, Y. N., Androulidakis, Y. S., Kontos, Y. N., and Georgakopoulos, G., 2011. Coastal Inundation in the North-Eastern Mediterranean Coastal Zone Due to Storm Surge Events. *J. Coast. Conserv.*, 15 (3), 353–368.
- Martzikos, N., Afentoulis, V., and Tsoukala, V., 2018. Storm clustering and classification for the port of Rethymno in Greece. *Water Utility Journal*, 20, 67-79.
- Martzikos, N., Lykou, A., Makropoulos, C., and Tsoukala, V., 2017. Cluster Analysis and Classification of Storm Events at Rethymno. *Eur. Water*, 57, 57–62.
- Mendoza, E. T., Trejo-Rangel, M. A., Salles, P., Appendini, C. M., Lopez-Gonzalez, J., and Torres-Freyermuth, A., 2013. Storm Characterization and Coastal Hazards in the Yucatan Peninsula. *J. Coast. Res.*, 65 (sp1), 790–795.
- Mendoza, E. T., Jimenez, J. A., Mateo, J., and Salat, J., 2011. A Coastal Storms Intensity Scale for the Catalan Sea (NW Mediterranean). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11 (9).
- Mendoza, E. T., and Jiménez, J. A., 2009. Regional Vulnerability Analysis of Catalan Beaches to Storms. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*; Thomas Telford Ltd, 162, 127–135.
- Mendoza, E. T., and Jiménez, J. A., 2006. Storm-Induced Beach Erosion Potential on the Catalonian Coast. *J. Coast. Res.*, No. 48, 81–88.
- Nielsen, P., and Hanslow, D. J., 1991. Wave Runup Distributions on Natural Beaches. *J. Coast. Res.*, 7 (4), 1139–1152.
- Petroliaqkis, T. I., Voukouvalas, E., Disperati, J., and Bidlot, J., 2016. Joint Probabilities of Storm Surge, Significant Wave Height and River Discharge Components of Coastal Flooding Events. *Eur. Comm. Tech. Reports*, Italia.
- Rangel-Buitrago, N. and Anfuso, G., 2011. An Application of Dolan and Davis (1992) Classification to Coastal Storms in SW Spanish Littoral. *J. Coast. Res.*, 1891–1895.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. van T., McCall, R., and Lescinski, J., 2009. Modelling Storm Impacts on Beaches, Dunes and Barrier Islands. *Coast. Eng.*, 56 (11–12), 1133–1152.
- Soukissian, T. H., 2014. Probabilistic Modeling of Directional and Linear Characteristics of Wind and Sea States. *Ocean Eng.*, 91, 91–110.
- Soukissian, T., Hatzinaki, M., Korres, G., Papadopoulos, A., Kallos, G., and Anadranistakis, E., 2007. *Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas*; Hellenic Centre for Marine Research: Anavysos.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A. and Sallenger Jr, A. H., 2006. Empirical Parameterization of Setup, Swash, and Runup. *Coast. Eng.*, 53 (7), 573–588.
- Tsoukala, V. K., Chondros, M., Kapelonis, Z. G., Martzikos, N., Lykou, A., Belibassakis, K., and Makropoulos, C., 2016. An Integrated Wave Modelling Framework for Extreme and Rare Events for Climate Change in Coastal Areas—the Case of Rethymno, Crete. *Oceanologia*, 58 (2), 71–89.
- UNEP/MAP/PAP, 2008. Protocol on Integrated Coastal Zone Management in the Mediterranean. Priority Actions Programme Split, Croatia.
- Westerink, J. J., Luetlich, R. A., Baptists, A. M., Scheffner, N. W., and Farrar, P., 1992. Tide and Storm Surge Predictions Using Finite Element Model. *J. Hydraul. Eng.*, 118 (10), 1373–1390.
- Yamazaki, Y., Kowalik, Z., and Cheung, K. F., 2009. Depth-integrated, Non-hydrostatic Model for Wave Breaking and Run-up. *Int. J. Numer. methods fluids*, 61 (5), 473–497.

Βερυκίου - Παπασπυριδάκου, Ε., Μπαθρέλλος, Γ., και Σκυλοδήμου, Χ., 2004. Φυσικογεωγραφικές Παρατηρήσεις της Παράκτιας Ζώνης της Βορειοανατολικής Ρόδου. *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας* τομ. ΧΧΧVI, Πρακτικά 10^{ου} Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.

Σιάρδος, Γ., 1998. *Μέθοδοι πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Υδρογραφική Υπηρεσία, 2013. Στατιστικά Στοιχεία της Στάθμης της Θάλασσας Ελληνικών Λιμένων.