



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διδακτορική Διατριβή

« Ανάλυση κυματικών μετρήσεων πεδίου και αριθμητικές
προσομοιώσεις κυματικών συνθηκών στον Κόλπο Χανίων»

Νικόλαος Μαραβελάκης

Συμβουλευτική επιτροπή:

Καθηγητής Κώστας Συνολάκης (Ακαδημία Αθηνών, University of Southern California)

Καθηγητής Νικόλαος Νικολαΐδης (Πολυτεχνείο Κρήτης)

Αναπληρωτής Καθηγητής Ανάργυρος Δελής (Πολυτεχνείο Κρήτης)

Χανιά, 2021

Επταμελής Επιτροπή:

Καθηγητής Κώστας Συνολάκης (Ακαδημία Αθηνών, University of Southern California)

Καθηγητής Νικόλαος Νικολαΐδης (Πολυτεχνείο Κρήτης)

Αναπληρωτής Καθηγητής Ανάργυρος Δελής (Πολυτεχνείο Κρήτης)

Αναπληρωτής Καθηγητής Δημήτριος Μητσούδης (Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής)

Διευθυντής Ερευνών Νικόλαος Μελής (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Κύριος Ερευνητής Νίκος Καλλιγέρης (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών)

Ερευνήτρια Επιστήμων Μαρία Καζολέα (Institute for Research in Digital Science and Technology, France)

Στους γονείς μου Άρτεμις και Βενιζέλο

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διατριβής μου Καθηγητή Κώστα Συνολάκη για την καθοδήγηση, την έμπνευση και την στήριξή του καθόλη την διάρκεια της διατριβής, καθώς επίσης και τους Καθηγητή Νικόλαο Νικολαΐδη και Αν. Καθηγητή Ανάργυρο Δελή ως μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον Ερευνητή Νίκο Καλλιγέρη για την πολύτιμη συνεργασία του και συμβουλές του. Η συνεισφορά των Σκαναβή Βασίλη, Γιάννη Δαπόλα και των καταδυτικών σχολών του Αρτέμη Χειλαδάκη (FunDive) και Νίκου Γιαννουλάκη (ChaniaDiving) ήταν κάτι παραπάνω από ουσιαστική στην συλλογή των δεδομένων πεδίου. Θερμές ευχαριστίες και στον Ιστιοπλοϊκό Όμιλο Χανίων για την παραχώρηση σκαφών και υποδομών κατά την διάρκεια εργασιών πεδίου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

EΙΚΟΝΕΣ.....	9
ΠΙΝΑΚΕΣ	15
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	17
1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	21
1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	21
1.1.1 Αναγκαίες υποθέσεις για την στατιστική ανάλυση χρονοσειρών ανύψωσης στάθμης 22	
1.1.2 Εφαρμογή κατανομής πιθανοτήτων Rayleigh στους θαλάσσιους κυματισμούς 25	
1.1.3 Ανάλυση κυματισμών στο πεδίο χρόνου (Time Domain Analysis)	28
1.1.4 Ανάλυση κυματισμών στο πεδίο των συχνοτήτων – Φασματική ανάλυση (Frequency domain analysis – Spectral analysis)	30
1.2 ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ	34
1.2.1 Βασική θεωρία	34
1.2.2 Υπερβαρυτικοί κυματισμοί (infragravity waves, IG) και συντονισμός λιμένων 37	
1.3 ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	39
1.3.1 Εισαγωγικά.....	39
1.3.2 Συνεισφορά των IG κυματισμών στην διεργασία υπερπήδησης	42
2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	45
2.1 Ανεμολογικά στοιχεία περιοχής μελέτης	45
2.2 Η θαλάσσια παλίρροια στην περιοχή μελέτης	50
2.3 Θαλάσσια ρεύματα	53
2.3.1 Κυκλοφορία υδάτων στην Ανατολική Μεσόγειο και το Αιγαίο.....	53
2.3.2 Ρεύματα στον κόλπο Χανίων	54
2.4 Κυματικό καθεστώς και κυματισμοί σχεδιασμού για κόλπο Χανίων	57
2.5 Ο Ενετικός λιμένας Χανίων	61
2.5.1 Ιστορικό μελετών προστασίας και κατασκευής έργων προστασίας	63
2.5.2 Σήμερα κατάσταση.....	66
3 ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ	68
3.1 Μετρήσεις στα ανοιχτά του κόλπου Χανίων.....	68
3.1.1 Περιγραφή οργάνων και αρχές λειτουργίας.....	68
3.1.2 Περιοχές και περίοδοι πόντισης – πλάνα δειγματοληψίας	70
3.1.3 Έλεγχος ποιότητας χρονοσειρών	72
3.1.4 Επεξεργασία χρονοσειρών στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων 74	
3.2 Μετρήσεις εντός της λιμενολεκάνης του Ενετικού Λιμένα	81
4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ	85
4.1 Αριθμητικό μοντέλο COULWAVE	85
4.1.1 Οριακές συνθήκες	87
4.2 Δεδομένα εισόδου.....	87
4.2.1 Βαθυμετρία - τοπογραφία	88
4.2.2 Κυματικά δεδομένα εισόδου	91
5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	94
5.1 Εμπειρικές εξισώσεις υπερπήδησης.....	95
5.2 Κυματικές παράμετροι εισόδου και προσεγγίσεις ποσοτικοποίησης της επιρροής συντονισμού στην παροχή υπερπήδησης.	97
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	101
6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΝΟΙΧΤΑ ΤΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΧΑΝΙΩΝ.....	101
6.1.1 Συνοπτική περιγραφή κυματικών χαρακτηριστικών κάθε περιοχής.....	101
6.1.2 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης χρονοσειρών.	121

6.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΕΝΕΤΙΚΟΥ ΛΙΜΕΝΑ	141
6.2.1	Απόκριση της λιμενολεκάνης στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες	142
6.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ – ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ.....	159
6.3.1	Καθορισμός ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών συντονισμού.....	160
6.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΩΝ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ	163
7	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	169
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	176

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 1. Χρονοσειρά ανύψωσης στάθμης της θάλασσας ανοιχτά του Ενετικού λιμένα συνολικής διάρκειας 1200 s και βήματος δειγματοληψίας 2 Hz (1 s).	23
Εικόνα 2. Λεπτομέρεια της χρονοσειράς της Εικόνας 1 και ορισμοί κυματικών παραμέτρων των μεθόδων των μηδενικών διαβάσεων. Σε κύκλους τα σημεία μεταξύ των οποίων ορίζονται οι παράμετροι ύψους και περιόδου. H_{uc} και T_{uc} ύψος και περίοδος κύματος με τη μέθοδο των άνω μηδενικών διαβάσεων, H_{dc} και T_{dc} ύψος και περίοδος κύματος με τη μέθοδο των κάτω μηδενικών διαβάσεων.	29
Εικόνα 3. Χρονοσειρά ανύψωσης στάθμης της θάλασσας διάρκειας 1200 s (α), και το φάσμα ενεργειακής πυκνότητας που της αντιστοιχεί στην μέγιστη δυνατή ανάλυση με $\Delta f=1/1200s=0.000833$ και 2 βαθμούς ελευθερίας (DOF) (β).	32
Εικόνα 4. Φάσματα διαφορετικής ανάλυσης Δf και βαθμών ελευθερίας DOF, για χρονοσειρά διάρκειας 1200 s ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (αριστερά) και 4096 s εντός του λιμένα (δεξιά).	34
Εικόνα 5. Προφίλ επιφάνειας για τις τέσσερις πρώτες ιδιομορφές συντονισμού σε κλειστές και ανοιχτού στόμιου λεκάνες ομοιόμορφου βάθους (Πηγή: Rabinovich, 2010).	36
Εικόνα 6. Υπερπήδηση κυματισμών στον Ενετικό λιμένα Χανίων κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων. Υπερπήδηση τύπου spray overtopping στο ΒΔ σημείο της εισόδου (α,β). Υπερπήδηση τύπου green water στην δυτική προβλήτα της δυτικής λιμενολεκάνης (β,δ).	40
Εικόνα 7. Σκίτσο ορισμών για την εκτίμηση υπερπήδησης σε απλά κάθετα μέτωπα. R_c ελεύθερο περιθώριο στέψης, H_{m0} ύψος κύματος στον πόδα της κατασκευής, h βάθος στον πόδα της κατασκευής, 1: m κλίση πυθμένα (Πηγή: EurOtop, 2018).	42
Εικόνα 8. Ροδόγραμμα ανέμων για την περίοδο 07/1958 – 05/2020 στον σταθμό της Ε.Μ.Υ. 746 (35°53', 24°15')	46
Εικόνα 9. Μηνιαία ροδογράμματα ανέμου της περιόδου 07/1958 – 05/2020 για τους μήνες Ιανουάριο έως και Ιούνιο.	48
Εικόνα 10. Μηνιαία ροδογράμματα ανέμου της περιόδου 07/1958 – 05/2020 για τους μήνες Ιούλιο έως και Δεκέμβριο.	49
Εικόνα 11. Πλάτη ημερήσιων (πάνω) και ημιμερήσιων (κάτω) συνιστωσών παλίρροιας για τον κόλπο της Σούδας (1982 – 2003) και για την περιοχή ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (2018 – 2019) (Πηγή δεδομένων 1982 – 2003: Παπαδόπουλος, 2009).	52
Εικόνα 12. Πλάτη μηνιαίας/δεκαπενθήμερων (πάνω) και ετήσιας/ημιετήσιας (κάτω) συνιστωσών παλίρροιας για τον κόλπο της Σούδας (1982 – 2003) και για την περιοχή ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (2018 – 2019) (Πηγή δεδομένων 1982 – 2003: Παπαδόπουλος, 2009).	53
Εικόνα 13. Βαθυμετρία και απεικόνιση κυκλοφορίας Νοτίου Αιγαίου. BSW Black Sea Water, MC Myrtoan Cyclone, LSW Levantine Surface Water, AW Atlantic Water, PG Pelops Gyre, CWA Cretan Western anticyclone, CEG Cretan Eastern Gyre, IG Ierapetra Gyre (Πηγή: (Kassis et al., 2015)).	54
Εικόνα 14. Ροδογράμματα μέσης ταχύτητας και μέσης διεύθυνσης ρευμάτων για συγκεκριμένα εύρη βαθών στις περιοχές ανοιχτά του Γερανίου (αριστερά) και του Ενετικού λιμένα (δεξιά).	56
Εικόνα 15. Χρονοσειρά σημαντικών υψών κύματος για την περίοδο 1994-2004 από τον κυματικό Άτλαντα του ΕΛΚΕΘΕ. Με κόκκινο οι τιμές που επιλέχτηκαν για την στατιστική ανάλυση ακραίων τιμών (POT) βάσει του ορίου $u=1.5$ m (Πηγή: (Συνολάκης et al., 2011)).	59

Εικόνα 16. Οι τιμές επαναφοράς (return values) από την κατανομή Weibull και οι τιμές του δείγματος (Πηγή: (Συνολάκης et al., 2011)).	60
Εικόνα 17. Κάτοψη Ενετικού λιμένα Χανίων με σημειωμένα τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.	62
Εικόνα 18. Εξέλιξη του Ενετικού λιμένα στο χρόνο δεξιόστροφα από επάνω αριστερά. Πάνω αριστερά η μορφή του λιμένα κατά το δεύτερο μισό του 16 ^{ου} αιώνα. Πάνω δεξιά και κάτω δεξιά κατά το πρώτο μισό του 17 ^{ου} αιώνα. Κάτω αριστερά στη σημερινή του μορφή.	63
Εικόνα 19. (α) Τοποθεσίες πόντισης των οργάνων AWAC στον κόλπο Χανίων, (b) όργανο AWAC τοποθετημένο στην βάση, χαμηλά διακρίνεται το μεταλλικό κουτί εντός του οποίου είναι τοποθετημένη η μπαταρία τροφοδοσίας, (c) πλωτή πλατφόρμα ρημούλκησης του οργάνου, (d) στιγμή κατά την οποία το όργανο έχει μόλις ανέλθει στην επιφάνεια από τον βυθό με τη χρήση σάκου ανέλκυσης.	69
Εικόνα 20. Παραδείγματα χρονοσειρών οι οποίες δεν ήταν να δυνατόν να διορθωθούν και να περάσουν τον έλεγχο ποιότητας. (α) Καταγραφή σε ήρεμες κυματικές συνθήκες κατά την οποία το σήμα παρεμποδίστηκε, (β) Καταγραφή κατά την διάρκεια ισχυρής καταιγίδας με μετακίνηση του οργάνου. Σε κόκκινο πλαίσιο τα προβληματικά σημεία των καταγραφών.	73
Εικόνα 21. Τοποθεσίες πόντισης κυματομετρητών πίεσης εντός του Ενετικού λιμένα (α). Συσκευές κυματομετρητών RBR-duet (b) και TWR-2050 (c).	82
Εικόνα 22. Απεικόνιση όλων των μετρήσεων πεδίου, τοπογραφίας και βαθυμετρίας, που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του κάναβου.	89
Εικόνα 23. Η Εικόνα 22 σε μικρότερη κλίμακα.	90
Εικόνα 24. Βαθυμετρία Ενετικού λιμένα και ευρύτερης περιοχής.	90
Εικόνα 25. Τρισδιάστατη απεικόνιση του κυματοθραύστη και των προβλητών με TIN και του βαθυμετρικού καννάβου με χρωματικό χάρτη.	91
Εικόνα 26. Κυματικό φάσμα εισαγωγής της αριθμητικής προσομοίωσης.	92
Εικόνα 27. Τοποθεσίες εκτίμησης κυματικής υπερπήδησης κατά μήκος της περιμέτρου της δυτικής λιμενολεκάνης (κόκκινα σημεία). Τα μαύρα σημεία είναι οι κόμβοι καταγραφής των αριθμητικών χρονοσειρών ανύψωσης της στάθμης. Τα τρίγωνα αποτελούν τα τριάδες που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των διευθυντικών φασμάτων και την εξαγωγή των παραμέτρων εισαγωγής για τις εκτιμήσεις υπερπήδησης. Στα δεξιά της εικόνας παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των τριάδων με τις τοποθεσίες εκτίμησης.	94
Εικόνα 28. Απεικόνιση των δύο προσεγγίσεων για την εκτίμηση της συνεισφοράς του συντονισμού λιμένα στην κυματική υπερπήδηση κατά μήκος της προβλήτας.	99
Εικόνα 29. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων H_{max} , $H_{1/3}$, H_m , $T_{1/3}$ και T_m , για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.	102
Εικόνα 30. Κυματικό ροδόγραμμα για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.	106
Εικόνα 31. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων H_{max} , $H_{1/3}$, H_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	107
Εικόνα 32. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων $T_{1/3}$ και T_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	108
Εικόνα 33. Κυματικό ροδόγραμμα $H_{1/3}$ και $MDir$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	112
Εικόνα 34. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων H_{max} , $H_{1/3}$, H_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.	113

Εικόνα 35. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων $T_{1/3}$ και T_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.	114
Εικόνα 36. Κυματικό ροδόγραμμα $H_{1/3}$ και $MDir$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.	117
Εικόνα 37. Αλληλοεπικαλυπτόμενη απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) και στις τρεις τοποθεσίες εντός του κόλπου Χανίων για την περίοδο 15/12/2010 – 20/08/2020. Κενές περίοδοι καταγραφής ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (μπλέ χρώμα) έχουν αντικατασταθεί με τις καταγραφές ανοιχτά της Αγίας Κυριακής (κόκκινο χρώμα) και ανοιχτά του Γερανίου (καφέ χρώμα).	118
Εικόνα 38. Θηκογράμματα μέσω των στατιστικών περιγραφικών κυματικών παραμέτρων ανά μήνα για το συγκεντρωτικό σετ δεδομένων και από τις τρεις τοποθεσίες καταγραφής εντός του κόλπου Χανίων. Εκτός των θηκών οι γραμμές φτάνουν μέχρι τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές ανά μήνα. (a) H_{mean} (b) $H_{1/3}$ (c) T_{mean} και (d) $T_{1/3}$	120
Εικόνα 39. Ιστογράμματα κανονικοποιημένων μεμονομένων κυματικών υψών και εφαρμοσμένη σε αυτά η κατανομή Rayleigh. (α) Κατανομή H/η_{rms} , (b) Κατανομή H/H_{mean} , (c) Κατανομή H/H_{rms} , (d) Κατανομή $H/H_{1/3}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	122
Εικόνα 40. Συσχέτιση μεταξύ φασματικών εκτιμήσεων μέσω περιγραφικών κυματικών παραμέτρων και στατιστικών υπολογισμών αυτών. Με μπλέ χρώμα η συσχέτιση βάση της θεωρητικής εκτίμησης Longuet-Higgins και με καφέ η εκτίμηση βάση των υπολογισμών πεδίου. Οι παράμετροι που απεικονίζονται αφορούν τις παραμέτρους (a) $H_{1/10}$, (b) $H_{1/3}$, (c) H_{mean} και (d) H_{rms} . Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	125
Εικόνα 41. (a) Συσχέτιση μεταξύ μετρούμενου και εκτιμώμενου μέγιστου ύψους κύματος και (b) συσχέτιση μεταξύ του λόγου των δύο και του μετρούμενου μέγιστου ύψους κύματος. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	126
Εικόνα 42. Συσχετίσεις μεταξύ μέσω περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων και κατανομές εμφάνισης των λόγων τους. (a)-(b) $H_{1/10} / H_{1/3}$, (c)-(d) $H_{1/3} / H_{mean}$, (e)-(f) $H_{1/3} / H_{rms}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	127
Εικόνα 43. Συσχέτιση στατιστικού $H_{1/3}$ και H_{max} . (a) Διάγραμμα συσχέτισης $H_{max} - H_{1/3}$ (b) συσχέτιση μεταξύ συνολικού αριθμού κυματισμών χρονοσειράς (N) και T_{mean} και $H_{1/3}$, (c) συσχέτιση μεταξύ του λόγου των δύο και του $H_{1/3}$, (d) κατανομή εμφάνισης των λόγων τους. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	128
Εικόνα 44. Ιστογράμματα κανονικοποιημένων μεμονομένων κυματικών περιόδων. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα για την περίοδο (08/2019 – 08/2020).	129
Εικόνα 45. Διάγραμμα συσχέτισης και ιστόγραμμα κατανομής για τις μέσες στατιστικές και φασματικές περιόδους (a)-(b) $T_p - T_{1/3}$, (c)-(d) $T_{m02} - T_{mean}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	130
Εικόνα 46. Διάγραμμα συσχέτισης και ιστόγραμμα κατανομής για τις μέσες στατιστικές περιόδους (a)-(b) $T_{1/10} - T_{1/3}$, (c)-(d) $T_{1/3} - T_{mean}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	131
Εικόνα 47. Διαγράμματα συσχέτισης (a) φασματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p και (b) στατιστικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$. Οι σκιασμένες περιοχές περιλαμβάνουν τα δεδομένα ($H_{1/3} < 1m$) τα οποία δεν λήφθηκαν υπόψη στις καμπύλες εφαρμογής. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	132

Εικόνα 48. Διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ φασματικών παραμέτρων πλάτους ν και ε . Τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν στην κατηγοριοποίηση των κυματικών συνθηκών όπως αυτές φαίνονται στο υπόμνημα. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 133

Εικόνα 49. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) και φασματικών παραμέτρων ν , K_a και Q_p (a, b, c) καθώς και μεταξύ σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) και συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών r_{HH} (d). Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 134

Εικόνα 50. Επιλεγμένα ενεργειακά φάσματα κυματικών χρονοσειρών που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κυματικές συνθήκες. (a-b) $0.5m < H_{1/3} < 2.5m$ και $NE < Mdir < NW$, (c-d) $0.5m < H_{1/3} < 2.5m$ και $NNW < Mdir < NNE$, (e-f) $H_{1/3} > 2.5m$ και $NNW < Mdir < NNE$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 136

Εικόνα 51. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των φασματικών παραμέτρων (a) $K_a - \nu$, (b) $Q_p - \nu$ και (c) $K_a - Q_p$. Τα μαύρα τετράγωνα αποτελούν τις μέσες τιμές των παραμέτρων και στους δύο άξονες και συνοδεύονται από τις τυπικές αποκλίσεις των δεδομένων. Οι καμπύλες εφαρμογής παρουσιάζονται ως ενδειξη της τάσης συσχέτισης και έχουν προκύψει από την εφαρμογή στις μέσες τιμές. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 137

Εικόνα 52. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των φασματικών παραμέτρων και του συντελεστή συσχέτισης r_{HH} . (a) $K_a - r_{HH}$, (b) $Q_p - r_{HH}$ και (c) $\nu - r_{HH}$ και (d) $\varepsilon - r_{HH}$. Τα μαύρα τετράγωνα αποτελούν τις μέσες τιμές των παραμέτρων και στους δύο άξονες και συνοδεύονται από τις τυπικές αποκλίσεις των δεδομένων. Η καμπύλη εφαρμογής παρουσιάζεται ως ενδειξη της τάσης συσχέτισης και έχει προκύψει από την εφαρμογή στις μέσες τιμές. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 138

Εικόνα 53. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των φασματικών παραμέτρων και του λόγου $H_{1/3}rms$, (a) $\varepsilon - H_{1/3}rms$, (b) $\nu - H_{1/3}rms$, (c) $K_a - H_{1/3}rms$ και (d) $Q_p - H_{1/3}rms$. Τα μαύρα τετράγωνα αποτελούν τις μέσες τιμές των παραμέτρων και στους δύο άξονες και συνοδεύονται από τις τυπικές αποκλίσεις των δεδομένων. Η καμπύλη εφαρμογής παρουσιάζεται ως ενδειξη της τάσης συσχέτισης και έχει προκύψει από την εφαρμογή στις μέσες τιμές. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 139

Εικόνα 54. Περιγραφή εξέλιξης κυματικών γεγονότων Μαρτίου 2019, μέσω του σημαντικού ύψους κύματος (a), της κύριας διεύθυνσης $Mdir$ (b), των ενεργειακών φασμάτων (c), της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου K_a και του συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών r_{HH} (d) και της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου Q_p (e). Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 140

Εικόνα 55. Περιγραφή εξέλιξης κυματικών γεγονότων Μαρτίου 2013, μέσω του σημαντικού ύψους κύματος (a), της κύριας διεύθυνσης $Mdir$ (b), των ενεργειακών φασμάτων (c), της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου K_a και του συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών r_{HH} (d) και της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου Q_p (e). Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. 141

Εικόνα 56. Σημαντικά ύψη κύματος κατά τη διάρκεια των εξεταζόμενων καταιγίδων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα και εντός της λιμενολεκάνης στις τοποθεσίες A, B, C και D..... 142

Εικόνα 57. Σημαντικά ύψη κύματος $H_{1/3}$ κατά τη διάρκεια των εξεταζόμενων καταιγίδων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα και μέγιστα ύψη κύματος H_{max} εντός της λιμενολεκάνης στις τοποθεσίες A, B και C. 144

Εικόνα 58. Απεικόνιση απόκρισης τοποθεσίας A στις προσπιπτουσες κυματικές συνθήκες της καταιγίδας 1 μέσω φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας. (a) $H_{1/3}$ προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών – μεταξύ των κόκκινων γραμμών είναι διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων (b) Φάσμα

Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών (c) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B (d) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B για $f < 0.04\text{Hz}$ (e) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας C (f) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας C για $f < 0.04\text{Hz}$ (g) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D (h) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D για $f < 0.04\text{Hz}$.	150
Εικόνα 64. Μέσα φάσματα ανά καταιγίδα εκτός Ενετικού λιμένα και εντός λιμενολεκάνης στις τέσσερις τοποθεσίες.	152
Εικόνα 65. Μέσα φάσματα από το σύνολο των χρονοσειρών κατά την διάρκεια των έξι καταιγίδων για τις τοποθεσίες A, B, C και D.	154
Εικόνα 66. Λεπτομέρεια στο εύρος $0\text{Hz} < f < 0.04\text{Hz}$ των μέσων φασμάτων από το σύνολο των χρονοσειρών κατά την διάρκεια των έξι καταιγίδων για τις τοποθεσίες A, B, C και D.	155
Εικόνα 67. Κοινές ιδιοσυχνότητες στο εύρος $0\text{Hz} < f < 0.04\text{Hz}$, των μέσων φασμάτων από το σύνολο των χρονοσειρών κατά την διάρκεια των έξι καταιγίδων για τις τοποθεσίες A, B, C και D.	156
Εικόνα 68. Ταυτοποίηση των NOP του κόλπου Χανίων. α) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας στην τοποθεσία D για την Καταιγίδα 2, χρησιμοποιώντας χρονοσειρές των 24,576 s και 22 βαθμούς ελευθερίας, β) Η βαθυμετρική διατομή (διακεκομμένη γραμμή) που εξάχθηκε από την βαθυμετρία EMODnet (2016) για τον κόλπο Χανίων – οι ισοβαθείς είναι ανά 20 m, γ) Βαθυμετρικό προφίλ της διατομής; Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει όλο το βενθικό προφίλ της διατομής και η συνεχής γραμμή το κομμάτι της διατομής που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ιδιοπεριόδου.	158
Εικόνα 69. (α)Θέσεις υπολογιστικών κυματομετρητών (5-8) και μετασχηματισμός ομαλοποιημένου κυματικού φάσματος από τη θέση 8 στη θέση 5.	159
Εικόνα 70. (α) Μέσο χωρικό φάσμα ενεργειακής πυκνότητας υπολογιζόμενο από τις χρονοσειρές ανύψωσης της στάθμης του COULWAVE εντός της λιμενολεκάνης σε συγκριση με το φάσμα JONSWAP που τέθηκε στις οριακές συνθήκες. Η σκιασμένη περιοχή δηλώνει το IG εύρος συχνοτήτων του μέσου χωρικού φάσματος που απεικονίζεται από κάτω (b).	160
Εικόνα 71. Ιδιομορφές συντονισμού που αντιστοιχούν στις οχτώ πρώτες ιδιοπεριόδους που ταυτοποιήθηκαν για την λιμενολεκάνη μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα έχουν ομαλοποιηθεί από την μέγιστη φασματική ενέργεια για κάθε ιδιοπερίοδο ($Max(S)$) που έχει υπολογιστεί για όλη την λιμενολεκάνη. Η φασματική ενέργεια με τιμές δύο τάξεων μεγέθους μικρότερης της $Max(S)$ εμφανίζεται με άσπρο χρώμα. Οι τοποθεσίες των οργάνων μέτρησης A – D εμφανίζονται με πράσινα σημεία.	162
Εικόνα 72. Αποτελέσματα εκτίμησης μέσων ρυθμών υπερπήδησης, q (l/s/m). Συσχέτιση εκτιμήσεων υπερπήδησης υπό την επίδραση της IG ενέργειας (για τις προσεγγίσεις A, q_{HF} , ADJ και B, $q_{HF-IG,SWL}$) σε σχέση με την απουσία αυτής, $q_{HF,SWL}$, για κάθετη πρόσπτωση (α) και λοξή πρόσπτωση (b). Συσχέτιση των εκτιμήσεων μεταξύ των δύο προσεγγίσεων A και B για κάθετη και λοξή πρόσπτωση (c). Εκτιμήσεις υπερπήδησης ανά τοποθεσία για κάθετη (d) και λοξή (e) πρόσπτωση.	164
Εικόνα 73. Χρονοσειρά εκτιμήσεων παροχών υπερπήδησης $q_{HF,ADJ}$ για την τοποθεσία 4. Με μπλέ χρώμα απεικονίζονται οι παροχές για κάθετη πρόσπτωση και με πορτοκαλί για λοξή πρόσπτωση.	166

Εικόνα 74. Φάσματα χρονοσειρών παροχών υπερπήδησης $q_{HF,ADJ}$ για την προσέγγιση A για κάθετες συνθήκες πρόσπτωσης. Οι ομάδες αποτελούν μέσους όρους των φασμάτων τοποθεσιών παρόμοιας φασματικής κατανομής (οι τοποθεσίες που αναφέρονται φαίνονται στην **Εικόνα 27**). 168

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1. Αδιάστατες περίοδοι, $T_n^* = T_n gH / 2l$, για κλειστή και με ανοιχτό στόμιο ορθογώνια λεκάνη ομοιόμορφου βάθους (Πηγή: Rabinovich, 2010).....	37
Πίνακας 2. Πίνακας κοινής κατανομής μέσης ταχύτητας ανέμου και μέσης διεύθυνσης για την περίοδο 07/1958 – 05/2020.	47
Πίνακας 3. Αντιστοίχιση κλίμακας Beaufort με ταχύτητες ανέμου.....	50
Πίνακας 4. Πίνακας χρονικών περιόδων δειγματοληψιών, πλάνων δειγματοληψιών και αριθμού χρονοσειρών.	71
Πίνακας 5. Πίνακας χρονικών περιόδων και πλάνων δειγματοληψιών για τις τοποθεσίες δειγματοληψίας εντός της λιμενολεκάνης.	83
Πίνακας 6. Τιμές παραμέτρων εισαγωγής στις εξισώσεις εκτίμησης παροχής υπερπήδησης.	100
Πίνακας 7. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.....	104
Πίνακας 8. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνιση) των κυματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.....	105
Πίνακας 9. Πίνακας κοινής κατανομής $H_{1/3}$ και κύριας διεύθυνσης για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.	105
Πίνακας 10. Καταγεγραμμένα κυματικά γεγονότα με $H_{1/3} > 4.5m$ ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.....	109
Πίνακας 11. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	110
Πίνακας 12. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνιση) των κυματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	111
Πίνακας 13. Πίνακας κοινής κατανομής $H_{1/3}$ και κύριας διεύθυνσης για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	111
Πίνακας 14. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.	115
Πίνακας 15. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνιση) των κυματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.	116
Πίνακας 16. Πίνακας κοινής κατανομής $H_{1/3}$ και κύριας διεύθυνσης για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.	116
Πίνακας 17. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την συνολική κάλυψη του Κόλπου Χανίων.	119
Πίνακας 18. Μέσες τιμές φασματικών παραμέτρων μέσω Longuet-Higgins και των μετρήσεων πεδίου για τις τρεις τοποθεσίες ανοιχτά του κόλπου Χανίων.	124

Πίνακας 19. Μέσες τιμές των λόγων μέσων περιγραφικών κυματικών υψών μέσω Longuet-Higgins και των μετρήσεων πεδίου για τις τρεις τοποθεσίες ανοιχτά του κόλπου Χανίων.	126
Πίνακας 20. Μέσες τιμές των λόγων μέσων περιγραφικών κυματικών περιόδων για τις τρεις τοποθεσίες ανοιχτά του κόλπου Χανίων.....	129
Πίνακας 21. Μέσες τιμές φασματικών παραμέτρων K_α , Q_p , ν , ϵ και της στατιστικής r_{HH} για διάφορες κυματικές συνθήκες του σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.	135
Πίνακας 22. Βαθμοί ελευθερίας και διαστήματα εμπιστοσύνης για τα μέσα φάσματα κάθε τοποθεσίας.	153
Πίνακας 23. Εντοπισμός ανώτατων και κατώτατων ορίων των ιδιοπεριόδων (s) της λιμενολεκάνης για την αριθμητική προσομοίωση και τις μετρήσεις πεδίου στις τοποθεσίες πόντισης A – D.....	161

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο καθορισμός του κυματικού καθεστώτος σε μια παράκτια θαλάσσια περιοχή, αποτελεί θεμελιώδες βήμα για την επίλυση προβλημάτων που άπτονται της ακτογραμμής. Η γνώση των προσπιπτόντων κυματισμών είναι απαραίτητη καθώς αποτελούν σημαντικό παράγοντα καθορισμού της γεωμετρίας των ακτών, αλλά και του σχεδιασμού οποιωνδήποτε παράκτιων έργων. Η έκθεση στην κυματική πρόσπτωση μπορεί να έχει σημαντική επιρροή στην επιλογή τοποθεσίας για την εγκατάσταση παράκτιων κατασκευών, ενώ η εξέταση των σχεδίων και των μεθόδων κατασκευής απαιτεί λεπτομερή γνώση και κατανόηση της κυματικής δραστηριότητας καθώς και των ακραίων συνθηκών της.

Μακροχρόνιες μετρήσεις του κυματικού πεδίου σε μια συγκεκριμένη περιοχή, σε γενικές γραμμές σπανίζουν. Στην ευρύτερη περιοχή του κόλπου Χανίων, μέχρι την έναρξη της έρευνας που παρουσιάζεται σε αυτή την διατριβή, δεν υπήρχαν κυματικές μετρήσεις πεδίου. Ο καθορισμός των προσπιπτόντων κυματισμών ήταν δυνατός μόνο μέσω εκτιμήσεων από εμπειρικές μεθόδους βασιζόμενες σε ανεμολογικά δεδομένα, ή την αναζήτηση δεδομένων από αριθμητικές προσομοιώσεις πρόγνωσης που εκτελούνται από διάφορα ιδρύματα της χώρας όπως το Αστεροσκοπείο Αθηνών, η Ε.Μ.Υ και το ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.

Η παρούσα διατριβή έρχεται να καλύψει τα παραπάνω κενά. Κατ' αρχάς για πρώτη φορά καταγράφεται μέσω μετρήσεων πεδίου, το κυματικό καθεστώς του κόλπου σε βάθος χρόνου, σχεδόν δεκαετίας. Επιπλέον, η συχνότητα δειγματοληψίας που επιλέχτηκε, ανά μία ώρα, δίνει λεπτομερέστατη εικόνα της εξέλιξης των χαρακτηριστικών των κυματικών γεγονότων. Η λεπτομερής αυτή εικόνα συμπληρώνεται από τις τρεις διαφορετικές τοποθεσίες δειγματοληψίας, σε ενδιάμεσα βάθη των περίπου 20 m. Υπολογίστηκαν, μεταξύ άλλων, βασικές περιγραφικές κυματικές παράμετροι όπως το σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$, η σημαντική περίοδος $T_{1/3}$ και το μέγιστο ύψος κύματος, H_{max} , απ' ευθείας από τις καταγεγραμμένες χρονοσειρές μεταβολών ανύψωσης της στάθμης. Μέσω φασματικής ανάλυσης υπολογίστηκαν ανάλογες κυματικές παράμετροι χαρακτηρισμού του κυματικού καθεστώτος, καθώς και παράμετροι περιγραφής της φασματικής ενεργειακής πυκνότητας. Τέλος, αξιολογήθηκε η κατανομή των κυματικών υψών σε σχέση με την κατανομή Rayleigh, την πλέον εφαρμόσιμη κατανομή σε κυματικές μετρήσεις.

Πέραν της συλλογής των κυματικών δεδομένων για τον χαρακτηρισμό του κυματικού καθεστώτος του κόλπου, διερευνήθηκε και το χρόνιο πρόβλημα υπερπήδησης των θαλάσσιων κυματισμών κατά μήκος της προβλήτας του Ενετικού Λιμένα Χανίων κατά τη διάρκεια καταιγίδων. Οι κάκιστες κυματικές συνθήκες εντός του λιμένα, είναι αποτέλεσμα της άμεσης έκθεσης της εισόδου στους ΒΒΔ και Β κυματισμούς και της ελλιπούς προστασίας της. Η έκθεση

αυτή έχει ως αποτέλεσμα την διεύρυνση μακρών κυματισμών, οι οποίοι απελευθερώνονται από μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις των ανεμογενών κυματισμών στην ζώνη θραύσης. Όταν οι περίοδοι αυτών των μακρών κυματισμών συμπίπτουν με τις ιδιοπεριόδους της λιμενολεκάνης ενεργοποιείται το φαινόμενο του συντονισμού λιμένων. Κύριος στόχος στην διερεύνηση του προβλήματος ήταν η ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς του συντονισμού στις παροχές υπερπήδησης των κυματισμών κατά μήκος της προβλήτας.

Για το σκοπό αυτό ποντίστηκαν κυματομετρητές εντός της λιμενολεκάνης του Ενετικού λιμένα. Αυτοί ποντίστηκαν σε διαφορετικές τοποθεσίες προκειμένου να καταγραφούν λεπτομερώς οι κυματικές συνθήκες κατά την διάρκεια καταιγίδων. Μέσω φασματικής ανάλυσης ταυτοποιήθηκαν οι ιδιοπερίοδοι της λιμενολεκάνης στις διαφορετικές τοποθεσίες. Εντοπίστηκαν ιδιοπερίοδοι που αφορούν αποκλειστικά τις επιλεχθείσες τοποθεσίες αλλά και ιδιοπερίοδοι οι οποίες αφορούν το σύνολο της λιμενολεκάνης. Παρόλη την σημαντικότητα των μετρήσεων πεδίου στην ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων, αυτές δεν μπορούν να δώσουν εικόνα για τις ιδιομορφές στις οποίες αντιστοιχούν. Επιπλέον, λόγω της πολύπλοκης γεωμετρίας της λιμενολεκάνης του Ενετικού λιμένα, η εφαρμογή εξισώσεων καθορισμού ιδιομορφών που αφορούν απλές γεωμετρίες δεν ήταν δυνατή. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές προσομοιώσεις με τη χρήση του κώδικα COULWAVE ([P. Lynett, 2002](#)), ο οποίος εφαρμόζει εξισώσεις τύπου Boussinesq. Ως δεδομένα εισόδου στον κώδικα χρησιμοποιήθηκαν συνθήκες πρόσπτωσης αντιπροσωπευτικές των καταγεγραμμένων ανοιχτά του λιμένα ενώ η βαθυμετρία και η τοπογραφία προέκυψαν από λεπτομερή βυθομέτρηση και τοπογράφιση της ευρύτερης περιοχής. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συμφωνούν σε πολύ καλό βαθμό με τις μετρήσεις πεδίου. Σχεδόν όλες οι ιδιοπερίοδοι που ταυτοποιήθηκαν στις μετρήσεις, προέκυψαν και από τις προσομοιώσεις ενώ αποδόθηκαν και οι ιδιομορφές που αντιστοιχούν στις ιδιοπεριόδους.

Η συνεισφορά του συντονισμού στην παροχή υπερπήδησης μελετήθηκε μέσω των εμπειρικών εξισώσεων του ευρέως πλέον εφαρμόσιμου εγχειριδίου EuroTop ([EurOtop, 2018](#)). Τα κυματικά δεδομένα εισόδου στις εξισώσεις αντλήθηκαν έπειτα από ανάλυση των αριθμητικών χρονοσειρών του μοντέλου ενώ τα γεωμετρικά δεδομένα εισήχθησαν από την τοπογράφιση και βυθομέτρηση πεδίου. Η μελέτη έγινε μέσω δύο προσεγγίσεων. Η μια αφορούσε την συμβατική εφαρμογή των εξισώσεων εκτίμησης του εγχειριδίου. Η δεύτερη αποτελεί μια πρωτότυπη μέθοδο, η οποία επιχειρεί να ποσοτικοποιήσει απευθείας την συνεισφορά των μακρών ταλαντώσεων συντονισμού στις εκτιμήσεις υπερπήδησης. Απομονώνει από τους προσπίπτοντες κυματισμούς τα κυματικά χαρακτηριστικά στις υψηλότερες συχνότητες, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν μακρές ταλαντώσεις, και τα εφαρμόζει σε χρονοσειρές μακρών ταλαντώσεων πλησίον των επιλεγόμενων τοποθεσιών εκτίμησης

υπερπήδησης. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της πρωτότυπης μεθόδου οδηγεί σε αποτελέσματα τα οποία αποτυπώνουν την συνεισφορά συγκεκριμένων ιδιοπεριόδων στις παροχές υπερπήδησης κατά μήκος της προβλήτας της δυτικής λιμενολεκάνης του Ενετικού λιμένα.

Η πρώτη ενότητα αποτελεί εισαγωγικό κεφάλαιο των αντικειμένων που μελετούνται στην διατριβή. Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και μέθοδοι της ανάλυσης των θαλάσσιων κυματισμών που εφαρμόστηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του φαινόμενου συντονισμού λιμένων καθώς και η συνεισφορά των υπερβαρυτικών κυματισμών στην δημιουργία του. Στο τέλος της ενότητας παρουσιάζεται η διεργασία της υπερπήδησης των κυματισμών και η γνώση που υπάρχει σχετικά με την συνεισφορά των υπερβαρυτικών κυματισμών σε αυτήν. Η δεύτερη ενότητα αποτελεί περιγραφή της περιοχής μελέτης. Παρουσιάζεται το ανεμολογικό καθεστώς της περιοχής μέσω επεξεργασίας δεδομένων από την Ε.Μ.Υ., καθώς και πληροφορίες για τα θαλάσσια ρεύματα στον κόλπο Χανίων οι οποίες αποτελούν προϊόν επεξεργασίας δεδομένων που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Η περιγραφή του θαλάσσιου περιβάλλοντος ολοκληρώνεται με την παρουσίαση του παλιρροιακού εύρους της περιοχής και με την παρουσίαση αποτελεσμάτων μακροπρόθεσμης στατιστικής ανάλυσης του κυματικού καθετώτος στον κόλπο Χανίων. Η στατιστική ανάλυση βασίζεται σε κυματικά δεδομένα hindcasting τα οποία παραχωρήθηκαν από το ΕΛΚΕΘΕ και αφορούν χρονικό διάστημα 10 ετών (1995 – 2004). Τέλος, η ενότητα κλείνει με αναφορά στα χρόνια προβλήματα που αντιμετωπίζει ο Ενετικός λιμένας και στις προσπάθειες που έχουν γίνει για την αντιμετώπισή τους.

Η τρίτη ενότητα αφορά την μεθοδολογία των κυματικών μετρήσεων πεδίου στις τοποθεσίες ανοιχτά του κόλπου Χανίων και εντός της λιμενολεκάνης του Ενετικού λιμένα. Παρουσιάζονται τα όργανα καταγραφής, οι διάρκειες και τα πλάνα δειγματοληψιών. Περιγράφεται η διαδικασία διαλογής των δεδομένων που αναλύθηκαν, οι κυματικές παράμετροι που υπολογίστηκαν και τα κυματικά γεγονότα που επιλέχθηκαν για την μελέτη του συντονισμού και την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων του λιμένα. Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζεται περιληπτικά το αριθμητικό μοντέλο COULWAVE καθώς και οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στις προσομοιώσεις. Η πέμπτη ενότητα αφορά την εκτίμηση των παροχών υπερπήδησης. Παρουσιάζονται οι εμπειρικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν και η μεθοδολογία διαλογής και εφαρμογής τους. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται και η πρωτότυπη μεθοδολογία που εφαρμόζεται στην διατριβή, για την ποσοτικοποίηση της συνεισφοράς των υπερβαρυτικών ταλαντώσεων στην υπερπήδηση κυματισμών κατά μήκος της προβλήτας της δυτικής λιμενολεκάνης του Ενετικού λιμένα.

Η έκτη ενότητα αφορά τα αποτελέσματα. Περιγράφεται αναλυτικά το κυματικό καθεστώς στον κόλπο Χανίων καθώς επίσης και τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των κυματικών παραμέτρων. Ταυτοποιούνται οι ιδιοπερίοδοι της λιμενολεκάνης από τις μετρήσεις πεδίου εντός λιμένα και δίνεται εικόνα της κατάστασής του κατά τη διάρκεια επιλεγμένων καταιγίδων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται σχετικά με τις ιδιοπεριόδους αλλά και τις ιδιομορφές στις οποίες αντιστοιχούν. Μέσω των ίδιων προσομοιώσεων αναλύεται η συνεισφορά του συντονισμού στις παροχές υπερπήδησης. Στην έβδομη ενότητα συζητώνται τα αποτελέσματα.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Η θαλάσσια επιφάνεια αποτελεί συνήθως έναν συνδυασμό κυματικών συνιστωσών. Οι συνιστώσες αυτές έχουν ως γενεσιουργό αιτία τον άνεμο είτε σε τοπική κλίμακα είτε σε πιο απομακρυσμένες περιοχές από αυτές στις οποίες πραγματοποιούνται παρατηρήσεις. Παρατηρώντας καταγραφές της μεταβολής της θαλάσσιας επιφάνειας σε σταθερό σημείο, διαπιστώνει κανείς ότι οι μεταβολές αυτές αντιπροσωπεύουν ένα μη επαναλαμβανόμενο προφίλ ακανόνιστων και τυχαίων κυματισμών. Ο όρος *τυχαίοι ακανόνιστοι κυματισμοί* (*random irregular waves*) χρησιμοποιείται για να δηλώσει την φυσική κατάσταση της θάλασσας, στις οποίες οι κυματισμοί ακολουθούν μια στατιστική μεταβλητότητα ([US Army Corps Of Engineers, 2002](#)).

Ο χαρακτηρισμός του κυματικού πεδίου μιας περιοχής προκύπτει μέσω στατιστικής επεξεργασίας των καταγραφών της θαλάσσιας επιφάνειας. Οι καταγραφές αυτές αποτυπώνουν βραχείς κυματισμούς (*short waves*) των οποίων η περίοδος δεν ξεπερνάει τα 25s. Γενεσιουργός αιτία των βραχέων κυματισμών είναι ο άνεμος που πνέει πάνω από την θαλάσσια επιφάνεια, και αποτελούν τον πιο σημαντικό παράγοντα στην διαμόρφωση της παράκτιας μορφολογίας.

Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, i) τα κύματα ανέμου (*wind waves*) ή αλλιώς και κύματα καταιγίδας. Δημιουργούνται και αναπτύσσονται από τοπικούς ανέμους. Έχουν σχετικά απότομη κλίση, χαρακτηρίζονται από εύρος υψών και περιόδων και είναι συνήθως ακανόνιστα και πολλαπλών διευθύνσεων. Επίσης οι κορυφές τους δεν ξεπερνούν σε έκταση το ένα ή δύο μήκη κύματος και γι' αυτό αναφέρονται ως βραχύ-κορφα (*short crested*). Τέλος, παίζουν σημαντικό ρόλο στην διάβρωση των ακτών. ii) τα κύματα ρεστίας (*swell waves*). Είναι κύματα τα οποία έχουν δημιουργηθεί από ανέμους σε απομακρυσμένες τοποθεσίες στην ανοιχτή θάλασσα, και ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις σε βαθιά νερά μακριά από το σημείο γένεσης. Είναι μακρείς κυματισμοί μεγάλων περιόδων με περισσότερη ομοιομορφία σε ύψος, περίοδο και διεύθυνση ενώ παρουσιάζουν και ήπια κλίση. Λόγω της ήπιας κλίσης τους, οι κορυφές τους είναι ευδιάκριτες και μακρές σε μήκος, λόγοι για τους οποίους αναφέρονται ως μακρύ-κορφοί (*long-crested*) κυματισμοί. Σε αντίθεση με τους κυματισμούς ανέμου, συμβάλλουν στην πρόσχωση ιζημάτων στις ακτές ([Magnor, 2020; US Army Corps Of Engineers, 2002](#)). Το κυματικό καθεστώς σε μια περιοχή μπορεί να αποτελείται μόνο από κυματισμούς ανέμων ή μόνο από ρεστίες ή από συνδυασμό και των δύο.

1.1.1 Αναγκαίες υποθέσεις για την στατιστική ανάλυση χρονοσειρών ανύψωσης στάθμης

Ο ακριβής καθορισμός του κυματικού καθεστώτος σε μια περιοχή μπορεί να γίνει μόνο μέσω μετρήσεων πεδίου. Αυτές γίνονται μέσω συσκευών καταγραφής των μεταβολών της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας. Οι καταγραφές πραγματοποιούνται ψηφιακά σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα και είναι πεπερασμένης χρονικής διάρκειας.

Στην **Εικόνα 1** δίνεται μια χρονοσειρά καταγραφών ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας από τον κόλπο Χανίων διάρκειας 20min (1200s) και συχνότητα δειγματοληψίας 2Hz (0.5s). Σε αυτήν διακρίνεται η τυχαιότητα των μεταβολών της στάθμης. Το προφίλ των τυχαίων κυματισμών που προέρχεται από ένα σταθερό σημείο περιγράφεται από την σχέση

$$\eta(x_0, y_0, t) = \eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (1.1)$$

μέσω της οποίας οι τυχαίοι κυματισμοί παρουσιάζονται ως μια υπέρθεση άπειρων κυματισμών μικρού πλάτους με διαφορετικές συχνότητες διάδοσης. η είναι η ανύψωση της στάθμης της θαλάσσιας επιφάνειας πάνω από τη μέση στάθμη στο σημείο x_0 , a_n είναι το πλάτος κύματος, φ_n η φάση για κάθε συχνότητα f_n και t είναι ο χρόνος.

Οι χρονοσειρές που προκύπτουν από τις καταγραφές αναλύονται στατιστικά προκειμένου να εξαχθούν στατιστικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν το κυματικό πεδίο. Η ανάλυση που γίνεται στην χρονική κλίμακα χρονοσειρών αναφέρεται ως βραχυχρόνια ανάλυση (short term analysis), και προκειμένου αυτή να γίνει χρειάζονται συγκεκριμένες υποθέσεις που αφορούν τις μεταβολές της η .

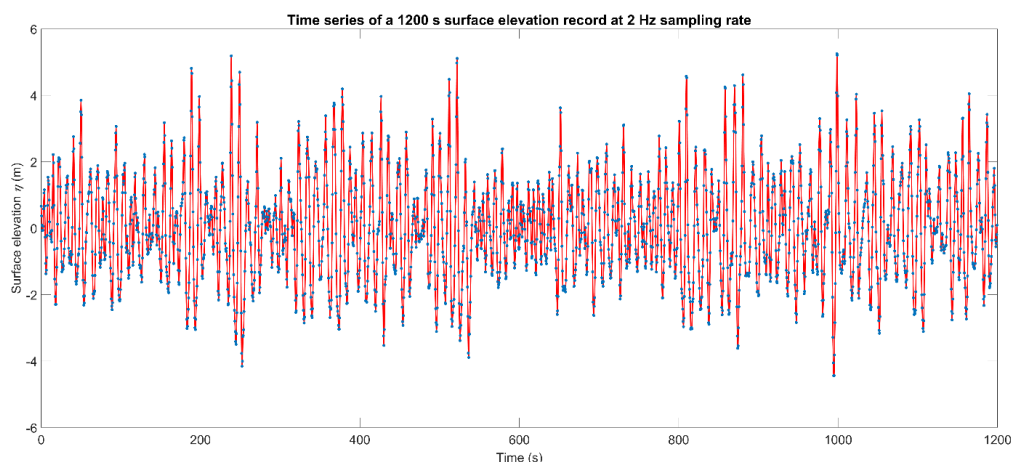
Από την αναπαράσταση των τυχαίων κυματισμών μέσω της εξίσωσης **(1.1)** υποδηλώνεται ότι το προφίλ των κυματισμών της η μπορεί να εκφραστεί ως μια στοχαστική διεργασία, η οποία όμως πρέπει να ικανοποιεί τρεις συνθήκες: της σταθερότητας, της εργοδικότητας και να αποτελεί μια Γκαουσιανή (Gaussian) διεργασία ([Goda, 2010](#)).

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε άπειρο αριθμό χρονοσειρών μεταβολής ανύψωσης στάθμης $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots$, όλες διαφορετικών προφίλ, αλλά ανήκουν στο ίδιο κυματικό πεδίο έχοντας ίδιο σημαντικό ύψος κύματος και περίοδο. Η έκφρασή αυτών των προφίλ, ως στοχαστική διεργασία, δίνεται από το σύνολο

$$\eta(t) = \{\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_j(t), \dots\}. \quad (1.2)$$

Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι η πυκνότητα πιθανότητας του προφίλ η δεν αντιστοιχεί μόνο σε μια χρονοσειρά $\eta_j(t)$ αλλά σε όλο το σύνολο σε συγκεκριμένο χρόνο t . Δηλαδή, οι

στατιστικές ιδιότητες μιας χρονοσειράς τυχαίων κυματισμών μπορούν να εξαχθούν από ένα σύνολο χρονοσειρών, αλλά όχι από μία μεμονωμένη.



Εικόνα 1. Χρονοσειρά ανύψωσης στάθμης της θάλασσας ανοιχτά του Ενετικού λιμένα συνολικής διάρκειας 1200 s και βήματος δειγματοληψίας 2 Hz (1 s).

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε άπειρο αριθμό χρονοσειρών μεταβολής ανύψωσης στάθμης $\eta_1(t), \eta_2(t), \dots$, όλες διαφορετικών προφίλ, αλλά ανήκουν στο ίδιο κυματικό πεδίο έχοντας ίδιο σημαντικό ύψος κύματος και περίοδο. Η έκφρασή αυτών των προφίλ, ως στοχαστική διεργασία, δίνεται από το σύνολο

$$\eta(t) = \{\eta_1(t), \eta_2(t), \dots, \eta_j(t), \dots\}. \quad (1.3)$$

Επιπλέον, γίνεται η υπόθεση ότι η πυκνότητα πιθανότητας του προφίλ η δεν αντιστοιχεί μόνο σε μια χρονοσειρά $\eta_j(t)$ αλλά σε όλο το σύνολο σε συγκεκριμένο χρόνο t . Δηλαδή, οι στατιστικές ιδιότητες μιας χρονοσειράς τυχαίων κυματισμών μπορούν να εξαχθούν από ένα σύνολο χρονοσειρών, αλλά όχι από μία μεμονωμένη.

Η πρώτη συνθήκη της σταθερότητας, αναφέρεται στην ιδιότητα ότι όλες οι μέσες στατιστικές ιδιότητες του συνόλου (π.χ. μέση τιμή του συνόλου, τυπική απόκλιση του συνόλου, ασυμμετρία (*skewness*) και κύρτωση (*kurtosis*) μεταξύ άλλων) παραμένουν αμετάβλητες στον χρόνο. Στην περίπτωση που μόνο η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση παραμένουν αμετάβλητες, αναφερόμαστε σε μια ασθενώς σταθερή στοχαστική διεργασία. Η υπόθεση της σταθερότητας είναι απαραίτητη για τον καθορισμό μιας πυκνότητας πιθανοτήτων για τους κυματισμούς. Η πυκνότητα πιθανότητας μπορεί να επιτευχθεί θεωρώντας τις $\eta_1(t), \eta_2(t), \eta_3(t), \dots$, ως μεταβλητές ανεξάρτητες του χρόνου t . Εάν επιπλέον η $\eta(t)$ μπορεί να μετρηθεί σε διαφορετικές τοποθεσίες και οι ιδιότητές της δεν εξαρτώνται από την τοποθεσία των μετρήσεων, τότε η διεργασία μπορεί να θεωρηθεί και ομογενής. Η $\eta(t)$ μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και ομογενής μόνο για

περιορισμένο χρόνο στην τοποθεσία μέτρησης. Τα κύματα ανέμου μπορούν να θεωρηθούν σε μερικώς σταθερή κατάσταση μόνο για λίγες ώρες, τρεις ώρες ή λιγότερο, καθώς για περισσότερες οι ιδιότητές τους αναμένεται να μεταβληθούν (*US Army Corps Of Engineers, 2002*).

Η δεύτερη συνθήκη της εργοδικότητας, αναφέρεται στην ιδιότητα ότι οι μέσες στατιστικές παράμετροι μιας συγκεκριμένης χρονοσειράς είναι ίσες με αυτές του συνόλου. Για παράδειγμα, η μέση τιμή των ανυψώσεων στάθμης μιας χρονοσειράς είναι ίση με την μέση τιμή ανυψώσεων του συνόλου. Η έννοια της εργοδικότητας επιτρέπει την χρήση της στατιστικής πληροφορίας από μία μόνο χρονοσειρά, χωρίς να είναι αναγκαία η καταγραφή σε διαφορετικές τοποθεσίες (*US Army Corps Of Engineers, 2002*). Μια στοχαστική διεργασία που είναι εργοδική χαρακτηρίζεται πάντα και από σταθερότητα, αλλά το αντίστροφο δεν ισχύει πάντα. Παρόλα αυτά, εάν η πυκνότητα πιθανότητας της χρονοσειράς περιγράφεται από *Gaussian* κατανομή και η διεργασία δεν περιέχει περιοδικές σχέσεις συγκεκριμένων περιόδων (π.χ. απουσία συνιστωσών κανονικών κυματισμών), τότε η διεργασία χαρακτηρίζεται από σταθερότητα και εργοδικότητα. Η φασματική ανάλυση των χρονοσειρών που παρουσιάζεται στην ενότητα **1.1.4** βασίζεται στην υπόθεση της εργοδικότητας (*Goda, 2010*).

Η τρίτη συνθήκη της *Gaussian* διεργασίας, αναφέρεται στην ιδιότητα ότι η πυκνότητα πιθανότητας ενός κυματικού προφίλ που μπορεί να πάρει μια τιμή μεταξύ η και $\eta+dh$ σε συγκεκριμένο χρόνο, αντιπροσωπεύεται από μια κατανομή Gauss (κανονική κατανομή).

Η δυνατότητα εφαρμογής των τριών παραπάνω υποθέσεων δεν έχει επαληθευτεί αυστηρά όσον αφορά τους τυχαίους θαλάσσιους κυματισμούς. Καταρχάς είναι αδύνατο να υπάρξει ένα πραγματικό σύνολο κυματικών χρονοσειρών για μια καθορισμένη θαλάσσια κατάσταση, γιατί απλά η κατάσταση της θάλασσας είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη στον χρόνο και στο χώρο. Συνεπώς, η σταθερότητα όπως και η εργοδικότητα ποτέ δεν θα μπορέσουν να επαληθευτούν για τους θαλάσσιους κυματισμούς (*Goda, 2010*).

Δύναται καταρχήν να συλλεχθεί ένα σύνολο στοχαστικής διεργασίας παίρνοντας μια χρονοσειρά μακράς διάρκειας, αλλά δεν μπορούμε να αναμένουμε σταθερότητα σε αυτήν καθώς γνωρίζουμε ότι στατιστικές παράμετροι όπως το σημαντικό ύψος κύματος μεταβάλλονται σε σχέση με τον χρόνο. Μπορούμε όμως να θεωρήσουμε κάποια σταθερότητα της θαλάσσιας κατάστασης για μια μικρή χρονική περίοδο ορισμένων λεπτών ή δεκάδων λεπτών κι έτσι να υποθέσουμε την συνθήκη της σταθερότητας για τέτοιας διάρκειας χρονοσειρές. Όσον αφορά την εργοδικότητα, υποθέτουμε ότι αυτή ισχύει για τους θαλάσσιους κυματισμούς καθώς δεν υπάρχουν αποδείξεις ή κάποιος λόγος ώστε να πιστεύουμε ότι δεν ισχύει (*Goda, 2010*).

Η υπόθεση της κατανομής Gauss για το κυματικό προφίλ είναι γνωστό ότι δεν είναι εφαρμόσιμη, καθώς η κατανομή των τιμών ανύψωσης της στάθμης αποκλίνει από αυτήν (Goda, 2010). Η απόκλιση αυτή είναι ακόμα εντονότερη στα ρηχά νερά. Παρόλα αυτά, εφόσον η υπόθεση αυτή είναι απαραίτητη για την ανάλυση των τυχαίων κυματισμών σε συνιστώσες κυματισμών που υπερθέτονται γραμμικά, σκοπίμως εφαρμόζεται προκειμένου να προχωρήσουμε στις διάφορες στατιστικές θεωρίες για την ανάλυση των θαλάσσιων κυματισμών.

1.1.2 Εφαρμογή κατανομής πιθανοτήτων Rayleigh στους θαλάσσιους κυματισμούς

Προκειμένου να είναι αποτελεσματική η εφαρμογή των τυχαίων κυματισμών στον σχεδιασμό παράκτιων έργων, οι ιδιότητες των μεμονωμένων κυματικών χρονοσειρών θα πρέπει να ακολουθούν κάποιους νόμους πιθανοτήτων. Έτσι οι περιγραφικές στατιστικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τους κυματισμούς θα μπορούν να εξάγονται άμεσα μέσω κατάλληλης ανάλυσης (US Army Corps Of Engineers, 2002). Η κατανομή πιθανοτήτων που παρουσιάζεται παρακάτω, αφορά την μαθηματική έκφραση του προφίλ τυχαίων κυματισμών όπως αυτό δίνεται από την σχέση 1.1.

Ο Longuet-Higgins (1952) διαπίστωσε ότι τα πλάτη καθώς και τα ύψη των μεμονωμένων κυματισμών ακολουθούν την κατανομή Rayleigh. Βασική υπόθεση εφαρμογής αυτής της κατανομής είναι ότι η ενέργεια του κυματικού φάσματος περιορίζεται σε στενό εύρος συχνοτήτων (narrow-band spectrum) με τα μέγιστα του κυματικού προφίλ να αντιστοιχούν στις κορυφές των κυματισμών και τα ελάχιστα στις κοιλίες (Goda, 2010; Longuet-Higgins, 1952, 1975, 1983; US Army Corps Of Engineers, 2002). Υπό αυτές τις συνθήκες, η σχέση κατανομής πιθανοτήτων Rayleigh για τα ύψη των κυματισμών δίνεται από

$$p(H) = \frac{H}{4m_0} \exp\left[-\frac{H^2}{8m_0}\right], \quad (1.4)$$

όπου H το ύψος κύματος και m_0 η φασματική ροπή ίση με την διακύμανση της η ($m_0 = \overline{\eta^2}$).

Υπολογίζοντας αρχικά το μέσο ύψος και το μέσο τετραγωνικό ύψος από τις σχέσεις

$$\overline{H} = \sqrt{2\pi m_0} \quad (1.5)$$

$$H_{rms}^2 = 8m_0, \quad (1.6)$$

η κατανομή μπορεί να εκφραστεί σε γενική μορφή ως

$$p(x) = 2a^2 x \exp[-a^2 x^2], \quad (1.7)$$

όπου

$x = H / H^* : H^*$ είναι το ύψος κύματος αναφοράς και

$$a = \frac{H_*}{\sqrt{8m_0}} = \begin{cases} 1/2\sqrt{2} : H_* = \sqrt{m_0} = \eta_{rms}, \\ \sqrt{\pi}/2 : H_* = \bar{H}, \\ 1 : H_* = H_{rms}, \\ 1.416 : H_* = H_{1/3}, \end{cases} \quad (1.8)$$

Η πιθανότητα υπέρβασης $P(x)$ δίνεται από

$$P(x) = \exp[-a^2 x^2], \quad (1.9)$$

Στον παράκτιο σχεδιασμό έργων γίνεται συνήθως χρήση κυματικών παραμέτρων οι οποίες αναφέρονται στον μέσο όρο των υψηλότερων I/N κυματισμών. Ο λόγος x_N , ο οποίος έχει την πιθανότητα υπέρβασης $P(x_N) = 1/N$ υπολογίζεται από

$$\exp[-a^2 x_N^2] = 1/N, \quad \text{ή} \quad x_N = \frac{1}{a} \sqrt{\ln N} \quad (1.10)$$

Η μέση τιμή των υψηλότερων I/N κυματισμών, $x_{1/N}$, υπολογίζεται από

$$x_{1/N} = x_N + \frac{N}{a} \text{Erfc}[ax_N], \quad (1.11)$$

όπου Erfc είναι η συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος. Κατόπιν σχετικής επεξεργασίας της, μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω προσεγγιστική σχέση με σφάλμα περίπου 0.6% για $N=10$ (Goda, 2010),

$$x_{1/N} \simeq x_N + \frac{1}{2a\sqrt{\ln N}} \left\{ 1 - \frac{1}{4 \ln N} \right\}, \quad (1.12)$$

Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης (1.11) οδηγεί στις σχέσεις μεταξύ των κυριότερων μέσων κυματικών παραμέτρων ύψους που εφαρμόζονται στον σχεδιασμό έργων, (Goda, 2010),

$$\begin{aligned} H_{1/3} &= 4.004\sqrt{m_0} = 1.416H_{rms} = 1.597\bar{H} \\ H_{1/10} &= 5.090\sqrt{m_0} = 1.800H_{rms} = 2.031\bar{H} \\ H_{1/50} &= 6.2410\sqrt{m_0} = 2.207H_{rms} = 2.490\bar{H} \\ H_{1/100} &= 6.673\sqrt{m_0} = 2.359H_{rms} = 2.662\bar{H} \end{aligned} \quad (1.13)$$

Μέσω της Rayleigh μπορεί επίσης να εξαχθεί συσχέτιση και για το μέγιστο ύψος κύματος H_{max} σε σχέση με τις παραπάνω μέσες στατιστικές παραμέτρους. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι, ενώ διαφορετικές χρονοσειρές μπορεί να δίνουν το ίδιο $H_{1/3}$, το H_{max} σε αυτές παίρνει διαφορετικές τιμές γιατί αναφέρεται στο ύψος ενός κύματος το οποίο συμβαίνει να έχει την μέγιστη τιμή σε μια χρονοσειρά. Έτσι λοιπόν, ενώ είναι δύσκολο να ορίσουμε ντετερμινιστικά

συγκεκριμένο H_{max} για μια συγκεκριμένη κατάσταση καταιγίδας βάση της Rayleigh κατανομής, μπορούμε να ορίσουμε μια πυκνότητα πιθανότητας για τον λόγο μεταξύ μέσων παραμέτρων στους οποίους συμπεριλαμβάνεται το H_{max} (Goda, 2010).

Θεωρούμε N_0 αριθμό κυματικών υψών από ένα πληθυσμό κυματικών υψών ο οποίος ακολουθεί την κατανομή Rayleigh, και δηλώνουμε την μέγιστη τιμή μεταξύ των N_0 υψών ως x_{max} (σε αδιάστατη μορφή). Η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας για x_{max} δίνεται από,

$$p(x_{max}) = 2a^2 x_{max} \xi e^{-\xi}, \quad (1.14)$$

όπου

$$\xi = N_0 P(x_{max}) = N_0 \exp[-a^2 x_{max}^2], \quad (1.15)$$

Βάση των δύο παραπάνω σχέσεων καταλήγουμε στην πιο πιθανή τιμή για το x_{max} μέσω της σχέσης

$$x_{max} \simeq \frac{1}{a} \sqrt{\ln N_0}, \quad (1.16)$$

Μπορούμε επίσης να ορίσουμε την ποσότητα $(x_{max})_\mu$ της με πιθανότητα υπέρβασης μ ,

$$(x_{max})_\mu \simeq \frac{1}{a} \sqrt{\ln \left[\frac{N_0}{\ln(1/(1-\mu))} \right]}, \quad (1.17)$$

Για παράδειγμα, για την πιο πιθανή τιμή του H_{max} μέσω του λόγου $H_{max}/H_{1/3}$ έχουμε από την εξίσωση (1.8), $\alpha=1.416$ για $H^*=H_{1/3}$ και προκύπτει,

$$H_{max}/H_{1/3} \simeq 0.706 \sqrt{\ln N_0}, \quad (1.18)$$

ενώ για $(H_{max})_\mu$ με $\mu=0.01$ έχουμε

$$(H_{max})_\mu/H_{1/3} \simeq 0.706 \sqrt{\ln \left[\frac{N_0}{0.01005} \right]}, \quad (1.19)$$

Οι εκτιμήσεις βάση των παραπάνω σχέσεων για το H_{max} σε σχέση με το $H_{1/3}$, πέφτουν συνήθως εντός του εύρους $H_{max} = (1.6 \sim 2.0)H_{1/3}$ (Goda, 2010).

Η κατανομή Rayleigh, κατά γενική ομολογία, βρίσκει εφαρμογή σε πολύ καλό βαθμό στην κατανομή των κυματικών μετρήσεων πεδίου (Rattanapitikon, 2010; US Army Corps Of Engineers, 2002). Η εφαρμογή είναι καλύτερη σε μετρήσεις κυματισμών βαθιών υδάτων στους οποίους είναι πιθανότερο η κατανομή του ενεργειακού φάσματος να περιορίζεται σε ένα στενό εύρος συχνοτήτων. Παρόλα αυτά έχει παρατηρηθεί ότι ανταποκρίνεται σε καλό βαθμό ακόμα και σε περιπτώσεις που παρουσιάζεται μεγαλύτερη ευρύτητα στην κατανομή της φασματικής

ενέργειας (Caires & Gent, 2012; US Army Corps Of Engineers, 2002). Η επιρροή του εύρους του ενεργειακού φάσματος στην κατανομή των κυματικών υψών έχει μελετηθεί θεωρητικά κατά το παρελθόν (M. A. Tayfun, 1983), ενώ άλλες έρευνες έχουν ποσοτικοποιήσει την επιρροή αυτή μέσω παραμέτρου του σχήματος του φάσματος (βλ. παράμετρος κ , ενότητα 3.1.4.β) και έχουν καταλήξει στη συσχέτιση μεταξύ των δύο (Forristall, 1984; Goda & Kudaka, 2007; Naess, 1985). Η σημαντικότητα της επιρροής αυτής συνεχίζει να επιβεβαιώνεται για διάφορα βάθη και κυματικές συνθήκες σε πρόσφατες έρευνες (Karmpadakis et al., 2020).

Πέραν των βαθέων υδάτων, η φασματική ενέργεια είναι γνωστό ότι διασπείρεται σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων κατά τη διάδοση των κυματισμών προς ενδιάμεσα και ρηχά νερά (Battjes & Groenendijk, 1998, 2000; Thornton & Guza, 1983). Ενώ ορισμένες έρευνες έχουν καταλήξει ότι κατά την διάδοση σε αυτά τα βάθη, η κατανομή των κυματισμών δεν αποκλίνει ιδιαίτερα από την κατανομή Rayleigh (Rattanapitikon, 2010; Thornton & Guza, 1983), άλλες κατέληξαν σε σημαντική απόκλιση μεταξύ των δύο προτείνοντας άλλες προσεγγίσεις κατανομών (Battjes & Groenendijk, 2000; Dally, 1990; Mendez et al., 2004; Wu et al., 2016).

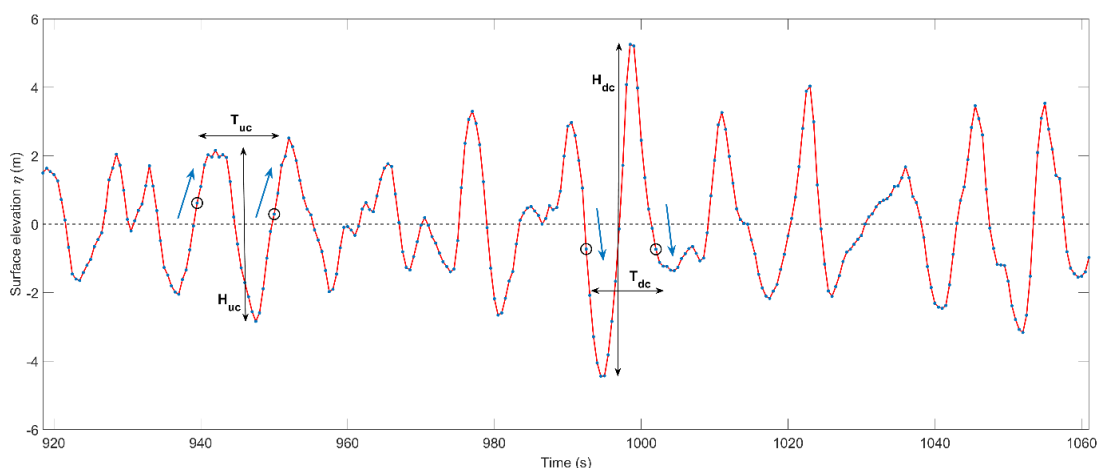
Η Rayleigh συνεπώς, δεν είναι η μόνη κατανομή που έχει μελετηθεί για τους θαλάσσιους κυματισμούς. Κατά καιρούς, έπειτα από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου ή εργαστηρίου, έχουν προταθεί είτε τροποποιήσεις της Rayleigh είτε άλλες όπως η Weibull (και τροποποιήσεις της). Κοινός παρονομαστής όλων αυτών των ερευνών είναι ότι καμία προσέγγιση δεν μπορεί να εφαρμοστεί με ακρίβεια σε εκτεταμένα σείτ δεδομένων και ιδιαίτερα όταν αυτά αντιπροσωπεύουν διαφορετικές περιοχές. Για μια πιο λεπτομερή εικόνα των κατανομών που εφαρμόζονται και των αποτελεσμάτων τους, ο αναγνώστης παραπέμπεται μεταξύ άλλων στις εργασίες των (Casas-Prat & Holthuijsen, 2010; Karmpadakis et al., 2020; Rattanapitikon, 2010; Y. Wu et al., 2016).

1.1.3 Ανάλυση κυματισμών στο πεδίο χρόνου (Time Domain Analysis)

Μια προσέγγιση υπολογισμού των αντιπροσωπευτικών κυματικών παραμέτρων είναι η ανάλυση στο πεδίο του χρόνου. Σε αυτήν οι παράμετροι υπολογίζονται απ'ευθείας από τις καταγεγραμμένες μεταβολές ανύψωσης της θαλάσσιας στάθμης. Οι μεταβολές χωρίζονται σε τμήματα τα οποία στην συνέχεια θεωρούνται ως μοναδικά κύματα. Η διαδικασία που έχει καθιερωθεί για τον ορισμό των κυματισμών, είναι αυτή της μηδενικής διαβάσεως από την μέση στάθμη, η οποία έχει οριστεί προηγουμένως στο μηδέν (zero-crossing method). Η μέθοδος της μηδενικής διαβάσεως χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες. Της 'μηδενικής προς τα άνω

διαβάσεως' (zero-upcrossing method) και της ' μηδενικής προς τα κάτω διαβάσεως' (zero-down crossing method).

Η μεθοδολογία έχει ως εξής: Διακρίνεται το πρώτο σημείο όπου το προφίλ της επιφάνειας έχει διασχίσει την γραμμή του μηδέν προς τα πάνω (zero-upcrossing) ή προς τα κάτω (zero-downcrossing). Αυτό το σημείο θεωρείται η αρχή ενός κύματος. Συνεχίζοντας ξαναβρίσκεται το επόμενο σημείο του προφίλ που έχει διασχίσει την γραμμή του μηδέν προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Το σημείο αυτό σηματοδοτεί το τέρμα του ενός κύματος και την αρχή του επόμενου. Η χρονική διάρκεια που μεσολαβεί μεταξύ αυτών των δύο σημείων είναι η περίοδος του συγκεκριμένου κύματος. Η κάθετη απόσταση μεταξύ του υψηλότερου και χαμηλότερου σημείου μεταξύ των παρακείμενων zero-crossing σημείων ορίζεται ως το ύψος του κύματος (**Εικόνα 2**). Η κύρια διαφορά μεταξύ των μεθόδων είναι στο πως ορίζουν το κύμα. Στην προς τα πάνω διαβάσεως ορίζεται μεταξύ της κορυφής και της επόμενης κοιλίας, ενώ στην προς τα κάτω διαβάσεως μεταξύ της κορυφής και της προηγούμενης κοιλίας.



Εικόνα 2. Λεπτομέρεια της χρονοσειράς της Εικόνας 1 και ορισμοί κυματικών παραμέτρων των μεθόδων των μηδενικών διαβάσεων. Σε κύκλους τα σημεία μεταξύ των οποίων ορίζονται οι παράμετροι ύψους και περιόδου. H_{uc} και T_{uc} ύψος και περίοδος κύματος με τη μέθοδο των άνω μηδενικών διαβάσεων, H_{dc} και T_{dc} ύψος και περίοδος κύματος με τη μέθοδο των κάτω μηδενικών διαβάσεων.

Και οι δύο μέθοδοι δίνουν πολύ κοντινά αποτελέσματα όσον αφορά τις μέσες τιμές των κυματικών χαρακτηριστικών. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος που προτιμάται είναι της προς τα κάτω διαβάσεως ([IAHR, 1989](#)). Ένας λόγος είναι ότι ορίζει το κύμα όπως και η οπτική παρατήρηση, όπου το ύψος του κύματος ορίζεται από το ύψος της κορυφής σε σχέση με την κοιλία που προπορεύεται ([Prat, 2008](#)). Επιπλέον, ο ορισμός της περιλαμβάνει ουσιαστικά το μέτωπο του κύματος το οποίο προσκρούει στις ακτές και στις παράκτιες κατασκευές ενώ συγχρόνως συνδέεται άμεσα και με την διεργασία της θραύσης αλλά και τους ακραίους κυματισμούς ([US Army Corps Of Engineers, 2002](#)).

Για τους παραπάνω λόγους, σε αυτή την εργασία επιλέχτηκε η μεθοδολογία της προς τα κάτω διαβάσεως για την εξαγωγή των κυματικών παραμέτρων. Αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα **3.1.4.α**.

1.1.4 Ανάλυση κυματισμών στο πεδίο των συχνοτήτων – Φασματική ανάλυση (Frequency domain analysis – Spectral analysis)

Σε ένα σταθερό σημείο, η φασματική ανάλυση εξετάζει την χρονοσειρά ως την διακύμανση της επιφάνειας από την μέση τιμή της και αναγνωρίζει ότι η διακύμανση αυτή χαρακτηρίζεται από διάφορες περιοδικότητες. Σε αντίθεση με την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου η οποία ορίζει απευθείας από την χρονοσειρά τα μεμονωμένα κύματα, η φασματική ανάλυση ορίζει την κατανομή της διακύμανσης της επιφάνειας σε σχέση με την συχνότητα της καταγραφής (*US Army Corps Of Engineers, 2002*). Η κατανομή της διακύμανσης σε σχέση με την συχνότητα ορίζεται μέσω της συνάρτησης $S(f)$, με την προϋπόθεση ότι αυτή είναι συνεχής, καθώς στην πραγματικότητα οι μετρήσεις λαμβάνονται ανά τακτά χρονιά διαστήματα. Η φασματική ανάλυση δίνει επίσης την δυνατότητα προσέγγισης των κυματισμών ως επιφάνεια, η οποία αντιπροσωπεύει την διακύμανση αυτής από την μέση τιμή της ως περιοδική στο χρόνο και το χώρο. Ορίζεται μέσω της συνάρτησης $S(f, \theta)$, η οποία παρουσιάζει τον τρόπο που κατανέμεται η διακύμανση στην συχνότητα f και διεύθυνση θ .

Το κύριο πλεονέκτημα της φασματικής ανάλυσης των κυματισμών έναντι της ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου, είναι ότι δείχνει σε ποιες συχνότητες συγκεντρώνεται σημαντικό ποσοστό της ενέργειας, και προς τα πού η ενέργεια αυτή κατευθύνεται. Μειονέκτημα της αποτελεί το γεγονός ότι δεν συμπεριλαμβάνει την πληροφορία των μεμονωμένων κυματισμών.

Όπως προαναφέρθηκε στην ενότητα **1.1.1**, η εφαρμογή της ανάλυσης στο πεδίο των συχνοτήτων βασίζεται στην υπόθεση της σταθερότητας και της εργοδικότητας των μεταβολών της θαλάσσιας επιφάνειας. Ο μετασχηματισμός μιας χρονοσειράς από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων γίνεται μέσω της μεθόδου του ταχέως μετασχηματισμού Fourier (FFT, Fast Fourier Transforms) (*Cooley & Tukey, 1965; Newland, 1975*).

Οι μεταβολές της ανύψωσης της στάθμης, η , σε ένα σταθερό σημείο μπορούν να παρουσιαστούν ως ένα άθροισμα γραμμικών κυματισμών όπως αυτό της εξίσωσης (**1.1**). Μέσω αυτής προσδιορίζεται το φάσμα συχνοτήτων $S(f)$, ως το άθροισμα των τετραγώνων των κυματικών πλατών σε ένα διάστημα από f έως $f + df$, το οποίο είναι πεπερασμένο και μοναδικό. Η τιμή του φάσματος ορίζεται από την σχέση:

$$S(f)df = \sum_f^{f+df} \frac{1}{2} a_n^2 \quad (1.20)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι θεμελιώδους σημασίας για τη ανάλυση του φάσματος συχνοτήτων ενός σημειακού ακανόνιστου κυματικού προφίλ και ορίζει την συνάρτηση φασματικής πυκνότητας. Παρόλα αυτά δεν είναι εφαρμόσιμη σε πρακτικούς υπολογισμούς, καθώς περιέχει άπειρο αριθμό πλατών a_n των κυματικών συνιστωσών.

Για το λόγο αυτό θεωρούμε μια πεπερασμένη χρονοσειρά η οποία δίνεται στη διαδοχική μορφή N διακριτών σημείων $\eta(\Delta t)$, $\eta(2\Delta t)$, ..., $\eta(N\Delta t)$, που λαμβάνονται σε σταθερά διαστήματα Δt , και εκτιμούμε την σχετική συνάρτηση φασματικής πυκνότητας. Προς απλοποίηση το N θεωρείται ζυγός αριθμός. Μέσω αρμονικής ανάλυσης, η χρονοσειρά $\eta(t)$ εκφράζεται ως η παρακάτω πεπερασμένη σειρά Fourier,

$$\eta(t_*) = \frac{A_0}{2} + \sum_{k=1}^{N/2-1} \left(A_k \cos \frac{2\pi k}{N} t_* + B_k \sin \frac{2\pi k}{N} t_* \right) + \frac{A_{N/2}}{2} \cos \pi t_*, \quad (1.21)$$

όπου

$$\begin{aligned} t_* &= t/\Delta t : t_* = 1, 2, \dots, N \\ f_k &= k/(N\Delta t) = k/t_0 \end{aligned} \quad (1.22)$$

και t_0 είναι η συνολική διάρκεια της χρονοσειράς.

Η παραπάνω εξίσωση δίνει τις ίδιες ανυψώσεις επιφάνειας με αυτές του αρχικού προφίλ $\eta(N\Delta t)$ στα χρονικά σημεία $t_* = 1, 2, \dots, N$ με τους συντελεστές Fourier να δίνονται από

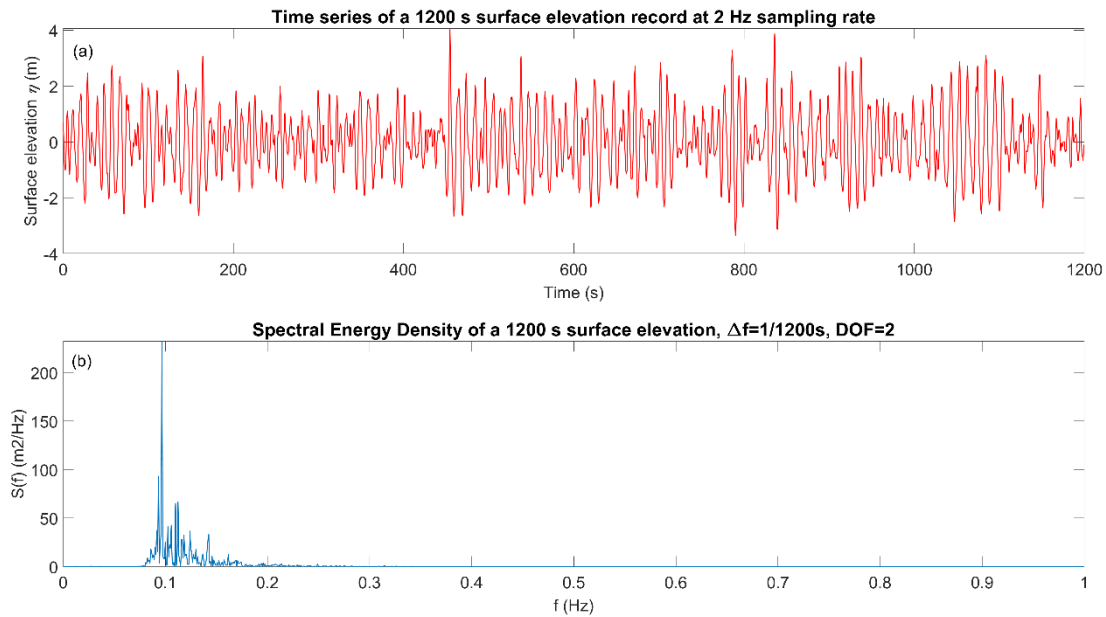
$$A_k = \frac{2}{N} \sum_{t_*=1}^N \eta(t_*) \cos \frac{2\pi k}{N} t_* : 0 \leq k \leq N/2, \quad (1.23)$$

$$B_k = \frac{2}{N} \sum_{t_*=1}^N \eta(t_*) \sin \frac{2\pi k}{N} t_* : 0 \leq k \leq N/2 - 1, \quad (1.24)$$

Οι συντελεστές A_k και B_k είναι και οι δύο στοχαστικές μεταβλητές που ακολουθούν την κανονική κατανομή, με μέση τιμή μηδέν και διακυμανση $S(f)/(N\Delta t)$ (Godá, 2010). Στην **Εικόνα 3** δίνεται ένα παράδειγμα κυματικής χρονοσειράς και του φάσματος που της αντιστοιχεί.

Εφόσον το φάσμα δεν είναι συνεχές, η μικρότερη συχνότητα που μπορεί να οριστεί είναι ίση με $f_{min} = 1/t_0$. Για την καλύτερη λοιπόν δυνατή ανάλυση του φάσματος βάση της συχνότητας γίνεται χρήση της f_{min} και συνεπώς $\Delta f = 1/t_0$, όπου Δf είναι το βήμα συχνοτήτων του φάσματος. Η μέγιστη τιμή συχνότητας φάσματος μιας χρονοσειράς με διάστημα δειγματοληψίας Δt , ορίζεται από την *Nyquist* συχνότητα η οποία δίνεται από $f_N = 1/2\Delta t$. Για παράδειγμα, για τη χρονοσειρά της **Εικόνα 3α** συνολικής διάρκειας 1200s και διάστημα

δειγματοληψίας 0.5s, το φάσμα έχει την μέγιστη δυνατή ανάλυση για $\Delta f = \frac{1}{1200} = 8.33 \times 10^{-4}$ z και μέγιστη συχνότητα $f_N = 1/(2 \times 0.5 \text{ s}) = 1 \text{ Hz}$.



Εικόνα 3. Χρονοσειρά ανύψωσης στάθμης της θάλασσας διάρκειας 1200 s (a), και το φάσμα ενεργειακής πυκνότητας που της αντιστοιχεί στην μέγιστη δυνατή ανάλυση με $\Delta f = 1/1200 \text{ s} = 0.000833$ και 2 βαθμούς ελευθερίας (DOF) (b).

Στο φάσμα της **Εικόνα 3b** διακρίνονται πολλές κορυφές σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο φάσμα έχει την μέγιστη δυνατή ανάλυση $\Delta f = 8.33 \times 10^{-4} \text{ Hz}$. Στην πραγματικότητα, τόσο πολύ συγκεντρωμένη ενέργεια δεν είναι δυνατή. Είναι αποτέλεσμα αβεβαιοτήτων στις εκτιμήσεις και γι' αυτό το λόγο γίνεται εξομάλυνση του φάσματος ([Kamphuis, 2000](#)). Αυτό γίνεται υπολογίζοντας κατά μέσο όρο το $S(f)$ σε εύρη συχνοτήτων μεγαλύτερα από Δf έτσι ώστε

$$S(f) = \frac{1}{df} + \sum_{m=-M/2}^{m=M/2} |A_{n+m}|^2 : df = M_f \Delta f \quad (1.25)$$

όπου df είναι η ανάλυση του φάσματος και το M_f ορίζει πόσες τιμές του Δf υπολογίζονται κατά μέσο όρο. Για $\Delta f = 8.33 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ και $M_f = 12$, έχουμε ανάλυση $df = 0.01 \text{ Hz}$.

Μια άλλη μέθοδος εξομάλυνσης του φάσματος είναι να χωριστεί η χρονοσειρά σε μικρότερης αλλά ίσης διάρκειας χρονοσειρές, να υπολογιστούν τα επί μέρους φάσματα κι έπειτα να υπολογιστεί ο μέσος όρος αυτών. Για να επιτύχουμε ανάλυση $df = 0.01 \text{ Hz}$ από μία αρχική χρονοσειρά με $t_0 = 1200 \text{ s}$, θα πρέπει να την χωρίσουμε σε $M = 12$ ίσα μέρη των 100s. Το φάσμα κάθε επί μέρους χρονοσειράς έχει πλέον μέγιστη ανάλυση $\Delta f = 1/100 \text{ s} = 0.01 \text{ Hz}$ η οποία συνοδεύει και τον τελικό μέσο όρο. Εν συντομία, η ανάλυση σε αυτήν την περίπτωση δίνεται από $df = M / t_0$. Με την εξομάλυνση του φάσματος το σφάλμα στους υπολογισμούς

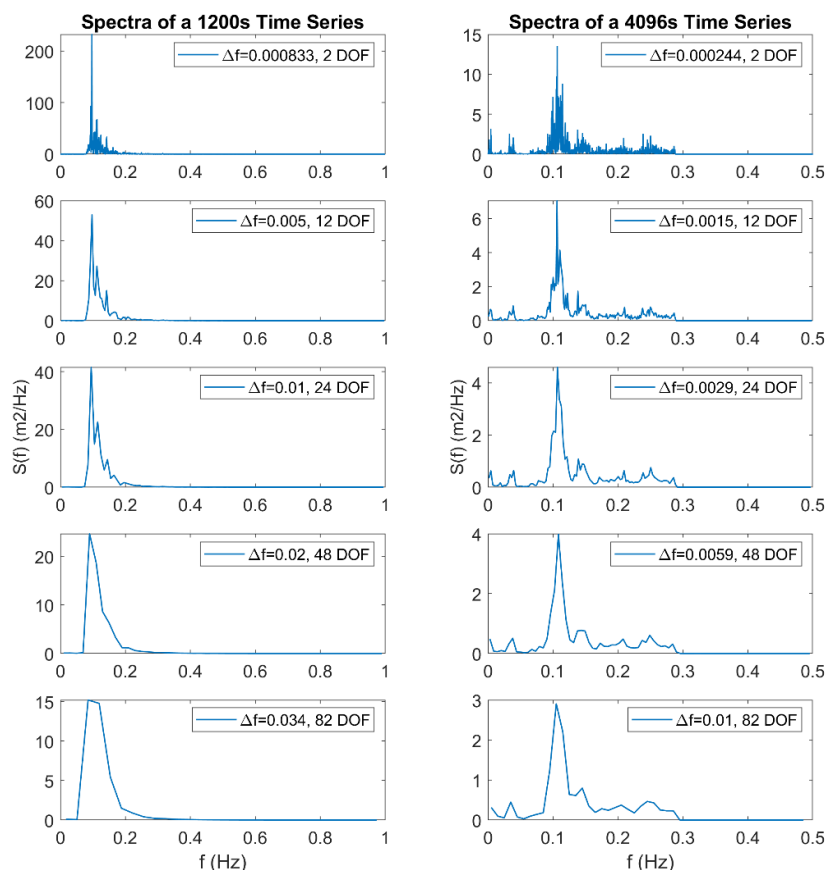
εκτίμησης μειώνεται κατά \sqrt{M} . Το ποσοστιαίο επί τοις εκατό σφάλμα εκφράζεται μέσω του υπολογισμού $100/\sqrt{M}$ (Prat, 2008).

Η $S(f)$ ακολουθεί την χ^2 κατανομή με $2M$ βαθμούς ελευθερίας (Goda, 2010). Συνεπώς για μια ποσοτική αξιολόγηση της φασματικής εκτίμησης συνήθως χρησιμοποιούνται τα διαστήματα εμπιστοσύνης της χ^2 κατανομής. Για παράδειγμα, έστω ότι υπολογίσαμε την φασματική πυκνότητα από τον μέσο όρο $M=12$ φασμάτων (ή $M_f = 12$) και θέλουμε να εκτιμήσουμε την πραγματική, εντός διαστήματος εμπιστοσύνης 95%. Οι βαθμοί ελευθερίας είναι $2M = 24$. Το ανώτερο όριο του 95% διαστήματος εμπιστοσύνης προκύπτει από την τιμή της χ^2 μεταβλητής που ικανοποιεί την συνθήκη $P(\chi_{24}^2 \leq \alpha) = 0.975$. Από τον πίνακα της χ^2 κατανομής βρίσκουμε $\alpha = 39.36$ ή $\alpha/2M = 1.64$. Ομοίως για το κατώτερο όριο που ικανοποιεί την συνθήκη $P(\chi_{24}^2 \leq \beta) = 0.025$, βρίσκουμε $\beta = 12.4$ ή $\beta/2M = 0.52$. Συνεπώς, η πραγματική φασματική πυκνότητα εκτιμάται ότι βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ $0.52 S(f)$ και $1.64 S(f)$ της πυκνότητας που υπολογίσαμε.

Η επιλογή του βαθμού εξομάλυνσης εξαρτάται από την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιούμε την φασματική ανάλυση. Μπορεί η ανάλυση στην οποία έχουν χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος αριθμός φασμάτων για την εξομάλυνση να δίνει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας (και συνεπώς μικρότερα διαστήματα εμπιστοσύνης με λιγότερο σφάλμα στους υπολογισμούς), αλλά συγχρόνως χάνεται χρήσιμη πληροφορία που αφορά την ενέργεια σε ορισμένες συχνότητες. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί εξ αρχής προγραμματίζοντας μεγαλύτερη διάρκεια καταγραφής, πάντα βέβαια στο πλαίσιο να ικανοποιούνται οι συνθήκες σταθερότητας και εργοδικότητας του δείγματος.

Όπως προαναφέρθηκε, η μικρότερη συχνότητα που μπορεί να οριστεί στο φάσμα είναι συνάρτηση του συνολικού χρόνου καταγραφής και συγχρόνως αυτή αποτελεί το Δf του φάσματος με την καλύτερη δυνατή ανάλυση, $\Delta f = 1/t_0$. Μια χρονοσειρά διάρκειας 1200 s δίνει $\Delta f = 8.33 \times 10^{-4}$, ενώ μία άλλη διάρκειας 4096 s δίνει $\Delta f = 2.44 \times 10^{-4}$. Η παραπάνω διαφορά καθιστά σαφή την δυνατότητα των 4096 s για την μελέτη της φασματικής ενέργειας σε μεγαλύτερο αριθμό συχνοτήτων, ιδιαίτερα αν θέλουμε να μελετήσουμε την ενέργεια σε χαμηλές συχνότητες η οποία συνεισφέρει σε φαινόμενα όπως π.χ. ο συντονισμός λιμένων. Ενδεικτικά, για το φαινόμενο του συντονισμού το οποίο αναφέρεται σε συχνότητες μικρότερες των 0.04 Hz, μια χρονοσειρά των 1200 s μπορεί να δώσει λεπτομέρεια έναν αριθμό συχνοτήτων ίσο με $0.04 \text{ Hz} / 0.000833 \text{ Hz} = 48$, ενώ μια χρονοσειρά των 4096 s σε $0.04 \text{ Hz} / 0.000244 \text{ Hz} = 164$ συχνότητες. Στην **Εικόνα 4** παρουσιάζονται τα φάσματα δύο χρονοσειρών 1200s και 4096s με διαφορετική ανάλυση και βαθμούς ελευθερίας. Τα φάσματα της χρονοσειράς των 1200 s είναι από καταγραφή ανοιχτά του Ενετικού λιμένα Χανίων ενώ των 4096 s από καταγραφή εντός του λιμένα. Είναι εμφανής η επιρροή της συνολικής διάρκειας της χρονοσειράς στην

λεπτομέρεια του φάσματος. Για ίδιους βαθμούς ελευθερίας η πληροφορία στο φάσμα των 4096 s είναι πιο λεπτομερής σε σχέση με το φάσμα των 1200 s.



Εικόνα 4. Φάσματα διαφορετικής ανάλυσης Δf και βαθμών ελευθερίας DOF , για χρονοσειρά διάρκειας 1200 s ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (αριστερά) και 4096 s εντός του λιμένα (δεξιά).

Παραπάνω παρουσιάστηκαν βασικές πληροφορίες που αφορούν την φασματική ανάλυση κυματικών χρονοσειρών. Για περισσότερες πληροφορίες ο αναγνώστης παραπέμπεται σε κλασσικά συγγράμματα όπως των *Dean & Dalrymple (1991)*, *Goda (2010)* και *Kamphuis (2000)*, μεταξύ άλλων.

1.2 ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ ΛΙΜΕΝΩΝ

1.2.1 Βασική θεωρία

Ο συντονισμός λιμένων είναι ένα φαινόμενο ταλαντώσεων της θαλάσσιας επιφάνειας εντός μιας λιμενολεκάνης, το οποίο οφείλεται στην διείσδυση μακρών κυματισμών από την ανοιχτή θάλασσα μέσω της εισόδου των λιμένων (*Raichlen, 1966; Synolakis, 2003*). Οι συχνότητες των μακρών αυτών κυματισμών βρίσκονται στο εύρος των υπερβαρυτικών συχνοτήτων (*infragravity waves, IG*) με $f < 0.04\text{Hz}$ (*Okihiro & Guza, 1996; Rabinovich, 2010*). Όταν οι συχνότητες των *IG* κυματισμών που διεισδύουν στην λιμενολεκάνη συμπίπτουν με τις

ιδιοσυχνότητες της λιμενολεκάνης (*natural oscillation periods, NOPs*), τότε προκαλούνται στάσιμοι μακρείς κυματισμοί (*seiches*) αυξημένου πλάτους οδηγώντας την θαλάσσια επιφάνεια σε συντονισμό (*M. Okihiro et al., 1993; Thotagamuwage & Pattiaratchi, 2014*).

Η επιφάνεια στάσιμων κυματισμών σε μία κλειστή ορθογώνια λεκάνη μήκους l και σταθερού βάθους h , δίνεται από τη σχέση

$$\eta(x, t) = A \cos kx \cos \omega t, \quad (1.26)$$

όπου η είναι η ανύψωση της θαλάσσιας επιφάνειας, A είναι το πλάτος του κύματος, $k = 2\pi/L$ ο κυματικός αριθμός και $\omega = 2\pi/T$ η γωνιακή κυματική συχνότητα. L και T είναι το μήκος και η περίοδος κύματος αντίστοιχα. Η γωνιακή συχνότητα και ο κυματικός αριθμός συνδέονται μέσω των σχέσεων

$$\omega = kc, \quad (1.27)$$

$$T = \frac{L}{c}, \quad (1.28)$$

όπου $c = \sqrt{gh}$ είναι η ταχύτητα φάσης και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει ροή στα όρια της λεκάνης ($x = 0$; $x = l$) προκύπτουν οι κυματικοί αριθμοί

$$k = \frac{\pi}{l}, \frac{2\pi}{l}, \frac{3\pi}{l}, \dots, \frac{n\pi}{l}, \quad (1.29)$$

οι οποίοι σχετίζονται με τις ιδιομορφές της λεκάνης. Η βασική ιδιομορφή (*fundamental mode*) ($n = 1$) έχει μήκος κύματος ίσο με το διπλάσιο μήκος της λεκάνης. Είναι αντισυμμετρική: όταν η μία πλευρά της επιφάνειας είναι προς τα πάνω η απέναντι είναι προς τα κάτω. Οι μέγιστες τιμές ταλάντωσης βρίσκονται στους αντικόμβους (*antinodes*) και παρατηρούνται στα όρια της λεκάνης, ενώ στους κόμβους (*nodes*) εξ ορισμού $\eta = 0$ (**Εικόνα 5**). Οι θέσεις των κόμβων στην κλειστή λεκάνη ορίζονται από

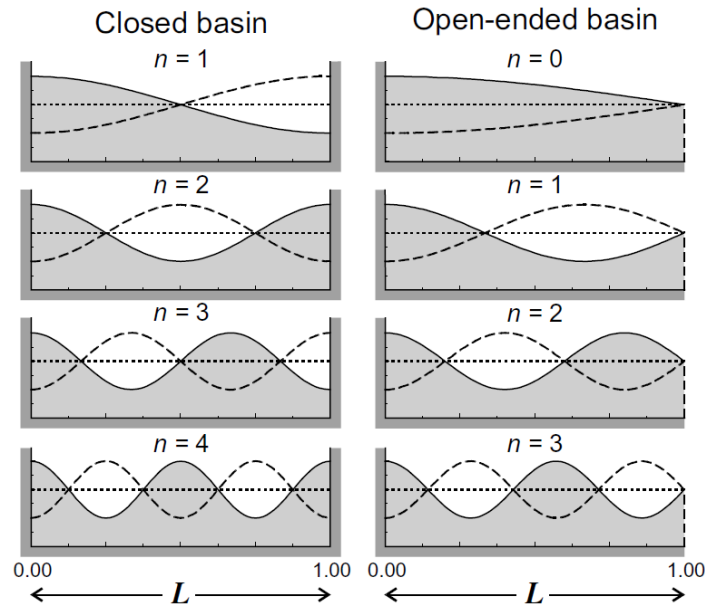
$$x_n^m = \frac{(2m-1)l}{2n}, \quad m, n = 1, 2, \dots; \quad m \leq n. \quad (1.30)$$

Για $n = 1$, υπάρχει ένας κόμβος, $x_1^1 = l/2$ στην μέση της λεκάνης. Για $n = 2$, δύο κόμβοι, σε $x_2^1 = l/4$ και $x_2^2 = 3l/4$, κλπ.

Οι θέσεις των αντικόμβων ορίζονται από

$$x_n^j = \frac{jl}{n}, \quad j = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (1.31)$$

Για $n = 2$, υπάρχουν τρεις αντικόμβους σε $x_2^0 = 0$, $x_2^1 = l/2$ και $x_2^2 = l$.



Εικόνα 5. Προφίλ επιφάνειας για τις τέσσερις πρώτες ιδιομορφές συντονισμού σε κλειστές και ανοιχτού στόμιου λεκάνες ομοιόμορφου βάθους (Πηγή: [Rabinovich, 2010](#)).

Από τις σχέσεις (1.27) και (1.28) προκύπτουν οι γνωστές εξισώσεις *Merian*, οι οποίες δίνουν τις ιδιοπεριόδους της λεκάνης και οι οποίες εξαρτώνται αποκλειστικά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ([Synolakis, 2003](#)). Για κλειστές ορθογώνιες λεκάνες σταθερού βάθους τότε,

$$T_n = \frac{2l}{n\sqrt{gh}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.32)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι όσο μακρύτερη είναι η λεκάνη ή όσο πιο ρηχό το βάθος, τόσο μεγαλύτερη και η ιδιοπερίοδος. Η βασική ιδιομορφή έχει την μέγιστη ιδιοπερίοδο T_1 . Οι υπόλοιπες ιδιομορφές έχουν ιδιοπεριόδους ίσες με $T_1/2$, $T_1/3$, $T_1/4$ κλπ., όπου T_1 είναι η βασική ιδιομορφή.

Σε ορθογώνια λεκάνη με ανοιχτό στόμιο στην μία της πλευρά, οι θέσεις των κόμβων και αντικόμβων καθώς και οι ιδιοπερίοδοι ορίζονται διαφορετικά. Οι στάσιμοι κυματισμοί σε ορθογώνια λεκάνη με σταθερό βάθος και ανοιχτή είσοδο έχουν επίσης την μορφή της εξίσωσης (1.26), αλλά με τον κόμβο να βρίσκεται στην είσοδο της λεκάνης. Προσεγγιστικά, οι τοποθεσίες των κόμβων δίνονται από την σχέση

$$x_n^m = \frac{(2m+1)l}{2n+1}, \quad m, n = 1, 2, \dots; \quad m \leq n, \quad (1.33)$$

ενώ για τους αντικόμβους από την σχέση

$$x_n^j = \frac{2jl}{2n+1}, \quad j, n = 0, 1, 2, \dots; \quad j \leq n. \quad (1.34)$$

Η πιο ενδιαφέρουσα και σημαντική ιδιομορφή στην ανοιχτή λεκάνη είναι η χαμηλότερη για $n = 0$, η οποία αναφέρεται ως *Helmholtz*. Παρουσιάζει έναν μοναδικό κόμβο στην είσοδο της λεκάνης ($x = l$) και έναν μοναδικό αντικόμβο στην αντίθετη πλευρά ($x = 0$). Έχει μήκος κύματος ίσο με τέσσερις φορές το μήκος της λεκάνης.

Οι ιδιοπερίοδοι για τις ανοιχτές λεκάνες δίνονται από την σχέση

$$T_n = \frac{4l}{(2n+1)\sqrt{gh}}, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1.35)$$

Η ιδιοπερίοδος *Helmholtz* για μια ορθογώνια ανοιχτή λεκάνη με σταθερό βάθος είναι ίση με $T_0 = 4l/\sqrt{gH}$, η οποία είναι διπλάσια από την ιδιοπερίοδο της βασικής ιδιομορφής σε μία κλειστή λεκάνη, $T_1 = 2l/\sqrt{gH}$.

Οι ιδιομορφές βάσει των παραπάνω σχέσεων δίνονται σχηματικά στην **Εικόνα 5**, ενώ οι αντίστοιχες ιδιοπερίοδοι στον **Πίνακα 1**. Παρουσιάζουν την ιδεατή περίπτωση ορθογώνιων λεκανών με σταθερό βάθος. Για πιο σύνθετες περιπτώσεις λεκανών μεταβλητού βάθους και άλλων σχηματισμών, ο αναγνώστης παραπέμπεται στις αναφορές [Raichlen, 1966](#), [Synolakis, 2003](#) και [Rabinovich \(2010\)](#).

Πίνακας 1. Αδιάστατες περίοδοι, $T_n^* = T_n\sqrt{gH}/2l$, για κλειστή και με ανοιχτό στόμιο ορθογώνια λεκάνη ομοιόμορφου βάθους ([Πηγή: Rabinovich, 2010](#)).

Τύπος λεκάνης	Ιδιομορφή				
	n = 0	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
Κλειστή	-	1	1/2	1/3	1/4
Ανοιχτό στόμιο	2	2/3	2/5	2/7	2/9

1.2.2 Υπερβαρυτικοί κυματισμοί (infragravity waves, IG) και συντονισμός λιμένων

Ο κυριότερος παράγοντας που οδηγεί σε συντονισμό, και συνεπώς στην ενίσχυση (amplification) των κυματισμών εντός του λιμένα, είναι η διείδυση IG κυματισμών που δημιουργούνται ανοιχτά της εισόδου του λιμένα λόγω μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων ανεμογενών κυματισμών ή κυματισμών ρεστίας.

Η διείδυση των IG κυματισμών σε λιμένες έχει μελετηθεί εκτενώς κατά το παρελθόν ([McComb et al., 2005](#); [Okiihiro & Guza, 1996](#); [Thotagamuwage & Pattiaratchi, 2014](#)), ειδικά σε περιπτώσεις όπου η εισόδός τους είναι εκτεθειμένη σε ρηχά νερά. Οι κυματισμοί αυτοί ευθύνονται μεταξύ άλλων για την διακοπή λειτουργιών ελλιμενισμού πλοίων, ενώ μπορεί να προκαλέσουν ακόμα και υπερπήδηση κυματισμών κατά μήκος των προβλητών, ελλιπώς προστατευμένων λιμενολεκανών ([Gierlefsen et al., 2001](#); [Maravelakis et al., 2016](#); [McComb](#)

et al., 2005; Thotagamuwage & Pattiaratchi, 2014). Η περίοδος τους κυμαίνεται μεταξύ 25s και 300-600s (*Rabinovich, 2010*).

Αποτελέσματα που έχουν προκύψει από πειραματικές και αναλυτικές εργασίες, έχουν δώσει σαφή εικόνα για την συνεισφορά των κυματισμών μικρής περιόδου (ανεμογενών και ρεστίας) στις IG ταλαντώσεις εντός λιμένων. Ο *Bowers (1977)* κατέληξε ότι τα ‘δεσμευμένα’ μακρά κύματα (*bound waves*) τα οποία είναι παγιδευμένα σε κυματο-ομάδες ρεστίας κατευθυνόμενες προς την ακτή, διεγείρουν απ’ ευθείας τις ιδιοπεριόδους λιμένων οδηγώντας σε συντονισμό. Οι ελεύθεροι μακρείς κυματισμοί (*free long waves*), οι οποίοι απελευθερώνονται κατά την θραύση, μπορούν επίσης να διεγείρουν τις ιδιοταλαντώσεις της λιμενολεκάνης και να προκληθεί συντονισμός (*Agnon & Mei, 1989; De Girolamo, 1996; J. K. Wu & Liu, 1990*).

Σε δύο έρευνες αναφοράς, οι *Okiihiro et al. (1993)* και *Okiihiro & Guza (1996)* αναγνώρισαν μέσω μετρήσεων πεδίου τις ωκεάνιες ρεστίες ως την κύρια πηγή ενέργειας για τις μακρές ταλαντώσεις άνω των 0.002 Hz, εντός των λιμένων Barbers Point και Kahului της Χαβάης και Oceanside στην Καλιφόρνια. Οι *Morison & Imberger (1992)* βρήκαν ότι ο συντονισμός στον λιμένα Esperance, Δυτική Αυστραλία, ήταν αποτέλεσμα εισερχόμενων ρεστιών, με περιόδους μεταξύ 15 s-25 s και άλλων μακρών ταλαντώσεων (> 40 s), ενώ οι *López et al. (2012)* κατέληξαν ότι ταλαντώσεις μεγάλων περιόδων ($0.7\text{mHz} < f < 2.5\text{mHz}$) στον λιμένα Ferrol, Ισπανία, συσχετίζονταν έντονα με κυματική ενέργεια ρεστιών από τα ανοιχτά. Πέραν των παραπάνω συνθηκών, η δημιουργία των IG κυματισμών εντός λιμένων έχει καταγραφεί και κατά την διάρκεια τοπικών καταιγίδων (*Holman et al., 1979; Jeong et al., 1996; Nakamura & Katoh, 1993*). Οι *Thotagamuwage & Pattiaratchi, (2014)* κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι μακρές ταλαντώσεις σε μία μικρή μαρίνα στην ΒΔ Αυστραλία, είχαν ως μηχανισμό γένεσης κύματα ρεστίας από τα ανοιχτά, και αυτές ενισχύονταν περαιτέρω κατά τη διάρκεια καταιγίδων.

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις έχουν επίσης υπάρξει χρήσιμο εργαλείο στην μελέτη συνεισφοράς των IG κυματισμών σε φαινόμενα συντονισμού εντός λιμένων. Τα πλέον συνήθη σε χρήση είναι τα μοντέλα γραμμικών εξισώσεων ήπιας κλίσης (linear mild-slope equations, LMDE) (π.χ. *CGWAVE, PHAROS, MIKE 21, EMS, etc.*), κυρίως λόγω της λιγότερης υπολογιστικής ισχύς που απαιτούν σε σχέση με τα μοντέλα εξισώσεων τύπου *Boussinesq (BT)* που επίσης χρησιμοποιούνται για την μελέτη συντονισμού λιμένων. Παρόλα αυτά η επιλογή των *BT* μοντέλων μπορεί να προσφέρει άλλα πλεονεκτήματα σε αντάλλαγμα: i) οι υδροδυναμικές διεργασίες επιλύονται με ακρίβεια από τα βαθιά στα ρηχά νερά, συμπεριλαμβάνοντας διασπορά της ενέργειας λόγω θραύσης των κυματισμών κοντά στην ακτή, ii) η αναρρίχηση κύματος προσομοιώνεται μέσω ενός μεταβαλλόμενου οριακού

αλγόριθμου (P. Lynett, 2002), κι έτσι η ανάκλαση κυματισμών δεν χρειάζεται να γίνει μέσω εμπειρικών συντελεστών κατά μήκος της ακτογραμμής και iii) μπορούν και προσομοιώνονται μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ κυματισμών για την δημιουργία υπερβαρυτικής (IG) ενέργειας (Longuet-Higgins & Stewart, 1964) με αποτέλεσμα να μπορούν να δοθούν ρεαλιστικές φασματικές συνθήκες στα όρια και να προβλεφθούν επίσης ρεαλιστικά αποτελέσματα για τα ύψη των κυματισμών και την ενίσχυσή τους εντός του λιμένα. Η καταλληλότητα και τα οφέλη των BT μοντέλων για μελέτες συντονισμού λιμένων έχουν παρουσιαστεί από τον *Nwogu (2001)*, ενώ ο *Douyere (2003)* εφάρμοσε τον κώδικα *COULWAVE*, που χρησιμοποιείται και σε αυτήν την εργασία, για την μελέτη ενίσχυσης κυματισμών λόγω συντονισμού σε λιμένες της Χαβάης.

Οι *Harkins & Briggs (1995)* με την χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (finite element model) κατέληξαν ότι, εντός του λιμένα Barbers Point, περισσότερη IG ενέργεια εξελίχτηκε από προσπίπτοντα στενόκορφα φάσματα (narrow banded spectra) παρά από φάσματα με πιο ευρεία κατανομή της ενέργειας, αποτελέσματα τα οποία επιβεβαιώθηκαν από εργαστηριακές και μετρήσεις πεδίου. Οι *Kofoed-Hansen et al. (2005)* χρησιμοποίησαν μοντέλο τύπου *BT*, για να προσομοιώσουν την ενίσχυση κυματισμών λόγω μακρών κυμάτων στους λιμένες Torsminde, Δανία και Long Beach, Καλιφόρνια, και απέδωσαν την εμφάνιση ενέργειας χαμηλών συχνοτήτων στην μη γραμμική αλληλεπίδραση των κυματισμών εκτός των λιμένων. Οι *Gierlevsen et al. (2001)* και *McComb et al. (2009)* χρησιμοποίησαν *BT* μοντέλα για την μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας της λιμενολεκάνης στην ενίσχυση των κυματισμών λόγω συντονισμού. Οι *Kofoed-Hansen et al. (2000)* προτείνουν την χρήση των *BT* μοντέλων στον αρχικό σχεδιασμό μαρίνας για την εκτίμηση πιθανών μορφών ιδιοταλάντωσης.

1.3 ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

1.3.1 Εισαγωγικά

Η υπερπήδηση κυματισμών σε παράκτιες κατασκευές έχει διαχωριστεί σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη οι κυματισμοί αναρριχώνται σε κατασκευές (επί το πλείστον επικλινείς) όπως παράκτιοι τοίχοι (seawalls) ή κυματοθραύστες και στην συνέχεια περνάνε πάνω από την στέψη τους ως μια ενιαία μάζα νερού. Η συγκεκριμένη υπερπήδηση ορίζεται ως υπερπήδηση υπερχειλίσσης (green water overtopping, **Εικόνα 6[b][d]**). Οι συχνότητες, όγκοι και ταχύτητες των συγκεκριμένων γεγονότων υπερπήδησης επηρεάζουν σημαντικά την ασφάλεια της κατασκευής καθώς και των ανθρώπων που ζουν, εργάζονται ή απλά βρίσκονται πίσω από και πάνω σε αυτές (*EurOtop, 2018*).

Στην δεύτερη μορφή οι κυματισμοί θραύονται μπροστά από ή πάνω στο, προς την ανοιχτή θάλασσα, μέτωπο της κατασκευής, δημιουργώντας μη συνεχείς υπερπηδήσεις και σημαντικού όγκου πίδακες θαλασσινού νερού. Οι πίδακες νερού υπερπηδούν την στέψη της κατασκευής είτε υπό τη δική τους ορμή, είτε υποβοηθούμενοι από άνεμο που πνέει προς την ξηρά. Η μορφή αυτή παρουσιάζεται πιο έντονα σε κατασκευές με κάθετο μέτωπο και ορίζεται ως ‘white-water’ ή ‘spray-overtopping’ (Εικόνα 6[a][c]). Απουσία ισχυρών ανέμων, οι πίδακες μπορεί να μην συνεισφέρουν στην υπερπήδηση με σημαντικούς όγκους νερού, αλλά μπορεί να προκαλέσουν άλλους τοπικούς κινδύνους όπως π.χ. δυσχέρεια ορατότητας κατά την οδήγηση στην περίπτωση παράκτιων δρόμων. Στην περίπτωση δε ισχυρών ανέμων και αυξημένων όγκων νερού, οι πίδακες μπορεί να μεταφέρουν στέρεα υλικά από τον βυθό μπροστά από την κατασκευή όπως μεγάλου διαμετρήματος ιζήματα (ακόμα και πέτρες), μπουκάλια κλπ. (EurOtop, 2018).



Εικόνα 6. Υπερήδηση κυματισμών στον Ενετικό λιμένα Χανίων κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων. Υπερήδηση τύπου *spray overtopping* στο ΒΔ σημείο της εισόδου (a,c). Υπερήδηση τύπου *green water* στην δυτική προβλήτα της δυτικής λιμενολεκάνης (b,d).

Η έρευνα της εκτίμησης υπερπήδησης κυματισμών έχει εφαρμοστεί σε τρεις κύριους τύπους κατασκευών: i) Σε κεκλιμένα παράκτια αναχώματα (dikes) και κεκλιμένους παράκτιους τοίχους, ii) σε θωρακισμένες επικλινείς κατασκευές (rubble slopes) iii) και σε κάθετα ή πολύ απότομης κλίσης τοιχεία. Οι εκτιμήσεις βασίζονται σε εμπειρικές εξισώσεις οι οποίες προέκυψαν κυρίως από πειραματικές μετρήσεις σε φυσικά εργαστηριακά μοντέλα (EurOtop, 2018).

Οι παράμετροι κλειδιά που χρησιμοποιούνται στις εμπειρικές εξισώσεις και εφαρμόζονται σε αυτή την εργασία είναι:

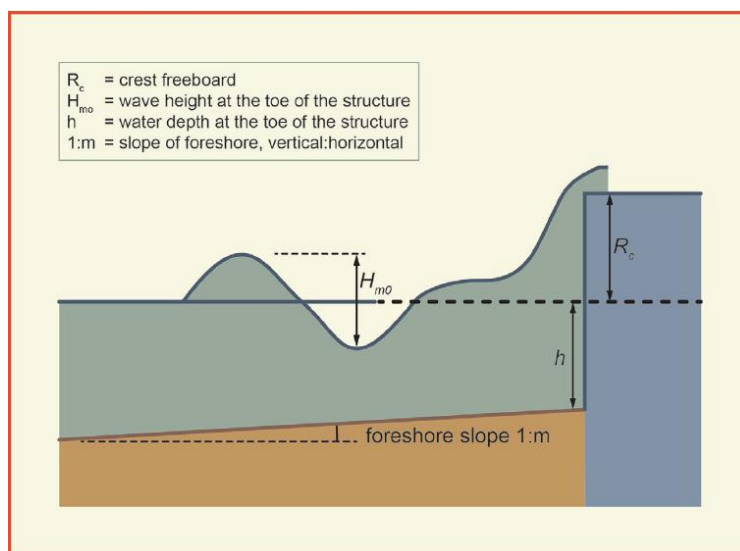
- *Ύψος κύματος.* Το ύψος κύματος που χρησιμοποιείται είναι το φασματικό ύψος κύματος H_{m0} στον πόδα της κατασκευής.

- *Περίοδος κύματος.* Η φασματική περίοδος που εφαρμόζεται είναι η μέση ενεργειακή περίοδος $T_{m-1,0} = m_{-1} / m_0$. Η συγκεκριμένη περίοδος δίνει περισσότερο βάρος στις χαμηλότερες συχνότητες του φάσματος, και ανεξαρτήτως του σχήματος του φάσματος, προκύπτουν ίδιες τιμές υπερπήδησης για ίδιες τιμές $T_{m-1,0}$ και H_{m0} (EurOtop, 2018).
- *Κλίση κύματος.* Η κλίση του κύματος ορίζεται ως $s = H_{m0} / L_0$, όπου L_0 το μήκος κύματος. Σε γενικές γραμμές, τιμές $s = 0.1$ υποδεικνύουν κύματα ρεστίας ενώ τιμές μεταξύ 0.4 και 0.6 ανεμογενείς κυματισμούς (EurOtop, 2018). Οι κυματισμοί ρεστίας συνοδεύονται από μακρές περιόδους, και σε αυτές τις περιπτώσεις η περίοδος είναι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την υπερπήδηση.
- *Παράμετρος h^* .* Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται για τον διαχωρισμό των συνθηκών πρόσκρουσης των κυματισμών σε ορμητικές (impulsive) και μη ορμητικές (non-impulsive), και ορίζεται ως $h^* = h^2 / (H_{m0} / L_0)$, όπου h το βάθος στον πόδα της κατασκευής. Οι ορμητικές συνθήκες πρόσκρουσης αφορούν κυρίως κυματισμούς οι οποίοι θραύονται είτε μπροστά από, είτε πάνω στο μέτωπο της κατασκευής. Οι μη ορμητικές συνθήκες αφορούν κατά κύριο λόγο μη θραυσμένους κυματισμούς. Μη ορμητικές συνθήκες έχουμε για $h^* > 0.23$ ενώ μη ορμητικές για $h^* \leq 0.23$.
- *Πόδας της κατασκευής.* Είναι το σημείο που ο πυθμένας βρίσκει την βάση της κατασκευής στην περίπτωση των κάθετων μετώπων.
- *Προάκτια ζώνη (foreshore).* Ορίζεται το τμήμα του πυθμένα μπροστά από τον πόδα της κατασκευής στο οποίο λαμβάνει χώρα η διεργασία της θραύσης. Το μήκος της ορίζεται να έχει ελάχιστο όσο το μήκος κύματος $L_{m-1,0}$. Ο υπολογισμός παροχών υπερπήδησης για λοξή πρόσπτωση κυματισμών, προϋποθέτει την ύπαρξη της προάκτιας ζώνης στις εξισώσεις εκτίμησης.
- *Ελεύθερο περιθώριο στέψης, R_c (crest freeboard).* Ορίζεται ως το σχετικό ύψος της στέψης της κατασκευής από το επιλέξιμο επίπεδο στάθμης της θάλασσας.
- *Παροχή κυματικής υπερπήδησης, q (wave overtopping discharge).* Ορίζεται ως η μέση παροχή κυματικής υπερπήδησης ανά μέτρο κατά πλάτος, π.χ. m^3/s ανά m ή l/s ανά m . Η μέση παροχή υπερπήδησης δεν κατηγοριοποιεί από μόνη της την δριμύτητα της υπερπήδησης, αλλά σε συνδυασμό με το προσπίπτον ύψος κύματος που προκαλεί την υπερπήδηση. Ένα μεγάλο ύψος κύματος δίνει πιο έντονη υπερπήδηση από ένα χαμηλότερο ύψος κύματος, για την ίδια παροχή υπερπήδησης.

Η βασική εμπειρική σχέση για την εκτίμηση της κυματικής υπερπήδησης είναι:

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = a \exp \left[- \left(b \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^c \right] \quad \text{για } R_c \geq 0, \quad (1.36)$$

η οποία αντιστοιχεί σε κατανομή Weibull με την αδιάστατη παροχή κυματικής υπερπήδησης $q/(gH_{m0}^3)^{1/2}$ και το σχετικό ελεύθερο περιθώριο στέψης R_c/H_{m0} (EurOtop, 2018).



Εικόνα 7. Σκίτσο ορισμών για την εκτίμηση υπερπήδησης σε απλά κάθετα μέτωπα. R_c ελεύθερο περιθώριο στέψης, H_{m0} ύψος κύματος στον πόδα της κατασκευής, h βάθος στον πόδα της κατασκευής, $1:m$ κλίση πυθμένα (Πηγή: EurOtop, 2018).

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται σε διαφορετικές εκδοχές για τους διάφορους τύπους κατασκευών. Οι τιμές των παραμέτρων a και b διαφέρουν ανά εκδοχή, ενώ προστίθενται επιπλέον συντελεστές για την τραχύτητα της επιφάνειας της κατασκευής σε περίπτωση κεκλιμένων επιφανειών αλλά και για την λοξή πρόπτωση κυματισμών. Επίσης, οι σχέσεις έχουν διαμορφωθεί για προσέγγιση μέσης τιμής (mean value approach) καθώς επίσης και για προσέγγιση σχεδιασμού (design or assessment approach). Η προσέγγιση σχεδιασμού δίνει μεγαλύτερες εκτιμήσεις για λόγους ασφαλείας.

Σε αυτή την εργασία έγινε χρήση των σχέσεων εκτίμησης υπερπήδησης σε απλά κάθετα μέτωπα (καθώς σε αυτά συγκαταλέγεται η προβλήτα της λιμενολεκάνης, (βλ. **Εικόνα 7**) με προσέγγιση μέσης τιμής. Η διαδικασία εφαρμογής των απαραίτητων εξισώσεων είναι αυτή που προτείνεται από το εγχειρίδιο EurOtop (EurOtop, 2018) και παρουσιάζεται λεπτομερώς στην ενότητα 5.1.

1.3.2 Συνεισφορά των IG κυματισμών στην διεργασία υπερπήδησης

Όσον αφορά την συνεισφορά των IG κυματισμών σε διεργασίες όπως η αναρρίχηση κυμάτων στην ακτή και η υπερπήδηση, οι Guza & Thornton (1982) και Raubenheimer et al. (1996) μελέτησαν την απελευθέρωση των IG κυματισμών στην ζώνη θραύσης και την συνεισφορά τους στην αναρρίχηση αντίστοιχα. Επίσης από άλλες έρευνες έχει προκύψει ότι

στην περίπτωση παραλιών που βρίσκονται μπροστά από υφάλους, οι IG κυματισμοί απελευθερώνονται πάνω από τον επίπεδο πυθμένα του υφάλου (Nwogu & Demirbilek, 2010; Shimozono et al., 2015). Τέλος, οι Ruessink et al. (1998) κατέληξαν ότι στις παραλίες με ήπια κλίση κατά μήκος των Ολλανδικών ακτών, η IG ενέργεια κυριαρχεί κατά την αναρρίχηση.

Σε αντίθεση η συνεισφορά των IG κυματισμών στην διεργασία υπερπήδησης δεν είναι το ίδιο κατανοητή. Η θραύση έχει ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της ενεργειακής κατανομής του φάσματος σε πιο χαμηλές συχνότητες (στο εύρος των IG κυματισμών) (Longuet-Higgins & Stewart, 1962), διεργασία η οποία φαίνεται να παίζει σημαντικό ρόλο στην υπερπήδηση (EurOtop, 2018). Το εγχειρίδιο EurOtop προτείνει τη χρήση της φασματικής περιόδου $T_{m-1,0}$ προκειμένου να συμπεριληφθεί η συνεισφορά της ενέργειας των χαμηλότερων συχνοτήτων στις εκτιμήσεις υπερπήδησης. Ο βαθμός στον οποίο μπορεί να επηρεάσει η ενέργεια χαμηλών συχνοτήτων τις εκτιμήσεις υπερπήδησης, παρουσιάζεται και στην έρευνα των Hofland et al., 2017. Κατέληξαν σε μία σχέση πρόβλεψης της $T_{m-1,0}$ σε ρηχούς πυθμένες, και έδειξαν ότι αυτή μπορεί να αυξηθεί μέχρι και οχτώ φορές σε πολύ ρηχά νερά. Οι Oosterlo et al. (2018) μελέτησαν τις αστοχίες σε παράκτια αναχώματα λόγω υπερπήδησης κυματισμών, καταλήγοντας στην σημαντική συνεισφορά των IG κυμάτων αλλά και στην ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.

Η εκτίμηση υπερπήδησης εντός λιμένων που παρουσιάζουν πρόβλημα προστασίας, όπως στην περίπτωση αυτής της εργασίας, είναι ακόμα πιο δύσκολη. Το κυματικό καθεστώς εντός ενός λιμένα κατά τη διάρκεια καταιγίδων είναι αρκετά πιο πολύπλοκο, σε σχέση με τις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες από την ανοιχτή θάλασσα προς την ακτή. Πολλαπλές προσπίπτουσες κυματικές διευθύνσεις δημιουργούνται εντός της λιμενολεκάνης λόγω περιθλάσεων και ανακλάσεων στα κάθετα στοιχεία. Η εκτίμηση των παροχών υπερπήδησης μέσω των εμπειρικών εξισώσεων βασίζεται σε προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες, ενώ σε μια λιμενολεκάνη οι ανακλάσεις μπορεί και να διπλασιάσουν τα ύψη κύματος που προσκρούουν στις προβλήτες. Ο συντονισμός εντός του λιμένα οδηγεί σε ενίσχυση των κυμάτων στις ιδιοπεριόδους του, των οποίων η χωρική κατανομή αντιστοιχεί στις ιδιομορφές ταλάντωσης. Οι ιδιομορφές και κατ' επέκταση οι προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες κατά μήκος των προβλητών είναι πολύ-διευθυντικές και κατά συνέπεια ο καθορισμός των διευθύνσεων πρόσπτωσης που θα χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις αποτελεί πρόκληση. Παρ' όλα αυτά, ο συντονισμός λιμένων μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο στην υπερπήδηση των κυματισμών κατά μήκος προβλητών (Gensen, 2017) και δεν θα πρέπει να παραλείπεται. Οι Nicolai et al., 2016, προκειμένου να ξεπεράσουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος, απλά πρόσθεσαν στατικά 0.3m στο επίπεδο στάθμης, προκειμένου να συμπεριλάβουν την επίδραση της

υπερπήδησης στους υπολογισμούς ρίσκου πλημμύρας κατά μήκος των προβλητών του λιμένα του Rotterdam.

Οι δυσχέρειες των διάφορων λιμενικών λειτουργιών αποτελεί το πιθανότερο μελλοντικό σενάριο δεδομένης της ανόδου της θαλάσσιας στάθμης. Συνεπώς είναι αναγκαία η ακριβής αναγνώριση των όποιων προκλήσεων πιθανώς εμφανιστούν (*Asariotis et al., 2018*), όπως για παράδειγμα μέσω συγκεκριμένων περιπτώσεων μελέτης οι οποίες προσπαθούν να εντοπίσουν τις μελλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στις λιμενικές λειτουργίες (*Sierra, 2019*). Οι παροχές υπερπήδησης και συνεπακολούθως πλημμυρικά φαινόμενα αναμένεται επίσης να ενταθούν λόγω της ανόδου της θαλάσσιας στάθμης (*Chini & Stansby, 2012; Gallien et al., 2014; Xie et al., 2019*), και ως εκ τούτου είναι σημαντική η καλύτερη κατανόηση των υποκείμενων φυσικών διεργασιών που συμβάλλουν στην κυματική υπερπήδηση παράκτιων υποδομών.

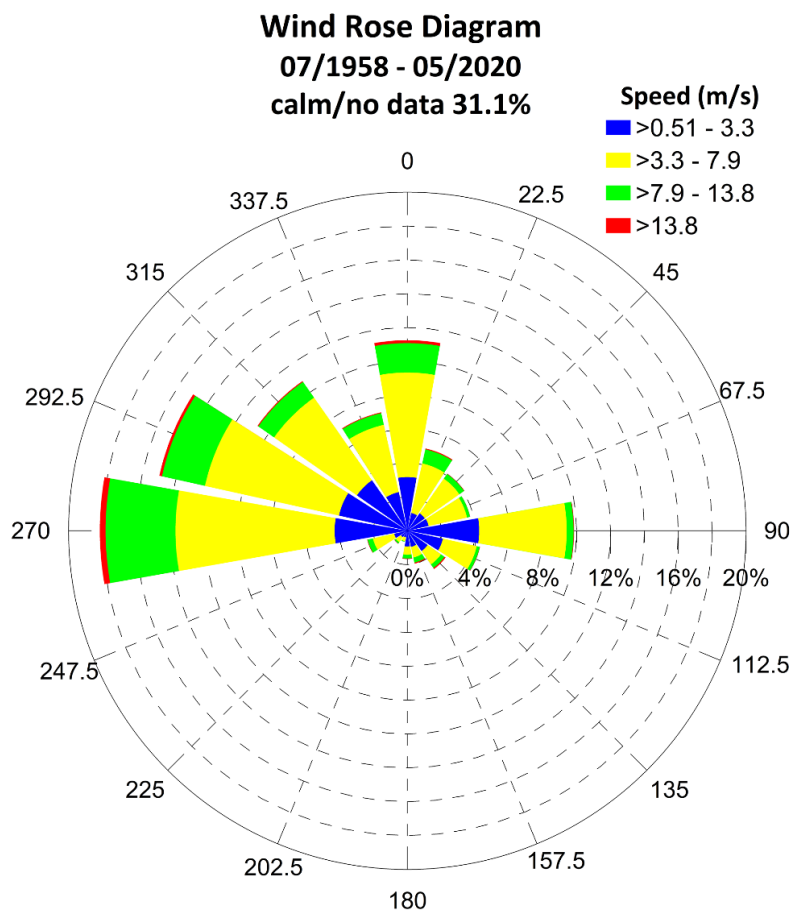
2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση περιβαλλοντικών και ωκεανογραφικών παραμέτρων που αφορούν τον κόλπο Χανίων. Επίσης γίνεται μια αναδρομή για τον Ενετικό λιμένα Χανίων και τα προβλήματα που παρουσιάζει, μέρος των οποίων μελετάται στην παρούσα διατριβή. Η πρώτη ενότητα αποτελεί ανάλυση του ανεμολογικού καθεστώτος στην περιοχή μελέτης βάσει δεδομένων που αποκτήθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.). Στην δεύτερη και τρίτη ενότητα παρουσιάζονται τα θαλάσσια ρεύματα στον κόλπο Χανίων και το παλιρροιακό καθεστώς αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα για τα θαλάσσια ρεύματα προέκυψαν από την ανάλυση δεδομένων που συλλέχθηκαν από το ίδιο όργανο που συλλέχθηκαν και τα κυματικά δεδομένα. Το παλιρροιακό καθεστώς προκύπτει από δεδομένα παλαιότερης έρευνας του [Παπαδόπουλος \(2009\)](#) και από δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Στην τέταρτη ενότητα παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν τις τιμές σχεδιασμού του σημαντικού ύψους κύματος για τον κόλπο Χανίων. Στην πέμπτη και τελευταία ενότητα περιγράφεται ο Ενετικός λιμένας Χανίων και οι ενέργειες που έχουν γίνει στο παρελθόν για την προστασία της εκτεθειμένης εισόδου του.

2.1 Ανεμολογικά στοιχεία περιοχής μελέτης

Τα ανεμολογικά στοιχεία, διατέθηκαν από την Ε.Μ.Υ. και προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό 746 ($35^{\circ}53'$, $24^{\circ}15'$), στο αεροδρόμιο Χανίων «ΔΑΣΚΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ», σε υψόμετρο 148 m ([Ε.Μ.Υ., 2020](#)). Τα πρωτογενή μετεωρολογικά δεδομένα που επεξεργάστηκαν αφορούν την μέση ταχύτητα ανέμου ανά τρίωρο, και καλύπτουν την χρονική περίοδο 07/1958 – 05/2020. Στις **Εικόνα 8 - Εικόνα 10** παρουσιάζονται τα ροδογράμματα μέσης έντασης ανέμου και διεύθυνσης για το σύνολο της χρονικής περιόδου, καθώς και για κάθε μήνα ξεχωριστά.

Το ροδόγραμμα της **Εικόνα 8** απεικονίζει την κατανομή των διευθύνσεων της μέσης ταχύτητας για την περίοδο 1958 – 2020. Το ποσοστό νηνεμίας (τιμή μέσης ταχύτητας μικρότερης του ενός κόμβου) και απουσίας δεδομένων αντιπροσωπεύει το 31.1% του δείγματος. Οι άνεμοι με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης είναι Δ διεύθυνσης και ακολουθούν κατά σειρά οι ΔΒΔ, οι Β και οι ΒΔ, Α με την ίδια περίπου συχνότητα εμφάνισης. Αξιόλογη συχνότητα εμφάνισης παρουσιάζουν επίσης οι ΒΔ διεύθυνσης άνεμοι.



Εικόνα 8. Ροδόγραμμα ανέμων για την περίοδο 07/1958 – 05/2020 στον σταθμό της Ε.Μ.Υ. 746 (35°53', 24°15')

Σε όλες τις διευθύνσεις οι επικρατούντες άνεμοι είναι μέτριας έντασης μεταξύ 3.3 – 7.9 m/s. Ισχυρής έντασης άνεμοι άνω των 13.8 m/s παρουσιάζονται σε διάφορες διευθύνσεις αλλά αυτοί εμφανίζονται περισσότερο στην Β διεύθυνση. Τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτουν με ακόμη περισσότερη λεπτομέρεια από τον πίνακα κοινής κατανομής της μέσης ταχύτητας και της διεύθυνσης (

Πίνακας 2). Σε αυτόν παρουσιάζονται οι εντάσεις ανέμων στην κλίμακα Beaufort (βλέπε **Πίνακας 3)** για αντιστοίχιση σε m/s). Παρατηρείται ότι άνεμοι ισχυρής έντασης άνω των 7 Beaufort παρουσιάζονται σε ποσοστό μόλις 0.74% ενώ οι επικρατέστεροι αντιστοιχούν στην κλάση των 3 Beaufort (23.12%). Όσον αφορά τις διευθύνσεις, ισχύουν τα σχόλια που προαναφέρθηκαν για το ροδόγραμμα. Η απώλεια δεδομένων αντιστοιχεί σε ποσοστό 1.45% ενώ η νηνεμία κυριαρχεί στο δείγμα σε ποσοστό 29.67%.

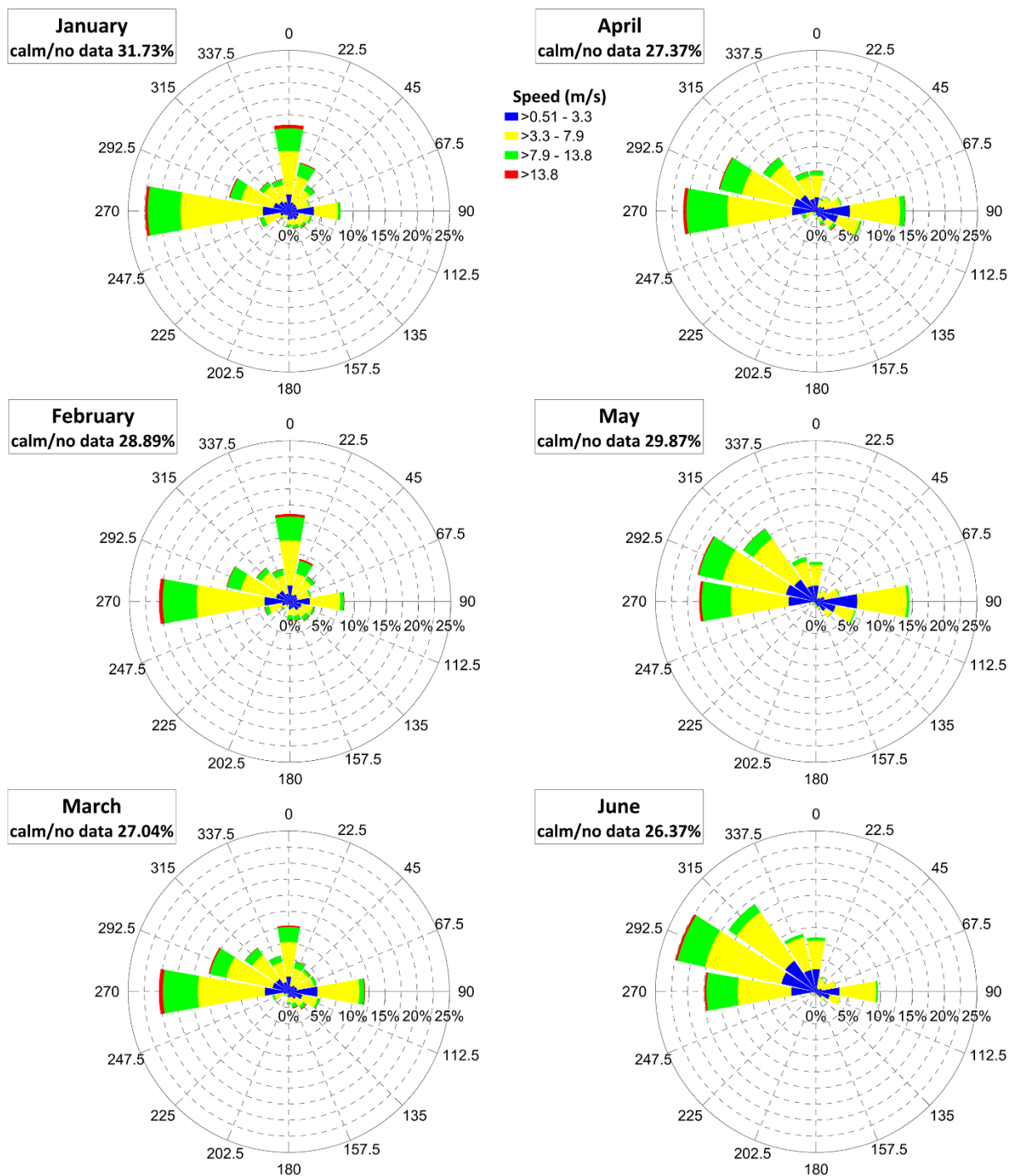
Πίνακας 2. Πίνακας κοινής κατανομής μέσης ταχύτητας ανέμων και μέσης διεύθυνσης για την περίοδο 07/1958 – 05/2020.

Beaufort	Διεύθυνση																Sum
NoData	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	1.45
Μηνεμία																	29.67
1	0.20	0.03	0.06	0.02	0.33	0.04	0.06	0.03	0.06	0.02	0.03	0.02	0.27	0.06	0.15	0.05	1.43
2	1.98	0.71	0.81	0.87	2.60	1.44	0.95	0.64	0.58	0.25	0.29	0.53	2.69	2.78	2.36	1.56	21.06
3	2.61	1.23	1.14	1.15	2.68	1.11	0.49	0.26	0.22	0.11	0.17	0.53	3.41	3.37	2.76	1.88	23.12
4	1.96	1.01	0.66	0.50	0.96	0.33	0.21	0.23	0.15	0.06	0.09	0.42	3.71	2.73	1.61	1.10	15.72
5	0.63	0.30	0.11	0.06	0.16	0.08	0.10	0.11	0.08	0.01	0.04	0.12	1.56	0.95	0.42	0.24	4.95
6	0.26	0.11	0.04	0.02	0.04	0.02	0.05	0.06	0.04	0.01	0.02	0.04	0.64	0.34	0.10	0.08	1.87
7	0.09	0.03	0.01	0.004	0.01	0.005	0.03	0.03	0.02	0.00	0.01	0.01	0.18	0.09	0.03	0.02	0.56
8	0.03	0.01	0.004	0.00	0.004	0.004	0.01	0.01	0.01	0.00	0.003	0.002	0.04	0.01	0.01	0.01	0.15
9	0.001	0.002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.003	0.00	0.00	0.001	0.00	0.004	0.001	0.001	0.002	0.02
10	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.002	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.00	0.004
11	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.001
Sum	7.75	3.43	2.84	2.62	6.79	3.03	1.90	1.37	1.15	0.46	0.65	1.67	12.51	10.33	7.44	4.94	100.00

Η μηνιαία κατανομή των ανέμων για όλη την χρονική περίοδο δίνεται στις **Εικόνα 9** και **Εικόνα 10**. Τους χειμερινούς μήνες Δεκέμβριο έως και Φεβρουάριο τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφάνισης παρουσιάζονται στην Β και Δ διεύθυνση ενώ σε όλες τις διευθύνσεις εμφανίζονται άνεμοι έντασης άνω των 13.8 m/s. Κατά τους ανοιξιάτικους μήνες Μάρτιο – Μάιο η συχνότητα εμφάνισης των Β ανέμων μειώνεται αισθητά ενώ αυξάνει αυτή των Α ανέμων. Οι Δ άνεμοι εξακολουθούν να κατέχουν τα μέγιστα ποσοστά εμφάνισης τους μήνες Μάρτιο και Απρίλιο ενώ τον μήνα Μάιο υπερτερούν οι ΔΒΔ ελαφρώς σε σχέση με τους Δ.

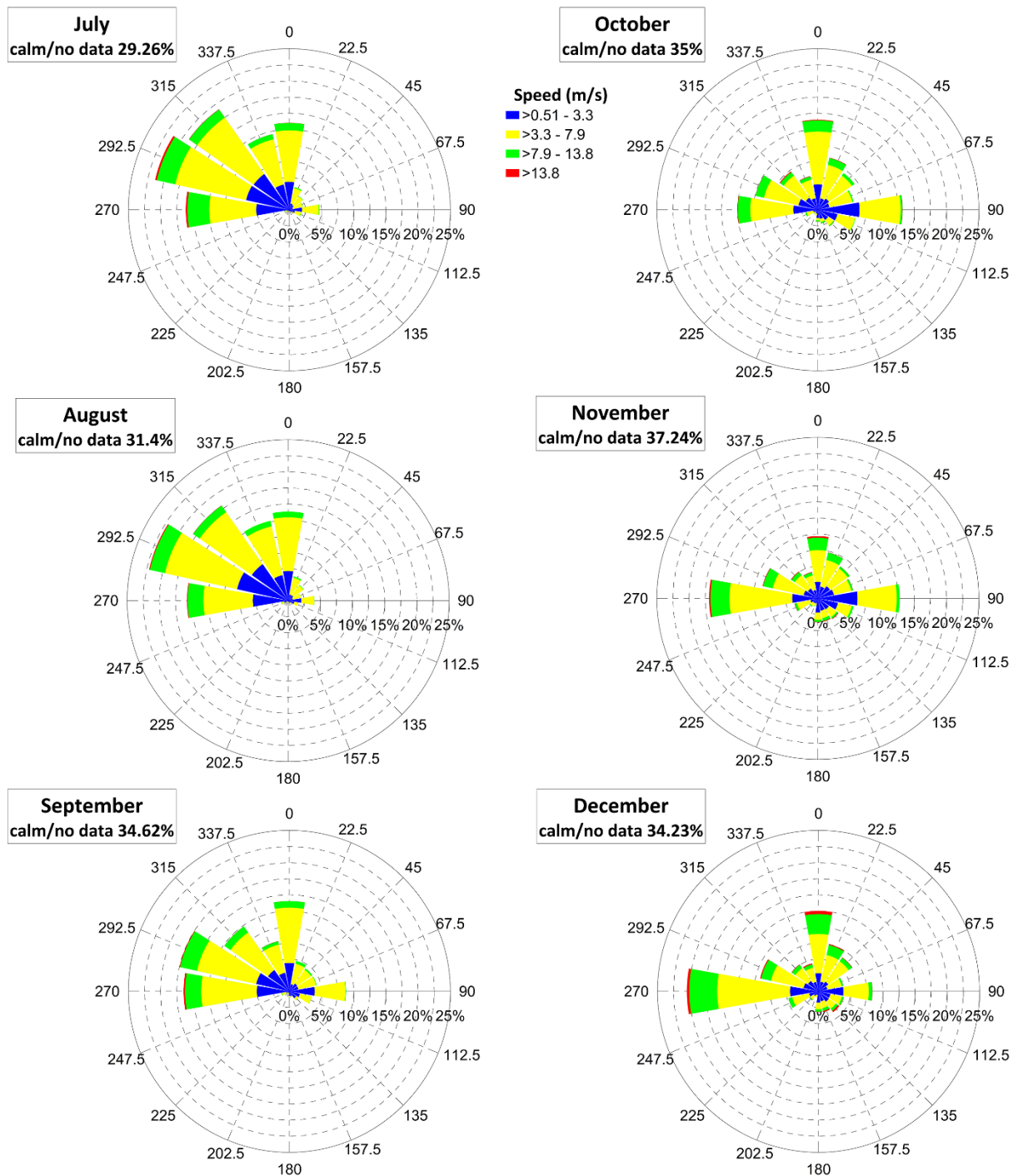
Τους θερινούς μήνες Ιούνιο – Αύγουστο κυριαρχούν οι άνεμοι στο εύρος των Δ – Β διευθύνσεων με κυριάρχη ένταση μεταξύ 3.3 – 7.9 m/s. Τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφανίζονται στην ΔΒΔ διεύθυνση. Τα μελτέμια δεν εμφανίζονται ως ισχυρά Β στο δείγμα, απεναντίας τα μικρά ποσοστά ανέμων ισχυρής έντασης άνω των 13.8 m/s εμφανίζονται στις Δ και ΔΒΔ διευθύνσεις. Τους φθινοπωρινούς μήνες αυξάνει το ποσοστό των Α ανέμων ιδιαίτερα κατά τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο. Τον μήνα Σεπτέμβριο οι επικρατούντες άνεμοι αντιστοιχούν στο εύρος Δ – Β, ενώ ισχυροί άνεμοι άνω των 13.8 m/s είναι εμφανέστεροι τον μήνα Νοέμβριο.

Monthly Wind Rose Diagrams of mean speed over the period 07/1958 - 05/2020



Εικόνα 9. Μηνιαία ροδογράμματα ανέμου της περιόδου 07/1958 – 05/2020 για τους μήνες Ιανουάριο έως και Ιούνιο.

Monthly Wind Rose Diagrams of mean speed over the period 07/1958 - 05/2020



Εικόνα 10. Μηνιαία ροδογράμματα ανέμου της περιόδου 07/1958 – 05/2020 για τους μήνες Ιούλιο έως και Δεκέμβριο.

Πίνακας 3. Αντιστοίχιση κλίμακας Beaufort με ταχύτητες ανέμου.

Beaufort	Κόμβοι	m/s
Νηνεμία	< 1	< 0.5
1	1 - 3	0.5 - 1.5
2	3 - 7	1.6 - 3.3
3	7 - 11	3.4 - 5.5
4	11 - 16	5.5 - 7.9
5	16 - 21	8.0 - 10.7
6	21 - 27	10.8 - 13.8
7	27 - 34	13.9 - 17.1
8	34 - 41	17.2 - 20.7
9	41 - 48	20.8 - 24.4
10	48 - 56	24.5 - 28.4
11	56 - 64	28.5 - 32.6
12	≥ 64	≥ 32.7

2.2 Η θαλάσσια παλίρροια στην περιοχή μελέτης

Οι παλίρροιες είναι μακρείς προβλέψιμοι ωκεάνιοι κυματισμοί οι οποίοι προκαλούν εύρος μεταβολών στην θαλάσσια στάθμη, ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές. Οι περιοδικές αυτές ταλαντώσεις προκαλούνται από την βαρυτική έλξη μεταξύ Γης, Ήλιου και Σελήνης. Τα φυσικά χαρακτηριστικά μετάδοσης των παλιρροιών σε συνδυασμό με την περιστροφή της Γης, καθορίζουν εν γένει το πλάτος το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγάλα εύρη σε ρηχές θάλασσες και κυκλωνική συμπεριφορά γύρω από τους ωκεανούς (Agresti, 2018).

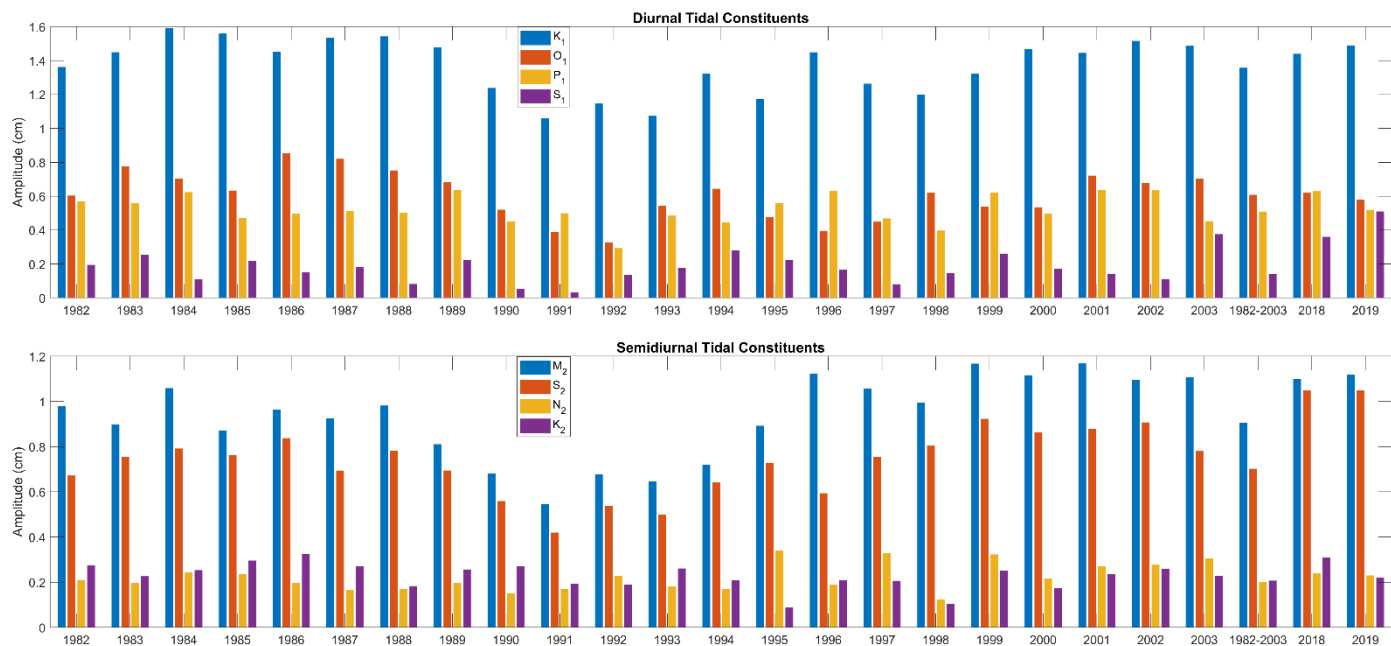
Οι κύριες παλιρροιακές συνιστώσες που επηρεάζουν τα παράκτια ύδατα και καθορίζονται από τις κινήσεις μεταξύ Ήλιου – Γης και Ήλιου – Σελήνης είναι οι ημερήσιες και οι ημιμερήσιες. Οι ημιμερήσιες παλίρροιες αποτελούν συνέπεια της περιστροφής της Γης και προκαλούν δύο μέγιστες και δύο χαμηλές στάθμες κατά μία περιστροφή. Οι βασικές είναι οι M_2 , S_2 , N_2 και K_2 με περιόδους 12.42 hrs, 12 hrs, 12.66 hrs και 11.97 hrs αντίστοιχα. Οι ημερήσιες συνδέονται με την απόκλιση της σελήνης και του ήλιου και οι κύριες συνιστώσες τους είναι οι K_1 , O_1 , P_1 και S_1 με περιόδους 23.93 hrs, 25.82 hrs, 24.07 hrs και 24 hrs. Άλλες παλιρροιακές συνιστώσες, με υπολογίσιμη συνεισφορά στο συνολικό παλιρροιακό πλάτος μιας περιοχής, έχουν περίοδο περίπου 15 ημερών (MS_f και M_f), και περίπου ενός μηνός (M_m).

Τέλος, παλιρροιακές συνιστώσες ακόμα μεγαλύτερης περιόδου, οι οποίες αποτελούν και μέρος ενός φαινομένου γνωστού ως εποχικός κύκλος ([Παπαδόπουλος, 2009](#)), είναι η ετήσια S_a με περίοδο 365.26 ημερών και η ημιετήσια με περίοδο 182.63 ημερών.

Οι παλίρροιες στην Μεσόγειο με εξαίρεση την Αδριατική Θάλασσα, το Βόρειο Αιγαίο και τον κόλπο του Γκαμπές, έχουν πλάτη τα οποία δεν ξεπερνούν τα μερικά εκατοστά ([Agresti, 2018](#)). Στο Αιγαίο οι πιο σημαντικές ημερήσιες συνιστώσες είναι οι O_1 και K_1 ενώ οι πιο σημαντικές ημιμερήσιες οι M_2 και S_2 . Στο Νότιο Αιγαίο το εύρος της παλίρροιας δεν ξεπερνάει τα 4 – 5 cm. Οι δεκαπενθήμερες και μηνιαίες συνιστώσες, στις ελληνικές θάλασσες, διεγείρονται κυρίως από διακυμάνσεις μετεωρολογικών φαινομένων, όπως ο άνεμος και η ατμοσφαιρική πίεση ([Tsimplis, 1994](#); [Παπαδόπουλος, 2009](#)).

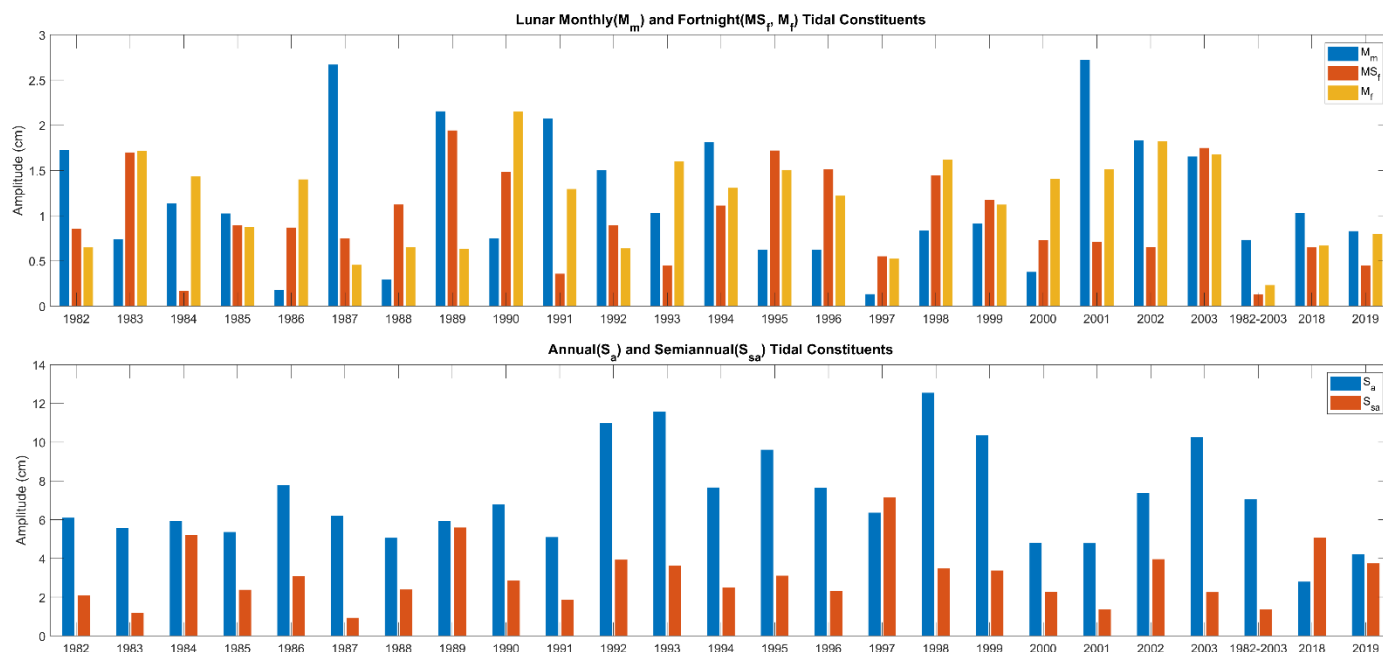
Στην έρευνά του ο [Παπαδόπουλος \(2009\)](#), μελέτησε το παλιρροιακό καθεστώς στον κόλπο της Σούδας μέσω των καταγραφών του παλιρροιογράφου του Ναυσταύθμου Κρήτης. Το χρονικό εύρος των καταγραφών αφορούσε τα έτη 1982 – 2003. Μεταξύ των κύριων συμπερασμάτων της έρευνας ήταν ότι το εύρος παλίρροιας στην περιοχή δεν ξεπερνάει τα 5 cm, ενώ οι σημαντικότερες ημερήσιες και ημιμερήσιες συνιστώσες είναι οι O_1 , K_1 , P_1 , M_2 και S_2 . Επίσης, συσχέτισε τις διακυμάνσεις του ετήσιου κύλου της περιοχής με τις διακυμάνσεις της Βόρειας Ατλαντικής Ταλάντωσης.

Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, μπορεί να αποδοθεί μια εικόνα για τα παλιρροιακά πλάτη των τελευταίων δύο ετών. Έγινε χρήση των καταγραφών του πιεσόμετρου του οργάνου καταγραφής (βλ. ενότητα 3.1.1), από τις οποίες προέκυψαν δεδομένα μέσω των τιμών της μεταβολής της θαλάσσιας επιφάνειας ανά 20 min ανά ώρα. Για τον υπολογισμό των παλιρροιακών συνιστωσών έγινε χρήση του πακέτου ρουτινών **t_tide**, σε περιβάλλον Matlab, , το οποίο εφαρμόζει την μέθοδο της αρμονικής ανάλυσης στα δεδομένα ([Pawlowicz et al., 2002](#)). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στις **Εικόνα 11** και **Εικόνα 12** μαζί με αυτά του [Παπαδόπουλος \(2009\)](#) της περιόδου 1982 – 2003. Τα δεδομένα από την παρούσα έρευνα αφορούν δύο έτη κατά τις περιόδους 14/08/2018 - 14/08/2019 και 14/08/2019 – 14/08/2020. Τα αποτελέσματα του [Παπαδόπουλος \(2009\)](#) παρουσιάζονται σε ανάλυση κατ'έτος αλλά και συνολικά για την περίοδο 1982 – 2003. Εδώ ας σημειωθεί, ότι τα δεδομένα από τα οποία προκύπτουν τα πλάτη παλίρροιας τα τελευταία δύο έτη, προέρχονται από διαφορετικές ποντίσεις του οργάνου, στις οποίες το βάθος πόντισης ήταν από 23 έως 23.7 m.



Εικόνα 11. Πλάτη ημερήσιων (πάνω) και ημιμερήσιων (κάτω) συνιστωσών παλίρροιας για τον κόλπο της Σούδας (1982 – 2003) και για την περιοχή ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (2018 – 2019) (Πηγή δεδομένων 1982 – 2003: Παπαδόπουλος, 2009).

Είναι εμφανέστατη η σημαντικότητα της ημερήσιας K_1 και των ημιμερησίων M_2 και S_2 συνιστωσών στο σύνολο των παλιρροιακών συνιστωσών χρονικού εύρους μίας μέρας για την περίοδο 1982 – 2003. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από τα δεδομένα της παρούσας εργασίας και για τα δύο έτη που έγινε επεξεργασία. Το άθροισμα των ημερήσιων και ημιμερήσιων συνιστωσών δίνει 5.75 cm πλάτος παλίρροιας για το έτος 2018 και 5.72 cm για το έτος 2019. Όσον αφορά την συνεισφορά των μακρότερων σε περίοδο συνιστωσών, στο συνολικό παλιρροιακό εύρος της περιοχής, φαίνεται ότι τα εύρη των συνιστωσών M_m , MS_f και M_f μεταβάλλονται ποικίλως ανά έτος και μάλιστα με αξιοσημείωτες διακυμάνσεις. Το ίδιο ισχύει και για την ετήσια και σε μικρότερο βαθμό για την ημιετήσια συνιστώσα. Η ετήσια συνιστώσα μάλιστα, παρουσιάζει σε αρκετά έτη πλάτη μεγαλύτερα των 10 cm, τιμές διπλάσιες της συνολικής παλίρροιας που μπορεί να εμφανίζουν 24 hrs.



Εικόνα 12. Πλάτη μηνιαίας/δεκαπενθήμερων (πάνω) και ετήσιας/ημιετήσιας (κάτω) συνιστωσών παλίρροιας για τον κόλπο της Σούδας (1982 – 2003) και για την περιοχή ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (2018 – 2019) (Πηγή δεδομένων 1982 – 2003: Παπαδόπουλος, 2009).

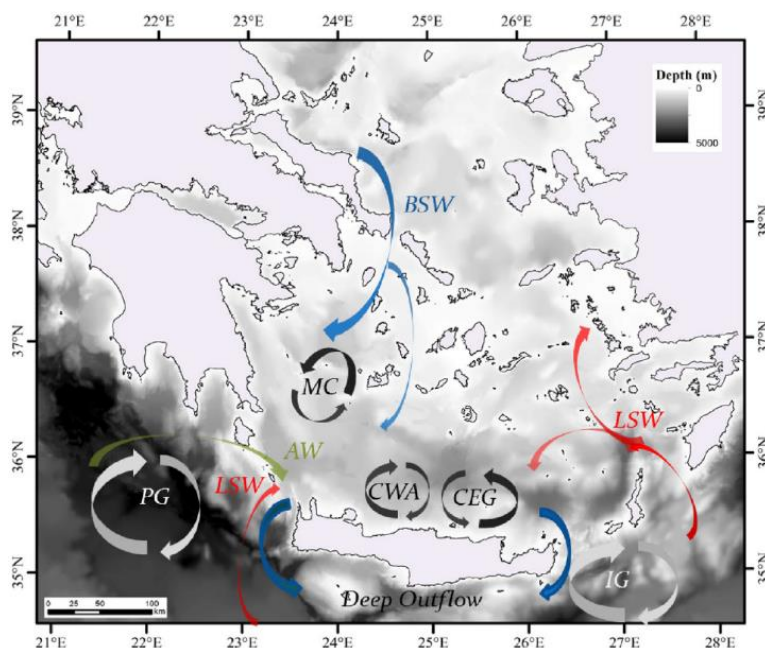
2.3 Θαλάσσια ρεύματα

2.3.1 Κυκλοφορία υδάτων στην Ανατολική Μεσόγειο και το Αιγαίο

Η εικόνα της γενικής κυκλοφορίας υδάτων στην Μεσόγειο θάλασσα είναι περίπλοκη και αποτελείται από τρεις κυρίαρχες αλληλεπιδρώσες χωρικές κλίμακες; κλίμακα ολόκληρης της Μεσογειακής λεκάνης (συμπεριλαμβανομένης της κατακόρυφης – θερμόαλης κυκλοφορίας), κλίμακα υπολεκανών (Δυτικής – Ανατολικής Μεσογείου) και μεσοκλίμακα (50-500 km). Η πολυπλοκότητα της κυκλοφορίας αλλά και οι προαναφερθείσες κλίμακες προκύπτουν από τις πολλαπλές κινητηρίες δυνάμεις του περιβάλλοντος της Μεσογείου, από τις έντονες τοπογραφικές και παράκτιες επιρροές αλλά και από εσωτερικές δυναμικές διεργασίες (Hamad et al., 2006; Robinson et al., 2001).

Εστιάζοντας στα μοτίβα κυκλοφορίας του Νότιου Αιγαίου και των παρακείμενων θαλασσών, από τα επιφανειακά έως τα ενδιάμεσου βάθους στρώματα, αυτά παρουσιάζουν σημαντική μεταβλητότητα. Στο Αιγαίο παρατηρείται μια γενική κυκλωνική κυκλοφορία κατά μήκος των ανατολικών και δυτικών ακτών του. Έξω από την λεκάνη του Αιγαίου, μόνιμα δυναμικά συστήματα παίζουν σημαντικό ρόλο στην εισροή και εκροή θαλάσσιων μαζών διαμέσου των Κρητικών Στενών. Στη Νοτιοανατολική πλευρά του Ιονίου, μέχρι και τα στενά των Κυθήρων, κυριαρχεί ένας αντικυκλωνικός σχηματισμός, γνωστός και ως «Πέλοπας» (Pelops Gyre, PG) (Εικόνα 13). Στο νοτιοανατολικό τμήμα κυριαρχεί ο αντικυκλωνικός

σχηματισμός της Ιεράπετρας (Ierapetra Gyre, IG) (*Kassiss et al., 2016*). Στο Κρητικό πέλαγος κυριαρχούν στα ανώτερα στρώματα δύο δίνες (eddies). Η μία είναι ο Δυτικός Κρητικός αντικυκλώνας (West Cretan anticyclone) και η άλλη ο ανατολικός Κρητικός κυκλώνας (Cretan Eastern gyre). Αυτό το κυκλωνικό/αντικυκλωνικό δίπολο στο κέντρο του Κρητικού πελάγους είναι η αιτία δημιουργίας ΝΔ και ΝΑ ρευμάτων κατά μήκος των ΒΔ και ΒΑ ακτών της Κρήτης αντίστοιχα (*Kassiss et al., 2015; Theocharis et al., 1999*).



Εικόνα 13. Βαθυμετρία και απεικόνιση κυκλοφορίας Νοτίου Αιγαίου. BSW Black Sea Water, MC Myrtoan Cyclone, LSW Levantine Surface Water, AW Atlantic Water, PG Pelops Gyre, CWA Cretan Western anticyclone, CEG Cretan Eastern Gyre, IG Ierapetra Gyre (Πηγή: (*Kassiss et al., 2015*)).

2.3.2 Ρεύματα στον κόλπο Χανίων

Στο πλαίσιο των δειγματοληψιών της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της έντασης των ταχυτήτων και των διευθύνσεων των ρευμάτων εγκάρσια στην υδάτινη στήλη. Οι συγκεκριμένες μερήσεις ήταν συμπληρωματικές στην καταγραφή των θαλάσσιων παραμέτρων που πραγματοποιήθηκαν. Ο κυριότερος λόγος αφορούσε τον περιορισμό που έθεταν οι λεπτομερείς καταγραφές των ρευμάτων στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας που τροφοδοτούσε το όργανο. Το ίδιο όργανο κατέγραφε και την ανύψωση της στάθμης της θάλασσας προκειμένου να εξαχθούν χαρακτηριστικές κυματικές παράμετροι. Δεδομένου λοιπόν ενός εκ των βασικότερων στόχων της παρούσας έρευνας, ο οποίος ήταν η μακροχρόνια καταγραφή του κυματικού καθεστώτος, αποφασίστηκε οι καταγραφές των ρευμάτων να είναι συνοπτικές προς όφελος της εξοικονόμησης ενέργειας της μπαταρίας.

Λεπτομέρειες για την αρχή λειτουργίας συλλογής ρευματικών δεδομένων του δίνονται στην ενότητα **3.1.1**.

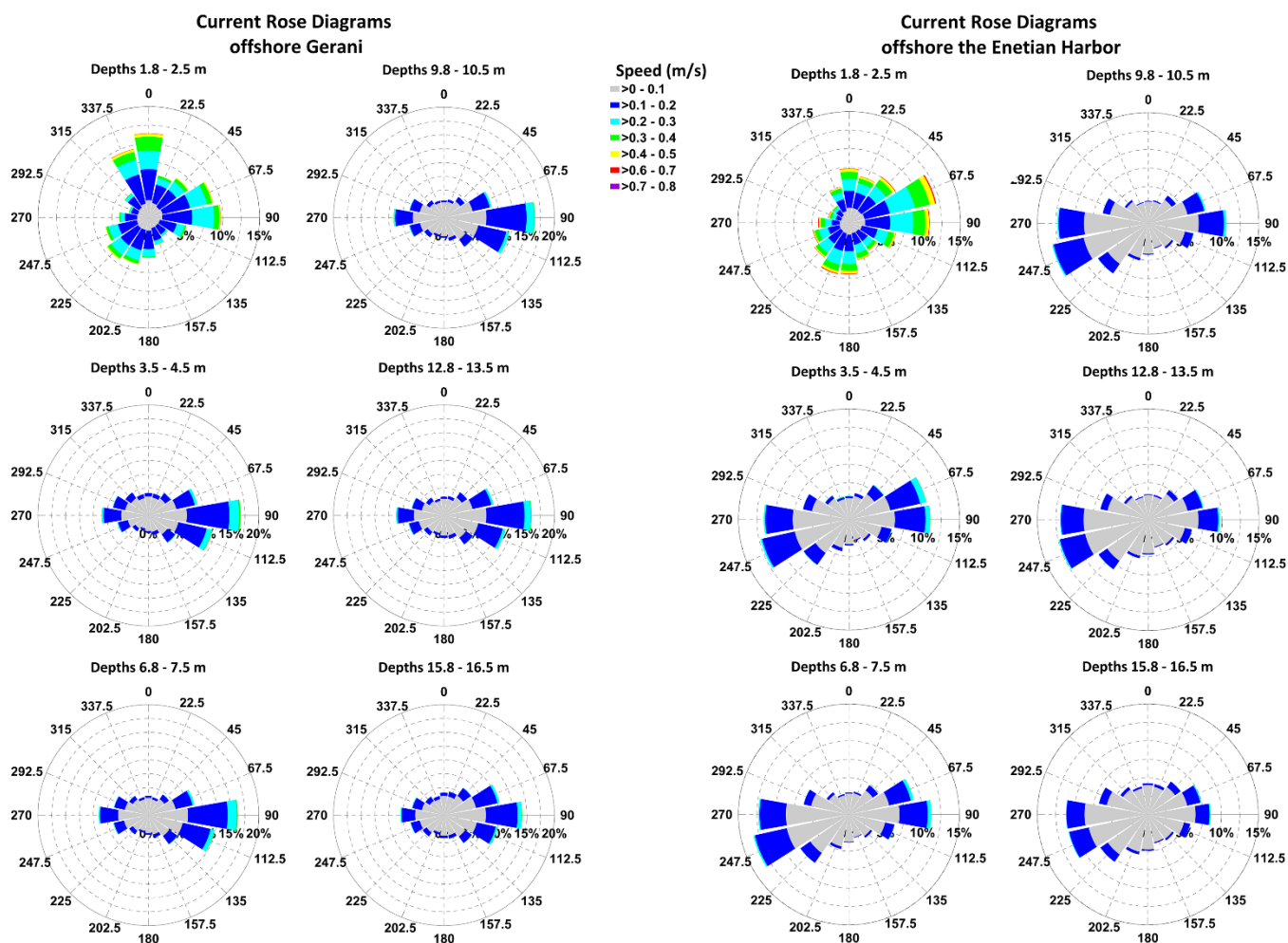
Οι μετρήσεις των ρευμάτων αντιστοιχούν στις χρονικές περιόδους μετρήσεων της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας. Η πλειονότητα των μετρήσεων είναι διάρκειας 120 s ανά 20 min, υπάρχουν όμως και καταγραφές των 60 s ανά 10 min. Ορίστηκαν να λαμβάνονται ανά ένα μέτρο. Τα αποτελέσματα μέσης ταχύτητας και διεύθυνσης προκύπτουν από τον μέσο όρο των 120 s ή 60 s και αφορούν σε δύο τοποθεσίες του κόλπου στις οποίες ποντίστηκαν τα όργανα καταγραφής (**Εικόνα 19a**). Η μία τοποθεσία είναι ανοιχτά της εισόδου του Ενετικού λιμένα και η άλλη ανοιχτά της περιοχής Γεράνι, στο μέσο περίπου του Κόλπου Χανίων.

Στα ροδογράμματα της **Εικόνα 14** απεικονίζονται οι κατανομές των μέσων ταχυτήτων σε διαφορετικές διευθύνσεις για διάφορα βάθη στις δύο προαναφερθείσες τοποθεσίες. Και στις δύο τοποθεσίες είναι εντονότερα τα ρεύματα στα επιφανειακά βάθη μέχρι 2.5 m. Σε αυτά τα βάθη οι τιμές των μέσων ταχυτήτων άνω των 0.2 m/s κατέχουν μεγάλα ποσοστά στο σύνολο των διευθύνσεων. Από τα 3.5 m βάθος και κάτω, ταχύτητες ρευμάτων μεταξύ 0.2 και 0.3 m/s κατέχουν αξιόλογα ποσοστά εμφάνισης στις κύριες διευθύνσεις, αλλά τιμές μεγαλύτερες από αυτές είναι αμελητέες.

Πιο συγκεκριμένα, στην τοποθεσία Γεράνι, τα μεγαλύτερα ποσοστά εμφάνισης στα επιφανειακά νερά βάθους 1.8 - 2.5 m, παρουσιάζονται στις BBA - B και ABA - A διευθύνσεις. Ακολουθούν τα εύρη διευθύνσεων NNA - ΔNA και BBA - BA. Σε όλες τις παραπάνω διευθύνσεις οι μέσες ταχύτητες άνω των 0.3 m/s εμφανίζονται σε αξιόλογα ποσοστά. Στα μεγαλύτερα βάθη από 3.5 - 16.5 m η εικόνα είναι τελείως διαφορετική και σχεδόν ομοιόμορφη. Κυριάρχη διεύθυνση των ρευμάτων είναι η A και ακολουθούν οι ANA και ABA διευθύνσεις. Αξιόλογο ποσοστό εμφανίζεται επίσης στην Δ διεύθυνση. Οι μέσες ταχύτητες που κυριαρχούν σε αυτά τα βάθη είναι μέχρι 0.2 m/s. Μόνο στις κύριες διευθύνσεις παρατηρούνται εμφανή ποσοστά ταχυτήτων μεταξύ 0.2 - 0.3 m/s.

Στην τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα η εικόνα της κατανομής των διευθύνσεων διαφέρει. Στα επιφανειακά νερά βάθους 1.8 - 2.5 m οι κύριες διευθύνσεις είναι η ABA και A. Ακολουθούν τα εύρη των διευθύνσεων B - BA και N - NNA. Όπως και στην τοποθεσία του Γερανίου, έτσι κι εδώ, οι μέσες ταχύτητες άνω των 0.3 m/s εμφανίζονται σε όλους τους τομείς των διευθύνσεων. Όσον αφορά τα μεγαλύτερα βάθη, η εικόνα είναι μερικώς ομοιόμορφη όπως και στο Γεράνι αλλά όχι στον ίδιο βαθμό. Οι Δ και ΔNA διευθύνσεις υπερτερούν ενώ μέχρι και τα 7.5 m βάθος ξεχωρίζουν και οι A και ABA διευθύνσεις. Και πάλι οι τιμές των μέσων ταχυτήτων είναι σε συντριπτικό ποσοστό μέχρι τα 0.2 m/s. Αξιοσημείωτη είναι η παρατήρηση ότι και σε αυτή την τοποθεσία οι τιμές μέσων ταχυτήτων μεταξύ 0.2 - 0.3 m/s, έχουν

μεγαλύτερα ποσοστά εμφάνισης στις Α και ΑΒΑ διευθύνσεις όπως και στην τοποθεσία του Γερανίου.



Εικόνα 14. Ροδογράμματα μέσης ταχύτητας και μέσης διεύθυνσης ρευμάτων για συγκεκριμένα εύρη βαθών στις περιοχές ανοιχτά του Γερανίου (αριστερά) και του Ενετικού λιμένα (δεξιά).

Συνοπτικά, βάσει των παραπάνω φαίνεται ότι για τα επιφανειακά νερά μέχρι 2.5 m, και στις δύο τοποθεσίες τα ρεύματα παρουσιάζουν σαφή τάση από τις Α – ΑΒΑ διευθύνσεις. Στην τοποθεσία του Γερανίου ρεύματα προερχόμενα από την Β – ΒΒΔ διεύθυνση εμφανίζουν μεγαλύτερα ποσοστά από την τοποθεσία του Ενετικού λιμένα. Για τα μεγαλύτερα βάθη, μια πρώτη εκτίμηση θα μπορούσε να είναι ότι στις δύο τοποθεσίες τα ρεύματα έχουν σχεδόν αντίθετες διευθύνσεις, βάσει των κυρίαρχων ποσοστών εμφάνισης. Α και ΑΝΑ διευθύνσεις στην τοποθεσία του Γερανίου και Δ, ΔΝΔ στον Ενετικό λιμένα. Το γεγονός όμως ότι και στις δύο τοποθεσίες τα ποσοστά των μέσων ταχυτήτων μεταξύ 0.2 – 0.3 m/s εμφανίζονται αυξημένα στο εύρος των ΑΒΑ – ΑΝΑ διευθύνσεων, υποδηλώνει πιθανώς την ροή ρευμάτων από αυτές τις διευθύνσεις κατά μήκος του κόλπου Χανίων. Το ίδιο θα μπορούσε να πει κανείς και για τα επιφανειακά στρώματα, καθώς παρόλο που οι ΑΒΑ και Α διευθύνσεις στην τοποθεσία του Γερανίου εμφανίζονται σε χαμηλότερο ποσοστό, δεν παύουν να είναι αυξημένες.

Παρόλο που δεν δόθηκε η δέουσα προσοχή στην μεθοδολογία μετρήσεων των ρευμάτων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, τα παραπάνω αποτελέσματα χρήζουν τουλάχιστον περισσότερης προσοχής και έρευνας. Ένα πιο στοχευμένο πλάνο σημειακών δειγματοληψιών (όπως οι συγκεκριμένες) σε συνδυασμό με μετρήσεις τύπου Lagrange μέσω παρασυρόμενων πλωτήρων (drifters), θα έδινε μια πιο σαφή εικόνα για την κυκλοφορία των ρευμάτων στον κόλπο Χανίων.

2.4 Κυματικό καθεστώς και κυματισμοί σχεδιασμού για κόλπο Χανίων

Μακροχρόνια καταγραφή του κυματικού καθεστώτος στον κόλπο Χανίων δεν είχε γίνει κατά το παρελθόν και πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής. Κυματικά δεδομένα σε βάθος χρόνου είναι απαραίτητα προκειμένου μέσω των κατάλληλων στατιστικών αναλύσεων να οριστούν παράμετροι σχεδιασμού για οποιαδήποτε εφαρμογή έργου προστασίας των ακτών ή παράκτιων υποδομών (η συνηθέστερη παράμετρος που χρησιμοποιείται είναι το σημαντικό ύψος κύματος).

Για την καλύτερη δυνατή εφαρμογή των στατιστικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται στην μακροχρόνια στατιστική ανάλυση (long term wave analysis), βασική προϋπόθεση αποτελεί το σετ δεδομένων να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερης διάρκειας. Εάν η διάρκεια του δεν είναι επαρκής, και οι καταργίδες της περιόδου των δεδομένων είναι εντονότερες ή πιο ήπιες του συνηθισμένου, τότε και οι εκτιμώμενες παράμετροι σχεδιασμού θα είναι υπερεκτιμημένες ή υποεκτιμημένες, αντίστοιχα. Το σφάλμα αυτό είναι μεγαλύτερης σημαντικότητας στην περίπτωση που αναζητούνται ακραίες τιμές των παραμέτρων. Ανάλογα με την στατιστική μέθοδο που χρησιμοποιείται ακόμα και 20 χρόνια συνεχών καταγραφών μπορεί να είναι λίγα και να δίνουν μεγάλο εύρος διαστήματος εμπιστοσύνης (Goda, 2010). Επίσης και οι Fröhle & Kohlhase, 2001 διαπίστωσαν ότι ένα σετ δεδομένων περίπου 20 χρόνων είναι απαραίτητο προκειμένου να βγουν αξιόπιστες εκτιμήσεις για κύματα σχεδιασμού με περίοδο επαναφοράς 20, 50 και 100 χρόνων. Πέραν της συνολικής διάρκειας του δείγματος όμως, έδειξαν ότι και το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της λήψης μετρήσεων παίζει ρόλο στην εκτίμηση του κύματος σχεδιασμού. Τόσο μεγάλα σετ δεδομένων πεδίου όμως σπανίζουν. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται πολλές φορές μεταγενέστερες εκτιμήσεις (δεδομένα hindcasting), οι οποίες αφορούν προσομοιώσεις κυματικών χαρακτηριστικών που λαμβάνονται μέσω μεθόδων ανασύνθεσης του κυματικού κλίματος με τη βοήθεια ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων (Σουκισιάν και Προσπαθόπουλος, 2003; Perez et al., 2017; Rusu et al., 2008; Shimura and Mori, 2019).

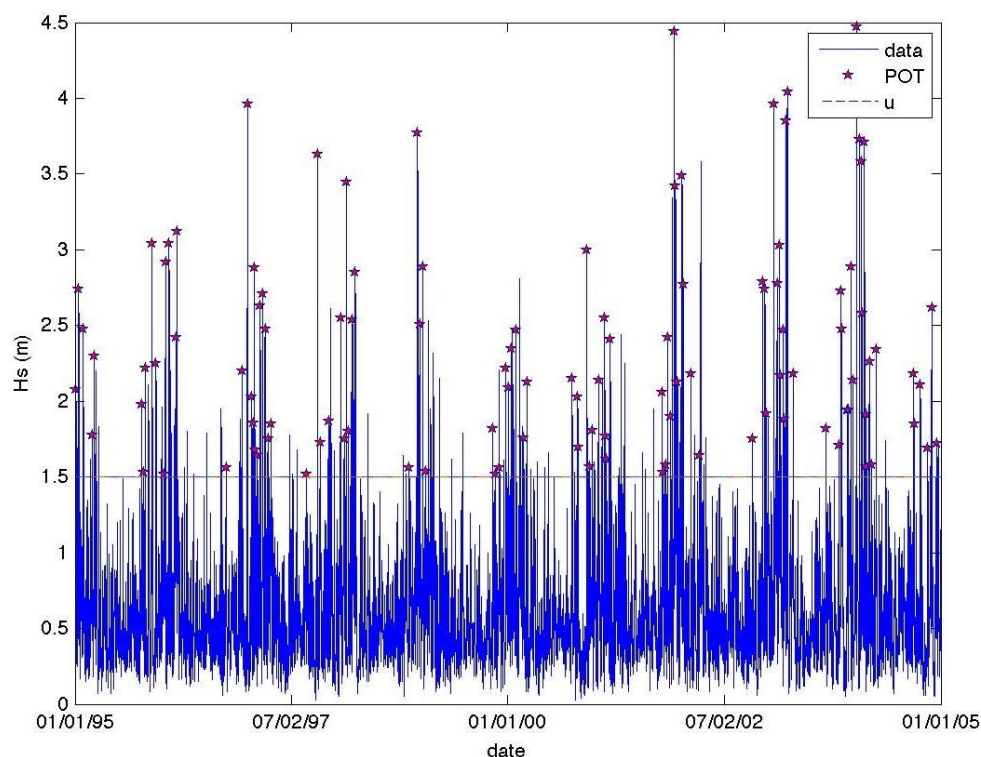
Μπορεί η καταγραφή του κυματικού καθεστώτος στην παρούσα διατριβή να είναι η πλέον μακροχρόνια που υπάρχει για τον κόλπο Χανίων (σχεδόν δεκαετίας), αλλά υπάρχουν σε αυτήν κενές περίοδοι δεδομένων. Τα κενά αυτά είναι τέτοιας διάρκειας ώστε να κάνουν επισφαλή την εφαρμογή των όποιων μεθόδων για τον καθορισμό κυματικών παραμέτρων σχεδιασμού σε καθορισμένες χρονικές περιόδους επαναφοράς.

Οι *Συνολάκης et al. (2011)*, στο πλαίσιο ερευνητικής μελέτης που εκπόνησαν για το Δημοτικό Λιμενικό Ταμείο Χανίων για την χωροθέτηση μαρίνας στο παράκτιο μέτωπο του Δήμου Χανίων, εφάρμοσαν μακροπρόθεσμη στατιστική ανάλυση του κυματικού καθεστώτος στον κόλπο Χανίων με αριθμητικά δεδομένα από τον κυματικό άτλαντα του ΕΛΚΕΘΕ (*Soukissian et al., 2008*). Τα κυματικά δεδομένα αποτελούσαν προϊόν της εφαρμογής του προγνωστικού κυματικού μοντέλου τρίτης γενιάς WAM-Cycle 4, στο Αιγαίο Πέλαγος για χρονικό διάστημα 10 ετών (1995-2004). Για τη μοντελοποίηση του κυματικού κλίματος χρησιμοποιήθηκαν τα ανεμολογικά δεδομένα του συστήματος European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) και δεδομένα τοπογραφίας με μέγεθος κελιού 0.1° (~10km).

Στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν κυματισμοί από τους μήνες Σεπτέμβριο έως Απρίλιο, οπότε και συμβαίνουν οι κυματικές καταιγίδες στην περιοχή μελέτης. Επίσης, οι κύριες διευθύνσεις των κυματισμών κατά την διάρκεια καταιγίδων είναι από ΒΒΔ έως ΒΒΑ λόγω του αυξημένου αναπτύγματος πελάγους στις συγκεκριμένες διευθύνσεις (*Συνολάκης et al., 2011*). Η διαλογή έγινε κατ'αυτόν τον τρόπο προκειμένου να εξασφαλιστεί η μέγιστη δυνατή σταθερότητα του δείγματος. Από στατιστικής πλευράς, η μεταβολή στον χρόνο μιας χρονοσειράς σημαντικών υψών κύματος, είναι μια συνεχής μη σταθερή (non-stationary) διεργασία (*Mathiesen et al., 1994*). Η έλλειψη σταθερότητας οφείλεται στις εποχικές διακυμάνσεις που παρουσιάζει το σημαντικό ύψος κύματος στην περιοχή, καθώς τους θερινούς μήνες η κατάσταση της θάλασσας είναι σαφώς πιο ήρεμη σε σχέση με τους χειμερινούς.

Από την παραπάνω διαλογή εντοπίστηκαν τα τοπικά μέγιστα ύψη κύματος άνω ενός ορίου u , με τη μέθοδο στατιστικής ανάλυσης ακραίων τιμών των ανεξάρτητων υπερβάσεων κατάλληλα προσδιορισμένων ορίων (POT, Peak Over Threshold) (*Συνολάκης et al., 2011*). Μέσω αυτής της μεθόδου διαχωρίστηκαν οι τιμές σημαντικού ύψους κύματος που αντιστοιχούν σε καταιγίδες. Η τιμή του ορίου που επιλέχτηκε ήταν τέτοια ώστε ο μέσος αριθμός κορυφών (ανά έτος) που υπερβαίνουν το προκαθορισμένο όριο να είναι ίσος (ή λίγο μικρότερος) από τον μέσο αριθμό καταιγίδων που συμβαίνουν ανά έτος στην περιοχή μελέτης (*Mathiesen et al., 1994*). Επίσης, η χρήση της μεθόδου POT προαπαιτεί ότι οι μέγιστες τιμές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Για να επιτευχθεί αυτό έπρεπε να εξασφαλιστεί ότι το κάθε τοπικό μέγιστο αντιστοιχούσε σε διαφορετικό κυματικό γεγονός. Για τον λόγο αυτό τέθηκε ένα

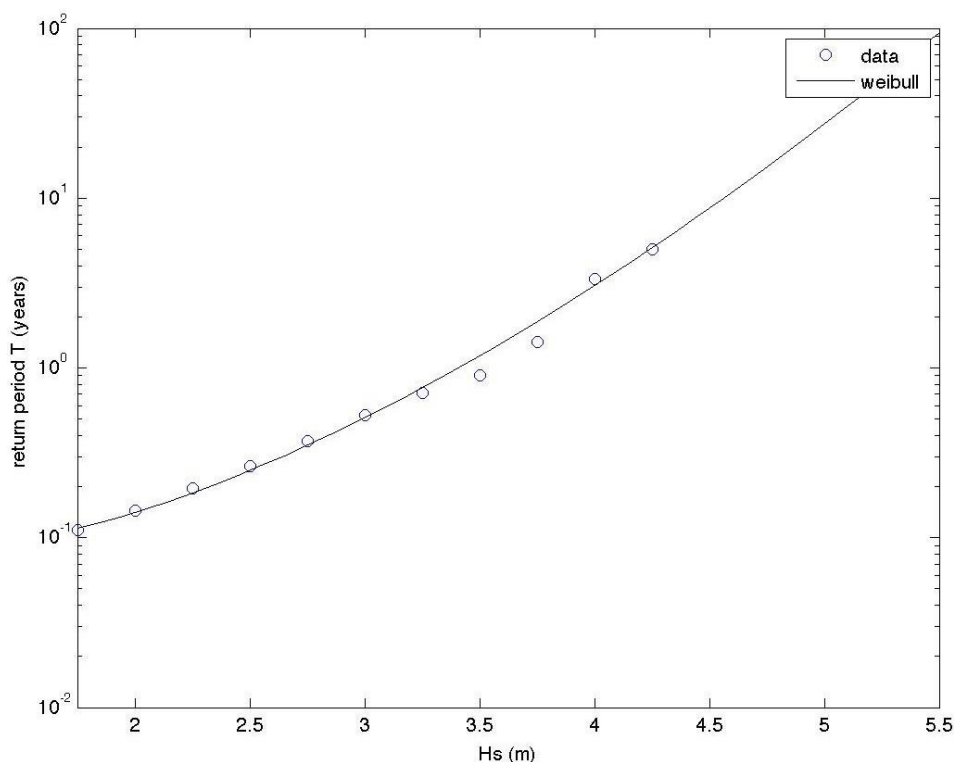
ασφαλές (ελάχιστο) χρονικό διάστημα μεταξύ των τοπικών μέγιστων του δείγματος ίσο με 3 μέρες (Mathiesen et al., 1994). Μετά από την δοκιμή τιμών $1.5 \leq u \leq 2.25$ m ως όριο για τη μέθοδο POT, επιλέχθηκε τελικώς η τιμή $u = 1.5$ m με τελικό αριθμό δείγματος 112 τιμές σημαντικού ύψους κύματος (Εικόνα 15). Η στατιστική κατανομή που εφαρμόστηκε σε αυτά τα 112 δεδομένα προκειμένου να εξαχθούν οι κυματισμοί σχεδιασμού για διαφορετικές περιόδους επαναφοράς ήταν η Weibull τριών παραμέτρων (Mathiesen et al., 1994; Συνολάκης et al., 2011).



Εικόνα 15. Χρονοσειρά σημαντικών υψών κύματος για την περίοδο 1994-2004 από τον κυματικό Άτλαντα του ΕΛΚΕΘΕ. Με κόκκινο οι τιμές που επιλέχθηκαν για την στατιστική ανάλυση ακραίων τιμών (POT) βάσει του ορίου $u=1.5$ m (Πηγή: (Συνολάκης et al., 2011)).

Στο γράφημα της Εικόνα 16 δίνεται η καμπύλη κατανομής Weibull για τους κυματισμούς σχεδιασμού για διαφορετικές τιμές επαναφοράς. Η εφαρμογή της καμπύλης στα δεδομένα είναι εμφανώς ικανοποιητική. Από την συγκεκριμένη καμπύλη προκύπτει ότι κυματισμοί σημαντικού ύψους κύματος 4.5 m έχουν περίοδο επαναφοράς 1:9 έτη, κυματισμοί σημαντικού ύψους κύματος 5 m έχουν περίοδο επαναφοράς 1:27 έτη ενώ κυματισμοί σημαντικού ύψους κύματος 5.5 m έχουν περίοδο επαναφοράς 1:90 έτη. Οι παραπάνω τιμές σημαντικού ύψους κύματος αντιστοιχούν σε ισχυρές καταιγίδες οι οποίες προκαλούν σοβαρά προβλήματα στο παράκτιο μέτωπο του κόλπου Χανίων. Όπως παρουσιάζεται όμως παρακάτω στις μετρήσεις πεδίου (βλ. Πίνακας 10), τα συγκεκριμένα κυματικά γεγονότα έχουν καταγραφεί ήδη αρκετές φορές στο πέρας της δεκαετίας των μετρήσεων της παρούσας εργασίας. Για την ακρίβεια, την τελευταία πενταετία 2015 – 2020, τέσσερις φορές έχουν καταγραφεί γεγονότα με τιμές

σημαντικού ύψους κύματος μεταξύ 4.5 και 5 m, δύο φορές με τιμές μεταξύ 5 και 5.5 m και άλλες δύο φορές με τιμές μεταξύ 5.5 και 6 m.



Εικόνα 16. Οι τιμές επαναφοράς (return values) από την κατανομή Weibull και οι τιμές του δείγματος (Πηγή: (Συνολάκης *et al.*, 2011)).

Η συχνότερη παρουσία υψηλών τιμών σημαντικού ύψους κύματος στις μετρήσεις πεδίου, σε σχέση με την περίοδο επαναφοράς που δίνει η στατιστική ανάλυση, μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους λόγους. Μπορεί απλά να έτυχε τα συγκεκριμένα γεγονότα μεγαλύτερης επαναφοράς να συνέβησαν και να καταγράφηκαν την τελευταία πενταετία και συνεπώς τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης να είναι ορθά. Από την άλλη μπορεί το αριθμητικό μοντέλο να μην είναι ικανό να προσομοιώσει τις συγκεκριμένες συνθήκες στον κόλπο Χανίων. Ακόμα, μπορεί οι ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούσαν εκείνη την δεκαετία, και βάση των οποίων έγιναν οι προσομοιώσεις, να ήταν πιο ήπιες απ'ότι σήμερα. Μπορεί ακόμα και το όριο του 1.5m σημαντικού ύψους κύματος που τέθηκε στην ανάλυση ακραίων τιμών να ήταν τόσο χαμηλό ώστε να οδηγεί σε εσφαλμένες ή υποεκτιμημένες τιμές επαναφοράς. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι ακόμα και ένα συνεχές δεκαετές σετ δεδομένων συγκεκριμένης περιόδου μπορεί να μην είναι αρκετό για ασφαλή εξαγωγή κυματισμών σχεδιασμού. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις, εφ'όσον ισχύουν, έχουμε υποεκτίμηση των κυματισμών σχεδιασμού όσον αφορά κυρίως στις περιόδους επαναφοράς.

Όλοι οι παραπάνω λόγοι καταδεικνύουν την σημαντικότητα των μακροχρόνιων μετρήσεων πεδίου στον υπολογισμό κυματισμών σχεδιασμού. Παρ'ότι σίγουρα πιο κοστοβόρες από την εκτέλεση αριθμητικών προσομοιώσεων, καταφέρνουν και αποτυπώνουν

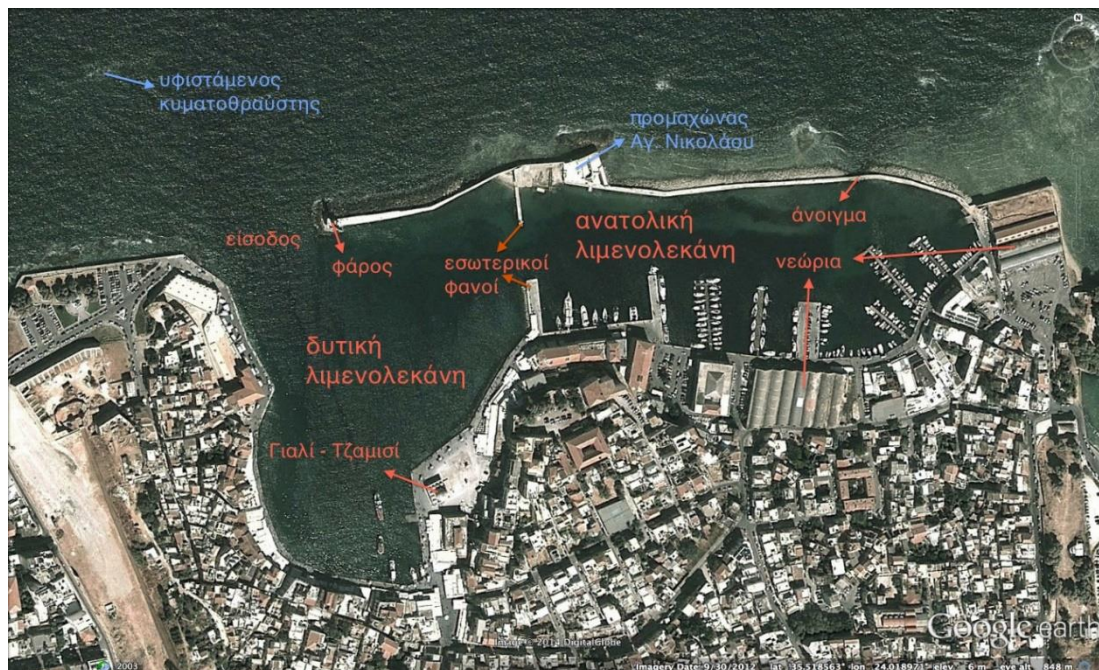
το πραγματικό κυματικό καθεστώς σε μία περιοχή. Ακόμα μεγαλύτερης ίσως σημασίας, αποτελεί το γεγονός ότι καταγράφονται οι μεταβολές του στο χρόνο μακροπρόθεσμα, οι οποίες μπορεί να επηρεάζονται περιοδικά από μετεωρολογικά φαινόμενα μεγαλύτερης κλίμακας της περιοχής μελέτης (*Lionello et al., 2006*).

2.5 Ο Ενετικός λιμένας Χανίων

Ο Ενετικός λιμένας Χανίων κτίστηκε κατά τον 14ο αιώνα μ.Χ. επί Ενετοκρατίας. Παρ'όλο που η κύρια χρήση του ήταν εμπορική, η δυναμικότητα του σε αριθμό ελλιμενιζόμενων πλοίων ήταν περιορισμένη. Αποτελούσε τον κύριο λιμένα του νομού Χανίων, ως τα μέσα του 20ου αιώνα, όπου ο φυσικός (προστατευμένος από τους βόρειους κυματισμούς) κόλπος της Σούδας έγινε ο κύριος εμπορικός/επιβατικός λιμένας. Λόγω του περιορισμένου μεγέθους και βάθους, τα μεγάλα πλοία επρέπε να μείνουν αγκυροβολημένα έξω από τον Ενετικό λιμένα και τα εμπορεύματα/επιβάτες μεταφέρονταν με βάρκες στην πλατεία μπροστά από το Γιαλί Τζαμιά. Το λιμάνι επίσης εξυπηρετούσε υπηρεσίες επισκευής/συντήρησης πλοίων στα νεώρια (επισκευαστικές ζώνες των Ενετών) τα οποία κτίστηκαν τον 14ο-15ο αιώνα. Τα νεώρια εγκαταλήφθηκαν σταδιακά επί Τουρκοκρατίας και κάποια μετατράπηκαν σε αποθήκες (*Συνολάκης et al., 2015*).

Βασική προστασία από τους βόρειους κυματισμούς προσφέρει ο βόρειος λιμενοβραχίονας ο οποίος είναι θεμελιωμένος τμηματικά σε ύφαλους. Ο λιμενοβραχίονας ξεκινάει από τα νεώρια του Μορο στα ανατολικά (ένα από τα οποία στεγάζει σήμερα τον Ιστιοπλοϊκό Όμιλο Χανίων), όπου στο μέσον περίπου του μήκους του βρίσκεται ο προμαχώνας του Αγ. Νικολάου και στο δυτικό άκρο ο φάρος. Επίσης, σημαντικό στοιχείο του λιμένα αποτελεί το άνοιγμα πλάτους ~4m, που βρίσκεται κοντά στο ανατολικό άκρο του λιμενοβραχίονα και επιτρέπει την ανανέωση των υδάτων της λιμενολεκάνης (**Εικόνα 17**).

Η διαμόρφωση του λιμένα έχει τροποποιηθεί πολλές φορές στο παρελθόν από την αρχική κατασκευή του (**Εικόνα 18**). Ο λιμενοβραχίονας αρχικά δεν είχε επαφή με τον λιμένα μέχρι που κτίστηκαν τα νεώρια του Μορο στο ανατολικό του τμήμα. Η πλατεία όπου θεμελιώθηκε το τέμενος Γιαλί Τζαμιά κατασκευάστηκε επί Ενετοκρατίας. Μεταγενέστερα, επί Κρητικής Πολιτείας επεκτάθηκαν σταδιακά τα κρηπιδώματα και ξεκίνησε να κατασκευάζεται ο παραλιακός δρόμος. Οι δύο μόλοι που ξεχωρίζουν την ανατολική και δυτική λιμενολεκάνη και όπου στα άκρα τους εδράζουν οι εσωτερικοί φανοί του λιμένα, κατασκευάστηκαν την περίοδο μεταξύ 1890-1970 (*Συνολάκης et al., 2015*).



Εικόνα 17. Κάτοψη Ενετικού λιμένα Χανίων με σημειωμένα τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.

Η θέση και ο προσανατολισμός του λιμένα δεν είναι ευνοϊκοί για την χωροθέτηση τέτοιου έργου, κάτι το οποίο γνώριζαν οι Ενετοί. Ο κόλπος Χανίων προσβάλλεται κυρίως από τους βόρειους κυματισμούς λόγω του αναπτύγματος πελάγους στη συγκεκριμένη κατεύθυνση και λόγω της διεύθυνσης των ανέμων που πνέουν στην περιοχή του Αιγαίου και Κρητικού Πελάγους. Επίσης, ο προσανατολισμός της εισόδου του λιμένα καθιστά τον λιμένα εκτεθειμένο στους δευτερεύοντες ΒΒΔ και ΒΔ κυματισμούς που συναντώνται συχνά στον κόλπο Χανίων (βλέπε ενότητα 6.1.1.β). Πάρα ταύτα, οι Ενετοί προχώρησαν στην κατασκευή του λιμένα. Η δυτική λιμενολεκάνη που είναι πιο εκτεθειμένη στους κυματισμούς δεν προσφέρει προστασία κατά τη διάρκεια έντονων καταιγίδων. Η ανατολική λιμενολεκάνη, ενώ είναι προστατευμένη από τους κυματισμούς, παρουσιάζει προβλήματα πρόσχωσης ιζημάτων και ανανέωσης των υδάτων και έχει χρειαστεί αρκετές φορές στο παρελθόν βυθοκόρηση ιζήματος για να παραμείνει λειτουργική. Στην σημερινή κατάσταση η πρόσχωση έχει δημιουργήσει μία περιοχή με αβαθή νερά και μια μικρή παραλία νότια του λιμενοβραχίονα, μόλις δυτικά του ανοίγματος.

Οι ελλιμενιζόμενοι έχουν προσαρμοστεί στην απουσία έργων προστασίας του λιμένα από τους κυματισμούς καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Η ανατολική λιμενολεκάνη παρέχει ασφαλή ελλιμενισμό για τα σκάφη καθόλη τη διάρκεια του έτους, ενώ στην δυτική προσδένουν σκάφη μόνο όταν η θάλασσα είναι ήρεμη, κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Όμως, οι κυματισμοί που προσβάλλουν τον λιμένα επιφέρουν κόπωση των υλικών και υποσκαφή στους κρηπιδότοιχους, ενώ ο παραλιακός δρόμος και τα καταστήματα επί της Ακτής Κουντουριώτη και Τομπάζη πλημμυρίζουν λόγω της υπερπήδησης των κυμάτων στους κρηπιδότοιχους κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων (Εικόνα 6) (Συνολάκης *et al.*, 2015). Οι λόγοι αυτοί οδήγησαν

σε μία σειρά από προμελέτες και μελέτες προστασίας της εισόδου του λιμένα για την απόσβεση της ενέργειας των κυματισμών. Παρακάτω δίνεται μια σύντομη αναφορά στις μελέτες αυτές.



Εικόνα 18. Εξέλιξη του Ενετικού λιμένα στο χρόνο δεξιόστροφα από επάνω αριστερά. Πάνω αριστερά η μορφή του λιμένα κατά το δεύτερο μισό του 16^{ου} αιώνα. Πάνω δεξιά και κάτω δεξιά κατά το πρώτο μισό του 17^{ου} αιώνα. Κάτω αριστερά στη σημερινή του μορφή.

2.5.1 Ιστορικό μελετών προστασίας και κατασκευής έργων προστασίας

Η πρώτη μελέτη προστασίας του Ενετικού λιμένα Χανίων ανατέθηκε από το τότε Υπουργείο Συντονισμού, σε φάση προμελέτης, στο Τεχνικό Γραφείο «ΙΠΠΟΔΑΜΟΣ Κ.Μ.Π.Ε.» σε κοινοπραξία με τους Γ. Αντωνόπουλο, Π. Κοτζιά και Α. Σταματόπουλο. Ο στόχος της προμελέτης ήταν η προστασία του Ενετικού λιμένα από του κυματισμούς, οι οποίοι δημιουργούν συνθήκες αναταραχής, διάβρωση και γήρανση στο μεγαλύτερο τμήμα του. Οι συναρμόδιες υπηρεσίες (Αρχαιολογική Υπηρεσία, Τοπική Αυτοδιοίκηση κ.α.) έθεσαν ως όρο να μη θίγεται το διαμορφωμένο περιβάλλον από τα προτεινόμενα έργα προστασίας. Έπομένως, σχεδιάστηκε ύφαλος κυματοθραύστης μήκους 200m, ο οποίος δεν δημιουργεί οπτική όχληση. Η προμελέτη εγκρίθηκε το 1981 με απόφαση του Υπουργείου Δημοσίων Έργων και η τελική μελέτη ανατέθηκε το 1984 στο Τεχνικό Γραφείο Ι. Παπαπάνος κατόπιν διαγωνισμού που ανακηρύχθηκε από την Διεύθυνση Τεχνικών Υπηρεσιών Νομού Χανίων ([Συνολάκης et al., 2015](#)).

Ο παραπάνω μελετητής προχώρησε στον σχεδιασμό ύφαλου απεσπασμένου κυματοθραύστη για την προστασία της εισόδου του λιμένα. Το κύμα σχεδιασμού υπολογίστηκε μέσω εμπειρικών εξισώσεων, χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα ανεμολογικά στοιχεία και το ανάπτυγμα πελάγους στην κύρια, βόρεια διεύθυνση. Το σημαντικό, και μέγιστο ύψος κύματος υπολογίστικαν ως $H_s = 3.50$ m και $H_{max} = 6.5$ m αντίστοιχα. Ο σχεδιασμός έγινε βάσει του μέγιστου ύψους κύματος βόρειας διεύθυνσης, με περίοδο και μήκος κύματος στα βαθιά νερά $T_0 = 8$ s και $L_0 = 100$ m, αντίστοιχα (Παπαπάνος, 1984).

Μετά από τροποποίηση που ζητήθηκε από το Λιμενικό Ταμείο Χανίων (μετακίνηση του κυματοθραύστη παράλληλα κατά 30 m ΒΔ για να μεγαλώσει το ΒΑ στόμιο), ο κυματοθραύστης στην τελική του μορφή προτάθηκε να έχει μήκος 290 m. Όσον αφορά τη διεύθυνση του, η κάθετος στον άξονα του κυματοθραύστη δημιουργεί γωνία 150° σε σχέση με την κατεύθυνση του Βορρά. Η στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη υπολογίστηκε να είναι στα 0.5 m κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας και 0.06 m κάτω από τη στάθμη στην περίπτωση κατώτατης ρηχίας. Επομένως η στέψη του κυματοθραύστη υπερυψώθηκε όσο το δυνατόν περισσότερο για να επιτευχθεί η μέγιστη απόσβεση των κυματισμών, δίχως να γίνεται εμφανής. Το ελάχιστο πλάτος στέψης του κυματοθραύστη σχεδιάστηκε να είναι 18 m. Η διατομή του κυματοθραύστη αποτελείται από βάση με λίθους και λιθοσυντρίμματα, πρίσμα ποδός, πυρήνα από φυσικούς ογκόλιθους και θωράκιση από τετράποδα 20 τόνων (Παπαπάνος, 1985). Τέλος, προτείνονται έργα εκβάθυνσης του ανατολικού στομίου, απ' όπου προβλεπόταν η είσοδος στον λιμένα, και έργα προστασίας του κρηπιδότοιχου της δυτικής πλευράς του στομίου του λιμένα (φρούριο Φιρκά). Επίσης, για την αποφυγή ανακλάσεων στην ανατολική πλευρά του στομίου (φάρος) από του ΒΑ κυματισμούς, των οποίων η ενέργεια δεν μειώνεται από τον κυματοθραύστη, προτείνεται τοποθέτηση φυσικών ογκόλιθων (Παπαπάνος, 1985).

Το 1986 εγκρίθηκε με την Τ.Υ. οικ.5058/30-7-86 η κατασκευή κυματοθραύστη μήκους 105 m, προβλεπόμενου από την παραπάνω μελέτη. Η κατασκευή του δυτικού τμήματος 105 μέτρων του κυματοθραύστη ξεκίνησε το 1988 και τα έργα τελείωσαν το 1990. Ο προσανατολισμός και το πλάτος της στέψης του κυματοθραύστη τηρήθηκαν ως προβλέπονταν στην μελέτη, ενώ η στάθμη της στέψης υπερέβη τις προτεινόμενες τιμές της μελέτης. Η στέψη κατασκευάστηκε στο +0.70 m από τη Μ.Σ.Θ. στο ανατολικό τμήμα του κυματοθραύστη και φτάνει μέχρι το +1.00 m στο δυτικό τμήμα, με αποτέλεσμα ο κυματοθραύστης να είναι ορατός.

Το ίδιο έτος που εγκρίθηκε το πρώτο στάδιο κατασκευής του κυματοθραύστη (1986), ανατέθηκε στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π. (υπεύθυνος του εργαστηρίου ήταν ο Κ.Ι. Μουτζούρης, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός) το ερευνητικό πρόγραμμα με τίτλο «Ερευνα σε μαθηματικό ομοίωμα των κυματικών διαταραχών προ του στομίου του λιμένα Χανίων μετά την κατασκευή του ύφαλου κυματοθραύστη». Το αντικείμενο της έρευνας περιλάμβανε την

διερεύνηση των κυματικών διαταραχών προ του στομίου του λιμένα, i) μετά την πρώτη φάση κατασκευής του κυματοθραύστη (μήκους 105m), ii) μετά την ολοκλήρωση του έργου βάσει της μελέτης Παπαπάνου (κυματοθραύστης μήκους 290m), και iii) μετά την κατασκευή κυματοθραύστη ενδιάμεσου μήκους (μεταξύ 105m-290m).

Τα συμπεράσματα της έρευνας που ολοκληρώθηκε τον Μάιο του 1987 περιλαμβάνουν ποσοτική ανάλυση μέσω του υπολογισμού της μείωσης του ύψους κύματος κατάντη του κυματοθραύστη σε σχέση με το ύψος των κυμάτων στα βαθιά νερά για τα προαναφερθέντα κατασκευαστικά σενάρια, όπως και ποιοτικά συμπεράσματα για την προτιμότερη λύση. Τα κύματα σχεδιασμού περιορίστηκαν στις Β και ΒΔ διευθύνσεις (με $H_0 = 4.64\text{m}$ και $H_0 = 5.77\text{m}$ αντίστοιχα), θεωρώντας σπάνιες τις κυματικές καταιγίδες από τον ΒΑ τομέα. Βάσει των παραπάνω κυμάτων σχεδιασμού προτάθηκε το μήκος του κυματοθραύστη να περιοριστεί στα πρώτα 215 m (από Δυτικά προς Ανατολικά), σενάριο το οποίο θα εξασφάλιζε την βέλτιστη προστασία του λιμένα. Στην έρευνα αναφέρεται ότι ο κυματοθραύστης μήκους 105 m θα είναι αποτελεσματικός μόνο για κυματισμούς από τον τομέα ΒΔ – Β, ενώ θα είναι ελλιπής η προστασία που θα παρέχει κατά τη διάρκεια Βόρειων κυματικών καταιγίδων. Η κατασκευή όλου του μήκους του κυματοθραύστη της μελέτης Παπαπάνου (290m) δεν κρίθηκε απαραίτητη βάσει των εξετασθέντων κυματισμών. Τέλος, στην έρευνα αναφέρεται ότι η πρόταση των συναρμόδιων τοπικών φορέων, να είναι ύφαλος ο κυματοθραύστης, περιορίζει σημαντικά την απόδοση του έργου (*Συνολάκης et al., 2015*).

Μετά την πρώτη φάση κατασκευής του έργου, που ολοκληρώθηκε το 1990, η Τεχνική Υπηρεσία του Λιμενικού Ταμείου Χανίων ανέθεσε στον Κ.Ι. Μουτζούρη, την εκπόνηση μελέτης επέκτασης του κατασκευασμένου κυματοθραύστη. Η μελέτη βασίστηκε σε παρατηρήσεις από την απόδοση του ήδη κατασκευασμένου τμήματος του έργου και από τα αποτελέσματα της μαθηματικής προσομοίωσης της απόδοσης της επέκτασης. Τα σενάρια επέκτασης του κυματοθραύστη περιλάμβαναν τρεις μεταβλητές: i) τη στάθμη στέψης (-0.80m, 0.00m ή +0.80m), ii) τον προσανατολισμό της επέκτασης (400° , 200° , 300° ως προς τον άξονα του υφιστάμενου τμήματος ή κατ'επέκταση), και iii) το μήκος επέκτασης ($l_1 = 100\text{m}$ και $l_2 = 150\text{m}$). Η αποτελεσματικότητα των παραπάνω κατασκευαστικών σεναρίων ελέγχθηκε για τρία κύματα σχεδιασμού, δύο ακραίες κυματικές καταιγίδες και μία συχνότερα εμφανιζόμενη κυματική διαταραχή (οι τιμές αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά του κύματος στα βαθιά νερά): i) $H_0 = 4.64\text{ m}$, $T_0 = 8.86\text{ s}$, $L_0 = 122.5\text{ m}$, Β διεύθυνση, ii) $H_0 = 5.77\text{ m}$, $T_0 = 9.42\text{ s}$, $L_0 = 138.4\text{ m}$, ΒΔ διεύθυνση, και iii) $H_0 = 2.02\text{ m}$, $T_0 = 5.30\text{ s}$, $L_0 = 43.8\text{ m}$, Β διεύθυνση (*Μουτζούρης, 1992*).

Το κατασκευαστικό σενάριο της επέκτασης του υφιστάμενου κυματοθραύστη που τελικώς επιλέχθηκε από τον μελετητή έχει μήκος $l_1 = 150\text{m}$, γωνία 300° ως προς τον άξονα

του υφιστάμενου τμήματος και στάθμη στέψης +0.80 m. Η στάθμη στέψης επιλέχθηκε με γνώμονα την μέγιστη απορρόφηση κυματική ενέργειας, αντισταθμίζοντας σε βάρος την πρόταση των τοπικών αρχών το έργο να μην είναι ορατό. Το μήκος της επέκτασης πήρε την μέγιστη προτεινόμενη τιμή, επίσης λόγω της πρόσθετης προστασίας που παρέχει στον λιμένα. Τέλος, η επιλογή διεύθυνσης του άξονα της επέκτασης έγινε λαμβάνοντας υπ' όψη την επιτυγχανόμενη απόσβεση κυμάτων σε σχέση με την ευκολία και ασφάλεια ναυσιπλοίας κατά την έξοδο και είσοδο από/προς τον λιμένα. Η διεύθυνση της επέκτασης είχε άμεση σχέση με την τμήμα του βυθού που θα έπρεπε να εκβαθυνθεί για λόγους ναυσιπλοίας. Μεγαλύτερη γωνιά μεταξύ της επέκτασης και του υφιστάμενου κυματοθραύστη δημιουργεί μεγαλύτερο άνοιγμα μεταξύ του κυματοθραύστη και του λιμενοβραχίονα, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η περιοχή βυθοκόρησης για διευκόλυνση της ναυσιπλοίας, αλλά ταυτόχρονα μειώνοντας την απόδοση του κυματοθραύστη. Η τελική επιλογή του προσανατολισμού της επέκτασης εγκρίθηκε από το Λιμενικό Ταμείο Χανίων μετά από συνεννόηση με τους πλοιάρχους μεγάλων αλιευτικών που ελλιμενίζονται στον εν λόγω λιμένα (*Μοντζούρης, 1992*).

Τον σχεδιασμό της επέκτασης του κυματοθραύστη ακολούθησε μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Μ.Π.Ε.), το έτος 1993. Στην μελέτη αυτή αναφέρεται ότι τα έργα επεκτάσεως δεν θα προκαλέσουν διάβρωση, είτε του πυθμένα, είτε της ακτής, εφόσον από τα υπάρχοντα στοιχεία συμπεραίνεται ότι ο πυθμένας στην περιοχή μελέτης είναι βραχώδης και οι παρακείμενες ακτές είναι μόλοι θωρακισμένοι από ογκόλιθους. Τα θαλάσσια ρεύματα δεν προβλέπεται να επηρεαστούν λόγω της διεύθυνσης του κυματοθραύστη, ενώ η ανανέωση των νερών της λιμενολεκάνης αναφέρεται ότι δεν θα παρεμποδιστεί από το έργο, εφόσον η επέκταση γίνεται προς τα ανοιχτά, «δίχως να στραγγαλίζεται η διατομή εξόδου». Όσον αφορά την αισθητική του έργου, θέμα μείζονος σημασίας για την συγκεκριμένη περιοχή, αναφέρεται ότι η στάθμη στέψης στα +0.80m από τη Μ.Σ.Θ. είναι χαμηλή σε σχέση με το +2.00m βάσει του οποίου θα έπρεπε να σχεδιαστεί από καθαρά τεχνοκρατικής απόψεως, και ότι το έργο δεν θα αλλοιώσει την αισθητική του ορίζοντα από τον λιμένα Χανίων. Τέλος, συμπεραίνεται ότι η επέκταση του κυματοθραύστη Χανίων αποτελεί σημαντική παρέμβαση περιβαλλοντικής διατήρησης του μνημείου (*Μοντζούρης, 1993*).

2.5.2 Σήμερα κατ' κατάσταση

Το Νομαρχιακό Συμβούλιο συνεδρίασε στις 19 Μαΐου του 1995, υπό την προεδρία του κ. Μιχάλη Ανδριανάκη, για να συζητηθεί μεταξύ άλλων το θέμα της έγκρισης των περιβαλλοντικών όρων της προαναφερθείσας Μ.Π.Ε. Στην εισηγησή του, ο Πρόεδρος της Επιτροπής Κοινωνικών Υποθέσεων κ. Παύλος Ροζάκης, απέρριψε την κατατεθείσα Μ.Π.Ε.

επέκτασης του κυματοθραύστη μετά από συστάσεις που είχαν υποβληθεί από τον Σύλλογο Αρχιτεκτόνων Χανίων και του Δικηγόρου κ. Στυλιανάκη. Οι συστάσεις έκαναν λόγο για «αισθητική προσβολή του μνημείου με την προτεινόμενη έξαλη κατασκευή», «προχειρότητα των διατάξεων της υποβληθείσας μελέτης που βασίζεται σε ενδείξεις και υποθέσεις», «τον κίνδυνο που υπάρχει να προκληθεί μεταβολή της κίνησης των θαλάσσιων νερών με αποτέλεσμα την μείωση των εισερχόμενων ποσοτήτων νερού και τον εγκλωβισμό κυμάτων εντός της λιμενολεκάνης», και «έλλειψη συστηματικού ελέγχου χάραξης του έργου από πλευράς ασφάλειας και ναυσιπλοΐας». Ο λόγος δόθηκε επίσης στον προϊστάμενο του Λιμενικού Ταμείου Χανίων κ. Χαζίρη, στον εκπρόσωπο του Τεχνικού Επιμελητηρίου κ. Ξυνίδη και στον προϊστάμενο της Δ/σης Τεχνικών Υπηρεσιών κ. Ποντικάκη οι οποίοι ήταν θετικοί προς την έναρξη των εργασιών όπως προβλέπονται στην μελέτη Μουτζούρη (*Νομαρχία Χανίων, 1995*).

Το τελικό αποτέλεσμα των παραπάνω είναι η έως τώρα απουσία εύρεσης λύσης για την προστασία του Ενετικού λιμένα, σημαντικού μνημείου πολιτιστικής κληρονομιάς και συμβόλου της πόλης. Στην σημερινή κατάσταση παραμένει ο κυματοθραύστης από την πρώτη φάση κατασκευής των έργων της μελέτης Παπαπάνου και οι φυσικοί ογκόλιθοι που οχυρώνουν το εξωτερικό τμήμα του λιμενοβραχίονα, και σε ορισμένα σημεία τον κρηπιδότοιχο της ανατολικής λιμενολεκάνης. Η τοποθέτηση των ογκόλιθων μπροστά από τους κρηπιδότοιχους έχει γίνει εμπειρικά, με αποσπασματικές πρωτοβουλίες των τοπικών αρχών, με σκοπό την μείωση της κυματικής δράσης και επομένως την αποφυγή υποσκαφής, διάβρωσης και υπερπήδησης του κρηπιδότοιχου (*Συνολάκης et al., 2015*).

3 ΚΥΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ

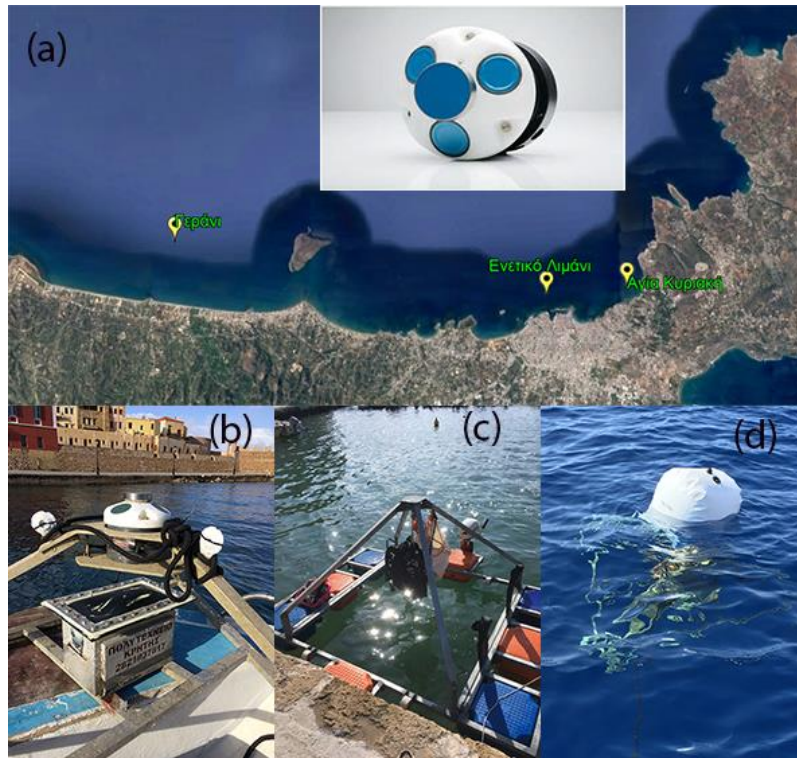
3.1 Μετρήσεις στα ανοιχτά του κόλπου Χανίων

3.1.1 Περιγραφή οργάνων και αρχές λειτουργίας

Οι μετρήσεις κυμάτων και ρευμάτων στα διάφορα σημεία ανοιχτά του κόλπου Χανίων έγιναν με την χρήση οργάνων AWAC 600kHz (Acoustic Wave and Current Profiler) της εταιρείας Nortek SA. Το όργανο, διαθέτει εξωτερικά στην κεφαλή τέσσερις ακουστικούς μετατροπείς (τρεις πλάγιους επικλινείς και έναν κάθετο στο κέντρο) και έναν αισθητήρα πίεσης (Εικόνα 19[α]). Εσωτερικά στην κεφαλή είναι τοποθετημένοι ένας αισθητήρας κλίσης και ο αισθητήρας θερμοκρασίας ο οποίος έρχεται σε επαφή με το νερό με μια αγωγίμη επαφή τιτανίου. Ο προσανατολισμός του αισθητήρα κλίσης ρυθμίζεται σύμφωνα τον προσανατολισμό του οργάνου κατά την διάρκεια λειτουργίας του. Το όργανο είναι σχεδιασμένο για κάθετο προσανατολισμό και μπορεί να περιστραφεί 180° ώστε να λειτουργεί μετρώντας από τον βυθό προς την επιφάνεια της θάλασσας ή αντίστροφα. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις τεχνικές προδιαγραφές μπορεί να βρει κανείς στο εγχειρίδιο του οργάνου ([Nortek, 2017](#)).

Η συλλογή των μετρήσεων από το όργανο βασίζεται στο φαινόμενο Doppler. Η μέτρηση της ταχύτητας και της διεύθυνσης των ρευμάτων γίνεται μέσω της μετάδοσης ενός βραχύ ηχητικού παλμού, ο οποίος ανακλάται από αιωρούμενα σωματίδια (π.χ ζωοπλαγκτόν ή αιωρούμενα ιζήματα) τα οποία παρασύρονται από τα ρεύματα στην υδάτινη στήλη. Η αλλαγή της συχνότητας του ανακλώμενου σήματος σε σχέση με το μεταδιδόμενο (Doppler shift), είναι ανάλογη της ταχύτητας των σωματιδίων κατά μήκος της ακουστικής δέσμης. Συνδυάζοντας τις αλλαγές των συχνοτήτων των ακουστικών δεσμών από τους τρεις επικλινείς μετατροπείς, είναι δυνατός ο υπολογισμός της τρισδιάστατης ταχύτητας των ρευμάτων.

Η μέτρηση των μεταβολών της θαλάσσιας επιφάνειας γίνεται μέσω του αισθητήρα πίεσης αλλά και του κάθετου μετατροπέα στο κέντρο της κεφαλής του οργάνου. Σε αυτή την εργασία οι υπολογισμοί των κυματικών χαρακτηριστικών έγιναν από τα δεδομένα μεταβολής θαλάσσιας στάθμης που συλλέχθηκαν από τον κάθετο ακουστικό μετατροπέα. Η συλλογή αυτών των δεδομένων βασίζεται όπως και στην περίπτωση των ρευμάτων στο φαινόμενο Doppler. Μεταδίδεται ένας βραχύς ηχητικός παλμός, και ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι να βρει ο παλμός την επιφάνεια της θάλασσας και να επιστρέψει στο όργανο, επιτρέπει την εκτίμηση της απόστασης μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας (AST, Acoustic Surface Tracking). Η έντονη διαφορά πυκνότητας στην διεπιφάνεια μεταξύ αέρα και θάλασσας, δίνει μια σχεδόν τέλεια ανάκλαση του σήματος και συνεπώς μια ισχυρή επιστροφή ([Nortek, 2017](#)).



Εικόνα 19. (α) Τοποθεσίες πόντισης των οργάνων AWAC στον κόλπο Χανίων, (β) όργανο AWAC τοποθετημένο στην βάση, χαμηλά διακρίνεται το μεταλλικό κουτί εντός του οποίου είναι τοποθετημένη η μπαταρία τροφοδοσίας, (γ) πλωτή πλατφόρμα ρημούλκησης του οργάνου, (δ) στιγμή κατά την οποία το όργανο έχει μόλις ανέλθει στην επιφάνεια από τον βυθό με τη χρήση σάκων ανέλκυσης.

Καθώς σκοπός ήταν η μακροχρόνια παρακολούθηση του κυματικού καθεστώτος, η τροφοδοσία των οργάνων γινόταν με μπαταρίες βαθιάς εκφόρτησης. Στις αρχικές ποντίσεις έγινε χρήση μπαταριών λιθίου μίας χρήσης οι οποίες προμηθεύονταν από την εταιρεία Nortek μαζί με το κουτί τους, ειδικά σχεδιασμένο για να ανταπεξέρχεται στις ιδιαίτερες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος σε ενδιάμεσα βάθη. Το υψηλό κόστος όμως αυτών των μπαταριών (~3,000 ευρώ για κάθε πόντιση διάρκειας περίπου έξι μηνών εκτός απροόπτων) και το γεγονός ότι ήταν μη επαναφορτιζόμενες, οδήγησε στην υιοθέτηση εναλλακτικών οικονομικότερων λύσεων. Έγινε αγορά επαναφορτιζόμενων μπαταριών τύπου Gel βαθιάς εκφόρτησης, και κατασκευάστηκαν ειδικά κουτιά από ανοξείδωτο ατσάλι 316L ώστε να μην επηρεάζεται η εσωτερική πυξίδα του οργάνου. Οι βάσεις στις οποίες τοποθετήθηκαν τα όργανα και τα κουτιά με τις μπαταρίες, σχεδιάστηκαν από το εργαστήριο με το ίδιο μέταλλο προκειμένου και πάλι να μην υπάρχουν παρεμβολές στην πυξίδα του οργάνου. Τέλος, κατασκευάστηκε πλωτή πλατφόρμα, η οποία διευκόλυνε την ανέλκυση της βάσης έξω από την επιφάνεια του νερού προκειμένου αυτή στη συνέχεια να ρυμουλκηθεί στη στεριά (Εικόνα 19[b][c][d]).

3.1.2 Περιοχές και περίοδοι πόντισης – πλάνα δειγματοληψίας

Οι περιοχές πόντισης των οργάνων, ανοιχτά της βόρειας ακτής του κόλπου Χανίων, φαίνονται στην **Εικόνα 19a**. Οι ποντίσεις ξεκίνησαν στις 15/12/2010 από την περιοχή της Αγίας Κυριακής, ανατολικά του κόλπου και περίπου 800m ΒΔ του λιμενικού καταφυγίου της περιοχής, σε βάθη από 18 m έως 20 m. Οι μετρήσεις στο συγκεκριμένο σημείο διήρκεσαν ως τις αρχές Μαρτίου 2012. Το άλλο σημείο ποντίσεων είναι βόρεια του Ενετικού λιμένα Χανίων σε απόσταση περίπου 500m από την είσοδο του και σε βάθη γύρω στα 23m. Οι μετρήσεις σε αυτήν την τοποθεσία ξεκίνησαν τον Οκτώβριο του 2011 και συνεχίζονται μέχρι και σήμερα. Η τρίτη τοποθεσία ποντίσεων είναι ανοιχτά της ακτής του χωριού Γεράνι, σε απόσταση περίπου 2km και σε βάθη περίπου 20 m. Οι μετρήσεις εδώ διήρκεσαν από τον Οκτώβριο του 2012 έως και τον Ιούλιο του 2017.

Κατά την διάρκεια των ποντίσεων, σε όλες τις τοποθεσίες, υπήρξαν χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες οι μετρήσεις διακόπηκαν. Οι λόγοι διακοπής είχαν να κάνουν μεταξύ άλλων με τεχνικές δυσκολίες ή αστοχίες. Ορισμένες φορές λόγω ηλεκτρολύσεων υπήρξε φθορά και καταστροφή των μπαταριών με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να διακοπούν νωρίτερα της αναμενόμενης ημερομηνίας. Τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με την εφαρμογή ανοδίων στα κουτιά των μπαταριών και στις βάσεις. Σε άλλη περίπτωση, στην περιοχή του Γερανίου, και ειδικότερα κατά τη διάρκεια ισχυρής καταιγίδας, το όργανο εισχώρησε στον πυθμένα σχεδόν 30cm λόγω των πολύ λεπτόκοκκων βενθικών ιζημάτων, με αποτέλεσμα να υποστεί ζημιά το καλώδιο τροφοδοσίας. Υπήρξαν και περίοδοι όπου λόγω έλλειψης πόρων δεν ήταν δυνατή πόντιση των οργάνων. Τέλος, δεν ήταν λίγες οι περιπτώσεις που λόγω απότομων δυσμενών μεταβολών των καιρικών συνθηκών μετά την ανέλκυση των οργάνων, χρειάστηκε να αναβληθεί η πόντιση για μερικές ημέρες.

Στον **Πίνακα 4** δίνονται λεπτομερώς ανά τοποθεσία, οι χρονικές περίοδοι ποντίσεων κατά τις οποίες υπήρξαν μετρήσεις, ο αριθμός των χρονοσειρών που καταγράφηκαν, ο αριθμός αυτών των οποίων πέρασαν την διαδικασία ποιότητας ελέγχου και τέλος σύνοψη των πλάνων δειγματοληψίας. Στην πλειονότητα των καταγραφών ακολουθήθηκε ένα πλάνο δειγματοληψίας.

Διαφορετικό πλάνο πραγματοποιήθηκε στην πρώτη πόντιση της Αγίας Κυριακής και σε ορισμένες ποντίσεις στο Γεράνι. Εκτός των καταγραφών της πόντισης στην Αγία Κυριακή, οι χρονοσειρές των ποντίσεων στο Γεράνι επεξεργάστηκαν ώστε να είναι ίδιας διάρκειας με τις υπόλοιπες. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίστηκε η καλύτερη δυνατή ομογενοποίηση μεταξύ των δειγμάτων.

Πίνακας 4. Πίνακας χρονικών περιόδων δειγματοληψιών, πλάνων δειγματοληψιών και αριθμού χρονοσειρών.

Τοποθεσία	Αρχή Πειράματος	Τέλος Πειράματος	Συνολικές ώρες πειράματος	Σύνολο χρονοσειρών	Σύνολο χρονοσειρών κατόπιν ελέγχου	Σύνολο απορριπτέων χρονοσειρών	
Αγία Κυριακή	15-12-10	10-03-12	10812	10788	10782	6	
Περίοδος	Αρχή	Λήξη	Δt (Hz)	Αριθμός σημείων χρονοσειράς	Διάρκεια χρονοσειράς (sec)	Σύνολο χρονοσειρών	Σύνολο χρονοσειρών κατόπιν ελέγχου
1	15-12-10	04-04-11	2	2048	1024	2640	2639
2	04-04-11	05-10-11	2	2400	1200	4414	4414
3	06-10-11	10-03-12	2	2400	1200	3734	3729
Τοποθεσία	Αρχή Πειράματος	Τέλος Πειράματος	Συνολικές ώρες πειράματος	Σύνολο χρονοσειρών	Σύνολο χρονοσειρών κατόπιν ελέγχου	Σύνολο απορριπτέων χρονοσειρών	
Ενετικός Λιμένας	06-10-11	20-08-20	77791	56621	56333	288	
Περίοδος	Αρχή	Λήξη	Δt (Hz)	Αριθμός σημείων χρονοσειράς	Διάρκεια χρονοσειράς (sec)	Σύνολο χρονοσειρών	Σύνολο χρονοσειρών κατόπιν ελέγχου
1	06-10-11	01-02-12	2	2400	1200	2822	2765
2	10-12-12	04-01-13	2	2400	1200	611	602
3	10-01-13	16-06-13	2	2400	1200	3769	3732
4	17-06-13	13-07-13	2	2400	1200	622	616
5	28-11-13	15-12-13	2	2400	1200	407	407
6	15-12-13	17-01-14	2	2400	1200	789	785
7	17-01-14	20-05-14	2	2400	1200	2949	2934
8	29-05-14	11-11-14	2	2400	1200	3982	3954
9	13-11-14	13-04-15	2	2400	1200	3614	3598
10	05-05-15	25-09-15	2	2400	1200	3442	3432
11	11-11-15	10-01-16	2	2400	1200	1439	1432
12	11-01-16	15-07-16	2	2400	1200	4458	4444
13	18-07-16	04-01-17	2	2400	1200	4080	4066
14	05-01-17	25-01-17	2	2400	1200	491	490
15	23-11-17	09-04-18	2	2400	1200	3256	3254
16	11-05-18	13-08-18	2	2400	1200	2251	2244
17	14-08-18	21-02-19	2	2400	1200	4587	4575
18	22-02-19	15-07-19	2	2400	1200	3437	3429
19	16-07-19	13-02-20	2	2400	1200	5077	5054
20	13-02-20	20-08-20	2	2400	1200	4538	4520
Τοποθεσία	Αρχή Πειράματος	Τέλος Πειράματος	Συνολικές ώρες πειράματος	Σύνολο χρονοσειρών	Σύνολο χρονοσειρών κατόπιν ελέγχου	Σύνολο απορριπτέων χρονοσειρών	
Γεράκι	26-10-12	31-07-16	32975	24677	24656	21	
Περίοδος	Αρχή	Λήξη	Δt (Hz)	Αριθμός σημείων χρονοσειράς	Διάρκεια χρονοσειράς (sec)	Σύνολο χρονοσειρών	Σύνολο χρονοσειρών κατόπιν ελέγχου
1	26-10-12	16-11-12	2	2400	1200	502	502
2	16-11-12	09-01-13	2	2400	1200	1294	1293
3	22-01-13	14-03-13	2	4096	2048	1220	1220
4	18-03-13	16-05-13	2	4096	2048	1410	1408
5	28-05-13	12-09-13	2	4096	2048	2569	2568
6	12-09-13	24-11-13	1.5	4096	2730	1755	1750
7	16-12-13	03-04-14	2	2400	1200	2587	2584
8	24-05-14	21-10-14	2	2400	1200	3599	3598
9	22-10-14	23-01-15	2	2400	1200	2235	2228
10	27-07-15	11-11-15	2	2400	1200	2565	2564
11	12-11-15	24-03-16	2	2400	1200	3186	3186
12	19-05-16	31-07-16	2	2400	1200	1755	1755

Η διάρκεια των κυματικών χρονοσειρών που επεξεργάστηκαν είναι των 20 min (1200 s) με συχνότητα δειγματοληψίας 2 Hz (0.5 s), δηλαδή 2400 καταγραφές. Οι καταγραφές προγραμματίστηκαν να λαμβάνονται ανά μία ώρα. Λαμβάνοντας υπόψη ότι στην περιοχή μελέτης η μέση περίοδος των κυματισμών ανά καταγραφή δεν ξεπερνάει τα 8.5s (κατά τη διάρκεια καταιγίδων), συνεπάγεται ότι μια καταγραφή δεν περιέχει λιγότερους από περίπου 140 κυματισμούς. Ο αριθμός αυτός κρίνεται ικανοποιητικός προκειμένου να έχουμε χαμηλή

μεταβλητότητα στο δείγμα και συγχρόνως να ικανοποιείται η προϋπόθεση της σταθερής κατάστασης της θάλασσας, δεδομένης και της ανάγκης εξοικονόμησης ενέργειας στην μπαταρία τροφοδοσίας. Τέλος, λόγω βάθους των ποντίσεων, οι κυματισμοί που καταγράφηκαν και στις τρεις τοποθεσίες χαρακτηρίζονται ως κυματισμοί βαθιών νερών μέχρι και ενδιάμεσων νερών κατά τη διάρκεια αυξημένων κυματικών γεγονότων.

Τα ακατέργαστα δεδομένα από το όργανο εξάχθηκαν μέσω του λογισμικού *AWAC AST* της κατασκευάστριας εταιρείας. Στη συνέχεια από τα ακατέργαστα δεδομένα εξάχθηκαν οι χρονοσειρές, μέσω ρουτίνων που αναπτύχθηκαν γι' αυτό το σκοπό σε περιβάλλον *MATLAB*.

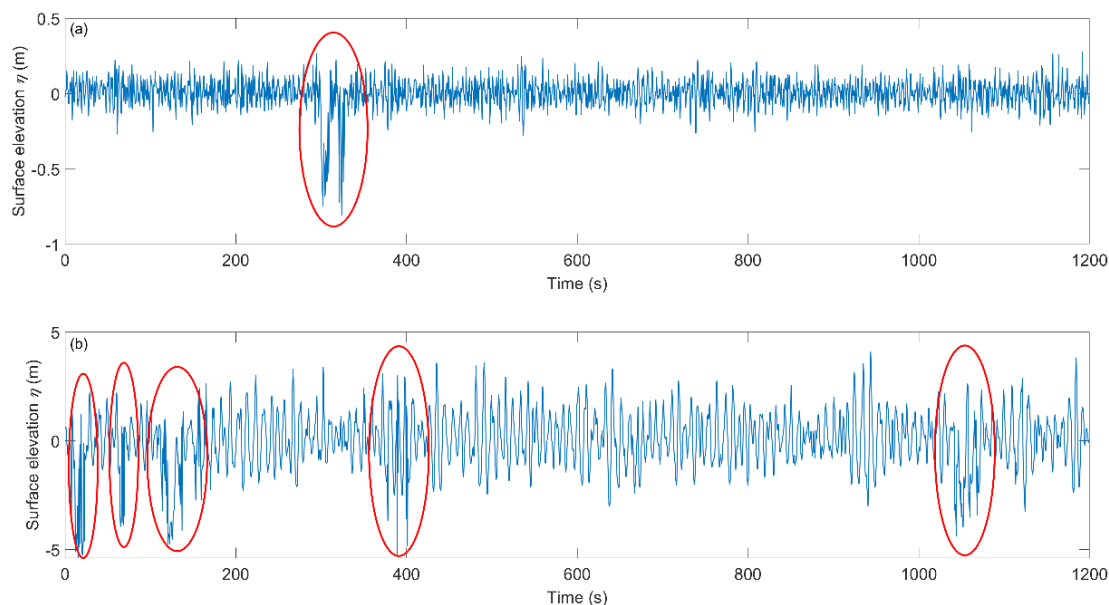
3.1.3 Έλεγχος ποιότητας χρονοσειρών

Προτού προχωρήσει η ανάλυση των χρονοσειρών ήταν απαραίτητο να ελεγχθεί η ποιότητα τους για τυχόν σφάλματα. Εδώ πρέπει να σημειωθεί η εξαιρετική λειτουργία των οργάνων όλα αυτά τα χρόνια ποντίσεων. Σε καμία πόντιση δεν παρατηρήθηκε κάποιο πρόβλημα λειτουργικής φύσεως, που να είχε ως αποτέλεσμα την κακή καταγραφή μετρήσεων.

Κατόπιν οπτικών παρατηρήσεων διαπιστώθηκε ότι οι προβληματικές χρονοσειρές ήταν αποτέλεσμα παρεμπόδισης των ακουστικών σημάτων (π.χ πιθανόν από θαλάσσιους οργανισμούς στην υδάτινη στήλη ή πλωτά μέσα στην επιφάνεια της θάλασσας) καθώς επίσης και ελαφρών ταλαντώσεων των βάσεων κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων. Τέτοια προβλήματα ταλαντώσεων προέκυπταν ενώ τα σημαντικά ύψη κύματος άρχισαν να ξεπερνούν τα 4m. Ευτυχώς, οι ταλαντώσεις δεν ήταν συνεχείς καθ' όλη την διάρκεια των ισχυρών καταιγίδων. Από μετρήσεις ελέγχου του οργάνου που αφορούσαν την θέση του τρισδιάστατα, φαίνεται ότι η βάση έπειτα από λίγο αποκτούσε σταθερότητα στον πυθμένα και ήταν πλέον δυνατόν να υπάρξουν αξιόπιστες καταγραφές ακόμα και στο ζενίθ των καταιγίδων. Επίσης σε καμία περίπτωση η βάση δεν πήρε κλίση μεγαλύτερη των 5°, ώστε να χρειαστεί να απορριφθούν τα δεδομένα (*Nortek, 2017*). Στην **Εικόνα 20** φαίνονται παραδείγματα προβληματικών χρονοσειρών οι οποίες δεν πέρασαν τον έλεγχο ποιότητας και απορρίφθηκαν.

Για τον έλεγχο ποιότητας αλλά και για την ανάλυση των χρονοσειρών που ακολούθησε, χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό τα λογισμικά *WAFO* (*WAFO group, 2017*) και *STORM*. Το λογισμικό *STORM* είναι το επίσημο λογισμικό της εταιρείας Nortek, με το οποίο είναι δυνατή η άμεση επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων των οργάνων. Από την επεξεργασία με το *STORM* χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα αποτελέσματα για την κύρια διεύθυνση των κυματισμών, ο καθορισμός του βάθους καθώς και μεταβλητές που είχαν να κάνουν με την ποιότητα των δεδομένων. Ο βασικότερος λόγος που δεν χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή άλλων κυματικών χαρακτηριστικών, ήταν το γεγονός ότι δίνει την δυνατότητα επεξεργασίας χρονοσειρών

διάρκειας μέχρι 1024 s. Την υπόλοιπη πληροφορία δεν την λάμβανε υπόψιν. Επίσης, οι κυματικές παράμετροι από την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου καθορίζονται με την μέθοδο της προς τα πάνω διαβάσεως. Παρόλα αυτά, το περιβάλλον του λογισμικού επέτρεψε την γρήγορη επισκόπηση όλων των χρονοσειρών. Για τον καθορισμό και υπολογισμό των κυματικών παραμέτρων, αναπτύχθηκαν κώδικες σε περιβάλλον *MATLAB®*, οι οποίες αξιοποιήθηκαν συνδυαστικά με ρουτίνες του *WAFO* για την ανάλυση σε βάθος όλων των χρονοσειρών.



Εικόνα 20. Παραδείγματα χρονοσειρών οι οποίες δεν ήταν να δυνατόν να διορθωθούν και να περάσουν τον έλεγχο ποιότητας. (α) Καταγραφή σε ήρεμες κυματικές συνθήκες κατά την οποία το σήμα παρεμποδίστηκε, (β) Καταγραφή κατά την διάρκεια ισχυρής καταιγίδας με μετακίνηση του οργάνου. Σε κόκκινο πλαίσιο τα προβληματικά σημεία των καταγραφών.

Η διαδικασία ελέγχου ποιότητας, διόρθωσης, διαλογής και προετοιμασίας των χρονοσειρών για περαιτέρω ανάλυση είχε ως εξής:

- 1) Αναπτύχθηκε αρχικά κώδικας, με τον οποίο εξάχθηκαν από τα πρωτογενή δεδομένα του οργάνου οι χρονοσειρές μεταβολής της στάθμης της θάλασσας για κάθε ώρα καταγραφής. Κατόπιν, σε ξεχωριστούς κώδικες συνδυάστηκαν ρουτίνες του *WAFO* προκειμένου να εφαρμοστούν τα επόμενα βήματα στο σύνολο των χρονοσειρών.
- 2) Ακολούθησε διόρθωση των χρονοσειρών ως προς τη μέση στάθμη (mean water level, MWL). Αυτό έγινε με την αφαίρεση από κάθε σημείο ανύψωσης της στάθμης, της μέσης τιμής όλων των ανυψώσεων της εκάστοτε χρονοσειράς. Με αυτή τη διαδικασία η μέση στάθμη ορίστηκε στο μηδέν. Δεν έγινε διόρθωση ως προς την παλίρροια αφού το εύρος παλίρροιας της περιοχής είναι πολύ μικρό ([Παπαδόπουλος, 2009](#)), ενώ συγχρόνως η διάρκεια της κάθε χρονοσειράς είναι αρκετά μικρότερη από την περίοδο της παλίρροιας.
- 3) Επόμενο βήμα ήταν η ανίχνευση λανθασμένων σημείων στις χρονοσειρές με τη χρήση των εξής εμπειρικών κριτηρίων ([WAFO group, 2017](#)):

- $x'(t) < 5 \text{ m/s}$, καθώς η αυξανόμενη ταχύτητα Gaussian κατανεμημένων κυματισμών σπάνια ξεπερνά αυτό το όριο,
 - $x''(t) < 9.81/2 \text{ m/s}^2$, η οποία είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη επιτάχυνση των Stokes κυματισμών,
 - ανίχνευση συνεχόμενων ίδιων σημείων, τα οποία θα πρόσθεταν λανθασμένα υψηλές συχνότητες στις εκτιμώμενες φασματικές ενεργειακές πυκνότητες των χρονοσειρών.
- 4) Αντικατάσταση των λανθασμένων σημείων βάσει των κριτηρίων του προηγούμενου βήματος και ανακατασκευή των χρονοσειρών. Η αντικατάσταση έγινε μέσω προσομοίωσης μεταξύ των σημείων λόγω μεγαλύτερης ακρίβειας στα αποτελέσματα απ' ότι αν γινόταν χρήση κάποιας παρεμβολής (*Brodtkorb et al., 2001*).
- 5) Υπήρξαν πολλές περιπτώσεις κατά τις οποίες οι χρονοσειρές δεν ήταν δυνατόν να ανακατασκευαστούν. Αυτό έγινε στις περιπτώσεις έντονης μετακίνησης των οργάνων κατά τη διάρκεια ισχυρών καταιγίδων και παρατεταμένης παρεμπόδισης του ακουστικού σήματος (Εικόνα 20). Τα συγκεκριμένα σφάλματα εντοπίζονταν στις χαμηλές συχνότητες του φάσματος μέσω του υπολογισμού της παραμέτρου ποιοτικού ελέγχου, R_s , κατά την φασματική ανάλυση (*Tucker, 1993*). Εάν η τιμή της παραμέτρου ήταν μεγαλύτερη μιας κρίσιμης τιμής τότε σε επόμενο βήμα ελέγχονταν οι εν λόγω χρονοσειρές. Η παράμετρος R_s ορίζεται παρακάτω στην ενότητα 3.1.4.β.
- 6) Τέλος, έγινε επισκόπηση των χρονοσειρών με τιμή παραμέτρου R_s μεγαλύτερης της κρίσιμης. Η πλειονηφία των περιπτώσεων αντιπροσώπευε συνθήκες ήρεμης θάλασσας, όπου ταλαντώσεις μεγάλων περιόδων έδιναν αυξημένες τιμές στην R_s . Οι χρονοσειρές αυτές δεν απορρίφθηκαν καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα επηρέαζαν τα αποτελέσματα της εικόνας του κυματικού καθεστώτος λόγω του μεγάλου τους αριθμού. Ήταν όμως αρκετές και οι περιπτώσεις που οι χρονοσειρές δεν ανακατασκευάστηκαν σωστά και απορρίφθηκαν.

3.1.4 Επεξεργασία χρονοσειρών στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο των συχνοτήτων

Τον ποιοτικό έλεγχο και την απόρριψη των προβληματικών χρονοσειρών, ακολούθησε η ανάλυση των εναπομεινάντων στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων, ώστε να υπολογιστούν οι αντιπροσωπευτικές κυματικές παράμετροι που αναφέρονται παρακάτω.

3.1.4.α Κυματικές παράμετροι ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου (time domain analysis)

Για την ανάλυση στο πεδίο του χρόνου εφαρμόστηκε η μεθοδολογία των προς τα κάτω διαβάσεων (zero-downcrossing). Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η εργαλειοθήκη του

WAFO. Σε πρώτο βήμα, για κάθε κύμα που ορίστηκε στην κάθε χρονοσειρά μέσω της zero-downcrossing, υπολογίστηκαν: το ύψος κύματος (H , wave height), η περίοδος κύματος (T , wave period) και η κλίση κύματος (S , wave steepness). Αφού προσδιορίστηκαν αυτά, υπολογίστηκαν οι παρακάτω αντιπροσωπευτικοί παράμετροι για κάθε χρονοσειρά:

- Μέσο ύψος κύματος (H_{mean} , mean wave height), αντιστοιχεί στην αριθμητική μέση τιμή όλων των καταγεγραμμένων κυμάτων της χρονοσειράς

$$H_{mean} = \bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j \quad (3.1)$$

όπου N ο συνολικός αριθμός κυμάτων.

- Σημαντικό ύψος κύματος ($H_{1/3}$, significant wave height): τα κύματα της χρονοσειράς ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά καθ' ύψος. Ο μέσος όρος του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων ορίζεται ως $H_{1/3}$,

$$H_{1/3} = \bar{H}_l = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i, \quad (3.2)$$

όπου H_i είναι το ένα τρίτο των υψηλότερων κυμάτων της χρονοσειράς. Η συγκεκριμένη στατιστική παράμετρος είναι η πλέον συνήθης και σημαντική στην περιγραφή της κατάστασης της θάλασσας. Η έννοια της εισάχθηκε πρώτη φορά από τους [Sverdrup & Munk \(1947\)](#). Την όρισαν στην προσπάθεια τους να συσχετίσουν τις μετρήσεις που έκαναν με τις αναφορές από ναύτες παρατηρητές. Ως εκ τούτου, αποτελεί μια εμπειρικά καθορισμένη παράμετρο ([US Army Corps Of Engineers, 2002](#)). Επίσης, είναι αυτή που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για τον σχεδιασμό παράκτιων έργων. Τέλος, εφόσον οι κυματισμοί ακολουθούν την κατανομή Rayleigh τότε $H_{1/3} \approx H_{m0} \equiv 4\sqrt{m_0}$, όπου H_{m0} είναι το φασματικό σημαντικό ύψος κύματος (βλέπε ενότητα **3.1.4.β**).

- Μέσο τετραγωνικό ύψος κύματος (H_{rms} , root mean square wave height), αντιστοιχεί στην τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των κυμάτων της χρονοσειράς στο τετράγωνο. Η συγκεκριμένη παράμετρος σχετίζεται συνήθως με εφαρμογές που αφορούν την κυματική ενέργεια καθώς αυτή είναι ανάλογη του τετραγώνου του ύψους κύματος.

$$H_{rms} = \sqrt{\bar{H}^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j^2} \quad (3.3)$$

- Μέγιστο ύψος κύματος (H_{max} , *maximum wave height*), αντιστοιχεί στο κύμα με το μεγαλύτερο ύψος στην χρονοσειρά

$$H_{max} = \max(H) \quad (3.4)$$

- Μέση περίοδος κύματος (T_{mean} , *mean wave period*), αντιστοιχεί στην μέση τιμή των περιόδων όλων των καταγεγραμμένων κυμάτων της χρονοσειράς

$$T_{mean} = \bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N T_j \quad (3.5)$$

- Σημαντική περίοδος κύματος (T_s , *significant wave period*): μέση περίοδος του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων

$$T_{1/3} = \bar{T}_l = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} T_i \quad (3.6)$$

όπου T_i είναι οι περίοδοι του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων της χρονοσειράς.

- Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ διαδοχικών κυματισμών (rHH , *correlation coefficient between successive wave heights*). Στις κυματικές μετρήσεις πεδίου εμφανίζεται συνήθως μια τάση ομαδοποίησης μεταξύ των κυμάτων όπου υψηλοί κυματισμοί φαίνεται να διαδίδονται μαζί ως ομάδα ([US Army Corps Of Engineers, 2002](#)). Η εμφάνιση ομαδικότητας μεταξύ διαδοχικών κυματισμών, για N κυματισμούς με k αριθμό καθυστερήσεων (lags) μεταξύ των κυμάτων, ορίζεται μέσω του παρακάτω συντελεστή συσχέτισης ([Rye, 1974](#)),

$$rHH(k) = \frac{1}{\sigma_H^2(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} (H_i - \bar{H})(H_{i+k} - \bar{H}) \quad (3.7)$$

όπου σ_H^2 είναι η τυπική απόκλιση των κυματισμών της χρονοσειράς, N ο συνολικός αριθμός των κυματισμών της χρονοσειράς, k ο αριθμός των lags μεταξύ των κυμάτων και \bar{H} η μέση τιμή των κυμάτων. Εφόσον δεν υπάρχει κάποια συσχέτιση μεταξύ των διαδοχικών κυματισμών, τότε $rHH \rightarrow 0$ καθώς $N \rightarrow \infty$. Θετικές τιμές του rHH υποδεικνύουν ότι τα κύματα διαθέτουν ‘μνήμη’ και οι μεγάλοι κυματισμοί τείνουν να διαδέχονται και ακολουθούνται από μεγάλους κυματισμούς, με το ίδιο να ισχύει και για μικρούς κυματισμούς ([Rye, 1974](#)). Αρνητικές τιμές υποδηλώνουν μηδενική ομαδικότητα των κυματισμών στο δείγμα. Για μετρήσεις πεδίου οι τιμές του $rHH(1)$ κυμαίνονται μεταξύ 0.2 και 0.4 ενώ για $k > 1$ οι τιμές $rHH(k)$ προσεγγίζουν κατά μέσο όρο το μηδέν.

3.1.4.β Κυματικές παράμετροι ανάλυσης στο πεδίο των συχνοτήτων - φασματική ανάλυση (frequency domain analysis-spectral analysis)

Η φασματική ανάλυση των χρονοσειρών έγινε με τη μέθοδο της *FFT*, μέσω της εργαλειοθήκης του *WAFO* (*WAFO group, 2017*). Τα αρχικά φάσματα μέγιστης ανάλυσης $\Delta f = 8.33 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ ($1/1200 \text{ s}$) εξομαλύνθηκαν προκειμένου να περιοριστεί των σφάλμα των φασματικών εκτιμήσεων, χρησιμοποιώντας $M_f = 12$ τιμές Δf . Τα φάσματα που προέκυψαν είχαν τελική ανάλυση $df = 0.01 \text{ Hz}$ με 24 βαθμούς ελευθερίας ($CI\ 95\% [0.52S(f) \ 1.64S(f)]$) και ποσοστιαίο σφάλμα 28.87%. Οι φασματικές περιγραφικές παράμετροι κυματικών συνθηκών και ιδιοτήτων του φάσματος που υπολογίστηκαν είναι οι παρακάτω:

- *Φασματική ροπή* (m_n , *spectral moment*) Οι περισσότερες παράμετροι εμπεριέχουν των υπολογισμό φασματικών ροπών του φάσματος οι οποίες ορίζονται από τη σχέση

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df, \quad n = \dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3.8)$$

με πιο σημαντική την m_0 , η οποία αντιπροσωπεύει το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη της ενεργειακής πυκνότητας και αυτό με τη σειρά του την διακύμανση των τιμών της κυματικής χρονοσειράς ($m_0 = \bar{\eta}^2$). Παρόλο που οι ροπές m_n ορίζονται από την ολοκλήρωση ως το άπειρο, οι υπολογισμοί στην πράξη έχουν ανώτατο όριο την μέγιστη συχνότητα f_{max} (ή f_n , Nyquist συχνότητα), η οποία καθορίζεται από το χρονικό βήμα δειγματοληψίας Δt ως $f_n = 1/2\Delta t$. Όσο μεγαλύτερης τάξης είναι το m τόσο μεγαλύτερο βάρος δίνεται στις υψηλές συχνότητες του φάσματος.

- *Φασματικό σημαντικό ύψος κύματος* (H_{m0} , *spectral significant wave height*),

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (3.9)$$

Σε βαθιά και ενδιάμεσα νερά, η τιμή του φασματικού ύψους κύματος συμπίπτει με αυτήν του $H_{1/3}$ και είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτήν.

- *Περίοδος στο μέγιστο του ενεργειακού φάσματος* (T_p , *spectral peak period*), είναι η περίοδος που αντιστοιχεί στην μέγιστη τιμή της φασματικής ενεργειακής πυκνότητας. Αποτελεί την φασματική περίοδο που έχει καθιερωθεί για τον χαρακτηρισμό του κυματικού καθεστώτος αλλά μειονέκτημά της αποτελεί το γεγονός ότι εξαρτάται άμεσα από την ανάλυση του φάσματος.

- Μέση φασματική περίοδος (T_{m02} , *mean spectral period*), η συγκεκριμένη φασματική περίοδος συσχετίζεται με την αντίστοιχη μέση περίοδο της μεθόδου των διαβάσεων (Goda, 2010),

$$T_{m02} = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (3.10)$$

- Φασματική ενεργειακή περίοδος ($T_{m-1,0}$, *wave energy period*), η συγκεκριμένη φασματική περίοδος αναφέρεται και ως περίοδος κυματικής ενέργειας καθώς είναι η ισοδύναμη περίοδος κύματος που απαιτείται για τον υπολογισμό της ενεργειακής ροής P για οποιοδήποτε ακανόνιστο κυματικό πεδίο βαθέων υδάτων (Hofland et al., 2017). Τις τελευταίες δεκαετίες έχει γίνει αποδεκτή ως χαρακτηριστική περίοδος για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης των θαλάσσιων κυματισμών με παράκτιες κατασκευές και εν τέλει για τον σχεδιασμό τους. Χρησιμοποιείται για την περιγραφή διάφορων διεργασιών όπως η αναρρίχηση, η υπερπήδηση, η ανάκλαση και η σταθερότητα στρωμάτων θωράκισης παράκτιων κατασκευών, ειδικά όταν ο πυθμένας μπροστά από την κατασκευή χαρακτηρίζεται από ρηχά νερά (Hofland et al., 2017). Επίσης η χρήση της προτείνεται επειδή ο υπολογισμός της δεν επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις υψηλές συχνότητες του φάσματος ενώ συμπεριλαμβάνει και πληροφορία για χαμηλότερες συχνότητες. Τέλος, θεωρείται καλύτερη εναλλακτική της T_p σε περιπτώσεις κυματικών καταστάσεων που συνδυάζουν τοπικούς ανεμογενείς κυματισμούς και κυματισμούς ρεστίας. Εάν χρησιμοποιηθεί η T_p ως αντιπροσωπευτική περίοδος σε μια τέτοια συνδυαστική περίπτωση, τότε θα υπάρξει κάποια στιγμή απότομη μεταβολή της τιμής της από την περιόδων των ρεστιών στην περίοδο των τοπικών κυματισμών. Αντιθέτως η $T_{m-1,0}$ δίνει μια πιο ομαλή μετάβαση σε τέτοιες περιπτώσεις (Goda, 2010). Δίνεται από την σχέση,

$$T_{m-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (3.11)$$

- Κύρια κυματική διεύθυνση ($MDir$, *main wave direction*), η οποία αποτελεί σταθμισμένο μέσο όρο όλων των διευθύνσεων του φάσματος. Υπολογίζεται από τη σχέση $MDir = atan2(A, B)$, όπου A και B είναι σταθμισμένες μέσες τιμές των συντελεστών Fourier σε όλο το φάσμα. Οι διευθύνσεις αναφέρονται ως προς την προέλευση των κυματισμών. Κυματισμοί που ορίζονται με Βόρεια διεύθυνση, είναι κυματισμοί που έρχονται από τον Βορρά.

- Παράμετρος ποιότητας ελέγχου,

$$R_s = \frac{S(0.0146) + S(0.0195) + S(0.0244)}{3S(f_p)} \quad (3.12)$$

όπου $S(f)$ είναι οι τιμές ενεργειακής πυκνότητας στις αντίστοιχες συχνότητες f και $S(f_p)$ είναι η τιμή ενεργειακής πυκνότητας στο μέγιστο του φάσματος. Από την συγκεκριμένη παράμετρο εντοπίζονται σφάλματα στην χρονοσειρά τα οποία αποτυπώνονται μεσω ταλαντώσεων στις χαμηλές συχνότητες του φάσματος. Τα σφάλματα αυτά έχουν να κάνουν με συνεχόμενες ίσες τιμές στα καταγεγραμμένα σημεία ανύψωσης της στάθμης ή με ταλαντώσεις του οργάνου καταγραφής. Κρίσιμη τιμή της παραμέτρου ορίστηκε η $R_{scr} = 0.015$. Εάν $R_s > R_{sc}$ τότε γινόταν επισκόπηση της χρονοσειράς και εάν κρινόταν απαραίτητο αυτή αφαιρούνταν από το δείγμα. Η συγκεκριμένη τιμή θα μπορούσε να είναι 0.02 αφού οι χρονοσειρές προέρχονται από καταγραφή των μετατοπίσεων της θαλάσσιας επιφάνειας (Tucker, 1993). Έπειτα όμως από δειγματοληπτική ανάλυση συγκεκριμένων χρονοσειρών, και επισκόπησή τους, κρίθηκε καταλληλότερη η τιμή 0.015. Ο λόγος ήταν ότι κατά την επισκόπηση εντοπίστηκαν χρονοσειρές προς απόρριψη οι οποίες έδιναν τιμές R_s μεταξύ 0.015 – 0.02.

- Παράμετροι φασματικού πλάτους ν και ε

$$\nu = \sqrt{\frac{m_0 m_1}{m_1^2} - 1} : 0 \leq \nu \leq 1 \quad (3.13)$$

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} : 0 \leq \varepsilon \ll 1 \quad (3.14)$$

Οι παράμετροι ν (Longuet-Higgins, 1975) και ε (Cartwright, D. E. & Longuet-Higgins, 1956) χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το εύρος πλάτους του φάσματος. Οι τιμές που παίρνουν είναι από 0 μέχρι 1. Για ένα φάσμα στενού εύρους (narrow-band spectrum) θα πρέπει και οι δύο να προσεγγίζουν το μηδέν. Πιο συγκεκριμένα περιγράφουν κατά πόσο το φάσμα των τυχαίων ακανόνιστων κυματισμών (irregular waves) αποκλίνει από το ιδεατό φάσμα ενός κανονικού μονότονου κυματισμού (regular wave) (Boccotti, 2011). Η επιλογή της ε δεν λαμβάνεται συνήθως μόνη της ως κριτήριο του πλάτους του φάσματος (US Army Corps Of Engineers, 2002), ενώ συγχρόνως η χρήση της πρέπει να γίνεται με επιφύλαξη (Goda & Kudaka, 2007; Vandever et al., 2008; Rye, 1977). Ο λόγος είναι ότι οι χρονοσειρές μετρήσεων πεδίου δεν ικανοποιούν την προϋπόθεση $\varepsilon \ll 1$, αλλά δίνουν τιμές μεταξύ 0.6 και 0.9 (Goda & Kudaka, 2007). Αυτό οφείλεται στο ότι στον υπολογισμό της ε περιλαμβάνονται οι υψηλότερες φασματικές ροπές m_2 και m_4 οι οποίες ενισχύουν τον

θόρυβο που εμπεριέχουν οι υψηλές συχνότητες του φάσματος. Η παράμετρος ν δεν είναι τόσο ευαίσθητη στις υψηλές συχνότητες και περιγράφει σε μεγαλύτερο βαθμό τη διασπορά της ενεργειακής πυκνότητας γύρω από την μέση περίοδο του φάσματος (*Tucker, M.J. and Pitt, 2001*). Παρόλα αυτά και αυτή εξαρτάται από το μέγεθος της συχνότητας f_n μέχρι την οποία υπολογίζονται οι ροπές m_n .

- Παράμετρος κορυφής φάσματος Q_p ,

$$Q_p = \frac{2}{m_0^2} \int_0^{\infty} f S^2(f) df \quad (3.15)$$

Η παράμετρος Q_p (*Goda, 2010*) προτάθηκε ως εναλλακτική των παραμέτρων ν και ε καθώς δεν εξαρτάται από την f_n , ενώ περιγράφει περισσότερο το εύρος κορυφής του φάσματος (*Rye & Sves, 1977*). Οι τιμές που παίρνει κυμαίνονται μεταξύ $2 < Q_p < 3$ για τοπικούς ανεμογενείς κυματισμούς (wind waves) και μεταξύ $5 < Q_p < 8$ για κυματισμούς ρεστίας (swell waves) (*Ewing, 1973; Saulnier et al., 2011; Vizcaino, 2011*). Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης παραμέτρου έναντι των ν και ε , αποτελεί επίσης το γεγονός της συσχέτισης της με την παράμετρο κορυφής γ του φάσματος JONSWAP (*Hasselmann K., et al., 1973*). Ο *Rye, (1977)* συνόψισε τη συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων ως εξής,

$$\begin{aligned} Q_p &= 2.00 \quad 3.15 \quad 4.65 \\ \gamma &= 1.00 \quad 3.30 \quad 7.00 \end{aligned}$$

Ας σημειωθεί ότι για $\gamma=1$ το φάσμα JONSWAP αντιστοιχεί στο φάσμα Pierson Moskowitz (*Pierson & Moskowitz, 1964*). Μειονέκτημα της Q_p είναι η ευαισθησία της στο df που επιλέγεται κατά την διαδικασία ανάλυσης του φάσματος. Από την εξίσωση (3.15) φαίνεται ότι η παράμετρος είναι ανάλογη του τετραγώνου της εκτίμησης $S(f)$ με αποτέλεσμα να δημιουργείται θετικό σφάλμα (positive bias) κατά τον υπολογισμό της, το οποίο είναι μέγιστο για εκτίμηση της $S(f)$ στην μέγιστη δυνατή ανάλυση (εκτίμηση της $S(f)$ χωρίς εξομάλυνση) βάσει της συνολικής διάρκειας του δείγματος (*Battjes, J. A., & Van Vledder, 1992; IAHR, 1992; van Vledeer, 1992*).

- Παράμετρος φασματικού σχήματος κ (spectral shape parameter),

$$\kappa = \kappa(\tau) = \frac{1}{m_0} \left| \int_0^{\infty} S(f) e^{i2\pi f \tau} df \right| \quad (3.16)$$

όπου το τ δηλώνει τη μέση χρονική καθυστέρηση (mean time lag) που διαχωρίζει δύο διαδοχικούς κυματισμούς και συνήθως ισούται με την φασματική μέση περίοδο T_{m02} .

Παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Η παράμετρος κ , πέραν της χρήσης της για τον προσδιορισμό της ευρύτητας του φάσματος (Forristall, 1984; Goda & Kudaka, 2007), συσχετίζεται και με το φαινόμενο της ομαδικότητας των κυματισμών σε μία καταγεγραμμένη χρονοσειρά (Battjes, J. A., & Van Vledder, 1984; Kimura, 1980; Liu, Z., Elgar, S., & Guza, 1993; Longuet-Higgins, 1984; Masson & Chandler, 1993). Τιμές κοντά στο 1 αντιστοιχούν σε φάσματα με ευδιάκριτη στενή κορυφή και περισσότερη ομαδοποίηση των κυματισμών, ενώ τιμές κοντά στο 0 σε φάσματα με μεγαλύτερο εύρος κορυφής και λιγότερη ομαδοποίηση κυματισμών (Goda, 2010). Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης παραμέτρου έναντι της Q_p , για τον προσδιορισμό του σχήματος του φάσματος, αποτελεί η μικρότερη εξάρτησή της από την ανάλυση που επιλέγεται για τον υπολογισμό του φάσματος. Ο λόγος είναι η γραμμική εμφάνιση της $S(f)$ στο ολοκλήρωμα, αλλά και το γεγονός ότι ο όρος $e^{i2\pi ft}$ μεταβάλλεται αργά σε σχέση με την αρχική μη εξομαλυσμένη εκτίμηση της $S(f)$ (Battjes, J. A., & Van Vledder, 1992; IAHR, 1992; van Vledeer, 1992).

3.2 Μετρήσεις εντός της λιμενολεκάνης του Ενετικού Λιμένα

Σκοπός των μετρήσεων εντός της λιμενολεκάνης ήταν η καταγραφή της κυματικής κατάστασης και η ταυτοποίηση των ιδιοσυχνοτήτων της λιμενολεκάνης κατά τη διάρκεια καταιγίδων. Οι μετρητές που χρησιμοποιήθηκαν για αυτές τις καταγραφές ήταν αισθητήρες πίεσης της εταιρείας RBR. Στο σύνολο χρησιμοποιήθηκαν τρία όργανα. Το ένα ήταν το TWR-2050 και τα άλλα δύο ήταν τα RBR-Duet. Ουσιαστικά πρόκειται για το ίδιο όργανο απλώς το TWR-2050 αποτελούσε παλαιότερο μοντέλο του RBR-Duet **Εικόνα 21[b][c]**. Τα όργανα αυτά ήταν πολύ πιο εύκολα στη χρήση σε σχέση με τα AWAC. Το μικρό τους μέγεθος ήταν ιδανικό για τις μετρήσεις εντός της λιμενολεκάνης και η κατασκευή βάσεων πολύ πιο εύκολη υπόθεση καθώς χρησιμοποιήθηκαν βάσεις ομπρέλας βάρους 25 kg στις οποίες τοποθετήθηκαν θήκες από ανοξείδωτο μέταλλο. Βασικές διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων είναι ότι το TWR-2050 μπορεί να ποντιστεί το μέγιστο σε 10m βάθος ενώ τα RBR-Duet μπορούν μέχρι 20m βάθος. Επίσης οι μπαταρίες που δέχονται τα RBR-duet (AA Li-SOCL₂ 3.6V) δίνουν μετρήσεις για πολύ περισσότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με αυτές του TWR-2050 (CR123A-Lithium 3V) για το ίδιο πλάνο δειγματοληψίας.

Τα σημεία πόντισης των οργάνων φαίνονται στην **Εικόνα 21[a]**. Η τοποθεσία A επιλέχθηκε εξ αρχής με κύριο σκοπό να καταγραφεί η κυματική ενέργεια που εισέρχεται στην λιμενολεκάνη από την ελλιπώς προστατευμένη είσοδο του λιμένα. Οι υπόλοιπες τοποθεσίες επιλέχθηκαν κατόπιν εκτέλεσης των προσομοιώσεων που αναφέρονται στην επόμενη ενότητα και οι οποίες έδωσαν μια αρχική εικόνα για τις ιδιοταλαντώσεις της λιμενολεκάνης. Η

τοποθεσία A στο κέντρο της δυτικής λεκάνης αντιστοιχεί σε βάθος 5.3m. Οι τοποθεσίες B και C στο νότιο και ΒΔ άκρο της δυτικής λεκάνης έχουν βάθη 2.4m και 2.2m αντίστοιχα. Η τοποθεσία D στο ανατολικότερο άκρο του λιμένα στην ανατολική λεκάνη αντιστοιχεί σε βάθος 2.3m.



Εικόνα 21. Τοποθεσίες πόντισης κυματομετρητών πίεσης εντός του Ενετικού λιμένα (a). Συσκευές κυματομετρητών RBR-duet (b) και TWR-2050 (c).

Για την εξαγωγή των ακατέργαστων δεδομένων από το όργανο έγινε χρήση του λογισμικού *Ruskin* της κατασκευάστριας εταιρείας των οργάνων. Το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει την δυνατότητα εξαγωγής των καταγεγραμμένων χρονοσειρών καθώς και απευθείας επεξεργασίας τους και υπολογισμού βασικών κυματικών χαρακτηριστικών. Όπως και στην περίπτωση των μετρήσεων ανοιχτά του κόλπου, οι χρονοσειρές εξάχθηκαν και έγινε περαιτέρω ανάλυσή τους. Εφόσον σκοπός αυτών των μετρήσεων ήταν ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων της λιμενολεκάνης, δόθηκε βάρος στον υπολογισμό μόνο των απαραίτητων περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων. Αυτές ήταν οι κυματικές παράμετροι του $H_{1/3}$, $T_{1/3}$ και H_{max} οι οποίες χαρακτήριζαν την ανταπόκριση της λιμενολεκάνης κατά τη διάρκεια καταιγίδων.

Στον **Πίνακα 5**, δίνονται οι ημερομηνίες συλλογής δεδομένων για κάθε τοποθεσία εντός του λιμένα καθώς και τα πλάνα δειγματοληψίας. Βάσει της εικόνας που έδωσαν οι προσομοιώσεις για τις ιδιοταλαντώσεις κρίθηκε ότι οι χρονοσειρές θα έπρεπε να είναι πολύ μεγαλύτερης διάρκειας σε σχέση με αυτές εκτός του λιμένα προκειμένου να αποτυπωθούν στις μετρήσεις οι ιδιοσυχνότητες. Έτσι λοιπόν ορίστηκε συνολική διάρκεια κάθε χρονοσειράς στα 4096 s με καταγραφές ανά 1 Hz (1 s). Την κάθε καταγραφή ακολουθούσε παύση 2 s και ξεκινούσε η επόμενη. Συνεπώς, υπήρξε συνεχής ουσιαστικά κάλυψη της κυματικής κατάστασης της λιμενολεκάνης κατά την διάρκεια των καταιγίδων.

Πίνακας 5. Πίνακας χρονικών περιόδων και πλάνων δειγματοληψιών για τις τοποθεσίες δειγματοληψίας εντός της λιμενολεκάνης.

Τοποθεσία A	Αρχή Πειράματος 13-11-14	Τέλος Πειράματος 13-02-16		
Περίοδος	Αρχή	Λήξη	Δt (Hz)	Διάρκεια χρονοσειράς
1	13-11-14	15-12-14	1	4096
2	30-12-14	12-01-15	1	4096
3	31-01-15	04-03-15	1	4096
4	13-03-15	14-04-15	1	4096
5	16-04-15	25-04-15	1	4096
6	11-11-15	07-12-15	1	4096
7	08-12-15	22-12-15	1	4096
8	23-12-15	11-01-16	1	4096
9	12-01-16	13-02-16	1	4096
Τοποθεσία B	Αρχή Πειράματος 23-12-15	Τέλος Πειράματος 27-03-19		
Περίοδος	Αρχή	Λήξη	Δt (Hz)	Διάρκεια χρονοσειράς
1	23-12-15	11-01-16	1	4096
2	12-01-16	23-04-16	1	4096
3	24-09-18	01-11-18	1	4096
4	12-02-19	27-03-19	1	4096
Τοποθεσία C	Αρχή Πειράματος 24-09-18	Τέλος Πειράματος 27-03-19		
Περίοδος	Αρχή	Λήξη	Δt (Hz)	Διάρκεια χρονοσειράς
1	24-09-18	01-11-18	1	4096
2	12-02-19	27-03-19	1	4096
Τοποθεσία D	Αρχή Πειράματος 15-03-15	Τέλος Πειράματος 24-02-19		
Περίοδος	Αρχή	Λήξη	Δt (Hz)	Διάρκεια χρονοσειράς
1	15-03-15	03-04-15	1	4096
2	03-04-15	16-04-15	1	Συνεχής Καταγραφή
3	16-04-15	30-06-15	1	
4	19-11-15	07-12-16	1	4096
5	08-12-15	22-12-15	1	4096
6	23-12-15	11-01-16	1	4096
7	12-01-16	23-04-16	1	4096
8	24-09-18	15-10-18	1	4096
9	12-02-19	24-02-19	1	4096

Η επιλογή των καταγίδων προς ανάλυση, βασίστηκε τόσο στην έντασή τους όσο και στην καλύτερη δυνατή κάλυψη που υπήρξε από όργανα μέσα στις δύο λιμενολεκάνες. Ας σημειωθεί ότι τα όργανα δεν ήταν και τα τρία διαθέσιμα από την αρχή της έρευνας. Επιπλέον, από επιτόπιες παρατηρήσεις διαπιστώθηκε ότι έντονη αναταραχή εντός της δυτικής λιμενολεκάνης, καθώς έστω και ελάχιστη υπερπήδηση σε διάφορα σημεία κατά μήκος της προβλήτας, αντιστοιχούσαν σε $H_{1/3} > 2$ m ανοιχτά του λιμένα. Συνεπώς, για τον καθορισμό των ιδιοσυχνοτήτων, επιλέχθηκαν συγκεκριμένες καταγίδες μεταξύ Φεβρουαρίου 2015 και Φεβρουαρίου 2019, κατά τις οποίες υπήρξαν μετρήσεις εντός του λιμανιού και συγχρόνως το

σημαντικό ύψος κύματος εκτός ξεπέρασε τα 2 m. Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιήθηκαν από τις μετρήσεις εντός του λιμανιού αντιστοιχούσαν στα χρονικά διαστήματα κατά τα οποία το σημαντικό ύψος κύματος στα ανοιχτά ξεπέρασε τα 2 m. Οι καταιγίδες που επιλέχτηκαν είναι οι παρακάτω,

- Καταιγίδα 1: 10/02/15-12/02/15, 43 χρονοσειρές, $\max(H_{1/3}) = 5.8\text{m}$, σημείο A.
- Καταιγίδα 2: 08/04/15-11/04/15, 49 χρονοσειρές, $\max(H_{1/3}) = 3.9\text{m}$, σημείο A,D.
- Καταιγίδα 3: 31/12/15-01/01/16, 21 χρονοσειρές, $\max(H_{1/3}) = 2.4\text{m}$, σημείο A,B,D.
- Καταιγίδα 4: 05/02/16-06/02/16, 20 χρονοσειρές, $\max(H_{1/3}) = 3.1\text{m}$, σημείο A,B,D.
- Καταιγίδα 5: 25/09/18-27/09/18, 41 χρονοσειρές, $\max(H_{1/3}) = 3.0\text{m}$, σημείο B,C,D.
- Καταιγίδα 6: 13/02/19-15/02/19, 51 χρονοσειρές, $\max(H_{1/3}) = 5.0\text{m}$, σημείο B,C,D.

Ο αριθμός των χρονοσειρών αντιστοιχεί στις χρονοσειρές από τα όργανα εντός του λιμένα και το $\max(H_{1/3})$ στο μέγιστο σημαντικό ύψος κύματος στα ανοιχτά κατά την διάρκεια των επιλεγμένων καταιγίδων. Η μέση κύρια προσπίπτουσα διεύθυνση κατά τη διάρκεια κάθε καταιγίδας ήταν B. Οι ιδιοσυχνότητες συντονισμού ταυτοποιήθηκαν μέσω υπολογισμού του μέσου όρου των φασμάτων των χρονοσειρών όλων των καταιγίδων, για κάθε τοποθεσία ξεχωριστά (Okiihiro & Guza, 1996). Κατά την φασματική ανάλυση των χρονοσειρών δεν έγινε κάποια εξομάλυνση προκειμένου να υπάρξει η μέγιστη δυνατή λεπτομέρεια στην κατανομή της ενέργειας σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Ως αποτέλεσμα το βήμα συχνότητας $\Delta f = 2.44 \times 10^{-4} \text{ Hz}$ του ενεργειακού φάσματος, έδωσε μια ξεκάθαρη διαφοροποίηση των ιδιοσυχνοτήτων συντονισμού μέσα στο λιμάνι. Επιπλέον, οι βαθμοί ελευθερίας των μέσων φασμάτων για κάθε τοποθεσία κυμαίνονται από 184 έως 364.

4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

Ο προσδιορισμός των ιδιοσυχνοτήτων της λιμενολεκάνης μέσω των μετρήσεων πεδίου αφορούσε συγκεκριμένα σημεία. Οι μετρήσεις αυτές όμως, παρότι ουσιαστικές και απαραίτητες, δεν μπορούν να δώσουν ξεκάθαρη εικόνα για τις ιδιομορφές της λιμενολεκάνης που αντιπροσωπεύουν οι ιδιοσυχνότητες. Επιπλέον, η παρουσία των δύο ακανόνιστου σχήματος λεκανών, κάνει δύσκολη την χρήση των εξισώσεων Merian ([Rabinovich, 2010](#)) προκειμένου να γίνει αντιστοίχιση των πειραματικών ιδιοσυχνοτήτων σε συγκεκριμένες ιδιομορφές βάσει της γεωμετρίας της λιμενολεκάνης.

Για τους παραπάνω λόγους, οι πειραματικές μετρήσεις συνδυάστηκαν με αριθμητικές προσομοιώσεις προκειμένου να καθοριστούν οι ιδιομορφές ταλάντωσης του Ενετικού λιμένα. Στη συνέχεια, αποτελέσματα των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση των παροχών υπερπήδησης στην προβλήτα του λιμένα. Στις εκτιμήσεις υπερπήδησης εφαρμόζεται μια πρωτότυπη μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιεί τις υπερβαρητικές ταλαντώσεις εντός της λιμενολεκάνης.

4.1 Αριθμητικό μοντέλο COULWAVE

Το υπολογιστικό μοντέλο COULWAVE είναι μία σουίτα από κώδικες για την προσομοίωση της εξέλιξης μη-γραμμικών και διασπειρόμενων κυματισμών σε μεταβαλλόμενη βαθυμετρία. Αναπτύχθηκε από τους Patrick Lynett και Philip Liu στο πανεπιστήμιο Cornell ([P. Lynett, 2002](#); [P. Lynett & Liu, 2004](#)) των ΗΠΑ.

- Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ποιες εξισώσεις θα χρησιμοποιήσει για την προσομοίωση:
- i) Εξισώσεις Boussinesq υπολογίζοντας την οριζόντια ταχύτητα σε αυθαίρετο βάθος ($\zeta = -\beta h$) ([Nwogu, 1993](#)), το οποίο δίνει τη δυνατότητα να προσομοιωθούν καλύτερα τα κύματα σχετικά μικρού μήκους ($h/L > 0.25$) με μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος.
 - ii) Ολοκληρωμένες ως προς το βάθος (depth-integrated) εξισώσεις Boussinesq ([Peregrine, 1967](#)), με τις οποίες μειώνεται το υπολογιστικό κόστος αλλά υπάρχει μεγαλύτερος περιορισμός στο μήκος κύματος ($h/L < 0.2$).
 - iii) Εξισώσεις ρηχού νερού, οι οποίες υπολογιστικά είναι οι λιγότερο απαιτητικές, αλλά περιορίζονται στην προσομοίωση μακρών κυμάτων ($h/L < 0.05$).

Επίσης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τη μη-γραμμικότητα των εξισώσεων: γραμμικές, ελαφρώς μη-γραμμικές (weakly non-linear) και μη-γραμμικές (fully non-linear). Για την ακριβή προσομοίωση της ρήξης των κυμάτων, ιδιαίτερα σε μικρές κλίσεις βυθού (π.χ. 1/20), προτείνεται η χρήση των μη-γραμμικών εξισώσεων, με αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Οι

ελαφρώς μη γραμμικές εξισώσεις σε αυτήν περίπτωση υπερεκτιμούν το ύψος κύματος κατά τη φάση ρήξης των κυμάτων. Τέλος, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον αριθμό των επιπέδων στο οποίο θα διαχωριστεί η υδάτινη στήλη αυξάνοντας την ακρίβεια της προσομοίωσης (P. Lynett, 2002; P. Lynett & Liu, 2004).

Σε συνοπτική μορφή οι εξισώσεις που εφαρμόζονται στο μοντέλο είναι οι παρακάτω (D.H. Kim & Lynett, 2011; D. H. Kim et al., 2009; P. J. Lynett et al., 2012):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [H\vec{u}] + E_{DISP} + E_{VISC} = 0 \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} + g\nabla \eta + \vec{F}_{DISP} + \vec{F}_{VISC} + \vec{M}_{HOR} + \vec{M}_{VERT} + \frac{\tau}{\rho H} = 0 \quad (4.2)$$

Στην εξίσωση συνέχειας (Εξ.4.1) ο όρος η είναι η ανύψωση της στάθμης και οι όροι E_{DISP} και E_{VISC} αντιπροσωπεύουν 2^{ης} τάξης διορθώσεις στο βασικό μοντέλο ρηχών υδάτων για την διασπορά (dispersion, E_{DISP}) και την ιξώδη διάχυση (viscous diffusion, E_{VISC}). Στην εξίσωση ορμής (Εξ.4.2) ο όρος \vec{u} είναι το διάνυσμα της οριζόντιας ταχύτητας αναφοράς, H είναι το βάθος, g η επιτάχυνση βαρύτητας, ∇ είναι ο τελεστής οριζόντιας κλίσης, t ο χρόνος, τ είναι η τάση πυθμένα και ρ η πυκνότητα του υγρού. Οι όροι \vec{F} και \vec{M} είναι και αυτοί 2^{ης} τάξης διορθώσεις για forcing και μείξη, κάθετα (VERT) και οριζόντια (HOR). Η τάση πυθμένα υπολογίζεται βάσει εμπειρικής σχέσης όπως π.χ της εξίσωσης Manning (P. J. Lynett et al., 2012).

Ο κώδικας χρησιμοποιεί την μέθοδο πρόβλεψης-διόρθωσης (predictor-corrector) για να προχωρήσει στο επόμενο χρονικό βήμα και τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών ή χωρίων για τον υπολογισμό των χωρικών παραγώγων σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Έχει ακρίβεια της τάξης Δt^4 στον χρόνο και Δx^4 στον χώρο. Το κομμάτι της πρόβλεψης της διαδικασίας χρησιμοποιεί την πεπλεγμένη τεχνική αριθμητικής επίλυσης (implicit in time) και η επίλυση επαναλαμβάνεται μέχρι να συγκλίνει στη τελική λύση του κάθε χρονικού βήματος (P. Lynett, 2002).

Στην παρούσα εργασία, στην οποία προσομοιώνονται κύματα καταιγίδας στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά, γίνεται χρήση των πλήρως μη-γραμμικών, ελαφρώς διασπειρόμενων και ελαφρώς στροφικών εξισώσεων Boussinesq (fully non-linear, weakly dispersive and weakly rotational Boussinesq equations) υπολογίζοντας την οριζόντια ταχύτητα σε αυθαίρετο βάθος, χρησιμοποιώντας ένα μόνο επίπεδο (Kim et al., 2009).

4.1.1 Οριακές συνθήκες

Το COULWAVE επιτρέπει την αναρρίχηση των κυμάτων στην τοπογραφία (ξηρός τομέας). Τα μεταβλητά όρια (moving boundaries) προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας τεχνική παρόμοια με εκείνη των [Kowalik & Bang, \(1987\)](#). Για τον υπολογισμό των παραγώγων στα όρια, οι τιμές του ύψους της στάθμης η και οι ταχύτητες u και v παρεκβάλλονται (extrapolated) από τον υγρό τομέα, μέσω του ορίου, στον ξηρό τομέα. Η παρεκβολή μέσω του υγρού-ξηρού ορίου επιτρέπει το όριο να υφίσταται μεταξύ των κόμβων, βελτιώνοντας έτσι την ακρίβεια.

Τα όρια του υπολογιστικού πεδίου (computational domain) είναι ανοικτά και οι κυματισμοί απορροφώνται από ζώνες απορροφητικότητας (sponge layers). Οι ζώνες απορροφητικότητας μοντελοποιούνται εισάγοντας σκεδαστικούς όρους (dissipative terms) στις εξισώσεις, οι οποίοι απορροφούν τους κυματισμούς πριν φτάσουν στα όρια του υπολογιστικού πεδίου. Το πλάτος του στρώματος προτείνεται να είναι από $0.75L_{max}$ - $1.25L_{max}$, όπου L_{max} είναι το μέγιστο μήκος κύματος που προσομοιώνεται. Οι ζώνες απορροφητικότητας που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο είναι των [Kirby et al., 1998](#).

Το υπολογιστικό μοντέλο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει μονοχρωματικά/διχρωματικά κύματα ή και φάσμα κυματισμών με διαφορετικές συχνότητες, πλάτη και διευθύνσεις. Οι κυματισμοί δημιουργούνται μέσω ενός αλγόριθμου που μετατρέπει το κυματικό φάσμα σε χρονοσειρές συνάρτησης πηγής σε μία λωρίδα σταθερού βάθους μέσα στο υπολογιστικό πεδίο (και όχι σε ένα από τα όρια), την θέση της οποίας την ορίζει ο χρήστης. Στην παρούσα εργασία προσομοιώθηκε φάσμα κυμάτων στα 20m βάθος (βλέπε **Εν.4.2.2**), με πληροφoρία για τα κυματικά χαρακτηριστικά από τις καταγραφές του AWAC ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Η χρονική ανάλυση καθορίστηκε μέσω τιμής 0.2 στον αριθμό Courant ($co = u \frac{\Delta t}{\Delta x}$) όπου u είναι η ταχύτητα, Δt το χρονικό βήμα και Δx το βήμα απόστασης μεταξύ των κελιών του υπολογιστικού καννάβου. Το Δx ορίστηκε στα 40 σημεία ανά μήκος κύματος L , το οποίο καθορίστηκε μέσω του βάθους και της περιόδου στο μέγιστο της ενέργειας του εισαγόμενου ενεργειακού φάσματος στην λωρίδα εισαγωγής. Το μήκος των ζωνών απορροφητικότητας ορίστηκε στο ένα μήκος κύματος L ($1L$), στον Β, Δ και Α τομέα του καννάβου.

4.2 Δεδομένα εισόδου

Το COULWAVE χρειάζεται τρία δεδομένα εισόδου: βαθυμετρία/τοπογραφία, κυματικά στοιχεία και ένα αρχείο με τις παραμέτρους του μοντέλου. Παρακάτω περιγράφονται τα δύο πρώτα.

4.2.1 Βαθυμετρία - τοπογραφία

Για την ακριβή προσομοίωση της διάδοσης των κυμάτων από την περιοχή δημιουργίας προς τον λιμένα, επιλέχθηκε πρώτα η έκταση της περιοχής, η οποία περιλάμβανε τον κánaβο, και στη συνέχεια η χωρική ανάλυση (μέγεθος κελιού) των δεδομένων ανάγλυφου.

Το βόρειο όριο του υπολογιστικού πεδίου που αποτελεί και την περιοχή δημιουργίας των κυμάτων, προσδιορίστηκε βάσει της τοποθεσίας και του βάθους όπου είχε ποντιστεί το όργανο AWAC. Το νότιο όριο προσδιορίστηκε 28m νότια από το νοτιότερο σημείο της λιμενολεκάνης. Το ανατολικό και δυτικό όριο προσδιορίστηκαν βάσει του εύρους διευθύνσεων που περιλαμβάνει η προσομοίωση. Τα Β, Α και Δ όρια περιλαμβάνουν κάποιο επιπλέον πλάτος που χρησιμοποιήθηκε από το υπολογιστικό μοντέλο για την απόσβεση των εξερχόμενων κυματισμών (sponge layer).

Η χωρική ανάλυση των δεδομένων ανάγλυφου (τοπογραφία και βαθυμετρία) επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια των εξαγόμενων δεδομένων. Η επιλογή της τιμής αυτής πρέπει να ισορροπεί την ακρίβεια με την υπολογιστική απαιτητικότητα. Επίσης, πολύ μικρές τιμές χωρικής ανάλυσης μπορούν να κάνουν τις προσομοιώσεις υπολογιστικά ασταθείς. Τα δύο σημεία που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής στην περιοχή μελέτης είναι η σωστή αναπαράσταση των προβλητών και της μικρής εισόδου της ανατολικής λιμενολεκάνης (με πλάτος ~4 m), επειδή το πλάτος τους είναι συγκρίσιμο με εκείνο του χωρικού κελιού του αριθμητικού πλέγματος. Η χωρική ανάλυση ορίστηκε στα 2 m η οποία είναι επαρκής για την επίλυση των ανεμογενών κυματισμών εντός και εκτός του λιμένα αλλά και την αναπαράσταση σημαντικών στοιχείων του λιμένα όπως οι κάθετες προβλήτες και της εισόδου στον κυματοθραύστη στην ανατοική λιμενολεκάνη.

Η τοπογραφία και βαθυμετρία της επιλεγόμενης περιοχής αποτελεί προϊόν μετρήσεων πεδίου, που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, με την βοήθεια των υπόλοιπων μελών του εργαστηρίου Φυσικών Καταστροφών και Παράκτιας Μηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης (ΠΚ). Για τις μετρήσεις τοπογραφίας χρησιμοποιήθηκε το τοπογραφικό όργανο *Topcon Hiper Pro* του εργαστηρίου. Το *Hiper Pro* είναι διαφορικό τοπογραφικό σύστημα GPS (*Global Positioning System*) που με δύο δέκτες επιτρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις με οριζόντια ακρίβεια 10mm+1.0ppm και κάθετη 15mm+1.0ppm (δεδομένα ακρίβειας από την εταιρεία Topcon) σε πραγματικό χρόνο (*RTK: Real Time Kinematics*). Ο δέκτης αναφοράς τοποθετήθηκε σε τριγωνομετρικό σημείο της ΓΥΣ (Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού) που βρίσκεται στην στέγη του νεώριου Μόρο. Οι συνταγμένες και το ύψος του τριγωνομετρικού υπολογίστηκαν με στατική μέτρηση και διόρθωση βάσει των μετρήσεων του

σταθμού αναφοράς του ΠΚ και των δεδομένων του μοντέλου γεωειδούς *EGM2008*. Όλες οι μετρήσεις ύψους λήφθηκαν σε σχέση με το ύψος του τριγωνομετρικού σημείου και έπειτα υπολογίστηκε το ύψος σε σχέση με τη μέση στάθμη θάλασσας (ΜΣΘ).

Για τις μετρήσεις βαθυμετρίας, όπου το βάθος ήταν ρηχό και η περιοχή απροσπέλαστη με σκάφος, το ανάγλυφο αποτυπώθηκε με το GPS. Για όλα τα άλλα σημεία, χρησιμοποιήθηκε το βυθόμετρο *Sonar Mite* της εταιρείας *Ohmex*. Το *Sonar Mite* είναι ηχοβολιστικό βυθόμετρο μονής - μικρής γωνίας κώνου - δέσμης, το οποίο μέσω καταγραφής της κλίσης του οργάνου διορθώνει παράλληλα το προκύπτον σφάλμα λόγω της κλίσης του σκάφους. Κατά τη διάρκεια της βυθομέτρησης, ο κινητός δέκτης *Hiper Pro* λάμβανε ταυτόχρονα με το βυθόμετρο, με συχνότητα *2Hz*, μετρήσεις θέσης και ύψους.

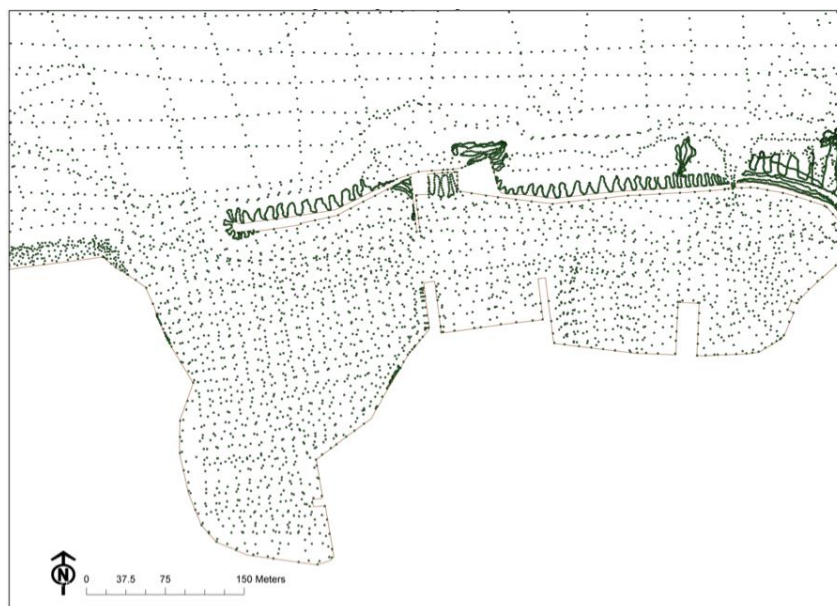
Η επεξεργασία των δεδομένων και η δημιουργία του κανάβου (raster) έγινε μέσω του λογισμικού *ArcGIS®* της εταιρείας *ESRI*. Οι μετρήσεις τοπογραφίας και βαθυμετρίας συνενώθηκαν και εισήχθησαν στο περιβάλλον GIS σε μορφή σημείων και γραμμών όπου υπάρχουν κάθετα στοιχεία. Για το ανάγλυφο τμήμα της τοπογραφίας που έχει κατασκευές με κάθετα στοιχεία, βάσει των αντίστοιχων γραμμών και σημείων δημιουργήθηκε αρχικά τριγωνικό μη κανονικό δίκτυο TIN (*Triangular Irregular Networks*). Για τις υπόλοιπες μετρήσεις έγινε αρχικά αραίωση των δεδομένων όπου χρειαζόταν, για να βελτιστοποιηθεί η κατανομή των τιμών στον χώρο, και έπειτα έγινε χρήση της μεθόδου IDW (*Inverse Distance Weighted interpolation*) για την καναβοποίηση.



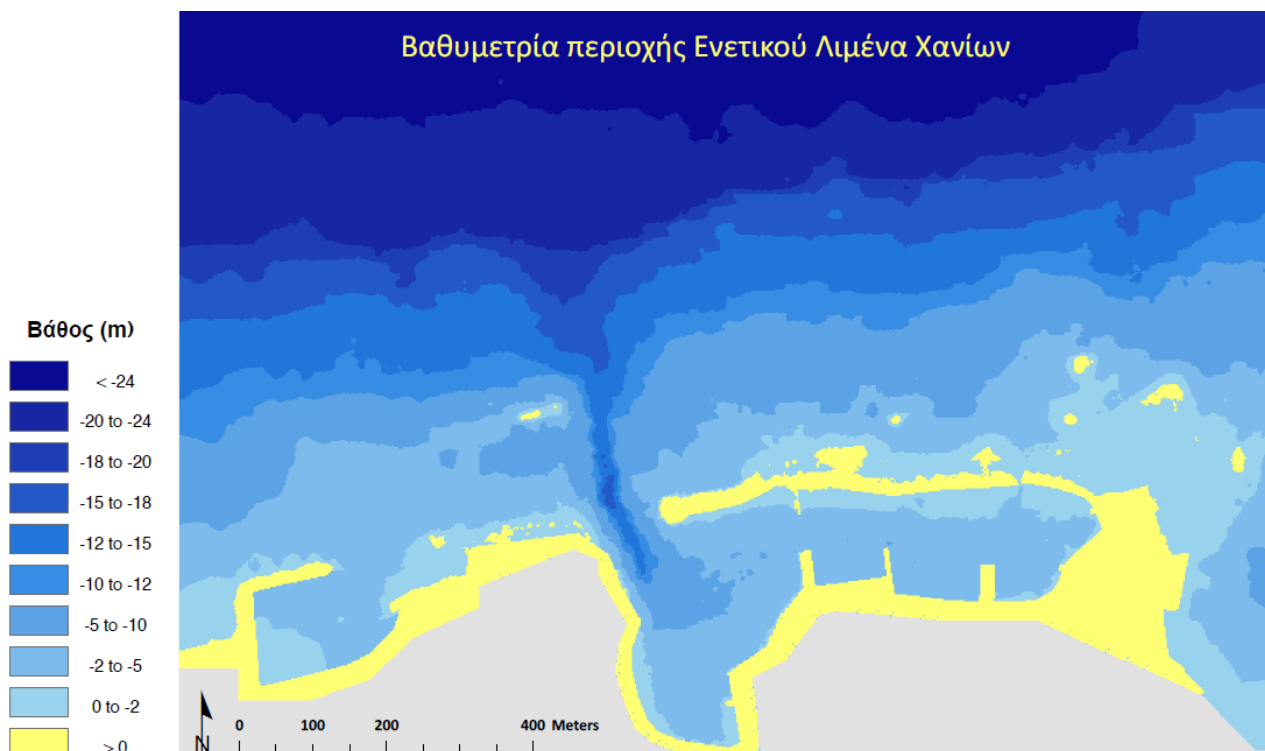
Εικόνα 22. Απεικόνιση όλων των μετρήσεων πεδίου, τοπογραφίας και βαθυμετρίας, που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του κανάβου.

Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για την καναβοποίηση απεικονίζονται στις εικόνες **Εικόνα 22** και **Εικόνα 23**. Οι δύο επιφάνειες (TIN και raster) συνενώθηκαν βάσει των θέσεων

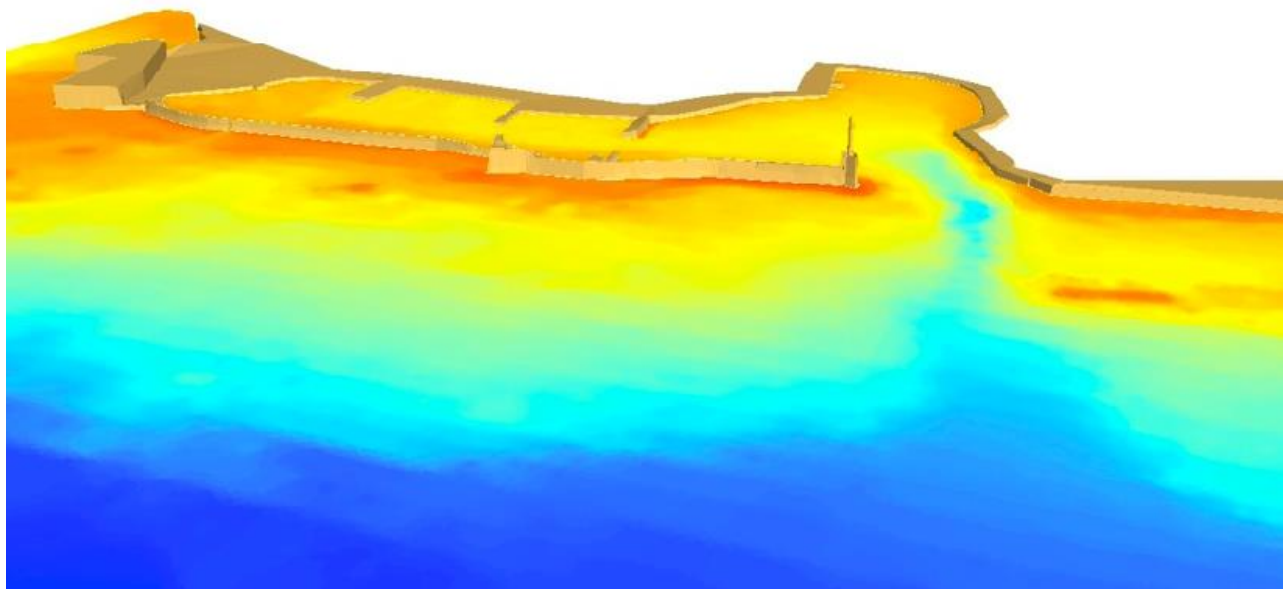
των κελιών του κάναβου για να πάρουμε τον τελικό κάναβο με 2m μέγεθος κελιού που απεικονίζεται στις εικόνες **Εικόνα 24** και **Εικόνα 25**.



Εικόνα 23. Η Εικόνα 22 σε μικρότερη κλίμακα.



Εικόνα 24. Βαθυμετρία Ενετικού λιμένα και ευρύτερης περιοχής.



Εικόνα 25. Τρισδιάστατη απεικόνιση του κυματοθραύστη και των προβλητών με TIN και του βαθυμετρικού καννάβου με χρωματικό χάρτη.

4.2.2 Κυματικά δεδομένα εισόδου

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιείται εξιδανικευμένο παραμετρικό φάσμα αντί του πραγματικού καταγεγραμμένου φάσματος. Ως εξιδανικευμένο κυματικό φάσμα επιλέχτηκε το φάσμα JONSWAP ([Hasselmann K. et al., 1973](#)), το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad (4.3)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07, & f < f_p \\ 0.09, & f \geq f_p \end{cases}$$

όπου a είναι η σταθερά Philips, η οποία μεταβάλλεται σημαντικά με το ανάπτυγμα πελάγους και την ταχύτητα ανέμου ([Rye, 1977](#)), f είναι η συχνότητα, f_p είναι η συχνότητα στο μέγιστο του φάσματος, g η επιτάχυνση βαρύτητας, σ είναι η παράμετρος που καθορίζει το πλάτος του φάσματος δεξιά και αριστερά της κορυφής του και τέλος γ είναι η παράμετρος ενίσχυσης της κορυφής του φάσματος. Η γ παίρνει τιμές από 1 έως 7 με συνήθως χρησιμοποιούμενη τη μέση τιμή $\gamma=3.3$ ([Hasselmann K. et al., 1973](#)).

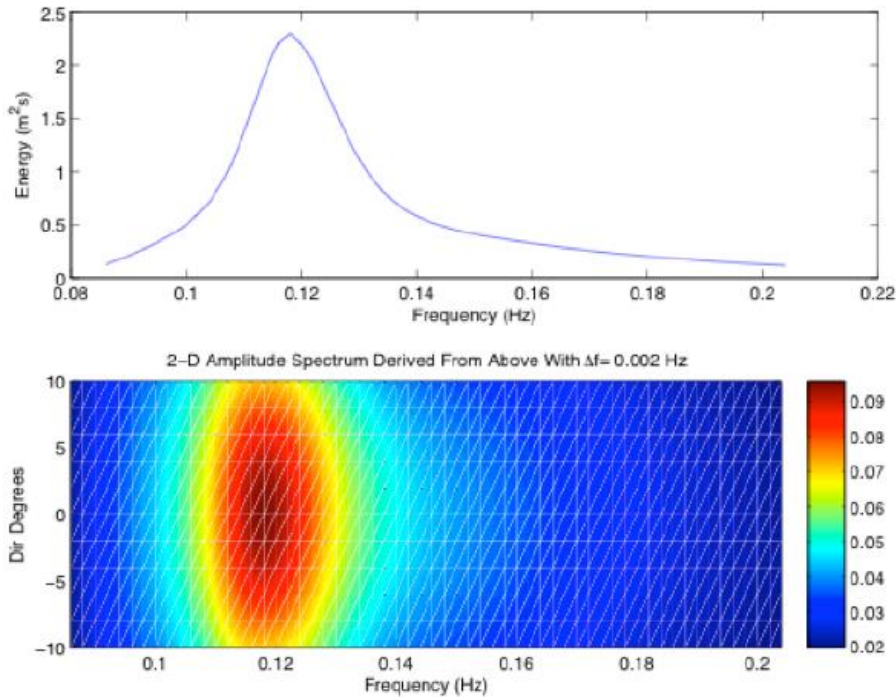
Το φάσμα μετατρέπεται σε φάσμα διεύθυνσης πολλαπλασιάζοντας το επί μια συνάρτηση εύρους διεύθυνσης (directional spreading function) $G(f, \theta)$ όπου $\int_{-\pi}^{\pi} G(\theta|f) d\theta = 1$ ([Goda, 2010](#)). Μια τέτοια συνάρτηση έχει προταθεί από τους ([Mitsuyasu et al., 1975](#)),

$$G(\theta|f) = G_0 \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right),$$

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} \cos^{2s} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) d\theta \right]^{-1}, \quad (4.4)$$

$$s = \begin{cases} (f/f_p)^5 s_m, & f \leq f_p \\ (f/f_p)^{-2.5} s_m, & f \geq f_p \end{cases}$$

όπου θ είναι το αζιμούθιο, η θ_0 υποδηλώνει το αζιμούθιο της κύριας διεύθυνσης του κύματος και s είναι η παράμετρος διάδοσης (spreading parameter) (Goda & Suzuki, 1975). Η G_0 είναι μία σταθερά ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη της συνάρτησης εύρους διεύθυνσης ίσης με ένα. Ο συντελεστής s_m παίρνει τιμές από 10 για ανεμογενείς κυματισμούς μέχρι 75 για ρεστίες (Goda & Suzuki, 1975).



Εικόνα 26. Κυματικό φάσμα εισαγωγής της αριθμητικής προσομοίωσης.

Οι προσομοιώσεις που έγιναν αντιπροσώπευαν μία τυπική χειμερινή κυματική καταιγίδα Β διεύθυνσης με χαρακτηριστικά $Hs = 3.5m$, $Tr = 8.5s$. Στις παραμέτρους κορυφής του φάσματος και διάδοσης εφαρμόστηκαν οι τιμές $\gamma = 3.3$ και $s_m = 80$ σε βάθος $h = 20m$, **Εικόνα 26**. Το βήμα συχνότητας (frequency step, Δf) που εφαρμόστηκε στο φάσμα εισόδου είναι $\Delta f = 0.002 \text{ Hz}$ και η φασματική ενέργεια αποκόπηκε στο 10% από την κορυφή του φάσματος εκατέρωθεν προς τις υψηλές και χαμηλές συχνότητες του διευθυντικού φάσματος.

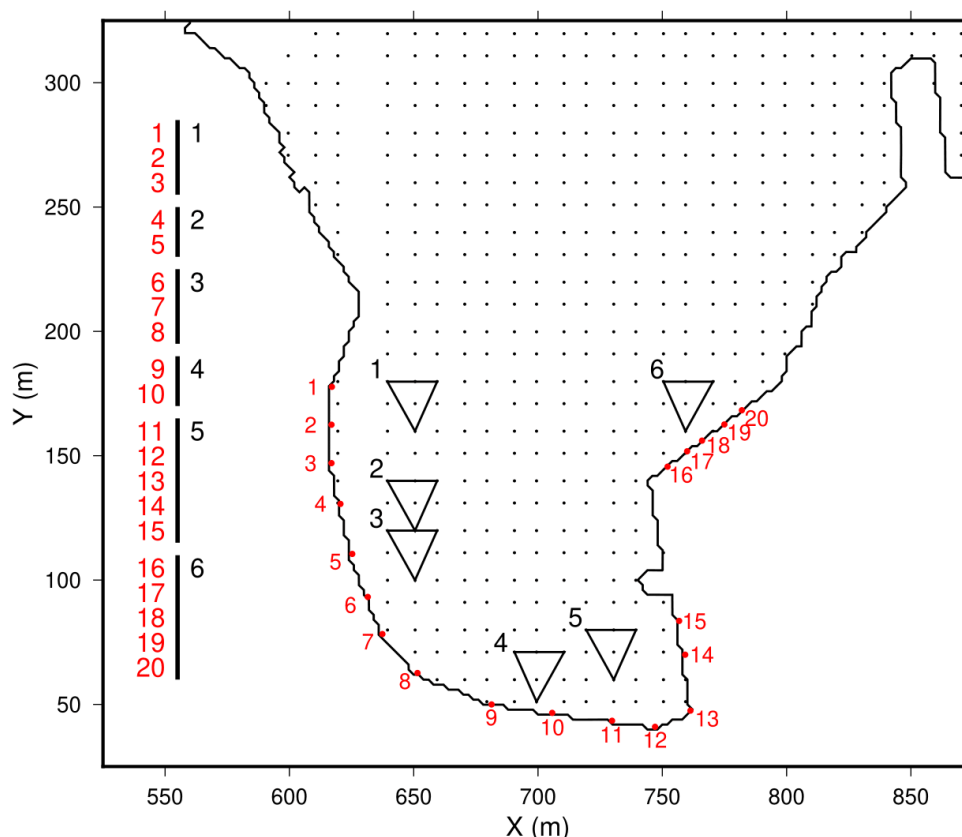
Το μοντέλο προσομοίωσε 200 min πραγματικού χρόνου, με τα πρώτα 20 min να μην συμπεριλαμβάνονται στην ανάλυση, καθώς η προσομοίωση έπρεπε πρώτα να φτάσει σε σχεδόν

σταθερή κατάσταση (quasi-steady state). Οι προσομοιωμένες κυματοσειρές μέσα στην λιμενολεκάνη αποθηκεύτηκαν σε κάναβο με μέγεθος κελιού 10m και στη συνέχεια υπολογίστηκαν τα φάσματα ενεργειακής πυκνότητας για κάθε κελί μέσω FFT.

5 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε, βασικό κομμάτι αυτής της εργασίας είναι η προσπάθεια ποσοτικοποίησης της συνεισφοράς του συντονισμού στην υπερπήδηση των κυματισμών κατά μήκος της προβλήτας του Ενετικού λιμένα.

Οι παροχές υπερπήδησης εξετάστηκαν σε 20 σημεία κατά μήκος της προβλήτας της δυτικής λιμενολεκάνης (Εικόνα 27). Κατά τη διάρκεια καταιγίδων έχει παρατηρηθεί ότι το μέγεθος αλλά και ο τρόπος υπερπήδησης των κυματισμών ποικίλει κατά μήκος της προβλήτας. Στα σημεία 1-15 έχουμε υπερπήδηση υπερχειλίσσης (green-water type overtopping) ενώ στα σημεία 16-20 συνήθίζεται πρόσκρουση των κυματισμών (ισχύος ανάλογης της έντασης της καταιγίδας) με πίδακες θαλασσινού νερού να υπερπηδούν την προβλήτα.



Εικόνα 27. Τοποθεσίες εκτίμησης κυματικής υπερπήδησης κατά μήκος της περιμέτρου της δυτικής λιμενολεκάνης (κόκκινα σημεία). Τα μαύρα σημεία είναι οι κόμβοι καταγραφής των αριθμητικών χρονοσειρών ανύψωσης της στάθμης. Τα τρίγωνα αποτελούν τα τριάδες που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των διευθυντικών φασμάτων και την εξαγωγή των παραμέτρων εισαγωγής για τις εκτιμήσεις υπερπήδησης. Στα δεξιά της εικόνας παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των τριάδων με τις τοποθεσίες εκτίμησης.

Στο δυτικό κομμάτι (σημεία 1-8) η υπερπήδηση προκαλείται από περιθλώμενους και μερικώς διαθλώμενους κυματισμούς που προσεγγίζουν την προβλήτα σε ευρείες γωνίες, με ανακλώμενους κυματισμούς να συνεισφέρουν περιοδικά σε αυξημένη υπερπήδηση κυματισμών. Κατά μήκος των νότιων σημείων (9-11), οι προσπίπτοντες κυματισμοί

προσεγγίζουν την προβλήτα σχεδόν κάθετα ερχόμενοι από την είσοδο του λιμένα και συγχρόνως ανακλώμενοι κυματισμοί συνεισφέρουν σε μεγαλύτερο βαθμό. Νοτιο-ανατολικά (σημεία 12-15) η υπερπήδηση συμβαίνει κυρίως από ανακλώμενους κυματισμούς οι οποίοι συγκεντρώνονται στην συγκεκριμένη περιοχή και σχηματίζουν στάσιμους κυματισμούς. Οι τοποθεσίες 16-20 από την άλλη μεριά έχουν μέτωπο στην απροστάτευτη είσοδο. Τα κύματα προσεγγίζουν την προβλήτα έχοντας διατηρήσει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς τους προερχόμενα από την είσοδο, και αφού αυξάνουν σε ύψος λίγα μέτρα από την προβλήτα λόγω ρήχωσης, με ορμή προσκρούουν στην προβλήτα σχηματίζοντας κατά τη διάρκεια έντονων καταιγίδων υψηλούς πίδακες υπερπήδησης νερού.

5.1 Εμπειρικές εξισώσεις υπερπήδησης

Για την εκτίμηση των παροχών υπερπήδησης εφαρμόστηκαν οι εμπειρικές εξισώσεις του EurOtop (*EuroTop*, 2018), χρησιμοποιώντας την προσέγγιση της μέσης τιμής (mean value approach), χωρίς να περιέχονται στις εξισώσεις παράμετροι ασφαλείας για σχεδιασμό κατασκευής. Οι εξισώσεις του EurOtop δίνουν προβλέψεις για κατασκευές που έχουν μέτωπο στην ανοιχτή θάλασσα. Παρόλο που κάτι τέτοιο δεν ισχύει για μια λιμενολεκάνη όπως μελετάται στην παρούσα εργασία, η χρήση τους είναι η μόνη αποδεδειγμένη επιλογή για τέτοιες εκτιμήσεις.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τις προβλήτες είναι αυτές για κάθετα μέτωπα κατασκευών. Λήφθηκε υπόψιν η επιρροή του πυθμένα μπροστά από την κατασκευή καθώς μόνο έτσι μπορεί να συμπεριληφθεί η λοξή πρόσπτωση των κυματισμών. Τα βήματα για την επιλογή των απαραίτητων εξισώσεων είναι τα ακόλουθα:

- **Βήμα 1:** Η επιρροή του πυθμένα μπροστά από την κατασκευή λήφθηκε υπόψιν χωρίς την παρουσία αναχώματος (mound) και τον πόδα της κατασκευής βυθισμένο.
- **Βήμα 2:** Προσδιορίστηκε εάν οι συνθήκες πρόσκρουσης των κυματισμών ήταν ορμητικές ή μη ορμητικές για κάθετη πρόσπτωση μέσω της παραμέτρου h^* ,

$$\begin{cases} \frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} > 0.23 & (\text{μη ορμητικές συνθήκες}), \\ \frac{h^2}{H_{m0}L_{m-1,0}} \leq 0.23 & (\text{ορμητικές συνθήκες}), \end{cases} \quad (5.1)$$

όπου h είναι το βάθος στην βάση της κατασκευής και H_{m0} είναι το προσπίπτον σημαντικό ύψος κύματος και $L_{m-1,0}$ το μήκος κύματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι παροχές υπερπήδησης για κάθετη πρόσπτωση κυματισμών.

Για μη ορμητικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.05 \exp\left(-2.78 \frac{R_c}{H_{m0}}\right), \quad (5.2)$$

όπου R_c είναι το ελεύθερο περιθώριο στέψης (m) και q είναι η παροχή υπερπήδησης (overtopping rate) (m^3/s , ανά μέτρο κατά μήκος της κατασκευής).

Για ορμητικές συνθήκες, η αντίστοιχη εξίσωση είναι

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.011 \left(\frac{H_{m0}}{hs_{m-1,0}}\right)^{0.5} \exp\left(-2.2 \frac{R_c}{H_{m0}}\right), \quad \text{για } 0 < \frac{R_c}{H_{m0}} < 1.35, \quad (5.3)$$

ή

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.0014 \left(\frac{H_{m0}}{hs_{m-1,0}}\right)^{0.5} \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^{-3}, \quad \text{για } \frac{R_c}{H_{m0}} \geq 1.35, \quad (5.4)$$

όπου $s_{m-1,0}$ είναι η κλίση του κύματος οριζόμενη ως $s_{m-1,0} = H_{m0} / L_{m-1,0}$.

- **Βήμα 3:** Η παροχή υπερπήδησης q για μη ορμητικές συνθήκες και λοξή πρόσπτωση κυματισμών υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = 0.05 \exp\left(-\frac{2.78}{\gamma_\beta} \frac{R_c}{H_{m0}}\right), \quad (5.5)$$

όπου γ_β είναι ο συντελεστής λοξότητας και δίνεται από

$$\gamma_\beta = 1 - 0.0033|\beta| \quad (\text{για } 0 \leq \beta \leq 80^\circ), \quad \gamma_\beta = 0.736 \quad (\text{για } |\beta| > 80^\circ)$$

και β είναι η προσπίπτουσα γωνία ([EurOtop, 2018](#)).

- **Βήμα 4:** Στην περίπτωση λοξής πρόσπτωσης κυματισμών και ορμητικών συνθηκών πρέπει να χρησιμοποιούνται και πάλι οι εξισώσεις του βήματος 3 εφόσον $\beta \geq 60^\circ$. Για γωνίες μικρότερες των 60° οι εκτιμήσεις υπερπήδησης βασίζονται σε αποτελέσματα για γωνίες $\beta = 15^\circ$ και $\beta = 30^\circ$. Η επίδραση της λοξής πρόσπτωσης χαρακτηρίζεται από την χρήση ενός συντελεστή λοξότητας $k_\beta = q_\beta / q_{\beta=0^\circ}$, όπου $q_{\beta=0^\circ}$ είναι η εκτίμηση παροχής υπερπήδησης για κάθετη πρόσπτωση. Οι τιμές του k_β για 15° και 30° δίνονται από,

$$k_{\beta=15^\circ} = \max \begin{cases} 0.375 \left(\frac{h^2}{H_{m0} L_{m-1,0}} \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-0.46} \\ \exp \left(-0.267 \frac{R_c}{H_{m0}} \right) \end{cases} \quad \beta = 15^\circ, \mu \varepsilon \max k_\beta = 1 \quad (5.6)$$

$$k_{\beta=30^\circ} = \max \begin{cases} 0.454 \left(\frac{h^2}{H_{m0} L_{m-1,0}} \frac{R_c}{H_{m0}} \right)^{-0.96} \\ \exp \left(-0.495 \frac{R_c}{H_{m0}} \right) \end{cases}, \quad \beta = 30^\circ, \mu \varepsilon \max k_\beta = 1 \quad (5.7)$$

Οι εκτιμήσεις για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης κάτω των 60° έγινε με γραμμική παρεμβολή, π.χ. για 50° , έγινε γραμμική παρεμβολή μεταξύ των εκτιμήσεων μέσω των εξισώσεων (5.5) και (5.7) ή για 20° μεταξύ των εξισώσεων (5.6) και (5.7), κλπ. Οι εξισώσεις (5.6) και (5.7) είναι εφαρμόσιμες στο εύρος σχετικού ύψους στέψης $1.35 \leq R_c/H_{m0} \leq 4$. Μόνο σε μία από τις 20 τοποθεσίες το σχετικό ύψος στέψης R_c/H_{m0} είναι μικρότερο από 1.35 (τοποθεσία 5), αλλά με την γωνία πρόσπτωσης να είναι 68° , οι συνθήκες θεωρήθηκαν ως μη ορμητικές και εφαρμόστηκαν οι εξισώσεις εκτίμησης του βήματος 3.

5.2 Κυματικές παράμετροι εισόδου και προσεγγίσεις ποσοτικοποίησης της επιρροής συντονισμού στην παροχή υπερπήδησης.

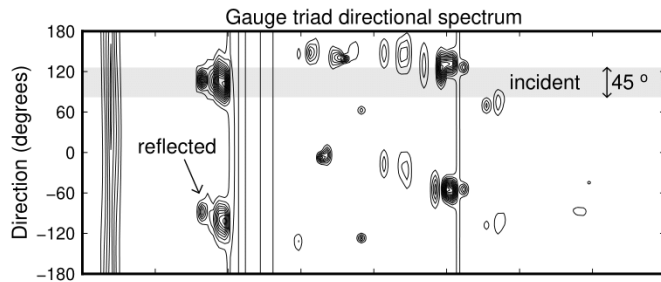
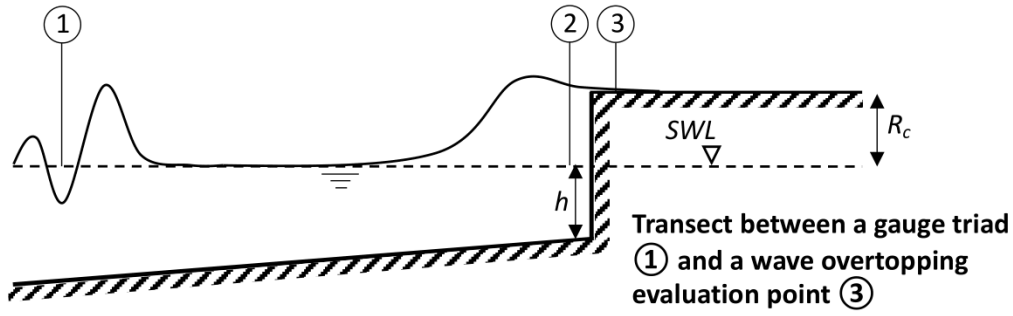
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των εξισώσεων, όπως το βάθος στον πόδα της κατασκευής και το ελεύθερο περιθώριο στέψης, ορίστηκαν μέσω της λεπτομερούς τοπογράφησης. Οι παράμετροι πρόσπτωσης για τις παραπάνω εξισώσεις εκτίμησης πάρθηκαν από τις προσομοιωμένες χρονοσειρές εντός της λιμενολεκάνης. Επιλέχθηκαν τριάδες αριθμητικών κελιών, συνδεδεμένων με τις τοποθεσίες εκτίμησης (Εικόνα 27), για την δημιουργία διευθυντικών φασμάτων. Για την εξαγωγή των φασμάτων διεύθυνσης έγινε χρήση της μεθόδου Extended Maximum Entropy Method (EMEM) (*Hashimoto N. et al., 1997*) μέσω της εργαλειοθήκης του WAFO (*WAFO group, 2017*). Έπειτα τα φάσματα διεύθυνσης χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της μέσης προσπίπτουσας διεύθυνσης φ . Στη συνέχεια εξάχθηκε μονοδιάστατο φάσμα ενεργειακής πυκνότητας ολοκληρώνοντας το διευθυντικό φάσμα στο διάνυσμα των διευθύνσεων σε εύρος $\varphi \pm 22.5^\circ$. Από αυτό το σημείο κ έπειτα δύο ξεχωριστές προσεγγίσεις εφαρμόστηκαν για τον καθορισμό των παραμέτρων εισόδου στις εξισώσεις (Εικόνα 28):

- **Προσέγγιση Α:** Η πρώτη προσέγγιση εξετάζει και ποσοτικοποιεί την επιρροή του συντονισμού του λιμένα στις εκτιμήσεις παροχής υπερπήδησης κατά μήκος της προβλήτας.

Τα προσπίπτοντα H_{m0} και $T_{m-1,0}$, που εφαρμόζονται στις εξισώσεις *EurOtop*, υπολογίστηκαν από το μονοδιάστατο φάσμα των τριάδων, χρησιμοποιώντας μόνο την ενέργεια του φάσματος σε συχνότητες μεγαλύτερες των 0.04 HZ (*High Frequency range, HF, f>0.04Hz*). Οι προσπίπτουσες αυτές παράμετροι αντιπροσωπεύουν την κυματική κατάσταση εντός της λιμενολεκάνης χωρίς την παρουσία μακρών ταλαντώσεων των οποίων οι συχνότητες ευθύνονται για τον συντονισμό. Η επιρροή του συντονισμού του λιμένα ποσοτικοποιείται μέσω επιλεγμένων προσομοιωμένων χρονοσειρών που είναι πιο κοντά στα σημεία εκτίμησης της υπερπήδησης. Μέσω φασματικής ανάλυσης απομονώθηκαν οι ταλαντώσεις η_{IG} (*Low Frequency range, IG, f<0.04Hz*) της επιλεγμένης χρονοσειράς. Η η_{IG} αφαιρέθηκε από το ύψος στέψης στη στάθμη θάλασσας ($R_{c,SWL}$), δημιουργώντας μια χρονοσειρά ύψους στέψης $R_{c,IG} = R_{c,SWL} - \eta_{IG}$. Οι παροχές υπερπήδησης υπολογίστηκαν πρώτα για $R_{c,SWL}$, δίνοντας τις εκτιμήσεις αναφοράς $q_{HF,SWL}$, κι έπειτα για τις προσαρμοσμένες τιμές $R_{c,IG}$ δίνοντας τις εκτιμήσεις $q_{HF,ADJ}$. Η διαφορά μεταξύ της μέσης τιμής των παροχών $q_{HF,ADJ}$ ($\bar{q}_{HF,ADJ}$) και $q_{HF,SWL}$, ποσοτικοποιεί την επιρροή του συντονισμού του λιμένα στις εκτιμήσεις υπερπήδησης κατά μήκος της προβλήτας.

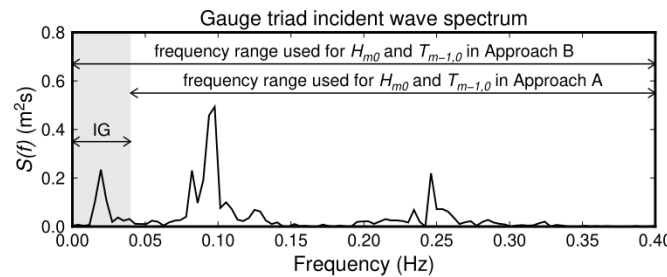
- **Προσέγγιση Β:** Η δεύτερη προσέγγιση αφορά στην συμβατική εφαρμογή των εξισώσεων *EurOtop*, η οποία θα παρέχει την αναφορά σύγκρισης με τις εκτιμήσεις της Προσέγγισης Α. Τα προσπίπτοντα H_{m0} και $T_{m-1,0}$ υπολογίστηκαν από τα μονοδιάστατα φάσματα ενεργειακής πυκνότητας των ίδιων τριάδων με την προσέγγιση Α. Αυτή τη φορά όμως χρησιμοποιώντας την ενέργεια από όλο το εύρος του φάσματος (IG και HF). Στη συνέχεια οι εξισώσεις *EurOtop* εφαρμόστηκαν σε κάθε τοποθεσία εκτίμησης χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο SWL , δίνοντας τις εκτιμήσεις $q_{HF-IG,SWL}$.

Στον **Πίνακα 6** δίνονται οι τιμές των παραμέτρων που εφαρμόστηκαν στις εξισώσεις εκτίμησης παροχών υπερπήδησης.

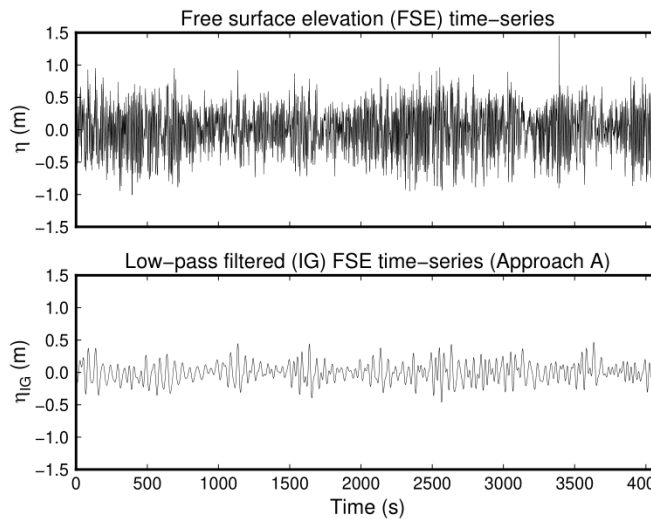


① Gauge triad

The directional spectrum $D(f, \theta)$ is used to obtain the incident frequency-energy spectrum $S(f)$ by integrating $D(f, \theta)$ along the directional vector at $\pm 22.5^\circ$ around the incident energy peak.



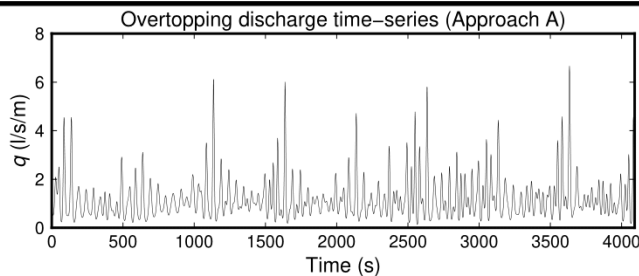
The frequency-energy spectrum $S(f)$ is used to obtain the incident significant wave height and spectral period. Approach A utilizes only the high-frequency range ($f > 0.04$ Hz), while Approach B uses the whole frequency spectrum.



② Freeboard adjustment

The IG FSE time-series (η_{IG}) adjacent to the evaluation points are used in Approach A to obtain time-series of adjusted freeboard.

In Approach A, the time-series of adjusted freeboard result in a time-series of overtopping discharge $q(t)$, from which $\text{mean}(q)$ is obtained.



③ Overtopping evaluation

Εικόνα 28. Απεικόνιση των δύο προσεγγίσεων για την εκτίμηση της συνεισφοράς του συντονισμού λιμένα στην κυματική υπερπήδηση κατά μήκος της προβλήτας.

Πίνακας 6. Τιμές παραμέτρων εισαγωγής στις εξισώσεις εκτίμησης παροχής υπερπήδησης.

Τοπ.	R _c (m)	h (m)	d (m)	H _{iA} (m)	H _{iB} (m)	T _{m-1,0A} (s)	T _{m-1,0B} (s)	L _{m-1,0A} (m)	L _{m-1,0B}	h _A *	h _B *	β°
1	0.85	1.30	3.54	0.31	0.33	7.91	11.48	44.84	66.43	0.12	0.08	24
2	0.73	1.25	3.54	0.31	0.33	7.91	11.48	44.84	66.43	0.11	0.07	24
3	0.61	1.31	3.54	0.31	0.33	7.91	11.48	44.84	66.43	0.12	0.08	24
4	0.51	1.43	2.61	0.33	0.35	8.00	11.27	39.37	56.24	0.16	0.11	68
5	0.42	1.27	2.61	0.33	0.35	8.00	11.27	39.37	56.24	0.12	0.08	68
6	0.53	1.07	2.30	0.37	0.38	8.48	11.57	39.41	54.33	0.08	0.06	38
7	0.62	1.08	2.30	0.37	0.38	8.48	11.57	39.41	54.33	0.08	0.06	18
8	0.67	0.92	2.30	0.37	0.38	8.48	17.41	39.41	54.33	0.06	0.04	18
9	0.73	1.50	2.43	0.36	0.41	9.48	17.41	45.44	84.60	0.14	0.06	24
10	0.78	1.43	2.43	0.36	0.41	9.48	17.11	45.44	84.60	0.12	0.06	24
11	0.79	1.72	2.20	0.40	0.46	7.58	17.11	34.31	79.14	0.21	0.08	32
12	0.82	1.77	2.20	0.40	0.46	7.58	17.11	34.31	79.14	0.23	0.09	5
13	0.84	1.38	2.20	0.40	0.46	7.58	17.11	34.31	79.14	0.14	0.05	5
14	0.86	1.44	2.20	0.40	0.46	7.58	17.11	34.31	79.14	0.15	0.06	75
15	0.88	1.27	2.20	0.40	0.46	7.58	17.11	34.31	79.14	0.12	0.04	75
16	0.94	1.05	3.16	0.48	0.50	8.34	14.68	45.02	80.94	0.05	0.03	20
17	1.00	1.86	3.16	0.48	0.50	8.34	14.68	45.02	80.94	0.16	0.09	20
18	1.07	2.11	3.16	0.48	0.50	8.34	14.68	45.02	80.94	0.21	0.11	20
19	1.09	2.43	3.16	0.48	0.50	8.34	14.68	45.02	80.94	0.28	0.15	20
20	1.08	2.51	3.16	0.48	0.50	8.34	14.68	45.02	80.94	0.29	0.16	20

h: βάθος στον πόδα της κατασκευής, *d*: βάθος τριάδας, *H_i*: Προσπίπτων σημαντικό ύψος κύματος, *T_{m-1,0}*: περίοδος φάσματος τριάδας, *L_{m-1,0}*: Μήκος κύματος βάση *T_{m-1,0}*, *h**: παράμετρος συνθηκών πρόσκρουσης, *β*: γωνία πρόσπτωσης ως προς Α και Β υποδηλώνουν τις παραμέτρους για τις αντίστοιχες προσεγγίσεις.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΝΟΙΧΤΑ ΤΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΧΑΝΙΩΝ

Στην Αγία Κυριακή οι καταγραφές ξεκίνησαν στις 15/12/10 και έληξαν στις 10/03/12. Σε σύνολο 10,812 ωρών για την παραπάνω περίοδο από την έναρξη μέχρι τη λήξη, λήφθηκαν 10,788 χρονοσειρές ενώ τον έλεγχο ποιότητας πέρασαν 10,782. Είχαμε δηλαδή σχεδόν ολική κάλυψη της περιόδου με 99.78% αυτής να καταγράφεται και 99.72% του δείγματος να προχωράει προς ανάλυση. Το συγκεκριμένο σετ δεδομένων είναι το μικρότερο εκ των τριών τοποθεσιών, τόσο σε διάρκεια όσο και σε αριθμό καταγραφών. Παρόλα αυτά όμως είναι αυτό με την πιο συνεχή κάλυψη.

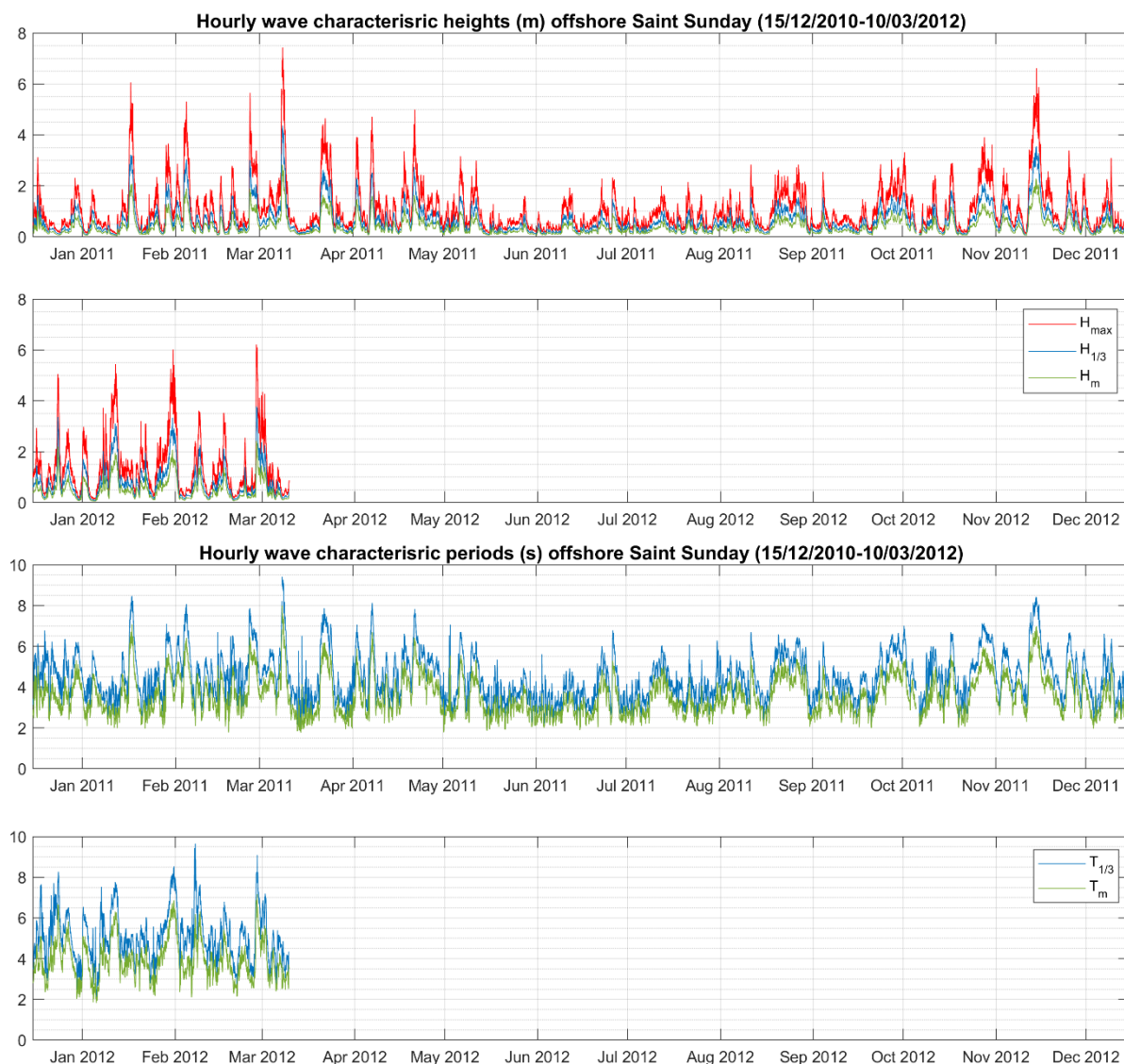
Ανοιχτά του Ενετικού λιμένα, οι καταγραφές ξεκίνησαν στις 06/10/11, καλύπτουν μία περίοδο μέχρι και τις 20/08/2020, και αποτελούν το μεγαλύτερο σετ δεδομένων χρονικά και ποσοτικά. Χαρακτηρίζεται όμως από κενές περιόδους για λόγους στους οποίους έγινε αναφορά στην εισαγωγή. Σε σύνολο 77,791 ωρών λήφθηκαν 56,621 χρονοσειρές και κατόπιν του ελέγχου αναλύθηκαν οι 56,333. Ποσοστιαία, οι καταγραφές κάλυψαν το 72.8% του συνόλου της περιόδου ενώ το 72.4% του δείγματος υπέστη ανάλυση.

Ανοιχτά της περιοχής Γεράνι, οι καταγραφές ξεκίνησαν 26/10/12 και έληξαν στις 31/07/16. Και αυτό το σετ δεδομένων υστερεί σε συνεχή κάλυψη καταγραφών. Σε σύνολο 39,275 ωρών είχαμε 24,677 καταγραφές εκ των οποίων οι 24,656 πέρασαν τον έλεγχο ποιότητας. Η κάλυψη δηλαδή ήταν 74.84% επί του συνόλου και το 74.77% του δείγματος προχώρησε προς ανάλυση.

6.1.1 Συνοπτική περιγραφή κυματικών χαρακτηριστικών κάθε περιοχής

Μια συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των βασικών στατιστικών παραμέτρων που προέκυψαν από την zero-down crossing και την φασματική ανάλυση παρουσιάζεται παρακάτω σε συδυασμό με εικόνες και πίνακες. Τα αποτελέσματα αφορούν τις παραμέτρους του μέγιστου ύψους κύματος H_{max} , του σημαντικού ύψους κύματος $H_{1/3}$, του μέσου ύψους κύματος H_m , της σημαντικής περιόδου $T_{1/3}$, της μέσης περιόδου T_m , του φασματικού σημαντικού ύψους κύματος H_{m0} και της περιόδου κορυφής του φάσματος T_p .

6.1.1.α Τοποθεσία Αγίας Κυριακής



Εικόνα 29. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων H_{max} , $H_{1/3}$, H_m , $T_{1/3}$ και T_m , για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.

Το συγκεκριμένο σει δεδομένων αντικατοπτρίζει πλήρως τις κυματικές συνθήκες για το έτος 2011, και επιπλέον ολόκληρους τους δύο χειμερινούς μήνες Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου και 10 ημέρες του Μαρτίου του 2012. Από την **Εικόνα 29** φαίνεται η έντονη κυματική δραστηριότητα κατά τους χειμερινούς μήνες του 2011 αλλά και των δύο πρώτων μηνών του 2012. Τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο του 2011, καταγράφηκαν τρεις καταιγίδες οι οποίες παρουσίασαν στο ζενίθ τους χαρακτηριστικά $\{H_{1/3}=3.2m \mid T_{1/3} = 8.5s\}$, $\{H_{1/3}=3m \mid T_{1/3} = 8s\}$, $\{H_{1/3}=3m \mid T_{1/3} = 7.9s\}$. Τον μήνα Μάρτιο του 2011 καταγράφηκε η ισχυρότερη καταιγίδα του έτους με κυματικά χαρακτηριστικά στο ζενίθ $\{H_{1/3}=4.4m \mid T_{1/3} = 9.4s\}$. Μέχρι τις 21/04 ακολούθησαν τέσσερις πιο ήπιες καταιγίδες με σημαντικά ύψη κύματος μεταξύ 2m και 2.7m και σημαντικές περιόδους μεταξύ 7s και 8s. Από εκεί κι έπειτα μέχρι και τον μήνα

Οκτώβριο υπήρξαν ήπια κυματικά γεγονότα τα οποία κυμάνθηκαν γύρω στο 1.5m σημαντικού ύψους κύματος και σημαντικών περιόδων μεταξύ 6s και 7s. Από τον μήνα Νοέμβριο ξεκινάνε πάλι οι έντονες καταιγίδες με την πρώτη να καταγράφεται τον ίδιο μήνα με χαρακτηριστικά $\{H_{1/3}=3.5m / T_{1/3} = 8.4s\}$. Τους υπόλοιπους μήνες καταγράφηκαν άλλες τρεις έντονες καταιγίδες, μία τον Δεκέμβριο με $\{H_{1/3}=3.4m / T_{1/3} = 7.8s\}$, δύο τον Ιανουάριο με $\{H_{1/3}=3.1m / T_{1/3} = 7.8s\}$ και $\{H_{1/3}=3.3m / T_{1/3} = 8.2s\}$ και μία τελευταία ισχυρή καταιγίδα στις 28/02 με χαρακτηριστικά $\{H_{1/3}=4.3m / T_{1/3} = 9s\}$.

Στον Πίνακα 7 της κοινής κατανομής των παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$, δίνεται μια λεπτομερέστερη εικόνα για το κυματικό καθεστώς της περιοχής για την περίοδο των καταγραφών. Η απώλεια δεδομένων αφορά μόλις το 0.29% της συνολικής χρονικής περιόδου. Θεωρούμε την κλάση των $H_{1/3} < 0.25m$ ως ήρεμη κατάσταση θάλασσας, καθώς αυτά τα ύψη κύματος αντιστοιχούν κατά κύριο λόγο σε ανέμους έντασης 0 και 1 της κλίμακας Beaufort. Στην ένταση 1, η επιφάνεια της θάλασσας μόλις που αρχίζει να ‘αντιδρά’ στην διατμητική τάση του ανέμου, εμφανίζοντας ελαφρές ταλαντώσεις. Η ήρεμη θάλασσα αντιπροσωπεύει περίπου το 21.62% των μετρήσεων. Η επόμενη κλάση μέχρι τα 0.5m αντιπροσωπεύει το 29.47% των μετρήσεων. Συνεπώς βλέπουμε ότι για την περίοδο καταγραφής, ποσοστό λίγο μεγαλύτερο από το 50% αντιστοιχεί σε ήρεμες σχετικά κυματικές συνθήκες.

Οι σημαντικές περίοδοι για τις συγκεκριμένες κλάσεις παρουσιάζουν μεγάλο εύρος από 0 ως 8s. Η κλάση $0.5m < H_{1/3} < 1m$ αντιστοιχεί σε ποσοστό 29.47% όπως και η προηγούμενη. Το μεγαλύτερο ποσοστό της συγκεκριμένης κλάσης εμφανίζει περιόδους μεταξύ 4 – 5 s (13.6%), ενώ και μεταξύ των περιόδων 5 – 6 s το ποσοστό εμφάνισης είναι παραπλήσιο (11.28%). Από την συγκεκριμένη κλάση περιόδων κι έπειτα οι κυματισμοί στην συγκεκριμένη τοποθεσία θεωρούνται ως ενδιάμεσων νερών, βάση της γραμμικής θεωρίας, καθώς το μέσο βάθος για όλες τις μετρήσεις είναι περίπου 20m. Έχοντας πλέον αθροιστικά φτάσει το 80% εμφάνισης για τους κυματισμούς με $H_{1/3} < 1m$, στις επόμενες κλάσεις από 1m-3.5m οι οποίες αντιστοιχούν από ήπια ως έντονα κυματικά γεγονότα εμφανίζεται το 18.96% των μετρήσεων. Οι περίοδοι στις συγκεκριμένες κλάσεις κυματικών συνθηκών είναι από 5s ως 9s. Τέλος, οι καταγεγραμμένες ισχυρές καταιγίδες που αντιστοιχούν σε $3.5m < H_{1/3} < 4.5m$ με $8s < T_{1/3} < 10s$ εμφανίζονται σε ποσοστό μόλις 0.19%.

Πίνακας 7. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.

	T _{1/3} (s)								
H _{1/3} (m)	0 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	Sum
NoData									0.29
<0.25	3.76	12.73	4.44	0.66	0.04	0.01	0.00	0.00	21.62
0.25 - 0.5	2.76	12.81	11.51	2.21	0.18	0.00	0.00	0.00	29.47
0.5 - 1	0.19	3.71	13.60	11.25	0.56	0.16	0.00	0.00	29.47
1 - 1.5	0.00	0.00	0.79	6.30	3.72	0.12	0.03	0.04	10.99
1.5 - 2	0.00	0.00	0.02	0.37	3.35	0.48	0.00	0.00	4.22
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.02	0.77	1.24	0.05	0.00	2.07
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	1.04	0.20	0.00	1.27
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.16	0.25	0.00	0.42
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.02	0.12
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.07
Sum	6.71	29.25	30.36	20.80	8.65	3.21	0.64	0.11	100

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει την κοινή κατανομή των περιγραφικών παραμέτρων φασματικού σημαντικού ύψους κύματος H_{m0} και και της περιόδου στο μέγιστο της φασματικής ενεργειακής πυκνότητας T_p . Παρατηρείται μια διαφορά στα ποσοστά εμφάνισης των κλάσεων ύψους αλλά και των περιόδων. Πιο συγκεκριμένα τα ποσοστά εμφάνισης για σημαντικά ύψη κύματος μικρότερα των 0.25 m είναι χαμηλότερα στα φασματικά αποτελέσματα ενώ για ύψη μεγαλύτερα των 0.25 m τα ποσοστά είναι υψηλότερα. Αντίστοιχα στις περιόδους, τα ποσοστά εμφάνισης είναι χαμηλότερα στις φασματικές περιόδους μέχρι και 5 s, σε σχέση με τις στατιστικές, και υψηλότερα για μεγαλύτερες περιόδους, ενώ οι φασματικές περίοδοι παρουσιάζουν τιμές μέχρι και 15 s. Τα ίδιο μοτίβο διαφορών παρουσιάζεται και στις άλλες δύο τοποθεσίες (Πίνακας 12

Πίνακας 15). Λεπτομέρειες για αυτές τις διαφορές αναφέρονται παρακάτω στην Εν.6.1.2.α.

Αποτελέσματα για τις κύριες διευθύνσεις των κυματισμών δίνονται στον Πίνακας 9 και στο ροδόγραμμα της Εικόνα 30. Λόγω τεχνικών προδιαγραφών του οργάνου, εάν οι κυματισμοί έχουν περίοδο T_p , μικρότερη από μία κρίσιμη τιμή (cut-off period), τότε δεν είναι αξιόπιστα τα αποτελέσματα των διευθύνσεων. Η κρίσιμη τιμή περιόδου T_p για τον υπολογισμό της διεύθυνσης εξαρτάται από το βάθος (Nortek, 2017). Για την τοποθεσία της Αγίας Κυριακής η κρίσιμη τιμή περιόδου T_p ορίστηκε στα 3.2s. Συνεπώς, όλες οι μετρήσεις με $T_p < 3.2s$ δεν συμπεριλαμβάνονται στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται.

Πίνακας 8. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνιση) των κυματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.

H _{m0} (m)	T _p (s)														Sum
	0 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14	14 - 15		
NoData														0.29	
<0.25	1.92	5.88	4.03	3.22	2.07	0.80	0.17	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	18.16	
0.25 - 0.5	2.65	6.73	12.17	4.86	2.64	1.17	0.31	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30.58	
0.5 - 1	0.43	2.70	5.44	14.62	4.62	1.05	0.68	0.25	0.08	0.08	0.06	0.02	0.05	30.06	
1 - 1.5	0.00	0.03	0.49	1.75	7.08	2.21	0.13	0.05	0.04	0.04	0.06	0.06	0.00	11.92	
1.5 - 2	0.00	0.00	0.02	0.15	1.14	2.77	0.49	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	4.58	
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.02	0.07	1.01	1.14	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.30	
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.90	0.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.31	
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.27	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.57	
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.09	
Sum	4.99	15.34	22.15	24.62	17.61	9.13	4.13	1.11	0.23	0.14	0.12	0.08	0.06	100	

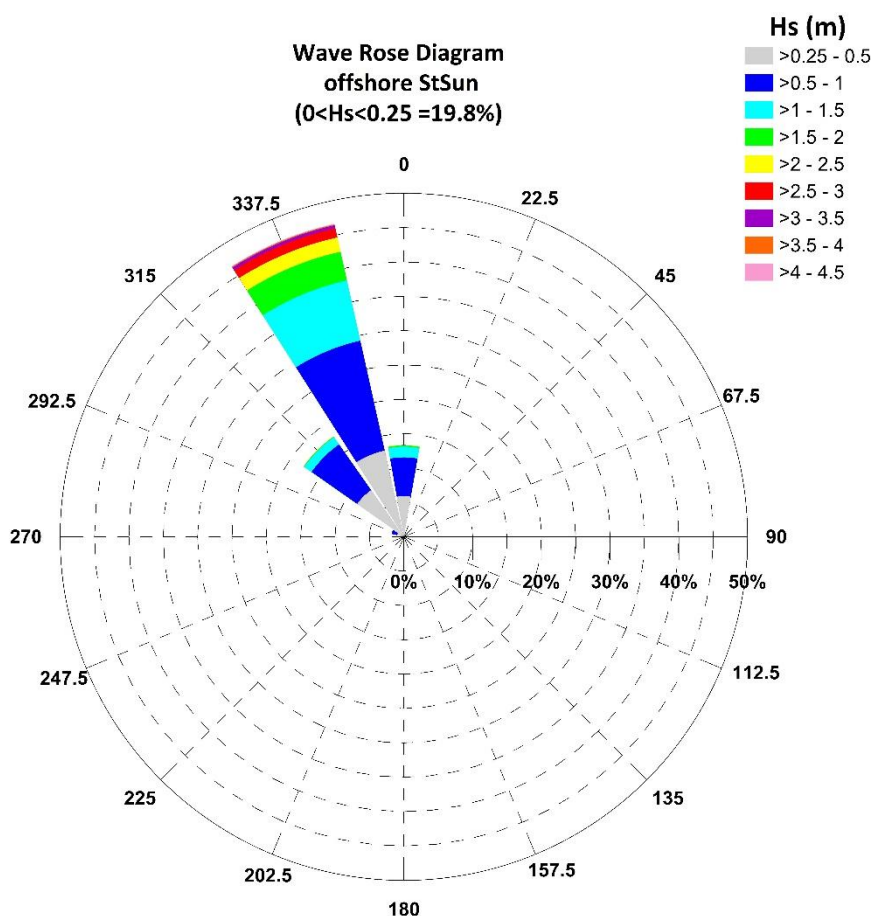
Έπειτα από αυτή τη διαλογή, το ποσοστό των μετρήσεων που παρουσιάζεται αποτελεί το 92.74% του συνόλου του δείγματος (Πίνακας 9). Στο ροδόγραμμα δεν συμπεριλαμβάνονται οι μετρήσεις που αντιστοιχούν στην ήρεμη θάλασσα. Επιπλέον, στα ποσοστά που εμφανίζονται στα ροδογράμματα δεν περιλαμβάνονται τα κενά δεδομένα (μετρήσεις που απορρίφθηκαν ή μη καταγραφές), εν αντιθέσει με τα ποσοστά που παρουσιάζονται στους πίνακες.

Πίνακας 9. Πίνακας κοινής κατανομής $H_{1/3}$ και κύριας διεύθυνσης για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.

$H_{1/3}$ (m)	Nautical Degrees**																Sum
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
NoData																	0.29
$T_p < 3.2s$																	6.97
<0.25	2.82	0.77	0.34	0.12	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.09	0.21	0.26	1.78	5.35	6.44	18.33
0.25 - 0.5	5.48	0.25	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.10	0.91	7.69	11.92	26.40
0.5 - 1	5.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.80	7.57	15.21	28.86
1 - 1.5	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	8.36	10.99
1.5 - 2	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	3.96	4.22
2 - 2.5	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	1.99	2.07
2.5 - 3	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.26	1.27
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.42
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07
Sum	15.21	1.02	0.36	0.13	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.09	0.23	0.39	3.48	21.93	49.74	100

Η κυρίαρχη διεύθυνση των κυματισμών για την τοποθεσία είναι η ΒΒΔ (NNW). Αυτό οφείλεται κυρίως στη βυθομετρία της περιοχής και στο γεγονός ότι ανατολικά του σημείου μετρήσεων βρίσκεται σε πολύ κοντινή απόσταση η ακτή. Η παρουσία ξηράς στα Ανατολικά και Νότια είναι ο λόγος απουσίας των συγκεκριμένων διευθύνσεων. Η παρουσία της ξηράς

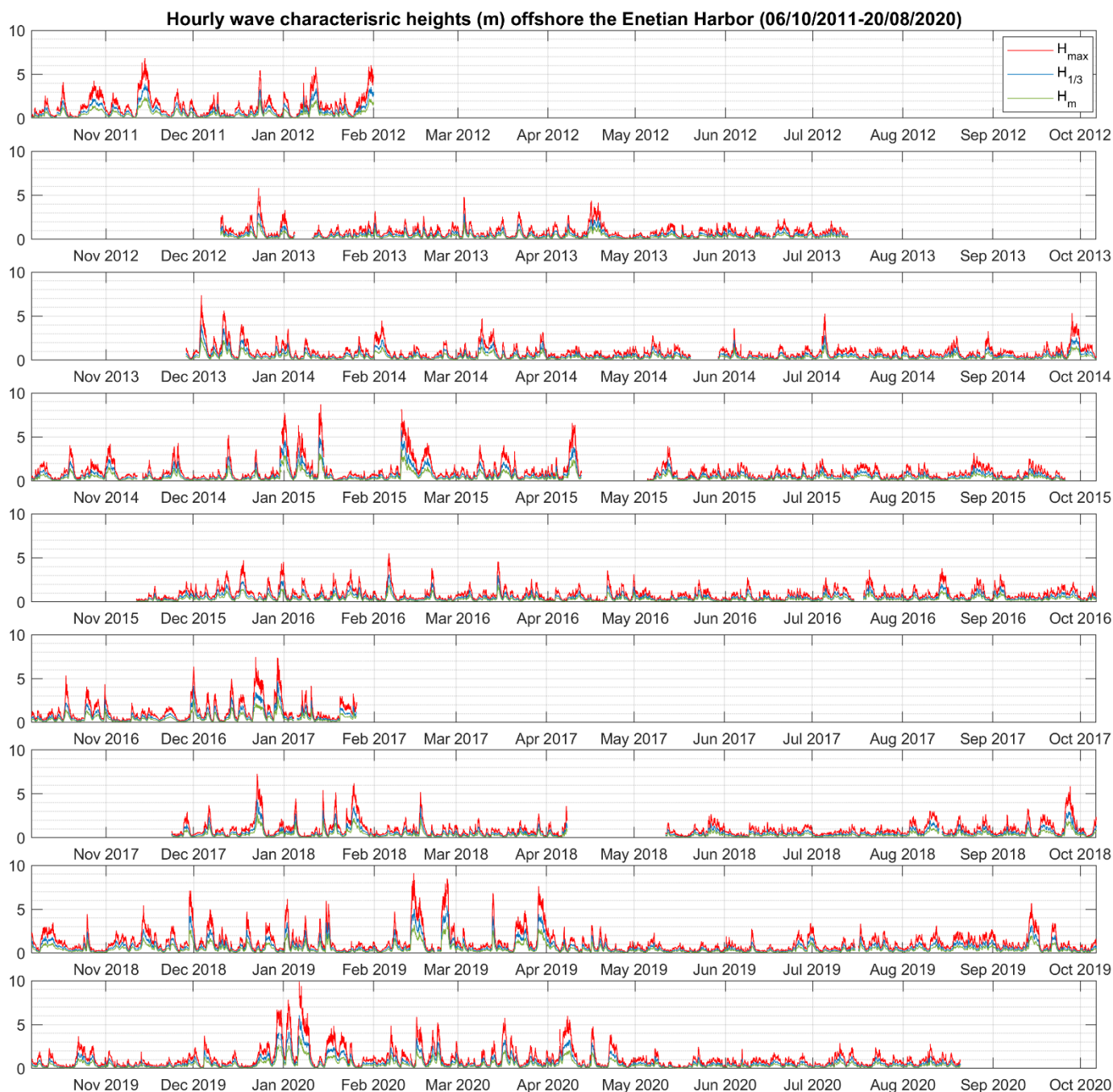
συμβάλει επίσης στα μικρά ποσοστά εμφάνισης της Β διεύθυνσης και κυρίως για κυματισμούς με $H_{1/3} < 1.5\text{m}$, ενώ αυξημένα σε σχέση με την Β διεύθυνση είναι τα ποσοστά εμφάνισης των Βόρειο-Δυτικών (NW) κυματισμών.



Εικόνα 30. Κυματικό ροδόγραμμα για την τοποθεσία ανοιχτά της Αγίας Κυριακής.

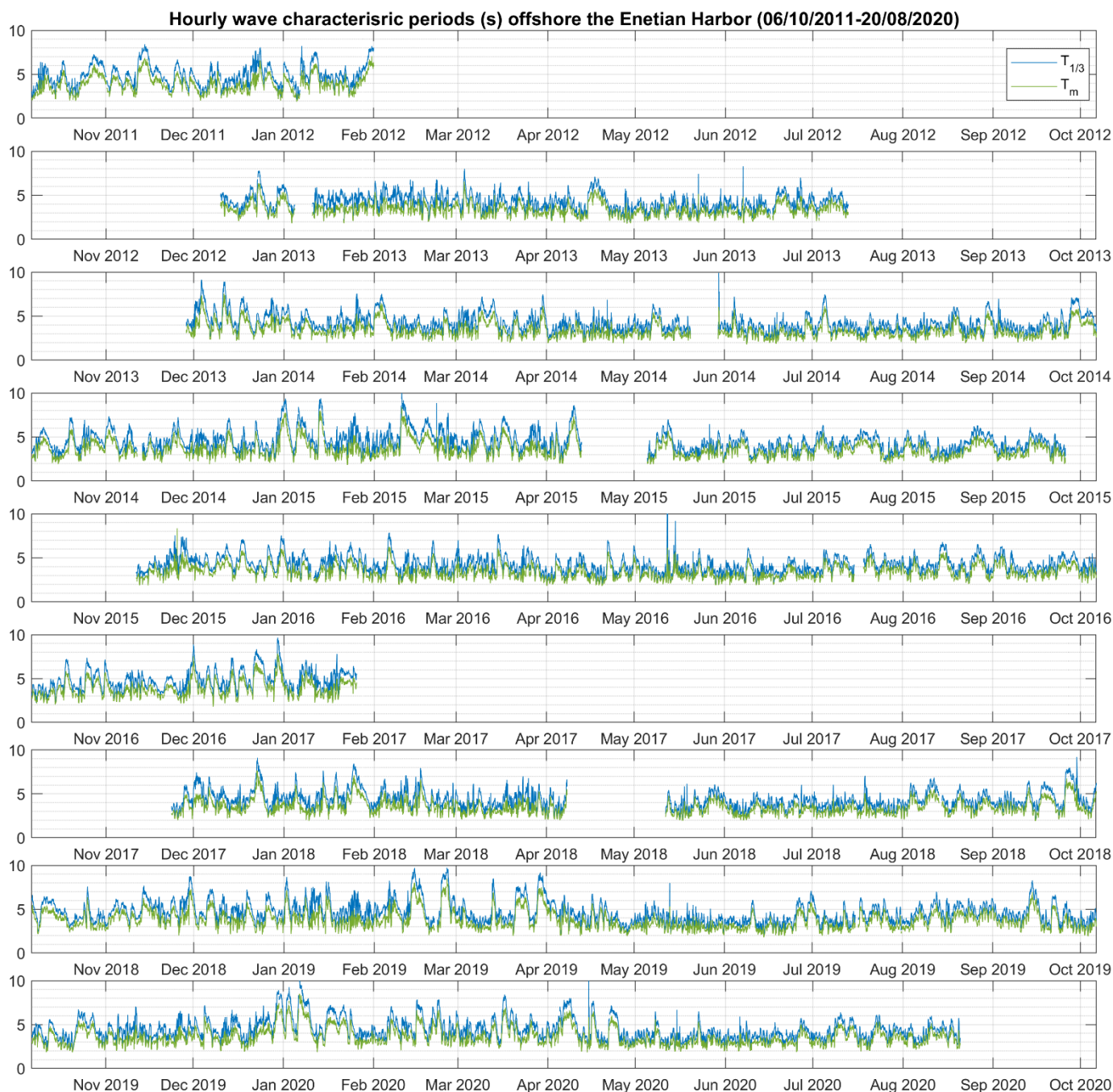
6.1.1.β Τοποθεσία Ενετικού Λιμένα

Οι μετρήσεις ανοιχτά του Ενετικού Λιμένα, όπως προαναφέρθηκε παρουσιάζουν κενές περιόδους. Αναμφίβολα, οι κενές περιόδους οι οποίες αντιπροσωπεύουν περίπου το 27% της συνολικής χρονικής διάρκειας, έχουν στερήσει σημαντική πληροφορία, αλλά παρόλα αυτά το υπόλοιπο 73% δίνει μια αρκετά καλή εικόνα για τα ποσοστά εμφάνισης των κυματισμών της περιοχής. Τρεις είναι οι πιο σημαντικές κενές περιόδους. Η πρώτη είναι από τις 01/02/2012 ως 10/12/12, η δεύτερη από 13/07/13 ως 28/11/13 και η τρίτη από 25/01/17 ως 23/11/17.



Εικόνα 31. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων H_{max} , $H_{1/3}$, H_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Παρατηρώντας την **Εικόνα 31**, σε ετήσια βάση με ημερομηνία έναρξης την 6^η Οκτωβρίου κάθε χρόνου (ημερομηνία που έγινε η πρώτη πόντιση), το έτος με την καλύτερη κάλυψη είναι αυτό από 06/10/18 ως 06/10/19 με τρεις μονάχα ημέρες χωρίς κάλυψη λόγω ανέλκυσης του οργάνου. Ακολουθεί η κάλυψη των ετών 2014-2015 με 33 ημέρες χωρίς καταγραφές, από 13/4/15 - 5/5/15 και 25/9/15 – 6/10/15. Έπειτα είναι η περίοδος 2015-2016 με 39 ημέρες χωρίς κάλυψη, από 6/10/15 – 11/11/15 και 15/7/16 – 18/7/16.



Εικόνα 32. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων $T_{1/3}$ και T_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Η περίοδος 2013-2014 έχει συνολικά κενά 62 ημερών από 6/10/13 – 28/11/13 και 20/05/14 – 29/5/14. Η περίοδος 2017-2018 παρουσιάζει ακόμα μεγαλύτερο κενό καταγραφών με 80 ημέρες συνολικά από 6/10/17 – 23/11/17 και 9/4/18 – 11/5/18. Τέλος, οι περίοδοι 2011-2012 και 2016-2017 είναι αυτές με την πλέον ελλιπή κάλυψη καθώς σε αυτές αντιστοιχούν μόλις 118 και 111 ημέρες καταγραφών αντίστοιχα. Το έτος (06/10/19 – 06/10/20) αναμένεται να είναι το έτος με την καλύτερη κάλυψη όλων, καθώς κατά την ανέλκυση στις 13/02/20 το όργανο έμεινε εκτός νερού μόλις για έξι ώρες ενώ στην επόμενη ανέλκυση στις 20/08/20 το όργανο δεν κατέγραψε για 18 ώρες.

Πέραν των παραπάνω σχολίων, παρατηρεί κανείς το ίδιο περίπου μοτίβο κυματικών συνθηκών με την τοποθεσία της Αγίας Κυριακής όπου οι μετρήσεις ξεκίνησαν τον Δεκέμβριο του 2012. Εδώ ας σημειωθεί ότι έχουμε αλληλοεπικάλυψη των δύο τοποθεσιών από 6/10/1 ως 31/1/12. Η έναρξη των έντονων κυματικών συνθηκών συμβαίνει ορισμένες φορές και από τον μήνα Νοέμβριο. Αυτές φαίνεται να συνεχίζουν να συμβαίνουν μέχρι και τον μήνα Απρίλιο όπως για παράδειγμα στα έτη 2013, 2015 και 2020. Κατά τους υπόλοιπους μήνες οι κυματικές συνθήκες είναι σαφώς πιο ήπιες με το πλείστο των πιο έντονων κυματικών γεγονότων να φτάνουν σε σημαντικό ύψος κύματος μέχρι τα 2m με σημαντικές περιόδους μεταξύ 6s και 7s (**Εικόνα 32**). Διακριτή εξαίρεση αποτελούν τρία γεγονότα, στις 5/7/2014 με $\{H_{1/3}=2.8m / T_{1/3} = 7.5s\}$, στις 26/9/2018 με $\{H_{1/3}=3m / T_{1/3} = 7.8s\}$ και στις 14/9/2019 με $\{H_{1/3}=3m / T_{1/3} = 8s\}$.

Εντονότερα κυματικά γεγονότα με $H_{1/3} > 3.5m$, τα οποία αντιστοιχούν σε ισχυρές καταιγίδες, καταγράφηκαν καθόλη την περίοδο καταγραφών στην συγκεκριμένη τοποθεσία. Για την ακρίβεια τα γεγονότα αυτά είναι συνολικά στον αριθμό 26 με την πλειοψηφία τους (19) να λαμβάνει χώρα τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο και Φεβρουάριο. Τρία έχουν καταγραφεί μήνα Νοέμβριο, δύο τον μήνα Μάρτιο και ένα τον μήνα Απρίλιο. Από αυτά ξεχωρίζουν οχτώ γεγονότα (**Πίνακας 10**) τα οποία στο ζενίθ ξεπέρασαν τα 4.5m σημαντικό ύψος κύματος και τα οποία προξένησαν σημαντικά προβλήματα στο παράκτιο μέτωπο με ζημιές σε υποδομές αλλά και αυξημένη διάβρωση των ακτών.

Πίνακας 10. Καταγεγραμμένα κυματικά γεγονότα με $H_{1/3} > 4.5m$ ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Ημερομ.	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	Mdir	$H_{max}(m)$	Ημερομ.	$H_{1/3}(m)$	$T_{1/3}(s)$	Mdir	$H_{max}(m)$
1/1/2015	4.7	8.9	N	7.5	14/2/2019	5.0	9.5	NNW	7.3
13/1/2015	4.97	9	NNW	7.7	25/2/2019	5.4	9.7	N	7.5
10/2/2015	5.8	9.3	N	8.2	2/1/2020	4.7	9.3	N	7.1
29/12/2016	4.7	9.5	N	7.4	6/1/2020	6.0	10	NNW	9.9

Στον **Πίνακας 10**, φαίνεται μεταξύ άλλων και το υψηλότερο κύμα που καταγράφηκε στις μετρήσεις που έγιναν στον κόλπο όλα αυτά τα χρόνια. Είναι ύψους 9.9m και αντιστοιχεί στο ζενίθ της καταιγίδας στις 6/1/2020 με μέγιστες συνθήκες $\{H_{1/3}=6m / T_{1/3} = 10s / H_{max} = 9.9m\}$. Οι οχτώ καταγραφές που παρουσιάζονται στον πίνακα αντιστοιχούν μεν στα υψηλότερα γεγονότα με $H_{1/3} > 4.5m$, αλλά αυτό δεν σημαίνει ότι σε αυτά αντιστοιχούν και τα υψηλότερα μέγιστα κύματα. Υπάρχουν άλλες δύο καταγραφές με μέγιστα ύψη κύματος πάνω από 9m. Αυτές μάλιστα τυχαίνει να ανήκουν σε δύο από τις καταιγίδες που αναφέρονται στον πίνακα. Η μία καταγραφή ανήκει στην καταιγίδα της 14/2/2019 και χρονικά ήταν τρεις ώρες πριν από αυτήν που αναφέρεται στον πίνακα. Τα χαρακτηριστικά της ήταν $\{H_{1/3}=4.5m / T_{1/3} = 9.2s / H_{max} = 9.1m\}$. Η άλλη καταγραφή είχε χαρακτηριστικά $\{H_{1/3}=4.8m / T_{1/3} = 9.5s / H_{max} = 9.4m\}$ και χρονικά απείχε 17 ώρες από την καταγραφή της καταιγίδας στις 6/1/2020 που αναφέρεται

στον πίνακα. Η σφοδρότητα της συγκεκριμένης καταιγίδας είναι χαρακτηριστική καθώς για 19 συνεχόμενες ώρες οι καταγραφές έδωσαν σημαντικά ύψη κύματος μεγαλύτερα 4.5m. Ανάλογης σφοδρότητας ήταν μόνο μία ακόμη από τις καταιγίδες που καταγράφηκαν όλο το διάστημα στην περιοχή (και γενικότερα στον κόλπο Χανίων), και ήταν της 25/2/2019 που φαίνεται στον πίνακα. Σε αυτήν οι καταγραφές έδωσαν σημαντικά ύψη κύματος άνω των 4.5m για 16 συνεχόμενες ώρες.

Πίνακας 11. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)										Sum
	0 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	
NoData											27.64
<0.25	2.87	9.65	4.38	1.01	0.13	0.01	0.003	0.004	0.001	0.003	18.07
0.25 - 0.5	2.50	10.08	8.88	1.49	0.46	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	23.46
0.5 - 1	0.12	3.84	9.90	5.49	0.22	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	19.61
1 - 1.5	0.00	0.003	0.51	4.11	1.19	0.01	0.001	0.001	0.00	0.00	5.82
1.5 - 2	0.00	0.00	0.01	0.40	1.99	0.12	0.001	0.00	0.00	0.00	2.53
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.81	0.47	0.01	0.00	0.00	0.00	1.30
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.63	0.05	0.00	0.00	0.00	0.76
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.15	0.00	0.00	0.00	0.38
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.19	0.01	0.00	0.00	0.22
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.03	0.00	0.00	0.13
4.5 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.05
5 - 5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
5.5 - 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.003	0.00	0.005
6 - 6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.001
Sum	5.49	23.57	23.69	12.50	4.88	1.59	0.51	0.12	0.004	0.003	100

Στους Πίνακας 11 και Πίνακας 13 των κοινών κατανομών $H_{1/3}$ με $T_{1/3}$ και $MDir$ καθώς και στο ροδόγραμμα της Εικόνα 33 φαίνεται λεπτομερέστερα η εικόνα του κυματικού καθεστώτος. Λόγω της μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας των δεδομένων του Ενετικού λιμένα, αυτά αντιπροσωπεύουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό το κυματικό καθεστώς του κόλπου Χανίων, σε σχέση με τις άλλες τοποθεσίες. Βλέπουμε λοιπόν, ότι στις τρεις πρώτες κλάσεις που αντιστοιχούν οι συνθήκες με σημαντικό ύψος κύματος μέχρι 1m το ποσοστό εμφάνισης φτάνει το 61.15%. Εύλογα μπορεί να υποθέσει κάποιος ότι το συγκεκριμένο ποσοστό μπορεί να είναι στην πραγματικότητα και μεγαλύτερο αφού οι δύο μεγάλες κενές περιόδους του συγκεκριμένου σετ δεδομένων, συμπεριλαμβάνουν ανοιξιάτικους και θερινούς μήνες εξ' ολοκλήρου, οπότε και η κυματική δραστηριότητα δεν είναι έντονη όπως στους χειμερινούς. Στην ήρεμη κατάσταση θάλασσας αντιστοιχεί περίπου το 18%, η κλάση 0.25m-0.5m εμφανίζει ποσοστό 23.46% ενώ από 0.5m μέχρι 1m έχουμε ποσοστό 19.61%. Η κύρια περίοδος για την κλάση $0.5m < H_{1/3} < 1m$ είναι στα 4s-5s, ενώ για τους χαμηλότερους κυματισμούς αντιστοιχεί η κλάση των 3s-4s. Για τις επόμενες κυματικές κλάσεις έως τα 3.5m όπου πλέον οι κυματισμοί και γι' αυτήν την τοποθεσία θεωρούνται ως ενδιάμεσων νερών αφού ξεπερνούν τα 5s σε περίοδο, το

ποσοστό αθροιστικά είναι στο 10.8%. Οι κύριες περίοδοι έχουν ως εξής: στην κλάση $1\text{m} < H_{1/3} < 1.5\text{m}$ αντιστοιχούν περίοδοι 5s-6s, στις κλάσεις $1.5\text{m} < H_{1/3} < 2\text{m}$ και $2\text{m} < H_{1/3} < 2.5\text{m}$ οι περίοδοι είναι στα 6s-7s ενώ τέλος στις έντονες κυματικές συνθήκες των κλάσεων $2.5\text{m} < H_{1/3} < 3.5\text{m}$ οι κύριες περίοδοι που αντιστοιχούν είναι στα 7s-8s. Οι ισχυρές καταιγίδες σε αυτήν την τοποθεσία καταγράφονται στις κλάσεις $3.5\text{m} < H_{1/3} < 6.5\text{m}$ με τις περιόδους που τους αντιστοιχούν να είναι στα 8s-11s.

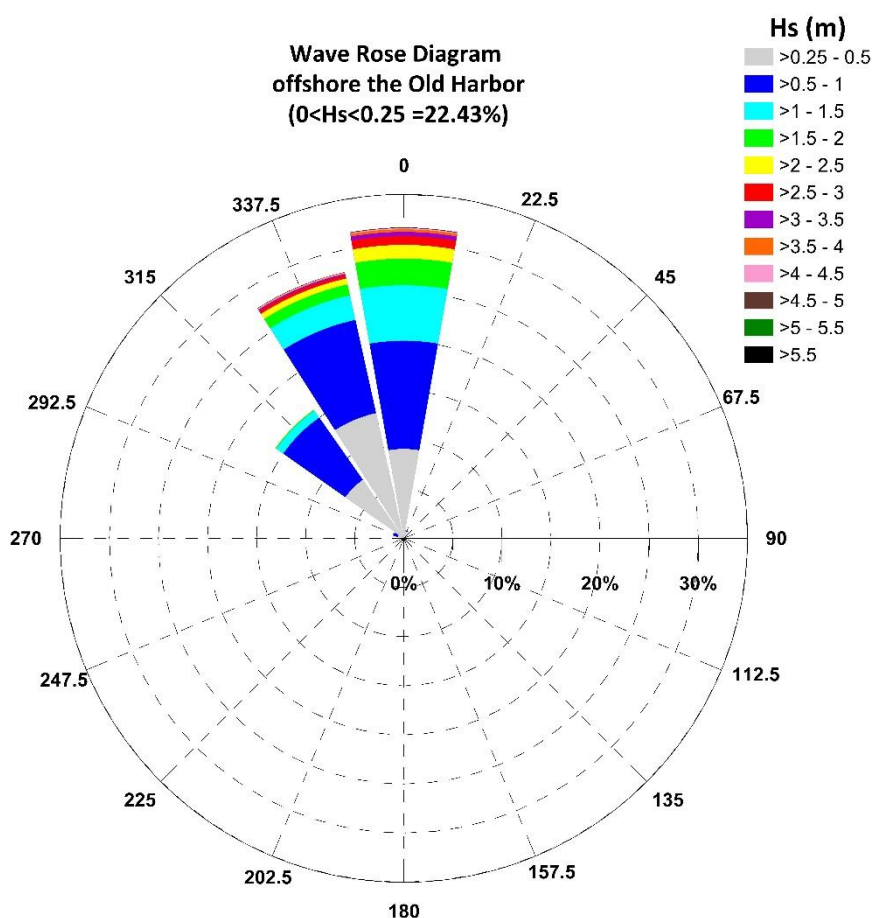
Πίνακας 12. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνιση) των κυματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

H_{m0} (m)	T_p (s)												Sum
	0 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	12 - 13	13 - 14	
NoData													27.68
<0.25	1.80	4.63	3.93	2.55	1.72	0.64	0.17	0.04	0.01	0.003	0.00	0.001	15.49
0.25 - 0.5	2.42	5.11	9.31	3.25	1.88	1.22	0.50	0.16	0.05	0.003	0.001	0.00	23.90
0.5 - 1	0.41	2.65	5.26	9.08	2.34	0.58	0.36	0.14	0.07	0.03	0.01	0.00	20.93
1 - 1.5	0.00	0.02	0.22	1.59	3.71	0.61	0.02	0.01	0.008	0.003	0.001	0.00	6.21
1.5 - 2	0.00	0.00	0.01	0.09	0.98	1.45	0.13	0.001	0.001	0.00	0.00	0.00	2.66
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.82	0.50	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	1.41
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.16	0.52	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.23	0.21	0.01	0.00	0.00	0.00	0.46
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.03	0.18	0.03	0.00	0.00	0.00	0.24
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004	0.09	0.05	0.00	0.00	0.00	0.14
4.5 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.004	0.00	0.00	0.07
5 - 5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004	0.02	0.003	0.00	0.00	0.02
5.5 - 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.001	0.004	0.00	0.00	0.006
6 - 6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.001
Sum	4.63	12.41	18.74	16.56	10.71	5.50	2.46	0.96	0.29	0.05	0.01	0.00	100

Πίνακας 13. Πίνακας κοινής κατανομής $H_{1/3}$ και κύριας διεύθυνσης για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

$H_{1/3}$ (m)	Nautical Degrees**																Sum
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
NoData																	27.68
$T_p < 3.4\text{s}$																	8.41
<0.25	3.12	1.00	0.26	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.07	0.22	0.83	3.22	5.34	14.34
0.25 - 0.5	5.81	0.47	0.03	0.003	0.00	0.003	0.00	0.001	0.004	0.00	0.001	0.003	0.02	0.39	4.65	8.35	19.73
0.5 - 1	7.05	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.31	4.95	6.24	18.63
1 - 1.5	3.61	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.01	0.55	1.63	5.82
1.5 - 2	1.73	0.004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.06	0.73	2.53
2 - 2.5	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.39	1.30
2.5 - 3	0.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.76
3 - 3.5	0.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.38
3.5 - 4	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.22
4 - 4.5	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.13
4.5 - 5	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.05
5 - 5.5	0.005	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.008	0.013
5.5 - 6	0.001	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.004	0.005
6 - 6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.001
Sum	23.35	1.54	0.28	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.07	0.25	1.54	13.45	23.12	100

Η διεύθυνση των προσπιπτόντων κυματισμών διαφέρει μερικώς από την περιοχή της Αγίας Κυριακής, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό μετατοπίζεται στη Β (Ν) διεύθυνση από ΒΒΔ (NNW). Λόγω μεγαλύτερων βαθών πόντισης σε αυτήν την τοποθεσία, η κρίσιμη περίοδος για την διαλογή των αξιόπιστων μετρήσεων τέθηκε στα $T_p = 3.4s$. Έπειτα από αυτή τη διαλογή, το ποσοστό των μετρήσεων που παρουσιάζεται αποτελεί το 63.91% του συνόλου του δείγματος. Οι διευθύνσεις πρόσπτωσης με τα μεγαλύτερα ποσοστά είναι από Β (Ν) έως ΒΔ (NW). Από τα 0.5m σημαντικό ύψος κύματος μέχρι και τα 5m η κύρια διεύθυνση πρόσπτωσης είναι από Β (Ν). Οι υπόλοιπες τρεις κλάσεις των πολύ ισχυρών καταιγίδων είχαν διεύθυνση πρόσπτωσης ΒΒΔ (NNW).

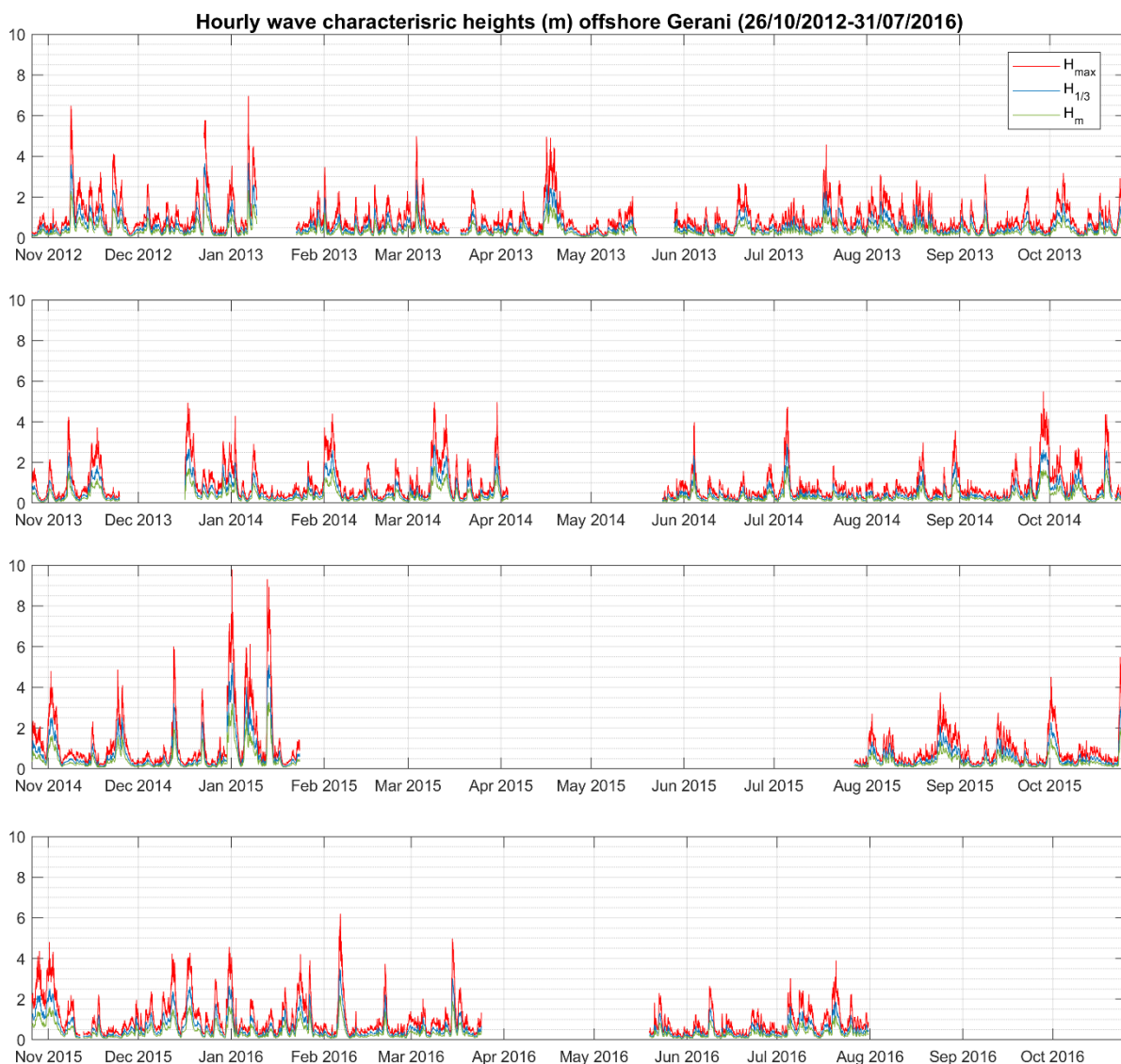


Εικόνα 33. Κυματικό ροδόγραμμα $H_{1/3}$ και $MDir$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα..

6.1.1.γ Τοποθεσία Γερανίου

Η περίοδος καταγραφής στην περιοχή Γεράνι παρουσιάζει κι αυτή κενές περιόδους μέχρι την λήξη της παρακολούθησης στις 31/7/2016. Όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 34**, η πιο σημαντική κενή περίοδος είναι από 23/1/2015 έως 27/07/2015 ενώ άλλες δύο αξιόλογες κενές περιόδους είναι μεταξύ 3/4/2014 - 24/5/2014 και 24/3/2016 – 19/5/2016. Η πιο πλήρης ετήσια

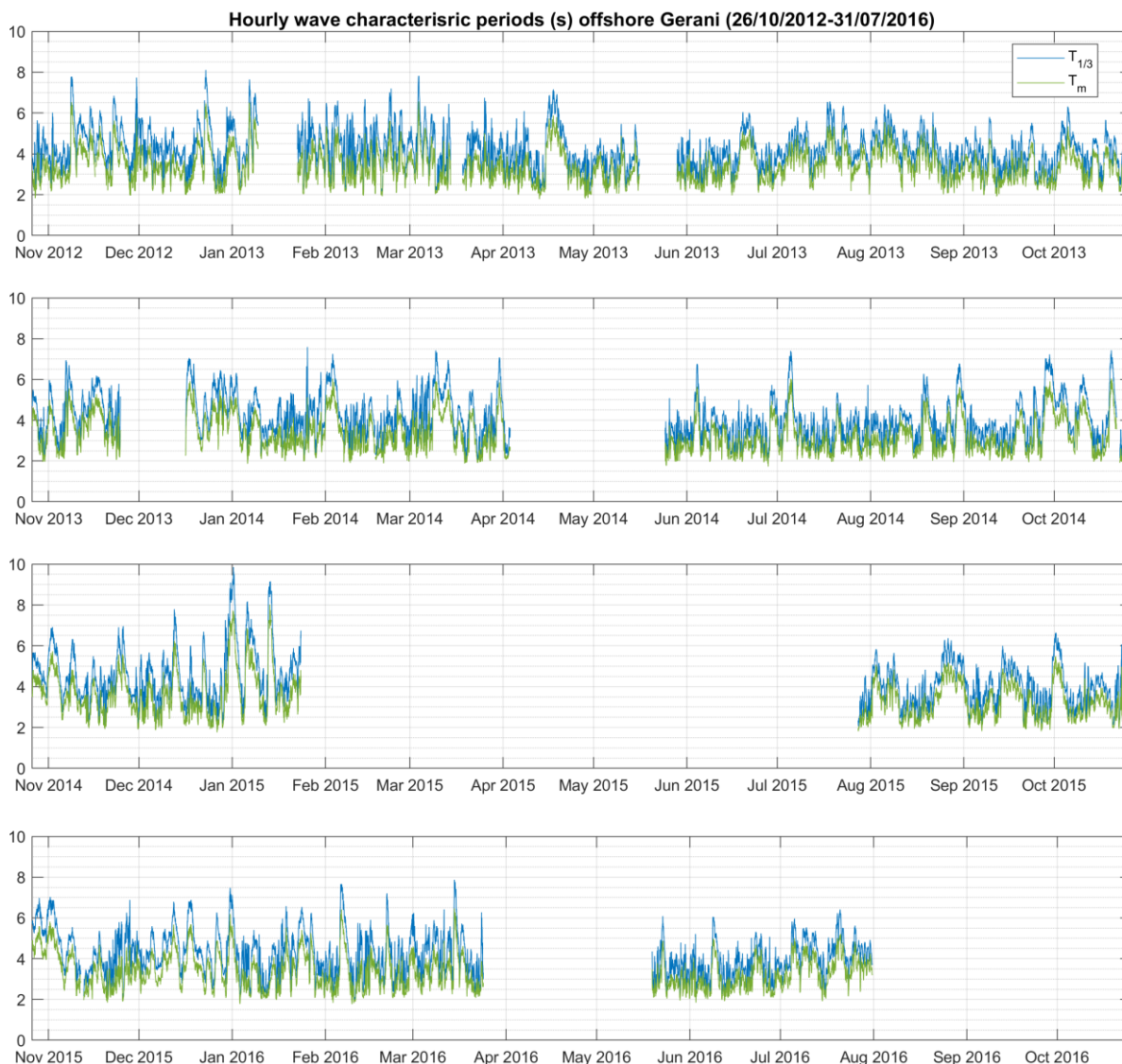
περίοδος αρχής γενομένης από 26/10/12 είναι η πρώτη από 26/10/12 – 26/10/13. Ο μήνας Μάιος είναι αυτός με την χειρότερη κάλυψη καθώς σε κανένα έτος δεν είχε ολική κάλυψη. Έπειτα είναι ο Απρίλιος με ολική κάλυψη το 2013 και στα υπόλοιπα έτη ουσιαστικά μηδενική αφού το 2014 μόνο για τρεις ημέρες στην αρχή του μήνα έδωσε καταγραφές.



Εικόνα 34. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων H_{max} , $H_{1/3}$, H_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.

Δεδομένου ότι η παρακολούθηση σταμάτησε στις 31/7/2016, οι μήνες Αύγουστος, Σεπτέμβριος και Οκτώβριος είναι αυτοί που καλύφθηκαν εξ' ολοκλήρου καθ' όλη την διάρκεια των παρατηρήσεων από τρεις φορές ο καθένας. Ο μήνας Νοέμβριος για επτά μόλις ημέρες το έτος 2013 δεν καταγράφηκε τέσσερις φορές, με αποτέλεσμα να είναι ο μήνας με την καλύτερη κάλυψη. Οι μήνες Δεκέμβριος και Ιανουάριος ακολουθούν με σχεδόν τρεισήμισι μηνών κάλυψη. Οι μήνες Φεβρουάριος, Ιούνιος και Ιούλιος είχαν κάλυψη τριών μηνών. Τέλος ο μήνας Μάρτιος καλύφθηκε εξ' ολοκλήρου το έτος 2014, το 2013 καλύφθηκε για 27 ημέρες, το 2016 για 24 ημέρες και το 2015 καθόλου. Συνεπώς η εικόνα που αποκτήθηκε για την συγκεκριμένη περιοχή είναι ικανοποιητική μεν, ιδιαίτερα για τις διευθύνσεις πρόσπτωσης, αλλά παρ' όλα

αυτά η ποσοστιαία κάλυψη σε σχέση με την ολική διάρκεια της παρακολούθησης παρέμεινε στο 75% περίπου.



Εικόνα 35. Αποτελέσματα zero-downcrossing ανάλυσης των παραμέτρων $T_{1/3}$ και T_m , για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.

Το μεγαλύτερο κομμάτι των καταγραφών στην τοποθεσία αυτή συμπίπτει χρονικά με τις καταγραφές στην τοποθεσία ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. Από την άλλη όμως υπάρχουν δεδομένα στο Γεράνι που συμπληρώνουν ένα μεγάλο κενό των δεδομένων του Ενετικού λιμένα για την περίοδο 13/7/2013 – 28/11/2013 καθώς επίσης και για την περίοδο 26/10/12 – 10/12/12, δίνοντας πληρέστερη εικόνα για το συνολικό κυματικό καθεστώς του κόλπου. Η σημαντικότητα της δεύτερης περιόδου είναι μεν η συμπλήρωση δεδομένων αλλά από την άλλη συμπληρώνει στο σύνολο μία επιπλέον έντονη καταιγίδα στις 8/11/12 με χαρακτηριστικά $\{H_{1/3}=3.6m \mid T_{1/3} = 7.8s\}$. Το ίδιο πράγμα συμβαίνει και για τις ημερομηνίες 4/1/2013 – 10/1/2013 όπου το όργανο ανοιχτά του Ενετικού λιμένα είχε ανελκυστεί. Κατά τη διάρκεια εκείνων των ημερών καταγράφηκε από το όργανο στο Γεράνι άλλη μία έντονη καταιγίδα με χαρακτηριστικά $\{H_{1/3}=3.7m \mid T_{1/3} = 7.7s\}$. Επιπλέον, σε αρκετές άλλες περιπτώσεις οι

μετρήσεις στο Γεράνι συμπληρώνουν κενά λόγω ανέλκυσης του οργάνου ανοιχτά του Ενετικού λιμένα αλλά και μοναδικές διάσπαρτες μετρήσεις που βγήκαν εκτός διαλογής.

Για τον γενικότερο χαρακτηρισμό των κυματικών συνθηκών για το υπόλοιπο των καταγραφών στο Γεράνι ισχύουν τα σχόλια που έγιναν παραπάνω για τον Ενετικό λιμένα και την Αγία Κυριακή. Οι κλάσεις των περιόδων αντιστοιχούν στις ίδιες κυματικές κλάσεις και στις τρεις περιοχές (Πίνακας 14). Η συγκεκριμένη παρατήρηση ήταν αναμενόμενη καθώς τα όργανα και στις τρεις τοποθεσίες ποντίστηκαν σε παραπλήσια βάθη. Αναμενόμενες επίσης είναι και οι διαφορές στα ποσοστά των κλάσεων λόγω του διαφορετικού όγκου δεδομένων ανά περιοχή.

Πίνακας 14. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερατίου.

$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)								Sum
	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	
NoData									25.24
<0.25	5.01	11.30	3.84	0.78	0.05	0.00	0.00	0.00	20.98
0.25 - 0.5	5.00	10.90	9.10	1.39	0.26	0.02	0.00	0.00	26.66
0.5 - 1	0.32	2.72	8.86	3.87	0.14	0.003	0.00	0.00	15.92
1 - 1.5	0.00	0.01	0.92	4.90	0.51	0.01	0.00	0.00	6.35
1.5 - 2	0.00	0.00	0.01	1.04	1.40	0.02	0.00	0.00	2.47
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.01	1.42	0.18	0.00	0.00	1.61
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.25	0.00	0.00	0.40
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.15	0.03	0.00	0.18
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.05	0.01	0.08
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.01	0.06
4.5 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.05
5 - 5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Sum	10.34	24.93	22.73	11.99	3.93	0.66	0.16	0.04	100

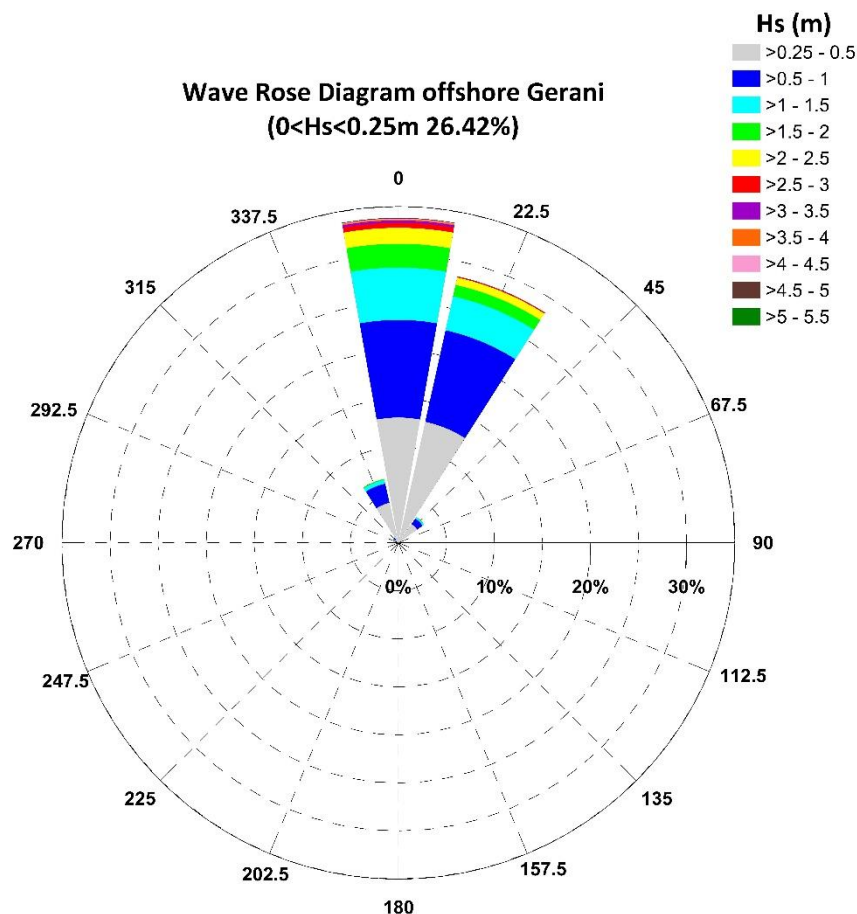
Στον παραπάνω γενικότερο χαρακτηρισμό δεν περιλαμβάνεται η διεύθυνση πρόσπτωσης. Όπως στις δύο προηγούμενες τοποθεσίες η τοπογραφία και η βαθυμετρία έπαιζαν σημαντικό ρόλο, έτσι κι εδώ βλέπουμε ότι η τοποθεσία πόντισης στο Γεράνι είναι ουσιαστικά στο κέντρο (κατά μήκος) του κόλπου Χανίων. Δεν υπάρχει εμπόδιο ξηράς Βορειο-Ανατολικά αυτής με αποτέλεσμα το ποσοστό BBA (NNE) κυματισμών να είναι ιδιαίτερα αυξημένο για την περιοχή (Εικόνα 36). Όπως και στην περίπτωση του Ενετικού λιμένα έτσι κι εδώ οι ανώτερες κλάσεις των ισχυρών καταιγίδων παρουσιάζονται στην Β (Ν) διεύθυνση (Πίνακας 16).

Πίνακας 15. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνιση) των κυματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.

H_{m0} (m)	T_p (s)											Sum
	0-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	
												25.25
<0.25	2.38	5.26	4.12	2.88	2.00	0.69	0.31	0.11	0.03	0.01	0.00	17.78
0.25 - 0.5	4.97	5.10	10.93	3.42	1.78	0.73	0.43	0.26	0.10	0.06	0.003	27.78
0.5 - 1	0.90	1.34	4.96	7.89	1.49	0.31	0.14	0.07	0.01	0.02	0.01	17.15
1 - 1.5	0.00	0.07	0.26	2.62	3.41	0.29	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	6.69
1.5 - 2	0.00	0.00	0.01	0.15	1.60	0.90	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	2.67
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.20	1.16	0.35	0.003	0.00	0.00	0.00	1.72
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.24	0.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.54
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.13	0.04	0.00	0.00	0.00	0.20
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	0.11
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.04	0.02	0.00	0.00	0.06
4.5 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.02	0.003	0.00	0.05
5 - 5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
Sum	8.25	11.77	20.28	16.96	10.51	4.34	1.71	0.62	0.21	0.09	0.01	100

Πίνακας 16. Πίνακας κοινής κατανομής $H_{1/3}$ και κύριας διεύθυνσης για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.

$H_{1/3}$ (m)	Nautical Degrees**																Sum
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
																	25.25
																	9.59
< 0.25	4.72	5.42	2.40	0.77	0.25	0.10	0.06	0.04	0.02	0.05	0.08	0.07	0.10	0.21	0.74	2.17	17.21
0.25 - 0.5	8.53	8.44	1.56	0.10	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.03	0.26	2.78	21.72
0.5 - 1	6.62	6.36	0.45	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.05	0.15	1.34	15.02
1 - 1.5	3.57	2.37	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.27	6.35
1.5 - 2	1.60	0.79	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	2.47
2 - 2.5	1.09	0.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	1.61
2.5 - 3	0.34	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.003	0.40
3 - 3.5	0.16	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.18
3.5 - 4	0.08	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08
4 - 4.5	0.06	0.003	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06
4.5 - 5	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
5 - 5.5	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
Sum	26.81	23.98	4.55	0.88	0.27	0.10	0.06	0.04	0.02	0.05	0.08	0.08	0.14	0.29	1.19	6.63	100

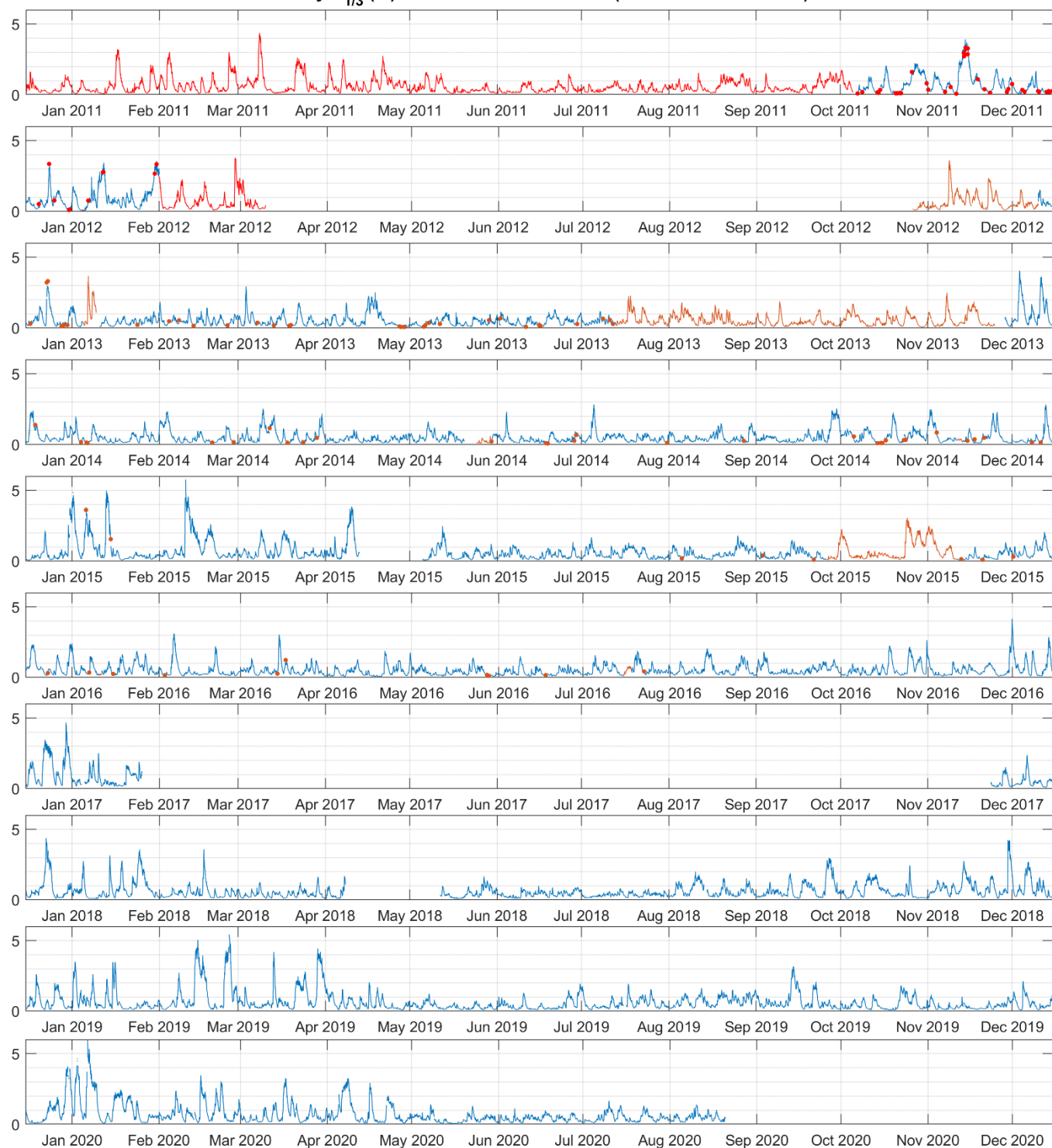


Εικόνα 36. Κυματικό ροδόγραμμα $H_{1/3}$ και $MDir$ για την τοποθεσία ανοιχτά του Γερανίου.

6.1.1.δ Συνολική εικόνα κυματικών συνθηκών στον κόλπο Χανίων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η κάλυψη του κυματικού καθεστώτος στον κόλπο Χανίων από τις 15/10/11 που ποντίστηκε πρώτη φορά το όργανο στην Αγία Κυριακή μέχρι και τις 20/08/2020 οπότε και έχουμε τις τελευταίες μετρήσεις ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. Στην συγκεκριμένη παρουσίαση χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς τα δεδομένα του Ενετικού λιμένα καθώς αυτά καλύπτουν τη μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Όπου υπάρχει αλληλοεπικάλυψη καταγραφών παρουσιάζονται οι μετρήσεις του Ενετικού λιμένα. Στις περιπτώσεις όπου υπάρχουν κενά στις καταγραφές του Ενετικού λιμένα, αυτά συμπληρώνονται με μετρήσεις των άλλων τοποθεσιών.

Hourly $H_{1/3}$ (m) offshore the Chania Gulf (15/12/2010-20/08/2020)



Εικόνα 37. Αλληλοεπικαλυπτόμενη απεικόνιση του σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) και στις τρεις τοποθεσίες εντός του κόλπου Χανίων για την περίοδο 15/12/2010 – 20/08/2020. Κενές περίοδοι καταγραφής ανοιχτά του Ενετικού λιμένα (μπλέ χρώμα) έχουν αντικατασταθεί με τις καταγραφές ανοιχτά της Αγίας Κυριακής (κόκκινο χρώμα) και ανοιχτά του Γερανίου (καφέ χρώμα).

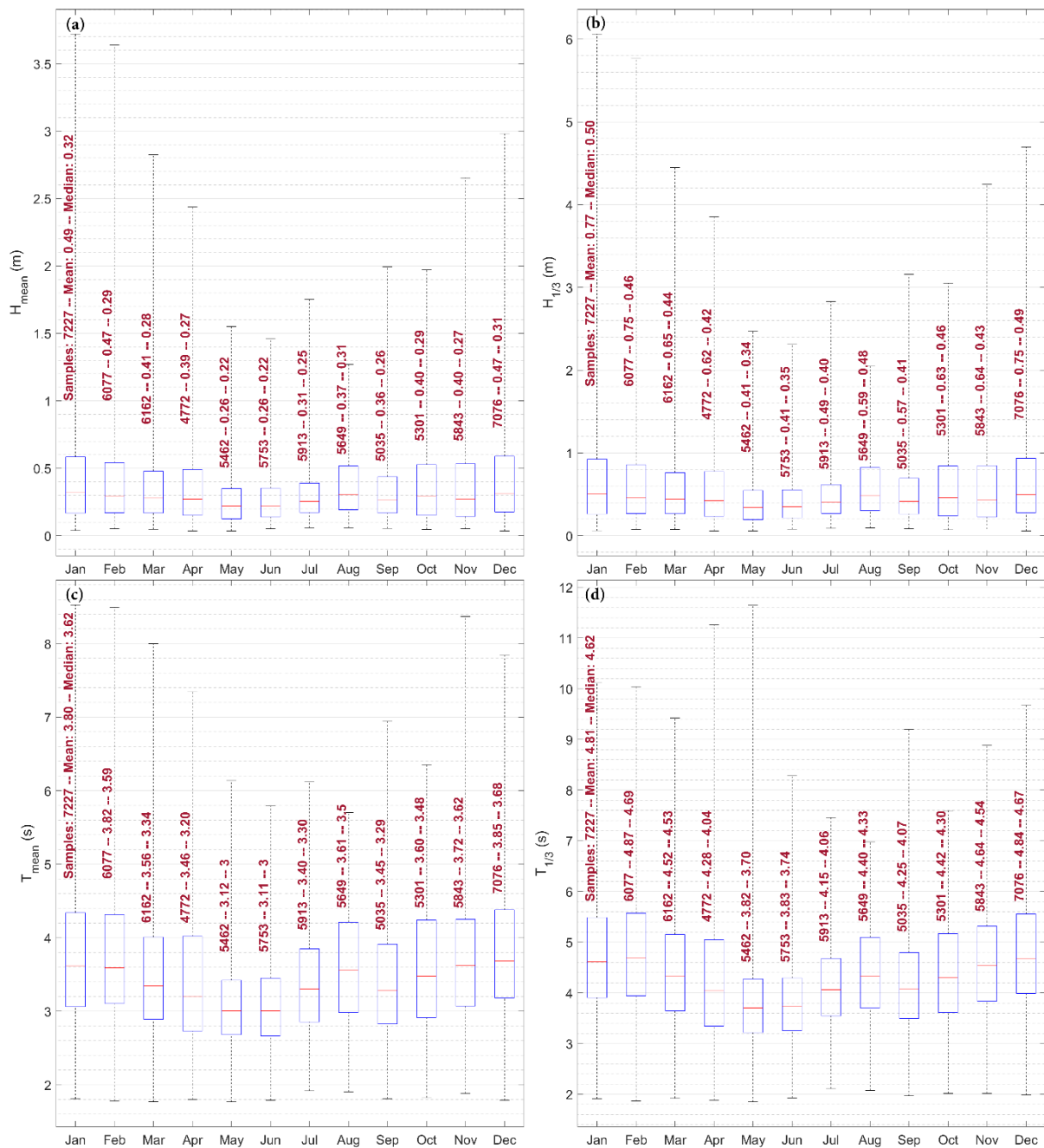
Στο σύνολο της από τις 15/10/12 μέχρι τέλους, η κάλυψη αφορά 84,870 ώρες. Από αυτές οι 70,270 καταγράφηκαν βάσει του πλάνου δειγματοληψίας και πέρασαν τον έλεγχο ποιότητας. Ποσοστιαία λοιπόν η κάλυψη του κυματικού καθεστώτος στον κόλπο Χανίων έγινε επιτυχώς κατά 82.8%. Κάλυψη η οποία κρίνεται σαφώς ικανοποιητικότερη από την μακροχρόνια

κάλυψη που υπήρξε ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. Στην **Εικόνα 37** απεικονίζονται οι καταγραφές στο σύνολό τους. Οι διαφορετικές τοποθεσίες ξεχωρίζουν από τους διαφορετικούς χρωματισμούς, με τις κουκίδες να αφορούν τις μεμονωμένες καταγραφές. Είναι εμφανές το θετικό αποτέλεσμα που είχαν εν τέλει στην συνολική κάλυψη του κυματικού καθεστώτος οι καταγραφές σε διαφορετικές τοποθεσίες.

Πίνακας 17. Πίνακας κοινής κατανομής (% εμφάνισης) των κυματικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$ για την συνολική κάλυψη του Κόλπου Χανίων.

$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)										Sum
	0 - 3	3 - 4	4 - 5	5 - 6	6 - 7	7 - 8	8 - 9	9 - 10	10 - 11	11 - 12	
NoData											17.20
<0.25	3.42	11.17	4.67	1.04	0.12	0.01	0.002	0.004	0.001	0.002	20.45
0.25 - 0.5	2.95	11.62	10.29	1.68	0.46	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	27.05
0.5 - 1	0.14	4.11	11.26	6.38	0.23	0.05	0.004	0.00	0.00	0.00	22.17
1 - 1.5	0.00	0.004	0.63	4.91	1.46	0.02	0.005	0.01	0.00	0.00	7.02
1.5 - 2	0.00	0.00	0.01	0.54	2.25	0.16	0.001	0.00	0.00	0.00	2.96
2 - 2.5	0.00	0.00	0.00	0.01	0.95	0.55	0.01	0.00	0.00	0.00	1.52
2.5 - 3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.67	0.05	0.00	0.00	0.00	0.81
3 - 3.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.16	0.004	0.00	0.00	0.39
3.5 - 4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.19	0.01	0.00	0.00	0.22
4 - 4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.04	0.00	0.00	0.13
4.5 - 5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.00	0.05
5 - 5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01
5.5 - 6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.002	0.002	0.00	0.005
6 - 6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.001	0.00	0.00	0.001
Sum	6.51	26.91	26.85	14.56	5.57	1.76	0.52	0.12	0.004	0.002	100

Στον **Πίνακας 17** δίνεται η κοινή κατανομή $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$. Συγκρίνοντας την ολική κάλυψη με αυτή του Ενετικού λιμένα που ήταν η μεγαλύτερη μεταξύ των τριών τοποθεσιών, παρατηρούνται αξιόλογες διαφορές μέχρι την κλάση των 2 - 2.5 m. Δεν προστέθηκαν στο συνολικό δείγμα (από την Αγ. Κυριακή και το Γεράνι) ισχυρές καταιγίδες, οι οποίες ούτως ή άλλως εμφανίζουν χαμηλά ποσοστά. Η κατανομή των κύριων περιόδων στις κυματικές κλάσεις ύψους είναι ίδια με αυτή των δεδομένων του Ενετικού λιμένα.



Εικόνα 38. Θηκογράμματα μέσω των στατιστικών περιγραφικών κυματικών παραμέτρων ανά μήνα για το συγκεντρωτικό σετ δεδομένων και από τις τρεις τοποθεσίες καταγραφής εντός του κόλπου Χανίων. Εκτός των θηκών οι γραμμές φτάνουν μέχρι τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές ανά μήνα. (a) H_{mean} (b) $H_{1/3}$ (c) T_{mean} και (d) $T_{1/3}$.

Στα θηκογράμματα της **Εικόνα 38** συγκεντρώνονται τα παραπάνω δεδομένα από τις τρεις τοποθεσίες και κατηγοριοποιούνται ανά μήνα. Παρουσιάζονται οι μέσες περιγραφικές παράμετροι $H_{1/3}$, H_{mean} (**Εικόνα 38[a][b]**) $T_{1/3}$ και T_{mean} (**Εικόνα 38[c][d]**). Οι κόκκινες γραμμές εντός των θηκών αφορούν τις διαμέσους των μηνιαίων δειγμάτων, ενώ για κάθε μήνα αναφέρονται επίσης ο αριθμός των μετρήσεων καθώς και η μέση τιμή τους. Οι γραμμές εκτός των θηκών φτάνουν μέχρι την μέγιστη και ελάχιστη τιμή των παραμέτρων ανά μήνα. Κύριο συμπέρασμα της συγκεντρωτικής ατής απεικόνισης αποτελεί το ήπιο κυματικό καθεστώς που χαρακτηρίζει την περιοχή. Το 50% των μετρήσεων κυμαίνεται μεταξύ 0.15 και 0.6 m ανάλογα

με τον μήνα όσο αφορά το H_{mean} , ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για το $H_{1/3}$ κυμαίνεται μεταξύ 0.2 και σχεδόν 1 m. Επίσης μέσω των διαμέσων βλέπουμε ότι περισσότερες από τις μισές μετρήσεις χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλά μέσα και σημαντικά ύψη κύματος. Όσον αφορά τις περιόδους, το 50% των μέσων περιόδων εντοπίζεται μεταξύ 2.65 και 4.4 s, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τις σημαντικές περιόδους κυμαίνεται μεταξύ 3.2 και 5.6 s.

Περισσότερο ενεργητικοί παρουσιάζονται οι μήνες από Οκτώβριο έως και Φεβρουάριο ενώ από τους ανοιξιάτικους και θερινούς ξεχωρίζει ο Αύγουστος ως πιο ενεργός. Οι μήνες με την λιγότερη ενεργητικότητα φαίνεται να είναι ο Μάιος και ο Ιούνιος. Στα συμπεράσματα αυτά πρέπει να ληφθεί υπόψη η απουσία δεδομένων για τις περιόδους από μέσα Μαρτίου του 2012 έως και τέλη Οκτωβρίου 2012 καθώς και από τέλη Ιανουαρίου 2017 έως τέλη Νοεμβρίου 2017. Επίσης οι μήνες Μάρτιος και Απρίλιος των ετών 2015 και 2018 παρουσιάζουν επιπλέον απώλειες μετρήσεων. Παρόλα αυτά για κάθε μήνα ο συνολικός αριθμός καταγραφών είναι αρκετά μεγάλος ώστε να παρέχεται μια αξιόπιστη εικόνα για το κυματικό καθεστώς κάθε μηνός.

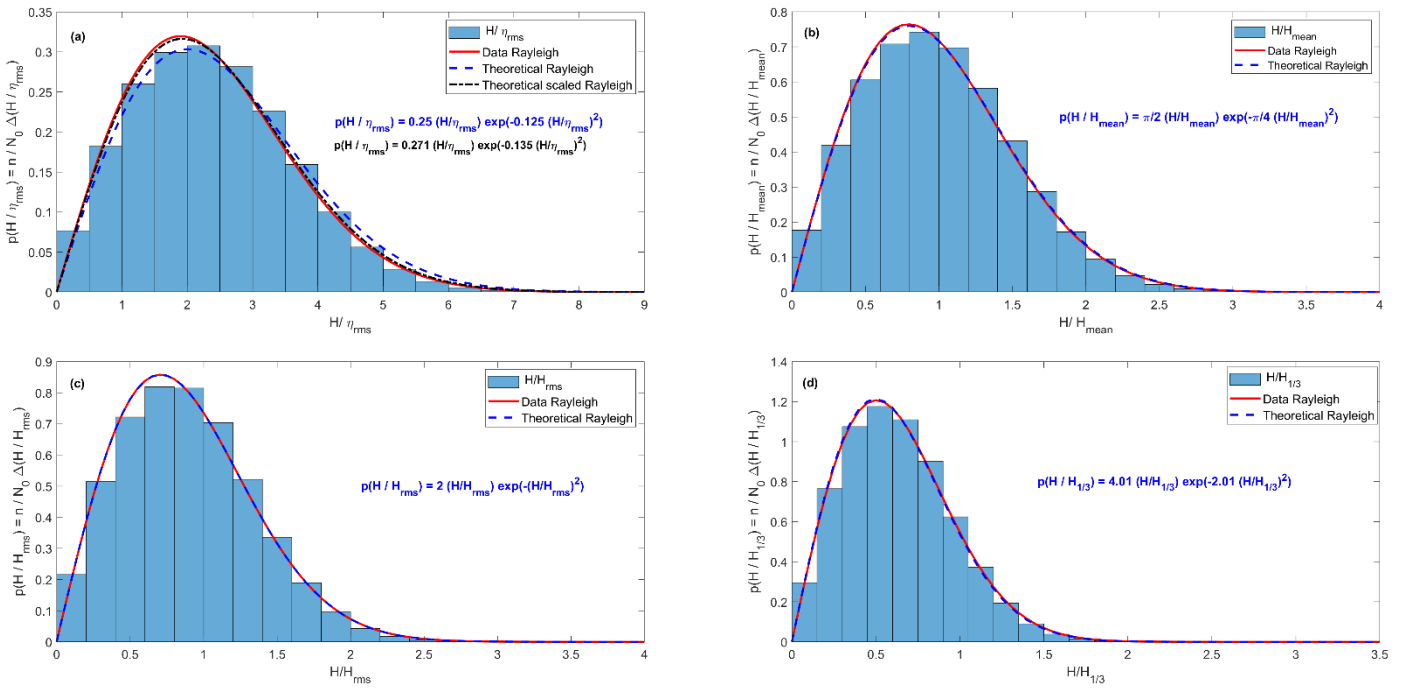
6.1.2 Αποτελέσματα στατιστικής ανάλυσης χρονοσειρών.

Σε αυτή την ενότητα ακολουθούν λεπτομερέστερα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των χρονοσειρών καταγραφής. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων εστιάζεται στα δεδομένα της τοποθεσίας ανοιχτά του Ενετικού λιμένα Χανίων. Ο κυριότερος λόγος είναι η μεγαλύτερη διάρκεια κάλυψης για την συγκεκριμένη περιοχή η οποία συνεπάγεται την παρουσία περισσότερων κυματικών συνθηκών στο δείγμα. Επίσης, στην ανάλυση δεν συμπεριλαμβάνονται οι καταγραφές που αντιστοιχούν σε ήρεμη κατάσταση θάλασσας ($H_{1/3} < 0.25m$) και συνεπώς την ασθενή ανάπτυξη κυματισμών. Άλλος ένας λόγος της συγκεκριμένης διαλογής, είναι η απομάκρυνση από το δείγμα παροδικών κυματισμών που προκαλούνται από σκάφη, και οι οποίοι κυματισμοί επηρεάζουν σημαντικά τα στατιστικά αποτελέσματα των ήρεμων συνθηκών. Το σύνολο των χρονοσειρών που απέμεινε προς ανάλυση μετά και από αυτήν την διαλογή, ανέρχεται στις 42,331 χρονοσειρές.

6.1.2.α Αποτελέσματα ανάλυσης στατιστικών και φασματικών κυματικών περιγραφικών παραμέτρων κυματικών υψών και περιόδων.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγική ενότητα, η κατανομή πιθανοτήτων που εκφράζει σε πολύ καλό βαθμό τους θαλάσσιους κυματισμούς, ιδιαίτερα των ενδιάμεσων και βαθέων υδάτων, είναι η Rayleigh. Αυτό ισχύει και για τους κυματισμούς που καταγράφηκαν στην

παρούσα έρευνα. Στα διαγράμματα της **Εικόνα 39** παρουσιάζονται οι κατανομές ομαδοποιημένων μεμονομένων κυματισμών, κανονικοποιημένων (normalized) ως προς διαφορετικές μέσες περιγραφικές παραμέτρους των χρονοσειρών στις οποίες αντιστοιχούν (άξονας x). Οι μεμονωμένοι κυματισμοί αφορούν το σύνολο των 42,331 χρονοσειρών του δείγματος του Ενετικού λιμένα. Ο κάθετος άξονας αποτελεί την σχετική συχνότητα εμφάνισης n / N_0 (όπου n είναι ο αριθμός των κυματισμών στις αντίστοιχες κλάσεις και N_0 ο συνολικός αριθμός των κυματισμών) διά το βήμα της ομαδοποίησης, $\Delta(H/H_*)$, που έχει οριστεί για τους κανονικοποιημένους κυματισμούς στον άξονα x, έτσι ώστε το εμβαδόν κάτω από το ιστόγραμμα να ισούται με την μονάδα.



Εικόνα 39. Ιστογράμματα κανονικοποιημένων μεμονομένων κυματικών υψών και εφαρμοσμένη σε αυτά η κατανομή Rayleigh. (α) Κατανομή H/η_{rms} , (β) Κατανομή H/H_{mean} , (γ) Κατανομή H/H_{rms} , (δ) Κατανομή $H/H_{1/3}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Η κανονικοποίηση των μεμονωμένων κυματισμών έγινε ως προς την τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης της ανύψωσης της στάθμης, $\eta_{rms} = \sqrt{\eta^2}$, του μέσου ύψους κύματος (H_{mean}), του μέσου τετραγωνικού ύψους κύματος (H_{rms}) και του σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) κάθε χρονοσειράς. Σε κάθε περίπτωση εφαρμόστηκε στα δεδομένα η κατανομή πιθανοτήτων Rayleigh, και συγκρίθηκε με την κλασική εκδοχή για τους θαλάσσιους κυματισμούς που αναπτύχθηκε από τον [Longuet-Higgins, 1952](#). Και για τις τέσσερις περιπτώσεις, βλέπουμε ότι η εφαρμοσμένη στα δεδομένα Rayleigh (κόκκινη κατανομή) ανταποκρίνεται σε πάρα πολύ ικανοποιητικό βαθμό στην περιγραφή της κατανομής των δεδομένων. Όσο αφορά τις κανονικοποιήσεις ως προς H_{mean} , H_{rms} και $H_{1/3}$, φαίνεται ότι η κατανομή Rayleigh των δεδομένων συγκλίνει με μεγάλη ακρίβεια στις αντίστοιχες θεωρητικές κατανομές Rayleigh του

Longuet-Higgins. Στην κανονικοποίηση από την η_{rms} , παρατηρείται μια μικρή απόκλιση μεταξύ της κατανομής Longuet-Higgins και αυτής που προκύπτει από τα δεδομένα. Η διαφορά αυτή έγκειται στην παραδοχή που έγινε, μεταξύ άλλων, από τον [Longuet-Higgins, 1952](#) και η οποία αφορούσε την μελέτη κυματισμών με στενό εύρος φάσματος, ενώ στην πραγματικότητα το φάσμα διασπείρεται σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων ([Goda, 2010](#)). Ο συντελεστής της κλίσης μεταξύ των $H_{1/3}$ και H_{m0} (βλ. **Εικόνα 40[b]**), για το συγκεκριμένο σετ δεδομένων, έχει τιμή $b=0.9609$. Εάν αυτός εφαρμοστεί εμπειρικά στην θεωρητική κατανομή Rayleigh της εξίσωσης (1.7) για η_{rms} , ως παρακάτω,

$$p(x) = 2a^2 \frac{H}{b^2 \eta_{rms}} \exp \left[-a^2 \left(\frac{H}{b^2 \eta_{rms}} \right)^2 \right], \quad (6.1)$$

τότε βλέπουμε ότι η παραπάνω κατανομή (**Εικόνα 39[a]** μαύρη κατανομή) συγκλίνει ακόμα περισσότερο στην κατανομή των δεδομένων.

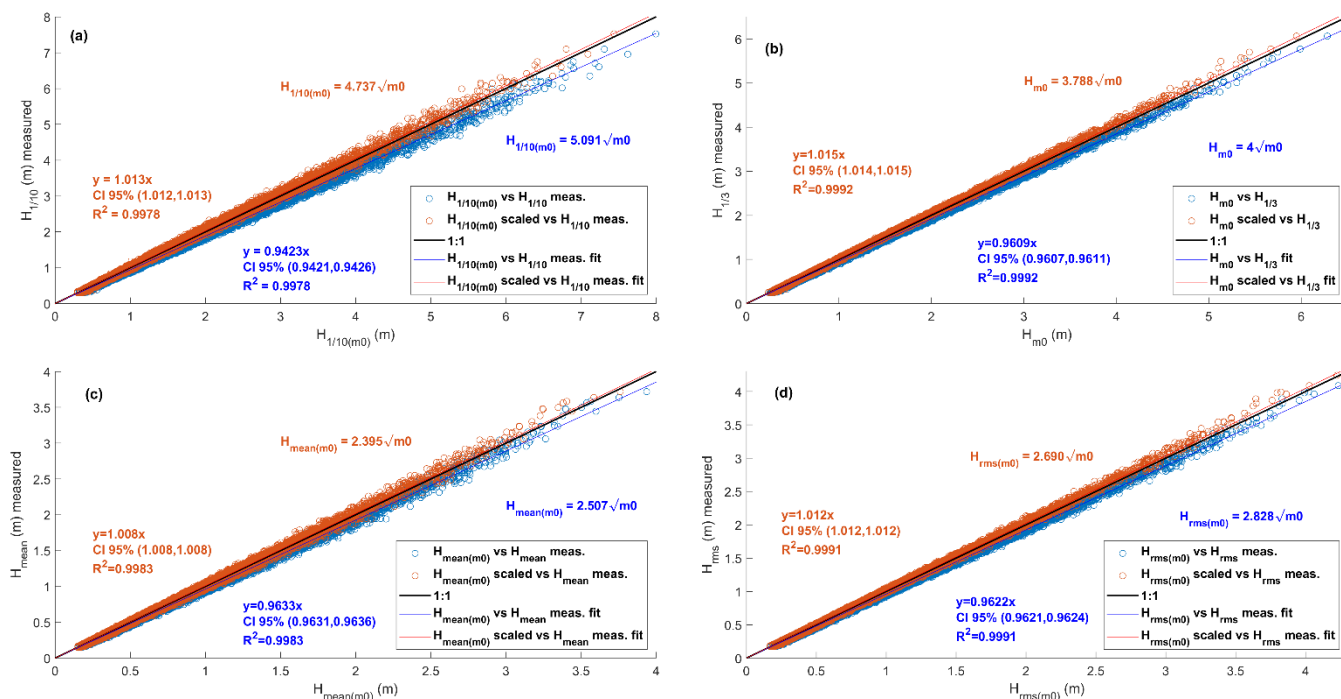
Στον **Πίνακα 18** δίνονται οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτουν οι θεωρητικές φασματικές παράμετροι μέσω Longuet-Higgins καθώς και οι αντίστοιχες σχέσεις που προκύπτουν έπειτα από την επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου και για τις τρεις τοποθεσίες. Οι πολλαπλασιαζόμενοι συντελεστές με την τετραγωνική ρίζα της φασματικής διακύμανσης των δεδομένων πεδίου, αποτελούν μέσες τιμές του συνόλου των παρατηρήσεων για κάθε τοποθεσία. Οι διαφορές μεταξύ των τριών τοποθεσιών είναι ουσιαστικά αμελητέες αφού με ακρίβεια πρώτου δεκαδικού δίνουν ίδιες τιμές στους συντελεστές, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση μεταξύ των τριών τοποθεσιών όσον αφορά την κατανομή των κυματισμών και τις κύριες περιγραφικές παραμέτρους ύψους κύματος. Κοινό χαρακτηριστικό των φασματικών εκτιμήσεων των μετρήσεων πεδίου είναι οι χαμηλότερες τιμές των συντελεστών σε σχέση με των θεωρητικών για όλες τις παραμέτρους. Επίσης, όσον αφορά την τιμή του λόγου του σημαντικού ύψους κύματος προς την διακύμανση ($H_{1/3}/\sqrt{m_0} = 3.788$), σημειώνεται η διαφορά που παρουσιάζει από την Rayleigh είναι στα πλαίσια της διαφοράς που αναφέρεται και στην βιβλιογραφία, γενικότερα για τις μετρήσεις πεδίου ([Goda, 2010](#); [US Army Corps Of Engineers, 2002](#); [Vandever et al., 2008](#)). Σημειώνεται επίσης ότι ο λόγος $H_{1/3}/\sqrt{\eta_{rms}}$ είναι ουσιαστικά ίδιος με τιμή 3.7882.

Πίνακας 18. Μέσες τιμές φασματικών παραμέτρων μέσω Longuet-Higgins και των μετρήσεων πεδίου για τις τρεις τοποθεσίες ανοιχτά του κόλπου Χανίων.

Αρ.Χρονοσειρών		$H_{1/3}$	$H_{1/10}$	H_{mean}	H_{rms}
Long.Hig.		$4.004\sqrt{m_0}$	$5.091\sqrt{m_0}$	$2.507\sqrt{m_0}$	$2.828\sqrt{m_0}$
Εν.Λιμένας	42231	$3.788\sqrt{m_0}$	$4.737\sqrt{m_0}$	$2.395\sqrt{m_0}$	$2.690\sqrt{m_0}$
Γεράνι	17735	$3.776\sqrt{m_0}$	$4.721\sqrt{m_0}$	$2.394\sqrt{m_0}$	$2.685\sqrt{m_0}$
Αγ.Κυριακή	8443	$3.789\sqrt{m_0}$	$4.741\sqrt{m_0}$	$2.381\sqrt{m_0}$	$2.683\sqrt{m_0}$

Οι υπερεκτιμήσεις των τιμών ύψους που δίνει η θεωρητική κατανομή Rayleigh για τις φασματικές παραμέτρους σε σχέση με τις στατιστικές παραμέτρους της μεθόδου των διαβάσεων από μετρήσεις πεδίου (Πίνακας 18), είναι κάτι σύνηθες που αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Casas-Prat & Holthuijsen, 2010; Forristall, 1978; Goda, 2010; Holthuijsen, 2007; M. A. Tayfun, 1990). Η διαφορά αυτή απεικονίζεται και στα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων του Ενετικού λιμένα στην Εικόνα 40. Στην ίδια εικόνα απεικονίζονται και οι φασματικές εκτιμήσεις βάσει των συντελεστών από τις μετρήσεις πεδίου που δίνονται στον Πίνακας 18. Φαίνεται πως κάνοντας χρήση αυτών των συντελεστών για την εκτίμηση των φασματικών, οι τιμές ύψους υποεκτιμώνται σε σχέση με την μέθοδο των διαβάσεων, σχεδόν στον ίδιο βαθμό και για τις τέσσερις παραμέτρους.

Τα αποτελέσματα για την εκτίμηση της πιο πιθανής τιμής του H_{max} η οποία αποτελεί συνάρτηση του $H_{1/3}$ και του αριθμού των κυματισμών σε συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (βλ. Εξ.1.18) φαίνονται στην Εικόνα 41. Η εκτίμηση έγινε βάσει του συνολικού αριθμού των κυματισμών που προέκυψαν από την μέθοδο της προς τα κάτω διαβάσεως για κάθε χρονοσειρά. Είναι εμφανής η μεγαλύτερη διασπορά των εκτιμήσεων σε σχέση με τις άλλες περιγραφικές παραμέτρους. Βάσει της καμπύλης εφαρμογής υπάρχει μια μικρή υποεκτίμηση του H_{max} σε σχέση με τις μετρήσεις αλλά η έντονη διασπορά δεν μπορεί να παραβλεφθεί. Στο δεύτερο γράφημα της ίδιας εικόνας δίνεται μια άποψη του λόγου μεταξύ της εκτιμήσης και της μέτρησης σε σχέση με τη μέτρηση και βλέπουμε την τάση της διασποράς να μειώνεται με την αύξηση του μετρούμενου ύψους H_{max} και ο λόγος να προσεγγίζει την μονάδα.

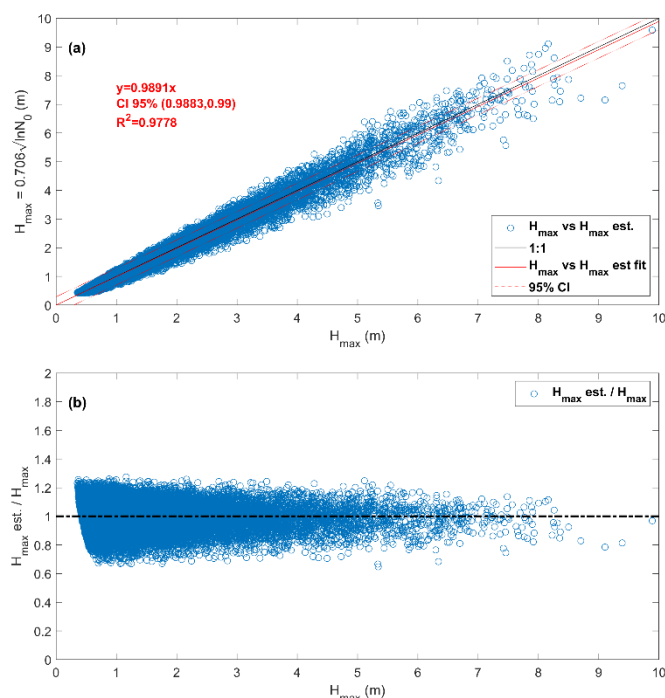


Εικόνα 40. Συσχέτιση μεταξύ φασματικών εκτιμήσεων μέσων περιγραφικών κυματικών παραμέτρων και στατιστικών υπολογισμών αυτών. Με μπλέ χρώμα η συσχέτιση βάση της θεωρητικής εκτίμησης Longuet-Higgins και με καφέ η εκτίμηση βάση των υπολογισμών πεδίου. Οι παράμετροι που απεικονίζονται αφορούν τις παραμέτρους (α) $H_{1/10}$, (β) $H_{1/3}$, (γ) H_{mean} και (δ) H_{rms} . Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των μέσων περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων και για τις τρεις περιοχές, καθώς και η συσχέτιση που δίνεται μεταξύ τους από την κατανομή Rayleigh. Βλέπουμε ότι οι μέσες τιμές των μετρήσεων πεδίου έχουν ελάχιστη απόκλιση από αυτές που προκύπτουν θεωρητικά από την κατανομή Rayleigh. Αποτέλεσμα αναμενόμενο λόγω της πολύ καλής εφαρμογής της θεωρητικής κατανομής στα δεδομένα που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Στην Εικόνα 42 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων για τον Ενετικό λιμένα μέσω των διαγραμμάτων συσχέτισης μεταξύ των παραμέτρων καθώς και των ιστογραμμάτων κατανομής των λόγων των παραμέτρων. Η συσχέτιση μεταξύ τους αυξάνει γραμμικά σε όλο το εύρος τιμών ενώ από τα ιστογράμματα φαίνεται ότι οι τιμές του λόγου $H_{1/3} / H_{mean}$ (Εικόνα 42[d]) παρουσιάζουν την μεγαλύτερη διασπορά με εύρος περίπου 0.4 και τυπική απόκλιση περίπου 0.04.

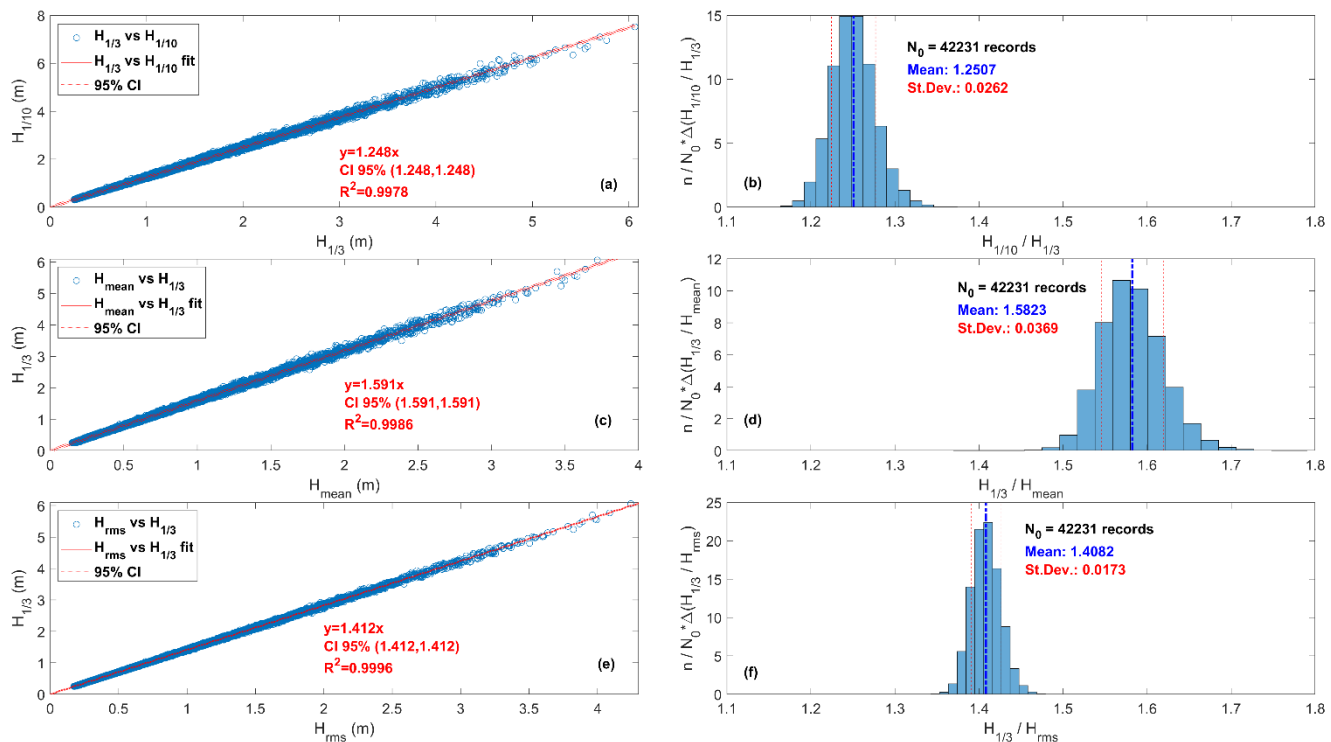
Πίνακας 19. Μέσες τιμές των λόγων μέσων περιγραφικών κυματικών υψών μέσω Longuet-Higgins και των μετρήσεων πεδίου για τις τρεις τοποθεσίες ανοιχτά του κόλπου Χανίων.

	$H_{1/10} / H_{1/3}$	$H_{1/3} / H_{\text{mean}}$	$H_{1/3} / H_{\text{rms}}$	$H_{\text{max}} / H_{1/3}$
Long.Hig.	1.271	1.597	1.416	$\approx 1.6 - 2.0$
Εν.Λιμένας	1.251	1.582	1.408	1.711
Γεράνι	1.251	1.578	1.406	1.717
Αγ.Κυριακή	1.251	1.592	1.413	1.702



Εικόνα 41. (α) Συσχέτιση μεταξύ μετρούμενου και εκτιμώμενου μέγιστου ύψους κύματος και (β) συσχέτιση μεταξύ του λόγου των δύο και του μετρούμενου μέγιστου ύψους κύματος. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Οι τιμές εκτίμησης του λόγου $H_{\text{max}} / H_{1/3}$, παρουσιάζουν μεγάλο εύρος λόγω της μοναδικότητας που χαρακτηρίζει το H_{max} και της εν γένει τυχαιότητας των θαλάσσιων κυματισμών. Στο ιστόγραμμα (Εικόνα 43[d]) οι τιμές του λόγου φαίνεται να κυμαίνονται σ' ένα εύρος μεταξύ 1.27 – 2.58 με μέση τιμή στο 1.71 περίπου. Για την εκτίμηση του H_{max} μέσω της εξίσωσης (1.18) αναφέρεται ότι ο λόγος $H_{\text{max}} / H_{1/3}$ δίνει τιμές μεταξύ 1.6 και 2.0 (Goda, 2010), με τιμές 1.6 να είναι πιθανότερες για καταγραφές των 20min (Reeve et al., 2012). Συνεπώς όσον αφορά την μέση τιμή ο λόγος των πειραματικών δεδομένων βρίσκεται εντός αυτού του εύρους.

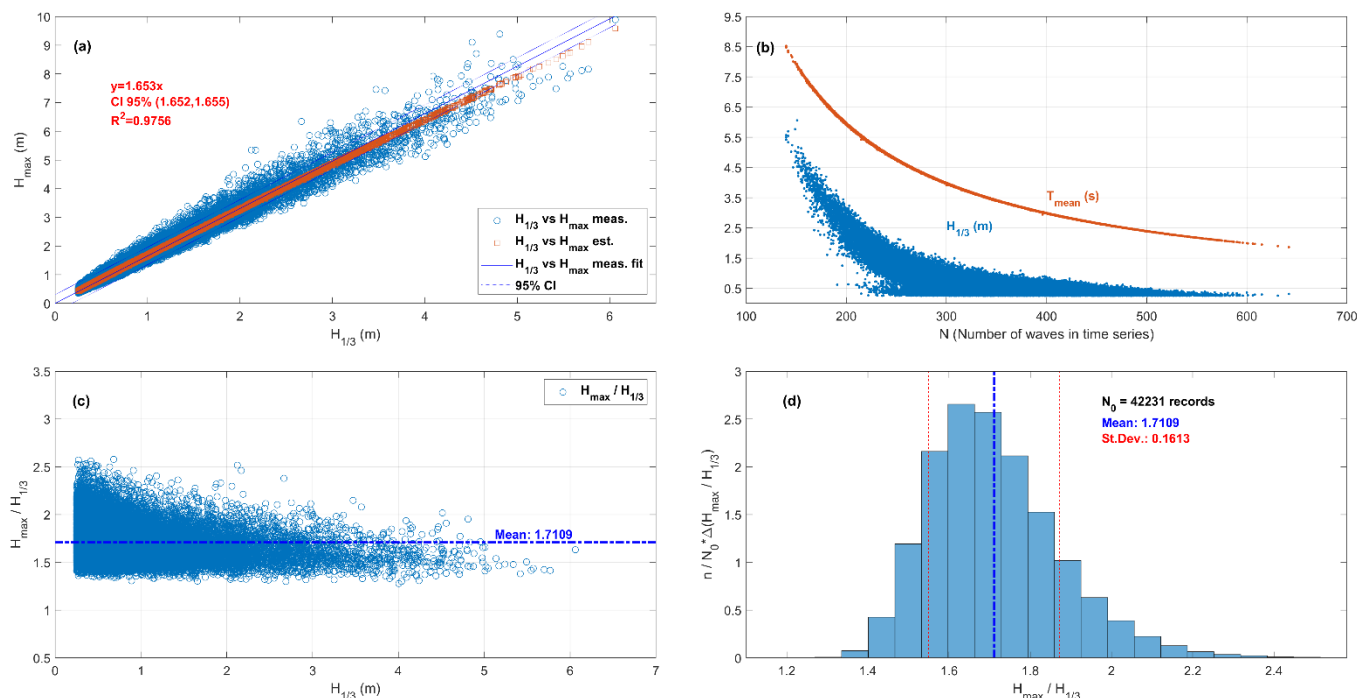


Εικόνα 42. Συσχετίσεις μεταξύ μέσων περιγραφικών στατιστικών παραμέτρων και κατανομές εμφάνισης των λόγων τους. (a)-(b) $H_{1/10} / H_{1/3}$, (c)-(d) $H_{1/3} / H_{mean}$, (e)-(f) $H_{1/3} / H_{rms}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Από την άλλη βέβαια χρειάζεται επιπλέον προσοχή σε περίπτωση που κάποιος επιθυμεί να επιλέξει την συγκεκριμένη μέση τιμή σε συνδυασμό με το $H_{1/3}$ για την εκτίμηση του H_{max} , καθώς η επιλογή αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό κατασκευής προστατευτικού έργου και συνεπώς στην κοστολόγηση του. Από το διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ των δύο παραμέτρων (Εικόνα 43[a]) παρατηρείται έντονη διασπορά ιδιαίτερα για $H_{1/3} > 3m$. Επίσης φαίνεται ότι όσο αυξάνει το $H_{1/3}$ μειώνεται ο λόγος $H_{max} / H_{1/3}$ (Εικόνα 43[c]). Πιο συγκεκριμένα, η πλειονότητα των τιμών άνω της μέσης τιμής βρίσκεται σε κυματικές συνθήκες με $H_{1/3} < 3m$, ενώ λίγες τιμές ξεπερνούν την μέση τιμή σε έντονες κυματικές καταιγίδες με $H_{1/3} > 3.5m$ με μόλις 3 περιπτώσεις να βρίσκουν το H_{max} διπλάσιο του $H_{1/3}$ στις έντονες κυματικές συνθήκες. Για ισχυρές καταιγίδες δε με $H_{1/3} > 4.5m$, τιμές ύψους οι οποίες θα πρέπει να αποτελούν τιμές σχεδιασμού για την κατασκευή έργων προστασίας στην περιοχή, η μέση τιμή των λόγων πέφτει στο 1.56. Η συγκεκριμένη μέση τιμή βέβαια προέρχεται από μικρό δείγμα παρατηρήσεων (μόλις 55 στο σύνολο) αλλά είναι ενδεικτική της κατάστασης που επικρατεί κατά την διάρκεια καταιγίδων στην περιοχή.

Στην Εικόνα 43[a] παρουσιάζονται επίσης οι εκτιμήσεις για την πιο πιθανή τιμή H_{max} . Η καλή γραμμική συσχέτιση είναι αναμενόμενη αφού υπενθυμίζεται ότι η εκτίμηση για την πιο πιθανή τιμή του μέγιστου ύψους κύματος για συνολικό αριθμό N_0 κυματισμών δίνεται από την σχέση $H_{max} \approx H_{1/3} 0.706\sqrt{\ln N_0}$. Η γραμμική συσχέτιση όμως οδηγεί και στην αδυναμία των

εκτιμήσεων να συλλάβουν την τυχαιότητα που διακρίνει την τιμή του μέγιστου ύψους κύματος σε μία χρονοσειρά. Επίσης παρατηρείται ότι από τιμές $H_{1/3} > 2.5\text{m}$, οι εκτιμήσεις για την πιο πιθανή τιμή του μέγιστου ύψους κύματος αρχίζουν να αποκλίνουν από την καμπύλη εφαρμογής μεταξύ των μετρούμενων H_{max} και $H_{1/3}$, και να δίνουν τιμές χαμηλότερες της καμπύλης.



Εικόνα 43. Συσχέτιση στατιστικού $H_{1/3}$ και H_{max} . (a) Διάγραμμα συσχέτισης H_{max} - $H_{1/3}$ (b) συσχέτιση μεταξύ συνολικού αριθμού κυματισμών χρονοσειράς (N) και T_{mean} και $H_{1/3}$, (c) συσχέτιση μεταξύ του λόγου των δύο και του $H_{1/3}$, (d) κατανομή εμφάνισης των λόγων τους. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

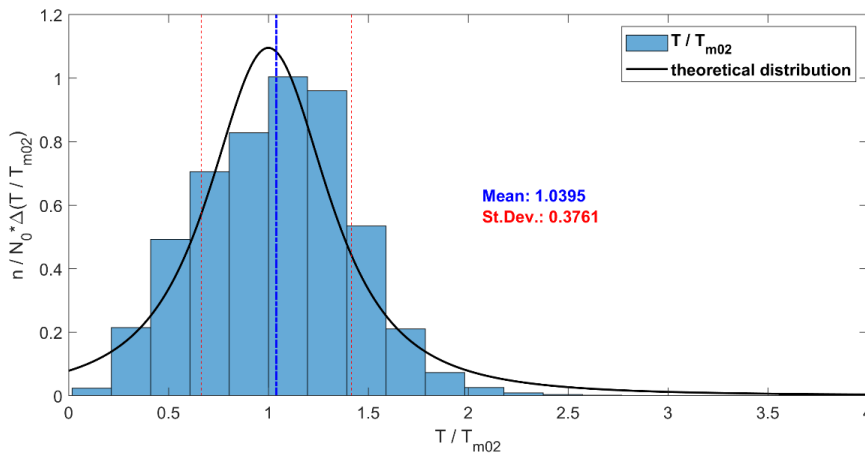
Στην **Εικόνα 43[b]** φαίνεται ότι καταγραφές με $H_{1/3} > 2.5\text{m}$ αρχίζουν να έχουν καταγεγραμμένους μεμονωμένους κυματισμούς λιγότερους από 200. Εν αντιθέσει οι ηπιότερες κυματικές συνθήκες με μεγαλύτερο αριθμό κυματισμών είναι και αυτές που εφαρμόζουν καλύτερα στην καμπύλη. Για τιμές σημαντικού ύψους κύματος κάτω των 2.5m , οι εκτιμήσεις ταυτίζονται με την καμπύλη. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται στον συνολικό αριθμό των κυματισμών που καταγράφονται στις έντονες κυματικές συνθήκες κατά την διάρκεια των 20min που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Όσο αφορά τις περιόδους των μεμονωμένων κυματισμών, δεν ακολουθούν κάποια κοινά αποδεκτή κατανομή όπως τα ύψη ακολουθούν την Rayleigh. Ο [Longuet-Higgins, 1975](#) παρουσίασε μια περιθωριακή κατανομή για τις κυματικές περιόδους βασιζόμενος, όπως και στην περίπτωση των υψών, σε στενό εύρος της φασματικής κατανομής. Η σχέση της περιθωριακής αυτής κατανομής για τις κυματικές περιόδους δίνεται από

$$p(\tau) = \frac{\nu^2}{2[\nu^2 + (\tau - 1)^2]^{3/2}}, \quad (6.2)$$

όπου ν είναι η παράμετρος φασματικού πλάτους (εξ. 3.13) και $\tau = T/T_{m02}$.

Στο ιστόγραμμα της **Εικόνα 44** δίνεται η κατανομή των κανονικοποιημένων μεμονωμένων περιόδων από δείγμα των δεδομένων του Ενετικού λιμένα (08/2019 – 08/2020). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται αφορούν κυματικές συνθήκες με $H_{1/3} > 0.25m$. Με μια πρώτη παρατήρηση φαίνεται ότι η κατανομή τους απέχει της μορφής των υψών κύματος. Εφαρμόζοντας στην θεωρητική περιθωριακή κατανομή την τιμή $\nu=0.4564$, η οποία αντιστοιχεί στην μέση τιμή των δεδομένων που απεικονίζονται, βλέπουμε ότι αυτή περιγράφει σχετικά καλά την κατανομή των περιόδων για την συγκεκριμένη περιοχή.



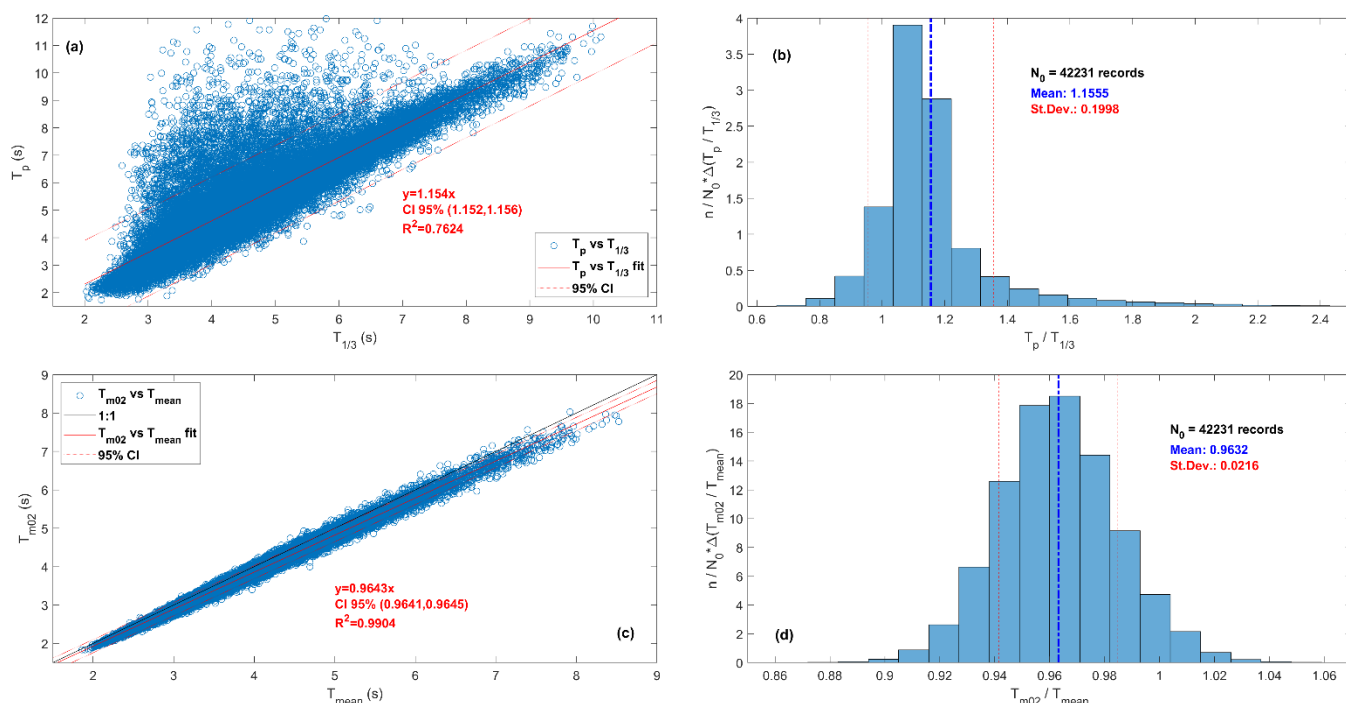
Εικόνα 44. Ιστογράμμο κανονικοποιημένων μεμονωμένων κυματικών περιόδων. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα για την περίοδο (08/2019 – 08/2020).

Πίνακας 20. Μέσες τιμές των λόγων μέσων περιγραφικών κυματικών περιόδων για τις τρεις τοποθεσίες ανοιχτά του κόλπου Χανίων.

	$T_p / T_{1/3}$	$T_{1/10} / T_{1/3}$	$T_{1/3} / T_{mean}$	T_{m02} / T_{mean}
Εν.Λιμένας	1.15	1.02	1.23	0.96
Γεράνι	1.15	1.02	1.22	0.96
Αγ.Κυριακή	1.16	1.02	1.25	0.96

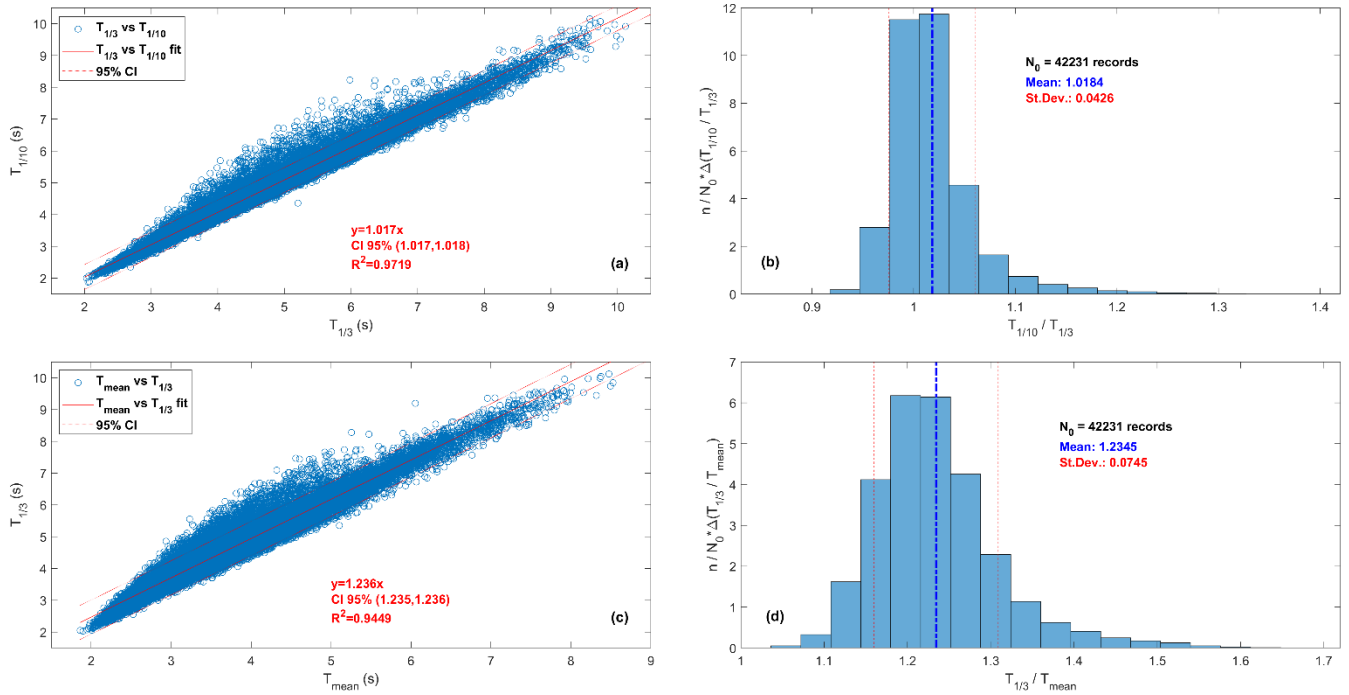
Παρ'όλη την δυσκολία περιγραφής της κατανομής των περιόδων με μια ήδη γνωστή κατανομή, οι μέσες στατιστικές περίοδοι που συνήθως χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των κυματικών συνθηκών, συσχετίζονται μεταξύ τους σε γενικές γραμμές μέσω της σχέσης $T_{max} \approx T_{1/10} \approx T_{1/3} \approx a\bar{T}$ με τον συντελεστή a να παίρνει τιμές μεταξύ 0.9 και 1.4 (Goda,

2010; US Army Corps Of Engineers, 2002). Στον Πίνακα 20 δίνονται οι μέσες τιμές μεταξύ των λόγων διάφορων στατιστικών και φασματικών περιόδων για τις τρεις περιοχές μελέτης. Παρ'όλη την διαφορά στα μεγέθη των δειγμάτων βλέπουμε ότι οι λόγοι αντιπροσωπεύονται από ίδιες μέσες τιμές μεταξύ των τοποθεσιών.



Εικόνα 45. Διάγραμμα συσχέτισης και ιστόγραμμα κατανομής για τις μέσες στατιστικές και φασματικές περιόδους (a)-(b) $T_p - T_{1/3}$, (c)-(d) $T_{m02} - T_{mean}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

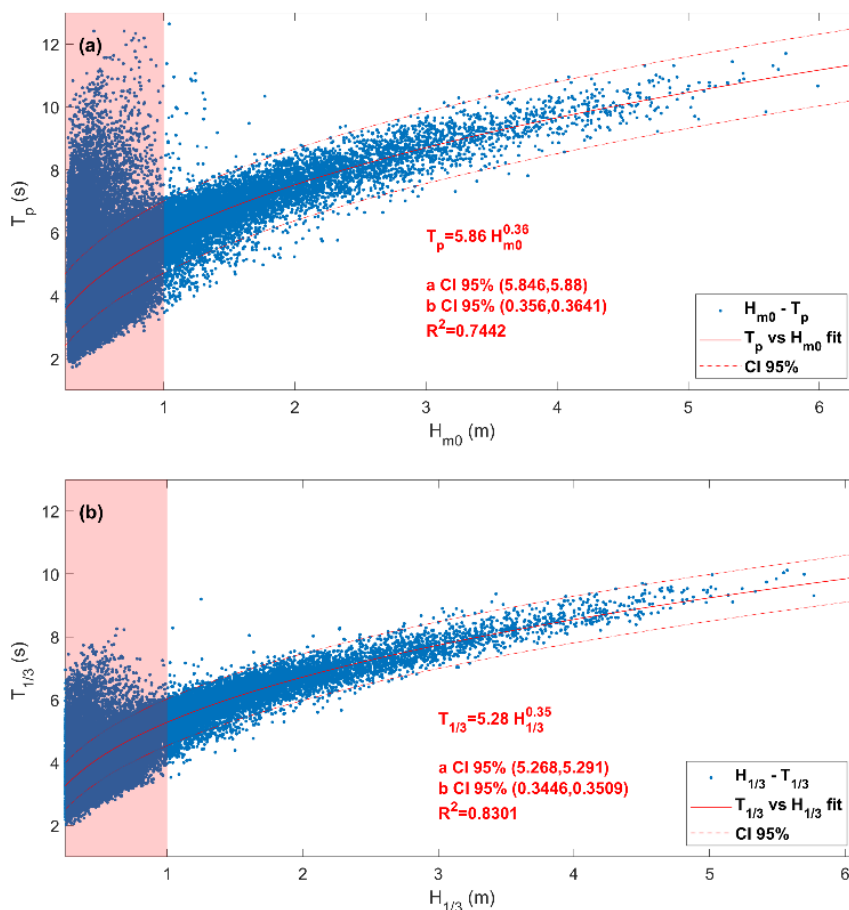
Στις Εικόνα 45 και Εικόνα 46 απεικονίζεται με λεπτομέρεια η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων περιόδου καθώς και τα ιστογράμματα κατανομών των λόγων τους για τα δεδομένα ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. Η συσχέτιση μεταξύ T_p και $T_{1/3}$ είναι αυτή που παρουσιάζει την μεγαλύτερη διασπορά (Εικόνα 45[a]). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ενώ η στατιστική παράμετρος $T_{1/3}$ αποτελεί μέσο όρο τιμών του ενός τρίτου των υψηλότερων κυματισμών, η T_p αναφέρεται στην συχνότητα που αντιστοιχεί στην κορυφή του ενεργειακού φάσματος. Για έντονες κυματικές συνθήκες στην περιοχή, οι οποίες είναι αποτέλεσμα των ισχυρών τοπικών ανέμων, το μέγιστο της ενεργειακής πυκνότητας αντιστοιχεί στους υψηλότερους κυματισμούς που μετρώνται μέσω της μεθόδου των διαβάσεων. Οι κυματισμοί αυτοί αντιστοιχούν σε $T_{1/3} > 7s$. Από το διάγραμμα συσχέτισης (Εικόνα 45[a]) φαίνεται ότι σε αυτές τις περιόδους οι δύο παράμετροι συγκλίνουν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μπορεί αξιόπιστα να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του λόγου τους για τον καθορισμό τους. Επιπλέον, από το ιστόγραμμα κατανομής του λόγου τους φαίνεται ότι ο μεγαλύτερος όγκος των παρατηρήσεων βρίσκεται μεταξύ 1 και 1.22.



Εικόνα 46. Διάγραμμα συσχέτισης και ιστόγραμμα κατανομής για τις μέσες στατιστικές περιόδους (a)-(b) $T_{1/10} - T_{1/3}$, (c)-(d) $T_{1/3} - T_{mean}$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Η μέση φασματική περίοδος T_{m02} είναι αυτή που αντιστοιχεί στην στατιστική περίοδο T_{mean} (Goda, 2010). Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ των δύο στα δεδομένα πεδίου (Εικόνα 45[c]). Η T_{m02} δίνει ελαφρώς μικρότερες τιμές σε σχέση με την T_{mean} σε όλο το μεταξύ τους εύρος. Τέλος, στην Εικόνα 46 δίνονται οι συσχετίσεις για τους άλλους δύο λόγους $T_{1/10} / T_{1/3}$ και $T_{1/3} / T_{mean}$. Παρατηρείται περισσότερη διασπορά σε περιόδους μεταξύ 3 – 7 s αλλά από τα ιστογραμματα φαίνεται ότι η πλειονότητα των τιμών των λόγων βρίσκονται γύρω από τη μέση τιμή για την κάθε περίπτωση.

Οι βασικότερες των κυματικών παραμέτρων που αναφέρθηκαν έως τώρα για την περιγραφή του κυματικού καθεστώτος, είναι το στατιστικό και φασματικό ύψος κύματος και αντίστοιχα η στατιστική σημαντική περίοδος και η περίοδος κορυφής του ενεργειακού φάσματος. Μία πρώτη περιγραφή μεταξύ αυτών των στατιστικών και φασματικών παραμέτρων παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα 6.1.1 μέσω των ανάλογων πινάκων κοινής κατανομής για κάθε τοποθεσία. Στην Εικόνα 47 απεικονίζονται τα διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των φασματικών και στατιστικών υψών και περιόδων.



Εικόνα 47. Διαγράμματα συσχέτισης (α) φασματικών παραμέτρων H_{m0} και T_p και (β) στατιστικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και $T_{1/3}$. Οι σκιασμένες περιοχές περιλαμβάνουν τα δεδομένα ($H_{1/3} < 1m$) τα οποία δεν λήφθηκαν υπόψη στις καμπύλες εφαρμογής. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Και στις δύο περιπτώσεις η αύξηση μεταξύ περιόδων και ύψους ακολουθεί το ίδιο μοτίβο. Η απεικονιζόμενη περιορισμένη αύξηση των περιόδων και των υψών οφείλεται στο ανάπτυγμα πελάγους για τον κόλπο Χανίων. Ενδεικτικά για την περιοχή του Ενετικού λιμένα (από όπου είναι και τα δεδομένα που φαίνονται στα διαγράμματα) το ισοδύναμο ανάπτυγμα πελάγους (effective fetch) είναι στα 175 km με Β την κύρια διεύθυνση (Συνολάκης *et al.*, 2011), και είναι αυτό που περιορίζει την ανάπτυξη των κυματισμών σε καιρικές συνθήκες καταιγίδας - μέσες ταχύτητες ανέμου 15-20 m/s. Οι συγκεκριμένες καιρικές συνθήκες χρειάζονται μόλις 10 με 12 ώρες προκειμένου να έχουμε πλήρη ανάπτυξη κυματισμών στην περιοχή. Όταν δε η διάρκεια των έντονων καιρικών συνθηκών ξεπερνά τις 20 ώρες (κάτι που συμβαίνει συχνά) έχουμε καταγραφές με $H_{1/3} > 4m$.

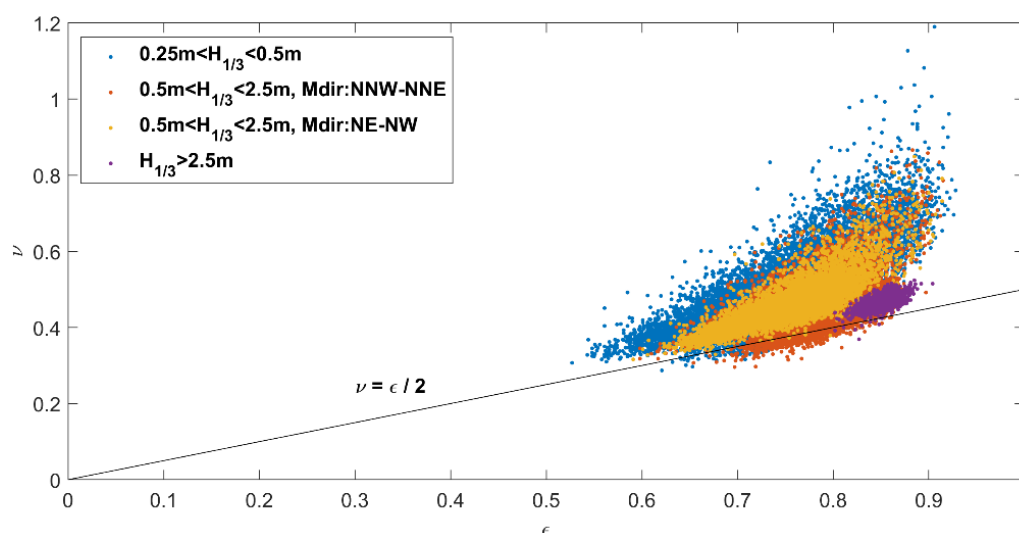
Μη συμπεριλαμβάνοντας τους κυματισμούς με $H_{1/3} < 1m$ στους οποίους παρατηρείται μεγάλη διασπορά στις περιόδους, και ιδιαίτερα στην περίπτωση των φασματικών παραμέτρων, θα μπορούσαμε σχετικά ικανοποιητικά να εφαρμόσουμε μια καμπύλη συσχέτισης μεταξύ των περιόδων και των κυματισμών. Η καμπύλη είναι της μορφής $T = aH^b$ και λεπτομέρειες της φαίνονται στα γραφήματα της Εικόνα 47.

6.1.2.β Αποτελέσματα περιγραφικών παραμέτρων πλάτους και σχήματος του φάσματος

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την περιγραφή των φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας μέσω των παραμέτρων K_a , Q_p , ν , και ε . Οι παράμετροι αυτοί υπενθυμίζεται ότι έχουν οριστεί για την περιγραφή του πλάτους και σχήματος του ενεργειακού φάσματος σε σχέση με το εύρος των συχνοτήτων. Επίσης εξετάζεται η συσχέτιση ορισμένων εξ'αυτών με την στατιστική παράμετρο του συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών, r_{HH} , η οποία ποσοτικοποιεί την εμφάνιση ομαδικότητας των κυματισμών σε μία χρονοσειρά.

6.1.2.β.1 Κατηγοριοποίηση περιγραφικών παραμέτρων πλάτους του φάσματος σε διαφορετικές συνθήκες πρόσπτωσης

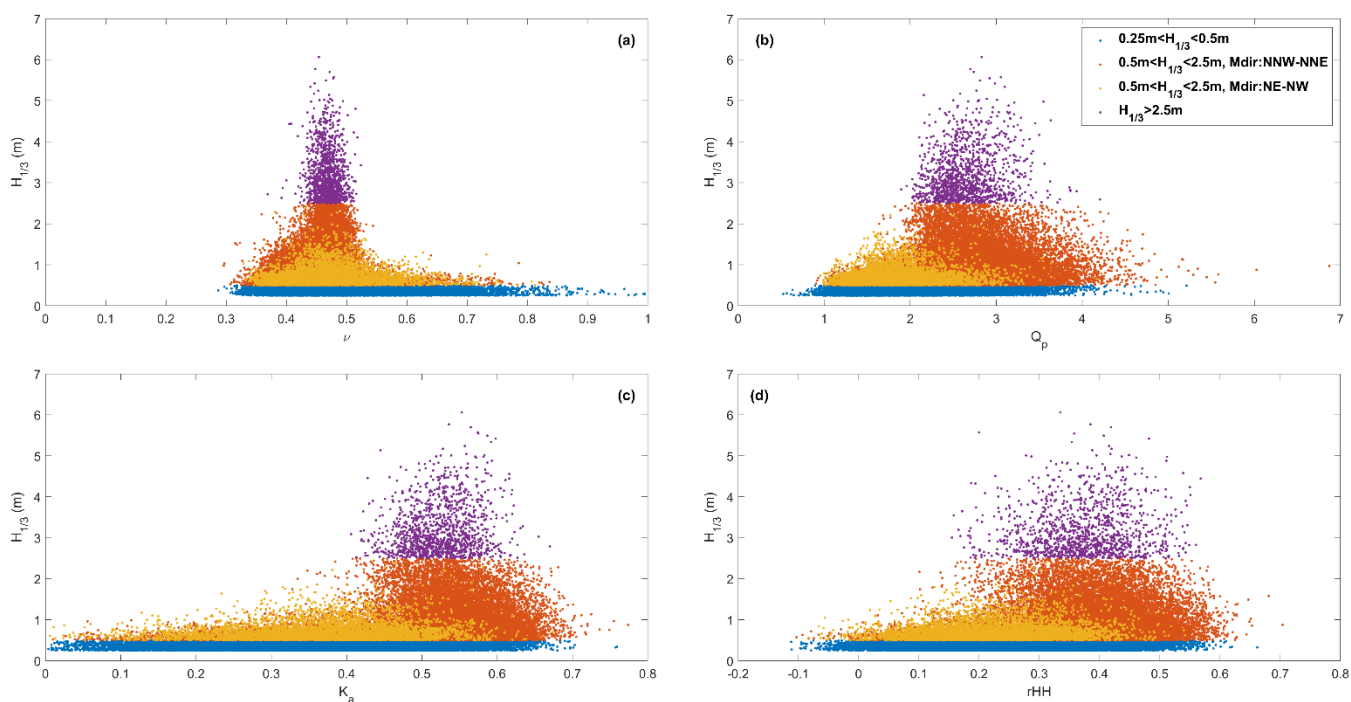
Οι παράμετροι ν και ε είναι από τις πρώτες που ορίστηκαν για τον χαρακτηρισμό πλάτους του φάσματος, στις εργασίες που αφορούσαν την θεωρητική εξέταση της κατανομής των θαλάσσιων κυματισμών και της εφαρμογής της κατανομής Rayleigh σε αυτούς ([Cartwright, D. E., & Longuet-Higgins, 1956](#); [Longuet-Higgins, 1975](#)). Η εξαγωγή τους όμως βασίστηκε σε παραδοχές γραμμικής θεωρίας και στην προϋπόθεση στενού πλάτους του φάσματος, προκειμένου να καταστεί δυνατή η θεωρητική εφαρμογή της κατανομής Rayleigh στην κατανομή των θαλάσσιων κυματισμών. Η προϋπόθεση στενότητας του φάσματος συνεπαγόταν τιμές για την $\varepsilon \ll 1$ ενώ ορίστηκε και η προσεγγιστική σχέση της με την ν , για πολύ μικρές τιμές της ε , ως $\nu \cong \varepsilon/2$ ([Goda & Kudaka, 2007](#); [Longuet-Higgins, 1975](#)).



Εικόνα 48. Διάγραμμα συσχέτισης μεταξύ φασματικών παραμέτρων πλάτους ν και ε . Τα διαφορετικά χρώματα αντιστοιχούν στην κατηγοριοποίηση των κυματικών συνθηκών όπως αυτές φαίνονται στο υπόμνημα. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Στην πραγματικότητα όμως τόσο χαμηλές τιμές της ε , όσο και η συσχέτιση της με την ν , δεν υφίστανται λόγω διασποράς της φασματικής ενέργειας σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Αυτό φαίνεται και στην **Εικόνα 48** που απεικονίζει τις μετρήσεις ανοιχτά του Ενετικού λιμένα. Διακρίνεται το εύρος τιμών της ε μεταξύ 0.5 – 0.9, το οποίο περιορίζεται μεταξύ 0.8-0.9 για κυματισμούς σε έντονες κυματικές συνθήκες, ενώ οι τιμές της ν κυμαίνονται μεταξύ 0.3-1. Όσον αφορά δε την συσχέτιση μεταξύ τους, αυτή αποκλίνει κατά πολύ από την προσέγγιση που προαναφέρθηκε και πολύ μικρό ποσοστό των μετρήσεων βρίσκεται κοντά σε αυτήν. Η αδυναμία αυτών των δύο παραμέτρων να περιγράψουν τις φασματικές ιδιότητες των χρονοσειρών έχει εντοπιστεί σε πλειάδα εργασιών κατά το παρελθόν, με αποτέλεσμα να αναπτυχθούν και άλλες παράμετροι περιγραφής του φάσματος με βασικότερες τις K_a και Q_p (Forristall, 1984; Goda, 1970; van Vledeer, 1992).

Η συσχέτιση με το $H_{1/3}$ για τέσσερις από τις εξεταζόμενες παραμέτρους δίνεται στην **Εικόνα 49**. Οι κυματικές συνθήκες χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες ανάλογα με το $H_{1/3}$ και την κύρια διεύθυνση. Η πρώτη κατηγορία αφορά τους κυματισμούς με $0.25\text{m} < H_{1/3} < 0.5\text{m}$, η δεύτερη τους κυματισμούς με $0.5\text{m} < H_{1/3} < 2.5\text{m}$ και $\text{BBD} < M_{dir} < \text{BBA}$, η τρίτη τους κυματισμούς με $0.5\text{m} < H_{1/3} < 2.5\text{m}$ και $\text{BA} < M_{dir} < \text{BD}$ και η τέταρτη του κυματισμούς με $H_{1/3} > 2.5\text{m}$ και $\text{BBD} < M_{dir} < \text{B}$.



Εικόνα 49. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) και φασματικών παραμέτρων ν , K_a και Q_p (a, b, c) καθώς και μεταξύ σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) και συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών rHH (d). Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Η τρίτη κατηγορία, παρόλο το εύρος της σε διεύθυνση, περιλαμβάνει ουσιαστικά κυματισμούς μεταξύ Δυτικών (W) και Βορειοδυτικών (NW) διευθύνσεων. Ο διαχωρισμός αυτός έγινε γιατί το ανάπτυγμα σε αυτές τις διευθύνσεις -περιορίζεται στα όρια του Κόλπου από Δυτικά προς Ανατολικά- έχει ως συνέπεια την περιορισμένη ανάπτυξη των κυματισμών πάρα τους ισχυρούς Δυτικούς ανέμους που επικρατούν στην περιοχή.

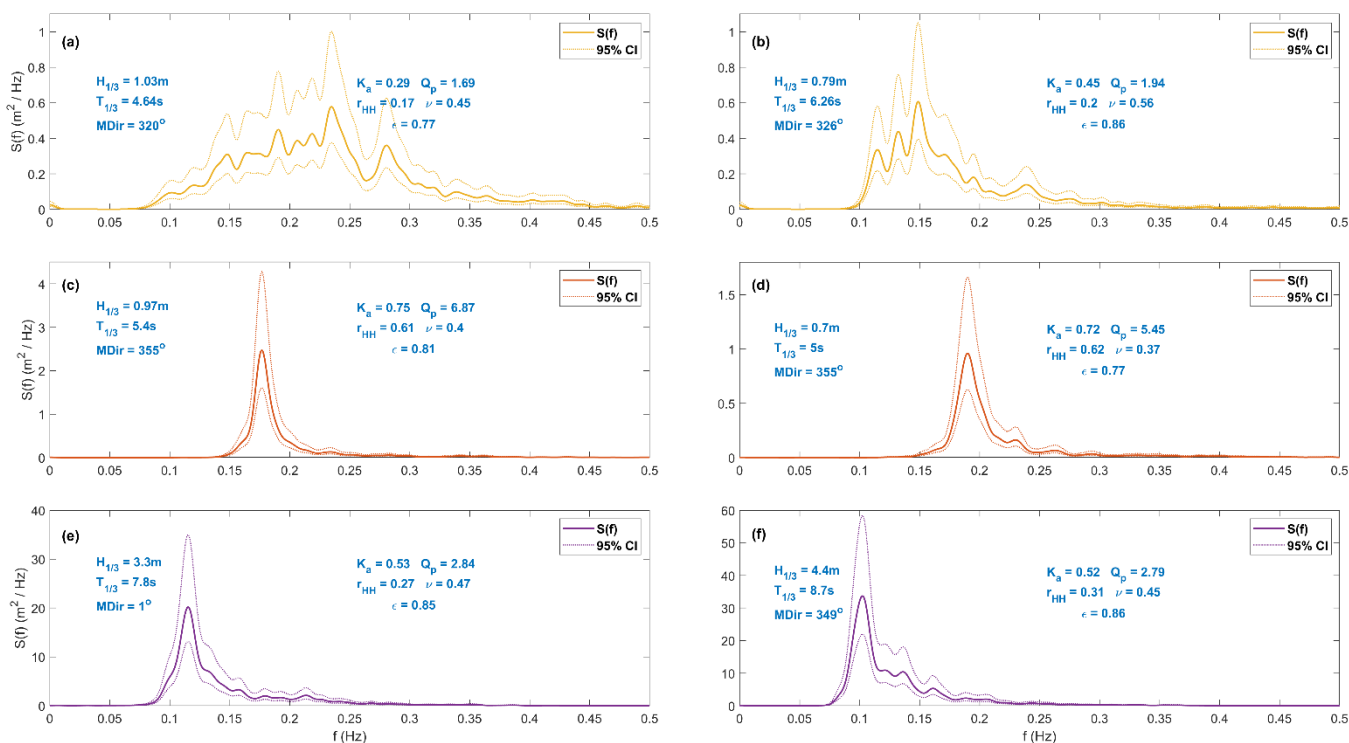
Εκ πρώτης όψεως διαπιστώνεται ότι καμία από τις τέσσερις παραμέτρους δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη τάση με την αύξηση του ύψους κύματος για το σύνολο των τιμών της. Παρατηρείται όμως ότι πέραν του σημαντικού ύψους κύματος 1.5m οι τιμές τους περιορίζονται σε συγκεκριμένο εύρος το οποίο μειώνεται μέχρι το μέγιστο καταγεγραμμένο $H_{1/3}$, με μεγαλύτερη διασπορά να εμφανίζει η παράμετρος rHH . Άλλη κοινή παρατήρηση είναι ότι παρουσιάζουν τιμές σε όλο το παρατηρούμενο εύρος τους μέχρι το σημαντικό ύψος κύματος των 0.5m. Αυτό οφείλεται από τη μία στο γεγονός ότι οι συγκεκριμένες ασθενείς κυματικές συνθήκες αντιπροσωπεύονται από ευρέα φάσματα λόγω ασθενών τοπικών ανέμων με αποτέλεσμα τις χαμηλές τιμές σε K_a , Q_p και υψηλές στην ν , και χαμηλή έως ανύπαρκτη ομαδικότητα με χαμηλές και αρνητικές τιμές rHH . Από την άλλη όμως, οι συγκεκριμένες κυματικές συνθήκες αντιπροσωπεύονται και από ρεστίες κυματισμών που προέρχονται από την γένεση κυματισμών σε απομακρυσμένα βαθύτερα νερά και καταλήγουν στην ακτή, με αποτέλεσμα να παρατηρούμε μέγιστες τιμές στις K_a , Q_p , ελάχιστες στην ν και μέγιστη ομαδικότητα μέσω των μέγιστων τιμών της rHH .

Πίνακας 21. Μέσες τιμές φασματικών παραμέτρων K_a , Q_p , ν , ε και της στατιστικής rHH για διάφορες κυματικές συνθήκες του σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

	ν	K_a	Q_p	rHH	ε
0.25<$H_{1/3}$<0.5m	0.4771	0.3885	1.9922	0.2485	0.7480
0.5<$H_{1/3}$<2.5m NNW<$Mdir$<NNE	0.4513	0.5158	2.6748	0.3699	0.7981
0.5<$H_{1/3}$<2.5m NE<$Mdir$<NW	0.4684	0.3685	1.8641	0.2233	0.7602
$H_{1/3} > 2.5m$ NNW<$Mdir$<N	0.4675	0.5243	2.6539	0.3720	0.8504

Οι μέσες τιμές των παραμέτρων ανά κατηγορία κυματισμών φαίνονται στον **Πίνακας 21**. Αν εξαιρέσει κανείς την παράμετρο ν όπου δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφοροποίηση, οι K_a , Q_p και rHH δίνουν μια πιο σαφή εικόνα μεταβολής. Οι τιμές τους είναι χαμηλές στις κατηγοριοποιήσεις των χαμηλών κυματισμών ($0.25m < H_{1/3} < 0.5m$) και της μεσαίας κατηγορίας για διευθύνσεις BA - ΒΔ ($0.5m < H_{1/3} < 2.5m$). Στις άλλες δύο κατηγορίες των

μεσαίων και υψηλών κυματισμών με κύριες διεθύνσεις τις B (N) και BBA (NNW), οι μέσες τιμές των παραμέτρων είναι αυξημένες και επιπλέον με παραπλήσιες τιμές για τις δύο κατηγοριοποιήσεις. Βλέπουμε και συγκεντρωτικά πλέον, για τις κύριες Βόρειες (N) και BBA (NNW) διεθύνσεις που αντιστοιχούν στα μεγαλύτερα αναπτύγματα πελάγους, ότι το πλάτος του φάσματος περιορίζεται γύρω από μία κύρια συχνότητα μέσω των K_a και Q_p , ενώ συγχρόνως παρατηρείται και μεγαλύτερη ομαδοποίηση των κυματισμών μέσω της r_{HH} .

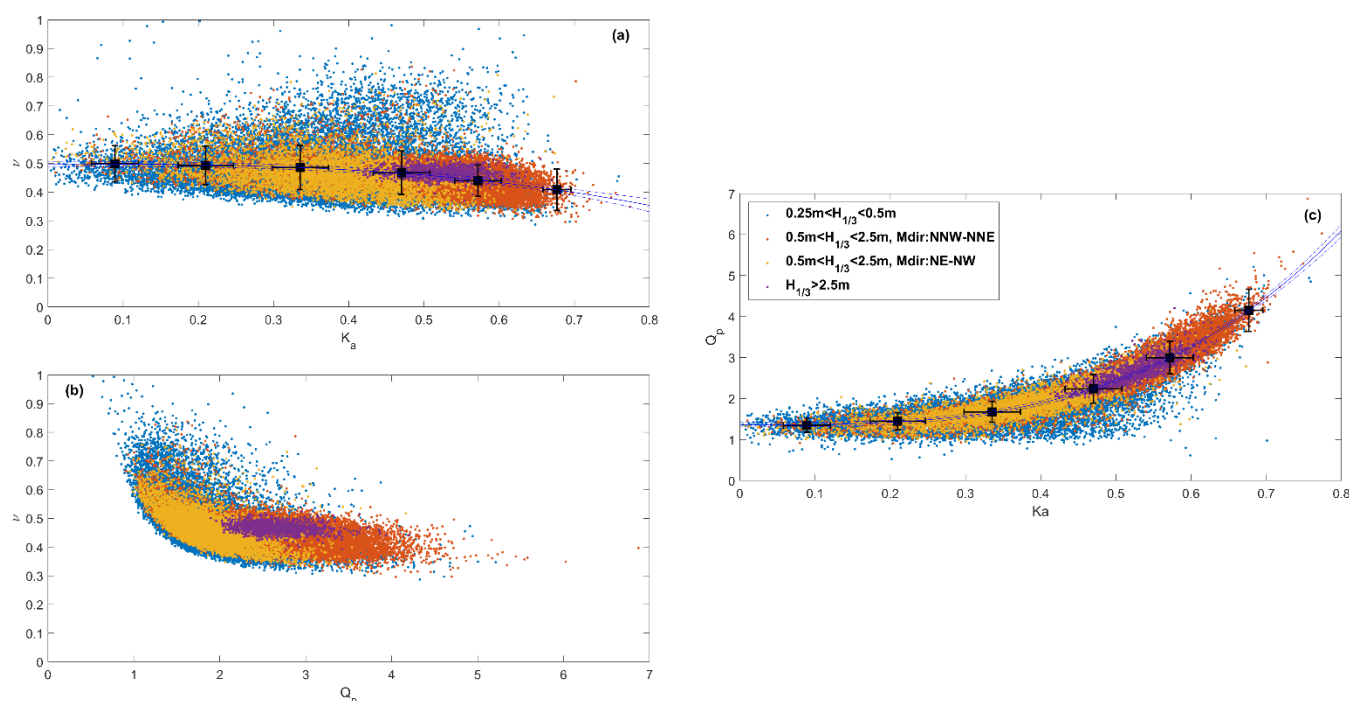


Εικόνα 50. Επιλεγμένα ενεργειακά φάσματα κυματικών χρονοσειρών που αντιστοιχούν σε διαφορετικές κυματικές συνθήκες. (a-b) $0.5m < H_{1/3} < 2.5m$ και $NE < Mdir < NW$, (c-d) $0.5m < H_{1/3} < 2.5m$ και $NNW < Mdir < NNE$, (e-f) $H_{1/3} > 2.5m$ και $NNW < Mdir < NNE$. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Οι συγκεκριμένες παρατηρήσεις απεικονίζονται και ποιοτικά στην **Εικόνα 50** μέσω των ενεργειακών φασμάτων συγκεκριμένων καταγραφών από τις κατηγορίες κυματικών συνθηκών που προαναφέρθηκαν. Φαίνεται ότι στις κυματικές συνθήκες ΒΔ διεύθυνσης (**Εικόνα 50[a][b]**) η φασματική ενέργεια διασπείρεται σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων με συνέπεια χαμηλές τιμές των παραμέτρων K_a και Q_p καθώς και χαμηλή ομαδικότητα κυματισμών ($r_{HH} \sim 0.2$). Στις μέτριας έντασης κυματικές συνθήκες Β-ΒΒΔ διεύθυνσης (**Εικόνα 50[c][d]**) παρατηρούνται στενού εύρους φάσματα με στενές κορυφές και υψηλές τιμές ομαδικότητας των κυματισμών. Σε συνθήκες καταιγίδας (**Εικόνα 50[e][f]**) φαίνεται και πάλι το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας να συγκεντρώνεται γύρω από μια συχνότητα αλλά είναι εμφανής η περισσότερη διασπορά ενέργειας σε υψηλότερες συχνότητες σε σχέση με τις ήπιες συνθήκες, με αποτέλεσμα τις μειωμένες τιμών των φασματικών παραμέτρων πλάτους και κορυφής του φάσματος.

6.1.2.β.2 Συσχέτιση μεταξύ φασματικών περιγραφικών παραμέτρων πλάτους και συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών, r_{HH}

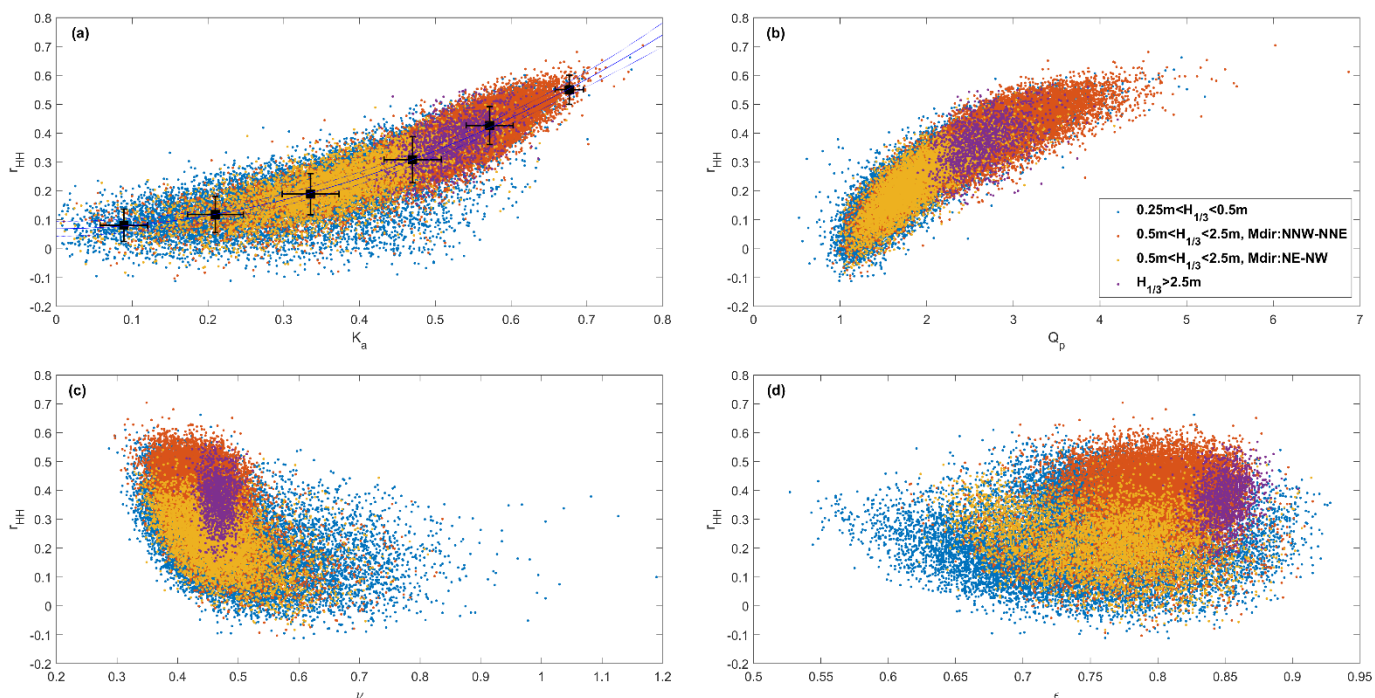
Όσο αφορά τις K_a και ν (Εικόνα 51[α]) οι οποίες εκφράζουν το πλάτος του φάσματος βλέπουμε ασθενέστατη συσχέτιση λόγω κυρίως του περιορισμένου εύρους τιμών της ν . Παρόλα αυτά παρατηρείται μια τάση μείωσης της ν με την αύξηση της K_a , αναμενόμενη αφού αυξημένες τιμές της K_a και μειωμένες της ν μεταφράζονται σε περιορισμένο πλάτος του φάσματος. Η τάση αυτή είναι όμως εμφανέστερη στην μεσαία κατηγορία κυματισμών, ενώ στις έντονες κυματικές συνθήκες δεν παρουσιάζεται αξιοσημείωτη μεταβολή της ν με την αύξηση της K_a . Στο άλλο γράφημα δε (Εικόνα 51[β]), μεταξύ Q_p και ν , φαίνεται πως δεν μπορούν να συσχετιστούν μεταξύ τους οι δύο παράμετροι.



Εικόνα 51. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των φασματικών παραμέτρων (α) $K_a - \nu$, (β) $Q_p - \nu$ και (γ) $K_a - Q_p$. Τα μαύρα τετράγωνα αποτελούν τις μέσες τιμές των παραμέτρων και στους δύο άξονες και συνοδεύονται από τις τυπικές αποκλίσεις των δεδομένων. Οι καμπύλες εφαρμογής παρουσιάζονται ως ένδειξη της τάσης συσχέτισης και έχουν προκύψει από την εφαρμογή στις μέσες τιμές. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Οι K_a και Q_p (Εικόνα 51[γ]) παρ'όλο που δεν εμφανίζουν μια γραμμική συσχέτιση μεταξύ τους φαίνεται ξεκάθαρα ότι η αύξηση της μίας συνοδεύεται από αύξηση και της άλλης. Ιδιαίτερα για την μεσαία κατηγορία κυματισμών και BBA - BBA κύριες διευθύνσεις, όπου οι τιμές των παραμέτρων καλύπτονται σε όλο το δυνατό εύρος, διαπιστώνεται ότι η ελάττωση του πλάτους του φάσματος (υψηλότερες τιμές K_a) συνοδεύεται και από διακριτότερη κορύφωσή του (υψηλότερες τιμές Q_p) ή αλλιώς πιο ξεκάθαρη συγκέντρωση της μέγιστης ενέργειάς του γύρω από μία συχνότητα.

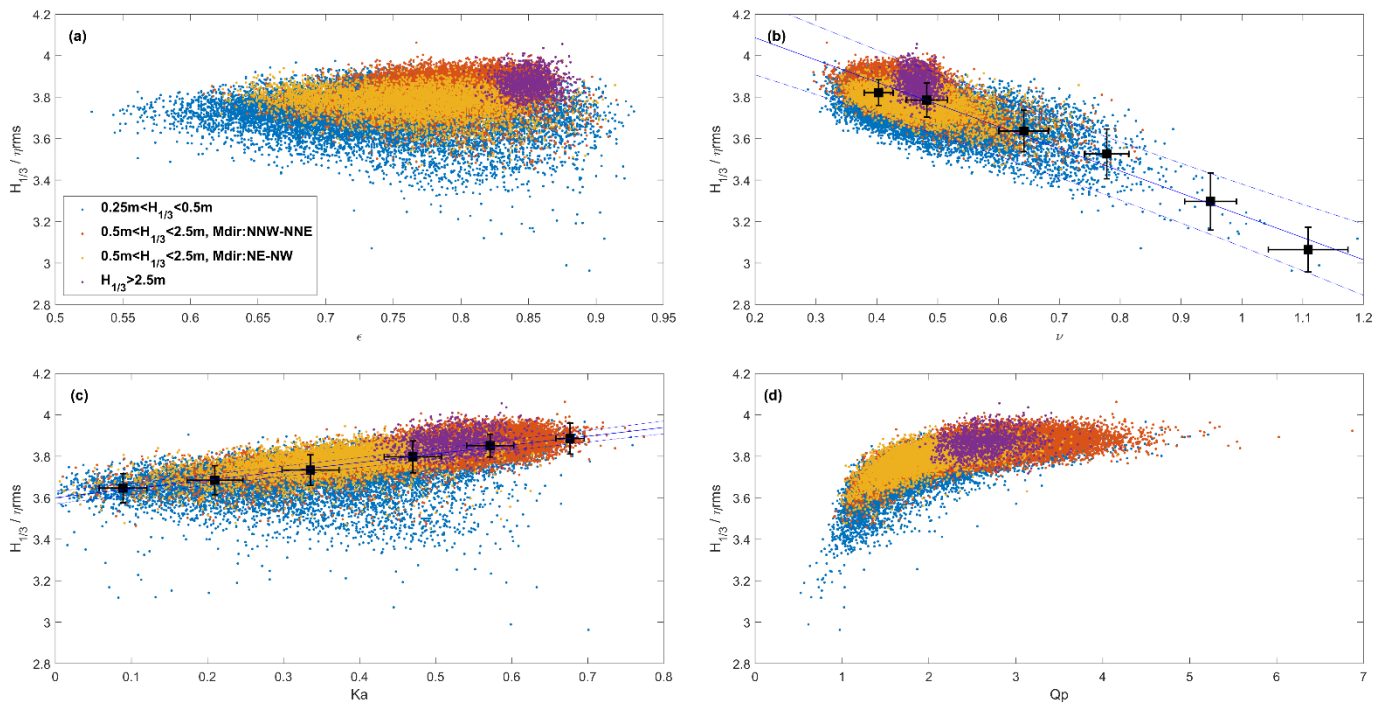
Όσον αφορά την συσχέτιση του συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών r_{HH} με τις K_a και Q_p η εικόνα είναι λίγο διαφορετική για τις δύο περιπτώσεις (Εικόνα 52[a][b]). Η r_{HH} συσχετίζεται σαφώς καλύτερα με την K_a , σε σχέση με την Q_p , υποδυκνύοντας σαφέστερα καλύτερη συσχέτιση της ομαδικότητας των κυματισμών όσο το πλάτος του φάσματος περιορίζεται, απ'ότι όταν περιορίζεται η κορυφή του γύρω από μία συχνότητα. Οι παράμετροι πλάτους ν και ε από την άλλη αδυνατούν πλήρως να εκφράσουν την οποιαδήποτε ομαδικότητα των κυματισμών σε μια χρονοσειρά (Εικόνα 52[c][d]).



Εικόνα 52. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των φασματικών παραμέτρων και του συντελεστή συσχέτισης r_{HH} . (a) $K_a - r_{HH}$, (b) $Q_p - r_{HH}$ και (c) $\nu - r_{HH}$ και (d) $\varepsilon - r_{HH}$. Τα μαύρα τετράγωνα αποτελούν τις μέσες τιμές των παραμέτρων και στους δύο άξονες και συνοδεύονται από τις τυπικές αποκλίσεις των δεδομένων. Η καμπύλη εφαρμογής παρουσιάζεται ως ενδειξη της τάσης συσχέτισης και έχει προκύψει από την εφαρμογή στις μέσες τιμές. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

6.1.2.β.3 Συσχέτιση φασματικών περιγραφικών παραμέτρων πλάτους με την κατανομή Rayleigh των θαλάσσιων κυματισμών

Χρησιμοποιώντας τον λόγο $H_{1/3}/\eta_{rms}$ ως δείκτη αναφοράς για την απόκλιση των δεδομένων πεδίου από την κατανομή Rayleigh, παρουσιάζεται παρακάτω η συσχέτισή του με τις προαναφερθείσες φασματικές παραμέτρους, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο αυτές ελέγχουν την κατανομή των κυματισμών. Εξετάζεται δηλαδή η συσχέτιση του πλάτους του φάσματος με την κατανομή των μεμονωμένων κυματισμών. Υπενθυμίζεται ότι βάσει της θεωρητικής κατανομής Rayleigh έχουμε $H_{1/3}/\eta_{rms} \approx 4$, ενώ βάσει των μετρήσεων πεδίου της παρούσας έρευνας $H_{1/3}/\eta_{rms} \approx 3.8$.



Εικόνα 53. Διαγράμματα συσχέτισης μεταξύ των φασματικών παραμέτρων και του λόγου $H_{1/3}/\eta_{rms}$, (a) $\epsilon - H_{1/3}/\eta_{rms}$, (b) $\nu - H_{1/3}/\eta_{rms}$, (c) $K_a - H_{1/3}/\eta_{rms}$ και (d) $Q_p - H_{1/3}/\eta_{rms}$. Τα μαύρα τετράγωνα αποτελούν τις μέσες τιμές των παραμέτρων και στους δύο άξονες και συνοδεύονται από τις τυπικές αποκλίσεις των δεδομένων. Η καμπύλη εφαρμογής παρουσιάζεται ως ενδειξη της τάσης συσχέτισης και έχει προκύψει από την εφαρμογή στις μέσες τιμές. Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Η παράμετρος ϵ (Εικόνα 53[a]) φαίνεται ξεκάθαρα πως δεν αποτελεί παράμετρο ελέγχου της κατανομής των θαλάσσιων κυματισμών. Ο λόγος $H_{1/3}/\eta_{rms}$ παρουσιάζει έντονη διασπορά και μάλιστα αυξάνει με την αύξηση της ϵ χωρίς να υπάρχει καμία συσχέτιση με αυτήν. Περνώντας στην συσχέτιση με την ν (Εικόνα 53[b]) βλέπουμε ότι ο λόγος συσχετίζεται ασθενώς αρνητικά με αυτήν. Με άλλα λόγια επιβεβαιώνεται ότι η κατανομή των κυματισμών αποκλίνει όλο και περισσότερο από την θεωρητική της Rayleigh με την αύξηση του πλάτους του φάσματος. Ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προκύπτει από την συγκεκριμένη συσχέτιση, είναι ότι η ν φαίνεται να αποτυπώνει σχετικά καλύτερα την απόκλιση από την κατανομή Rayleigh στο εύρος κυματισμών μεταξύ $0.5m < H_{1/3} < 2.5m$. Για εντονότερες κυματικές συνθήκες με $H_{1/3} > 2.5m$ αυτή δεν μεταβάλλεται με την κατανομή των κυματισμών των οποίων ο λόγος $H_{1/3}/\eta_{rms}$ κυμαίνεται μεταξύ 3.7 και 4.

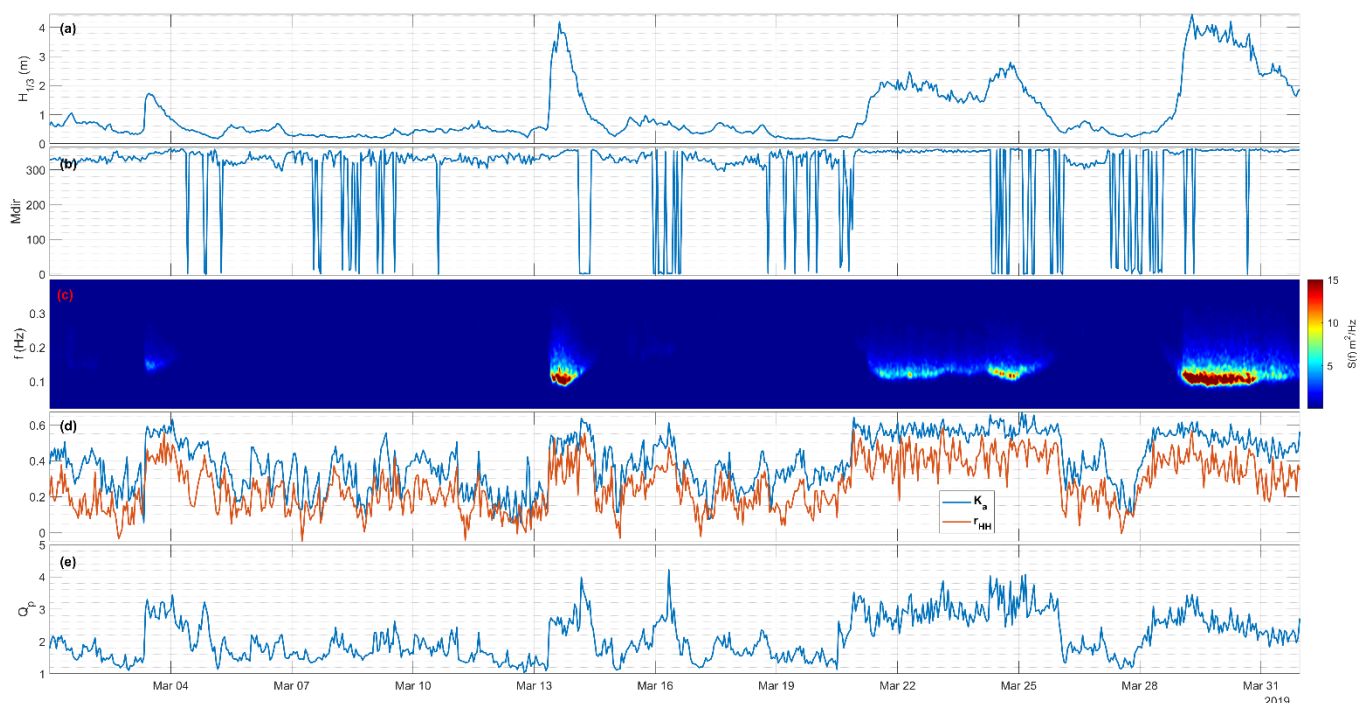
Η παράμετρος K_a δείχνει να αποτυπώνει με σαφήνεια την επίδραση του πλάτους του φάσματος στην κατανομή των κυματισμών (Εικόνα 53[c]). Ειδικότερα για κυματισμούς με $H_{1/3} > 0.5m$, η διασπορά του λόγου $H_{1/3}/\eta_{rms}$ είναι περιορισμένη και βλέπουμε ότι αύξηση της K_a , που υποδηλώνει και μείωση του πλάτους του φάσματος, συνεπάγεται όλο και περισσότερη σύγκλιση προς την κατανομή Rayleigh των κυματισμών. Ακόμα και για $H_{1/3} > 2.5m$, όπου η ν δεν κατάφερε να διαφοροποιηθεί, η K_a παρουσιάζει μεγάλο εύρος τιμών για διάφορες κατανομές των κυματισμών. Όσον αφορά το πλάτος κορυφής του φάσματος (Εικόνα 53[d]), το

οποίο μεταφράζεται μέσω της Q_p , δεν φαίνεται να μπορεί να συσχετιστεί με την κατανομή των κυματισμών όπως φάνηκε και με την παράμετρο ε .

6.1.2.β.4 Εξέλιξη περιγραφικών φασματικών παραμέτρων πλάτους και συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών κατά την ανάπτυξη και παρέλευση κυματικών γεγονότων

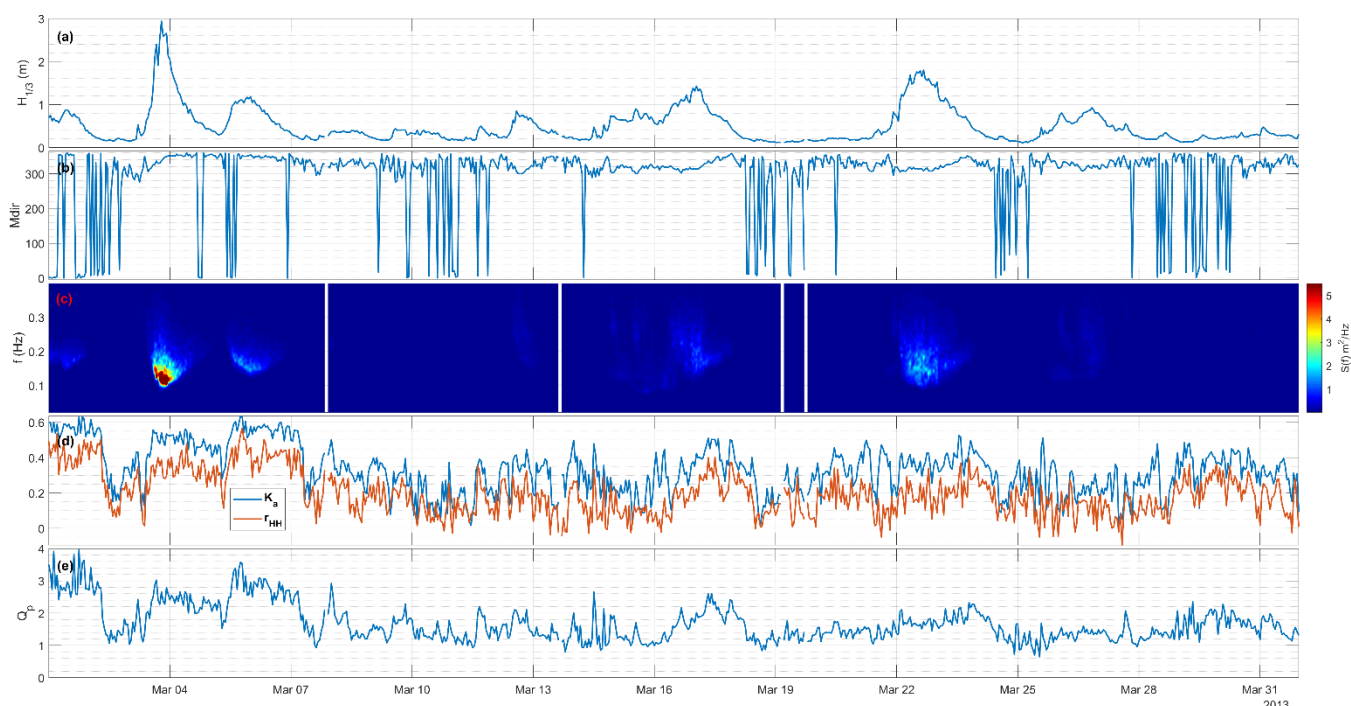
Πέραν της συσχέτισης των παραμέτρων που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εξέλιξη τους κατά την διάρκεια ανάπτυξης και παρέλευσης των κυματικών γεγονότων. Στις **Εικόνα 54** και **Εικόνα 55** απεικονίζονται κυματικά γεγονότα του μήνα Μαρτίου των ετών 2013 και 2019. Σε αυτές παρουσιάζονται το σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$, η κύρια διεύθυνση, η φασματική ενέργεια, οι φασματικοί παράμετροι K_a και Q_p και ο συντελεστής συσχέτισης r_{HH} .

Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η ανάπτυξη των κυματικών γεγονότων με ΒΒΔ – ΒΒΑ διεύθυνση (337.5° – 22.5°) συνοδεύεται από αύξηση των r_{HH} και K_a οι οποίες διατηρούνται αυξημένες κατά τη διάρκεια του γεγονότος και παρουσιάζουν τιμές γύρω από το 0.4 όσο αφορά τον r_{HH} (**Εικόνα 54[d]**). Η K_a στα ήπια κυματικά γεγονότα παρουσιάζει τιμές σταθερά κοντά στο 0.6. Με την παρέλευση δε των γεγονότων οι τιμές των παραμέτρων φθίνουν. Η συμπεριφορά αυτή είναι πιο ευδιάκριτη τον Μάρτιο του 2019 (13/03/19 – 15/03/19, 20/03/19 – 26/03/19 και 28/03/19 – 31/03/19).



Εικόνα 54. Περιγραφή εξέλιξης κυματικών γεγονότων Μαρτίου 2019, μέσω του σημαντικού ύψους κύματος (a), της κύριας διεύθυνσης $Mdir$ (b), των ενεργειακών φασμάτων (c), της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου K_a και του συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών r_{HH} (d) και της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου Q_p (e). Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

Επιπλέον παρατηρείται η διαφορετική συμπεριφορά των παραμέτρων για τα γεγονότα BBD – BBA διεύθυνσης και ΒΔ διεύθυνσης, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Στις αρχές Μαρτίου του 2013 (03 – 07/03) (Εικόνα 55[a]) καταγράφονται δύο διαδοχικά γεγονότα διεύθυνσης BBD – BBA και ακολουθούν μέχρι το τέλος του μήνα ήπιας αλλά και έντονης έντασης γεγονότα με ΒΔ διευθύνσεις (21-24/03 και 25-28/03). Στα πρώτα δύο διαδοχικά γεγονότα οι τιμές του rHH είναι χαρακτηριστικά αυξημένες σε σχέση με τις τιμές των επόμενων γεγονότων οι οποίες είναι γύρω από το 0.2 αλλά και χαμηλότερες, επιβεβαιώνοντας την μεγαλύτερη εμφάνιση κυματοομάδων κατά την ανάπτυξη κυματικών γεγονότων γύρω από την Β διεύθυνση.



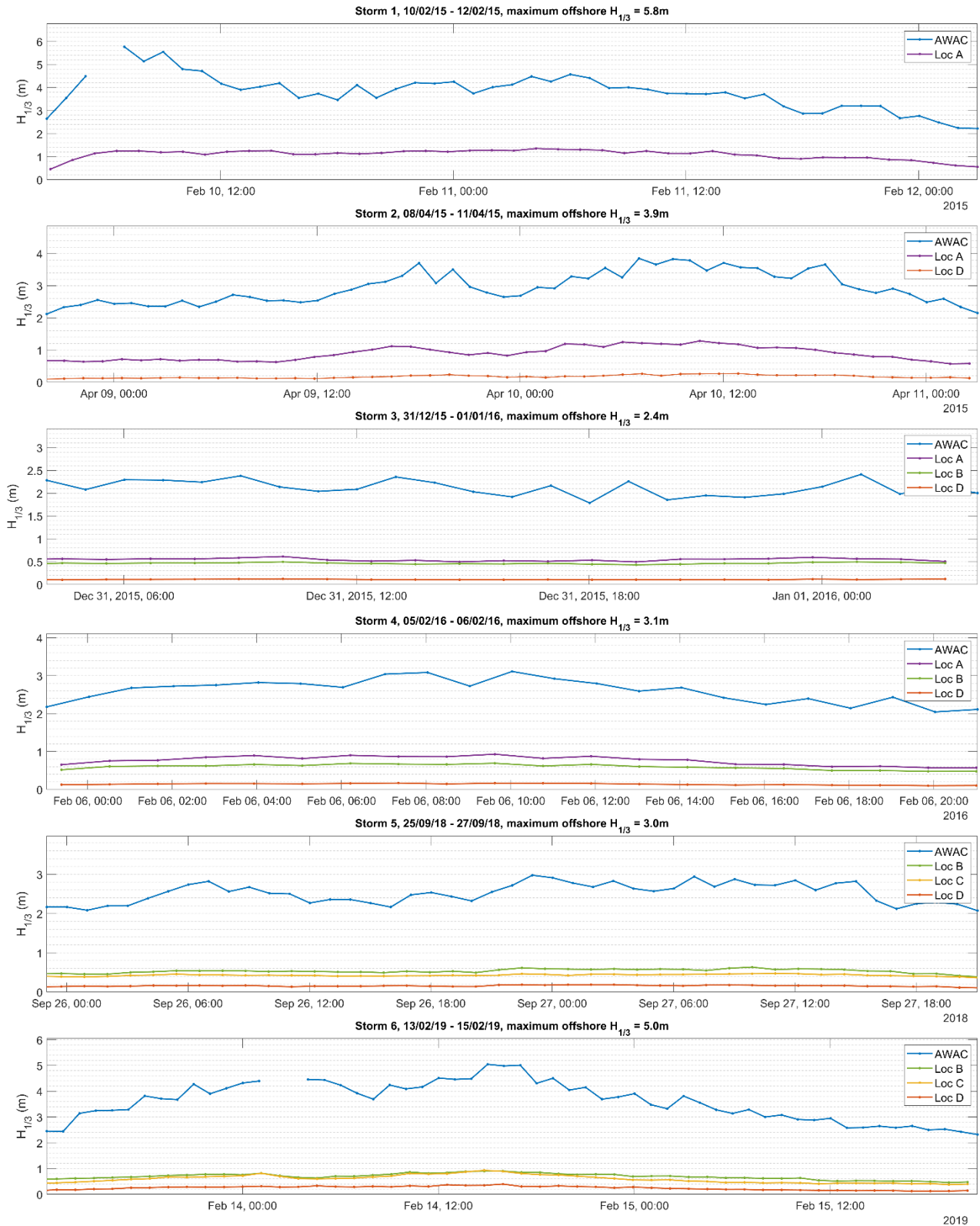
Εικόνα 55. Περιγραφή εξέλιξης κυματικών γεγονότων Μαρτίου 2013, μέσω του σημαντικού ύψους κύματος (a), της κύριας διεύθυνσης Mdir (b), των ενεργειακών φασμάτων (c), της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου K_a και του συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών rHH (d) και της φασματικής περιγραφικής παραμέτρου Q_p (e). Τα δεδομένα αφορούν το σετ δεδομένων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα.

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΕΔΙΟΥ ΕΝΤΟΣ ΤΟΥ ΕΝΕΤΙΚΟΥ ΛΙΜΕΝΑ

Σε αυτήν ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων εντός της λιμενολεκάνης. Μελετάται η απόκριση της λιμενολεκάνης κατά την διάρκεια συγκεκριμένων καταιγίδων μέσω των αποτελεσμάτων ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων. Τέλος, παρουσιάζονται οι ιδιοσυχνότητες που ταυτοποιήθηκαν σε κάθε τοποθεσία.

6.2.1 Απόκριση της λιμενολεκάνης στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες

6.2.1.α Γενική εικόνα απόκρισης της λιμενολεκάνης μέσω των στατιστικών παραμέτρων $H_{1/3}$ και H_{max}



Εικόνα 56. Σημαντικά ύψη κύματος κατά τη διάρκεια των εξεταζόμενων καταργίδων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα και εντός της λιμενολεκάνης στις τοποθεσίες A, B, C και D.

Η απόκριση της λιμενολεκάνης στις τέσσερις τοποθεσίες μέτρησης, σε σχέση με τις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες, για τα έξι κυματικά γεγονότα υπό μελέτη, απεικονίζεται στις **Εικόνα 56** και **Εικόνα 57**.

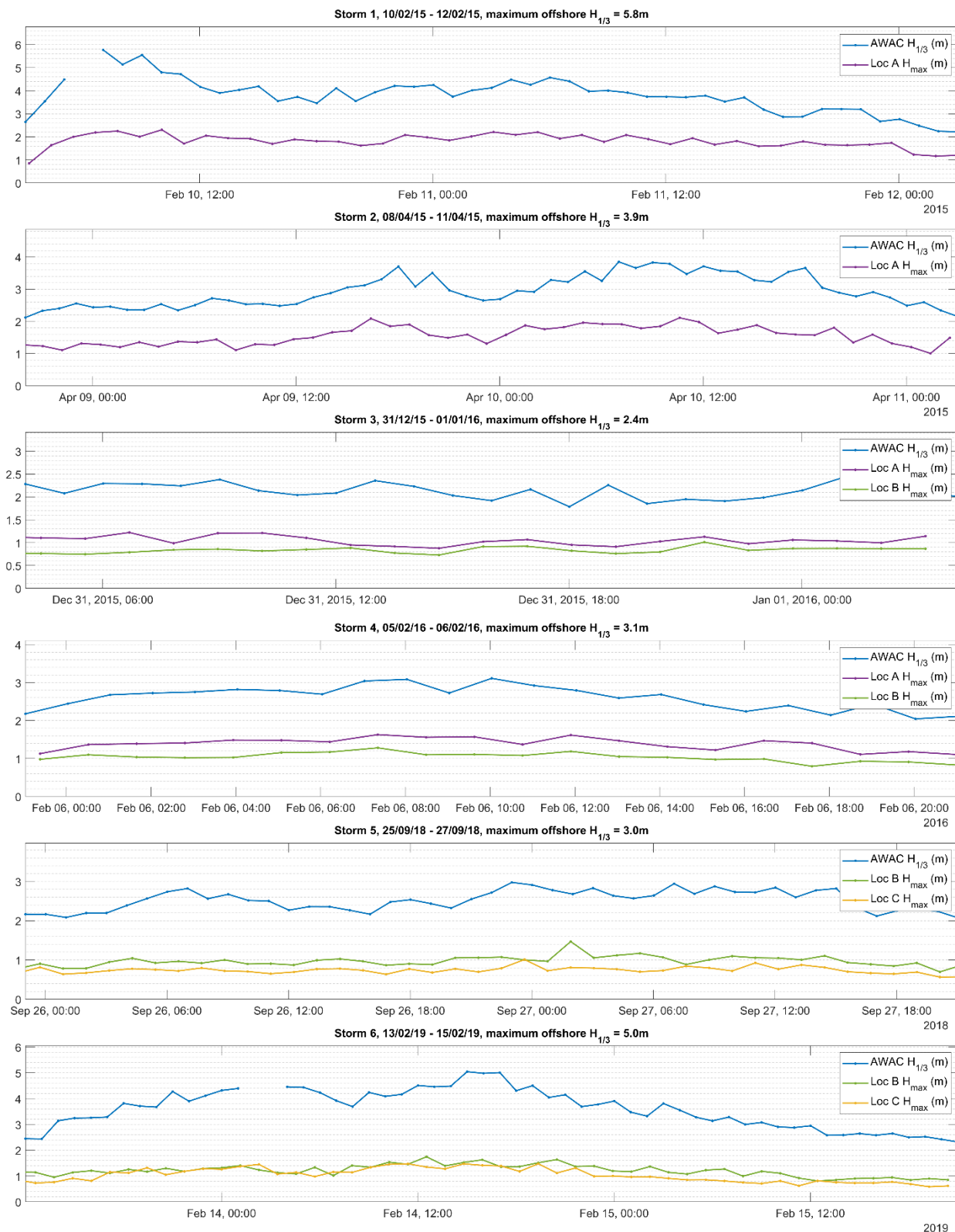
Η σύγκριση γίνεται μέσω των παραμέτρων $H_{1/3}$ εκτός της λιμενολεκάνης και $H_{1/3}$ και H_{max} εντός αυτής. Κοινό χαρακτηριστικό για τις τοποθεσίες A, B και C της δυτικής λιμενολεκάνης είναι οι υψηλές τιμές $H_{1/3}$ και H_{max} στις οποίες αποτυπώνεται και ποσοτικά πλέον η άσχημη κατάσταση που επικρατεί κατά την διάρκεια καταιγίδων λόγω της ελλιπούς προστασίας της εισόδου του λιμένα.

Η τοποθεσία A είναι αυτή κοντινότερα στην είσοδο του λιμένα. Οι τιμές της παραμέτρου $H_{1/3}$ δίνουν μια πρώτη εικόνα για το πόσο εκτεθειμένη είναι η λιμενολεκάνη στις έντονες κυματικές συνθήκες. Η ισχυρότερη καταιγίδα κατά την οποία υπήρξαν καταγραφές στην συγκεκριμένη τοποθεσία είναι η Καταιγίδα 1. Για όσο χρονικό διάστημα οι προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες ξεπερνούσαν σε σημαντικό ύψος τα 3.5 m, το σημαντικό ύψος στο σημείο ήταν σταθερά μεγαλύτερο του 1 m, ενώ συγχρόνως καταγράφονταν μέγιστα ύψη κύματος τα οποία ξεπερνούσαν τα 2 m. Το ίδιο παρατηρείται και για την Καταιγίδα 2 κατά την οποία οι προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες ξεπέρασαν τα 3.5m σημαντικού ύψους κύματος. Κατά το ήπιο κυματικό γεγονός της Καταιγίδας 3 με προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες έως 2.4 m σημαντικού ύψους κύματος, οι καταγραφές στο σημείο A δεν ξεπέρασαν τα 0.5 m σημαντικού ύψους κύματος. Επίσης τα μέγιστα ύψη κύματος που καταγράφηκαν κυμάνθηκαν γύρω στο 1 m.

Τα ύψη κύματος στην τοποθεσία B, επηρεάζονται σαφώς από την ενέργεια που φτάνει ως εκεί από την είσοδο του λιμένα, αλλά οι ανακλάσεις παίζουν σημαντικότερο ρόλο. Κατά την διάρκεια των ήπιων συνθηκών της Καταιγίδας 3, οι τιμές $H_{1/3}$ κυμάνθηκαν στα ίδια επίπεδα με της τοποθεσίας A ενώ οι τιμές H_{max} ήταν ελαφρώς μικρότερες. Στην Καταιγίδα 4 η οποία ήταν μεγαλύτερης έντασης, τα σημαντικά ύψη κύματος ήταν μικρότερα της A όπως και τα μέγιστα ύψη. Οι τιμές ήταν από 0.6 m έως 0.65 m και 0.8 m έως 1.3 m αντίστοιχα. Κατά την διάρκεια της ισχυρής Καταιγίδας 6, τα σημαντικά ύψη κύματος στο σημείο έφτασαν μέχρι τα 0.93 m ενώ τα μέγιστα που καταγράφηκαν έφτασαν ακόμα και τα 1.5 m.

Η τοποθεσία C, παρόλο που βρίσκεται στο ΒΑ άκρο της δυτικής λιμενολεκάνης και δεν είναι εκτεθειμένη στην είσοδο, παρουσίασε έντονες μεταβολές της στάθμης ανάλογες της τοποθεσίας B. Κατά τη διάρκεια της Καταιγίδας 5, οι τιμές σημαντικού ύψους κύματος προσέγγισαν τα 0.5 m και τα μέγιστα ύψη ήταν από 0.7 m έως και 1 m. Στην Καταιγίδα 6, είναι εμφανής η συνεισφορά των ισχυρών ανακλάσεων στα ύψη κύματος που διαμορφώνονται στην λιμενολεκάνη κατά την διάρκεια των ισχυρών καταιγίδων. Είναι αξιοσημείωτη η ομοιότητα με τις τιμές της τοποθεσίας B στο ζενίθ της καταιγίδας καθώς τα σημαντικά ύψη κύματος και στις

δύο τοποθεσίες είναι ουσιαστικά ίσα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το ίδιο όμως ισχύει και για τα μέγιστα ύψη κύματος τα οποία φτάνουν μέχρι και το 1.5 m όπως και στην Β.



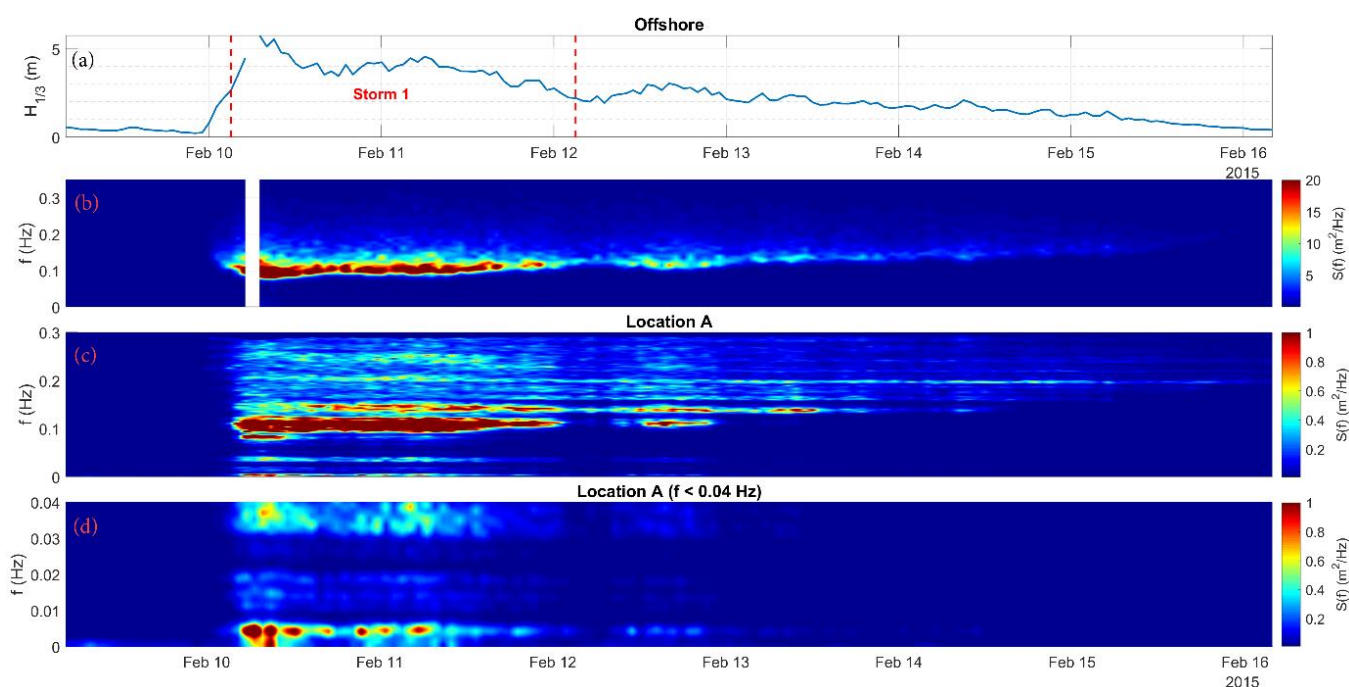
Εικόνα 57. Σημαντικά ύψη κύματος $H_{1/3}$ κατά τη διάρκεια των εξεταζόμενων καταιγίδων ανοιχτά του Ενετικού λιμένα και μέγιστα ύψη κύματος H_{max} εντός της λιμενολεκάνης στις τοποθεσίες Α, Β και C.

Στο σημείο D σαφώς και δεν αναμένονταν υψηλές τιμές κυματισμών καθώς είναι το πλέον προστατευόμενο σημείο όλης της λιμενολεκάνης. Παρόλα αυτά φαίνεται ότι δεν μένει

ανεπηρέαστο κατά την διάρκεια ισχυρών καταιγίδων καθώς στο ζενίθ της Καταιγίδας 6 έδωσε τιμές σημαντικού ύψους κύματος μέχρι και 0.4m.

6.2.1.β Γενική εικόνα απόκρισης της λιμενολεκάνης μέσω φασματικής ανάλυσης.

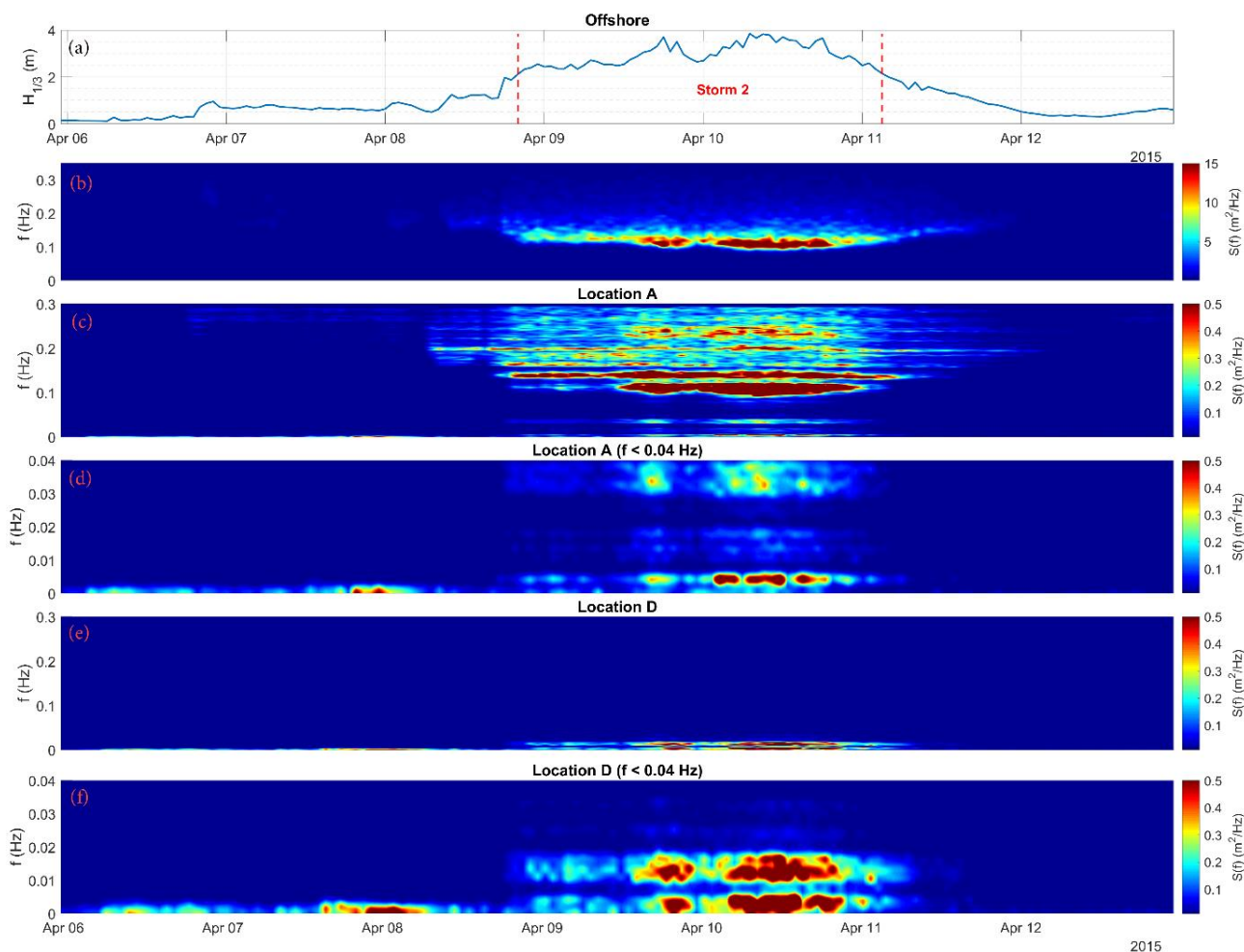
Η φασματική ανάλυση αποδίδει με περισσότερη λεπτομέρεια την απόκριση ενός λιμένα στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες. Καθοριστική είναι δε η συνεισφορά της στον εντοπισμό των συχνοτήτων στις οποίες ενισχύεται η κυματική ενέργεια με αποτέλεσμα την εμφάνιση συντονισμού των κυματικών ταλαντώσεων εντός του λιμένα.



Εικόνα 58. Απεικόνιση απόκρισης τοποθεσίας A στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες της καταιγίδας 1 μέσω φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας. (a) $H_{1/3}$ προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών – μεταξύ των κόκκινων γραμμών είναι διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων (b) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών (c) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A (d) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A για $f < 0.04$ Hz.

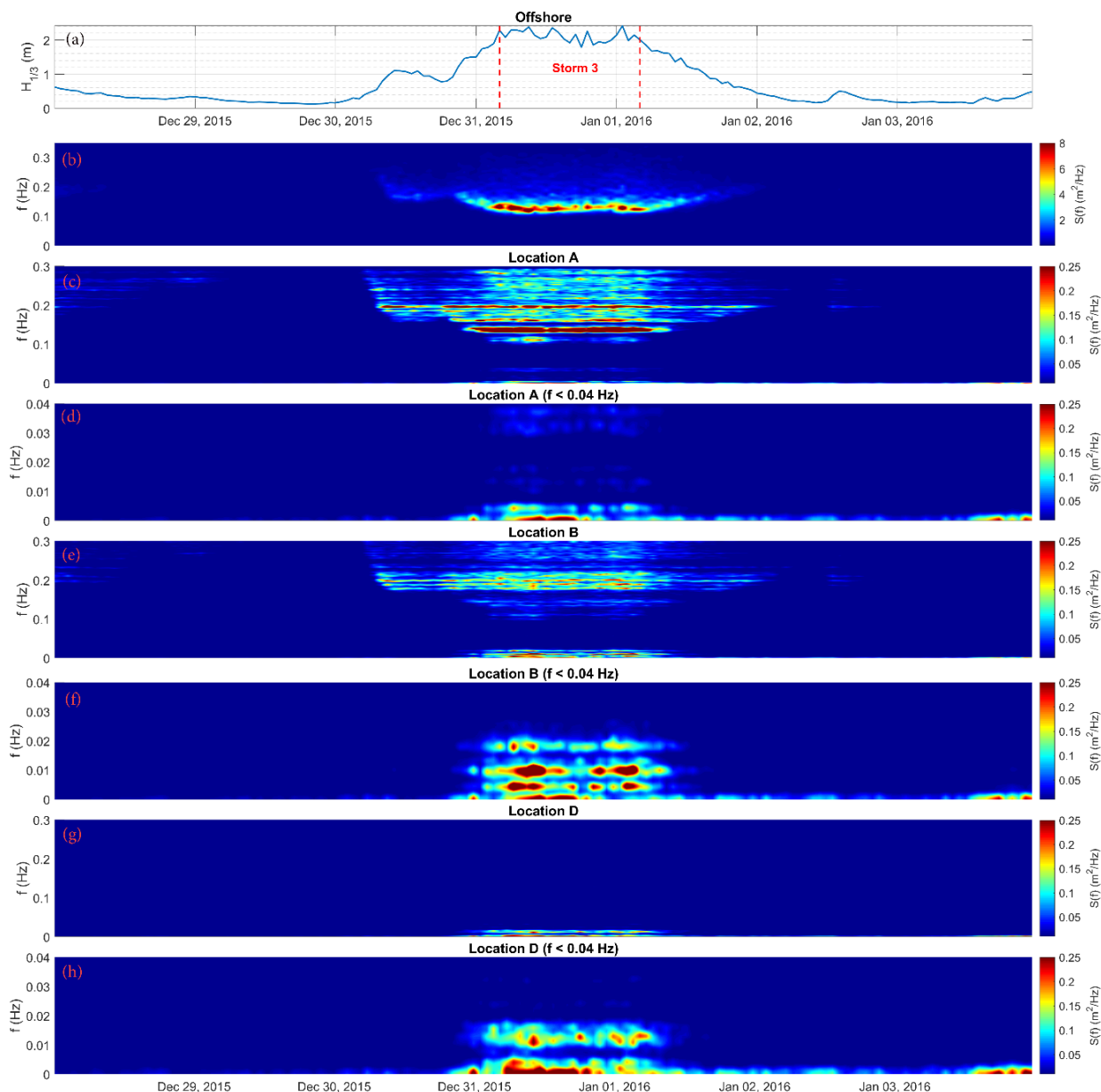
Στις Εικόνα 58 έως και Εικόνα 63 απεικονίζονται οι χρονικές περίοδοι καταγραφής κυματικών συνθηκών εντός και εκτός του λιμένα από τις οποίες αντλήθηκαν τα δεδομένα για τον καθορισμό των ιδιοπεριόδων της λιμενολεκάνης που παρουσιάζονται στην συνέχεια. Η ανάλυση των ενεργειακών φασμάτων στις συγκεκριμένες απεικονίσεις είναι $df = 0.01$ Hz (12 βαθμοί ελευθερίας) για τις χρονοσειρές ανοιχτά του Ενετικού λιμένα, ενώ για τις χρονοσειρές στις τοποθεσίες εντός του λιμένα η ανάλυση με $df = 0.0027$ Hz (11 βαθμοί ελευθερίας) κρίθηκε ικανοποιητική για την απεικόνιση των συχνοτήτων στις οποίες παρουσιάζονται ταλαντώσεις αυξημένης ενεργειακής πυκνότητας. Σε κάθε εικόνα φαίνονται με την σειρά οι κυματικές συνθήκες εκτός του λιμένα μέσω του $H_{1/3}$ κι έπειτα οι ίδιες κυματικές συνθήκες μέσω των

ενεργειακών φασμάτων πυκνότητας σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα ενεργειακά φάσματα για τις τοποθεσίες A, B, C και D (αναλογα με το κυματικό γεγονός που απεικονίζεται) σε όλο το εύρος συχνοτήτων καταγραφής αλλά και με λεπτομέρεια στο εύρος κάτω των 0.04 Hz.



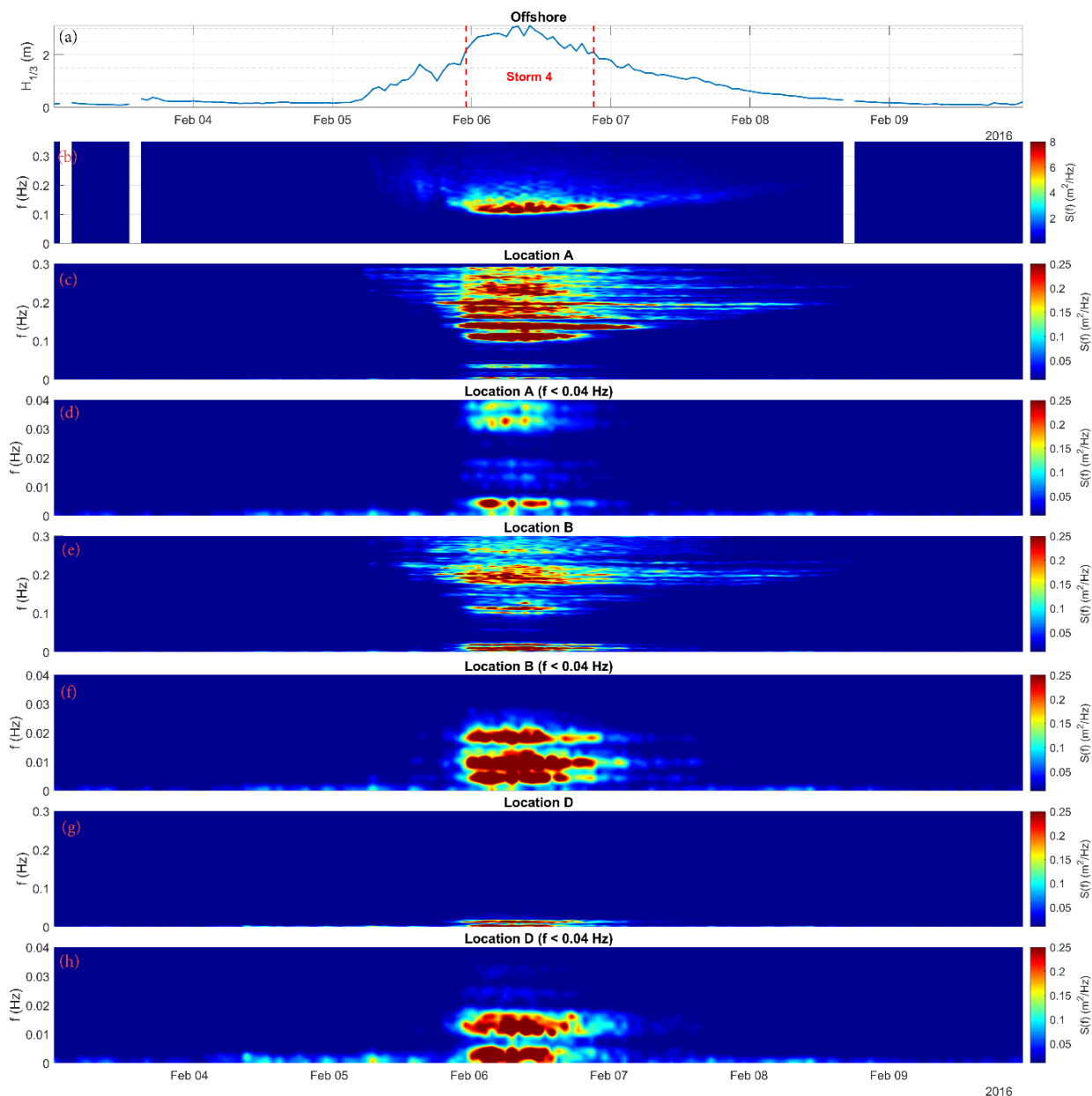
Εικόνα 59. Απεικόνιση απόκρισης τοποθεσιών A και D στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες της καταιγίδας 2 μέσω φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας. (a) $H_{1/3}$ προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών – μεταξύ των κόκκινων γραμμών είναι διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων (b) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών (c) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A (d) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A για $f < 0.04\text{Hz}$ (e) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D (f) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D για $f < 0.04\text{Hz}$.

Μια πρώτη παρατήρηση αφορά την παρουσία αυξημένης ενέργειας στις συχνότητες της προσπίπτουσας ενέργειας στην τοποθεσία A. Αυτή μεταφράστηκε και στις αυξημένες τιμές σημαντικού ύψους κύματος που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η αυξημένη ενέργεια παρατηρείται σε όλο το εύρος συχνοτήτων μεταξύ 0.09 – 0.3 Hz. Όσον αφορά την ενέργεια στις υπερβαρυτικές συχνότητες ($f < 0.04\text{ Hz}$), αυτή εντοπίζεται κυρίως σε περιόδους μεγαλύτερες των 165s αλλά και μεταξύ 30s και 25s.



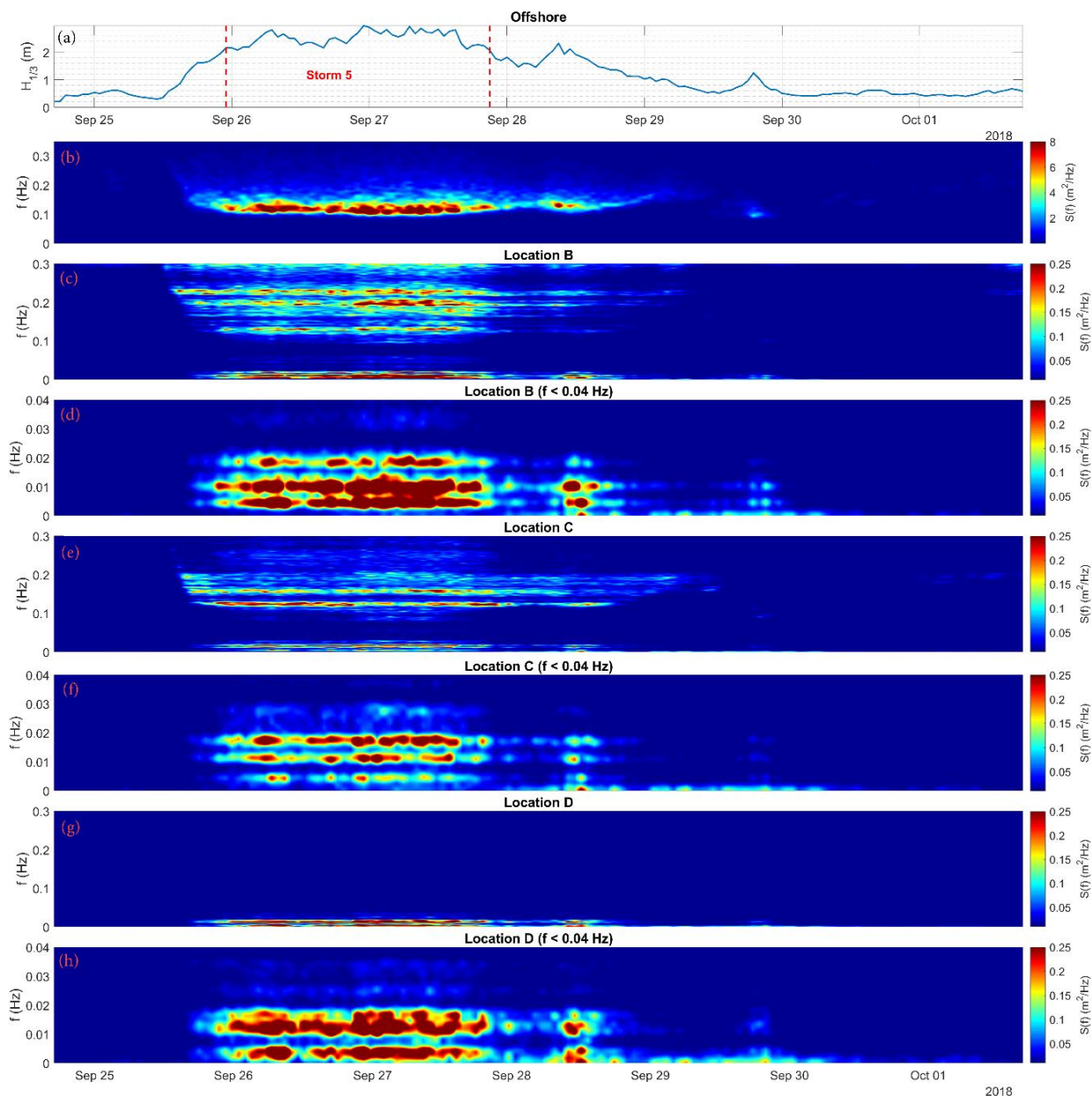
Εικόνα 60. Απεικόνιση απόκρισης τοποθεσιών A, B και D στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες της καταιγίδας 3 μέσω φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας. (a) $H_{1/3}$ προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών – μεταξύ των κόκκινων γραμμών είναι διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων (b) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών (c) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A (d) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A για $f < 0.04\text{Hz}$ (e) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B (f) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B για $f < 0.04\text{Hz}$ (g) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D (h) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D για $f < 0.04\text{Hz}$.

Στην τοποθεσία B οι ταλαντώσεις στο εύρος συχνοτήτων των προσπιπτόντων κυματισμών είναι σαφώς μειωμένες σε σχέση με την τοποθεσία A καθώς επίσης και η ενέργεια που παρατηρείται σε αυτές. Σε αυτές τις συχνότητες η ενέργεια φαίνεται να συγκεντρώνεται μεταξύ των 4s – 6s.



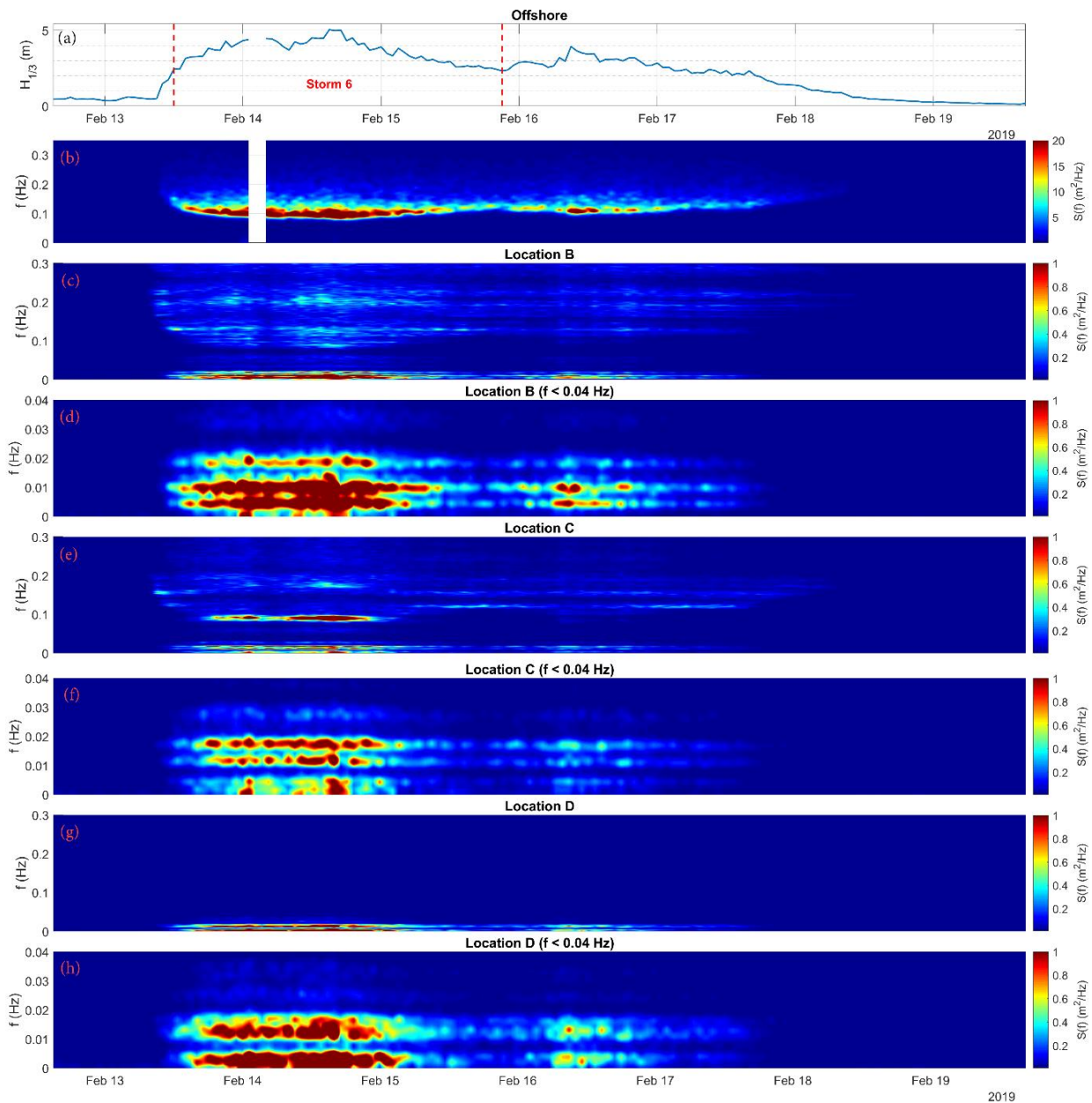
Εικόνα 61. Απεικόνιση απόκρισης τοποθεσιών A, B και D στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες της καταιγίδας 4 μέσω φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας. (a) $H_{1/3}$ προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών – μεταξύ των κόκκινων γραμμών είναι διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων (b) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών (c) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A (d) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας A για $f < 0.04\text{Hz}$ (e) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B (f) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B για $f < 0.04\text{Hz}$ (g) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D (h) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D για $f < 0.04\text{Hz}$.

Στην συγκεκριμένη τοποθεσία αρχίζουν πλέον να παίζουν σημαντικό ρόλο οι ταλαντώσεις στις υπερβαρυτικές συχνότητες. Καλύπτουν ένα εύρος μεταξύ 45s – 340s ενώ σε συνθήκες ισχυρής καταιγίδας (Εικόνα 63[d]) η ενέργεια σε αυτές τις συχνότητες είναι εμφανώς περισσότερη σε σχέση με τις υψηλότερες συνότητες.



Εικόνα 62. Απεικόνιση απόκρισης τοποθεσιών B, C και D στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες της καταιγίδας 5 μέσω φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας. (a) $H_{1/3}$ προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών – μεταξύ των κόκκινων γραμμών είναι διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων (b) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών (c) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B (d) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B για $f < 0.04\text{Hz}$ (e) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας C (f) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας C για $f < 0.04\text{Hz}$ (g) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D (h) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D για $f < 0.04\text{Hz}$.

Στην τοποθεσία C, παρατηρείται ξανά αυξημένη ενέργεια στις προσπίπτουσες συχνότητες. Αυτή ξεχωρίζει στις περιόδους 8s, 6s και 11s. Στις υπερβαρυντικές συχνότητες η ενέργεια παρουσιάζει μέγιστα σε ταλαντώσεις μεταξύ των 250s και 50s.



Εικόνα 63. Απεικόνιση απόκρισης τοποθεσιών B, C και D στις προσπίπτουσες κυματικές συνθήκες της καταιγίδας 6 μέσω φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας. (a) $H_{1/3}$ προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών – μεταξύ των κόκκινων γραμμών είναι διάρκεια που χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων (b) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας προσπιπτόντων κυματικών συνθηκών (c) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B (d) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας B για $f < 0.04\text{Hz}$ (e) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας C (f) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας C για $f < 0.04\text{Hz}$ (g) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D (h) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας κυματικών συνθηκών τοποθεσίας D για $f < 0.04\text{Hz}$.

Στην τοποθεσία D οι ταλαντώσεις στις προσπίπτουσες περιόδους εμφανίζουν μηδαμινή ενέργεια, σε αντίθεση με τις υπερβαρυτικές συχνότητες όπου συγκεντρώνεται όλη η ενέργεια σε περιόδους μεγαλύτερες των 60s.

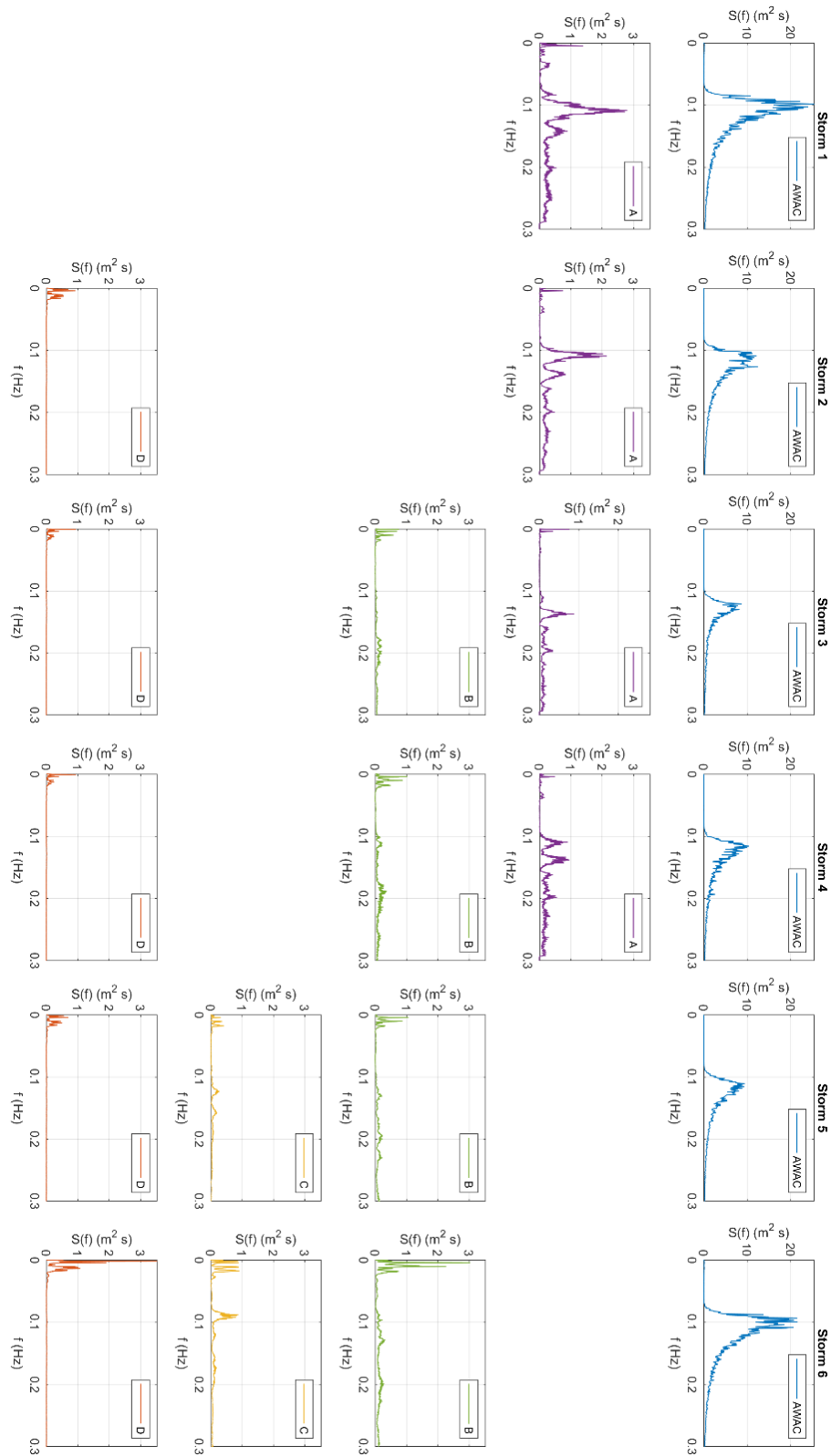
Οι παραπάνω παρατηρήσεις εξετάζονται με περισσότερη ακρίβεια μέσω του υπολογισμού του μέσου όρου των ενεργειακών φασμάτων των επιλεγμένων χρονοσειρών (Βλ. ενότητα 3.2), για κάθε τοποθεσία και καταιγίδα ξεχωριστά. Τα φάσματα που

χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό για τις τοποθεσίες εντός του λιμένα, είχαν την μέγιστη δυνατή ανάλυση ($df = 1/4096s = 2.44 \times 10^{-4}$) προκειμένου να μην χαθεί επιπλέον πληροφορία από την όποια εξομάλυνση. Το ίδιο έγινε και για τα φάσματα των χρονοσειρών ανοιχτά του Ενετικού λιμένα, των οποίων τα μέσα φάσματα που προέκυψαν είχαν ανάλυση ($df = 1/1200s = 8.33 \times 10^{-4}$). Τα αποτελέσματα των εξεταζομένων καταιγίδων εντός και εκτός λιμενολεκάνης φαίνονται στην **Εικόνα 64**.

Στο εύρος συχνοτήτων άνω των 0.04 Hz, οι μέγιστες τιμές των ενεργειακών φασμάτων στην τοποθεσία Α συμπίπτουν στο ίδιο εύρος συχνοτήτων με τις μέγιστες τιμές των φασμάτων εκτός του λιμένα, υποδεικνύοντας με περισσότερη σαφήνεια την ελλιπή προστασία της εισόδου. Άξια προσοχής είναι η πολύ λίγη ενέργεια που παρουσιάζεται γύρω από τα 8 s (0.12 Hz), ενώ συγχρόνως παρουσιάζονται διακριτές κορυφές ενέργειας γειτονικά στα 9 s (0.11 Hz) και 7 s (0.14 Hz). Πιο συγκεκριμένα η ενέργεια γύρω από τα 8 s παρουσιάζεται ελάχιστη ανεξαρτήτως της έντασης των κυματικών γεγονότων. Στις Καταιγίδες 1 και 2, οι οποίες είναι και οι πιο ενεργητικές για την τοποθεσία Α, η ενέργεια γύρω από τα 9 s είναι ιδιαίτερα αυξημένη καθώς και εκτός λιμένα η ενέργεια στην ίδια περίοδο βρίσκεται στην κορυφή του φάσματος. Στις Καταιγίδες 3 και 4 η ενέργεια γύρω από τα 9 s στα ανοιχτά είναι εκτός κορυφής του φάσματος. Ανάλογη είναι και η διακύμανση που παρουσιάζει η ενέργεια στην τοποθεσία Α. Ιδιαίτερης αναφοράς χρήζει το γεγονός ότι οι τιμές ενέργειας των ταλαντώσεων γύρω από τα 7 s, παραμένουν ουσιαστικά στα ίδια επίπεδα ανεξαρτήτως της έντασης των κυματικών γεγονότων.

Στην τοποθεσία Β, η φασματική ενέργεια είναι διάσπαρτη σε όλο το εύρος των συχνοτήτων άνω των 0.04 Hz και οι κορυφές ενέργειας δεν είναι τόσο ευδιάκριτες όσο στην τοποθεσία Α. Ταλαντώσεις μεγαλύτερων ενεργειακών κορυφών εμφανίζονται στις συχνότητες κάτω των 0.04Hz οι οποίες όμως αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

Αντιθέτως, στην τοποθεσία C εμφανίζονται και πάλι ευδιάκριτες κορυφές φασματικής ενέργειας, οι οποίες είναι γύρω από τα 6 s (0.16 Hz) και 8 s (0.12 Hz) κατά την διάρκεια της Καταιγίδας 5. Στην Καταιγίδα 6, η οποία είναι σαφώς εντονότερη, επανεμφανίζονται οι συγκεκριμένες κορυφές στις ίδιες περιόδους, αλλά αισθητά με λιγότερη ενέργεια. Συγχρόνως παρουσιάζεται μια νέα κορυφή γύρω από τα 11 s (0.08 Hz) η οποία αντιστοιχεί στις αυξημένες τιμές ενέργειας που παρουσιάζονται εκτός του λιμένα γύρω από την ίδια περίοδο. Η τοποθεσία D, ως η πλέον προστατευμένη του Ενετικού λιμένα, παρουσιάζει σχεδόν αμελητέα ενέργεια στις υψηλότερες συχνότητες, με όλη την ενέργεια στην συγκεκριμένη τοποθεσία να εμφανίζεται στις υπερβαρυτικές συχνότητες.



Εικόνα 64. Μέσα φάσματα ανά καταιγίδα εκτός Ενετικού λιμένα και εντός λιμενολεκάνης στις τέσσερις τοποθεσίες.

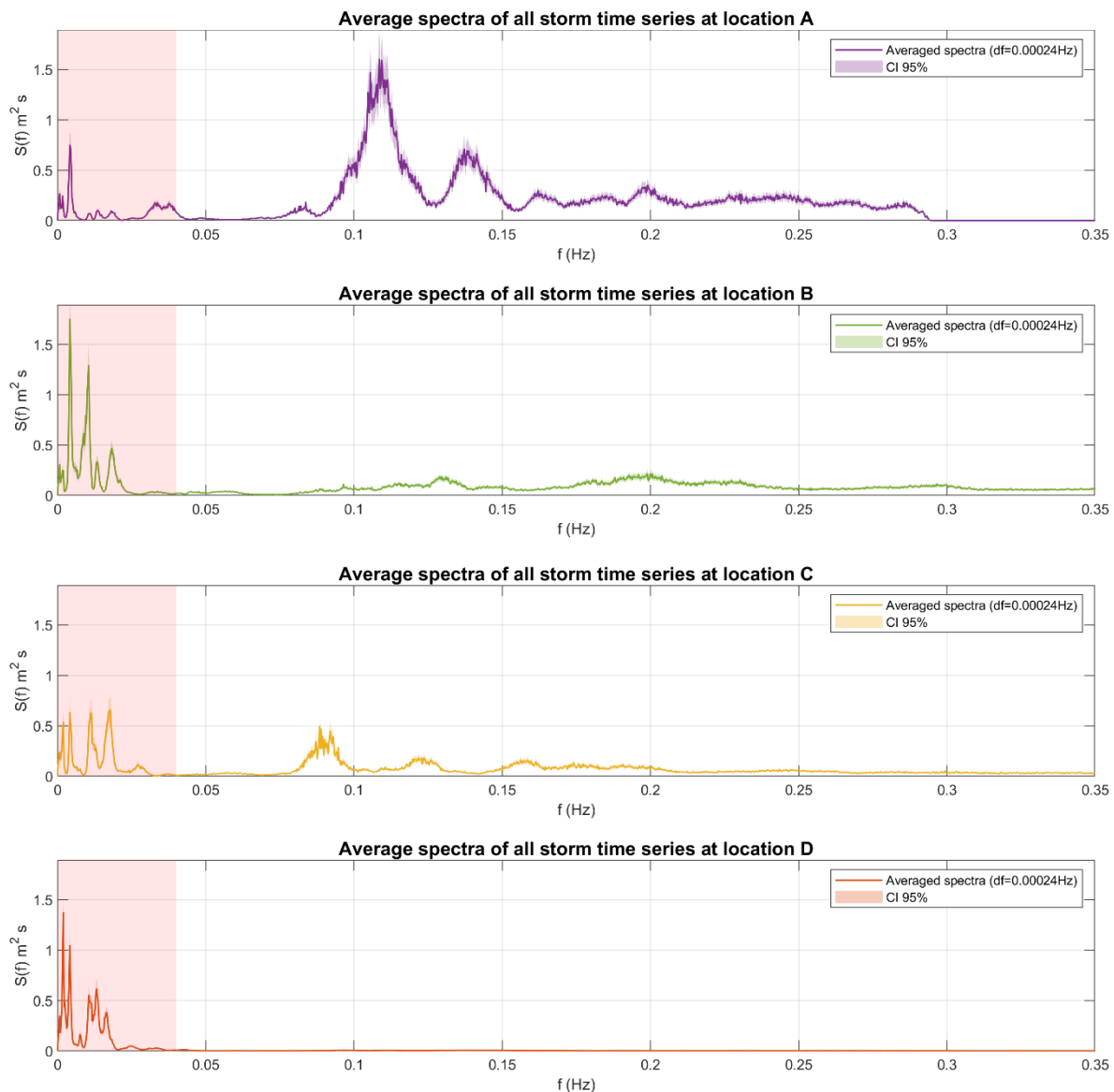
6.2.1.γ Απόκριση λιμενολεκάνης σε συχνότητες κάτω των 0.04Hz και ταυτοποίηση ιδιοπεριόδων.

Για την ταυτοποίηση των ιδιοπεριόδων της λιμενολεκάνης, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των φασμάτων των χρονοσειρών από όλες τις καταιγίδες για κάθε τοποθεσία ξεχωριστά. Στον **Πίνακας 22** δίνονται ο αριθμός των φασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε τοποθεσία, οι βαθμοί ελευθερίας και τα διαστήματα εμπιστοσύνης βάση της χ^2 κατανομής.

Πίνακας 22. Βαθμοί ελευθερίας και διαστήματα εμπιστοσύνης για τα μέσα φάσματα κάθε τοποθεσίας.

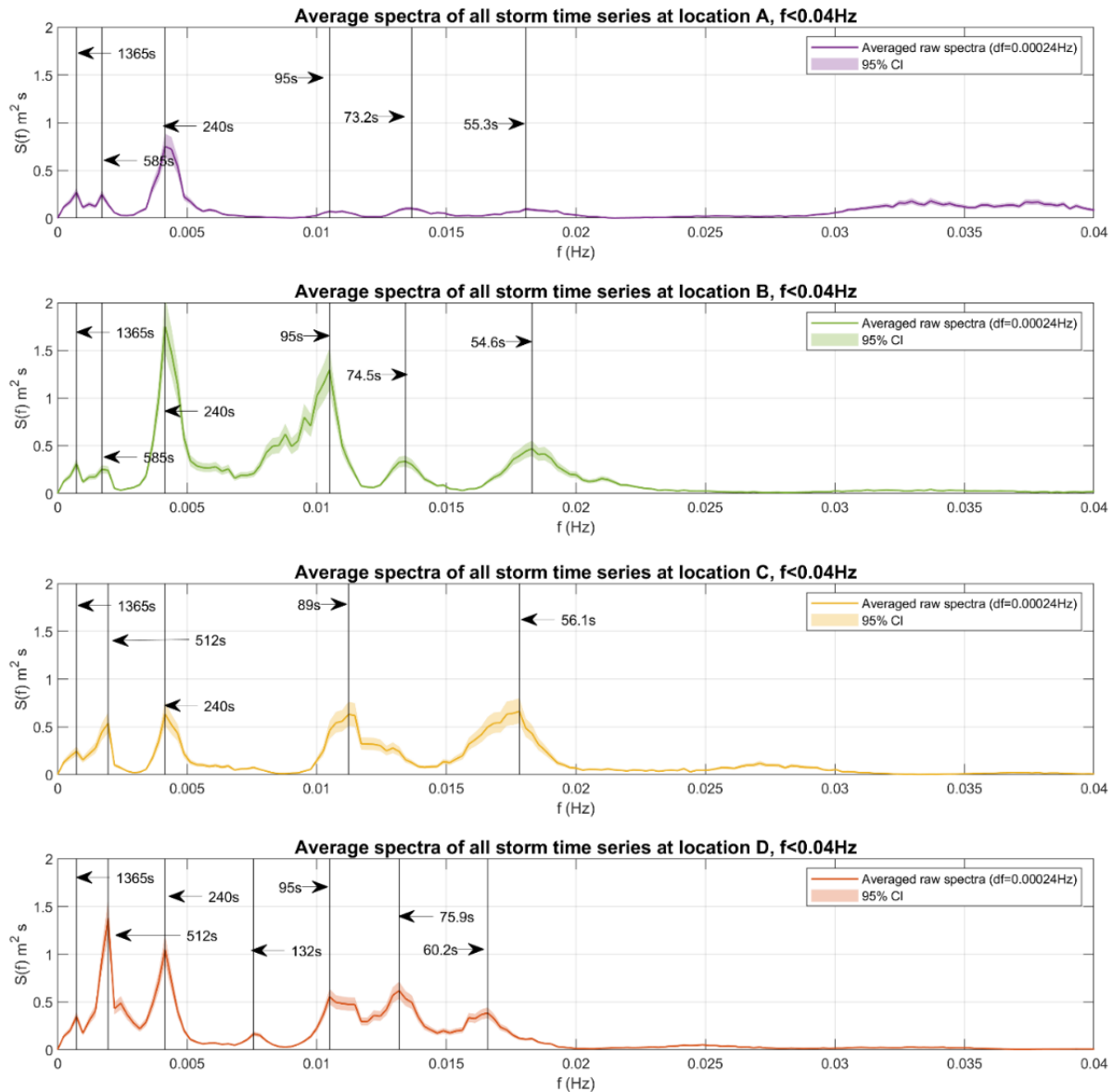
Τοποθεσία	n	DOF=2n	CI
A	133	266	[0.837 1.177]
B	133	266	[0.837 1.177]
C	92	184	[0.810 1.210]
D	182	364	[0.860 1.150]

Στην **Εικόνα 65** φαίνονται τα μέσα φάσματα για κάθε τοποθεσία. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, η τοποθεσία στην οποία η ενέργεια στις υπερβαρυτικές συχνότητες αποτελούσε τα μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με την ολική ενέργεια του φάσματος, ήταν η τοποθεσία D. Πιο συγκεκριμένα, η IG ενέργεια στην τοποθεσία A ήταν της τάξης του 5.3% κατά μέσο όρο για τις καταιγίδες που εξετάστηκαν. Στις τοποθεσίες B και C, η ενέργεια στις συχνότητες άνω των 0.04 Hz, παραμένει κυρίαρχη αλλά παρόλα αυτά η IG ενέργεια είναι πλέον αυξημένη και αποτελεί το 21.2% και 19.8% αντίστοιχα. Τέλος, στην τοποθεσία D, η IG ενέργεια κυριαρχεί κατά μέσο όρο 88.2%. Τα προαναφερθέντα ποσοστά μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά για την αναλογία της IG ενέργειας επί του συνόλου της ενέργειας σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων, παρόλο που τα μέσα φάσματα προέρχονται από διαφορετικό αριθμό χρονοσειρών για κάθε τοποθεσία,. Κι αυτό γιατί και ο μεγάλος αριθμός των χρονοσειρών για κάθε τοποθεσία δίνει περιορισμένου εύρους διαστήματα εμπιστοσύνης (**Πίνακας 22**) αλλά και επειδή οι περισσότερες τοποθεσίες καλύφθηκαν για τις περισσότερες εξεταζόμενες καταιγίδες.



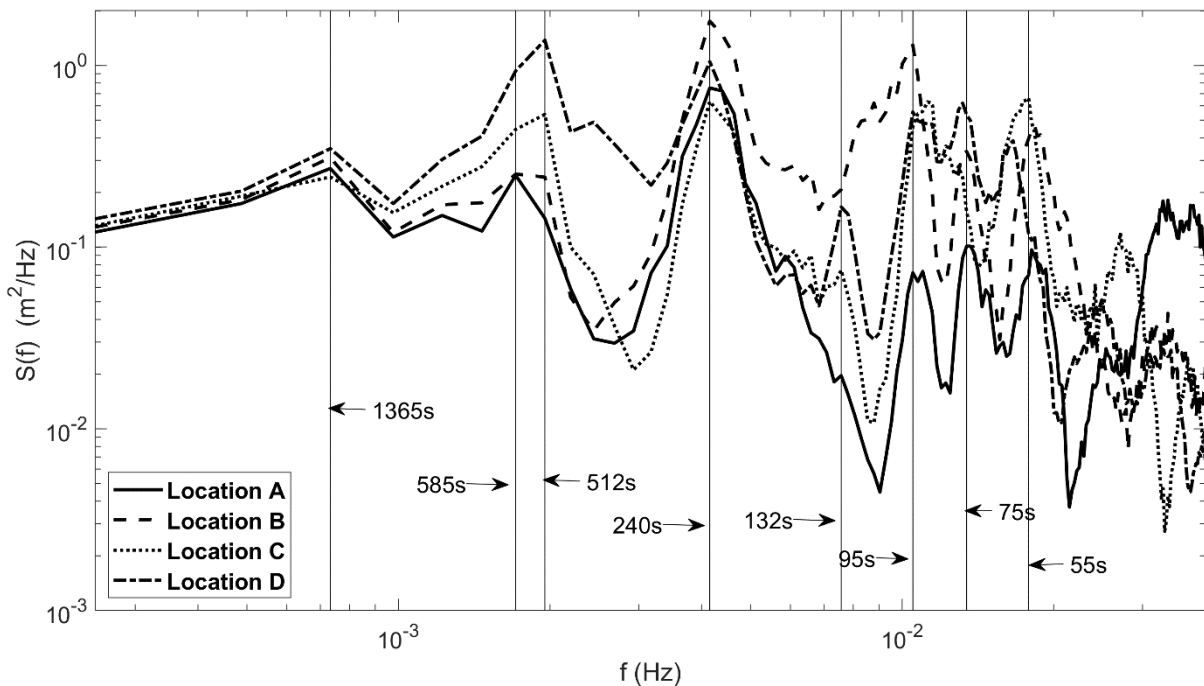
Εικόνα 65. Μέσα φάσματα από το σύνολο των χρονοσειρών κατά την διάρκεια των έξι καταιγίδων για τις τοποθεσίες A, B, C και D.

Στην **Εικόνα 66** εστιάζονται τα μέσα φάσματα κάθε τοποθεσίας, στο εύρος συχνοτήτων $0 \text{ Hz} < f < 0.04$. Διακρίνονται κορυφώσεις της φασματικής ενέργειας σε στενά εύρη συχνοτήτων, με τις περισσότερες να είναι κοινές για τις διάφορες τοποθεσίες. Οι διακριτές αυτές κορυφές, υποδεικνύουν ενίσχυση των κυματισμών μέσα στις λιμενολεκάνες σε χαμηλές συχνότητες οι οποίες αντιστοιχούν στις φυσικές ιδιοσυχνότητες της λιμενολεκάνης. Στην τοποθεσία A, διακρίνονται κορυφώσεις ενέργειας στα 1365 s, 585 s, 240 s, 95 s, 73.2 s και 55.3 s. Στην περίοδο των 240 s παρουσιάζεται η μέγιστη ενέργεια. Στο εύρος των περιόδων 25 – 33 s δεν παρατηρείται μεν κάποια ευδιάκριτη κορύφωση αλλά είναι εμφανής η αυξημένη ενεργειακή πυκνότητα. Στην τοποθεσία B εμφανίζονται και πάλι κορυφές στις περιόδους των 1365 s, 585 s, 240 s και 95 s. Επιπλέον, κορύφωση ενέργειας υπάρχει στις περιόδους των 74.5 s και 54.6 s. Και σε αυτή την τοποθεσία η περίοδος των 240 s συγκεντρώνει την περισσότερη ενέργεια.



Εικόνα 66. Λεπτομέρεια στο εύρος $0\text{Hz} < f < 0.04\text{Hz}$ των μέσων φασμάτων από το σύνολο των χρονοσειρών κατά την διάρκεια των έξι καταιγίδων για τις τοποθεσίες A, B, C και D.

Ακολουθεί με διαφορά από τις υπόλοιπες αυτή των 95 s. Στην τοποθεσία C ξεχωρίζουν οι κορυφές στις περιόδους των 1365 s, 512 s, 240 s, 89 s, και 56.1 s. Πέραν της περιόδου των 1365 s, η οποία παρουσιάζει την χαμηλότερη ενέργεια, οι υπόλοιπες συγκεντρώνουν τα ίδια μεγέθη ενέργειας. Επίσης, ενώ φαίνεται ότι υπάρχει ενέργεια στα 73 s με 74 s όπως στις προηγούμενες τοποθεσίες, δεν παρουσιάζεται κορύφωση ενέργειας. Ομοίως και στο εύρος των περιόδων 33 – 40 s η ενέργεια είναι αυξημένη χωρίς την ευδιάκριτη παρουσία κορύφωσης. Τέλος, στην τοποθεσία D αντιστοιχούν οι περίοδοι 1365 s, 512 s, 240 s, 132 s, 95 s, 75.9 s και 60.2 s. Στην συγκεκριμένη τοποθεσία, η περίοδος γύρω στα 55 s δεν παρουσιάζει πλέον κορύφωση αλλά κάνει την επανεμφάνισή της η κορυφή στα 75.9 s.



Εικόνα 67. Κοινές ιδιοσυχνότητες στο εύρος $0\text{Hz} < f < 0.04\text{Hz}$, των μέσων φασμάτων από το σύνολο των χρονοσειρών κατά την διάρκεια των έξι καταιγίδων για τις τοποθεσίες A, B, C και D.

Στην **Εικόνα 67** παρουσιάζονται τα παραπάνω αποτελέσματα συγκεντρωτικά και για τις τέσσερις τοποθεσίες σε λογαριθμική κλίμακα, καθιστώντας ευκολότερη τη σύγκριση μεταξύ των τοποθεσιών. Ξεκινώντας από τις κορυφές υψηλότερων συχνοτήτων, το φάσμα για την τοποθεσία A κορυφώνεται στα 55.3 s, για την τοποθεσία B στα 54.6 s και για την τοποθεσία C στα 56.1 s. Κάθε μία από τις συγκεκριμένες κορυφώσεις αντιστοιχεί πιθανότατα σε διαφορετική ιδιοπερίοδο. Στην τοποθεσία D δεν εμφανίζονται κορυφώσεις ενέργειας στο εύρος περιόδων 54.6 – 56.1 s, πιθανώς επειδή οι συγκεκριμένες ιδιοπερίοδοι ανταποκρίνονται σε συντονισμό μόνο της Δυτικής λιμενολεκάνης. Αντ' αυτού, στην τοποθεσία D η ενέργεια κορυφώνεται στα 60.2 s, στην οποία περίοδο τα φάσματα για τις τοποθεσίες A και B τις εμφανίζουν ως κομβικά σημεία, καθιστώντας τα 60.2 s ιδιοπερίοδο μόνο της Ανατολικής λιμενολεκάνης.

Η επόμενη ζώνη συχνοτήτων που παρουσιάζει κορυφές ενέργειας αντιστοιχεί στο εύρος των περιόδων 73.2 s – 75.9 s, με τις κορυφές να παρουσιάζονται στις τοποθεσίες A, B και D. Στην τοποθεσία C παρόλο που δεν κορυφώνεται η ενέργεια στο συγκεκριμένο εύρος, παρουσιάζεται αυξημένη. Ακολουθούν οι κορυφές στις περιόδους των 89 και 95 s. Η ομαλή μεταβολή αυξημένης ενέργειας στα φάσματα για τις τοποθεσίες A, C και D στο συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι στην τοποθεσία B είναι ευδιάκριτη η κορύφωση ενέργειας στα 95 s, μπορεί δικαιολογήσει την ύπαρξη δύο ξεχωριστών ιδιοπεριόδων: μία στα 89 s για τις τοποθεσίες A, C και D και μια στα 95 s η οποία ανταποκρίνεται σε όλες τις τοποθεσίες. Η επόμενη ενεργειακή κορύφωση είναι στα 132 s και είναι διακριτή στο φάσμα της τοποθεσίας D και σε λιγότερο βαθμό στο φάσμα της τοποθεσίας

C. Η τοποθεσία B δεν φαίνεται να επηρεάζεται στην συγκεκριμένη συχνότητα, ενώ το φάσμα της τοποθεσίας A εμφανίζει μια ισχυρή κορύφωση χαμηλής ενέργειας.

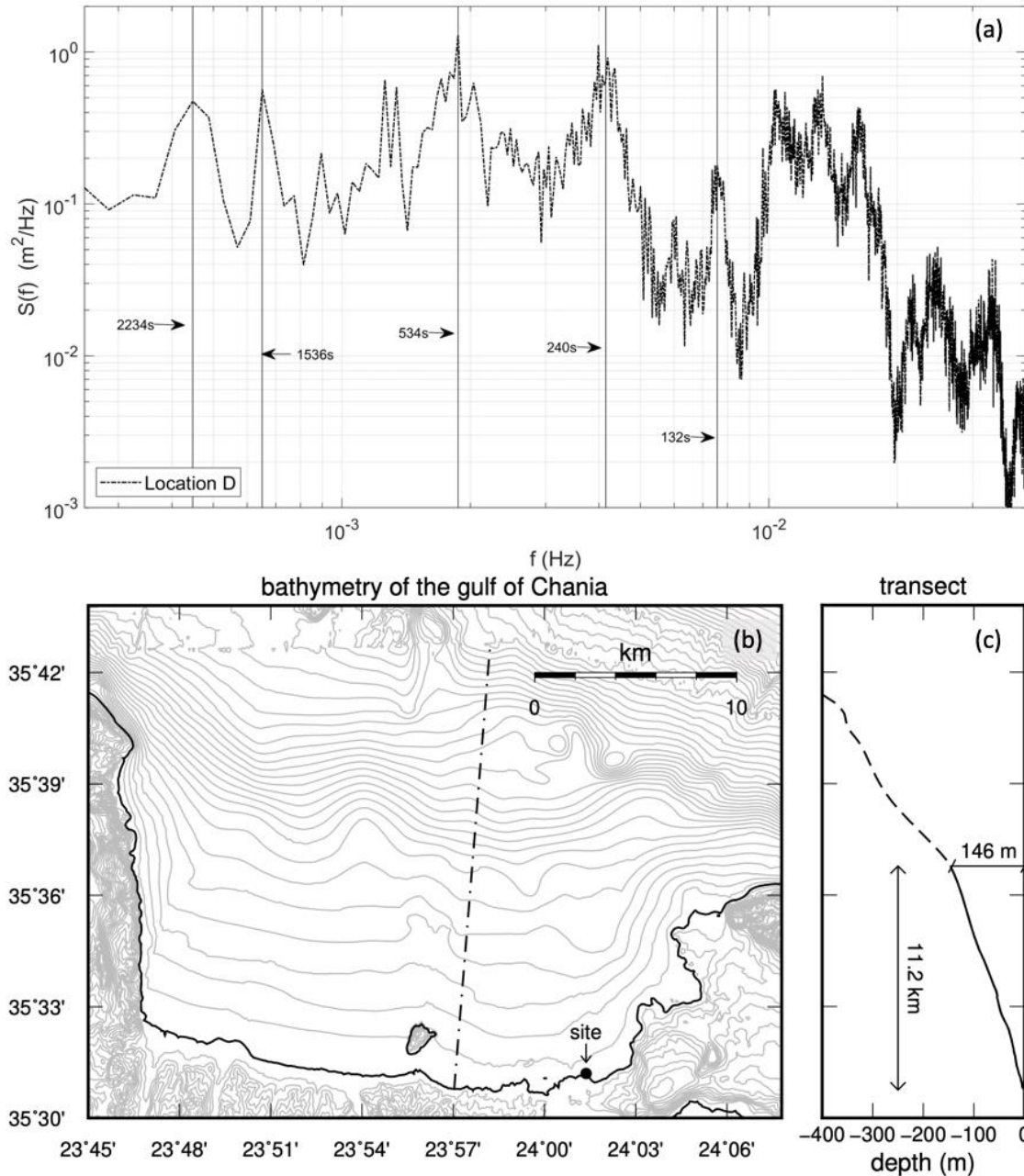
Η πλέον ευδιάκριτη κοινή ενεργειακή κορύφωση και για τις τέσσερις τοποθεσίες είναι αυτή στα 240 s. Οι επόμενες κορυφώσεις εμφανίζονται στα 512 και 585 s για τις τοποθεσίες C-D και A-B αντίστοιχα. Παρόλα αυτά, από τη στιγμή που η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών συχνοτήτων αντιστοιχεί σε μόλις ένα βήμα df ($df \approx 2.44 \times 10^{-4}$) του ενεργειακού φάσματος, είναι πιθανόν ότι οι δύο κορυφές αντιστοιχούν στην ίδια ζώνη συχνοτήτων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα της επόμενης ενότητας δείχνουν ότι οι κορυφές στις ζώνες περιόδων 512-585 s και των 240s ανταποκρίνονται στις δύο πρώτες ιδιοπερίόδους του λιμένα.

Τέλος, υπάρχει άλλη μία ευδιάκριτη κορυφή στην περίοδο των 1365 s, η οποία είναι κοινή στις τέσσερις τοποθεσίες. Αυτή η πάρα πολύ υψηλή περίοδος είναι πέρα από το δυνατό εύρος των NOPs της λιμενολεκάνης. Επιπλέον, λόγω της σχετικά χαμηλής ανάλυσης των μέσων φασμάτων σε αυτό το χαμηλό εύρος συχνοτήτων, η κορυφή των 1365 s αντιστοιχεί σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων (1170 – 1638 s). Προκειμένου, να εξεταστεί πιο λεπτομερώς η κατανομή της φασματικής ενέργειας σε αυτό το χαμηλό εύρος συχνοτήτων, πραγματοποιήθηκε ξεχωριστή φασματική ανάλυση χρησιμοποιώντας συνεχή δεδομένα ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας τα οποία συλλέχθηκαν κατά την διάρκεια της Καταιγίδας 2 στην τοποθεσία D. Το συνεχές αυτό σετ δεδομένων με 1 Hz ρυθμό δειγματοληψίας χωρίστηκε σε 11 χρονοσειρές των 24,756 s, δίνοντας φάσματα ανάλυσης $\Delta f \approx 4.069 \times 10^{-5}$. Από αυτά υπολογίστηκε μέσο φάσμα με 22 βαθμούς ελευθερίας.

Στην **Εικόνα 68[a]** απεικονίζεται το μεγαλύτερης ανάλυσης μέσο φάσμα και διακρίνονται κορυφώσεις ενέργειας σε διακριτές ζώνες συχνότητας πέραν των 534 s. Αυτές οι περίοδοι αντιστοιχούν πιθανότατα σε NOP's ενός μεγαλύτερου συστήματος, όπως ολόκληρος ο κόλπος Χανίων. Η υπόθεση αυτή εξετάζεται μέσω μιας απλοποιημένης ανάλυσης. Η μορφολογία της ακτής του κόλπου σε συνδυασμό με τις ισοβαθείς όπως φαίνεται στην **Εικόνα 68[b]**, υποδεικνύουν ότι ο κόλπος θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια ημίκλειστη λεκάνη με τριγωνικό βαθυμετρικό προφίλ ([Rabinovich, 2010](#)). Για την ταυτοποίηση της ιδιοσυχνότητας *Helmoltz*, T_H , μιας τέτοιας γεωμετρίας, εξάχθηκε το προφίλ βάθους από μία τομή όπως φαίνεται στην **Εικόνα 68[c]** και έγινε χρήση της εξίσωσης ([Rabinovich, 2010](#)):

$$T_H = 2.618 \frac{2L}{\sqrt{gh_1}}, \quad (6.3)$$

όπου L είναι το μήκος του προφίλ και h_1 είναι το βαθύτερο σημείο του προφίλ.



Εικόνα 68. Ταυτοποίηση των NOP του κόλπου Χανίων. α) Φάσμα ενεργειακής πυκνότητας στην τοποθεσία D για την Καταιγίδα 2, χρησιμοποιώντας χρονοσειρές των 24,576 s και 22 βαθμούς ελευθερίας, β) Η βαθυμετρική διατομή (διακεκομμένη γραμμή) που εξάχθηκε από την βαθυμετρία EMODnet (2016) για τον κόλπο Χανίων – οι ισοβαθείς είναι ανά 20 m, γ) Βαθυμετρικό προφίλ της διατομής; Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει όλο το βενθικό προφίλ της διατομής και η συνεχής γραμμή το κομμάτι της διατομής που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της ιδιοπεριόδου.

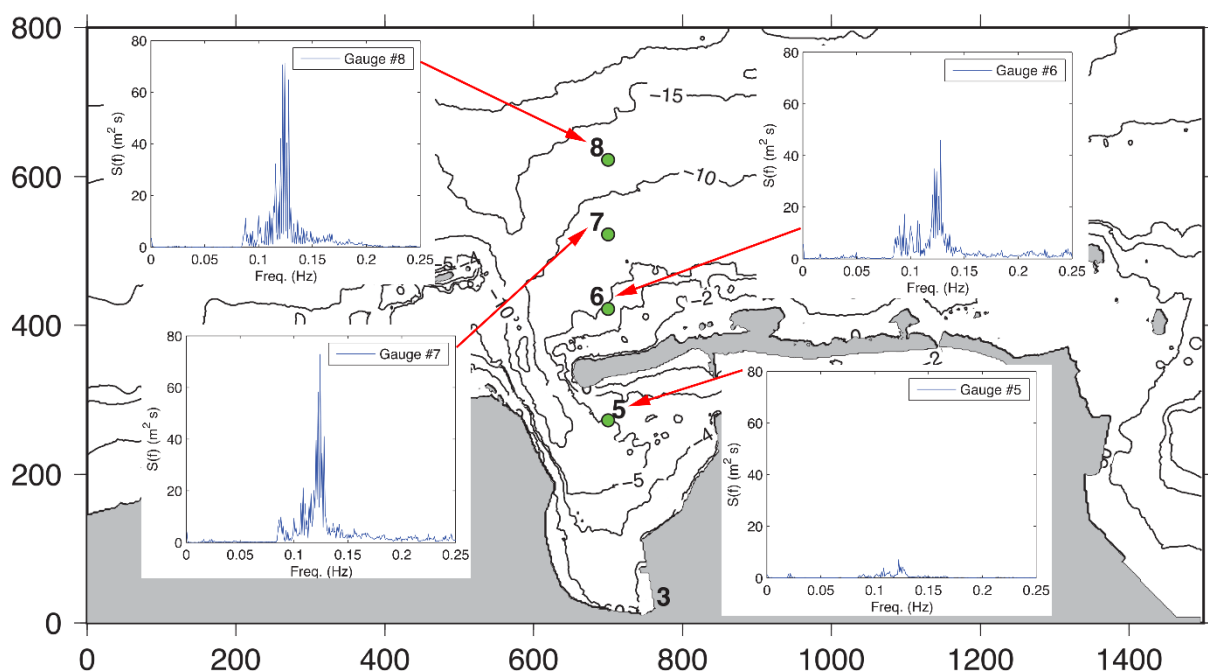
Κάνοντας χρήση των διαστάσεων που φαίνονται στην **Εικόνα 68[c]**, προκύπτει ότι $T_H = 1550$ s, η οποία είναι κοντά στην περίοδο των 1536 s που φαίνεται στην **Εικόνα 68[a]** και εντός του εύρους περιόδων της κορύφωσης των 1365 s που καταγράφηκε στις μετρήσεις (**Εικόνα 67**). Συνεπώς η κορυφή του μέσου φάσματος στα 1536 s (**Εικόνα 68[a]**) και η κορυφή στα 1365 s (**Εικόνα 67**), πιθανότατα ανταποκρίνονται στην *Helmholtz* ιδιοσυχνότητα του κόλπου με ιδιομορφή η οποία χαρακτηρίζεται από έναν κόμβο στην άκρη της υφαλοκρηπίδας (~146 m βάθος) και μέγιστο ταλάντωσης στην βόρεια ακτή του κόλπου. Δεν έγινε περαιτέρω ανάλυση

για τις ενεργειακές κορυφώσεις που διακρίνονται στο εύρος περιόδων 534 – 2234 s (Εικόνα 68[a]), αλλά πιθανότατα αυτές ανταποκρίνονται σε άλλες ιδιοπεριόδους του κόλπου.

6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ – ΤΑΥΤΟΠΟΙΗΣΗ ΙΔΙΟΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.2, οι κυματοσειρές από τα αποτελέσματα του μοντέλου *COULWAVE* αποθηκεύτηκαν στο εσωτερικό του λιμένα σε κানাβο με μέγεθος κελιού 10m. Έπειτα, υπολογίστηκε με τη χρήση Fast Fourier Transform (FFT) το φάσμα ενεργειακής πυκνότητας για κάθε κελί.

Στην Εικόνα 69 απεικονίζεται μέσω του μετασχηματισμού του φάσματος ενεργειακής πυκνότητας, η ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώνει την μεταβολή της κυματικής ενέργειας από τα βαθύτερα στα ρηχότερα νερά, σε επιλεγμένες τοποθεσίες μεταξύ 10 – 15 m βάθους εκτός του λιμένα και σε βάθος περίπου 5 m εντός αυτού. Οι θέσεις όπου επιλέχθηκαν οι υπολογιστικοί κυματομετρητές για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων φαίνονται στην ίδια εικόνα. Φαίνεται ότι το μοντέλο είναι ικανό να προσομοιώσει σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό την διασπορά της κυματικής ενέργειας σε χαμηλότερες και υψηλότερες συχνότητες, λόγω της μη γραμμικής αλληλεπίδρασης των κυματισμών κατά την διάδοση τους προς την ακτή (διεργασία θραύσης) (Longuet-Higgins & Stewart, 1962, 1964) από την θέση #8 στην θέση #5. Στην θέση #5 η ενέργεια είναι επιπλέον μειωμένη λόγω της προστασίας του σημείου από τον κυματοθραύστη.



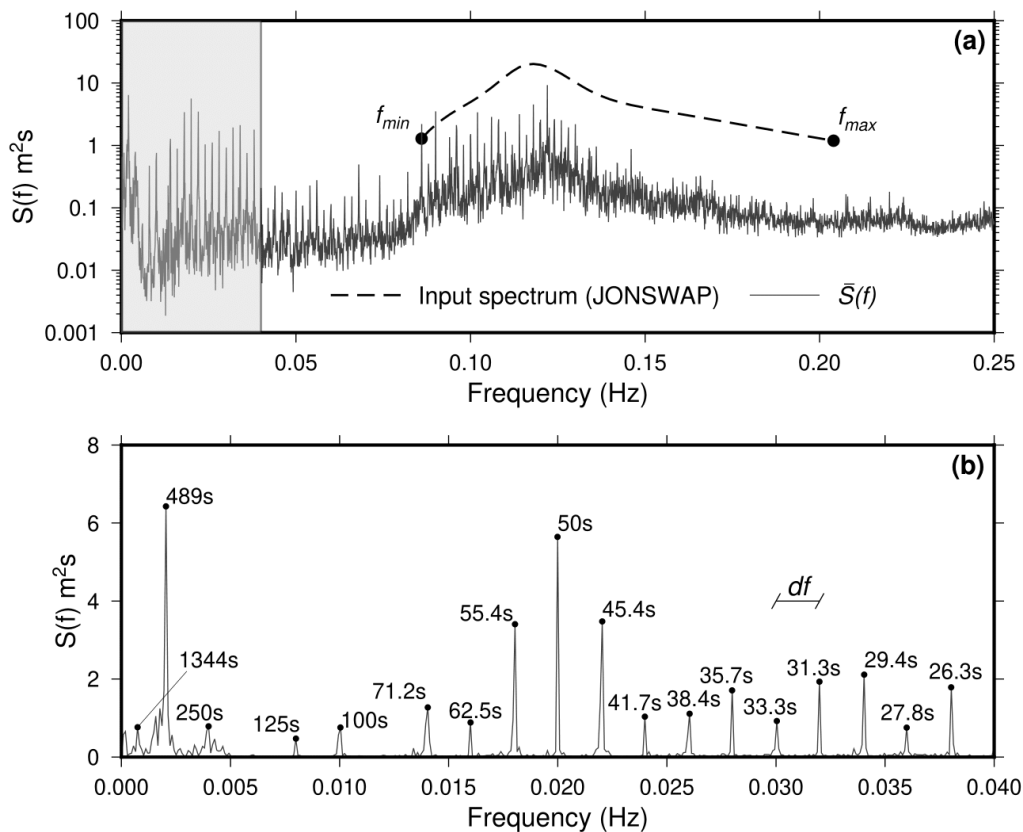
Εικόνα 69. (α)Θέσεις υπολογιστικών κυματομετρητών (5-8) και μετασχηματισμός ομαλοποιημένου κυματικού φάσματος από τη θέση 8 στη θέση 5.

6.3.1 Καθορισμός ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών συντονισμού

Οι ιδιοσυχνότητες της λιμενολεκάνης ταυτοποιήθηκαν από τα αριθμητικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας το μέσο χωρικό φάσμα ενεργειακής πυκνότητας όλης της λιμενολεκάνης το οποίο δίνεται από (Douyere, 2003) :

$$\bar{S}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i(f), \quad (6.4)$$

όπου $S_i(f)$ είναι η φασματική ενέργεια για κάθε κελί i εντός της λιμενολεκάνης και N είναι ο συνολικός αριθμός των κελιών της λιμενολεκάνης. Το μέσο χωρικό φάσμα χρησιμοποιήθηκε για την ταυτοποίηση των συχνοτήτων στις οποίες συγκεντρώνεται η ενέργεια, και σε συνδυασμό με την επισκόπηση των μεμονωμένων φασμάτων, παρέχει ένα στιγμιότυπο της διέγερσης της λιμενολεκάνης (Douyere, 2003). Στην **Εικόνα 70[a]** αποτυπώνεται η αισθητή μείωση της ενεργειακής πυκνότητας του μέσου χωρικού φάσματος εντός λιμενολεκάνης σε σχέση με το φάσμα εισόδου στις οριακές συνθήκες - στο εύρος συχνοτήτων του τελευταίου - για λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.



Εικόνα 70. (a) Μέσο χωρικό φάσμα ενεργειακής πυκνότητας υπολογιζόμενο από τις χρονοσειρές ανύψωσης της στάθμης του COULWAVE εντός της λιμενολεκάνης σε συγκριση με το φάσμα JONSWAP που τέθηκε στις οριακές συνθήκες. Η σκιασμένη περιοχή δηλώνει το IG εύρος συχνοτήτων του μέσου χωρικού φάσματος που απεικονίζεται από κάτω (b).

Οι κορυφώσεις ενέργειας στο εύρος των IG συχνοτήτων που προκύπτουν από το μέσο χωρικό φάσμα των αριθμητικών χρονοσειρών απεικονίζονται στην **Εικόνα 70[b]**. Με μια πρώτη επισκόπηση παρατηρείται ότι σημαντικός αριθμός ιδιοπεριόδων συμπίπτει σε μεγάλο βαθμό με τις ιδιοπεριόδους που ταυτοποιήθηκαν από τις μετρήσεις πεδίου (οι περίοδοι των παρενθέσεων με τις αντίστοιχες τοποθεσίες) : 125 s (132 s, D), 100 s (95 s, A/B/D), 71.2 s (73.2 – 75.9s, A/B/D), 62.5 s (60.2 s, D), 55.4 s (55.3 – 56.1s, A/B/C), 38.4 (36.9 s, C), 31.3 s (30.3 s, A) και 27.8 s (26.8 s, A). Οι ιδιοπερίοδοι 489 s και 250 s της προσομοίωσης που φαίνονται στην εικόνα δεν καταγράφηκαν σε καμία από τις τέσσερις τοποθεσίες των μετρήσεων πεδίου. Αντ’ αυτών, οι πλησιέστερες ιδιοπερίοδοι στις μετρήσεις βρίσκονται στα 512 s και 240 s αντίστοιχα.

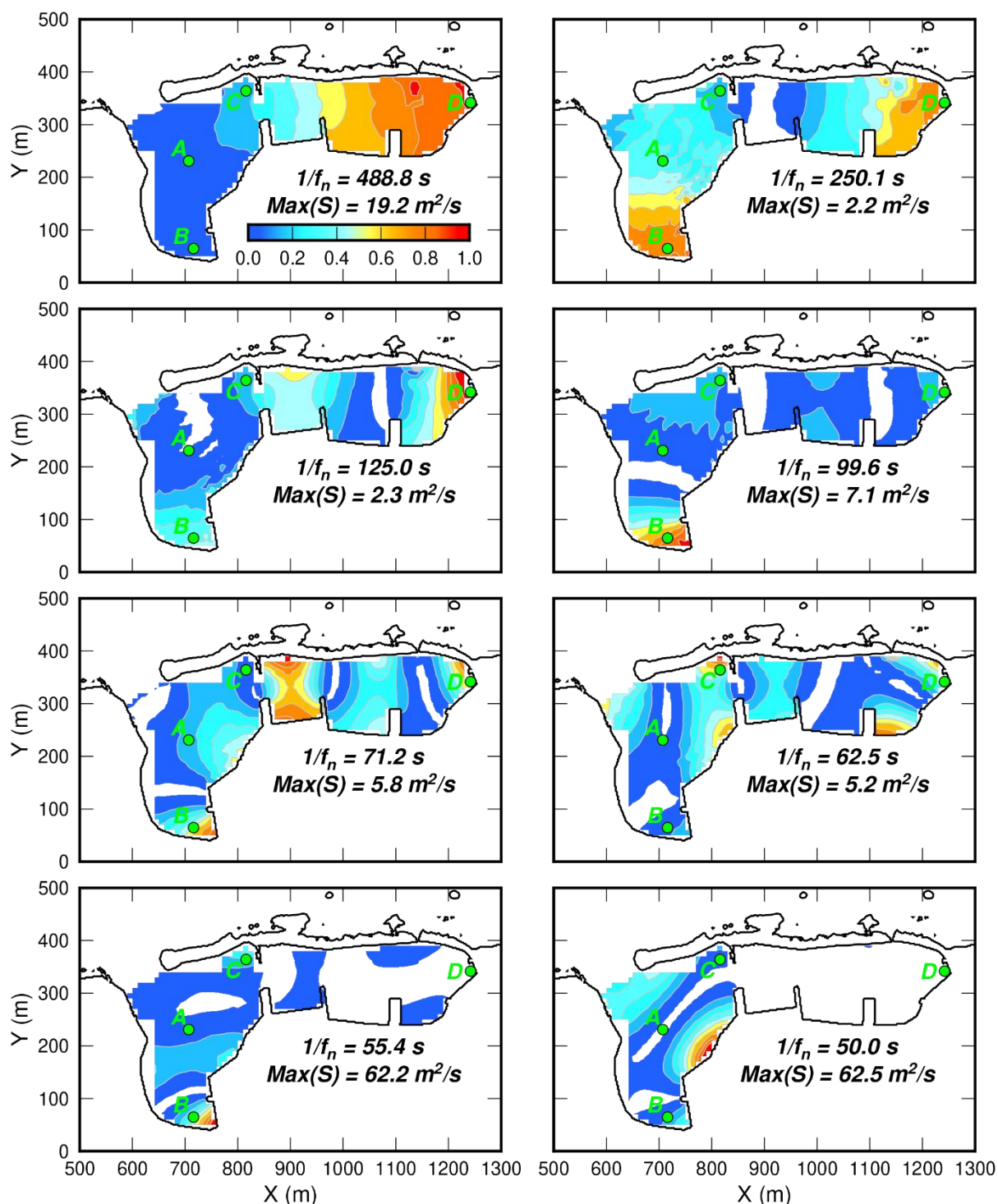
Φαίνεται ότι το μοντέλο είναι σε θέση να αναλύσει τις συχνότητες συντονισμού σε εύρος $\pm df/2$ (**Εικόνα 70[b]**). Από την άλλη, ο εντοπισμός των συχνοτήτων συντονισμού από τις μετρήσεις πεδίου περιορίζεται από το βήμα συχνότητας Δf που ορίζεται στην FFT, το οποίο αποτελεί συνάρτηση της συνολικής διάρκειας της χρονοσειράς (t_0), δηλ. $\Delta f = 1/t_0$. Επομένως, οι περίοδοι συντονισμού T_n που ταυτοποιούνται μέσω του αριθμητικού μοντέλου (κορυφές στην **Εικόνα 70[b]**) βρίσκονται σε εύρος $T_n \pm df/2$, και οι περίοδοι συντονισμού που ταυτοποιούνται μέσω των μετρήσεων πεδίου (κορυφές στην **Εικόνα 67**) βρίσκονται σε εύρος $T_n \pm \Delta f/2$. Λαμβάνοντας υπ’όψιν την εξάρτηση από τα df και Δf στην ακρίβεια ταυτοποίησης των περιόδων συντονισμού, αποδίδεται στον **Πίνακας 23** μια πιο ακριβής σύγκριση μεταξύ του εύρους ταυτοποιήσεων από τις μετρήσεις πεδίου και του αριθμητικού μοντέλου.

Πίνακας 23. Εντοπισμός ανώτατων και κατώτατων ορίων των ιδιοπεριόδων (s) της λιμενολεκάνης για την αριθμητική προσομοίωση και τις μετρήσεις πεδίου στις τοποθεσίες πόντισης A – D.

	Μετρήσεις Πεδίου								COULWAVE	
	A		B		C		D		$T_{n,min}$	$T_{n,max}$
	$T_{n,min}$	$T_{n,max}$	$T_{n,min}$	$T_{n,max}$	$T_{n,min}$	$T_{n,max}$	$T_{n,min}$	$T_{n,max}$	$T_{n,min}$	$T_{n,max}$
Helm. mode	546.0	630.0	546.0	630.0	481.9	546.1	481.9	546.1	328.4	956.9
Fund. mode	234.1	248.3	234.1	248.3	234.1	248.3	234.1	248.3	200.0	333.3
2nd mode	-	-	-	-	129.9	134.2	129.9	134.2	111.1	142.9
3rd mode	93.9	96.1	93.9	96.1	88.0	90.0	93.9	96.1	90.9	111.1
4th mode	72.5	73.8	73.8	75.2	76.6	78.0	75.2	76.6	66.5	76.7
5th mode	-	-	-	-	-	-	59.8	60.6	58.8	66.7
6th mode	54.9	55.7	54.2	55.0	55.7	56.5	-	-	52.5	58.6
7th mode	-	-	49.7	50.3	49.7	50.3	-	-	47.6	52.6

Μέσω της προσομοίωσης ήταν δυνατή η αναπαράσταση των ιδιομορφών που αντιστοιχούν στις ιδιοπεριόδους, κάτι το οποίο δεν ήταν δυνατόν από τις σημειακές μετρήσεις πεδίου. Τα αποτελέσματα της κατανομής της φασματικής ενέργειας για τις ιδιομορφές ταλάντωσης των πρώτων οχτώ ιδιοπεριόδων απεικονίζονται στην **Εικόνα 71**. Η ιδιομορφή της ιδιοπεριόδου των 489 s (512 s) που παρουσιάζει κόμβο στην είσοδο του λιμένα και μέγιστη

ανύψωση στο πλέον ανατολικό μέρος της ανατολικής λιμενολεκάνης, αντιστοιχεί στην μηδενική ιδιομορφή μιας μακριάς στενής λεκάνης με ανοιχτό άκρο, ή αλλιώς στην *Helmholtz* ιδιομορφή (*Rabinovich, 2010*); σε παρένθεση και πάλι δίνονται οι ιδιοπερίοδοι των μετρήσεων πεδίου.



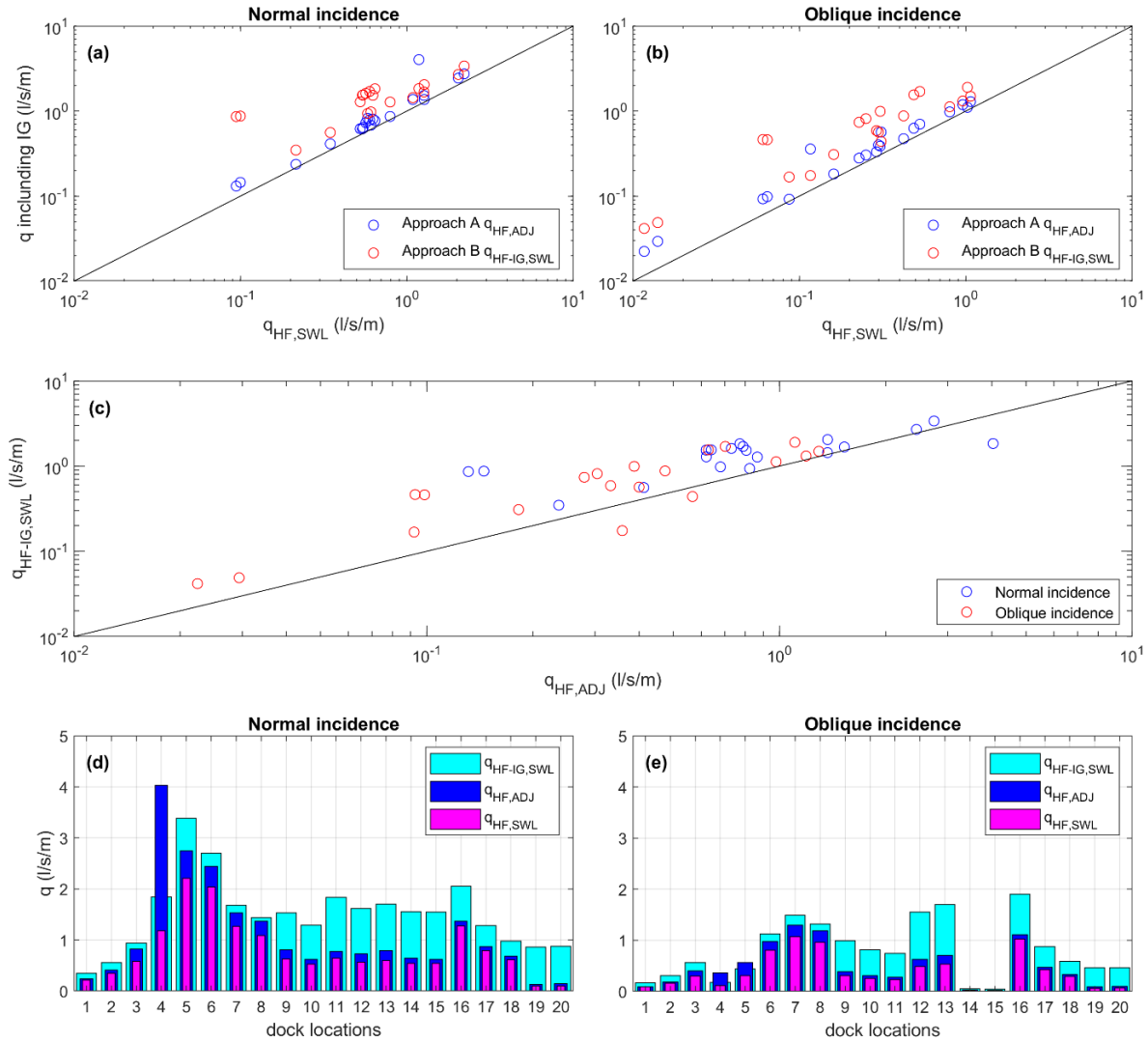
Εικόνα 71. Ιδιομορφές συντονισμού που αντιστοιχούν στις οχτώ πρώτες ιδιοπερίόδους που ταυτοποιήθηκαν για την λιμενολεκάνη μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα έχουν ομαλοποιηθεί από την μέγιστη φασματική ενέργεια για κάθε ιδιοπερίοδο ($Max(S)$) που έχει υπολογιστεί για όλη την λιμενολεκάνη. Η φασματική ενέργεια με τιμές δύο τάξεων μεγέθους μικρότερης της $Max(S)$ εμφανίζεται με άσπρο χρώμα. Οι τοποθεσίες των οργάνων μέτρησης A – D εμφανίζονται με πράσινα σημεία.

Η ιδιομορφή της ιδιοπεριόδου των 250s (240 s) η οποία παρουσιάζει αντικόμβους στα δύο άκρα της λιμενολεκάνης (νότιο και ανατολικό) και κόμβο στην μέση περίπου μεταξύ αυτών, αντιστοιχεί στην κύρια (*fundamental*) ιδιομορφή μιας μακράς και κλειστής λιμενολεκάνης (*Rabinovich, 2010*). Η κατανομή της φασματικής ενέργειας στην λιμενολεκάνη για αυτές τις δύο πρώτες ιδιομορφές είναι σε συμφωνία με την κατανομή της ενέργειας που μετρήθηκε στις τέσσερις τοποθεσίες για τις ιδιοπεριόδους των 512 s και 240 s (**Εικόνα 67**).

Οι ιδιοπερίοδοι των 125s (132s), 100 s (95 s), 71.2 s (73 – 76 s) ανταποκρίνονται στην δεύτερη, τρίτη και τέταρτη ιδιομορφή μιας μακράς και στενής κλειστής λεκάνης, παρουσιάζοντας δύο, τρεις και τέσσερις κόμβους αντίστοιχα. Οι ιδιομορφές των περιόδων 62.5 s (60 s) και 55.4 s (55 s) διαμορφώνονται σε δύο άξονες της λιμενολεκάνης με τις ταλαντώσεις να λαμβάνουν χώρα κατά μήκος και κατά πλάτος των λεκανών. Τέλος, η ιδιομορφή για την ιδιοπερίοδο των 50 s, η οποία φαίνεται να παρουσιάζει ανυψώσεις στις τοποθεσίες Β και C και κοιλία την τοποθεσία D, είναι χαρακτηριστική μόνο της δυτικής λιμενολεκάνης. Ανταποκρίνεται σε ταλάντωση μεταξύ της εισόδου και της προβλήτας απέναντι σε αυτήν στην οποία προσκρούουν οι εισερχόμενοι από την είσοδο κυματισμοί.

6.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΠΑΡΟΧΩΝ ΥΠΕΡΠΗΔΗΣΗΣ

Οι μέσες παροχές υπερπήδησης υπολογίστηκαν για κάθετη και λοξή πρόσπτωση των κυματισμών στις προβλήτες της δυτικής λιμενολεκάνης. Αυτό έγινε αφενός προκειμένου να γίνει σύγκριση μεταξύ των δύο συνθηκών και να εξεταστεί σε τι βαθμό επηρεάζει η γωνία πρόσπτωσης τα αποτελέσματα, αλλά κυρίως επειδή αποτελεί προϋπόθεση ο υπολογισμός της κάθετης πρόσπτωσης στον υπολογισμό των αποτελεσμάτων λοξής πρόσπτωσης. Οι περισσότερες τοποθεσίες χαρακτηρίζονται από ορμητικές συνθήκες πρόσπτωσης βάσει της παραμέτρου h^* . Παρόλα αυτά, χρησιμοποιώντας την προσέγγιση A, οι τοποθεσίες 19-20 καταλήγουν σε μη ορμητικές συνθήκες για κάθετη και λοξή πρόσπτωση των κυματισμών, λόγω αυξημένων τιμών της παραμέτρου h^* (βλ. **Εξ.5.1**). Επίσης, για λοξές συνθήκες πρόσπτωσης, και στις δύο προσεγγίσεις A και B, οι τοποθεσίες 4 -5 και 14 -15 καταλήγουν σε μη ορμητικές συνθήκες λόγω των μεγάλων γωνιών πρόσπτωσης ($\beta > 60^\circ$). Για μη ορμητικές συνθήκες, οι εξισώσεις υπολογισμού εκτίμησης της μέσης παροχής υπερπήδησης (5.2) και (5.5), δεν περιλαμβάνουν την επίδραση της φασματικής περιόδου.



Εικόνα 72. Αποτελέσματα εκτίμησης μέσων ρυθμών υπερπήδησης, q (l/s/m). Συσχέτιση εκτιμήσεων υπερπήδησης υπό την επίδραση της IG ενέργειας (για τις προσεγγίσεις A, $\bar{q}_{HF,ADJ}$ και B, $q_{HF-IG,SWL}$) σε σχέση με την απουσία αυτής, $q_{HF,SWL}$ για κάθετη πρόσπτωση (a) και λοξή πρόσπτωση (b). Συσχέτιση των εκτιμήσεων μεταξύ των δύο προσεγγίσεων A και B για κάθετη και λοξή πρόσπτωση (c). Εκτιμήσεις υπερπήδησης ανά τοποθεσία για κάθετη (d) και λοξή (e) πρόσπτωση.

Στην **Εικόνα 72** απεικονίζονται τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων για τις μέσες παροχές υπερπήδησης και για τις δύο προσεγγίσεις. Στα γραφήματα διασποράς (a) και (b) δίνεται μια γενική εικόνα συσχέτισης των εκτιμήσεων αναφοράς $q_{HF,SWL}$ (παροχές υπερπήδησης για των οποίων τις εκτιμήσεις χρησιμοποιήθηκαν φασματικές παράμετροι με $f > 0.04$ Hz και σταθερό ύψος στέψης $R_{c,SWL}$), με τις εκτιμήσεις που περιλαμβάνουν επίδραση της IG ενέργειας, $\bar{q}_{HF,ADJ}$ και $q_{HF-IG,SWL}$, για συνθήκες κάθετης και λοξής πρόσπτωσης. Οι εκτιμήσεις της προτεινόμενης προσέγγισης A, $\bar{q}_{HF,ADJ}$, οι οποίες περιλαμβάνουν την επίδραση των ταλαντώσεων συντονισμού η_{IG} , έχουν δώσει υψηλότερες τιμές παροχών υπερπήδησης σε σχέση με τις εκτιμήσεις αναφοράς $q_{HF,SWL}$, οι οποίες δεν συμπεριλαμβάνουν ενέργεια σε συχνότητες κάτω των 0.04Hz. Το ίδιο ισχύει και για τις εκτιμήσεις της προσέγγισης B, $q_{HF-IG,SWL}$ σε σχέση με τις εκτιμήσεις αναφοράς της προσέγγισης A. Οι αυξημένες εκτιμήσεις σε αυτή την περίπτωση ήταν αναμενόμενες. Και για τις δύο εκτιμήσεις ($q_{HF,SWL}$ και $q_{HF-IG,SWL}$) εφαρμόστηκαν απ'

ευθείας οι εξισώσεις EuroTop. Για τις εκτιμήσεις $q_{HF-IG,SWL}$ όμως, το ύψος H_{m0} και η περίοδος $T_{m-1,0}$ είχαν υψηλότερες τιμές αφού περιλάμβαναν ενέργεια από όλο το εύρος συχνοτήτων, ενώ για τις εκτιμήσεις $q_{HF,SWL}$ το ύψος H_{m0} και η περίοδος $T_{m-1,0}$ υπολογίστηκαν για συχνότητες μεγαλύτερες των 0.04 Hz. Υπενθυμίζεται ότι για τον υπολογισμό των εκτιμήσεων $\bar{q}_{HF,ADJ}$ στην προσέγγιση A, οι τιμές για H_{m0} και $T_{m-1,0}$ ήταν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στις εκτιμήσεις αναφοράς $q_{HF,SWL}$. Η IG ενέργεια συμπεριλήφθηκε στις εκτιμήσεις υπερπήδησης μέσω των ταλαντώσεων η_{IG} συχνότητας $f < 0.04$ Hz.

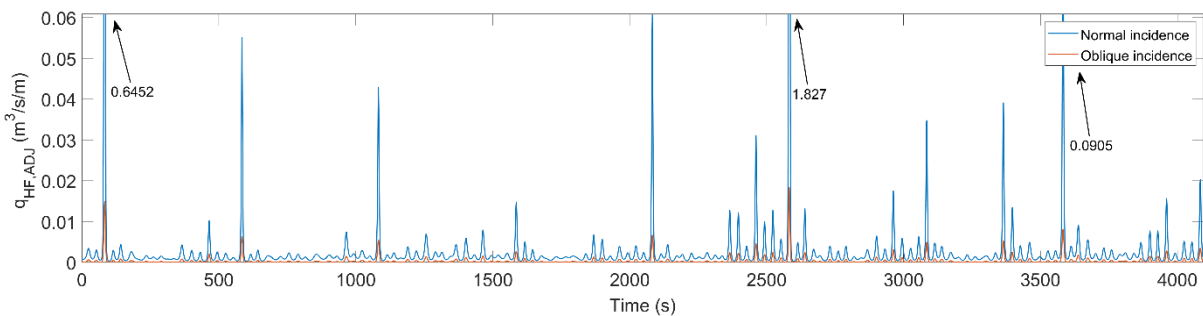
Στο γράφημα διασποράς (c) συσχετίζονται οι εκτιμήσεις υπερπήδησης των δύο προσεγγίσεων που συμπεριλαμβάνουν την IG ενέργεια για κάθετη και υπό γωνία πρόσπτωση. Στο πλείστο των περιπτώσεων οι εκτιμήσεις $q_{HF-IG,SWL}$ παρουσιάζουν μεγαλύτερες μέσες παροχές σε σχέση με τις $\bar{q}_{HF,ADJ}$. Μόνο σε τρεις περιπτώσεις, δύο για τις λοξής και μία για τις κάθετης πρόσπτωσης συνθήκες ισχύει το αντίθετο.

Στα γραφήματα (d) και (e) παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις παροχών σε σχέση με τις επιλεγόμενες τοποθεσίες. Οι εκτιμήσεις αναφοράς $q_{HF,SWL}$ στις συνθήκες κάθετης πρόσπτωσης ήταν μεγαλύτερες σε σχέση με της λοξής πρόσπτωσης για κάθε τοποθεσία. Ιδιαίτερως στις τοποθεσίες 14 και 15, οι εκτιμήσεις στις υπό γωνία συνθήκες, είχαν τις χαμηλότερες τιμές (σε σχέση με όλες τις τοποθεσίες) λόγω μέγιστης γωνίας και μη ορμητικών συνθηκών πρόσπτωσης. Άλλη μια ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προέκυψε για την τριάδα 5 (της οποίας τα κυματικά χαρακτηριστικά εφαρμόστηκαν για τις τοποθεσίες 14 και 15) από την ανάλυση των διευθυντικών αριθμητικών φασμάτων, ήταν ότι περισσότερη ενέργεια αντιστοιχούσε στις ανακλώμενες διευθύνσεις απ' ότι στις προσπίπτουσες προς την προβλήτα. Τα παραπάνω αποτελέσματα συμφωνούν με οπτικές παρατηρήσεις για καταιγίδες όμοιων χαρακτηριστικών με αυτής που εφαρμόστηκε στην αριθμητική προσομοίωση. Για τις τοποθεσίες ακριβώς απέναντι από την είσοδο (16-20), παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες προσπίπτουσες κυματικές παράμετροι της τριάδας 6, οι παροχές υπερπήδησης παρουσιάζονται μειούμενες από την τοποθεσία 16 προς στην τοποθεσία 20, κυρίως λόγω διαφορών στα αντίστοιχα βάθη στον πόδα της κατασκευής.

Στις συνθήκες κάθετης πρόσπτωσης, οι παροχές υπερπήδησης ποικίλαν διαφορετικά κατά μήκος της προβλήτας σε σχέση με τις λοξές συνθήκες, λόγω της απουσίας των γωνιών πρόσπτωσης στους υπολογισμούς. Οι εκτιμήσεις των παροχών για τις τοποθεσίες 9 – 15 έχουν παραπλήσιες τιμές λόγω ομοιοτήτων στα ύψη στέψης και τις κυματικές παραμέτρους πρόσπτωσης. Οι μεγαλύτερες διαφορές εντοπίζονται στις τοποθεσίες 4 – 6, κυρίως λόγω των σχετικά χαμηλών ύψων στέψης (η τοποθεσία 5 έχει το χαμηλότερο στα 0.42 m) και σε λιγότερο βαθμό λόγω των προσπιπτόντων κυματικών παραμέτρων· τα σημαντικά ύψη κύματος που αντιστοιχούσαν στις τριάδες 1 – 3 δεν ήταν τα μεγαλύτερα. Στις ίδιες τοποθεσίες οι μεγάλες

γωνίες πρόσπτωσης και οι μη ορμητικές συνθήκες μείωσαν αισθητά τις εκτιμήσεις των παροχών υπερπήδησης για τις λοξές συνθήκες, αποτέλεσμα που συνάδει με οπτικές παρατηρήσεις για τον τύπο καταιγίδας που προσομοιώθηκε (όπως και στις τοποθεσίες 14 -15). Κατά τη διάρκεια μεγαλύτερων καταιγίδων ($H_s > 4.5\text{ m}$), στις τοποθεσίες 4 – 6 παρατηρούνται οι μεγαλύτερες παροχές υπερπήδησης κατά μήκος της προβλήτας με τη μορφή υπερχειλίσσης, γεγονός που συμφωνεί με τις προβλέψεις των εξισώσεων για κάθετη πρόσπτωση.

Συνεχίζοντας με την προσέγγιση A, η επίδραση του συντονισμού λιμένα προστίθεται στις εξισώσεις μεταβάλλοντας το ύψος στέψης χρησιμοποιώντας τις IG χρονοσειρές μπροστά από κάθε επιλεγμένη τοποθεσία. Οι εκτιμήσεις $\bar{q}_{HF,ADJ}$ είναι μεγαλύτερες των $q_{HF,SWL}$ σε όλες τις τοποθεσίες. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να ερμηνευθεί από την μη γραμμική συμπεριφορά των εξισώσεων παροχής στις αλλαγές του ύψους στέψης, δηλ αυξάνοντας και μειώνοντας το ύψος στέψης μέσω της χρονοσειράς δεν οδηγεί σε ανάλογες αλλαγές στις εκτιμήσεις των παροχών υπερπήδησης. Αυτή η μη γραμμική συμπεριφορά είναι πιο εμφανής στις συνθήκες κάθετης πρόσπτωσης στις τοποθεσίες 4 – 6, οι οποίες έχουν τα χαμηλότερα ύψη στέψης. Σε αυτές τις τοποθεσίες, μικρές αλλαγές του R_c , μέσω των μακρών ταλαντώσεων, οδηγούν σε δυσανάλογες παροχές υπερπήδησης σε σχέση με τις τοποθεσίες υψηλότερων R_c . Η προσωρινή υπέρθεση συγκεκριμένων ταλαντώσεων, οδηγεί σε σημαντική μείωση του R_c , με αποτέλεσμα τις σποραδικές υπερπήδησεις αυξημένων όγκων νερού οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά την μέση παροχή υπερπήδησης· η επίδραση αυτή είναι εμφανέστερη στην εκτίμηση της τοποθεσίας 4 για κάθετη πρόσπτωση (Εικόνα 73). Συνεπώς, μέρη της προβλήτας με χαμηλότερα ύψη στέψης είναι αυτά που επηρεάζονται περισσότερο λόγω του συντονισμού. Διαφορές μεταξύ των εκτιμήσεων $\bar{q}_{HF,ADJ}$ και $q_{HF,SWL}$ για λοξή πρόσπτωση είναι λιγότερο εμφανείς (Εικόνα 72[e]), καθώς οι τοποθεσίες με χαμηλά R_c εκτίθενται σε χαμηλότερη υπερπήδηση λόγω των γωνιών πρόσπτωσης για τις συγκεκριμένες συνθήκες προσομοίωσης ($\beta > 20^\circ$).



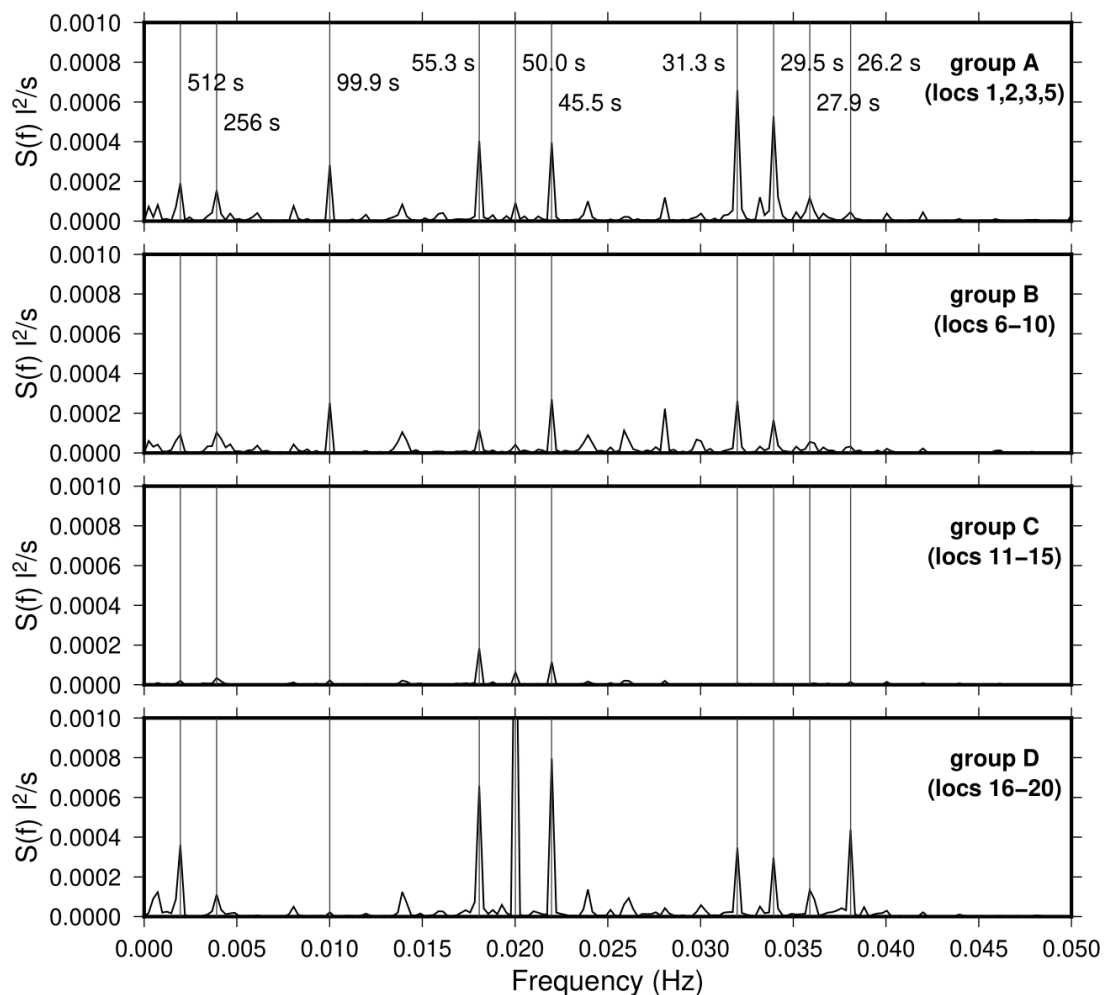
Εικόνα 73. Χρονοσειρά εκτιμήσεων παροχών υπερπήδησης $q_{HF,ADJ}$ για την τοποθεσία 4. Με μπλέ χρώμα απεικονίζονται οι παροχές για κάθετη πρόσπτωση και με πορτοκαλί για λοξή πρόσπτωση.

Συγκρίνοντας τις παροχές $q_{HF-IG,SWL}$ που προέκυψαν από την συμβατική εφαρμογή των εξισώσεων (προσέγγιση B) με τις παροχές $\bar{q}_{HF,ADJ}$ της προσέγγισης A, οι πρώτες είναι κατά μέσο όρο 2 φορές υψηλότερες από τις δεύτερες για τις συνθήκες κάθετης αλλά και λοξής

πρόσπτωσης. Συνεπώς στην παρούσα μελέτη περίπτωσης, λαμβάνοντας υπόψη την IG κυματική ενέργεια απευθείας μέσω των φασματικών παραμέτρων H_{m0} και $T_{m-1,0}$, έχει σε γενικές γραμμές ως αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές παροχών υπερπήδησης σε σύγκριση με την προσέγγιση Α. Για την ακρίβεια, ο λόγος $q_{HF,SWL} / q_{HF-IG,SWL}$ είναι κατά μέσο όρο 0.5 και 0.46 για κάθετη και λοξή πρόσπτωση αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχες τιμές του λόγου $q_{HF,SWL} / \bar{q}_{HF,ADJ}$ είναι 0.79 και 0.74. Παρόλα αυτά, η προσέγγιση Α δίνει υψηλότερες τιμές στις τοποθεσίες με πολύ χαμηλά R_c ; Οι εκτιμήσεις $\bar{q}_{HF,ADJ}$ στις τοποθεσίες 4 - 5 είναι μεγαλύτερες από τις $q_{HF-IG,SWL}$ για λοξή πρόσπτωση αλλά μόνο στην τοποθεσία 4 για κάθετη πρόσπτωση. Μια ακόμα παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι οι εκτιμήσεις των τοποθεσιών 19 – 20 διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων. Αυτό οφείλεται εν μέρει στην εφαρμογή εξισώσεων μη ορμητικών συνθηκών για την προσέγγιση Α, οι οποίες δεν περιλαμβάνουν την φασματική περίοδο για την εκτίμηση των παροχών υπερπήδησης.

Υπενθυμίζεται ότι στην προσέγγιση Α οι εκτιμήσεις $\bar{q}_{HF,ADJ}$ προέκυψαν από τον υπολογισμό της μέσης τιμής των $q_{HF,ADJ}$ οι οποίες απαρτίζουν μια χρονοσειρά παροχών υπερπήδησης βάση της η_{IG} . Τα χαρακτηριστικά αυτών των χρονοσειρών εξετάζονται φασματικά για τα αποτελεσμάτων της κάθετης πρόσπτωσης. Αρχικά υπολογίστηκαν τα φάσματα για κάθε χρονοσειρά υπερπήδησης μέσω FFT. Έπειτα από επισκόπηση των αποτελεσμάτων, εντοπίστηκαν οι ομοιότητες των φασμάτων σε συγκεκριμένες συχνότητες, κι έπειτα αυτά ομαδοποιήθηκαν σε τέσσερις ομάδες όπως φαίνεται στην **Εικόνα 74**. Όπως αναμενόταν τα φάσματα των $q_{HF,ADJ}$ για όλες τις ομάδες, παρουσιάζουν ευδιάκριτες κορυφές στις ιδιοπεριόδους που ταυτοποιήθηκαν μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης στην ενότητα **6.3.1**.

Οι τοποθεσίες της ομάδας Α βρίσκονται κατά μήκος της δυτικής προβλήτας, η οποία σύμφωνα με τα αποτελέσματα της **Εικόνα 71** δεν αποτελεί σημαντικό αντικόμβο για καμία από τις πρώτες οχτώ ιδιομορφές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παροχή υπερπήδησης να είναι ευρέως κατανεμημένη σε διάφορα εύρη συχνοτήτων. Η περίοδος με την μεγαλύτερη συμβολή στην παροχή υπερπήδησης είναι αυτή των 31.3 s η οποία αντιστοιχεί σε ιδιομορφή που δεν παρουσιάζεται στην **Εικόνα 71**. Ακολουθούν οι ιδιοπερίοδοι των 45.5 s και 55.3 s, με την δεύτερη να αποτελεί αντικόμβο κατά μήκος του κέντρου της δυτικής λιμενολεκάνης. Μικρότερες αλλά διακριτές είναι οι συνεισφορές των ιδιομορφών Helmholtz, της κύριας και της τρίτης. Η ομάδα Β παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά με την ομάδα Α, μολοντί οι κορυφές στις σχετικές ιδιοσυχνότητες είναι μικρότερου μεγέθους.



Εικόνα 74. Φάσματα χρονοσειρών παροχών υπερπήδησης $q_{HF,ADJ}$ για την προσέγγιση Α για κάθετες συνθήκες πρόσπτωσης. Οι ομάδες αποτελούν μέσους όρους των φασμάτων τοποθεσιών παρόμοιας φασματικής κατανομής (οι τοποθεσίες που αναφέρονται φαίνονται στην **Εικόνα 27**).

Στην ομάδα C οι παροχές υπερπήδησης είναι χαμηλότερες σε σχέση με τις προηγούμενες ομάδες. Από την άλλη οι τοποθεσίες που την απαρτίζουν βρίσκονται σε σημείο αντικόμβου αρκετών ιδιομορφών όπως φαίνεται στην **Εικόνα 71**. Η πλέον ενεργητική συνεισφορά στην παροχή υπερπήδησης αντιστοιχεί στην περίοδο των 55.3 s η οποία αφορά μόνο την δυτική λιμενολεκάνη. Ευδιάκριτες αλλά μικρότερες συνεισφορές προκύπτουν στις περιόδους των 50.0 s και 45.5 s. Στην ομάδα D αντιστοιχούν οι τοποθεσίες που αντικρίζουν την είσοδο του λιμένα. Η συγκεκριμένη περιοχή της λιμενολεκάνης επηρεάζεται κυρίως από ιδιοπεριόδους γύρω στα 50 s οι οποίες δημιουργούν ενεργητικές ανυψώσεις της στάθμης κατά μήκος της προβλήτας των εν λόγω τοποθεσιών. Ως αποτέλεσμα, οι παροχές υπερπήδησης εμφανίζουν διακριτές κορυφές γύρω από τις ιδιοπεριόδους των 45.5, 50 και 55.3 s. Επιπλέον, παρατηρούνται συνεισφορές από ιδιομορφές ιδιοπεριόδων κάτω των 35 s.

7 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το κυματικό καθεστώς στον κόλπο Χανίων αποτυπώθηκε για πρώτη φορά σε βάθος χρόνου, σε τρεις διαφορετικές τοποθεσίες (ανοιχτά των ακτών της Αγίας Κυριακής, της περιοχής Γεράνι και του Ενετικού λιμένα), με την χρήση του ακουστικού καταγραφέα του ωκεανογραφικού οργάνου AWAC. Τα βάθη πόντισης ανά τοποθεσία ήταν μεταξύ 20 – 23m. Η συνολική διάρκεια παρακολούθησης του κυματικού καθεστώτος (με ενδιαμέσες παύσεις) ήταν περίπου 10 χρόνια (15/12/10 – 20/08/20). Το πλάνο δειγματοληψίας καταγραφής της ανύψωσης στάθμης ορίστηκε ανά 2 Hz (0.5 s) για 20 min κάθε μία ώρα. Σε ορισμένες ποντίσεις το πλάνο ήταν διαφορετικό και οι χρονοσειρές προσαρμόστηκαν στο προαναφερθέν πλάνο εκτός της πρώτης δειγματοληψίας στην Αγία Κυριακή που η συνολική διάρκεια των χρονοσειρών ήταν 1024 s. Η τροφοδοσία των οργάνων γινόταν μέσω επαναφορτιζόμενων μπαταριών μακράς εκφόρτισης, εσώκλειστων σε ειδικά κουτιά ώστε να ανταπεξέλθουν στις δυσμενείς συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Στις χρονοσειρές που ανακτήθηκαν από τις καταγραφές έγινε πρώτα διαλογή και απόρριψη των εσφαλμένων. Στην συνέχεια αυτές επεξεργάστηκαν στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων μέσω των μεθόδων της προς τα κάτω διαβάσεων (zero – down crossing) και της Fast Fourier Transform αντίστοιχα.

Κύριο συμπέρασμα της μακροχρόνιας καταγραφής είναι οι ήπιες γενικότερα κυματικές συνθήκες που χαρακτηρίζουν την περιοχή. Οι μέσες τιμές για το μέσο ύψος κύματος (H_{mean}), ανά μήνα, κυμαίνονται μεταξύ 0.26 – 0.49 m ενώ οι αντίστοιχες του σημαντικού ύψους κύματος ($H_{1/3}$) μεταξύ 0.41 – 0.77 m. Τα εύρη δε των μέσων περιγραφικών περιόδων T_{mean} και $T_{1/3}$ ανά μήνα, είναι 3.11 – 3.85 s και 3.82 – 4.84 s αντίστοιχα (Εικόνα 38). Οι περισσότεροι ενεργοί κυματικά μήνες είναι οι χειμερινοί (Δεκέμβριος – Φεβρουάριος) ενώ οι μήνες Μάιος και Ιούνιος παρουσιάζουν τις πλέον ήρεμες κυματικές συνθήκες. Παρ'όλη την ήπια εικόνα που παρουσιάζουν οι κυματικές συνθήκες στο σύνολό τους, έχουν καταγραφεί έντονες και ισχυρές καταιγίδες ορισμένες εκ των οποίων ήταν υπεύθυνες για έντονα φαινόμενα διάβρωσης στο παράκτιο μέτωπο του κόλπου Χανίων.

Τέτοιες συνθήκες καταγράφηκαν οχτώ συνολικά φορές και μάλιστα στο διάστημα των τελευταίων πέντε ετών (Πίνακας 10). Τα γεγονότα αυτά στο ζενίθ τους είχαν σημαντικά ύψη κύματος ($H_{1/3}$) μεγαλύτερα των 4.7 m, σημαντικές περιόδους ($T_{1/3}$) μεταξύ 9 και 10 s ενώ τα μέγιστα ύψη κύματος (H_{max}) ξεπερνούσαν τα 7 m. Η πλέον ισχυρή καταιγίδα που καταγράφηκε ήταν στις 06/01/2020 και η οποία έδωσε μέγιστες καταγεγραμμένες συνθήκες $\{H_{1/3}=6m / T_{1/3} = 10s / H_{max} = 9.9m\}$. Το μέγιστο ύψος κύματος 9.9 m της συγκεκριμένης καταγραφής είναι και το υψηλότερο που καταγράφηκε καθ'όλη την διάρκεια της παρακολούθησης. Σημειώνεται υπολογισμοί κύματος σχεδιασμού στον κόλπο Χανίων με τη χρήση δεδομένων hindcast για την

δεκαετία 1995 – 2004, έχουν δώσει περιόδους επαναφοράς 1:30 και 1:90 έτη για σημαντικά ύψη κύματος 5m και 5.5 m αντίστοιχα ([Συνολάκης et al., 2011](#)).

Λεπτομερέστερη στατιστική ανάλυση έδωσε εικόνα για την κατανομή των κυματισμών και τις ιδιότητες των φασματικών ενεργειακών πυκνοτήτων κάθε καταγραφής. Στην συγκεκριμένη ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι καταγραφές ανοιχτά του Ενετικού λιμένα ως το μεγαλύτερο σετ δεδομένων εκ των τριών τοποθεσιών. Οι κυματισμοί στα βάθη τα οποία έγιναν οι καταγραφές ανοιχτά του Ενετικού λιμένα, χαρακτηρίζονται ως κυματισμοί βαθέων υδάτων για τις ήπιες κυματικές συνθήκες έως και ενδιάμεσων υδάτων στις εντονότερες συνθήκες και τις καταιγίδες. Η κατανομή πιθανοτήτων Rayleigh περιγράφει σε πάρα πολύ ικανοποιητικό βαθμό την κατανομή των καταγεγραμμένων κυματισμών (**Εικόνα 39**), ενώ και η συσχέτιση των μέσων περιγραφικών παραμέτρων των μετρήσεων πεδίου συνάδει με τις θεωρητικές συσχετίσεις βάσει Rayleigh (**Πίνακας 18, Πίνακας 19**). Συγκρίνοντας την μετρούμενη τιμή μέγιστου ύψους κύματος και την εκτίμηση της πιο πιθανής τιμής του (**Εξ.1.18**), παρατηρήθηκε ότι οι εκτιμήσεις αποκλίνουν από την καμπύλη εφαρμογής των μετρήσεων πεδίου για $H_{1/3} > 2.5 \text{ m}$ (**Εικόνα 43[a]**). Κυματικές συνθήκες μεγαλύτερες αυτής της τιμής αρχίζουν να έχουν καταγεγραμμένους μεμονωμένους κυματισμούς λιγότερους από 200 (**Εικόνα 43[b]**), για την συνολική διάρκεια καταγραφής 1200 s που εφαρμόστηκε σε αυτή την έρευνα. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με την έρευνα των ([Fröhle & Kohlhasse, 2001](#)), οι οποίοι διαπίστωσαν ότι καταγραφές τουλάχιστον 20 με 30mins με συνολικό αριθμό κυματισμών 200-400 είναι απαραίτητες προκειμένου να περιγραφεί με ακρίβεια η φυσική μεταβλητότητα και η κατανομή των θαλάσσιων κυματισμών.

Συνεπώς για την περιοχή του κόλπου Χανίων όπου στις ισχυρές καταιγίδες οι κυματισμοί εμφανίζουν μέση περίοδο κυματισμών στα 8.5s (**Εικόνα 43 [b]**), προτείνεται οι καταγραφές να είναι συνολικής διάρκειας περίπου 34mins (2048s), όπου αναμένεται να καταγράφονται περίπου 240 κυματισμοί ανά χρονοσειρά. Στην παρούσα έρευνα επιλέχτηκε η διάρκεια των 1200s λόγω της ανάγκης εξοικονόμησης ενέργειας των μπαταριών που παρείχαν την τροφοδοσία του οργάνου.

Η τάση εμφάνισης κυματοομάδων σε μια χρονοσειρά ποσοτικοποιήθηκε μέσω του συντελεστή συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών, r_{HH} . Διαπιστώθηκε ότι στην περιοχή μελέτης (ανοιχτά του Ενετικού λιμένα) περισσότερη ομαδικότητα αναπτύσσουν οι κυματισμοί γύρω από την Β διεύθυνση (**Πίνακας 21**) και ιδιαίτερα αυτοί των κυματικών συνθηκών με $0.5 \text{ m} < H_{1/3} < 1.5\text{-}2\text{m}$ (**Εικόνα 49[d]**). Κύριος λόγος είναι το αυξημένο ανάπτυγμα πελάγους σε αυτές τις διευθύνσεις το οποίο ευνοεί και την δημιουργία ρεστιών. Αυξημένες τιμές του συντελεστή σε ρεστίες διαπιστώθηκαν και σε έρευνα των ([Thomas et al., 1986](#)). Σε ισχυρές κυματικές συνθήκες οι οποίες αναπτύσσονται από ισχυρούς ανέμους έως και εντός του κόλπου,

ο συντελεστής συσχέτισης παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές (Εικόνα 49[d]). Επίσης διαπιστώθηκε αύξηση της τιμής του συντελεστή κατά την διάρκεια ανάπτυξης κυματικών γεγονότων και ελάττωση του κατά την παρέλευσή τους (Εικόνα 55), υποδυκνύοντας ότι ο σχηματισμός κυματοομάδων είναι εντονότερος κατά την ανάπτυξη των κυματικών γεγονότων σε σχέση με την παρέλευσή τους. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σύμφωνα με άλλες έρευνες μετρήσεων πεδίου (Rye, 1974; Thompson & Seelig, 1984; Vizcaino, 2011).

Η περιγραφή της κατανομής των φασμάτων ενεργειακής πυκνότητας έγινε μέσω του υπολογισμού των παραμέτρων ν , ε , K_a και Q_p , οι οποίες χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν το εύρος πλάτους και την κορυφή του φάσματος. Επιπλέον εξετάστηκε η συσχέτισή τους με την κατανομή των μεμονωμένων κυματισμών χρησιμοποιώντας τον λόγο $H_{1/3}/\eta_{rms}$ ως δείκτη αναφοράς απόκλισης των δεδομένων από την κατανομή Rayleigh, ενώ εξετάστηκε και η συχέτισή τους με την εμφάνιση ομαδικότητας μέσω του συντελεστή rHH . Διαπιστώθηκε ότι η K_a είναι αυτή που εκφράζει καλύτερα τις ιδιότητες του ενεργειακού φάσματος μιας χρονοσειράς θαλάσσιων κυματισμών. Παρουσιάζει σαφή συσχέτιση με τον λόγο $H_{1/3}/\eta_{rms}$, δείχνοντας ότι όσο το πλάτος του ενεργειακού φάσματος μειώνεται ($K_a \rightarrow 1$) (Εικόνα 53[d]), τόσο η κατανομή των μεμονωμένων κυματισμών της καταγραφής προσεγγίζει την θεωρητική κατανομή Rayleigh ($H_{1/3}/\eta_{rms} \approx 4$). Επίσης όσο $K_a \rightarrow 1$ τόσο ο συντελεστής συσχέτισης διαδοχικών κυματισμών των αντίστοιχων καταγραφών αυξάνεται ($rHH \rightarrow 1$), δηλαδή παρουσιάζεται μεγαλύτερη ομαδικότητα στους κυματισμούς της καταγραφής (Εικόνα 52[a]). Η έντονη συσχέτιση της K_a με την rHH είναι ο λόγος που ενίοτε η K_a χρησιμοποιείται και για τον εντοπισμό της ομαδικότητας σε μια χρονοσειρά.

Οι υπόλοιπες φασματικές παράμετροι περιγραφής του πλάτους (Q_p , ν και ε) δεν μπορούν να εκφράσουν την ομαδικότητα των κυματισμών και ιδιαίτερα οι ν και ε αδυνατούν πλήρως. Επιπλέον, δεν μπορούν να εκφράσουν την κατανομή των μεμονωμένων κυματισμών, με εξαίρεση την ν η οποία παρουσιάζει μια ελαφρά αρνητική συσχέτιση $H_{1/3}/\eta_{rms}$, αλλά υστερεί σε σχέση με την K_a , ενώ συγχρόνως παραμένει σχετικά σταθερή στο εύρος των κυματικών με $H_{1/3} > 2.5m$. Οι συσχετίσεις που παρουσιάστηκαν μεταξύ K_a , rHH και Q_p συμβαδίζουν με αποτελέσματα μετρήσεων πεδίου από διάφορες άλλες τοποθεσίες (Vizcaino, 2011). Τα παραπάνω συμπεράσματα συμφωνούν με τις διαπιστώσεις προηγούμενων ερευνών (Battjes, J. A., & Van Vledder, 1992; Goda & Kudaka, 2007; Medina & Hudspeth, 1990; van Vledeer, 1992).

Οι κυματικές συνθήκες εντός του Ενετικού λιμένα καταγράφηκαν σε τέσσερις διαφορετικές τοποθεσίες κατά την διάρκεια έξι καταιγίδων διαφορετικής έντασης και διάρκειας. Τα αποτελέσματα των καταγραφών έδωσαν σαφή εικόνα της απόκρισης της λιμενολεκάνης, αποτυπώνοντας το έντονο πρόβλημα έλλειψης προστασίας του λιμένα, ενώ

ταυτοποιήθηκαν και οι περίοδοι συντονισμού της λεκάνης. Η ταυτοποίηση έγινε μέσω του υπολογισμού των μέσων ενεργειακών φασμάτων επιλεγμένων χρονοσειρών κατά τη διάρκεια των καταιγίδων. Αυτα χαρακτηρίζονται από διακριτές κορυφές και κοιλίες σε συγκεκριμένα εύρη συχνοτήτων (**Εικόνα 67**).

Οι συχνότητες που αντιστοιχούν σε κάθε κορύφωση αντιπροσωπεύουν τις ιδιοσυχνότητες στις οποίες η φασματική ενέργεια ενισχύεται λόγω συντονισμού. Οι συχνότητες των ενεργειακών κορυφώσεων που εντοπίστηκαν στα μέσα φάσματα κάθε τοποθεσίας είναι σε γενικές γραμμές σε συμφωνία μεταξύ τους (**Εικόνα 66**). Μικρές αποκλίσεις διαπιστώθηκαν για ορισμένες εξ'αυτών. Για παράδειγμα, η συχνότητα που αντιστοιχεί στην κορύφωση της βασικής ιδιομορφής (fundamental mode) στα 240s είναι κοινή μεταξύ των φασμάτων και στις τέσσερις τοποθεσίες, αλλά η συχνότητα που αντιστοιχεί στην μηδενική ιδιομορφή (Helmholtz mode) δεν είναι κοινή μεταξύ των τοποθεσιών. Αυτή η απόκλιση στις περιόδους συντονισμού μπορεί να αποδοθεί στη σχετικά χαμηλή ανάλυση του φάσματος στο εύρος που βρίσκεται η ιδιοσυχνότητα Helmholtz, και πιθανώς σε διακυμάνσεις της μέσης θαλάσσιας στάθμης μεταξύ των καταιγίδων και κατά την διάρκειά τους, αφού κάθε μέσο φάσμα ανά τοποθεσία προέκυψε από διαφορετικά γεγονότα διαφορετικής έντασης μεταξύ τους. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες κατά τη διάρκεια κάθε καταιγίδας δεν είναι απαραίτητα ίδιες. Πέραν της κυματογενούς ανύψωσης (wave setup) η οποία εξαρτάται από την ένταση της καταιγίδας, η θαλάσσια στάθμη μεταβάλλεται λόγω παλιρροιακών μεταβολών, μεταβολών λόγω ατμοσφαιρικής πίεσης και της μετεωρολογικής παλίρροιας (storm surge). Οι διακυμάνσεις αυτές της στάθμης επηρεάζουν απ'ευθείας τις συχνότητες συντονισμού οι οποίες είναι συνάρτηση του βάθους (**Εξ.1.35**).

Για περαιτέρω εξέταση των ιδιοσυχνοτήτων αλλά και των ιδιομορφών της λιμενολεκάνης εφαρμόστηκε το αριθμητικό μοντέλο COULWAVE ([P. Lynett, 2002](#)) τύπου εξισώσεων Boussinesq. Οι οριακές συνθήκες εισάχθηκαν μέσω ιδεατού JONSWAP φάσματος το οποίο αντιπροσώπευε τυπικές κυματικές συνθήκες έντονης καταιγίδας για την περιοχή. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της λιμενολεκάνης και η βυθομετρία που εισάχθηκαν στο μοντέλο αποτελούσαν προϊόν λεπτομερούς τοπογράφησης και βυθομέτρησης της ευρύτερης περιοχής. Το φάσμα εισαγωγής περιείχε ενέργεια σε περιορισμένο εύρος συχνοτήτων μεταξύ 0.08 – 0.22 Hz με σταθερό βήμα df . Η ενέργεια στις υπερβαρυτικές συχνότητες ($f < 0.04 \text{ Hz}$) δημιουργήθηκε από τις μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις των εισαγόμενων συνιστωσών κατά την διεργασία της θραύσης, τις οποίες μπορεί και προσομοιώνει το μοντέλο σε πάρα πολύ ικανοποιητικό βαθμό (**Εικόνα 70[a]**).

Η μέση φασματική ενέργεια εντός της λιμενολεκάνης προέκυψε από τον χωρικό μέσο όρο όλων των φασμάτων των αριθμητικών χρονοσειρών που αποθηκεύτηκαν εντός της

λιμενολεκάνης. Στο μέσο αριθμητικό φάσμα εμφανίζεται ενέργεια στο υπερβαρυτικό εύρος σε διακριτές συχνότητες ως αποτέλεσμα του συντονισμού του λιμένα (**Εικόνα 70[b]**). Λόγω της χρήσης όμως σταθερού βήματος df στις εισαγόμενες οριακές συνθήκες, παρατηρήθηκε ότι οι ενεργειακές κορυφώσεις βρίσκονταν σε συχνότητες πολλαπλάσιες του df και όχι απαραίτητα στις πραγματικές συχνότητες συντονισμού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η λιμενολεκάνη να συντονιστεί (αριθμητικά) σε συχνότητες παραπλήσιες των μετρήσεων πεδίου στο υψηλότερο εύρος συχνοτήτων της υπερβαρυτικής ενέργειας ($0.004\text{ Hz} < f < 0.04\text{ Hz}$). Ο περιορισμός αυτός δεν επέτρεψε την άμεση σύγκριση των ενεργειών των ιδιοσυχνοτήτων. Ωστόσο, είναι ευδιάκριτη η αυξημένη ενεργητική συμπεριφορά της ιδιοσυχνότητας Helmholtz ενώ επίσης η ιδιοπερίοδος των 50 s που αφορά κυρίως την δυτική λιμενολεκάνη έχει συγκρίσιμη ενέργεια με της Helmholtz που αφορά το σύνολο της επιφάνειας του λιμένα (**Εικόνα 70[b]**).

Παρ'όλο τον περιορισμό που αναφέρθηκε, οι ιδιοσυχνότητες που υπολογίστηκαν από τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούν σε αρκετά καλό βαθμό με τις ιδιοσυχνότητες που εντοπίστηκαν στις μετρήσεις πεδίου. Δεν επιχειρήθηκε ποσοτική σύγκριση της ενέργειας των αριθμητικών ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιοσυχνοτήτων των μέσων φασμάτων των μετρήσεων, αφού τα τελευταία είναι αποτέλεσμα διαφορετικών κυματικών γεγονότων για κάθε τοποθεσία (διαφορετικής έντασης και διάρκειας). Η απεικόνιση της χωρικής κατανομής της φασματικής ενέργειας των αριθμητικών αποτελεσμάτων σε όλη την λιμενολεκάνη, προσέφερε μια γενική εικόνα των ιδιομορφών που αντιστοιχούν σε κάθε ιδιοσυχνότητα. Αναγνωρίστηκαν έτσι η μηδενική Helmholtz ιδιομορφή, η βασική ιδιομορφή και ιδιομορφές υψηλότερων συχνοτήτων στο υπερβαρυτικό φάσμα (**Εικόνα 71**). Η κατανομή της ενέργειας που παρατηρείται σε κάθε ιδιομορφή, συμπίπτει με την κατανομή της φασματικής ενέργειας των ιδιοσυχνοτήτων των μέσων φασμάτων πεδίου ανά τοποθεσία.

Για την συγκεκριμένη περίπτωση μελέτης, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης από το COULWAVE με αποτελέσματα προσομοίωσης του αριθμητικού μοντέλου TUCWave ([Kazolea et al., 2012](#); [Kazolea et al., 2015](#)) το οποίο αναπτύσσεται από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του ΠΚ. Ο κώδικας TUCWave επιλύει 2D ελαφρώς μη γραμμικές και ελαφρώς διασπειρόμενες Boussinesq τύπου εξισώσεις αναπτύσσοντας μια υψηλής τάξης ακρίβειας μέθοδο πεπερασμένων όγκων εφαρμόσιμη σε μη δομημένα υπολογιστικά πλέγματα ([Καζολέα, 2013](#)). Τα δύο μοντέλα έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά την διάδοση των κυματισμών από την είσοδο εντός της δυτικής λιμενολεκάνης, αλλά είχαν διαφορές όσον αφορά την κατανομή της ενεργειακής πυκνότητας στο εύρος των συχνοτήτων. Ιδιαίτερα στο υπερβαρυτικό εύρος το TUCWave δεν μπόρεσε να αναπαράγει σωστά τις χαμηλές συχνότητες και συνεπώς να εντοπίσει όλες τις ιδιοσυχνότητες της λιμενολεκάνης, αποτέλεσμα όμως

αναμενόμενο αφού οι συγκεκριμένες συχνότητες είναι εκτός του εύρους των εξισώσεων που μοντελοποιεί (*Kazolea et al., 2015*).

Οι αριθμητικές χρονοσειρές της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με τις εμπειρικές εξισώσεις EurOtop για την εκτίμηση των παροχών υπερπήδησης κατά μήκος της προβλήτας της δυτικής λιμενολεκάνης. Αυτό έγινε μέσω δύο διαφορετικών προσεγγίσεων: Η Προσέγγιση Β απέδωσε τις εκτιμήσεις παροχής $q_{HF-IG,SWL}$ οι οποίες προέκυψαν από την συμβατική εφαρμογή των εξισώσεων, και η πρωτότυπη Προσέγγιση Α απέδωσε τις εκτιμήσεις $q_{HF,SWL}$ και $\bar{q}_{HF,ADJ}$ οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για να ξεχωρίσουν την συνεισφορά του συντονισμού του λιμένα στην κυματική υπερπήδηση.

Συγκρίνοντας τις εκτιμήσεις $q_{HF,SWL}$ και $q_{HF-IG,SWL}$ εξετάστηκε η σημαντικότητα της IG ενέργειας στην υπερπήδηση των κυματισμών κατά μήκος της προβλήτας. Μη συμπεριλαμβανομένων των σημείων 19 και 20, ο λόγος $q_{HF,SWL} / q_{HF-IG,SWL}$ είχε τιμές έως ~ 2.9 και ~ 3.6 για κάθετη και λοξή πρόσπτωση αντίστοιχα (**Εικόνα 72[d][e]**). Η συνεισφορά της IG ενέργειας είναι πιο έντονη στις τοποθεσίες κοντά στον νότιο αντικόμβο - τοποθεσίες 9 – 15 - ο οποίος είναι κοινός για πολλές ιδιομορφές συντονισμού (**Εικόνα 71**). Αντιθέτως, για κάθετη πρόσπτωση, οι χαμηλότερες τιμές του λόγου $q_{HF,SWL} / q_{HF-IG,SWL}$ παρουσιάζονται στις τοποθεσίες 1 – 3, λόγω της χαμηλότερης IG ενέργειας σε σχέση με την ολική, και στις τοποθεσίες 16 – 18 λόγω των σχετικά υψηλών περιθωρίων στέψης. Αυτές οι παρατηρήσεις συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι η συνεισφορά της IG ενέργειας στην κυματική υπερπήδηση είναι υψηλότερη όταν ο λόγος IG/ολικής ενέργειας είναι ο υψηλότερος και το περιθώριο στέψης είναι το χαμηλότερο.

Υπολογίζοντας τις μέσες τιμές εκτίμησης παροχών $\bar{q}_{HF,ADJ}$ και συγκρίνοντάς τις με τις εκτιμήσεις $q_{HF,SWL}$ προσεγγίστηκε η συνολική συνεισφορά του συντονισμού στην κυματική υπερπήδηση. Οι εκτιμήσεις $\bar{q}_{HF,ADJ}$ επηρεάζονται από την μη γραμμική συμπεριφορά των εξισώσεων εκτίμησης στις αλλαγές του περιθωρίου στέψης, και ο λόγος $\bar{q}_{HF,ADJ} / q_{HF,SWL}$ βρέθηκε υψηλότερος στις τοποθεσίες αξιολόγησης με το χαμηλότερο περιθώριο στέψης. Σε σύγκριση με τις εκτιμήσεις $q_{HF-IG,SWL}$ οι οποίες περιλαμβάνουν την IG ενέργεια στις φασματικές παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις, οι εκτιμήσεις $\bar{q}_{HF,ADJ}$ είναι χαμηλότερες στις περισσότερες τοποθεσίες αξιολόγησης. Οι δύο προσεγγίσεις είναι ουσιαστικά διαφορετικές. Για ορμητικές συνθήκες, οι εκτιμήσεις $q_{HF-IG,SWL}$ συμπεριλαμβάνουν την IG ενέργεια στην φασματική περίοδο $T_{m-1,0}$, ενώ οι εκτιμήσεις $\bar{q}_{HF,ADJ}$ θεωρούν όλες τις διακυμάνσεις της στάθμης στο υπερβαρυντικό εύρος ($f < 0.04 \text{ Hz}$) ως αρκετά μακρείς ώστε να θεωρηθούν αλλαγή της μέσης στάθμης.

Η Προσέγγιση Α επέτρεψε επίσης την εξέταση της συνεισφοράς του συντονισμού του λιμένα στην κυματική υπερπήδηση χρησιμοποιώντας την IG ενέργεια ως μια στοχαστική

προσαρμογή του περιθωρίου στέψης των κάθετων τοιχίων που περιβάλλουν την δυτική λιμενολεκάνη. Από τις αριθμητικές χρονοσειρές μπροστά από κάθε τοποθεσία αξιολόγησης, εξάχθηκαν χρονοσειρές υπερβαρυντικών κυματισμών οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή του περιθωρίου στέψης προκειμένου να υπολογιστούν οι χρονοσειρές παροχής υπερπήδησης $q_{HF,ADJ}$. Μέσω ανάλυσης με FFT των χρονοσειρών $q_{HF,ADJ}$ εντοπίστηκαν οι ιδιοσυχνότητες που συνεισφέραν περισσότερο στην κυματική υπερπήδηση σε κάθε τοποθεσία αξιολόγησης (Εικόνα 74). Οι ιδιοπερίοδοι μεταξύ 45 και 55 s καθώς γύρω από τα 30 s είναι αυτές που συνεισφέρουν περισσότερο με αυξημένους όγκους υπερπήδησης.

Η προτεινόμενη πρωτότυπη μεθοδολογία αξιολόγησης της επίδρασης του συντονισμού λιμένα στις παροχές υπερπήδησης, χρειάζεται να αξιολογηθεί μέσω ελεγχόμενων πειραμάτων σε φυσικά μοντέλα με κάθετα τοιχία και σημαντική επίδραση από ρηχή προάκτια ζώνη.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agnon, Y., & Mei, C. C. (1989). Long-period oscillations in a harbour induced by incident short waves. *Journal of Fluid Mechanics*, 208, 595–608.
<https://doi.org/10.1017/S0022112089002958>
- Agresti, V. (2018). *Effects of tidal motion on the Mediterranean Sea General Circulation*. University of Bologna.
- Asariotis, R., Benamara, H., & Mohos-Naray, V. (2018). Climate change, Impacts, Adaptation, Ports, Seaports, Coastal transportation. *United Nations Conference on Trade and Development*, 18, 3. https://unctad.org/system/files/official-document/ser-rp-2017d18_en.pdf
- Battjes, J. A., & Van Vledder, G. P. (1992). List of Sea-State Parameters, Discussion by Gerbrant Ph. van Vledder and Jurjen A. Battjes. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(2), 226–228.
- Battjes, J. A., & Van Vledder, G. P. (1984). Verification of Kimura's theory on wave group statistics. *Coastal Engineering Proceedings 1984*, 400–407.
- Battjes, J. A., & Groenendijk, H. W. (1998). Shallow foreshore wave height statistic; A predictive model for the probability of exceedance of wave heights. In *Delft Hydraulics*. <http://repository.tudelft.nl/view/ir/uuid:fe03dda9-40d9-4046-87fb-459f01fcd3d3/>
- Battjes, J. A., & Groenendijk, H. W. (2000). Wave height distribution on shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 40(3), p 161–182.
- Boccotti, P. (2011). *Wave mechanics for ocean engineering*. Elsevier.
- Bowers, E. C. (1977). Harbour resonance due to set-down beneath wave groups. *Journal of Fluid Mechanics*, 79(1), 71–92. <https://doi.org/10.1017/S0022112077000044>
- Brodtkorb, P. A., Myrhaug, D., & Rue, H. (2001). Joint distribution of wave height and wave crest velocity from reconstructed data with application to ringing. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 11(1), 23–32.
- Caires, S., & Gent, M. R. A. Van. (2012). Wave height distribution in constant and finite depths. *Coastal Engineering Proceedings 2012*.
- Cartwright, D. E., & Longuet-Higgins, M. S. (1956). The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 237(1209), 212–232.
- Casas-Prat, M., & Holthuijsen, L. H. (2010). Short-term statistics of waves observed in deep water. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(9), 1–20.
<https://doi.org/10.1029/2009JC005742>

- Chini, N., & Stansby, P. K. (2012). Extreme values of coastal wave overtopping accounting for climate change and sea level rise. *Coastal Engineering*, 65, 27–37. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.02.009>
- Cooley, J. W., & Tukey, J. W. (1965). An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, 19(90), 297–301.
- Dally, W. R. (1990). Random breaking waves: A closed-form solution for planar beaches. *Coastal Engineering*, 14(3), 233–263.
- De Girolamo, P. (1996). An experiment on harbour resonance induced by incident regular waves and irregular short waves. *Coastal Engineering*, 27(1–2), 47–66.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. World Scientific.
- Douyere, Y. M. J. (2003). *Analysis of Harbor Oscillation with a Boussinesq model* (Issue August). UNiversity of Hawaii at Manoa.
- EurOtop(2018). (2018). *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Van der Meer, J. W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrum. www.overtopping-manual.com
- Ewing, J. A. (1973). Mean length of Runs of High Waves. *Journal of Geophysical Research*, 78(12), 1933–1936.
- Forristall, G. Z. (1978). On the Statistical Distribution of Wave Heights in a Storm. *Journal of Geophysical Research*, 83(C5), 2353–2358. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1029/JC083iC05p02353>
- Forristall, G. Z. (1984). The Distribution of Measured and Simulated Wave Heights as a Function of Spectral Shape. *Journal of Geophysical Research*, 89(C6), 10547–10552.
- Fröhle, P., & Kohlhasse, S. (2001). Influence of Sample Data on the Statistical Analysis of Wave Measurements. *Ocean Wave Measurement and Analysis*, 424–433.
- Gallien, T. W., Sanders, B. F., & Flick, R. E. (2014). Urban coastal flood prediction: Integrating wave overtopping, flood defenses and drainage. *Coastal Engineering*, 91, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.04.007>
- Gensen, M. R. A. (2017). *Wave Overtopping in Harbour Areas* (Issue March). Delft University of Technology.
- Gierlevsen, T., Hebsgaard, M., & Kirkegaard, J. (2001). Wave Disturbance Modelling in the Port of Sines , Portugal – with special emphasis on long period oscillations. *International Conference on Port and Maritime R&D and Technology*, 29–31.
- Goda, Y. (1970). Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation. In *Report*

- Goda, Y. (2010). *Random Seas and Design of maritime structures* (3rd Editio). World Scientific.
- Goda, Y., & Kudaka, M. (2007). On the role of spectral width and shape parameters in control of individual wave height distribution. *Coastal Engineering Journal*, 49(3), 311–335. <https://doi.org/10.1142/S0578563407001629>
- Goda, Y., & Suzuki, Y. (1975). Computation of refraction and diffraction of sea waves with Mitsuyasu's directional spectrum. *Tech. Note of Port and Harbour Res. Inst.*, 230, 45.
- Guza, R. T., & Thornton, E. B. (1982). Swash Oscillations on a Natural Beach. *Journal Of Geophysical Research*, 87(C1), 483–491.
- Hamad, N., Millot, C., & Taupier-Letage, I. (2006). The surface circulation in the eastern basin of the Mediterranean Sea. *Scientia Marina*, 70(3), 457–503. <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70n3457>
- Harkins, G. S., & Briggs, M. J. (1995). Resonant forcing of harbors by infragravity waves. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference 1994*, 1, 806–820. <https://doi.org/10.1061/9780784400890.060>
- Hashimoto, N., Nakawaga, Y., Nagai, T., & Ito, K. (1997). Modification of extended maximum entropy principle method (EMEP) for estimating directional spectrum in incident and reflected wave field. *Proceedings of the 1997 16th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*.
- Hasselmann K., Barnett T.P., Bouws E., Carlson H., Cartwright D.E., Enke K., Ewing J.A., Gienapp H., Hasselmann D.E., Kruseman P., Meeburg A., Muller P., Olbers D.J., Richter K., Sell W., W. H. (1973). *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)*.
- Hofland, B., Chen, X., Altomare, C., & Oosterlo, P. (2017). Prediction formula for the spectral wave period $T_{m-1,0}$ on mildly sloping shallow foreshores. *Coastal Engineering*, 123, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.02.005>
- Holman, R. A., Huntley, D. A., & Bowen, A. J. (1979). Infragravity Waves in Storm Conditions. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 1, 268–284. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.13>
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Wave in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- IAHR. (1989). List of Sea-State Parameters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 115(6), 793–808.
- IAHR. (1992). List of Sea-State Parameters, Closure by IAHR working Group. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(2), 228–230.

- Jeong, W. M., Chae, J. W., Park, W. S., & Jung, K. T. (1996). Field measurements and numerical modeling of harbor oscillations during storm waves. *Coastal Engineering Proceedings 1996*, 1268–1279.
- Kamphuis, J. W. (2000). *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific.
- Karmpadakis, I., Swan, C., & Christou, M. (2020). Assessment of wave height distributions using an extensive field database. *Coastal Engineering*, 157(January), 103630. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103630>
- Kassis, D., Korres, G., Petihakis, G., & Perivoliotis, L. (2015). Hydrodynamic variability of the Cretan Sea derived from Argo float profiles and multi-parametric buoy measurements during 2010–2012. *Ocean Dynamics*, 65(12), 1585–1601. <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0892-0>
- Kassis, D., Krasakopoulou, E., Korres, G., Petihakis, G., & Triantafyllou, G. S. (2016). Hydrodynamic features of the South Aegean Sea as derived from Argo T/S and dissolved oxygen profiles in the area. *Ocean Dynamics*, 66(11), 1449–1466. <https://doi.org/10.1007/s10236-016-0987-2>
- Kazolea, M., Delis, A. I., Nikolos, I. K., & Synolakis, C. E. (2012). An unstructured finite volume numerical scheme for extended 2D Boussinesq-type equations. *Coastal Engineering*, 69, 42–66. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.05.008>
- Kazolea, Maria, Kalligeris, N., Maravelakis, N., Synolakis, C. E., Delis, A. I., & Lynett, P. J. (2015). Numerical study of wave conditions for the old Venetian harbor of Chania in Crete, Greece. *The 36th IAHR World Congress, October 2016*.
- Kim, D. H., & Lynett, P. J. (2011). Turbulent mixing and passive scalar transport in shallow flows. *Physics of Fluids*, 23(1), 016603. <https://doi.org/10.1063/1.3531716>
- Kim, D. H., Lynett, P. J., & Socolofsky, S. A. (2009). A depth-integrated model for weakly dispersive, turbulent, and rotational fluid flows. *Ocean Modelling*, 27(3–4), 198–214. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.01.005>
- Kimura, A. (1980). Statistical properties of random wave groups. *Coastal Engineering Proceedings 1980*, 3(7), 2955–2973. <https://doi.org/10.9753/icce.v17.175>
- Kirby, J. T., Wei, G., Chen, Q., Kennedy, A. B., & Dalrymple, R. a. (1998). Funwave 1.0, fully nonlinear boussinesq wave model documentation and user's manual. *Center for Applied ...*, 80. <http://repository.tudelft.nl/view/hydro/uuid:d79bba08-8d35-47e2-b901-881c86985ce4/>
- Kofoed-Hansen, H., Kerper, D. R., Sorensen, O. R., & Kirkegaard, J. (2005). Simulation of Long Wave Agitation in Ports and harbours using a time domain Boussinesq model.

- Proceedings of Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis*, 3–7.
- Kofoed-Hansen, H., Sloth, P., Sørensen, O. R., & Fuchs, J. (2000). Combined numerical and physical modelling of seiche in exposed New Marina. *Proceedings of the 27th International Conference on Coastal Engineering, ICCE 2000*, 3600–3614.
- Kowalik, Z., & Bang, I. (1987). Numerical computation of tsunami run-up by the upstream derivative method. *Science of Tsunami Hazards*, 5(2), 77–84.
- Lionello, P., Malanotte-Rizzoli, P., Boscolo, R., Alpert, P., Artale, V., Li, L., Luterbacher, J., May, W., Trigo, R., Tsimplis, M., Ulbrich, U., & Xoplaki, E. (2006). The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. *Developments in Earth and Environmental Sciences*, 4(C), 1–26.
- Liu, Z., Elgar, S., & Guza, R. T. (1993). Groups of Ocean Waves- Linear Theory, Approximations to Linear Theory, and Observations. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(2), 144–159.
- Longuet-Higgins, M. S. (1952). On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves. *Journal of Marine Research*, 11(3), 245–266.
- Longuet-Higgins, M. S. (1975). On the Joint DiStribution of the Periods and Amplitudes of Sea Waves. *Journal of Geophysical Research*, 80(18), 2688–2694.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1029/JC080i018p02688>
- Longuet-Higgins, M. S. (1983). On the Joint Distribution of Wave Periods and Amplitudes in a Random Wave Field. *Proceedings of The Royal Society of London, Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 389(1797), 241–258.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1983.0107>
- Longuet-Higgins, M. S. (1984). Statistical properties of wave groups in a random sea state. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 312(1521), 219–250. <https://doi.org/10.1098/rsta.1984.0061>
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1962). Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to ‘surf beats.’ *Journal of Fluid Mechanics*, 13(4), 481–504.
<https://doi.org/10.1017/S0022112062000877>
- Longuet-Higgins, M. S., & Stewart, R. W. (1964). Radiation stresses in water waves-a physical discussion with applications. *Deep Sea Research*, 11, 529–562.
- López, M., Iglesias, G., & Kobayashi, N. (2012). Long period oscillations and tidal level in the Port of Ferrol. *Applied Ocean Research*, 38, 126–134.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2012.07.006>
- Lynett, P. (2002). *A Multi-Layer approach to modelling generation, propagation, and*

- interaction of water waves*. Cornell Univesity.
- Lynett, P. J., Borrero, J. C., Weiss, R., Son, S., Greer, D., & Renteria, W. (2012). Observations and modeling of tsunami-induced currents in ports and harbors. *Earth and Planetary Science Letters*, 327–328, 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.02.002>
- Lynett, P., & Liu, P. L. F. (2004). A two-layer approach to wave modelling. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 460(2049), 2637–2669. <https://doi.org/10.1098/rspa.2004.1305>
- Magnor, K. (2020). *Waves*. <http://www.coastalwiki.org/wiki/Waves>
- Maravelakis, N., Kalligeris, N., Lynett, P. J., & Synolakis, C. E. (2016). Case Study of Small Harbor Excitation under Storm Conditions. *Ports 2016*, 764–773. <https://doi.org/https://doi.org/10.1061/9780784479902.065>
- Masson, D., & Chandler, P. (1993). Wave groups: A closer look at spectral methods. *Coastal Engineering*, 20(3–4), 249–275.
- Mathiesen, M., Goda, Y., Hawkes, P. J., Martín, M. J., Peltier, E., & Edward, F. (1994). Recommended practice for extreme wave analysis. *Journal of Hydraulic Research*, 32(6).
- McComb, P. J., Johnson, D. L., & Beamsley, B. J. (2009). Numerical study of options to reduce swell and long wave penetration at port geraldton. *19th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference 2009 and the 12th Australasian Port and Harbour Conference 2009*, 482–488.
- McComb, R., Gorman, R., & Goring, D. G. (2005). Forecasting infragravity wave energy within a harbour. *Proceedings of WAVES*.
- Medina, J. R., & Hudspeth, R. T. (1990). A review of the analyses of ocean wave groups. *Coastal Engineering*, 14(6), 515–542.
- Mendez, F. J., Losada, I. J., & Medina, R. (2004). Transformation model of wave height distribution on planar beaches. *Coastal Engineering*, 50(3), 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.09.005>
- Mitsuyasu, H., Tasai, F., Suhara, T., Mizuno, S., Ohkusu, M., Honda, T., & Rikiishi, K. (1975). Observations of the Directional Spectrum of Ocean Waves Using a Cloverleaf Buoy. In *Journal of Physical Oceanography* (Vol. 5, Issue 4, pp. 750–760).
- Morison, M. L., & Imberger, J. (1992). Water-level Oscillations in Esperance Harbour. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 118(4), 352–367.
- Naess, A. (1985). On the distribution of crest to trough wave heights. *Ocean Engineering*, 12(3), 221–234.
- Nakamura, S., & Katoh, K. (1993). Generation of infragravity waves in breaking process of wave groups. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 1, 990–1003.

- Newland, D. E. (1975). *An Introduction to random vibrations and spectral analysis*. Longmans.
- Nicolai, R., Vuren, V. S., Pleijter, G., Huizinga, J., Koks, E., & De Moel, H. (2016). *Pilot Waterveiligheid Botlek; Kwantitatieve analyse overstromingsrisico's*.
- Nortek. (2017). The Comprehensive Manual. In *Nortek Manuals*.
- Nwogu. (2001). Time domain Simulation of Long Period Oscillations in Harbors. *Coastal Engineering Proceedings 2000*, 3643–3654.
- Nwogu, O. (1993). Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119(6), 618–638.
- Nwogu, O., & Demirbilek, Z. (2010). Infragravity wave motions and runup over shallow fringing reefs. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 136(6), 295–305.
- Okihiro, M., & Guza, R. T. (1996). Observations of Seiche Forcing and Amplification in Three Small Harbors. *Journal Of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 122(5), 232–238.
- Okihiro, M., Guza, R. T., & Seymour, R. J. (1993). Excitation of seiche observed in a small harbor. *Journal of Geophysical Research*, 98(C10). <https://doi.org/10.1029/93jc01760>
- Oosterlo, P., McCall, R. T., Vuik, V., Hofland, B., van der Meer, J. W., & Jonkman, S. N. (2018). Probabilistic assessment of overtopping of sea dikes with foreshores including infragravity waves and morphological changes: Westkapelle case study. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(48). <https://doi.org/10.3390/jmse6020048>
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using TDE. *Computers and Geosciences*, 28(8), 929–937.
- Peregrine, D. H. (1967). Long Waves on a Beach. *Journal of Fluid Mechanics*, 27(4), 815–827.
- Perez, J., Menendez, M., & Losada, I. J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 124(April), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.03.005>
- Pierson, W. J., & Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, 69(24), 5181–5190. <https://doi.org/10.1029/jz069i024p05181>
- Prat, M. C. (2008). *Overview of Ocean Wave Statistics*. Univeritat Polytechnica de Catalunya.
- Rabinovich, A. B. (2010). Seiches and harbor oscillations. In *Handbook of coastal and ocean engineering* (pp. 193–326). World Scientific.
- Raichlen, F. (1966). Harbor resonance. In A. T. Ippen (Ed.), *Estuary and coastline hydrodynamics* (pp. 281–340). McGraw Hill Book Comp, New York.

- Rattanapitikon, W. (2010). Verification of conversion formulas for computing representative wave heights. *Ocean Engineering*, 37(17–18), 1554–1563. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.09.013>
- Raubenheimer, B., Guza, R. T., & Elgar, S. (1996). Wave transformation across the inner surf zone. *Journal of Geophysical Research*, 101(C10), 25589–25597.
- Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. (2012). Coastal engineering: Processes, theory and design practice, second edition. In *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*. <https://doi.org/10.1201/b11804>
- Robinson, A. R., Leslie, W. G., Theocharis, A., & Lascaratos, A. (2001). Mediterranean Sea Circulation. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 1689–1705. <https://doi.org/10.1006/rwos.2001.0376>
- Ruessink, B. G., Houwman, K. T., & Hoekstra, P. (1998). The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9 m. *Marine Geology*, 152, 295–324.
- Rusu, L., Pilar, P., & Guedes Soares, C. (2008). Hindcast of the wave conditions along the west Iberian coast. *Coastal Engineering*, 55(11), 906–919. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2008.02.029>
- Rye, H. (1977). The stability of some currently used wave parameters. *Coastal Engineering*, 1(C), 359–365.
- Rye, H. (1974). Wave Group Formation Among Storm Waves. *Coastal Engineering Proceedings 1974*, 1, 164–183. <https://doi.org/10.9753/icce.v14.7>
- Rye, H., & Svee, R. (1977). Parametric representation of a wind-wave field. *Coastal Engineering Proceedings 1976*, 183–201. <https://doi.org/10.9753/icce.v15.11>
- Saulnier, J. B., Clment, A., Falco, A. F. D. O., Pontes, T., Prevosto, M., & Ricci, P. (2011). Wave groupiness and spectral bandwidth as relevant parameters for the performance assessment of wave energy converters. *Ocean Engineering*, 38(1), 130–147. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.10.002>
- Shimozono, T., Tajima, Y., Kennedy, A. ., Nobuoka, H., Sasaki, J., & Sato, S. (2015). Combined infragravity wave and sea-swell runup over fringing reefs by super typhoon Haiyan. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 120, 4463–4486. <https://doi.org/10.1002/2015JC010760>
- Shimura, T., & Mori, N. (2019). High-resolution wave climate hindcast around Japan and its spectral representation. *Coastal Engineering*, 151(April), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.013>
- Sierra, J. P. (2019). Economic impact of overtopping and adaptation measures in Catalan ports

- due to sea level rise. *Water (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/w11071440>
- Soukissian, T., Prospathopoulos, A., Hatzinaki, M., & Kabouridou, M. (2008). Assessment of the Wind and Wave Climate of the Hellenic Seas Using 10-Year Hindcast Results. *The Open Ocean Engineering Journal*, 1, 1–12.
- Sverdrup, H. U., & Munk, W. H. (1947). Wind, Sea, and Swell. Theory of Relations For Forecasting. In *US Navy Hydrographic Office* (Issue 601).
- Synolakis, C. E. (2003). Tsunami and seiche. In W. F. Chen & C. Scawthorn (Eds.), *Earthquake Engineering Handbook*. CRC Press.
- Tayfun, M. A. (1990). Distribution of large wave heights. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 116(6), 686–707.
- Tayfun, M. A. (1983). Effects of spectrum band width on the distribution of wave heights and periods. *Ocean Engineering*, 10(2), 107–118.
- Theocharis, A., Balopoulos, E., Kioroglou, S., Kontoyiannis, H., & Iona, A. (1999). A synthesis of the circulation and hydrography of the South Aegean Sea and the Straits of the Cretan Arc (March 1994-January 1995). *Progress in Oceanography*, 44(4), 469–509.
- Thomas, B. K. V, Baba, M., & Harish, C. M. (1986). Wave Groupiness In Long Traveled Swell. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 112(4), 498–511.
- Thompson, E. F., & Seelig, W. N. (1984). High Wave Grouping in Shallow Water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 110(2), 139–157.
- Thornton, E. B., & Guza, R. T. (1983). Transformation of wave height distribution. *Journal of Geophysical Research*, 88(C10), 5925–5938. <https://doi.org/10.1029/JC088iC10p05925>
- Thotagamuwage, D. T., & Pattiaratchi, C. B. (2014). Observations of infragravity period oscillations in a small marina. *Ocean Engineering*, 88, 435–445. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.07.003>
- Tsimplis, M. N. (1994). Tidal oscillations in the Aegean and Ionian Seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39(2), 201–208.
- Tucker, M.J. and Pitt, E. G. (2001). *Waves in Ocean Engineering*. Elsevier.
- Tucker, M. J. (1993). Recommended standard for wave data sampling and near-real-time processing. *Ocean Engineering*, 20(5), 459–474.
- US Army Corps Of Engineers. (2002). *Coastal Engineering Manual, Chapter 1-Water Wave Mechanics* (Issue April).
- van Vleeder, G. P. (1992). Statistics of wave group parameters. *Coastal Engineering Proceedings 1992*, 1(1980), 946–959. <https://doi.org/10.1061/9780872629332.071>
- Vandever, J. P., Siegel, E. M., Brubaker, J. M., & Friedrichs, C. T. (2008). Influence of spectral width on wave height parameter estimates in coastal environments. *Journal of Waterway,*

- Port, Coastal and Ocean Engineering*, 134(3), 187–194.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2008\)134:3\(187\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2008)134:3(187))
- Vizcaino, M. A. W. (2011). *Analysis of Spectra, Wave Grouping and Long Wave Phenomena of Real Measured Wind Waves in Coastal Waters* (Issue June). Universitat Politecnica De Catalunya.
- WAFO group. (2017). *WAFO – a Matlab Toolbox for Analysis of Random Waves and Loads*.
- Wu, J. K., & Liu, P. L. F. (1990). Harbour excitations by incident wave groups. *Journal of Fluid Mechanics*, 217, 595–613. <https://doi.org/10.1017/S0022112090000866>
- Wu, Y., Randell, D., Christou, M., Ewans, K., & Jonathan, P. (2016). On the distribution of wave height in shallow water. *Coastal Engineering*, 111, 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.01.015>
- Xie, D., Zou, Q. P., Mignone, A., & MacRae, J. D. (2019). Coastal flooding from wave overtopping and sea level rise adaptation in the northeastern USA. *Coastal Engineering*, 150(October 2017), 39–58. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.02.001>
- E.M.Y. (2020). *Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία*. <http://www.hnms.gr/emv/el/services/paroxi- ipresion-diktio-met-stathmon-epifaneias>
- Καζολέα, Μ. (2013). *Μαθηματική και υπολογιστική μοντελοποίηση γένεσης και διάδοσης κυματισμών στο θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον*. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μουτζούρης, Κ. Ι. (1992). *Μελέτη επεκτάσεως κυματοθραύστη λιμένα Χανίων*.
- Μουτζούρης, Κ. Ι. (1993). *Επέκταση κυματοθραύστη λιμένα Χανίων: Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων*.
- Νομαρχία Χανίων. (1995). *Πρακτικά συνεδρίασης Νομαρχιακού Συμβουλίου Χανίων, 29/05/1995*.
- Παπαδόπουλος, Θ. (2009). *Ανάλυση μετρήσεων για τον προσδιορισμό της στάθμης της θάλασσας και Δορυφορική αλτιμετρία*. Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Παπαπάνος, Ι. Ν. (1984). *Οριστική μελέτη προστασίας λιμανιού Χανίων*.
- Παπαπάνος, Ι. Ν. (1985). *Συμπληρωματική τεχνική έκθεση οριστικής μελέτης προστασίας λιμανιού Χανίων*.
- Σουκισιάν, Τ. Χ., & Προσπαθόπουλος, Α. Μ. (2003). *Εφαρμογή του Κυματικού Μοντέλου 3ης Γενιάς WAM-Cycle 4 στο Αιγαίο Πέλαγος. 1*.
- Συνολάκης, Κ., Μαραβελάκης, Ν., & Καλλιγέρης, Ν. (2015). *Έρευνα κυματικών συνθηκών Ενετικού Λιμένα Χανίων, 3ο παραδοτέο στη σύμβαση έργου μεταξύ Πολυτεχνείου Κρήτης και Δημοτικού Λιμενικού Ταμείου Χανίων με τίτλο Έρευνα χωροθέτησης μαρίνας, κυματικών συνθηκών Ενετικού λιμένα Χανίων & εξέλιξης ακτογραμμής από τη*.
- Συνολάκης, Κ., Μαραβελάκης, Ν., Καλλιγέρης, Ν., & Καλλιγέρης, Γ. (2011). *Έρευνα*

Χωροθέτησης Μαρίνας. 1ο Παραδοτέο στη σύμβαση μεταξύ Πολυτεχνείου Κρήτης και Δημοτικού Λιμενικού Ταμείου Χανίων με τίτλο Έρευνα χωροθέτησης μαρίνας, κυματικών συνθηκών Ενετικού λιμένα Χανίων & εξέλιξης ακτογραμμής από την Πύλη της Άμμου μέχρι την Α.