



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Μελέτη και ανάλυση θαλάσσιων κυματισμών στη Νοτιοδυτική
Κρήτη και σύγκριση με μετεωρολογικές προβλέψεις
κυματισμών»

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

1. Κος. Συνολάκης Κωνσταντίνος (επιβλέπων)
2. Κα. Ψυλλάκη Έλια
3. Κος. Καλογεράκης Νικόλαος

ΙΩΑΝΝΗΣ ΔΑΠΟΛΑΣ

ΧΑΝΙΑ 2020

Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία που ακολουθεί αποτελεί μια πολυετή προσπάθεια και δεν θα μπορούσε να είχε ολοκληρωθεί χωρίς την υποστήριξη των ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μου σε αυτήν.

Αρχικά νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κωσταντίνο Συνολάκη για την έμπνευση και την εμπιστοσύνη που μου έδωσε για να σχεδιάσουμε και να υλοποιήσουμε την έρευνα αυτήν, καθώς και την ολοκληρωμένη στήριξη του καθ' όλη την διάρκεια της.

Επίσης τους συνεργάτες του εργαστηρίου, Σκαναβή Βασίλη και Μαραβελάκη Νίκο για την απαραίτητη τεχνική και επιστημονική τους συμβολή για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, καθώς και τον Δαμουλή Τσιριντάνη, φίλο και ιδιοκτήτη του καταδυτικού κέντρου Σφακίων για την προσωπική και υλικοτεχνική του υποστήριξη.

Ακόμα ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους και την οικογένεια μου που μου έδιναν την δύναμη να συνεχίσω όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη	5
Abstract	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	7
Εισαγωγή – Προβληματισμός	7
1.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	9
Θεωρητικό υπόβαθρο	9
2.1 Τι είναι το κύμα.....	9
2.2 Ύψος Κύματος.....	10
2.3 Περίοδος Κύματος.....	10
2.4 Οπτική παρατήρηση-Μετρήσεις οργάνου	12
2.5 Φασματική περιγραφή των κυματικών διαταραχών	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	15
Μεθοδολογία – Πειραματική διάταξη.....	15
3.1 Μέθοδοι Παρατήρησης Κυματικών Διαταραχών	15
3.1.1 In situ τεχνικές	15
3.1.2 Remote-sensing τεχνικές (Τεχνικές τηλεπισκόπησης).....	17
3.1.3 Τελική επιλογή μετρητικού οργάνου	18
3.2 Αρχή λειτουργίας του AWAC	19
3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	21
3.4 Εγκατάσταση του οργάνου και ανάκτηση δεδομένων	22
3.5 Λογισμικό Storm	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο	29
Αποτελέσματα πειραματικής μελέτης	29
4.1 Σημαντικά κυματικά γεγονότα.....	29
4.2 Ρεύματα.....	33
4.2 Κυματικές συνθήκες ανά εποχή	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο	41
Σύγκριση αποτελεσμάτων με προγνωστικό μετεωρολογικό μοντέλο και αξιολόγηση.....	41
5.1 Το μετεωρολογικό μοντέλο WAM.....	41
5.2 Σχεδιασμός διαδικασίας σύγκρισης.....	42
5.3 Σημαντικά κυματικά γεγονότα.....	43
5.4 Διαγράμματα.....	44

5.5 Συμπεράσματα-Συζήτηση	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο	52
Συμπεράσματα – Μελλοντικές εφαρμογές	52
Βιβλιογραφία	53

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται μια συγκριτική αξιολόγηση πειραματικών μετρήσεων των βασικών χαρακτηριστικών των θαλάσσιων κυμάτων στην περιοχή των Σφακίων.

Η διεξαγωγή του πειράματος έγινε δυνατή με τη χρήση ειδικής μετρητικής διάταξης η οποία τοποθετήθηκε ανοιχτά του λιμανιού των Σφακίων για χρονικό διάστημα δύο ετών. Παράλληλα συλλέχθηκαν πληροφορίες και δεδομένα από μετεωρολογικές εκτιμήσεις για το ύψος, τη συχνότητα και τη διεύθυνση των κυμάτων την ίδια χρονική περίοδο.

Στόχος της εργασίας είναι η συλλογή των πειραματικών δεδομένων και η σύγκριση τους με εκτιμήσεις μετεωρολογικών υπολογιστικών μοντέλων. Παρατηρείται, επίσης, η μεταβολή των κυματικών φαινομένων με την πάροδο του χρόνου και την αλλαγή των εποχών και σημειώνονται σημαντικά κυματικά συμβάντα.

Από την μελέτη των μετεωρολογικών εκτιμήσεων των βασικών κυματικών μεγεθών της ίδιας χρονικής περιόδου υποδεικνύεται σημαντική συνάφεια σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα.

Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για καλύτερη εποπτεία των κυματικών συνθηκών στην περιοχή των Σφακίων τόσο για σκοπούς ναυσιπλοΐας όσο και για κατασκευαστικούς σκοπούς στη διαμόρφωση της ακτής.

Abstract

In the present diploma thesis, a comparative study of experimental measurements of the primary characteristics of sea waves in the area of Sfakia, Crete is presented.

The conduct of the experiment was made possible by the use of a special measuring device, which was located off the port of Sfakia for a total 2 years period of time. Meanwhile, information and data were selected from meteorological estimates of the wave height, frequency and direction at the same time period.

The purpose of this study is the collection of the experimental data and their comparison with the estimates of the meteorological computational models of wave distributions. In addition, the variation/alteration of the wave events during time is observed as well as the variations that occur on different seasons, and significant wave events are noted.

The study of the meteorological estimations of the wave characteristic values at the same time period indicates significant resemblance with the experimental data.

In conclusion, the results of this study could potentially be used for an improved supervision of the wave conditions in Sfakia area for both navigation and structural purposes on the formation of the shoreline.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή-Προβληματισμός

Τα διάφορα υπολογιστικά συστήματα για την πρόγνωση του καιρού ή για την εκτίμηση ποικίλων μετεωρολογικών συνθηκών αποτελούν ένα χρήσιμο και αξιόπιστο εν γένει εργαλείο για διάφορες καθημερινές ή πιο εξειδικευμένες δραστηριότητες. Τα μοντέλα αυτά αναπτύσσονται από διάφορους φορείς και υπάρχουν διαθέσιμα στο διαδίκτυο. Οι μετεωρολογικές παράμετροι που προκύπτουν από αυτά τα υπολογιστικά μοντέλα είναι συχνά εύκολα επαληθεύσιμες, όπως λ.χ. στην περίπτωση του ανέμου ή της ηλιοφάνειας. Παρόλα αυτά τα χαρακτηριστικά των κυμάτων της θάλασσας ενώ προσδιορίζονται μέσω αυτών των μοντέλων δεν μετρώνται εύκολα στην πράξη.

Με βάση αυτόν τον προβληματισμό το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι, εκτός από τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων, και η σύγκρισή τους με τις εκτιμήσεις των υπολογιστικών μοντέλων τα οποία κατά κόρον χρησιμοποιούνται σαν πηγή πληροφόρησης για την ένταση και τη μορφή των κυματικών φαινομένων μιας περιοχής.

Στόχος της εργασίας είναι επομένως, εκτός από τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων για το ύψος, τη χρονική περίοδο και την διεύθυνση των κυμάτων στην περιοχή των Σφακίων Κρήτης, και η σύγκριση τους με εκτιμήσεις μετεωρολογικών μοντέλων. Η σύγκριση και η επαλήθευση των μοντέλων αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την χρήση σε μελέτες που αφορούν λιμενικά ή άλλα κατασκευαστικά έργα στην ακτή (π.χ. αλιευτικά καταφύγια, λιμάνια, πρόβολοι, κυματοθραύστες) όσο και για μελέτες διάβρωσης της ακτογραμμής λόγω ιζηματομεταφορών. Εκτός αυτών τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής θα μπορούσαν να βρουν ενδιαφέρουσα εφαρμογή και στον τομέα της ναυσιπλοΐας όπου το ύψος κύματος αποτελεί μια βασικότατη παράμετρο η οποία κατά κύριο λόγο λαμβάνεται από τα διάφορα προσεγγιστικά μοντέλα και όχι από πραγματικές μετρήσεις.

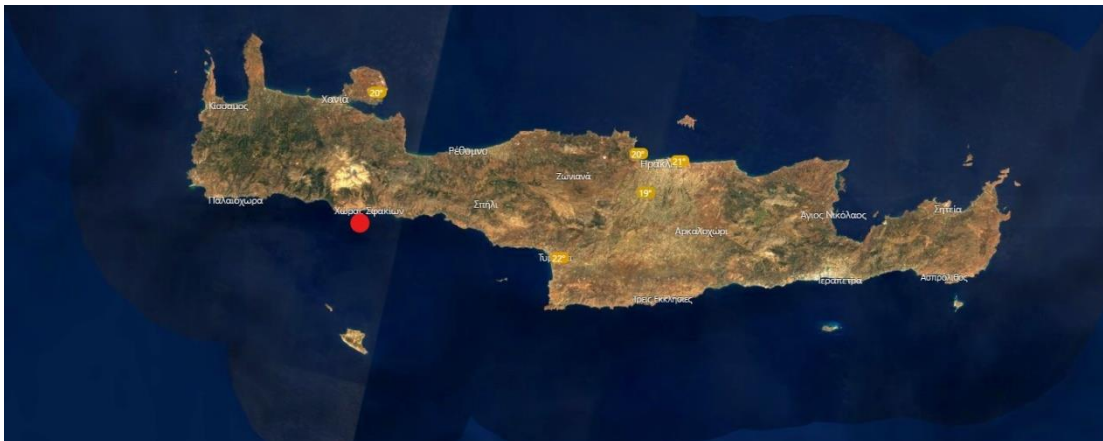
1.1 Περιγραφή περιοχής μελέτης

Η μελέτη έλαβε χώρα ευρύτερη θαλάσσια περιοχή του λιμανιού των Σφακίων στο νομό Χανίων στο Νοτιοδυτικό τμήμα της Κρήτης. Η μορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη των Λευκών Ορέων βόρεια των Σφακίων και από το μεγάλο ανάπτυγμα πελάγους στα νότια του νησιού.

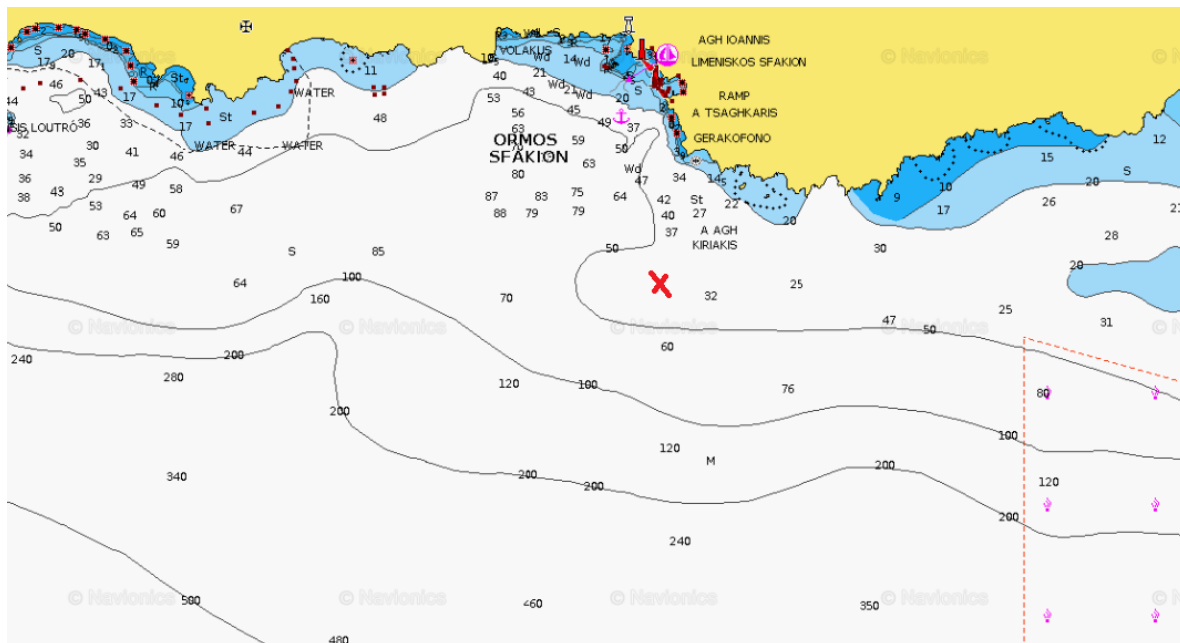
Εξαιτίας αυτής της μορφολογίας είναι γνωστό ότι η περιοχή πλήττεται κατά κύριο λόγο από νότιους και κυρίως δυτικούς ανέμους οι οποίοι λόγω του ανοιχτού πελάγους που εκτείνεται μέχρι τις ακτές της Αφρικής δημιουργούν έντονες κυματικές διαταραχές.

Συγκεκριμένα, το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη ποντίσθηκε νότια-νοτιοανατολικά του λιμένα των Σφακίων στην ακριβή θέση Ν

35°11.127, Ε024°08.373. Το σημείο αυτό επιλέχθηκε λόγω της επαρκούς απόστασης από την ακτή ώστε να αποφεύγονται σφάλματα που προκαλούνται από την ανάκλαση των κυμάτων στην ακτή, αλλά και λόγω του ικανοποιητικού βάθους και κλίσης του πυθμένα. Επιπλέον, το βάθος τοποθέτησης του οργάνου ορίστηκε στα 25m. Ήταν θεμιτό η διαμόρφωση του πυθμένα της θάλασσας στο σημείο πόντισης να είναι όσο το δυνατόν πιο επίπεδη με μηδενική κλίση για βέλτιστη ακρίβεια και ποιότητα μετρήσεων.



Εικόνα 1.1 - Μορφολογία της νήσου Κρήτης. Με κόκκινο σημειώνεται η θέση της περιοχής μελέτης



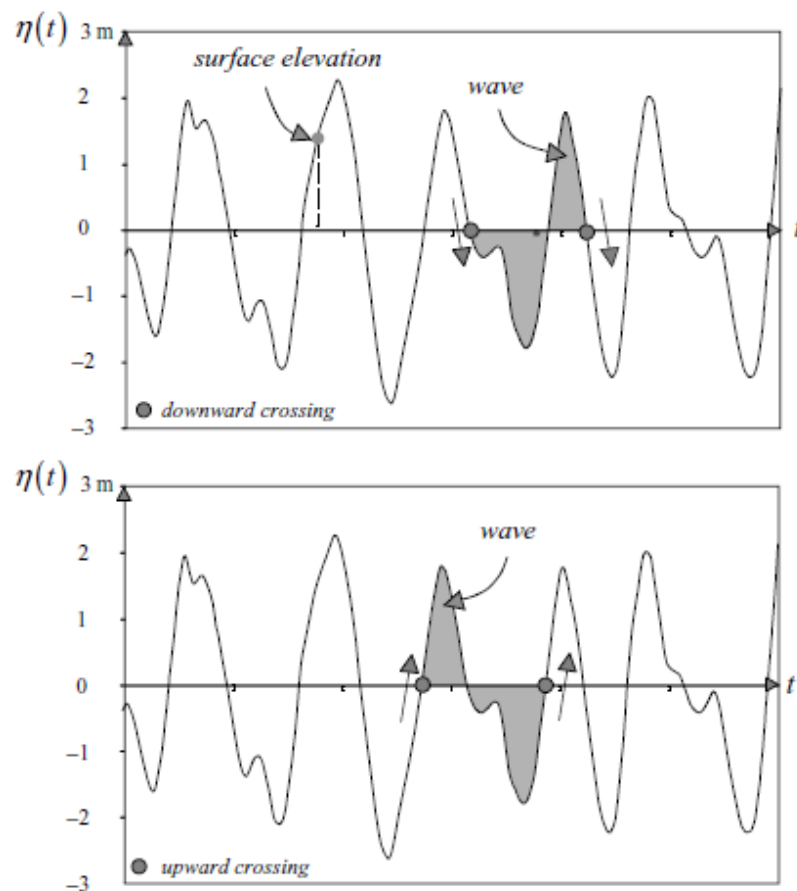
Εικόνα 2.2 - Βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής. Σημειώνεται προσεγγιστικά το σημείο πόντισης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 Τι είναι το κύμα

Σύμφωνα με τον Leo H. Holthuijsen (2007), είναι αρχικά αναγκαία η κατανόηση ενός βασικού διαχωρισμού. Αποτελεί συχνό φαινόμενο η σύγχυση των όρων: κύμα και ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας. Σε ένα κυματικό φαινόμενο που εξελίσσεται στην κλίμακα του χρόνου, ανύψωση της επιφάνειας ορίζεται ως η στιγμιαία τιμή του ύψους της επιφάνειας σχετικά με ένα ορισμένο επίπεδο αναφοράς. Αντιθετικά, το κύμα ορίζεται ως το προφίλ της ανύψωσης της επιφάνειας μεταξύ δύο διαδοχικών «περασμάτων» από το μηδέν με κατεύθυνση προς τα κάτω (ή προς τα πάνω), όπου μηδέν ορίζεται το ύψος επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία (επίπεδο αναφοράς). Για το λόγο αυτό η ανύψωση της επιφάνειας μπορεί να παίρνει



αρνητική τιμή, ενώ το κύμα όχι.

2.2 Ύψος Κύματος

Το ύψος κύματος H , ορίζεται ως η κάθετη απόσταση μεταξύ της μικρότερης και της μεγαλύτερης ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας (Leo H. Holthuijsen, 2007). Ένα κύμα λοιπόν έχει ένα μοναδικό ύψος κύματος.

Σε ένα κυματικό μητρώο N κυμάτων ως μέσο ύψος κύματος ορίζεται το:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i$$

Όπου i , ο αριθμός ακολουθίας των κυμάτων στο μητρώο (π.χ. $i=1$ για το πρώτο κύμα στο μητρώο, $i=2$ για το δεύτερο κ.ο.κ.).

Παρόλο που το μέσο ύψος κύματος είναι μία εύκολα οριστέα έννοια, δεν χρησιμοποιείται συχνά, μάλλον γιατί δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη ομοιότητα με το οπτικά εκτιμώμενο ύψος κύματος H_v . Για το λόγο αυτό ένα μέγεθος που χρησιμοποιείται ευρέως ονομάζεται σημαντικό ύψος κύματος H_s και ορίζεται ως ο μέσος όρος των υψών του υψηλότερου ενός τρίτου των κυμάτων ενός μητρώου.

$$H_s = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} H_j$$

Όπου j , όχι ο αριθμός ακολουθίας των κυμάτων αλλά ο αριθμός τους βάσει ύψους κύματος (π.χ. $j=1$ το κύμα με το μεγαλύτερο ύψος κύματος, $j=2$ κύμα με το δεύτερο μεγαλύτερο ύψος κύματος κ.ο.κ.). Αν και ο ορισμός του σημαντικού ύψους κύματος φαίνεται παράλογος για ορισμός χαρακτηριστικού μεγέθους των κυμάτων, πειράματα έχουν δείξει ότι το H_s προσεγγίζει εξαιρετικά την τιμή του οπτικά εκτιμώμενου ύψους κύματος H_v .

Στα διαγράμματα του λογισμικού Storm που θα παρατεθούν στη συνέχεια χρησιμοποιείται το H_{m0} το οποίο αποτελεί μια άλλη έκφραση του σημαντικού ύψους κύματος (H_s) που προκύπτει από το φάσμα ενέργειας.

Ένα άλλο μέγεθος που χρησιμοποιείται (σε μικρότερη κλίμακα βέβαια) είναι το $H_{1/10}$, το οποίο ορίζεται ως ο μέσος όρος του υψηλότερου ενός δέκατου των κυμάτων ενός μητρώου:

$$H_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} H_j$$

2.3 Περίοδος Κύματος

Περίοδος ενός κύματος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα μεταξύ της αρχής και του τέλους του κύματος ή αλλιώς το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών «περασμάτων» από το μηδέν με κατεύθυνση προς τα κάτω (Leo H. Holthuijsen, 2007). Εφόσον η περίοδος του κύματος ορίζεται βάσει των «περασμάτων» από το μηδέν, συμβολίζεται ως T_0 . Η μέση λοιπόν περίοδος κύματος ενός κυματικού μητρώου ορίζεται ως:

$$\overline{T_0} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_{0,i}$$

Όπου i , ο αριθμός ακολουθίας των κυμάτων στο μητρώο (π.χ. $i=1$ για το πρώτο κύμα στο μητρώο, $i=2$ για το δεύτερο κ.ο.κ.).

Σε αναλογία με το σημαντικό ύψος κύματος, ορίζουμε και τη σημαντική περίοδο κύματος T_s , ως το μέσο όρο των περιόδων του υψηλότερου ενός τρίτου των κυμάτων ενός μητρώου.

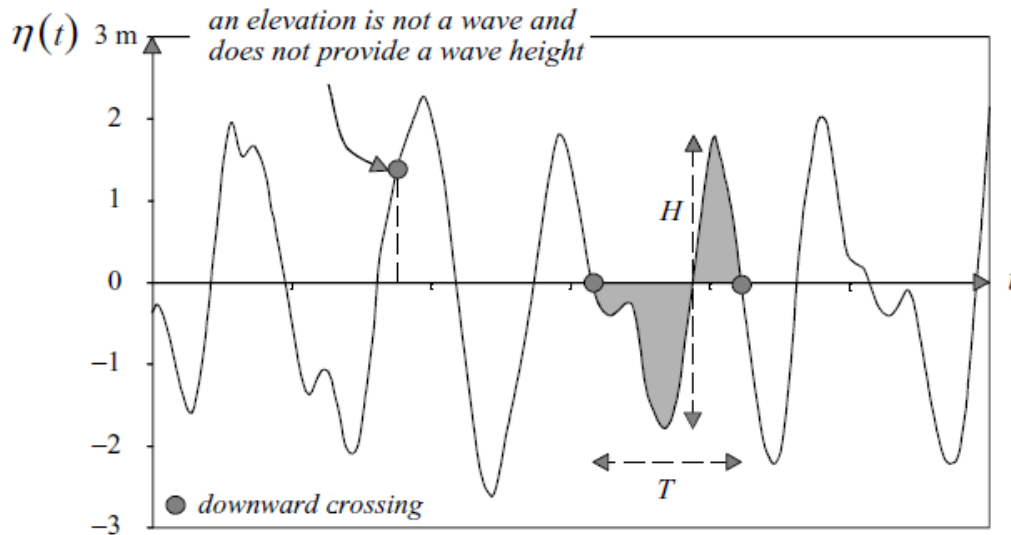
$$T_s = T_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{j=1}^{N/3} T_j$$

Όπου j , όχι ο αριθμός ακολουθίας των κυμάτων αλλά ο αριθμός τους βάσει ύψους κύματος (π.χ. $j=1$ το κύμα με το μεγαλύτερο ύψος κύματος, $j=2$ κύμα με το δεύτερο μεγαλύτερο ύψος κύματος κ.ο.κ.).

Αντίστοιχα με το ύψος κύματος, στα διαγράμματα του Storm (Nortek AS, 2005) αντί της T_s θα χρησιμοποιείται η $T_p \approx T_{1/3}$, η οποία επίσης προκύπτει από το φάσμα ενέργειας.

Τέλος όπως και στα ύψη κύματος, ένα ακόμα μέγεθος που χρησιμοποιείται είναι η περίοδος $T_{1/10}$, που ορίζεται ως ο μέσος όρος των περιόδων από το υψηλότερο ένα δέκατο των κυμάτων του μητρώου:

$$T_{1/10} = \frac{1}{N/10} \sum_{j=1}^{N/10} T_j$$



Σχήμα 2.2 - Σχηματική απεικόνιση του ύψους και της περιόδου κύματος.
Πηγή L. H. Holthuijsen 2007

2.4 Οπτική παρατήρηση-Μετρήσεις οργάνου

Μετρήσεις κύματος με τη βοήθεια οργάνου σε συχνή βάση, γίνονται σε συγκεκριμένα σημεία στις θάλασσες του κόσμου: κατά πλειοψηφία στις ακτές της Ευρώπης, στις Η.Π.Α., στον Καναδά και στην Ιαπωνία(αν και αυτό υποβοηθείται από την ανάπτυξη όλο και περισσότερων δορυφόρων παγκοσμίως). Στα υπόλοιπα μέρη του κόσμου ο μηχανικός χρησιμοποιεί άλλες μεθόδους να προσδιορίσει τα κυματικά χαρακτηριστικά. Οι βασικότερες εναλλακτικές είναι: οι δορυφορικές μετρήσεις, η οπτική παρατήρηση και υπολογιστικές μέθοδοι (Leo H. Holthuijsen,2007).

Για το λόγο αυτό είναι εμφανής η αιτία για την οποία ένας μηχανικός είναι σημαντικό να γνωρίζει τη συνάφεια της οπτικής παρατήρησης με το αποτέλεσμα της μέτρησης ενός οργάνου. Βάσει αποτελεσμάτων ορισμένων πειραμάτων που έχουν διεξαχθεί, προκύπτει πως η ταύτιση του $H_{1/3}$ με το οπτικά εκτιμώμενο ύψος H_v είναι αποδεκτή.

Η σχέση τους μπορεί να αποτυπωθεί ως:

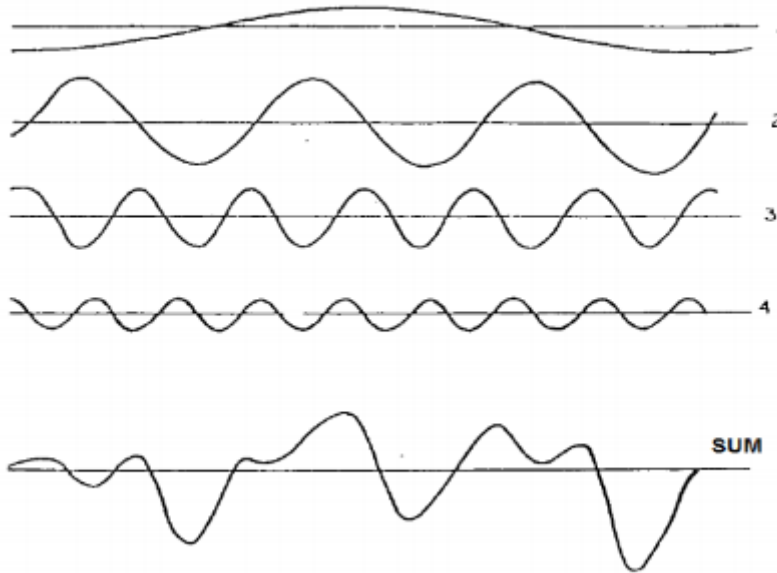
$$H_{1/3} = 1,67H_v^{0,77}, \text{ δηλαδή, } H_{1/3} \approx H_v.$$

Αντιθέτως από τα ίδια πειράματα προκύπτει ότι, η οπτικά μετρήσιμη σημαντική περίοδος κύματος T_v δεν συμπίπτει με την σημαντική περίοδο κύματος που προκύπτει από τις μετρήσεις $T_{1/3}$.

$$T_{1/3} = 2,83T_v^{0,44}, \text{ άρα εμφανώς } T_{1/3} \neq T_v.$$

2.5 Φασματική περιγραφή των κυματικών διαταραχών

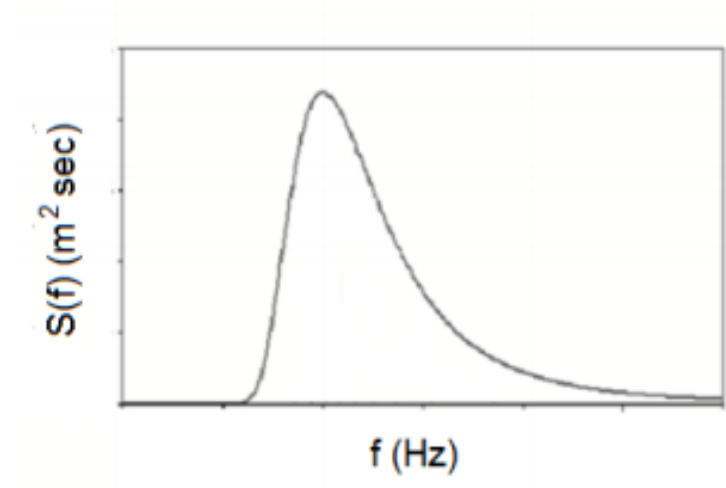
Μια ανεμογενής θαλάσσια διαταραχή συντίθεται από μια απειροσειρά μονοχρωματικών κυμάτων με χαρακτηριστικά (μέγεθος, συχνότητα, διεύθυνση μεταδόσεως) εμφανιζόμενα κατά στοχαστικό τρόπο.



Σχήμα 2.3 - Σύνθεση τεσσάρων μονοχρωματικών κυμάτων μεταδιδόμενων προς την ίδια κατεύθυνση Πηγή: Michel W.H.(1999)

Στο σχήμα δείχνεται η σύνθεση μόλις τεσσάρων μονοχρωματικών κυμάτων διαφορετικού μεγέθους και συχνότητας μεταδιδόμενων προς την ίδια κατεύθυνση, ώστε να γίνει αισθητό πώς ο συντιθέμενος κυματισμός παύει να χαρακτηρίζεται από την συμμετρία και αρμονικότητα των συνθετικών του μερών, τόσο χρονικά όσο και χωρικά.

Η περιγραφή μιας κυματικής διαταραχής, όπως και οποιασδήποτε άλλης στοχαστικής διαδικασίας, προϋποθέτει την ύπαρξη καταγραφών και βασίζεται σε μεθόδους χρονοσειρών. Οι καταγραφές κυματικής διαταραχής υφίστανται στατιστική επεξεργασία και φασματική ανάλυση. Κεντρική ιδέα της τελευταίας είναι η κατανόηση των ιδιοτήτων της καταγεγραμμένης συνάρτησης μέσω της αποσύνθεσής της σε αρμονικές διαφορετικών συχνοτήτων. Εργαλείο για την φασματική ανάλυση των καταγεγραμμένων χρονοσειρών αποτελεί η μέθοδος του διακριτού μετασχηματισμού Fourier, τα αποτελέσματα της οποίας μπορούν να εκτιμηθούν γρήγορα από τους υπολογιστές χρήσει αλγορίθμων γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (FFT). Μέσω του μετασχηματισμού Fourier αντιστοιχίζεται η εκάστοτε καταγεγραμμένη στην περιοχή του χρόνου συνάρτηση κυματικής διαταραχής με μία συνάρτηση στην περιοχή των συχνοτήτων. Η τελευταία ονομάζεται φάσμα ενέργειας ή συνάρτηση πυκνότητας φασματικής ενέργειας $S(f)$, καθώς περιγράφει την κατανομή της ενέργειας σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων.



Σχήμα 2.4 - Τυπικό διάγραμμα φάσματος ενέργειας

Το φασματογράφημα που παράγεται από το λογισμικό Storm, προκύπτει από την αναγωγή του παραπάνω φάσματος ενέργειας σε τριαξονικό σύστημα, του οποίου ο τρίτος άξονας είναι ο χρόνος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Μεθοδολογία - Πειραματική διάταξη

3.1 Μέθοδοι Παρατήρησης Κυματικών Διαταραχών

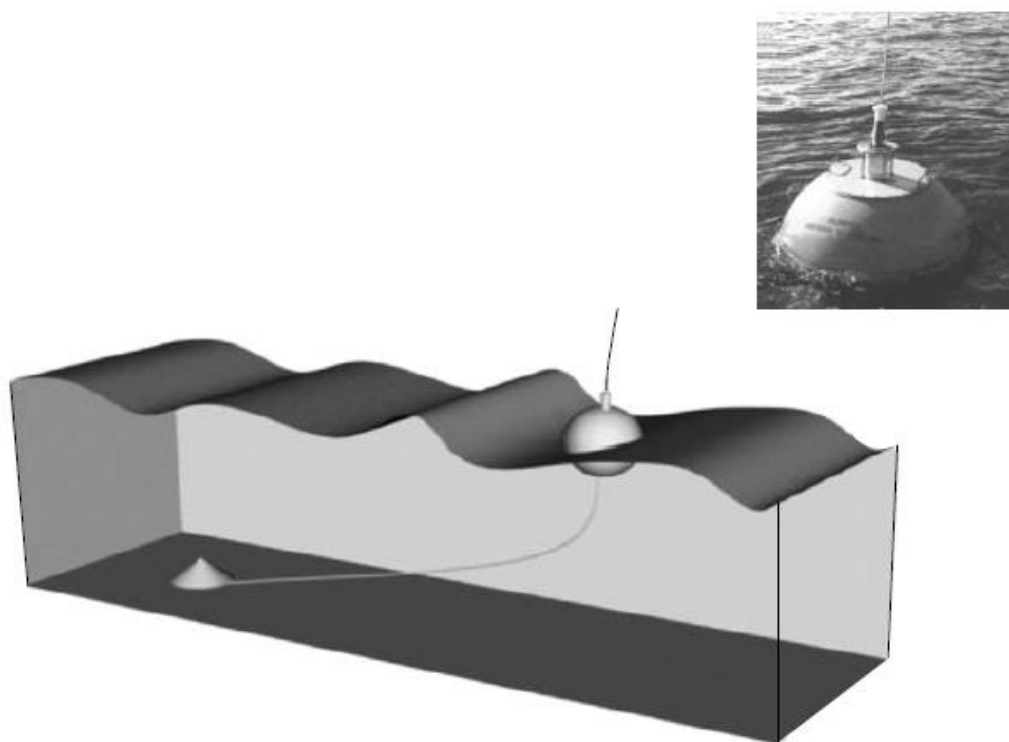
Η οπτική παρατήρηση των κυμάτων, αν και συχνά εξυπηρετεί πρακτικούς σκοπούς, δεν είναι αποτελεσματική στην λεπτομερή καταγραφή μιας κυματικής διαταραχής όσον αφορά το ύψος κύματος, την χρονική περίοδο και την κατεύθυνση. Η καταγραφή των μεγεθών αυτών σε τακτά χρονικά διαστήματα αποτελεί τη βάση με την οποία γίνεται δυνατή η πρόβλεψη των κυμάτων στο μέλλον. Για το λόγο αυτό είναι πάντα προτιμότερες οι μετρήσεις που λαμβάνονται από όργανα.

Οι τεχνικές μέτρησης με όργανα χωρίζονται σε *in situ* τεχνικές και τεχνικές τηλεπισκόπησης (*remote-sensing*). Η επιλογή της μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται κάθε φορά από τις ανάγκες του προβλήματος και τους διαθέσιμους πόρους. Κάθε μέθοδος έχει τους περιορισμούς και τις ιδιαιτερότητες της αναλογικά με την λειτουργική της απόδοση, ακρίβεια, απαιτήσεις συντήρησης και κόστους και με την αξιοπιστία της.

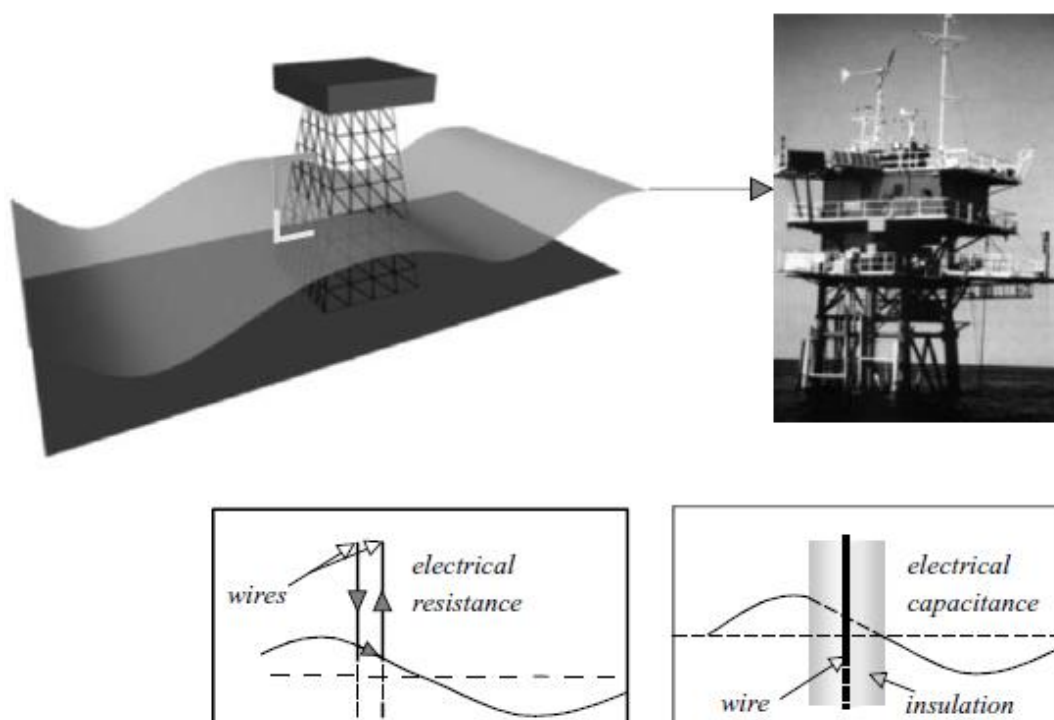
Δύο βασικοί περιορισμοί που συναντάμε σχετίζονται (α) με τη βασική αρχή λειτουργίας του ίδιου του οργάνου (π.χ. μετρητική σημαδούρα) και (β) στην ευαισθησία του οργάνου στις ακραίες συνθήκες του θαλάσσιου περιβάλλοντος (π.χ. διάβρωση, θαλάσσια μόλυνση κλπ). Τα όργανα που βρίσκονται εκτός του θαλάσσιου περιβάλλοντος επηρεάζονται από καιρικές και ατμοσφαιρικές συνθήκες (Leo H. Holthuijsen, 2007).

3.1.1 *In situ* τεχνικές

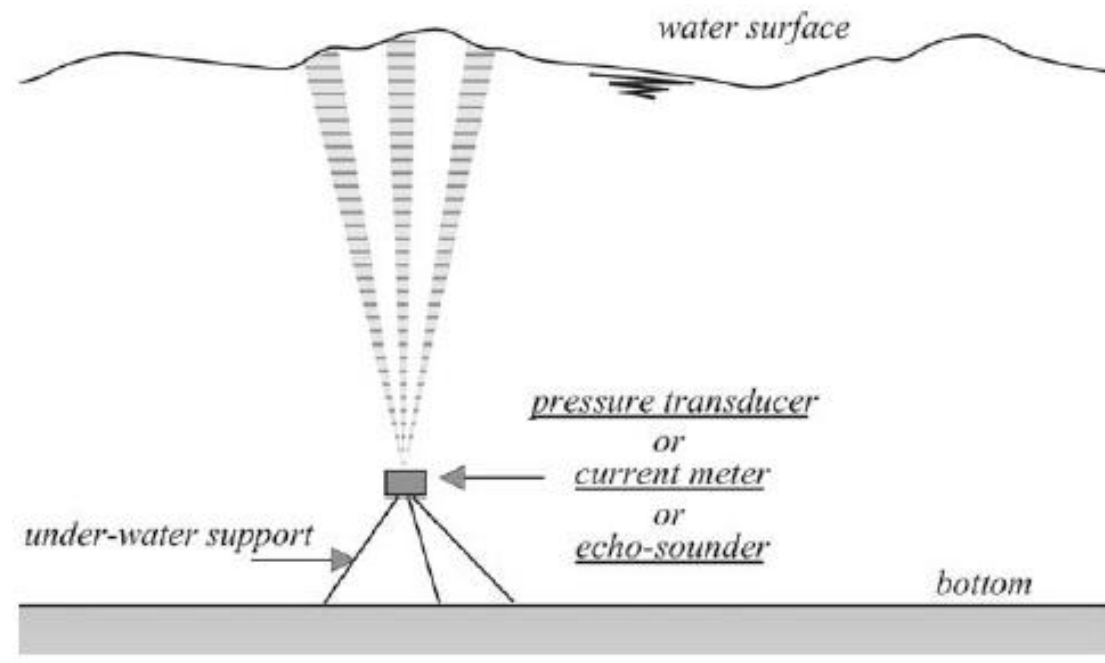
Ως *in situ* τεχνικές χαρακτηρίζονται εκείνες όπου το σύστημα μέτρησης βρίσκεται μέσα στη θάλασσα ή στην επιφάνεια της. Συνηθέστερα χρησιμοποιούνται μετρητικές σημαδούρες (*wave buoys*) και κύλινδροι (*wave poles*), ενώ σε άλλες περιπτώσεις αξιοποιούνται όργανα μέτρησης πίεσης, με υπερήχους ή μέτρησης ρευμάτων.



Σχήμα 3.1 - Σηματοδούρα στη θάλασσα (WAVERIDER, Datawell, Haarlem, Netherlands)
Πηγή L. H. Holthuijsen 2007



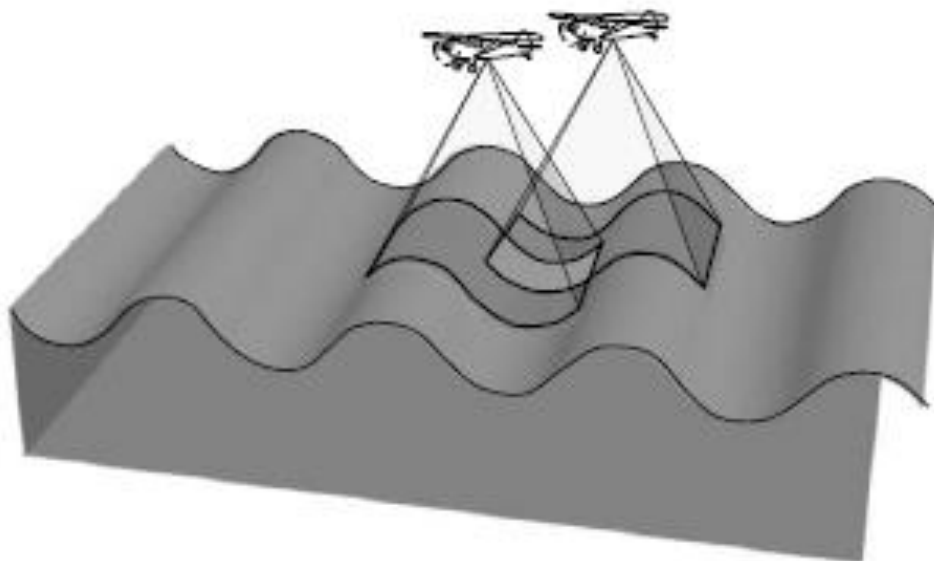
Σχήμα 3.2 - Δύο τεχνικές μέτρησης με κύλινδρο: ηλεκτρική αντίσταση και ηλεκτρική χωρητικότητα Πηγή L. H. Holthuijsen 2007



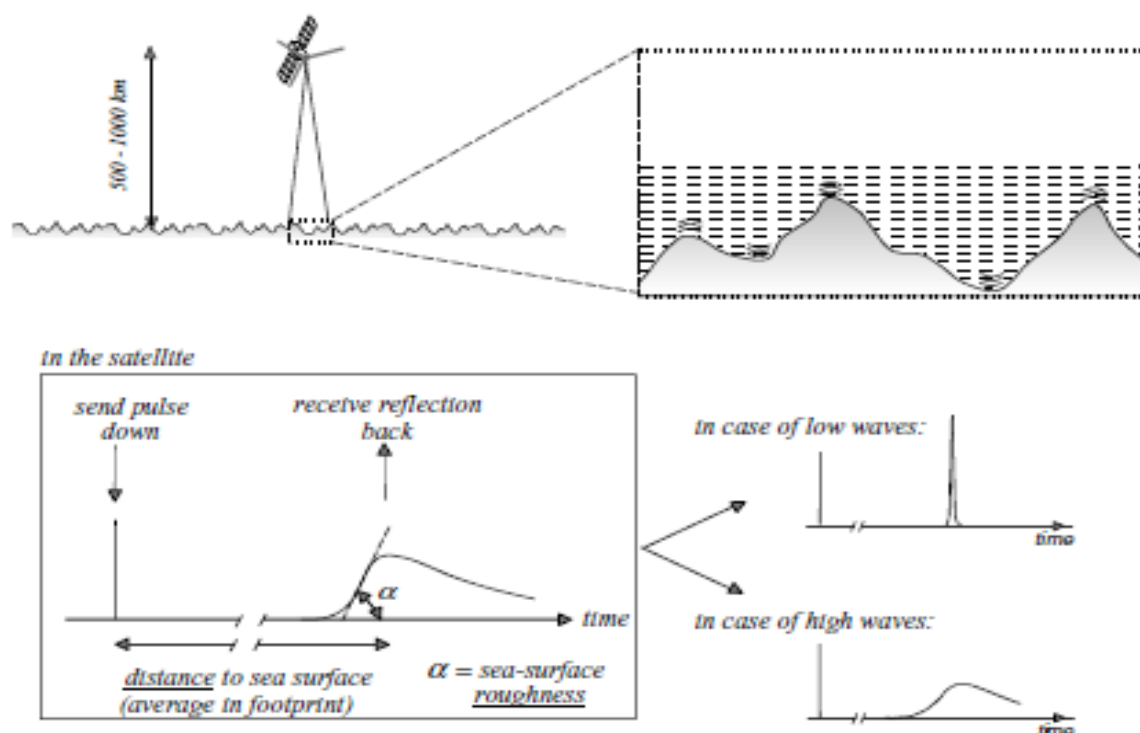
Σχήμα 3.3 - Όργανο μέτρησης τοποθετημένο στον πυθμένα της θάλασσας
Πηγή L. H. Holthuijsen 2007

3.1.2 Remote-sensing τεχνικές (Τεχνικές τηλεπισκόπησης)

Στις τεχνικές τηλεπισκόπησης τα μετρητικά όργανα είναι προσδεμένα πάνω από την επιφάνεια του νερού σε κάποια σταθερή ή κινητή πλατφόρμα. Μια τέτοια πλατφόρμα μπορεί να είναι ένας πύργος παρατήρησης μέσα στη θάλασσα, ένα πλοίο, ένα αεροπλάνο ή ένας δορυφόρος, ενώ κάποια όργανα μπορούν να τοποθετηθούν στην στεριά. Σαν βασική αρχή λειτουργίας τα όργανα αυτά εκπέμπουν κύματα ορατού ή υπέρυθρου φωτός ή σημάτων radar και λαμβάνουν πίσω την αντανάκλασή τους από την επιφάνεια της θάλασσας.



Σχήμα 3.4 - Στερεοφωτογραφία: Χρήση δύο επικαλυπτόμενων αεροφωτογραφιών για αποτύπωση της κατάστασης της επιφάνειας του νερού Πηγή L. H. Holthuijsen 2007



Σχήμα 3.5 - Αλτιμετρία με χρήση ραντάρ από δορυφόρο Πηγή L. H. Holthuijsen 2007

Η πιο σημαντική διαφορά τους από τις *in situ* τεχνικές είναι η δυνατότητα κάλυψης μεγάλων εκτάσεων σχεδόν ταυτόχρονα ή σε σύντομο χρονικό διάστημα, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται δορυφόρος. Φυσικά, όμως, οι μέθοδοι αυτές είναι συχνά πειραματικές και πολύ πιο δαπανηρές.

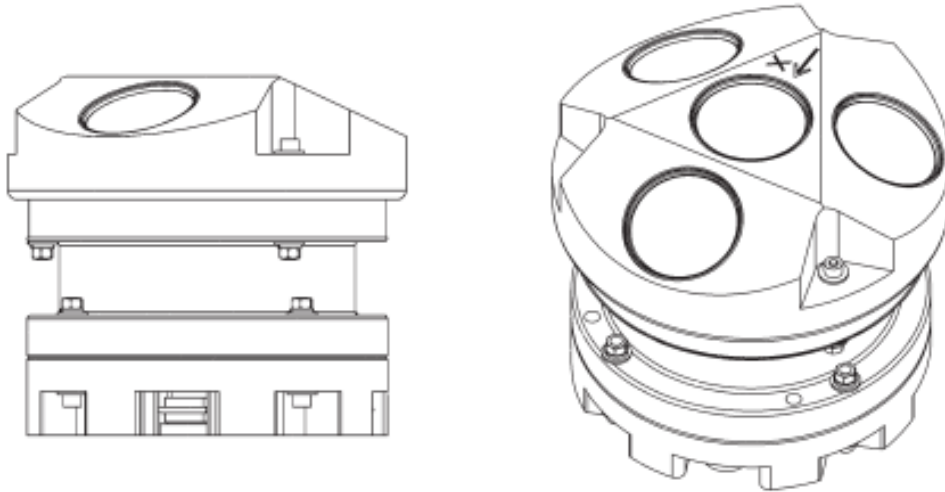
3.1.3 Τελική επιλογή μετρητικού οργάνου

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε *in situ* τεχνική και το μετρητικό όργανο AWAC (Acoustic Wave and Current meter) της εταιρίας Nortek, το οποίο διαθέτε το Εργαστήριο Φυσικών Καταστροφών, Τσουνάμι και Παράκτιας Μηχανικής της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το AWAC εγκαθίσταται στο βυθό της θάλασσας και μετράει ταυτόχρονα ύψος, περίοδο και κατεύθυνση κύματος και το συνολικό προφίλ των ρευμάτων. Εκτός από αυτές τις βασικές παραμέτρους του κύματος, διαθέτει αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας και πίεσης. Δίνει τη δυνατότητα μέτρησης όλων των ειδών κύματος. Τα δεδομένα που συλλέγονται αποθηκεύονται στην εσωτερική μνήμη που διαθέτει το όργανο και στη συνέχεια με ειδικά λογισμικά γίνεται η ανάλυση τους και η μετατροπή τους σε χρήσιμα διαγράμματα.

3.2 Αρχή λειτουργίας του AWAC

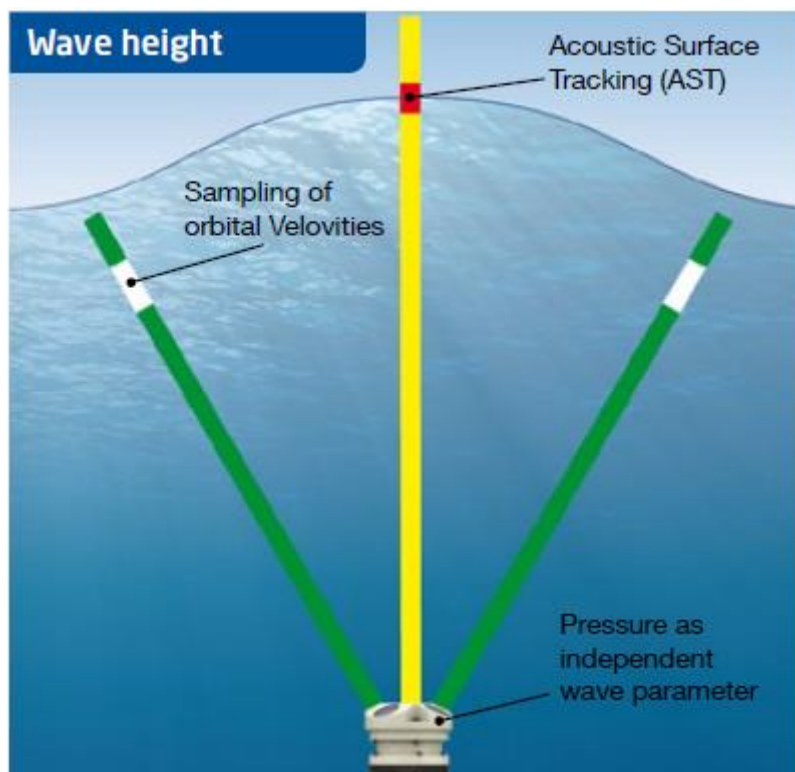
Στην κεφαλή του οργάνου είναι τοποθετημένοι τέσσερεις ακουστικοί πομποί και ένας αισθητήρας πίεσης. Επιπλέον, το όργανο διαθέτει αισθητήρα κλίσης, θερμοκρασίας και πυξίδα η οποία σε συνδυασμό με τον αισθητήρα κλίσης δίνουν το διάνυσμα της ταχύτητας σε παγκόσμιες συντεταγμένες. (Nortek AS, 2005)



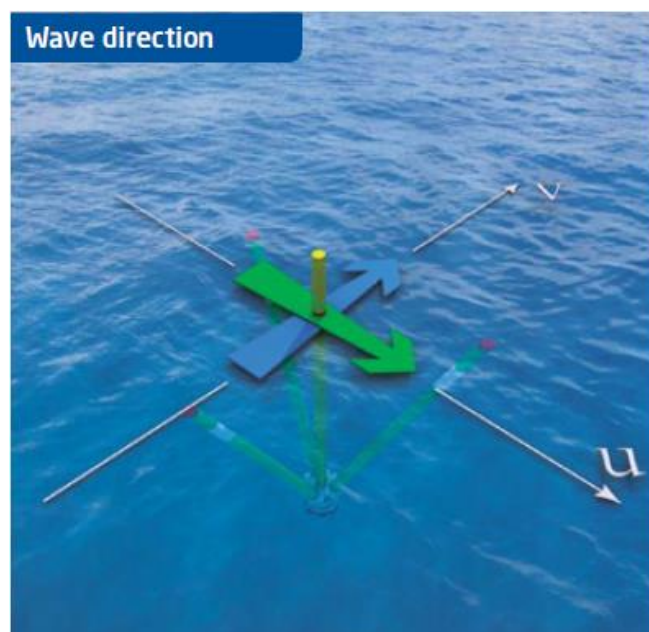
Σχέδιο 3.1 - Σχέδια της βασικής δομής του οργάνου AWAC
Πηγή: Nortek AS(2005)

Το AWAC λειτουργεί αξιοποιώντας το φαινόμενο Doppler. Ένας μικρός ηχητικός παλμός εκπέμπεται με κατεύθυνση προς την επιφάνεια της θάλασσας, με τέτοιο τρόπο ώστε όλη η ακτινοβολία να συγκεντρώνεται σε μία στενή δέσμη. Μετρώντας την διαφορά στη συχνότητα του ηχητικού παλμού που λαμβάνει πίσω υπολογίζει την ταχύτητα του κύματος στην επιφάνεια της θάλασσας. Συγκεκριμένα, ο ηχητικός παλμός ανακλάται από μικρά σωματίδια (κυρίως ζωοπλαγκτόν) που επιπλέουν στην επιφάνεια. Τα σωματίδια αυτά λόγω του πολύ μικρού τους μεγέθους κινούνται με την ταχύτητα του νερού και άρα η μέτρηση είναι ακριβής. Συνδυάζοντας τις ταχύτητες από τους τέσσερεις πομπούς και γνωρίζοντας την σχετική τους θέση παράγεται το τρισδιάστατο διάνυσμα της ταχύτητας.

Με παρόμοιο τρόπο υπολογίζεται και το ύψος κύματος. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το χαρακτηριστικό AST (Acoustic Surface Tracking), το οποίο λειτουργεί ουσιαστικά σαν ένας ανιχνευτής ακουστικών κυμάτων. Ο κεντρικός πομπός μεταδίδει ένα μικρό ηχητικό παλμό αντίστοιχο με αυτό στην περίπτωση υπολογισμού της ταχύτητας κύματος. Η χρονική καθυστέρηση του ανακλώμενου ηχητικού σήματος μεταφράζεται σε χρονοσειρά της ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας. Η ακρίβεια της μέτρησης της απόστασης μέχρι την επιφάνεια είναι της τάξης του 1 mm. Η μέθοδος AST επιλέγεται στη συγκεκριμένη μελέτη καθώς με αυτή δεν τίθενται περιορισμοί λόγω του βάθους πόντισης του οργάνου, σε αντίθεση με άλλες μεθόδους που χρησιμοποιούν αισθητήρες πίεσης. Το AST δίνει, επίσης, τη δυνατότητα απευθείας υπολογισμού των παραμέτρων του κύματος από τα ακατέργαστα δεδομένα, όπως το H_{max} , $H_{1/10}$, T_{mean} κ.α. (Nortek AS, 2005)



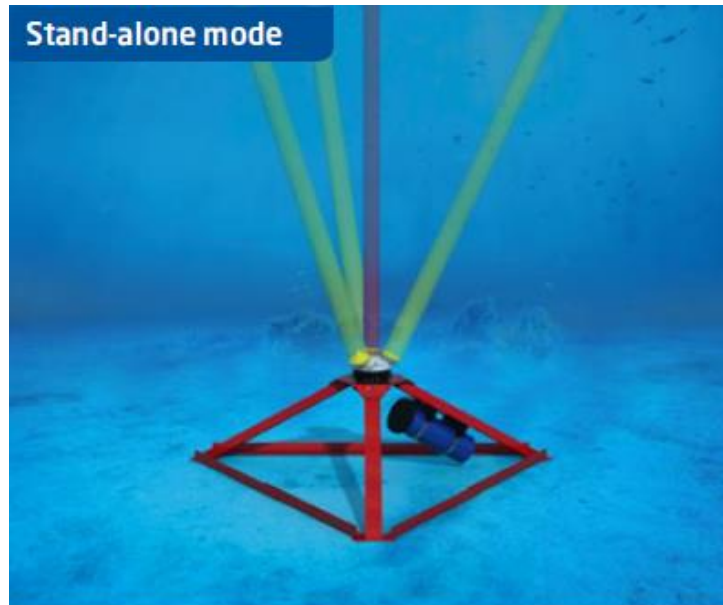
Σχήμα 3.6 - Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης ύψους κύματος με το όργανο AWAC
Πηγή: Nortek AS (2005)



Σχήμα 3.7 - Σχηματική αναπαράσταση μέτρησης της κατεύθυνσης κύματος με το όργανο AWAC
Πηγή: Nortek AS (2005)

3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το AWAC αποτελείται από τα εξής βασικά εξαρτήματα: την κεφαλή που φέρει τους αισθητήρες, την ηλεκτρονική μονάδα, την πυξίδα και την εξωτερική μπαταρία.



Σχήμα 3.8 - Σχηματική αναπαράσταση του οργάνου εγκατεστημένου στον πυθμένα της θάλασσας με πηγή ισχύος εξωτερική μπαταρία Πηγή: Nortek AS(2005)

Στην κεφαλή είναι τοποθετημένοι τέσσερις πομποί ακουστικών κυμάτων, ένας αισθητήρας πίεσης καθώς και αισθητήρες θερμοκρασίας και κλίσης. Η μονάδα των ηλεκτρονικών αποτελείται από δύο πλακέτες οι οποίες φέρουν τον πομπό ισχύος, αναλογική και ψηφιακή επεξεργασία σήματος, διατήρηση ισχύος και μνήμη για καταγραφή δεδομένων. Η πυξίδα μετράει το μαγνητικό πεδίο της Γης και σε συνδυασμό με τον αισθητήρα κλίσης επιτρέπει στο όργανο να διατηρεί σταθερή την πορεία του καθώς και να μετατρέπει τις μετρήσεις της ταχύτητας σε παγκόσμιες συντεταγμένες (Nortek AS,2005).

Πιο συγκεκριμένα, το AWAC εκπέμπει υπερήχους σε συχνότητα 600 kHz με τους τρεις ακουστικούς πομπούς- δέσμες να έχουν κλίση 25° από την κεντρική κατακόρυφη δέσμη. Επιλέχθηκε το όργανο να έχει ως πηγή ισχύος μπαταρίες (stand-alone mode) και να μην τροφοδοτείται μέσω καλωδίων από την ακτή. Το ονομαστικό φορτίο των μπαταριών είναι 12 V, μέγιστη τιμή ρεύματος τα 2A και τυπική τιμή κατανάλωσης ισχύος το 1W.

Το όργανο λειτουργεί σε θερμοκρασίες από -5°C μέχρι 35°C και πιέσεις μέχρι 50m στήλης ύδατος. Το εύρος μέτρησης ταχυτήτων των κυμάτων είναι 10 m/s οριζόντια και 5 m/s κατά μήκος των ακουστικών δεσμών με ακρίβεια 1% . Το μέγιστο βάθος στο οποίο μπορεί να τοποθετηθεί το όργανο είναι τα 40 m με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 4 Hz.

3.4 Εγκατάσταση του οργάνου και ανάκτηση δεδομένων

Στην διεκπεραίωση της πειραματικής διαδικασίας που περιελάμβανε τη ανέλκυση και την καθέλκυση του μετρητικού οργάνου συνέβαλαν ο καθηγητής Κωνσταντίνος Συνολάκης, ο υποψήφιος διδάκτορας Νίκος Μαραβελάκης, και ο επιστημονικός συνεργάτης του Εργαστηρίου Βασίλης Σκαναβής.

Το όργανο τοποθετήθηκε όπως προαναφέρθηκε ανοιχτά του λιμένα των Σφακίων σε βάθος 25 m και συντεταγμένες (N 35°11.127, E 24°08.373) .



Εικόνα 3.1 - Εικόνα του βυθού προσεγγιστικά το σημείο πόντισης

Αρχικά, για την στήριξη και τη σταθεροποίηση του οργάνου στο βυθό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε τα προηγούμενα χρόνια από το Εργαστήριο Φυσικών Καταστροφών, Τσουνάμι και Παράκτιας Μηχανικής της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης ειδική βάση από ανοξείδωτο ατσάλι σε μορφή τριγωνικής πυραμίδας. Εκτός αυτού κατασκευάστηκε ειδικά και προστατευτικό ανοξείδωτο κουτί στο οποίο τοποθετείται η μπαταρία. Το μήκος των πλευρών του τριγώνου της βάσης στήριξης είναι 1,9 m και το ύψος της βάσης είναι 0,51 m.



Εικόνα 3.2 - Φωτογραφία του οργάνου, της βάσης στήριξης και του κουτιού της μπαταρίας

Το AWAC είναι, επίσης, εξοπλισμένο με εξωτερικές μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης των 12 V για συνεχή παροχή ισχύος. Απαραίτητο προκαταρκτικό βήμα για την εκτέλεση του πειράματος ήταν η εκ των προτέρων φόρτιση των μπαταριών. Στη συνέχεια, γινόταν έλεγχος του φορτίου τους και τοποθέτησή τους στο ειδικό ανοξείδωτο κουτί. Το κουτί γεμιζόταν με ειδικό λάδι προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα αέρα στο εσωτερικό του. Στόχος ήταν στο εσωτερικό του κουτιού να υπάρχει -πρακτικά- ασυμπίεστο ρευστό ώστε να μην δημιουργούνται προβλήματα λόγω των μεγάλων πιέσεων που αναπτύσσονται στα βάθρα που τοποθετείται το όργανο. Μία φλάντζα στο επάνω μέρος του κουτιού προσέδιδε την απαραίτητη ελαστικότητα στο σύστημα υγρό- μεταλλικό περίβλημα. Η ελαστικότητα αυτή ήταν αναγκαία για την εκτόνωση της πίεσης που δημιουργείται από την μικρή ποσότητα αερίων που παράγονται κατά τη λειτουργία των μπαταριών. Ακόμη και αυτή η μικρή ποσότητα αερίου δύναται να δημιουργήσει προβλήματα και απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την ανέλκυση του οργάνου ώστε να μην προκληθεί θραύση της φλάντζας από την απότομη εκτόνωση των αερίων.

Επόμενο βήμα, μετά το κλείσιμο και σφράγισμα του κουτιού της μπαταρίας, ήταν η τοποθέτηση της κεφαλής του οργάνου πάνω στη βάση στήριξης καθώς και οι διάφορες καλωδιώσεις. Αφότου συνδεόταν με τον υπολογιστή γίνονταν οι

απαραίτητες ρυθμίσεις και η βαθμονόμηση του οργάνου. Ουσιαστικά το όργανο περιστρεφόταν γύρω από τον άξονά του ώστε να διαπιστωθεί η ακρίβεια του αισθητήρα κλίσης και διαβάζονταν οι μετρήσεις από τους αισθητήρες πίεσης και θερμοκρασίας, οι οποίες έπρεπε να είναι πολύ κοντά στις πραγματικές συνθήκες.

Η προσέγγιση του σημείου πόντισης γινόταν με ειδικό σκάφος το οποίο μας παρείχε το Καταδυτικό Κέντρο Σφακίων. Λόγω των πολύ ισχυρών ρευμάτων που σχεδόν πάντα υπάρχουν στην περιοχή δυσχεραινόταν η καθέλκυση του οργάνου, καθώς ήταν δύσκολο να παραμένει το σκάφος για μεγάλο χρονικό διάστημα στο ίδιο σημείο. Επομένως όλη η διαδικασία έπρεπε να γίνεται με γρήγορους ρυθμούς.

Στη συνέχεια, δύο δύτες έπεφταν στο νερό, ενώ η υπόλοιπη ομάδα κατέβαζε σταδιακά το όργανο προς το βυθό. Παράλληλα οι δύτες έλεγχαν τη διαδικασία ώστε το όργανο να κατεβαίνει ομαλά. Όταν το όργανο ήταν πλέον ακινητοποιημένο στο βυθό οι δύτες έλυναν τα σκοινιά, έλεγχαν ότι το έδαφος είχε -όσο ήταν δυνατό- μηδενική κλίση και ότι το όργανο στεκόταν σταθερά στη θέση εκείνη. Περαιτέρω σταθεροποίηση του οργάνου στο βυθό δεν ήταν απαραίτητη καθώς το βάρος της μεταλλικής κατασκευής και των μπαταριών ήταν αρκετό ώστε να το ακινητοποιήσει στο σημείο αυτό. Σε αυτό συνυπολογίζεται και η θέση του κέντρου βάρους που έχει σχεδιαστεί να βρίσκεται όσο πιο χαμηλά γίνεται για καλύτερη πρόσφυση στο έδαφος σε συνδυασμό με τη μεγάλη επιφάνεια που καλύπτει η μεταλλική βάση από ανοξείδωτο ατσάλι. Σημειώνεται ότι σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων δεν παρατηρήθηκε ποτέ μετακίνηση του οργάνου από την αρχική του θέση ακόμα και σε περιπτώσεις μεγάλων κυματικών φαινομένων.

Τη στιγμή που το όργανο έφτανε και σταθεροποιούνταν στο βυθό λαμβάνονταν οι ακριβείς συντεταγμένες του μέσω GPS, έτσι ώστε να είναι εύκολη η εύρεση και η ανάκτηση του την επόμενη φορά.

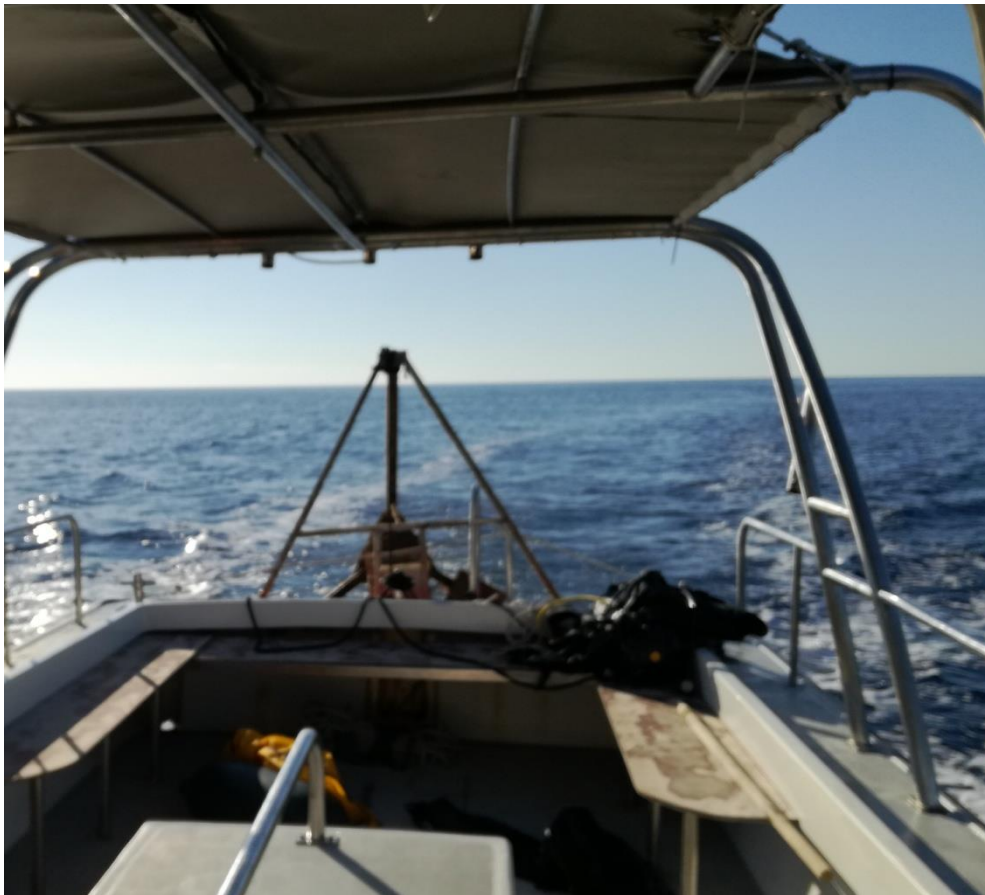
Με γνώμονα τη διάρκεια ζωής των μπαταριών οριζόταν και η χρονική στιγμή της ανέλκυσης του οργάνου και συλλογής των δεδομένων. Η ομάδα με το ίδιο σκάφος έφτανε στο σημείο όπου βρισκόταν το όργανο και δύο δύτες έπεφταν στο νερό. Αφού εντόπιζαν το όργανο προσάρμοζαν επάνω του ένα ειδικό μπαλόνι ανέλκυσης. Το μπαλόνι ανέλκυσης φουσκώνεται μέσα στο νερό με χρήση φιάλης και σιγά-σιγά ανυψώνει το όργανο από τον πυθμένα. Ο συνδυασμός της αύξησης του όγκου του αέρα μέσα στο μπαλόνι λόγω της μείωσης της εξωτερικής πίεσης καθώς το μπαλόνι ανυψώνεται, έχει ως αποτέλεσμα στην αύξηση της ταχύτητας ανέλκυσης. Όπως προαναφέρθηκε η γρήγορη και απότομη ανέλκυση μπορεί να προκαλέσει εκτόνωση των αερίων της μπαταρίας μέσα στο ειδικό κουτί και θραύση του. Για να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, καθώς το όργανο ανυψώνεται με αυξανόμενη ταχύτητα φροντίζουμε να αφαιρούμε μια ποσότητα αέρα από το μπαλόνι προκειμένου να μειωθεί ο όγκος του αέρα στο εσωτερικό του και κατ' επέκταση η ταχύτητα ανύψωσής του.

Όταν το όργανο έφτανε στην επιφάνεια της θάλασσας και μεταφερόταν στο σκάφος, καθαριζόταν πολύ σχολαστικά, ελέγχονταν τυχόν διαρροές στην μπαταρία και γινόταν φόρτισή της.

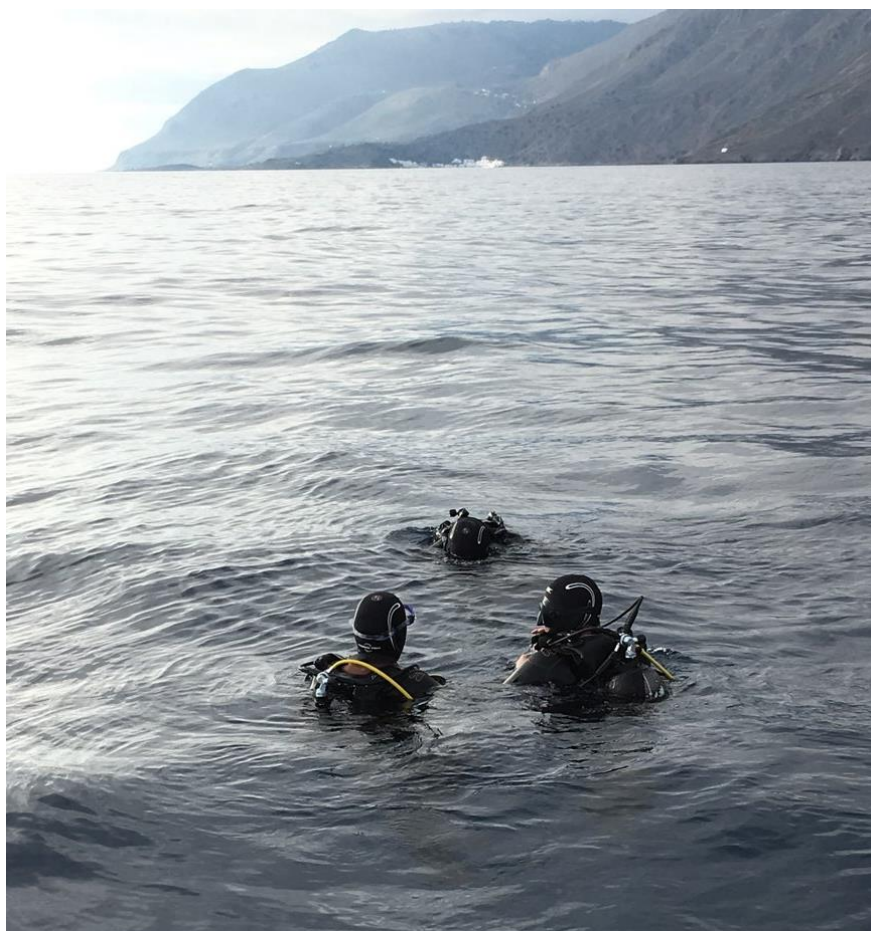
Τα ακατέργαστα δεδομένα που είχαν αποθηκευτεί στην εσωτερική μνήμη εξάγονταν στη συνέχεια σε έναν Η/Υ. Στην δική μας εφαρμογή τα διαστήματα πόντισης του οργάνου ήταν:

6/4/2017-20/8/2017, 16/10/2017-8/1/2018, 11/1/2018-22/3/2018, 15/8/2018-19/2/2019 και 19/2/2019-20/10/2019.

Στη συνέχεια με το ειδικό λογισμικό του AWAC, Storm, τα δεδομένα μετατρέπονται σε αρχεία ASCII ώστε να είναι διαχειρίσιμα από τον χρήστη.



Εικόνα 3.3 - Το όργανο κατά τη μεταφορά του στο σημείο πόντισης



Εικόνα 3.4 - Οι δύτες

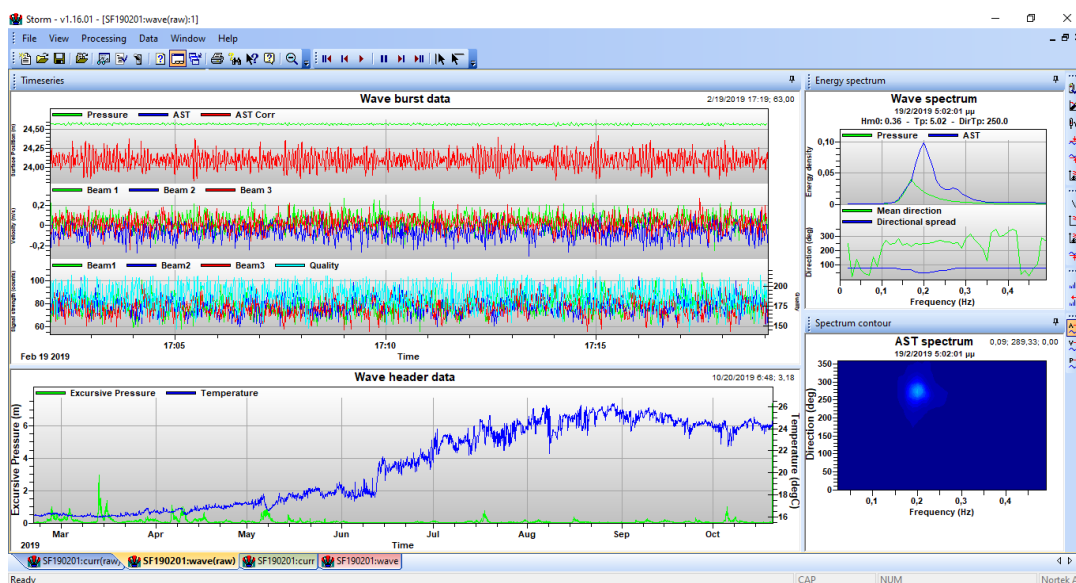


Εικόνα 3.5 - Η ομάδα στο λιμάνι των Σφακίων λίγο πριν την ανέλκυση του οργάνου

3.5 Λογισμικό Storm

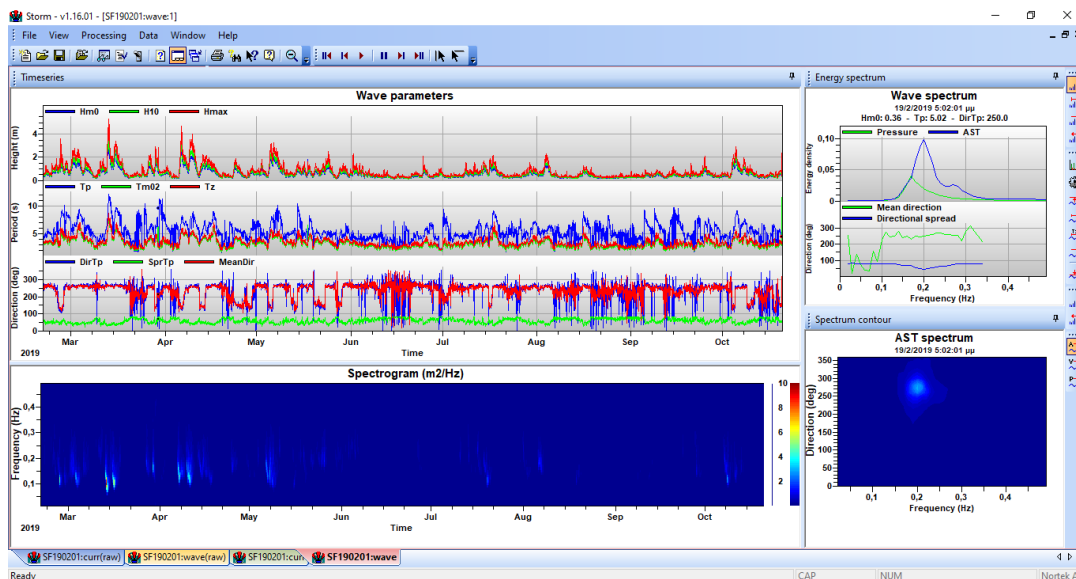
Για την επεξεργασία των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Storm, το οποίο διαθέτει γραφικό περιβάλλον και δίνει τη δυνατότητα διαγραμματικής αναπαράστασης των παραμέτρων του κύματος.

Παρακάτω φαίνεται το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού στο pre-processing στάδιο με τα διαγράμματα της μεταβολής της επιφάνειας της θάλασσας, της θερμοκρασίας και της πίεσης καθώς και το φάσμα της ενέργειας.



Σχήμα 3.9 - Γραφικό περιβάλλον Storm στο pre-processing στάδιο

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων το λογισμικό μας παρέχει τα παρακάτω πιο χρήσιμα και εποπτικά διαγράμματα.



Σχήμα 3.10 - Γραφικό περιβάλλον Storm στο post-processing στάδιο

Για την επεξεργασία των μετρήσεων δίνονται διάφορες επιλογές από το λογισμικό.

Επιλέχθηκε σαν μέθοδος επεξεργασίας η MLMST (Maximum Likelihood Method with Surface Tracking) η οποία συνδυάζει την MLM μέθοδο με το χαρακτηριστικό AST. Ο υπολογισμός του φάσματος ενέργειας έγινε με την επιλογή “Optimized” που δίνει το λογισμικό Storm. Το φάσμα σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο τις μετρήσεις του AST ενώ αν υπάρχουν ατέλειες σε πάνω από 10% των μετρήσεων αξιοποιεί τις μετρήσεις των αισθητήρων πίεσης και ταχύτητας.

Πιο συγκεκριμένα, το φάσμα της ενέργειας υπολογίζεται από τις χρονοσειρές των μη επεξεργασμένων μετρήσεων χρησιμοποιώντας αλγορίθμους FFT (Fast Fourier Transformation). Το πλήθος των στοιχείων των δειγμάτων μιας χρονοσειράς μπορεί να είναι 512, 1024 και 2048 με αντίστοιχες συχνότητες δειγματοποίησης 0,5 Hz, 1 Hz και 2 Hz. Μεγαλύτερα δείγματα δίνουν ακριβέστερο φάσμα, όμως απαιτούν μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Δεδομένου ότι βάθος πόντισης ήταν μεγαλύτερο από 20m και για να επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια χρησιμοποιήθηκε συχνότητα 1 Hz όπως προτείνεται από τον κατασκευαστή. Με την χρήση AST διπλασιάζεται το πλήθος των δειγμάτων καθώς και η συχνότητα δειγματοποίησης.

Το λογισμικό επεξεργάζεται τις χρονοσειρές και παράγει τα διαγράμματα του ύψους κύματος, της περιόδου και της διεύθυνσης του ως προς το χρόνο για τα συνολικά διαστήματα πόντισης του οργάνου, τα οποία δίνουν πλήρη εικόνα για την συμπεριφορά των βασικών παραμέτρων του κύματος. Αποδίδει, επίσης, το φασματογράφημα, το φάσμα της ενέργειας και το φάσμα της κατεύθυνσης κύματος ως προς τη συχνότητα με τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από το AST.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Αποτελέσματα πειραματικής μελέτης

Από το πλήθος των δεδομένων και των διαγραμμάτων για τα κύρια χαρακτηριστικά του κύματος μας ενδιέφερε να εντοπίσουμε στιγμές ή χρονικές περιόδους με αξιοσημείωτα κυματικά φαινόμενα. Τέτοια μπορεί να ήταν τα μεγαλύτερα ύψη κύματος που καταγράφηκαν σε κάποια χρονική στιγμή ή μεγαλύτερες χρονικά περίοδοι εκτεταμένης κακοκαιρίας.

4.1 Σημαντικά κυματικά γεγονότα

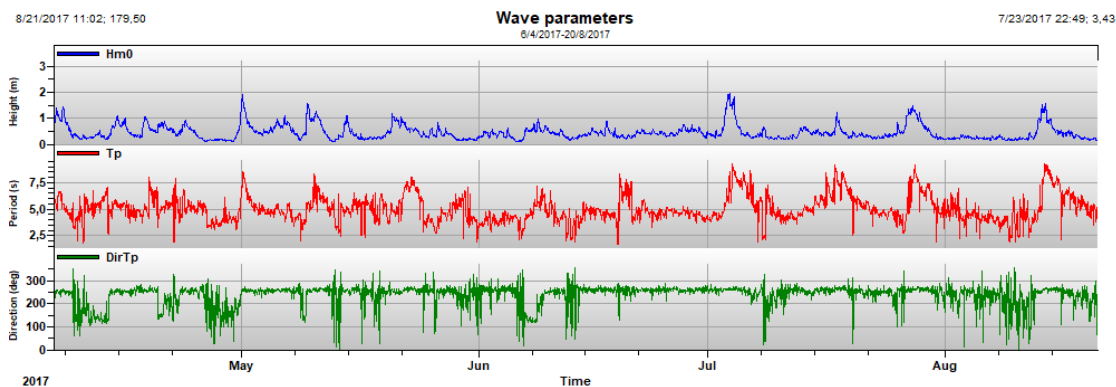
Η διαδικασία των μετρήσεων ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2017 και τερματίστηκε τον Οκτώβριο του 2019. Στο διάστημα των δύο αυτών χρόνων το όργανο κατέγραψε τις παρακάτω χρονικές περιόδους, ενώ ενδιάμεσα το όργανο έβγαине από τη θάλασσα με σκοπό την ανάκτηση των δεδομένων που είχαν συλλεχθεί:

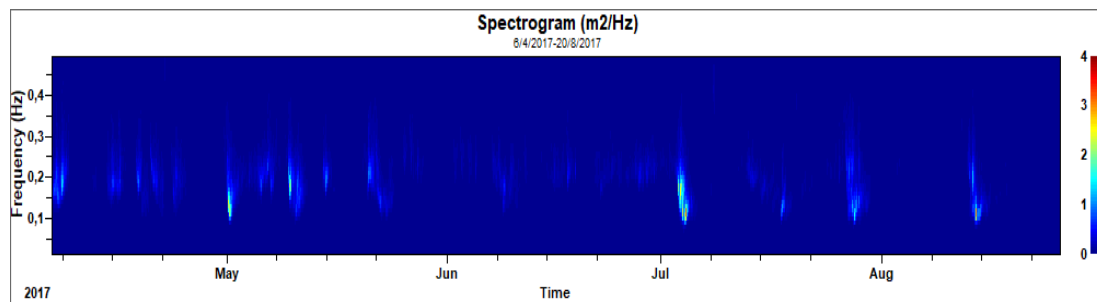
Περίοδος Πόντισης	Ημερομηνίες
1	6/4/17-20/8/17
2	16/10/17- 8/1/18
3	11/1/18- 22/3/18
4	15/8/18- 19/2/19
5	19/2/19- 20/10/19

Πίνακας 4.1: Χρονικές Περίοδοι Πόντισης

Μέσω του λογισμικού Storm προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα των πιο σημαντικών παραμέτρων των κυματικών διαταραχών ως προς το χρόνο καθώς και το φασματογράφημα.

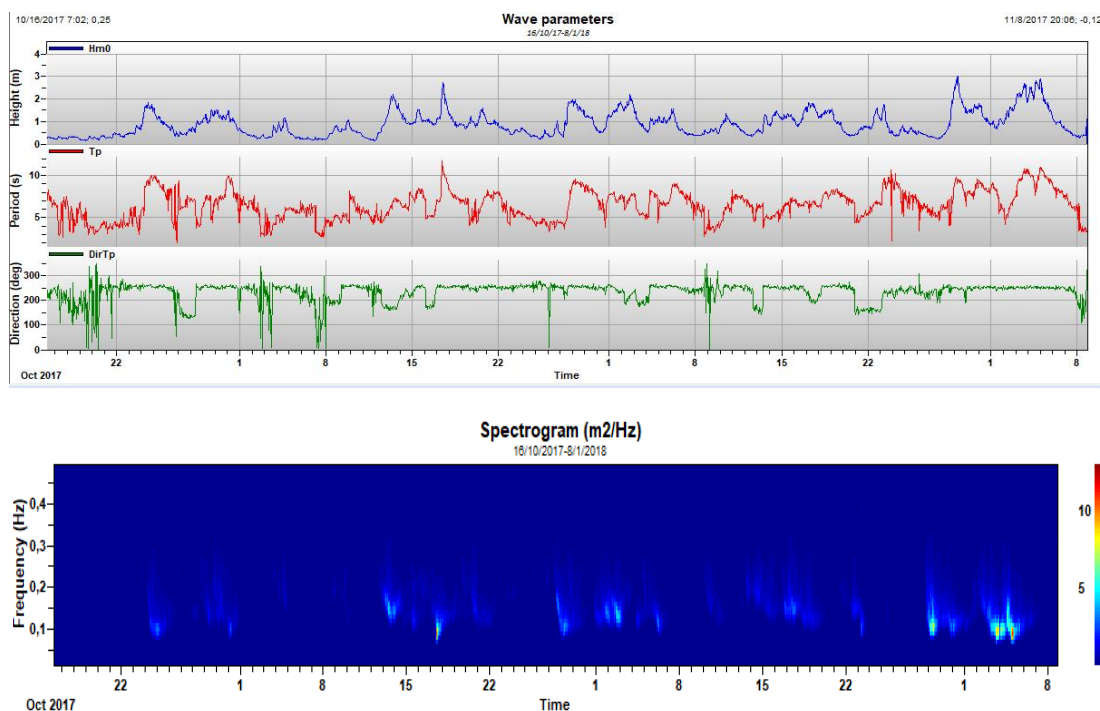
Όπως φαίνεται στο (Διάγραμμα 4.1), σε γενικές γραμμές από τον Απρίλιο μέχρι και τον Αύγουστο του 2017 τα ύψη κύματος είναι κάτω από 1,5 m και σε δύο περιπτώσεις φτάνουν τα 2 m. Αυτό συμβαίνει στις 1/5/2017 με $H_{m0} = 2,01$ m και περίοδο $T_p = 8,5$ sec και διεύθυνση 260° . Στις 3/7/2017 το ύψος κύματος έφτασε τα $H_{m0} = 1,9$ m, φαινόμενο σπάνιο για την εποχή, με περίοδο $T_p = 9,25$ sec και διεύθυνση 265° .





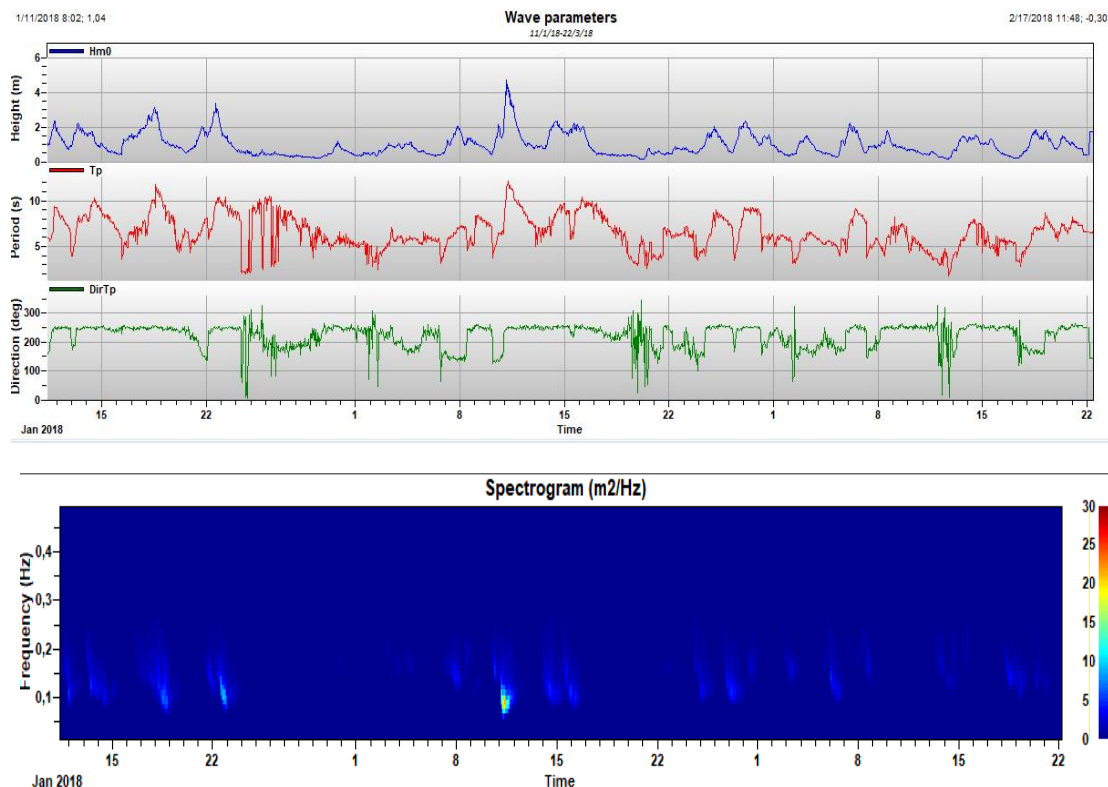
Διαγράμματα 4.1 - Περίοδος Πόντισης 1

Για την δεύτερη περίοδο βύθισης 16/10/17- 8/1/18 (Διάγραμμα 4.2) παρατηρούμε ότι τους φθινοπωρινούς μήνες τα κύματα δεν ξεπερνάνε κατά το μεγαλύτερο ποσοστό τους τα 2 m. Στις 29/12/17 το ύψος κύματος φτάνει τα 3 m με περίοδο $T_p=10$ sec και διεύθυνση 250° και μερικές μέρες αργότερα στις 4/1/18 – 5/1/18 έχουμε μια ολιγοήμερη κακοκαιρία με $H_{mo}=2-3$ m, $T_p=9-11$ sec και διεύθυνση 250° .



Διαγράμματα 4.2 - Περίοδος Πόντισης 2

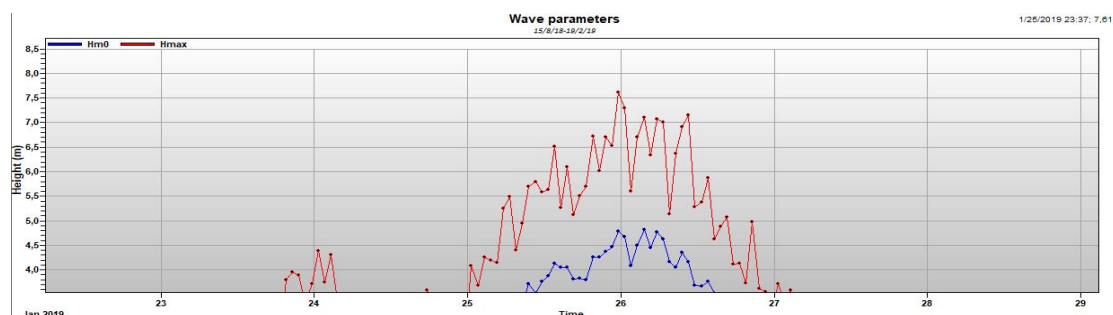
Στην τρίτη περίοδο πόντισης 11/1/18-22/3/18 παρατηρούνται τρία σημαντικά κυματικά γεγονότα, ως φαίνεται στο (Διάγραμμα 4.3). Στις 18/1/18 το ύψος κύματος φτάνει την τιμή $H_{mo}=3.09$ m με μεγάλη περίοδο $T_p=12$ sec και διεύθυνση νοτιοδυτική στις 250° . Στις 22/1/18 το ύψος κύματος είναι $H_{mo}=3.36$ m με περίοδο $T_p=9.78$ sec και ίδια διεύθυνση. Τέλος στις 11/2/18 παρατηρείται κύμα με $H_{mo}=4.70$ m, $T_p=10.34$ sec και κατεύθυνση 245° .



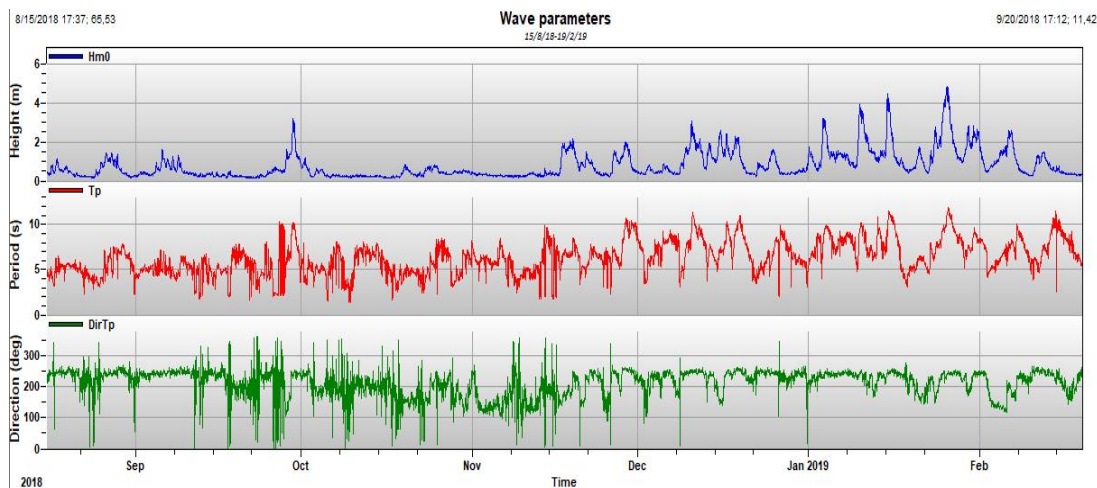
Διαγράμματα 4.3 - Περίοδος Πόντισης 3

Κατά την τέταρτη περίοδο 15/8/18- 19/2/19 (Διάγραμμα 4.5) τα σημαντικά κυματικά γεγονότα λαμβάνουν χώρα κατά κύριο λόγο τους χειμερινούς μήνες με τις κορυφές να φτάνουν τις μέγιστες τιμές τους τον Ιανουάριο. Εξαιρέση αποτελεί στις 29/9/18 κύμα με κορυφή $H_{m0} = 3.17$ m, περίοδο $T_p = 9.52$ sec και κατεύθυνση στις 233° . Στη συνέχεια παρατηρείται ισχυρή κακοκαιρία στις 10/12/18 – 19/12/18 με κορυφές που ξεκινούν από τα 2.4 m και φτάνουν μέχρι τα 3.1 m με κατεύθυνση νοτιοδυτική κοντά στις 250° . Στις 3/1/19 το σημαντικό ύψος κύματος H_{m0} φτάνει τα 3.2 m με περίοδο $T_p = 8$ sec και κατεύθυνση 228° . Στις 10/1/19 μετράται ύψος κύματος $H_{m0} = 3.9$ m κατεύθυνσης 228° και $T_p = 10.1$ sec. Στις 15/1/19 το ύψος κύματος είναι $H_{m0} = 4.45$ m με περίοδο $T_p = 9.1$ sec και κατεύθυνση 245° . Η πιο υψηλή κορυφή εμφανίζεται στις 26/1/19 με $H_{m0} = 4.81$ m, $T_p = 11.1$ sec και κατεύθυνση 240° .

Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι το μέγιστο στιγμιαίο ύψος κύματος είναι κατά πολύ μεγαλύτερο του σημαντικού μέγιστου ύψους κύματος, το οποίο απεικονίζεται στο διάγραμμα, δηλαδή φτάνει τα 7.6 m.

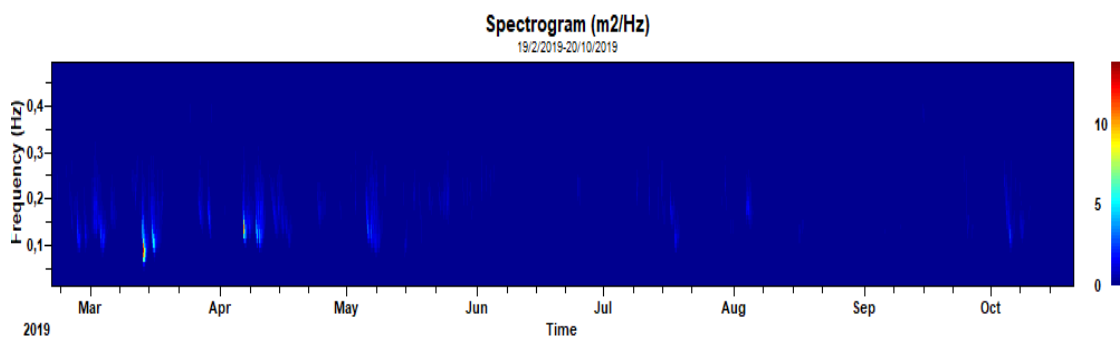
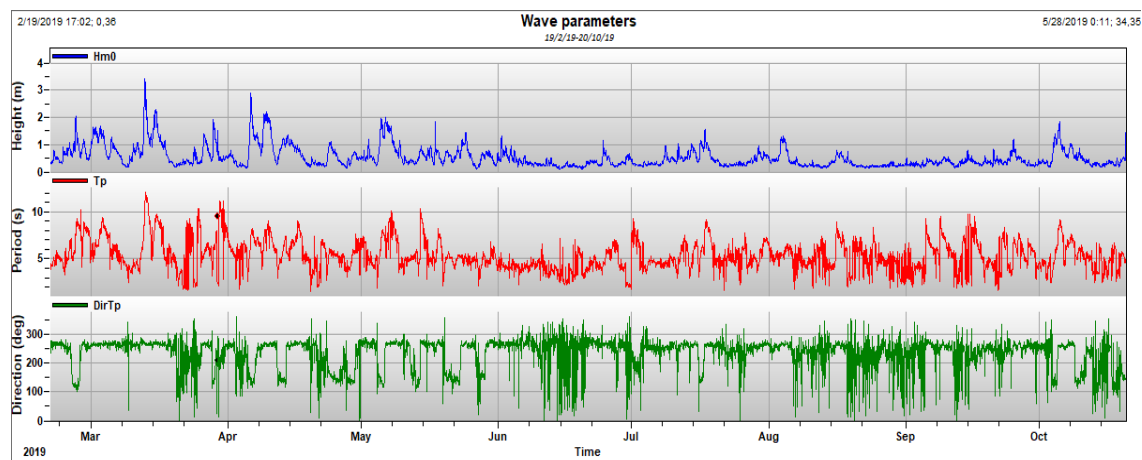


Διάγραμμα 4.4 - Σύγκριση σημαντικού με στιγμιαίο μέγιστο ύψος κύματος



Διάγραμμα 4.5 - Περίοδος Πόντισης 4

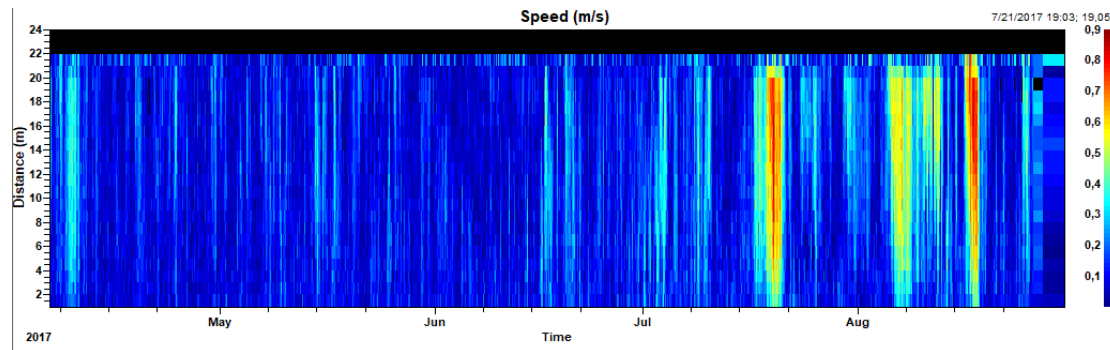
Τέλος, παρατηρώντας το (Διάγραμμα 4.6), από τις 19/2/19 μέχρι τις 20/10/19 τα ύψη κύματος έχουν χαμηλότερες τιμές σε σχέση με τις τιμές που εμφανίστηκαν τον Ιανουάριο του 2019. Συγκεκριμένα, στις 13/3/19 έχουμε ύψος κύματος $H_{m0} = 3.4$ m με περίοδο $T_p = 11.1$ sec και κατεύθυνση 267° . Τον Απρίλιο συναντάμε ακόμα μια υψηλή κορυφή, στις 6/4/19, με $H_{m0} = 2.9$ m, $T_p = 7.3$ sec και κατεύθυνση 260° .



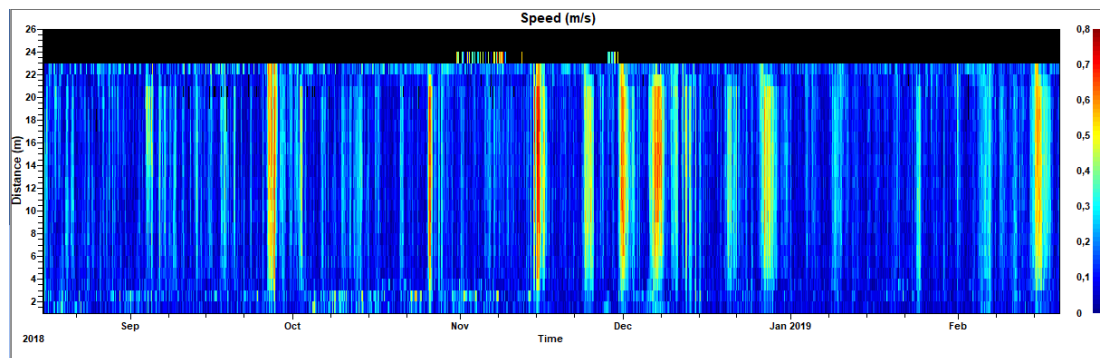
Διαγράμματα 4.6 - Περίοδος Πόντισης 5

4.2 Ρεύματα

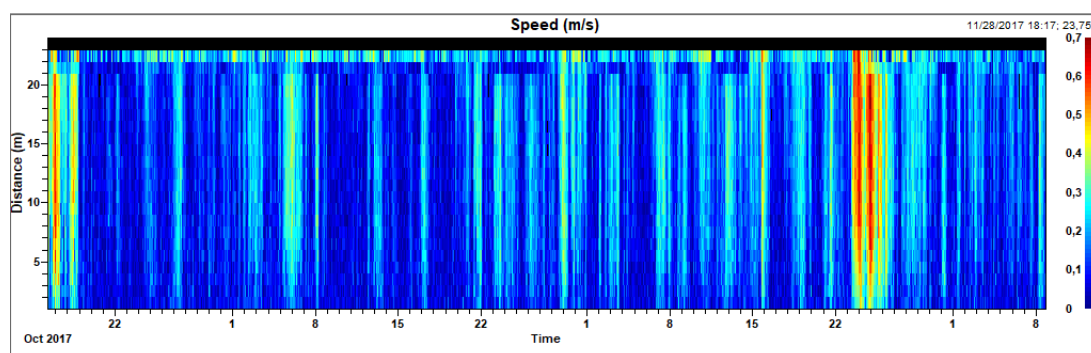
Μια επιπλέον δυνατότητα του Storm είναι ο υπολογισμός της ταχύτητας των ρευμάτων συναρτήσει του βάθους της θάλασσας. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η ταχύτητα των ρευμάτων ως προς το χρόνο σε διάφορα βάθη.



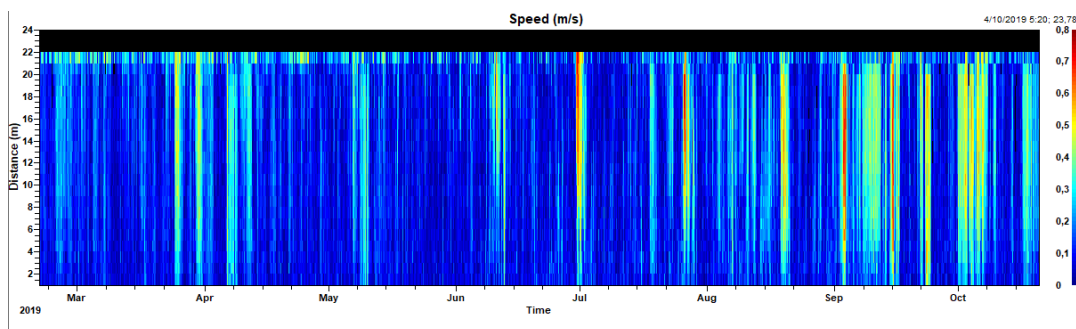
Διάγραμμα 4.7 - Περίοδος Πόντισης 1



Διάγραμμα 4.8 - Περίοδος Πόντισης 2



Διάγραμμα 4.9 - Περίοδος Πόντισης 3



Διάγραμμα 4.10 - Περίοδος Πόντισης 4

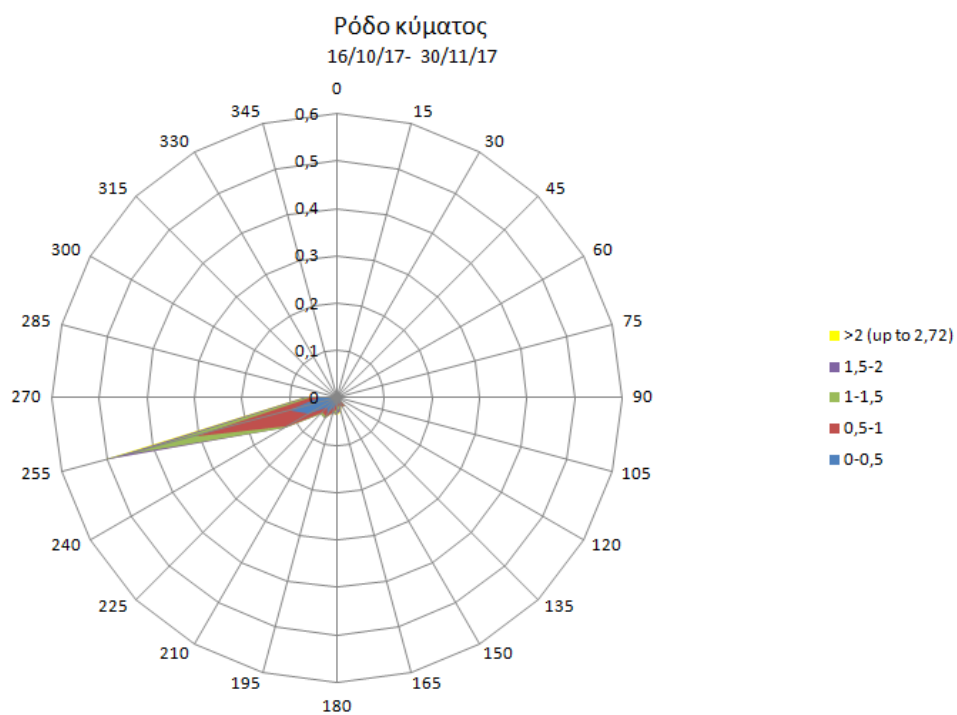
Με βάση τα παραπάνω (Διαγράμματα 4.7-4.10) είναι εμφανής η συχνή παρουσία ισχυρών ρευμάτων στην περιοχή. Σε γενικές γραμμές τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου, ανεξαρτήτως εποχής. Προσεγγιστικά, οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας φτάνουν τα 0.9 m/s, ενώ συχνές είναι και οι ταχύτητες της τάξης των 0.4- 0.6 m/s.

4.2 Κυματικές συνθήκες ανά εποχή

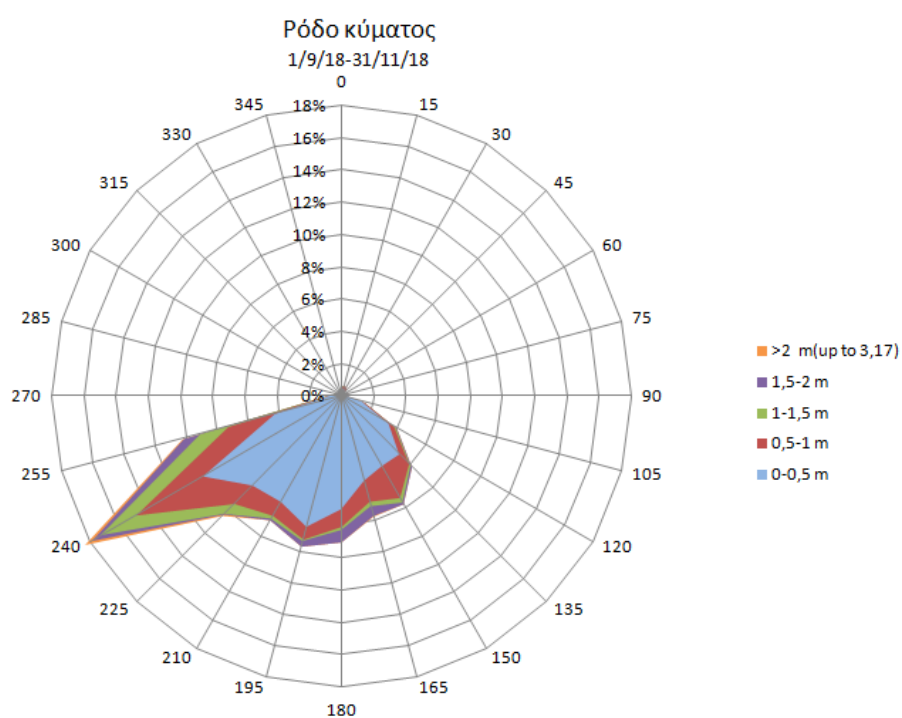
Συνολικά τα πειραματικά δεδομένα καλύπτουν χρονικό διάστημα δύο χρόνων με κάποιες ενδιάμεσες περιόδους κατά τις οποίες δεν γίνονταν μετρήσεις. Στις περιόδους αυτές υπήρξε απώλεια μετρήσεων λόγω αστοχίας των μπαταριών που είχε σαν αποτέλεσμα την αλλαγή τους, ενώ σε άλλες περιπτώσεις το όργανο δεν βυθίστηκε λόγω αντικειμενικών προβλημάτων.

Συνεπώς, είναι δυνατή η σύγκριση των κυματικών συνθηκών κάθε εποχής ανά έτος. Αυτού του είδους η σύγκριση δίνει τη δυνατότητα να αντιληφθούμε πώς μεταβάλλονται οι συνθήκες μέσα στο έτος, αλλά και κατά πόσο τα φαινόμενα αυτά που μετράμε είναι επαναλαμβανόμενα κάθε χρονιά.

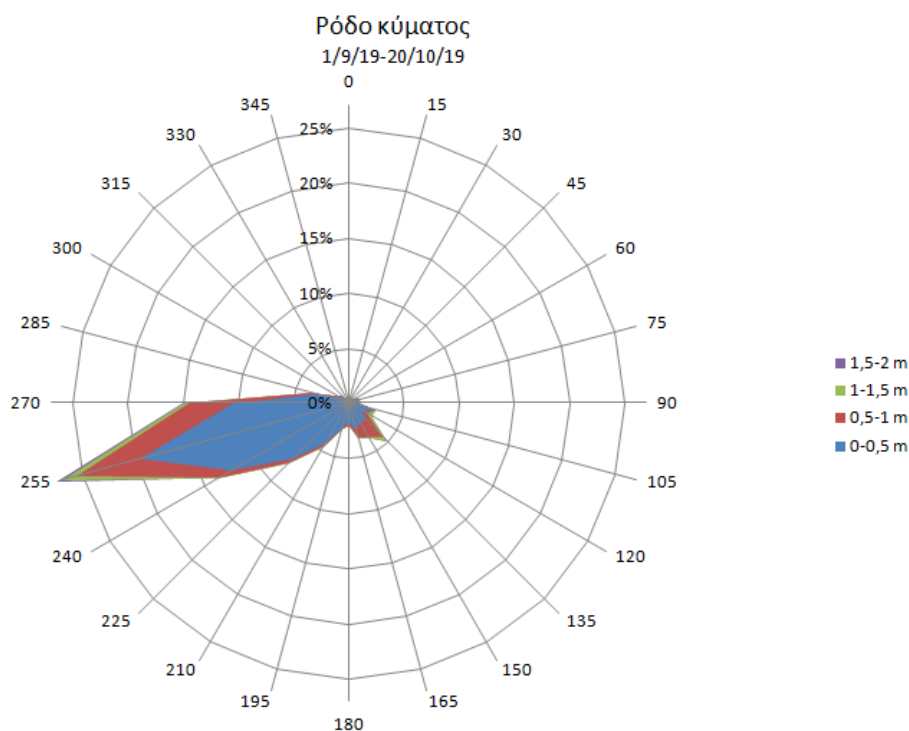
Χαρακτηριστικά, το φθινόπωρο του 2017 (Διάγραμμα 4.11) οι κατευθύνσεις από τις οποίες το κύμα φτάνει προς την ακτή περιορίζονται σε μια στενή ζώνη γύρω κοντά στις 255°. Σε αντιδιαστολή το 2018 (Διάγραμμα 4.12) οι κατευθύνσεις του κύματος ξεκινούν από τα νοτιοανατολικά στις 120° και φτάνουν μέχρι τα νοτιοδυτικά στις 255°. Το φθινόπωρο του 2019 (Διάγραμμα 4.13) η διεύθυνση του κύματος περιορίζεται πάλι κοντά στις 255° με εύρος $\pm 15^\circ$. Παρόλα αυτά είναι εμφανές ότι τους φθινοπωρινούς μήνες οι τιμές του ύψους κύματος είναι κατά κύριο λόγο χαμηλές μέχρι 1 m.



Διάγραμμα 4.11 - Φθινόπωρο 2017

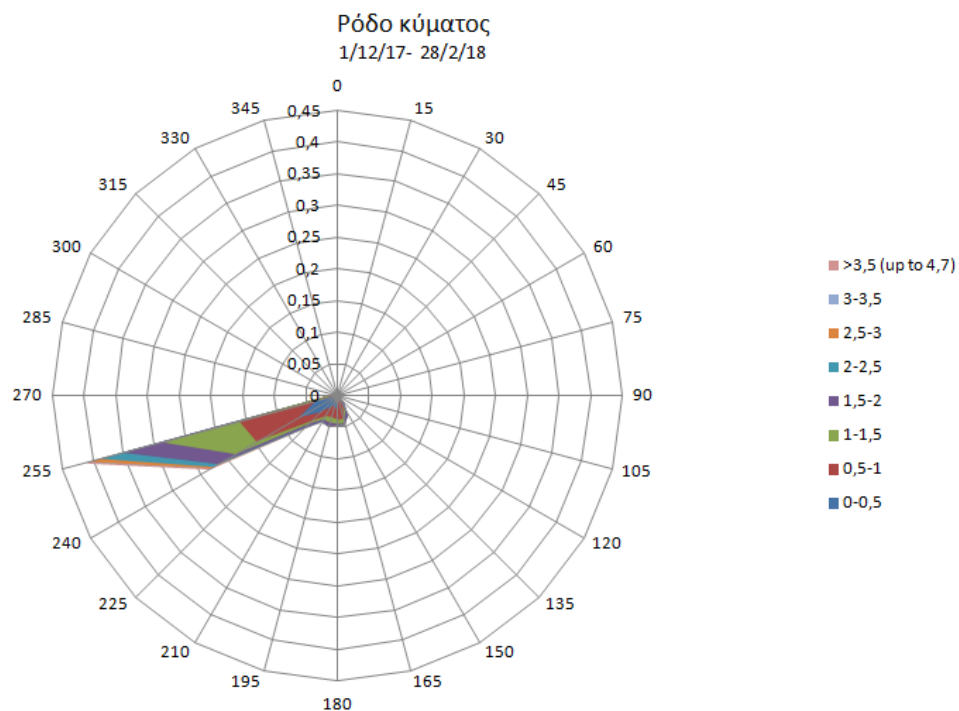


Διάγραμμα 4.12 - Φθινόπωρο 2018

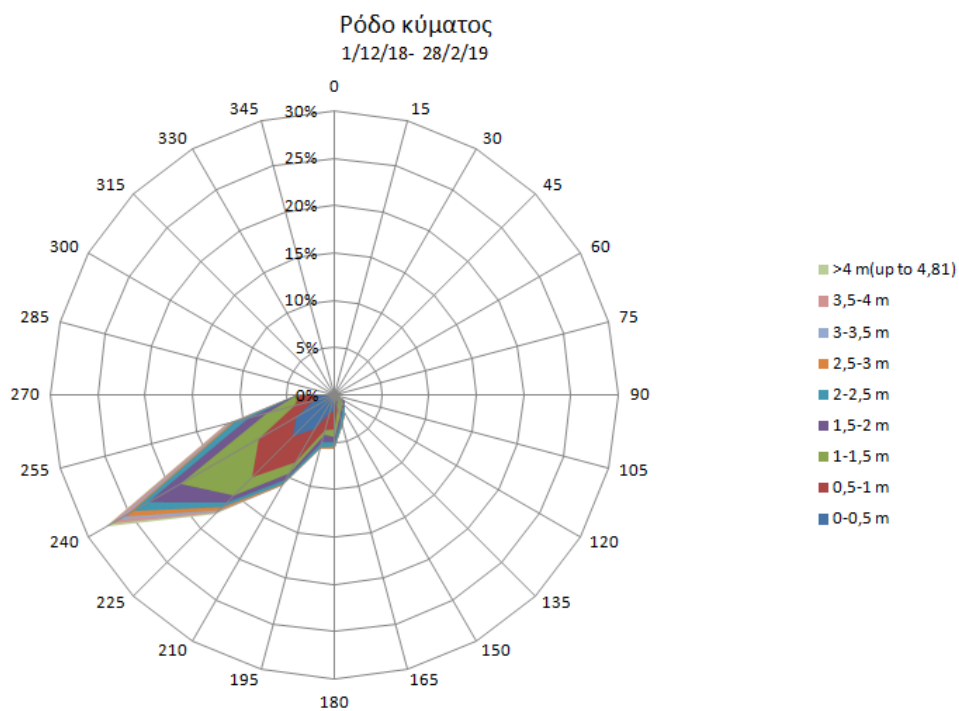


Διάγραμμα 4.13 - Φθινόπωρο 2019

Το χειμώνα του 2017-2018 (διάγραμμα 4.14) παρατηρείται σταθερά διεύθυνση κύματος στις 240° - 255° με συνήθη ύψη κύματος 0.5-1.5 m και λίγο σπανιότερα μέχρι 2 m. Την επόμενη χρονιά (διάγραμμα 4.15) οι άνεμοι- και επομένως οι κυματικές διαταραχές- είναι νότιοι-νοτιοδυτικοί στις 210° - 240° και τα ύψη κύματος στα 0.5- 1.5 m. Παρατηρείται και τα δύο έτη ένα ποσοστό περίπου 5% κυμάτων με διεύθυνση νότια στις 180° - 195° .

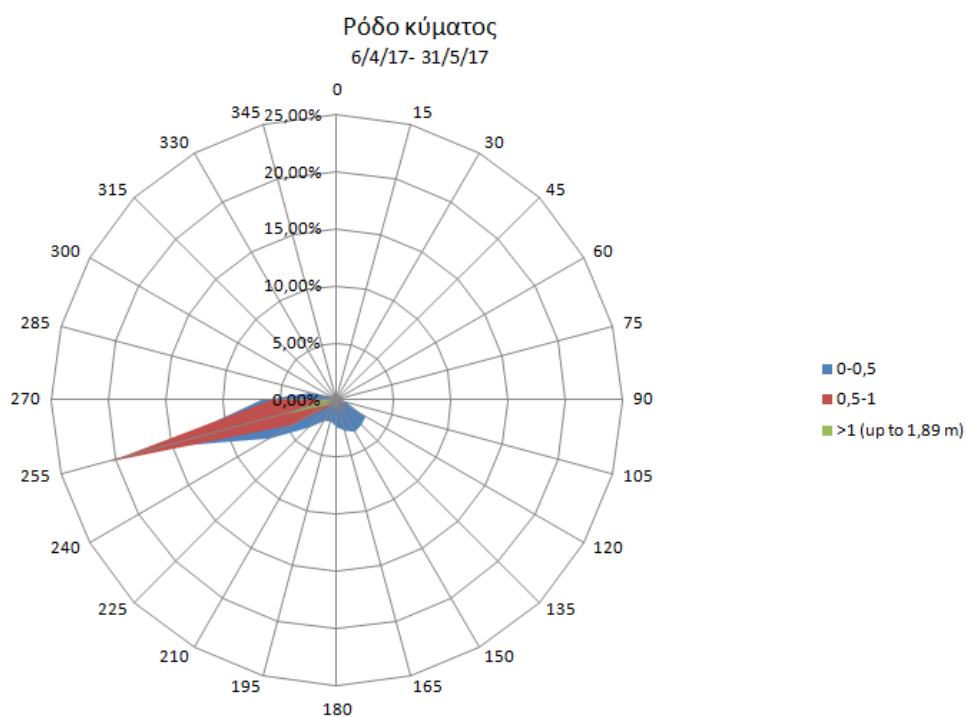


Διάγραμμα 4.14 - Χειμώνας 2017-2018

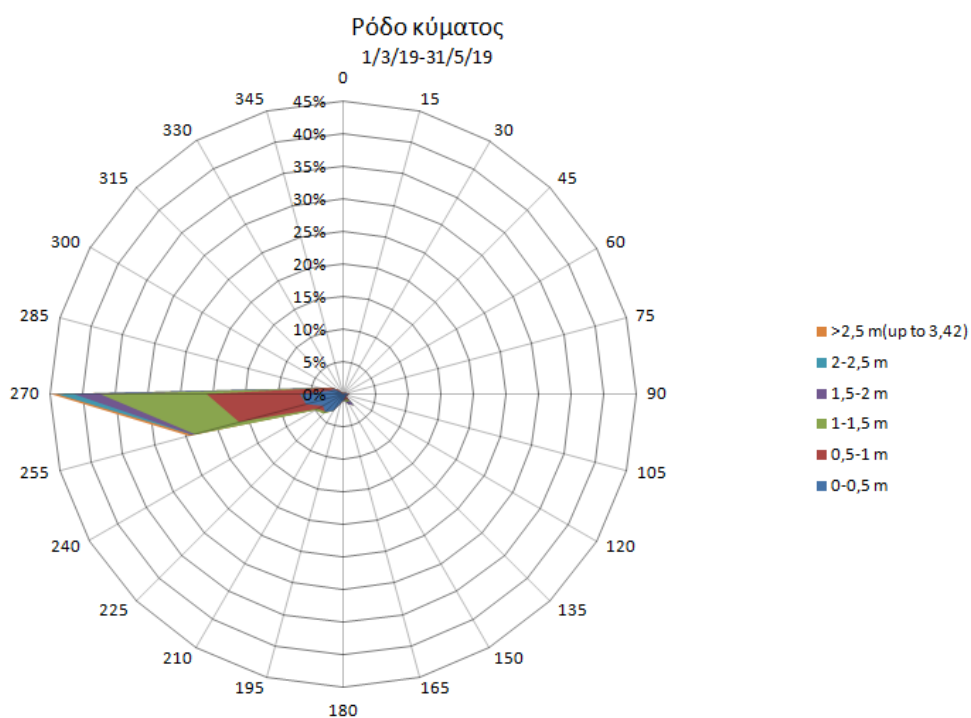


Διάγραμμα 4.15 - Χειμώνας 2018-2019

Τόσο την άνοιξη του 2017 (διάγραμμα 4.16) όσο και του 2018 (διάγραμμα 4.17) οι άνεμοι πνέουν στις 255° κατά κύριο λόγο. Παρόλα αυτά το 2017 τα ύψη κύματος φτάνουν το 1m ενώ το 2019 ένα μεγάλο ποσοστό φτάνει μέχρι τα 1.5 m ύψος. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι οι μετρήσεις του 2017 δεν περιλαμβάνουν τον Μάρτιο.

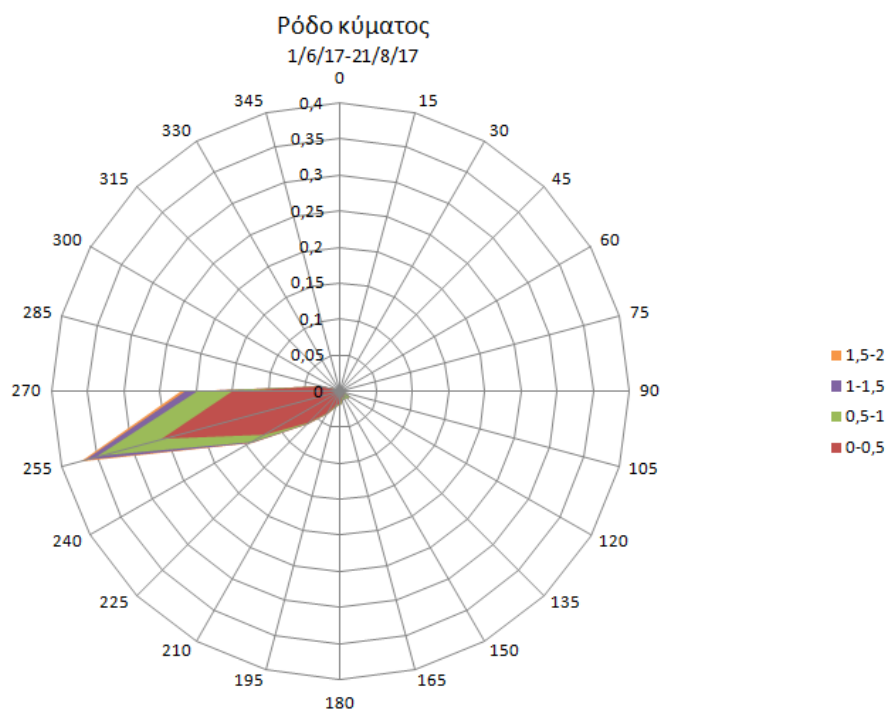


Διάγραμμα 4.16 - Άνοιξη 2017

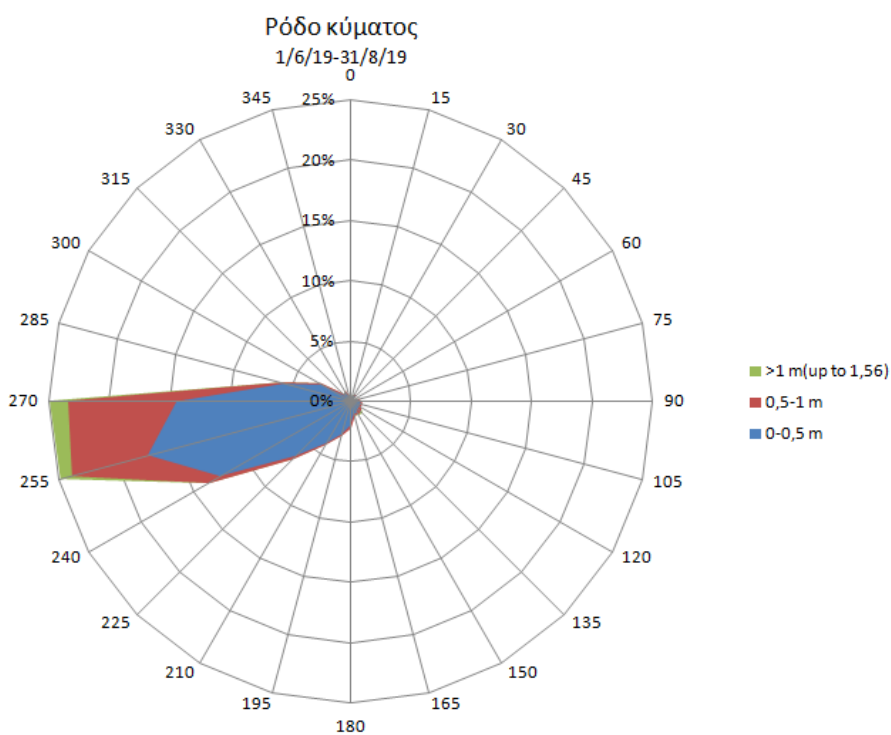


Διάγραμμα 4.17 - Άνοιξη 2019

Την καλοκαιρινή περίοδο (διάγραμμα 4.18, διάγραμμα 4.19) γίνεται εμφανές ότι τα ύψη κύματος είναι ως επί το πλείστον χαμηλά, μέχρι 0.5 m και σπανιότερα μέχρι 1 m. Η κατεύθυνση των κυμάτων είναι επίσης στις 255°-270°.

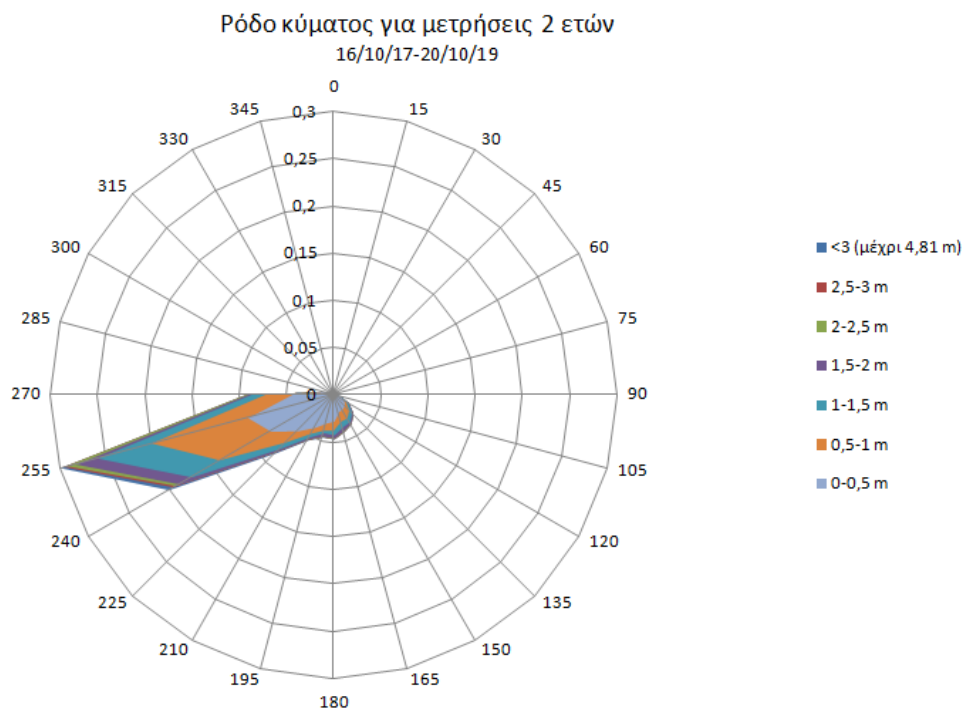


Διάγραμμα 4.18 - Καλοκαίρι 2017



Διάγραμμα 4.19 - Καλοκαίρι 2019

Τελικά, μια συνολική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της κυματολογικής μελέτης που διεξάχθηκε κατά την διάρκεια των δύο αυτών ετών θα ήταν η παρακάτω (διάγραμμα 4.20). Η απώλεια μετρήσεων για ένα διάστημα 5 μηνών επηρεάζει σαφώς το τελικό αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά δεδομένου ότι, όπως δείχνουν οι προηγούμενες συγκρίσεις, οι διαφορές μεταξύ των συνθηκών για ίδιες χρονικά περιόδους και εποχές είναι μικρές, μπορούμε να θεωρήσουμε το παρακάτω διάγραμμα ικανοποιητικό και ενδεικτικό των κυματικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή.



Διάγραμμα 4.20 - Συνολική απεικόνιση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Σύγκριση αποτελεσμάτων με προγνωστικό μετεωρολογικό μοντέλο και αξιολόγηση

Συνολικότερα ένα εκ των μεγαλύτερων ζητημάτων στην πλοήγηση αλλά και γενικότερα στην μετεωρολογία είναι η βελτίωση των μετεωρολογικών μοντέλων, καθώς η ακριβής πρόβλεψη κρίνεται από δύσκολη έως ακατόρθωτη. Στην παρούσα εργασία λοιπόν προσπαθήσαμε να συγκρίνουμε τις κυματικές συνθήκες βάσει πραγματικών μετρήσεων με τις συνθήκες κύματος όπου προέβλεπαν γνωστές μετεωρολογικές ιστοσελίδες όπως οι www.meteo.gr, www.poseidon.gr και www.windy.com. Από αυτές κρίθηκε ως περισσότερο αξιόπιστη και αναλυτική την σελίδα www.windy.com η οποία και επιλέχθηκε για την παρούσα σύγκριση. Επιπλέον, η συγκεκριμένη ιστοσελίδα παρέχει προβλέψεις για οποιεσδήποτε γεωγραφικές συντεταγμένες, μια δυνατότητα που επιτρέπει να συγκρίνουμε τις μετρήσεις του οργάνου και τις προβλέψεις της ιστοσελίδας ακριβώς στο ίδιο γεωγραφικό σημείο. Ο σκοπός αυτής της σύγκρισης ήταν αρχικά ο καθαυτός έλεγχος της αξιοπιστίας του μοντέλου WAM που χρησιμοποιεί το windy και έπειτα η βελτίωση του μοντέλου βάσει στατιστικών δεδομένων που εμείς συλλέξαμε για το διάστημα σχεδόν δύο χρόνων.

5.1 Το μετεωρολογικό μοντέλο WAM

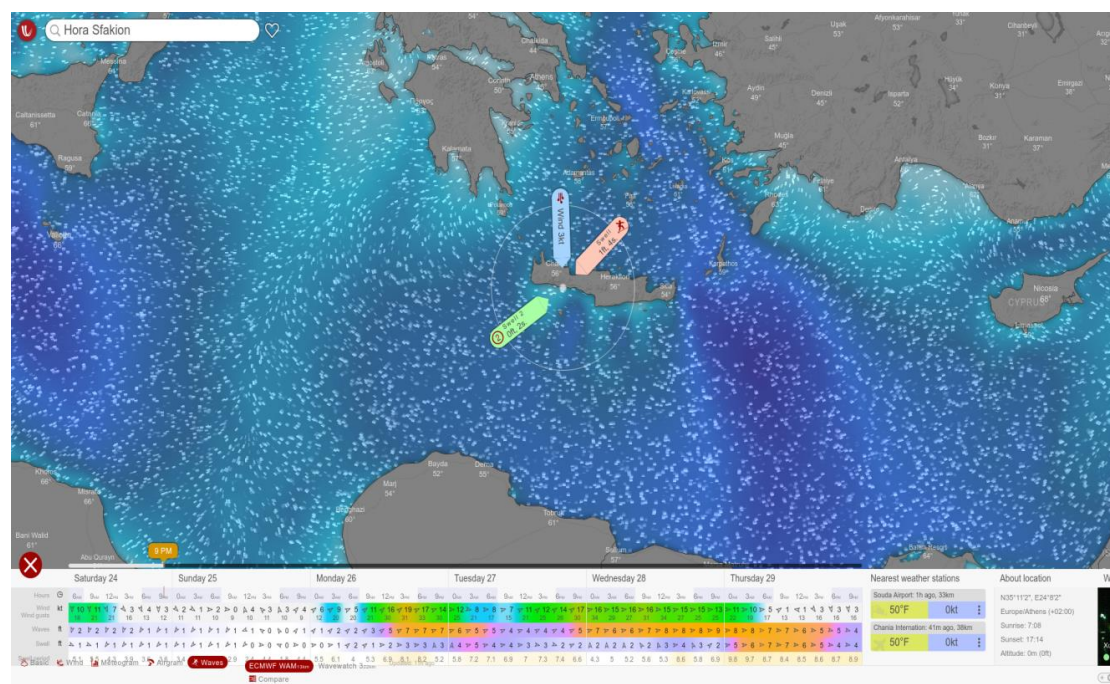
Το WAM είναι το πρώτο μοντέλο που κατάφερε να επιλύσει ικανοποιητικά την εξίσωση πυκνότητας της ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των μη γραμμικών όρων. Το 1980 μια ομάδα επιστημόνων, οι αυτοαποκαλούμενοι WAM, θεώρησαν εφικτή την επίλυση της εξίσωσης αυτής. Την εποχή εκείνη υπήρχε επιτακτική ανάγκη βελτίωσης των ήδη υπάρχοντων κυματικών μοντέλων, τα οποία αν και γενικότερα ήταν αρκετά λειτουργικά, σε ορισμένες περιπτώσεις ακραία μεταβαλλόμενων συνθηκών αποτύγχαναν να αποδώσουν μια ορθή εικόνα της θαλάσσιας κατάστασης. Επίσης, η επίλυση της εξίσωσης απαιτούσε μεγάλη υπολογιστική ισχύ, η οποία κατέστη διαθέσιμη τα τελευταία χρόνια. Τέλος, η ενέργεια αυτή συνέπεσε με την εξέλιξη τεχνικών τηλεπισκόπησης για μετρήσεις της επιφάνειας της θάλασσας, με τη χρήση οργάνων μικροκυμάτων (αλτίμετρο και ραντάρ SAR). Επιπρόσθετα, μεγάλη σημασία στην διαμόρφωση των κυματικών μοντέλων παίζει η δορυφορική τηλεπισκόπηση. Οι δορυφορικές παρατηρήσεις χρησιμεύουν στην επαλήθευση του μοντέλου. Ακόμα, μία αναλυτική περιγραφή του δυναμικού της επιφάνειας της θάλασσας είναι σημαντική για τη σωστή ερμηνεία των σημάτων που λαμβάνουμε από το ραντάρ (S. Foteinis et. al, 2016).

Στο παρόν το εγκεκριμένο μοντέλο WAM χρησιμοποιείται σε διεθνές και τοπικό επίπεδο για μετεωρολογικές και κυματικές προβλέψεις, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν για ναυσιπλοΐα, παράκτιες δραστηριότητες και επαλήθευση και ερμηνεία των δορυφορικών δεδομένων.

Το WAM αποτελεί ένα φασματικό μοντέλο κύματος, το οποίο χρησιμοποιείται σε μεσαία και μεγάλα βάθη, αν και αξιοποιείται και σε εφαρμογές σε ρηχά νερά. Το Εθνικό Παρατηρητήριο Αθηνών, από το 2010 λειτουργεί το μοντέλο WAM, εξαγοντας ανά διαστήματα τριών ωρών τις θαλάσσιες παραμέτρους. Χρησιμοποιεί τα ανεμολογικά δεδομένα που παρέχει το προγνωστικό μοντέλο BOLAM (Bologna Limited Area Model) για την ταχύτητα του ανέμου στα 10m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το WAM εξειδικεύεται σε δύο θαλάσσιους τομείς, τον ευρύτερο τομέα της Μεσογείου με ανάλυση πλέγματος $1/4^\circ$ και στον πιο περιορισμένο τομέα του Ιονίου και του Αιγαίου πελάγους με ανάλυση πλέγματος $1/16^\circ$. Στις Ελληνικές θάλασσες έχουν δοκιμαστεί και έτερα μοντέλα παρόμοιας λειτουργίας όπως το MIKE 21 SW και το SWAN με διαστήματα μεταξύ των εκτιμήσεων 6 και 3 ωρών. Από την αριθμητική ανάλυση του WAM, τελικά προκύπτουν, σε τρίωρα διαστήματα, εκτιμήσεις του σημαντικού ύψους κύματος και της σημαντικής περιόδου.

5.2 Σχεδιασμός διαδικασίας σύγκρισης

Αρχικά καθημερινά, για μία φορά την ημέρα (και ώρα 21:00), από την 1^η Ιανουαρίου του 2018 μέχρι και την 26^η Ιουνίου του 2019 λαμβάναμε στιγμιότυπα οθόνης της ιστοσελίδας για την περιοχή των Σφακιών, στα Χανιά.



Εικόνα 5.1 - Στιγμιότυπο της ιστοσελίδας WindyΠηγή: www.windy.com

Η παράμετρος που επιλέχθηκε να ελέγξουμε, ώστε να έχουμε σαφή αποτελέσματα είναι το ύψος κύματος.

Παρατηρούμε στο παραπάνω στιγμιότυπο (*Εικόνα 5.1*) πως απεικονίζεται ένα εύρος έξι ημερών σε κάθε στιγμιότυπο. Για το λόγο αυτό αποφασίσαμε να κάνουμε δύο διαφορετικές συγκρίσεις για κάθε σημαντικό κυματικό γεγονός. Μια σύγκριση για την πρόβλεψη μίας ημέρας πριν και μία για την πρόβλεψη τριών ημερών πριν. Αυτό μας βοήθησε να ελέγξουμε την ακρίβεια του μοντέλου σε διαφορετικό βάθος χρόνου, κάτι που έχει και πρακτικά σημαντικό ρόλο στην πλοήγηση και την μετεωρολογία καθώς για επαγγελματικούς και εμπορικούς σκοπούς είναι εξαιρετικά σημαντική η ακριβής πρόβλεψη των καιρικών (και κατ' επέκταση κυματικών) συνθηκών σε βάθος χρόνου τουλάχιστον τριών ημερών.

Το επόμενο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε είναι πως οι μετρήσεις που είχαμε από το πρόγραμμα Storm ήταν ανά μία ώρα ενώ το Windy εμφανίζει τιμές ανά τρεις ώρες. Έτσι αποφασίστηκε η απεικόνιση της σύγκρισης να γίνει μέσω διαγραμμάτων στα οποία οι πραγματικές μετρήσεις να εμφανίζονται ως μια συνεχής γραμμή (προσομοιάζοντας την πραγματική κυματομορφή) και οι τιμές του Windy να υπάρχουν απλά ως σημεία, καθώς θεωρήθηκε λανθασμένη η απόφαση να ενωθούν τα σημεία δημιουργώντας μια γραφική παράσταση, αφού θα δημιουργούνταν ψευδής εικόνα της κυματομορφής. Ούτως ή άλλως η τιμή, ανά τρεις ώρες, που εμφανίζεται στο Windy έχει προέλθει από τον μέσο όρο των τιμών στο τρίωρο που προηγήθηκε.

Τέλος, επιλέξαμε από τα διαγράμματα και τις μετρήσεις που εμφάνιζε το Storm κάποια από τα σημαντικότερα κυματικά γεγονότα, τα οποία έχρηζαν ανάλυσης, είτε λόγω μεγέθους του ύψους κύματος, είτε λόγω διάρκειας του φαινομένου, είτε συνδυασμού αυτών. Λογικά, όπως θα φανεί παρακάτω, τα περισσότερα παρατηρούνται στους χειμερινούς και φθινοπωρινούς μήνες.

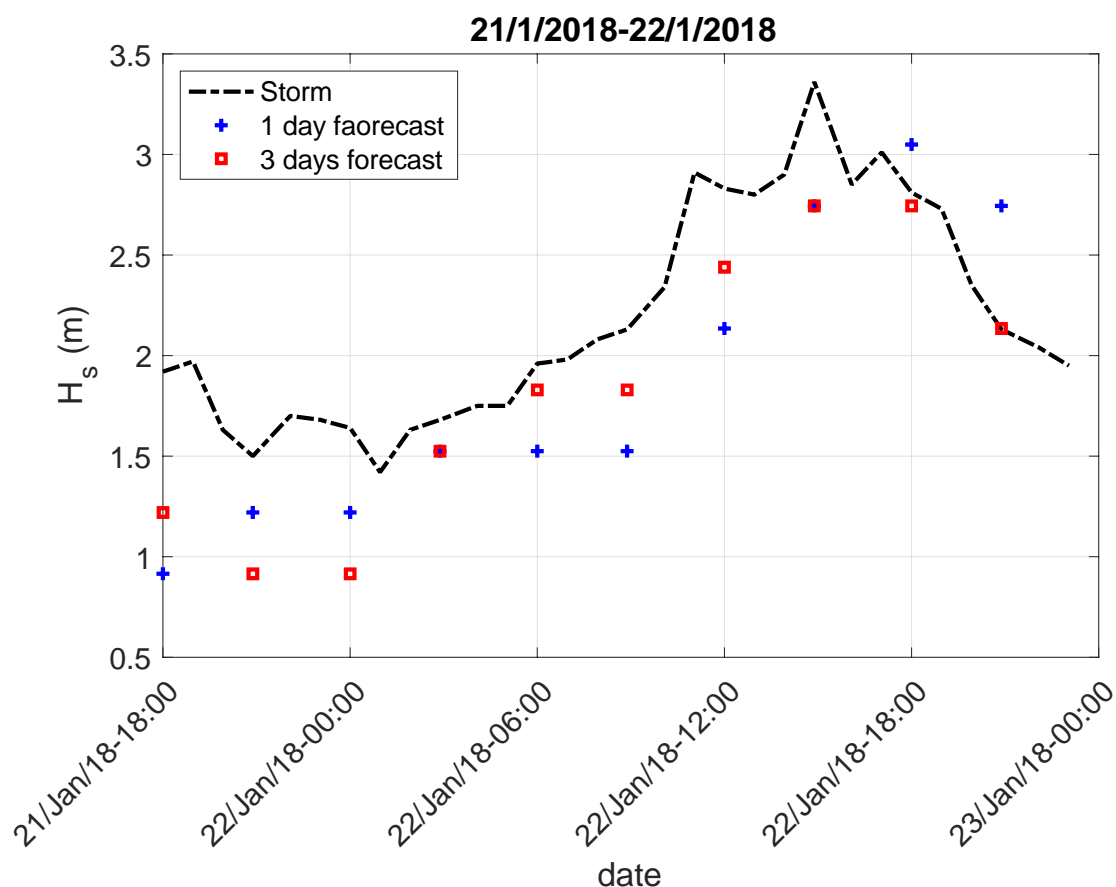
5.3 Σημαντικά κυματικά γεγονότα

Τα βασικότερα κυματικά γεγονότα που επιλέξαμε στο διάστημα 1/1/2018-26/6/2019, με χρονολογική σειρά, είναι τα εξής:

Περίοδος	Ημερομηνίες
1	21/1/2018, 18:00 – 22/1/2018, 21:00
2	10/2/2018, 12:00 – 12/2/2018, 00:00
3	28/9/2018, 9:00 – 30/9/2018, 3:00
4	15/1/2019, 00:00 – 16/1/2019, 9:00
5	25/1/2019, 00:00 – 27/1/2019, 12:00
6	5/4/2019, 21:00 – 6/4/2019, 21:00
7	8/4/2019, 18:00 – 10/4/2019, 20:00

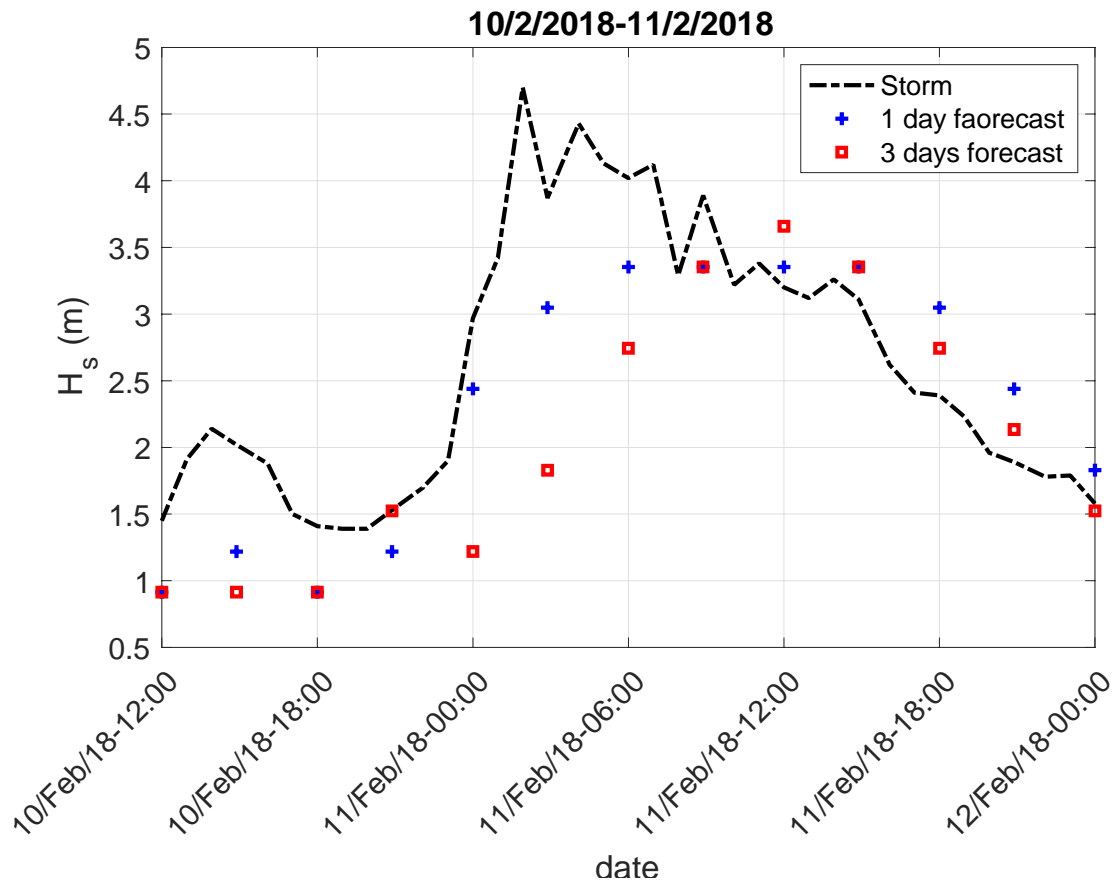
Πίνακας 5.1: Χρονικές περίοδοι σύγκρισης

5.4 Διαγράμματα



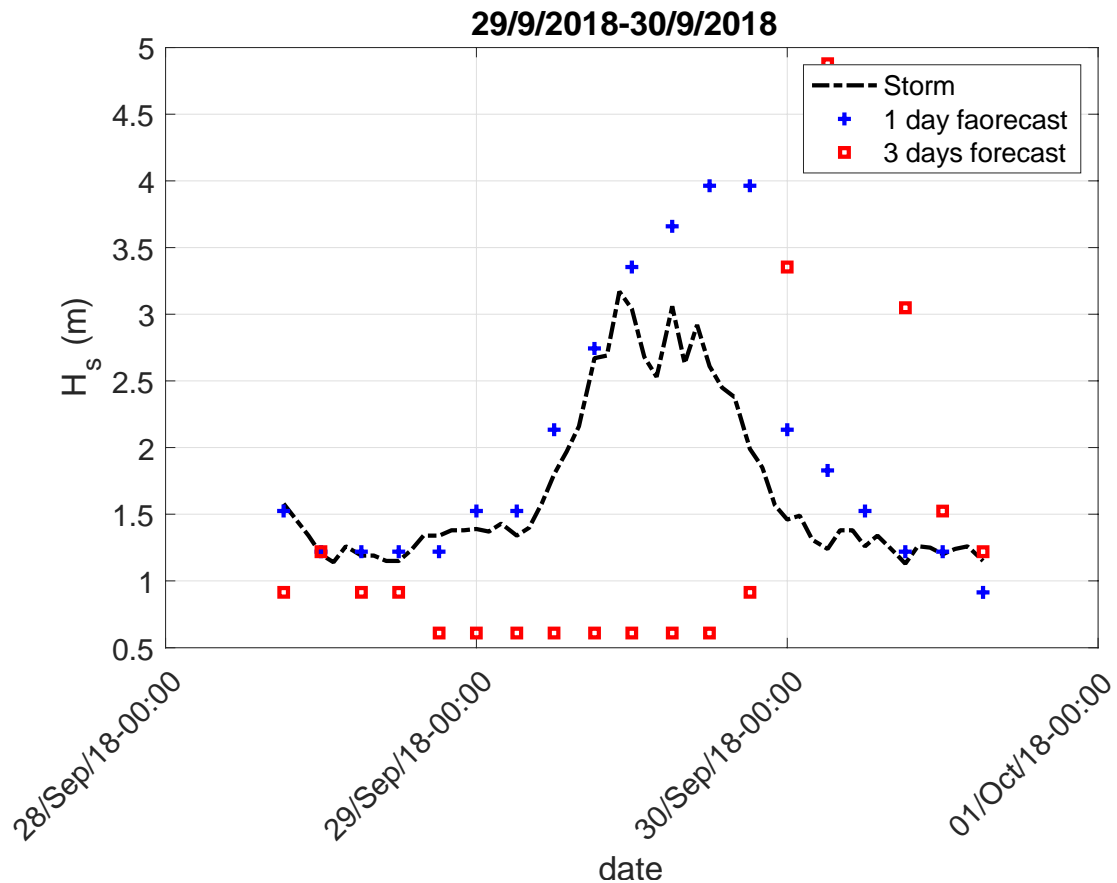
Διάγραμμα 5.1 - Σύγκριση H_s την χρονική περίοδο 1

Σύμφωνα με το (Διάγραμμα 5.1), παρατηρούμε ακρίβεια και στις δύο προβλέψεις. Συνολικά τα σημεία που έχει προβλέψει το Windy είναι μετατοπισμένα πιο κάτω από το διάγραμμα των μετρήσεων. Αυτό κρίνεται λογικό γιατί παρουσιάζεται ο μέσος όρος των τιμών του ύψους κύματος για το διάστημα των προηγούμενων τριών ωρών, οπότε χάνονται οι τιμές των υψηλότερων κορυφών. Επίσης παρατηρούμε έναν μικρό ετεροχρονισμό στην πρόβλεψη της μέγιστης κλιμάκωσης του φαινομένου, κατά σχεδόν δύο ώρες, πράγμα όμως που κρίνεται αμελητέο. Τέλος, δείχνει η πρόβλεψη τριών ημερών πριν να είναι ακριβέστερη κατά ελάχιστο.



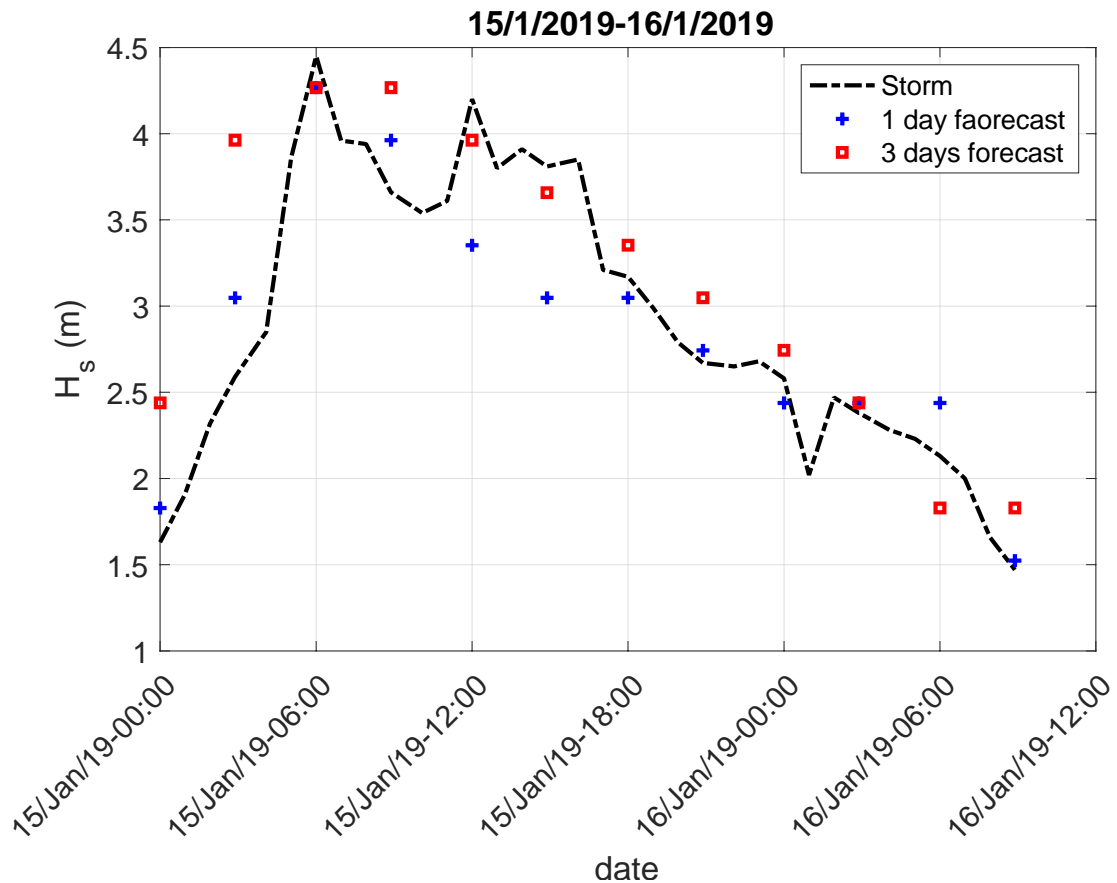
Διάγραμμα 5.2 - Σύγκριση H_s την χρονική περίοδο 2

Και σε αυτήν την περίπτωση (Διάγραμμα 5.2) οι προβλέψεις παρουσιάζουν σχετική ακρίβεια όσον αφορά στη μορφή του γεγονότος. Τα ύψη κύματος στο Windy κυμαίνονται σε μικρότερες τιμές. Ειδικά την περίοδο αυτή παρατηρήθηκε και μία από τις μεγαλύτερες κορυφές κυμάτων από το σύνολο των μετρήσεων, στα 4,7 m, και επίσης παρατηρούνται αρκετές κορυφές άνω των 4m. Το Windy προβλέπει ύψη κύματος μέχρι τα 3,5 m, μια αρκετά μεγάλη διαφορά, υπάρχει λοιπόν, περίπου στο 1m. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι η πρόβλεψη τριών ημερών πριν είναι αρκετά ετεροχρονισμένη σε αντίθεση με την πρόβλεψη μίας ημέρας πριν, αλλά τελικά καμία από τις δύο δεν προβλέπει τόσο μεγάλα ύψη κύματος.



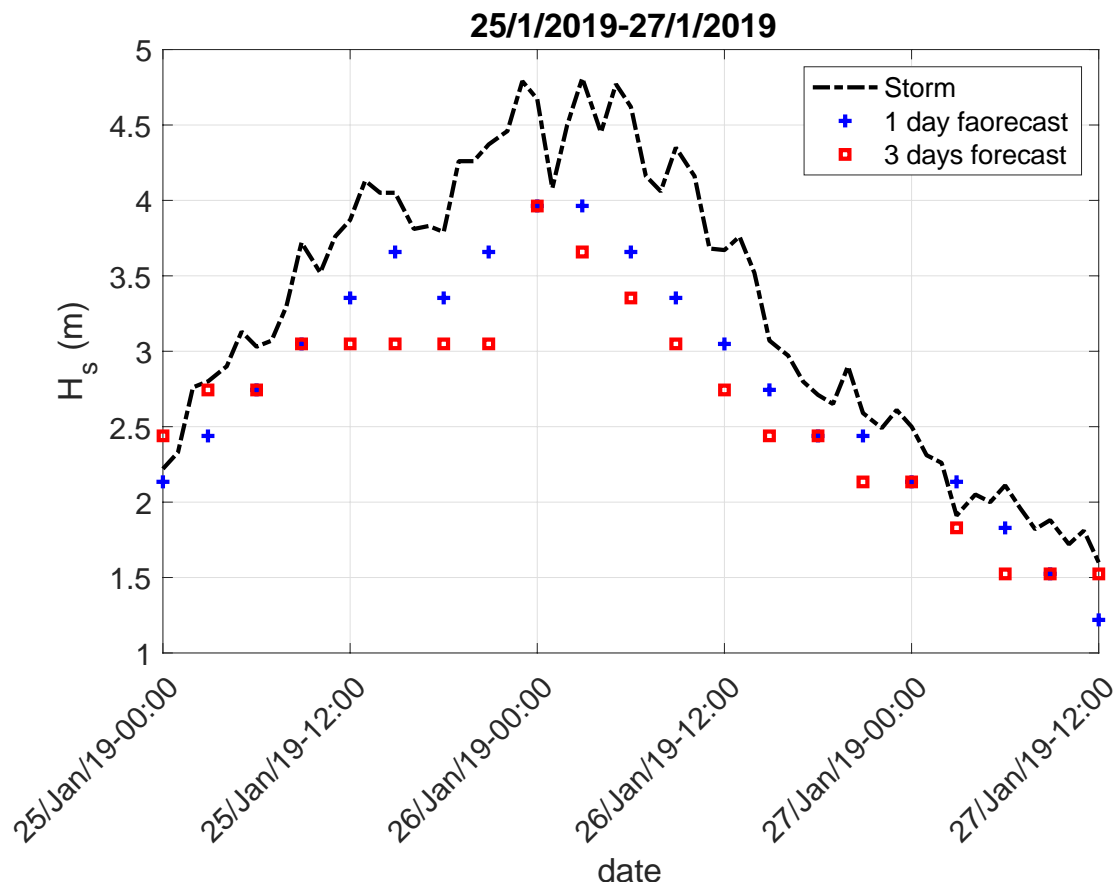
Διάγραμμα 5.3 - Σύγκριση H_s την χρονική περίοδο 3

Στο διάγραμμα 5.3 παρατηρούμε μια περίπτωση κυματικού φαινομένου, στην οποία οι προβλέψεις έχουν πέσει αρκετά εκτός και ειδικά αυτή των τριών ημερών πριν. Σε αυτήν το γεγονός εμφανίζεται αρκετά ετεροχρονισμένα (η πρόβλεψη της μέγιστης κακοκαιρίας εμφανίζεται σχεδόν 15 ώρες μετά) , με μικρότερη διάρκεια και εξαιρετικά μεγαλύτερο εκτιμώμενο ύψος κύματος (πρόβλεψη για 5 m αντί για μέγιστο ύψος λίγο πάνω από 3m). Το μεγαλύτερο εκτιμώμενο ύψος εμφανίζεται και στην πρόβλεψη μίας ημέρας πριν (κοντά στα 4 m), η οποία όμως κατά τ' άλλα καλύπτει το κυματικό γεγονός με αξιοσημείωτη ακρίβεια. Η περίπτωση αυτή δείχνει εξαιρετικά την αναπροσαρμογή των δεδομένων ως προς τη βελτίωση της πρόβλεψης του Windy από τις τρεις μέρες στη μία.



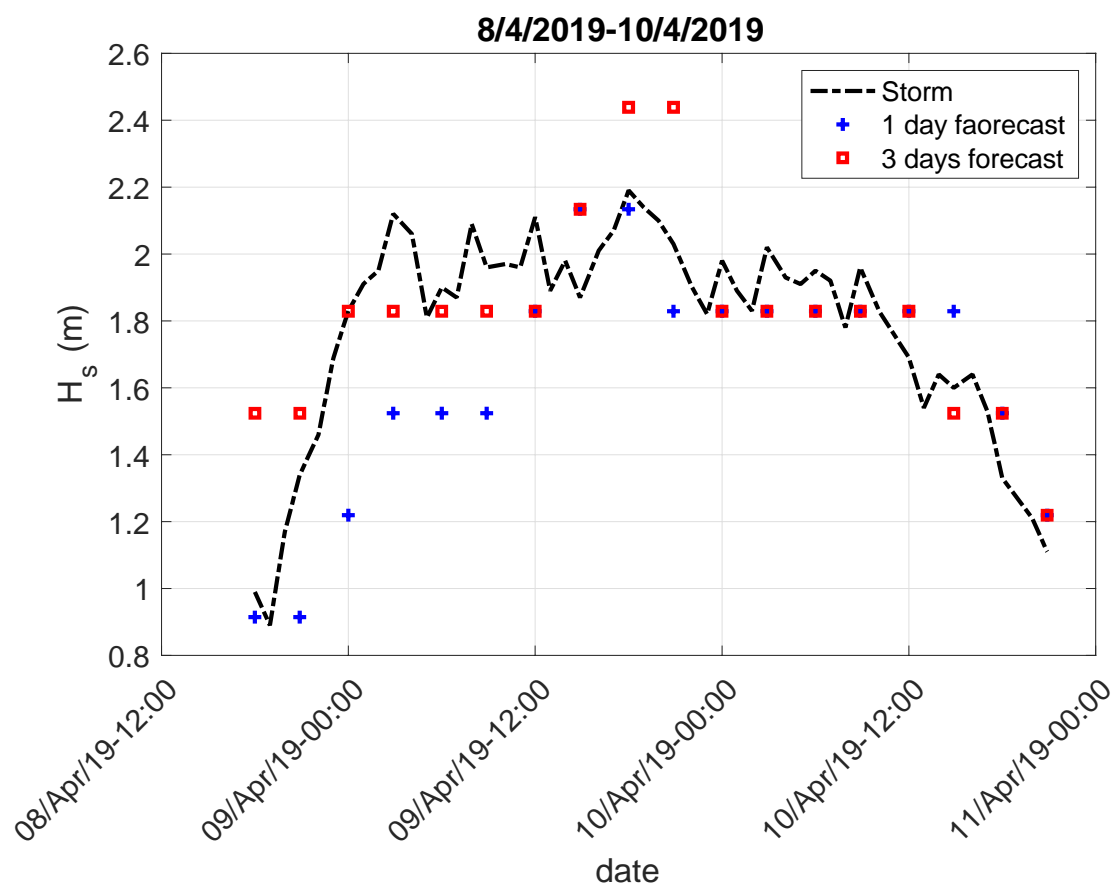
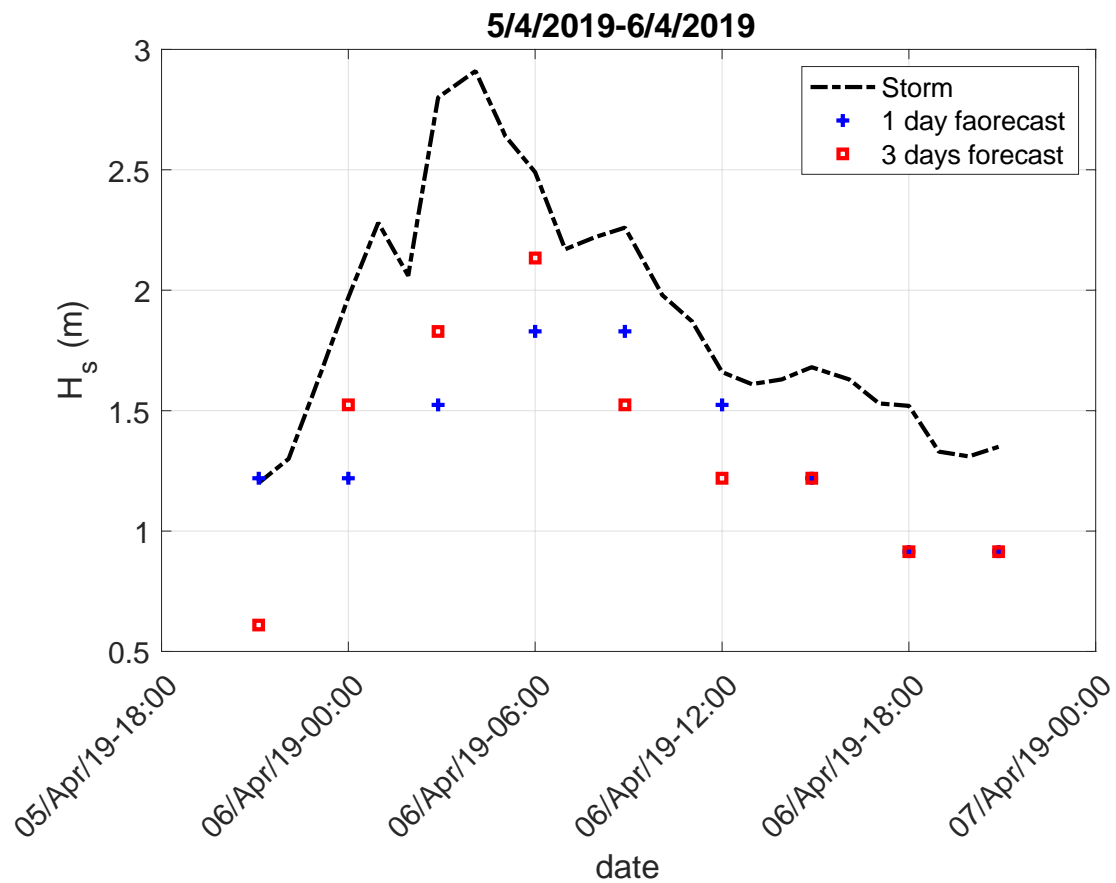
Διάγραμμα 5.4 - Σύγκριση H_s την χρονική περίοδο 4

Σε ένα από τα πιο ακραία κυματικά γεγονότα των μετρήσεων μας (με μέγιστο ύψος κύματος στα 4,5 m και αρκετές κορυφές ανάμεσα από 3,5 m και 4 m) το Windy πραγματοποιεί μια εξαιρετική προσέγγιση (Διάγραμμα 5.4). Ακολουθεί χωρίς ιδιαίτερη απόκλιση το κυματικό φαινόμενο, και από άποψη μεγέθους και από χρονική άποψη. Το παράδοξο στη σύγκριση αυτή είναι πως η πρόβλεψη τριών ημερών πριν είναι κατά λίγο ακριβέστερη, καθώς εντοπίζει και τη δεύτερη σειρά κορυφών (10:00-14:00 στις 15/1) η οποία παραλείπεται από την πρόβλεψη της μίας ημέρας πριν.



Διάγραμμα 5.5 - Σύγκριση H_s την χρονική περίοδο 5

Η περίπτωση του (Διαγράμματος 5.5), αποτελεί την ισχυρότερη κακοκαιρία στα δύο χρόνια μετρήσεων. Τα πραγματικά ύψη κύματος φτάνουν έως και 4,81m και επιπλέον υπάρχουν ακόμα τέσσερις κορυφές άνω των 4,5 m , πράγμα σπάνιο για την περιοχή. Το Windy φαίνεται να ακολουθεί πιστά την πραγματική «κυματομορφή», όμως αδυνατεί να καταγράψει αυτά τα τρομακτικά ύψη. Αναπαριστά μια σχετικά καλή πρόβλεψη πάραυτα, η οποία όσο περνούν οι μέρες παρουσιάζεται ακριβέστερη, καθώς αυτή της μίας ημέρας πριν είναι βελτιωμένη σε σχέση με αυτή των τριών ημερών πριν.



Διαγράμματα 5.6 - Σύγκριση H_s τις χρονικές περιόδους 6 και 7

Στα δύο τελευταία διαγράμματα (Διαγράμματα 5.6) αυτό που είναι αρκετά διαφορετικό είναι η εποχή. Πρόκειται για άνοιξη και όχι για φθινόπωρο ή χειμώνα. Για αυτό το λόγο αυτά τα σημαντικά κυματικά γεγονότα είναι, προφανώς, μικρότερα σε μέγεθος από τα χειμερινά ή τα φθινοπωρινά. Κρίθηκαν σημαντικά γεγονότα για την διαφορά τους αναλογικά με την μόνιμη κατάσταση της εποχής.

Στις 5/4-6/4 εμφανίζεται ένα μικρό σε διάρκεια φαινόμενο με ραγδαία εξέλιξη. Παρατηρούμε μία μέτρια πρόβλεψη από το Windy καθώς από άποψη ύψους κύματος οι προβλέψεις είναι συνεχώς τουλάχιστον ένα μέτρο κάτω από το πραγματικό (και ειδικότερα στην περίπτωση μας όπου το μέγιστο ύψος κύματος είναι λιγότερο από τρία μέτρα, αυτό αποτελεί σημαντική απόκλιση). Χρονικά τουλάχιστον το Windy προβλέπει μια γενική ιδέα της κατάστασης.

Στις 8/4-10/4 το φαινόμενο παρουσιάζει μεγάλη διάρκεια με μεσαία ύψη κύματος και ήπια εξέλιξη και θα χαρακτηριζόταν ως φουσκοθαλασσιά. Η απεικόνιση μας δείχνει μια πολύ ακριβή χρονική και υψομετρική προσέγγιση. Μπορούν να παρατηρηθούν μικρές διαφορές στα ύψη κύματος όσον αφορά την πρόβλεψη μίας ημέρας πριν, αλλά σε σημείο που θεωρείται αμελητέο. Τέλος σε ακόμα μία περίπτωση η πρόβλεψη τριών ημερών πριν παρουσιάζεται κατά ελάχιστο καλύτερη.

5.5 Συμπεράσματα-Συζήτηση

Οι μεμονωμένες περιπτώσεις στατιστικά δεν δείχνουν την αλήθεια. Τα διαγράμματα που αναλύθηκαν αποτυπώνουν μια εικόνα και ιδέα ως προς τη βελτίωση ενός ήδη υπάρχοντος μοντέλου και σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν απόλυτο γνώμονα. Θεωρήθηκε πως μεγαλύτερη πιθανότητα σφάλματος αλλά και ανάγκη μελέτης θα προέκυπτε στα ισχυρότερα κυματικά γεγονότα των μετρήσεών μας και αυτά επιλέξαμε.

Σε αυτά λοιπόν παρατηρήσαμε πως η ιστοσελίδα www.windy.com παρουσιάζει στην πλειοψηφία των γεγονότων μικρότερη κλίμακα υψών. Αυτό υποθέτουμε πως έχει να κάνει με έναν μέσο όρο δεδομένων για κάθε χρονικό διάστημα τριών ωρών, λόγω του οποίου ορισμένες κορυφές δεν εμφανίζονται. Σε ορισμένες μάλιστα περιπτώσεις η απόκλιση γίνεται σημαντική με αποτέλεσμα τη συνολική αλλοίωση του φαινομένου.

Επίσης, σε φαινόμενα που εξελίχθηκαν ραγδαία και ήταν μικρής διάρκειας, συχνά παρατηρήθηκε ετεροχρονισμός της κορύφωσης του φαινομένου, ακόμα και στην πρόβλεψη μίας ημέρας πριν. Η χρονική διαφορά κυμάνθηκε στις συγκρίσεις μας από 3 ώρες ως και 15 ώρες. Η χρήση των μετρήσεών μας για πιο έγκαιρη πρόβλεψη ραγδαία εξελιξιμων κυματικών γεγονότων αποτελεί και τη βασική πρόταση αξιολόγησης του μοντέλου.

Τέλος μπορούμε να πούμε πως η ιστοσελίδα www.windy.com αποτελεί έναν εξαιρετικό μετεωρολογικό οδηγό, καθώς οι προβλέψεις του, για μέχρι και μία ημέρα πριν, είναι ακριβείς τόσο ώστε να γίνει εύκολα αντιληπτή η κατάσταση που θα επικρατεί στη θάλασσα το επόμενο εικοσιτετράωρο. Με τον τρόπο αυτό προδιαθέτει τους χρήστες της ιστοσελίδας οι οποίοι εξαρτώνται από τον καιρό σε επαγγελματικό

ή και προσωπικό επίπεδο για τη γενική εικόνα, ακόμα και αν ορισμένες λεπτομέρειες χρήζουν βελτίωσης. Μην ξεχνάμε άλλωστε ότι τα δεδομένα του Windy αναπροσαρμόζονται ανά τρεις ώρες, κι έτσι ακόμα και αν κρύβουν ανακρίβειες, μία ή τρεις μέρες πριν, καταλήγουν λίγο αργότερα να είναι απολύτως ακριβή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Συμπεράσματα - Μελλοντικές εφαρμογές

Από τη διεξαγωγή του πειράματος και τη μελέτη των αποτελεσμάτων, εξάγεται μια καθαρή εικόνα του κυματικού δυναμικού της περιοχής μελέτης. Στο χρονικό διάστημα Οκτωβρίου-Φεβρουαρίου λαμβάνουν χώρα τα πιο ακραία κυματικά συμβάντα (με μεγάλα ύψη κύματος και περιόδους) ενώ από τον Μάρτιο έως και τον Σεπτέμβριο επικρατούν ήπιες συνθήκες. Τα ύψη κύματος δεν ξεπερνάνε στις έντονες κακοκαιρίες τα 5 m, στο σημείο όπου είναι τοποθετημένο το όργανο (περίπου 1,6 km από τη χώρα Σφακίων). Στη συντριπτική όμως πλειοψηφία των περιπτώσεων, το ύψος κύματος έχει ανώτατο όριο το 1,5 m. Όσον αφορά τη κατεύθυνση των κυμάτων, αυτή διαγράφεται με τη βοήθεια των ρόδων να είναι νότια-νοτιοδυτική. Η εξήγηση έγκειται στην ανάλογη κατεύθυνση των ανέμων και στο ανάπτυγμα πελάγους νότια της περιοχής μελέτης. Αντίθετα παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν άνεμοι και άρα κυματικές διαταραχές με κατεύθυνση βόρεια λόγω της παρουσίας των Λευκών Ορέων, που αποτελούν φυσικό τείχος και κλιματικό ρυθμιστή της νήσου.

Ένα άλλο βασικό στοιχείο της παρούσας μελέτης είναι η διερεύνηση της ακρίβειας των χαρακτηριστικών κυματικών μεγεθών που παρέχει το Windy. Τα μετρητικά δεδομένα επαληθεύουν σε γενικές γραμμές το προγνωστικό μοντέλο WAM. Θεωρώντας ότι οι πειραματικές μετρήσεις είναι αξιόπιστες και ακριβείς, το WAM επιτυγχάνει ικανοποιητικά, αλλά εξελίξιμα να τις προσεγγίσει.

Η παρούσα διπλωματική θέτει γόνιμο έδαφος για περαιτέρω προβληματισμό και έρευνα στο πεδίο της εκτίμησης των κυματικών διαταραχών και ειδικά στην εκτίμηση της παραμέτρου του ύψους κύματος. Δυνητικά τέτοιου είδους πειραματικές μετρήσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως βάση δεδομένων για ποικίλες κλιματολογικές έρευνες, σκοπούς ναυσιπλοΐας ή και μετεωρολογικές εφαρμογές. Οι φορείς που αναπτύσσουν διάφορα προγνωστικά μοντέλα με χρήση υπολογιστικών μεθόδων αξιοποιούν βάσεις δεδομένων που έχουν προκύψει από πραγματικές μετρήσεις ως ανατροφοδότηση προκειμένου να βελτιώσουν την αξιοπιστία τους. Οι μετρήσεις που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη για τα κυματικά μεγέθη στη περιοχή των Σφακίων σε συνολικό διάστημα δύο χρόνων θα μπορούσαν, επομένως, να χρησιμοποιηθούν ως τέτοια βάση δεδομένων με σκοπό την αξιολόγηση και την συνεχή βελτίωση των μετεωρολογικών προγνωστικών μοντέλων.

Βιβλιογραφία

Dominic Reeve, Andrew Chadwick, Chris Fleming, “Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice”, Εκδόσεις SPON

J. William Kamphuis, “Introduction to Coastal Engineering and Management”, Εκδόσεις World Scientific

Leo H. Holthuijsen, “Waves in Oceanic and Coastal Waters”, Εκδόσεις Cambridge

Michel W.H. (1999), “Sea spectra revised”, Marine Technology

Nortek AS, “AWAC: Acoustic Wave and Current Meter”, User Guide, September 2005

Peter Janssen, “The wave model”, May 1995

Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, “Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists”, Εκδόσεις World Scientific

Robert M. Sorensen, “Basic Coastal Engineering”, Τρίτη Έκδοση, Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Bethlehem, Pennsylvania

S. Foteinis, J. Hancock , N. Mazarakis , T. Tsoutsos , C.E. Synolakis, “A comparative analysis of wave power in the nearshore by WAM estimates and in-situ (AWAC) measurements”. The case study of Varkiza, Athens, Greece

U.S. Army Corps of Engineers, “Coastal Engineering Manual”, 2002

Σύνδεσμοι

<https://webapp.navionics.com/?lang=en#boating@6&key=gxyfFsxzoC>

<https://www.windy.com/35.200/24.140/waves?waves.34.867,24.461,9>

