



**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ  
ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ ΤΟΜΟΓΡΑΦΟΥ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΜΕΝΟΥ ΣΕ DRIFTER**

**Βουρλάκος Αντώνιος**

**[mar08010@marine.aegean.gr](mailto:mar08010@marine.aegean.gr)**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλης Ζερβάκης**

**Μυτιλήνη, Φεβρουάριος 2015**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αποφοίτου του Τμήματος Επιστημών της Θάλασσας**

**Αντώνιου Βουρλάκου**

**ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:**

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΥ  
ΤΟΜΟΓΡΑΦΟΥ ΡΕΥΜΑΤΩΝ ΑΝΑΡΤΗΜΕΝΟΥ ΣΕ DRIFTER**

**Τριμελής Επιτροπή Επίβλεψης και Κρίσης της Εργασίας**

**Υπογραφές**

**Βασίλης Ζερβάκης  
Επιβλέπων Καθηγητής**

**Θωμάς Χασιώτης**

**Ελίνα Τράγου**



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή Β. Ζερβάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Επιστημών της Θάλασσας του Πανεπιστημίου Αιγαίου, για τη καθοδήγηση του, τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις που συντέλεσαν για τη διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας. Επίσης ευχαριστώ και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής επίκουρους καθηγητές Θ. Χασιώτη και Ε. Τράγου.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία εστιάζει στην ανάλυση των επιφανειακών κυματισμών στην ανατολική ακτή της Λήμνου. Τα δεδομένα καταγράφηκαν από ακουστικό τομογράφο 2 MHz ενσωματωμένο σε ελεύθερα παρασυρόμενο πλωτήρα για τα ανώτερα 2 m της υδάτινης στήλης. Στην ανάλυση των δεδομένων για το πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων παρατηρήθηκε η ενεργειακή συμφωνία του ρηχού ~0.2 m με το βαθύ ~1.6 m μετρούμενο βάθος με το μεσαίο μετρούμενο βάθος στο 1.0 m να προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την κίνηση που διαγράφει ο πλωτήρα. Η ανάλυση στο πεδίο των συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των φασματικών συνιστωσών του ύψους κύματος και της ανύψωσης της θαλάσσιας επιφάνειας, από τις συνιστώσες Fourier των καταγραμμένων ταχυτήτων. Επίσης επιτεύχθηκε και ο προσδιορισμός κυματικών χαρακτηριστικών όπως το σημαντικό ύψος κύματος, το μήκος κύματος και η μέση κυματική περίοδος. Η στατιστική ανάλυση των κυματισμών πραγματοποιήθηκε με βάση την ανάλυση Rayleigh.

## Abstract

The current thesis focuses in the analysis of surface waves, in the east coast of Limnos. The data recorded from subsurface drifter equipped with the 2 MHz Aquadopp profiler for the upper 2 m of the water column. In the analysis of the recorded data for the time and frequency domain observed the energy agreement for the shallowest ~0.2 m and deeper ~1.6 m depth cell, with the mean depth cell ~1.0 m to approach the drifter movement. The analysis in the frequency domain used to estimate the wave spectrum components and the sea-surface elevation, from the Fourier components of recorded velocities. Thus succeed the definition of wave characteristics as significant wave height, wavelength and the mean wave period. The statistical analysis of the surface waves realization based in the Rayleigh analysis.



## Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract .....	6
1. Εισαγωγή .....	11
1.1. Αρχή Λειτουργίας Ελεύθερα Παρασυρόμενων Πλωτήρων .....	12
1.2. Αρχή Λειτουργίας Ακουστικών Τομογράφων Ρευμάτων.....	13
1.3. Γραμμική Θεωρία Κυματισμών Απειροστού Πλάτους.....	14
1.4. Ανάλυση Fourier .....	16
1.5. Στατιστική κατανομή και χαρακτηριστικά κυματισμών.....	18
2. Μεθοδολογία .....	19
2.1. Καταγραφή δεδομένων.....	19
2.2. Προ-Επεξεργασία δεδομένων .....	20
2.3. Φασματική Ανάλυση .....	22
2.3.1. Υπολογισμός Ύψους κύματος.....	24
2.4. Στατιστική Ανάλυση.....	26
3. Αποτελέσματα .....	27
3.1. Ανάλυση στα δεδομένα της πίεσης .....	27
3.2. Φασματική ανάλυση επιφανειακών ρευμάτων στις συνιστώσες $u, v, w$ .....	28
3.2.1. Φασματική σύγκριση κυματικών τροχιακών ταχυτήτων συναρτήσει συχνότητας .....	32
3.2.2. Φασματική σύγκριση κυματικών τροχιακών ταχυτήτων σε σχέση με μήκος κύματος.....	33
3.3. Φασματική ανάλυση κυματικών τροχιακών ταχυτήτων στις συνιστώσες δέσμης ανά ριπή.....	34
3.4. Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου για τις συνιστώσες του ύψους κύματος ανά ριπή .....	37
3.4.1. Διαγραμματική απεικόνιση μέσου σημαντικού ύψους κύματος στο πεδίο του χρόνου .....	43
3.4.2. Διαγραμματική απεικόνιση μέσης κυματικής περιόδου στο πεδίο του χρόνου .....	44

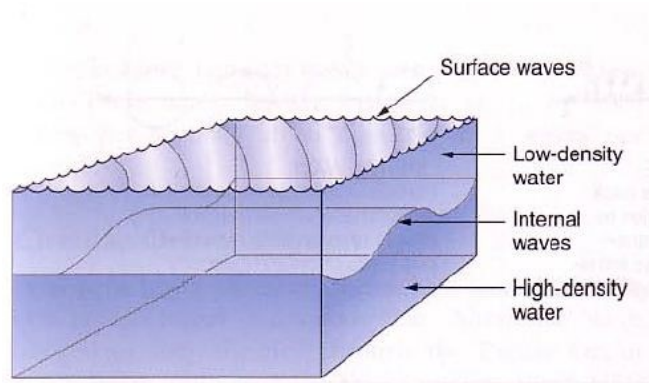


4. Συμπεράσματα-Συζήτηση.....	45
5. Βιβλιογραφία.....	46
Παράρτημα.....	48



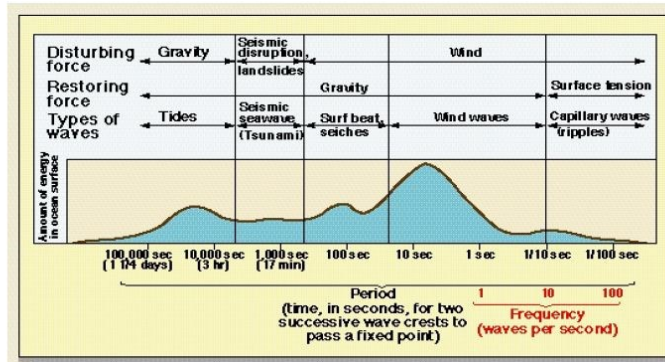
## 1. Εισαγωγή

Τον Οκτώβριο του 2012, το Πανεπιστήμιο Αιγαίου πραγματοποίησε μετρήσεις Langrange μέσω υψίσυχνου ακουστικού τομογράφου ρευμάτων (ADCP) ενσωματωμένου σε ελεύθερα παρασυρόμενο πλωτήρα στην ανατολική ακτή της Λήμνου με σκοπό την καταγραφή των επιφανειακών κυματισμών. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε για το ερευνητικό έργο TOSCA (Tracking Oil Spills & Coastal Awareness Network) στα πλαίσια του προγράμματος MED και διήρκησε από τις 2 έως τις 7 Οκτώβρη του 2012. Ο σχεδιασμός της δειγματοληψίας (μέσω κατά ριπάς δειγματοληψιών των συνιστωσών της ταχύτητας κατά μήκος των ακουστικών ακτίνων) επέτρεψε την εξέλιξη μιας πειραματικής μεθόδου εκτίμησης βασικών χαρακτηριστικών του κυματικού πεδίου που επικρατούσε κατά τη διενέργεια του πειράματος, η οποία μέθοδος αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας πτυχιακής εργασίας.



**Εικόνα 1.** Αναπαράσταση σημείου δράσης και ύπαρξης επιφανειακών κυματισμών στην υδάτινη στήλη (Thurman, 2001).

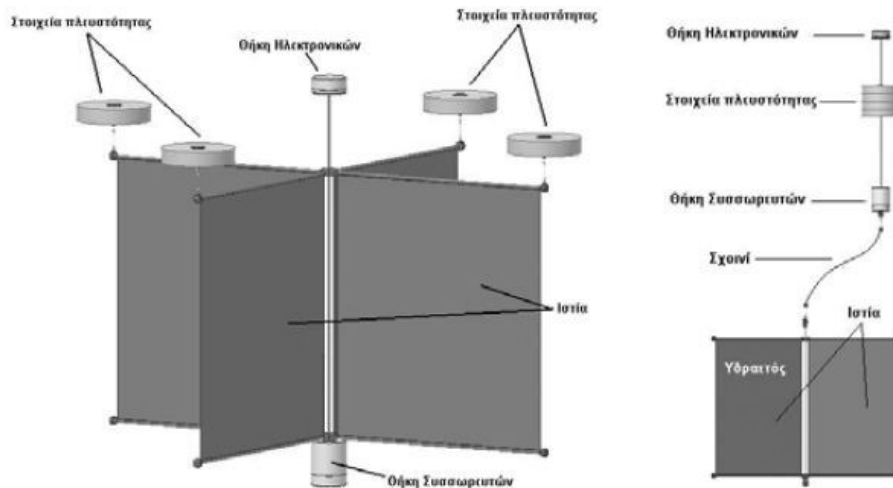
Η δυναμική των επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας στην περιοχή της παράκτιας ζώνης είναι πλούσια σε φυσικά φαινόμενα, και ως εκ τούτου παρουσιάζει και μεγάλο ενδιαφέρον εξέτασης, (Massel, 1989). Η ενεργειακή ανάλυση των ανεμογενών κυμάτων αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την παράκτια μηχανική, διότι τα μεγαλύτερα ποσά ενέργεια συγκεντρώνονται σε αυτό το είδος κυματισμών [Εικ.2]. Η ανατολική ακτή της Λήμνου κυριαρχείται από βόρειους ανέμους με ποσοστιαίες συχνότητες εμφάνισης στα 26 % και με ταχύτητες στους 15 knots (1 knot=1m/s=1 Beaufort=2km/h=1mile/h), στην ίδια περιοχή συχνά το 20% των ανέμων αφορά βορειοανατολικούς ανέμους με ταχύτητες περίπου στους 17 knots (Georgakas, 2014).



**Εικόνα 2.** Διαγραμματική απεικόνιση του φάσματος της κυματικής ενέργειας στους ωκεανούς συναρτήσει της περιόδου (Garrison,(1996),Fig. 10.4 ).

### 1.1.Αρχή Λειτουργίας Ελεύθερα Παρασυρόμενων Πλωτήρων

Η καταγραφή της θαλάσσιας κυκλοφορίας μέσω Langrange μετρήσεων χρησιμοποιείται από την γέννηση της επιστήμης της Ωκεανογραφίας. Οι ελεύθερα παρασυρόμενοι πλωτήρες (surface drifters), αποτελούν ένα από τα δύο εργαλεία για μετρήσεις κατά Langrange στη θάλασσα, οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν επιφανειακή ή υποεπιφανειακή θαλάσσια κυκλοφορία. Οι αρχικές δυνατότητες καταγραφής μόνο επιφανειακών ρευμάτων, και καθορισμού του στίγματος με οπτικό τριγωνισμό, συμπληρώθηκαν γρήγορα με ακουστικές μεθόδους (Swallow, 1955; Rossby *et al.*, 1986), και αργότερα με χρήση του δορυφορικού συστήματος ARGOS (Leger, 1991). Στις παράκτιες περιοχές για τη μέτρηση επιφανειακών ρευμάτων, χρησιμοποιείται ο πλωτήρας τύπου CODE (Davis, 1985), αποτελούμενος από υδραετό του οποίου τα ορθογώνια ιστία σχηματίζουν σταυρό, στις επιφανειακές αντένες του οποίου αναρτώνται μικροί πλωτήρες που εξασφαλίζουν την παρακολούθηση της επιφάνειας του νερού από τον πλωτήρα. Συνήθως, ο πλωτήρας τύπου CODE είναι εφοδιασμένος με σύστημα GPS για τον καθορισμό του στίγματος και ραδιοφωνικό σύστημα για την επικοινωνία. Η εξέλιξη της κινητής τηλεφωνίας και κάλυψη μεγάλων παράκτιων περιοχών επέτρεψε τη χρήση κινητών τηλεφώνων για την επικοινωνία με το σταθμό βάσης, καθώς επίσης και σχεδιαστικές τροποποιήσεις που επέτρεψαν τη μελέτη είτε επιφανειακών ρευμάτων (με διαμόρφωση τύπου CODE/Davis) είτε υποεπιφανειακών ρευμάτων (με ανάρτηση του υδραετού σε μεγαλύτερο βάθος από ότι ο πλωτήρας) (Zervakis *et al.*, 2005; Zervakis *et al.*, 2009). Λεπτομέρειες για τους πλωτήρες χαμηλού κόστους για επιφανειακή και υποεπιφανειακή χρήση, που αφορούν την λειτουργία, τις δυνατότητες και τα προβλήματα απόδοσης τους αναφέρονται από Zervakis *et al* (2009).



**Εικόνα 3.** Απεικόνιση κατασκευής και λειτουργίας του σχεδιασμένου πλωτήρα από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου για καταγραφή επιφανειακών ρευμάτων (αριστερά) και υποεπιφανειακών ρευμάτων (δεξιά) (Zervakis, *et al.*, 2009).

## 1.2. Αρχή Λειτουργίας Ακουστικών Τομογράφων Ρευμάτων

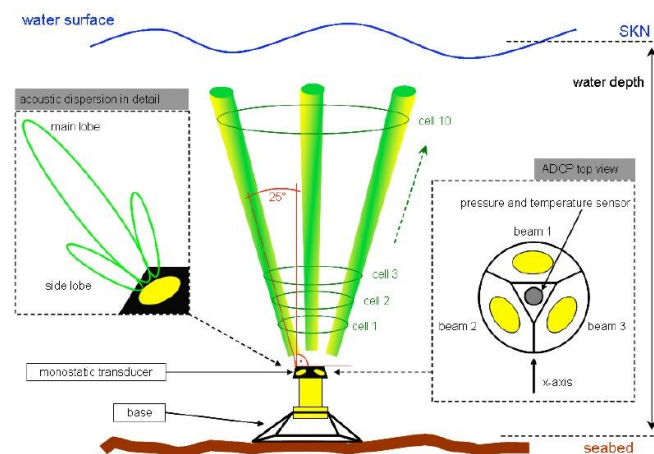
Το πρώτο παραχθέν ADCP αναπτύχθηκε το 1979 και βασίστηκε σε ένα πρότυπο σύστημα Doppler και πλοήγησης, με σκοπό την μέτρηση της ταχύτητας των πλοίων (Rowe and Young, 1979). Τα ADCP λοιπόν είναι ευέλικτα όργανα, με πολύ μεγάλες δυνατότητες. Είναι σημαντικό ότι επειδή ακριβώς βασίζονται στην καταγραφή της κατά Doppler κύλισης της συχνότητας, η απόδοσή τους δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη βιοσυσσώρευση (ή βιοαπόθεση), και επειδή δεν έχουν μηχανικά μέρη η απόδοσή τους δεν παρουσιάζει σταδιακή μείωση, ούτε απαιτούνται συνεχείς βαθμονομήσεις. Ένας ακουστικός τομογράφος για την καταγραφή των ρευμάτων βασίζεται στο φαινόμενο Doppler: συγκεκριμένα το ADCP παράγει ηχητικά σήματα τα οποία οπισθοσκεδάζονται από αιωρούμενους σκεδαστές στην υδάτινη στήλη, με την βασική προϋπόθεση πως η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη κινείται με την ίδια ταχύτητα με αυτή του νερού. Αρχικά ο ακουστικός τομογράφος αποτελεί τον πομπό και η αιωρούμενη σωματιδιακή ύλη τον δέκτη, αλλά κατά την ανάκλαση του ακουστικού σήματος οι ρόλοι του πομπού και δέκτη αντιστρέφονται με αποτέλεσμα το φαινόμενο Doppler να διπλασιάζεται με την τελική συχνότητα του φαινομένου αυτού να βρίσκεται από:

$$F_d = 2 F_s (V/C) \quad (1)$$

Όπου  $F_d$  η επιστρεφόμενη συχνότητα κύλισης Doppler,  $F_s$  η γνωστή συχνότητα στην οποία καταγράφει ο ακουστικός τομογράφος,  $V$  η σχετική ταχύτητα μεταξύ των σκεδαστών και του πομποδέκτη και  $C$  ταχύτητα του ήχου στο μέσο.

Οι πομποδέκτες του ήχου ενός ADCP είναι προσανατολισμένοι υπό γωνία ως προς τον κατακόρυφο άξονα και αυτό αποσκοπεί στην εκπομπή των ηχητικών δεσμών υπό γωνία προς τα πάνω (ή προς τα κάτω, ανάλογα με τον προσανατολισμό του ADCP σύμφωνα με το σχεδιασμό των μετρήσεων). Το πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι

ότι επιτρέπει μέσω του χρόνου καταγραφής του οπισθοσκεδαζόμενου ήχου μετά από κάθε εκπομπή την διαίρεση του σε χρονικά διαστήματα άφιξης από συγκεκριμένα διαστήματα απόστασης από τον πομποδέκτη της κάθε δέσμης, γνωρίζοντας και την μέση ταχύτητα του ήχου στο νερό. Ο τρόπος αυτός συντελεί αρχικά στον υπολογισμό της συνιστώσας της ταχύτητας σε διάφορα βάθη (στρωματίδια ή bins) κατά μήκος της ηχητικής δέσμης και έπειτα στον συνδυασμό των συνιστωσών από κάθε δέση για την απόδοση του τρισδιάστατου διανύσματος της ταχύτητας. Η πιο συνηθισμένη χρήση των ακουστικών τομογράφων ρευμάτων είναι τοποθέτηση στον πυθμένα με προσανατολισμό των πομποδεκτών προς τα πάνω [Εικ. 4], ώστε να διασφαλίζεται η καταγραφή κατακόρυφων προφίλ ταχύτητας. Όσον αφορά την επιλογή του σωστού οργάνου, θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι κρίσιμες παράμετροι που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η επιθυμητή εμβέλεια και η χωρική διακριτική ικανότητα (το μέγεθος του bin). Αυτά καθορίζονται από το μήκος κύματος του ήχου, που σε συνδυασμό με την ταχύτητα του ήχου στο νερό μας δίνει την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας του οργάνου που πρέπει να επιλεγεί.



**Εικόνα 4.** Περιγραφή λειτουργίας και δομής ενός ακουστικού τομογράφου(ADCP) για καταγραφή του κατακόρυφου προφίλ της υδάτινης στήλης, διακρίνονται οι αισθητήρες καταγραφής των χρονοσειρών της πίεσης και της θερμοκρασίας, η γωνία μεταξύ των ηχητικών δεσμών, ο αριθμός των διάφορων μετρούμενων κελιών βάθους(bins) αλλά και οι αισθητήρες καταγραφής για τα 3 beams.

### 1.3. Γραμμική Θεωρία Κυματισμών Απειροστού Πλάτους

Τα διάφορα είδη των κυματισμών που υπάρχουν στον ωκεανό κατηγοριοποιούνται βάσει των κυρίαρχων δυνάμεων που τα διέπουν και τα δημιουργούν και βάσει των βασικών τους χαρακτηριστικών δηλαδή της περιόδου, του μήκους κύματος, του ύψους κύματος, της κανονικότητας κλπ. Τα απειροστά μικρού ύψους κύματα στην ανοικτή θάλασσα δεν μεταφέρουν μάζα αλλά μόνο ενέργεια (Garrison,1996). Η γραμμική κυματική θεωρία (Airy,1845) είναι η απλούστερη και η πιο εφαρμοσμένη κυματική θεωρία και πραγματεύεται με κύματα πρώτης τάξης. Η θεωρία αυτή αναφέρεται στην προσεγγιστική λύση του συστήματος εξισώσεων, έτσι ώστε να περιγραφεί η κίνηση του νερού στη περίπτωση των κυματισμών. Οι σχέσεις που περιγράφουν την εσωτερική

κίνηση του νερού προέρχονται από τις λύσεις ενός συστήματος που περιέχει (α) τις εξισώσεις Navier-Stokes, που εξισορροπούν τις μεταβολές της ορμής του νερού με τις δυνάμεις που ασκούνται επάνω του και (β) την εξίσωση συνέχειας, που εξασφαλίζει την διατήρηση της μάζας. Οι εξισώσεις Navier-Stokes έχουν μόνον όρους που περιγράφουν τις ταχύτητες του νερού και τις τοπικές πιέσεις, λόγω του πολύ μικρού μεγέθους της τριβής. Οι κυριότερες παραδοχές που απαιτούνται για την λύση του συστήματος των εξισώσεων αναφέρουν, ότι το ύψος κύματος ( $H$ ) είναι πολύ μικρότερο από το μήκος κύματος ( $L$ ) και το βάθος ( $h$ ) και ότι η τριβή απουσιάζει. Η γραμμική θεωρία παρά την απλότητά της έχει δώσει χρήσιμες προσεγγίσεις των κινηματικών και δυναμικών ιδιοτήτων των επιφανειακών κυματισμών **[Πίνακας 1]**. Η λύση της περιγραφής της ανύψωσης/καταβύθισης της θαλάσσιας επιφάνειας δίνεται ως:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

με  $\eta(x, t)$  θέση της θαλάσσιας επιφάνειας,  $x$  η απόσταση κατά την διεύθυνση του κύματος σε  $x$ ,  $t$  ο χρόνος,  $H$  το πλάτος κύματος,  $k$  κυματικός αριθμός ( $2\pi/L$ ),  $\omega$  η γωνιακή συχνότητα ( $2\pi/T$ ).

Η εξίσωση της διασποράς προκύπτει μέσω των οριακών κινηματικών συνθηκών της θαλάσσιας επιφάνειας. Στη δυναμική των ρευστών, η εξίσωση της διασποράς των κυμάτων οφείλεται στη κίνηση των σωματιδίων του νερού, κατά την οποία ο κυματισμός που αποτελείται από σύνθεση κυμάτων με διαφορετικές περιόδους, έχει ως αποτέλεσμα την διασπορά του κατά την προώθηση του, διότι το κάθε κύμα διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα φάσης. Η σχέση διασποράς για τους κυματισμούς συσχετίζει την ταχύτητα φάσης και το μήκος κύματος με την περίοδο ή την συχνότητα του κυματισμού. Οι παράγωγες εξισώσεις της αφορούν την εξίσωση της φασικής ταχύτητας ( $C$ ), του μήκους κύματος στα βαθιά νερά ( $L_0$ ) και του μήκους κύματος ( $L$ ) σε ένα συγκεκριμένο βάθος ( $d$ ). Η ταχύτητα φάσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η περίοδος κυματισμού λόγω της αναλογίας της, άρα ένας κυματισμός θα διαδίδεται πιο γρήγορα από έναν άλλον με μικρότερη περίοδο.

$$\sigma^2 = gk \tanh(kd) \quad (3)$$

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kd) \quad (4)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (5)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kd) \quad (6)$$

**Πίνακας 1.**Κυματικές λύσεις για τα κύματα Airy (Komar,1998).

Parameter	General Expression	Deep Water	Shallow Water
Surface elevation	$\eta(x,t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$		
Phase velocity	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$	$C_w = \frac{gT}{2\pi}$	$C_s = \sqrt{gh}$
Wave length	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$	$L_w = \frac{gT^2}{2\pi}$	$L_s = T\sqrt{gh}$
Horizontal orbital diameter	$d = H \frac{\cosh[k(z_o + h)]}{\sinh(kh)}$	$d = He^{kz_o}$	$d = \frac{HL_s}{2\pi h} = \frac{HT}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{h}}$
Vertical orbital diameter	$s = H \frac{\sinh[k(z_o + h)]}{\sinh(kh)}$	$s = He^{kz_o}$	$s = 0$
Horizontal orbital velocity	$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z_o + h)]}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t)$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - \sigma t)$	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos(kx - \sigma t)$
Vertical orbital velocity	$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z_o + h)]}{\sinh(kh)} \sin(kx - \sigma t)$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \sin(kx - \sigma t)$	$w = 0$

### 1.4. Ανάλυση Fourier

Το θεώρημα του Fourier αναφέρει ότι οι λύσεις της κυματικής εξίσωσης μπορούν να γραφτούν σαν άθροισμα ημιτονοειδών κυμάτων διαφόρων συχνοτήτων και μηκών κύματος που ταξιδεύουν προς όλες τις κατευθύνσεις. Το γεγονός ότι κάθε μέτρηση καταγράφεται σε διαφορετική χρονική στιγμή, ότι δηλαδή η μετρούμενη ποσότητα  $\xi$  είναι συνάρτηση του χρόνου ( $\xi=\xi(t)$ ), μας επιτρέπει να χρησιμοποιήσουμε την ανάλυση Fourier στην προσπάθεια εκτίμησης των διαφόρων συνιστωσών που προκαλούν την παρατηρούμενη μεταβλητότητα της παραμέτρου  $\xi$ . Η βασική θεωρία της ανάλυσης Fourier εισήχθη για πρώτη φορά το 1807 από το Γάλλο μαθηματικό Joseph Fourier (1768-1830). Η ιδέα του Fourier ήταν ότι κάθε χρονοσειρά πεπερασμένου μήκους  $T$  (που εκτείνεται δηλαδή σε χρονικό διάστημα  $0 < t < T$ , μπορεί να περιγραφεί σαν το γραμμικό άθροισμα ημιτονοειδών και συνημιτονοειδών συναρτήσεων. Κατά την χρησιμοποίηση χρονοσειρών από την καταγραφή δεδομένων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, τίθεται ένα όριο στον αριθμό των συνιστωσών Fourier που μπορούν να υπολογισθούν, το οποίο αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα  $dt$  μεταξύ δύο συνεχόμενων μετρήσεων. Οι χρονοσειρές μπορούν να γραφτούν σαν άθροισμα  $N/2$  συνιστωσών Fourier και να αναπαρασταθούν ως εξής:

$$y(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{p=1}^{N/2} [A_p \cos(\omega_p t) + B_p \sin(\omega_p t)] \tag{7}$$

Όπου  $\omega_p = 2\pi f_p = 2\pi p f_1 = \frac{2\pi}{T} p$  και για  $t_n = n dt$  η(7) μπορεί να γραφτεί:

$$y(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{p=1}^{N/2} [A_p \cos(2\pi p n / N) + B_p \sin(2\pi p n / N)] \tag{8}$$



$$= \frac{C_0}{2} + \sum_{p=1}^{N/2} [C_p \cos((2\pi p n/N) - \theta_p )]$$

Οι συντελεστές Fourier υπολογίζονται από τα παρακάτω ολοκληρώματα (αντικαταστημένα από αθροίσματα)

$$A_p = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N y_n \cos\left(\frac{2\pi p n}{N}\right), \quad p = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} \tag{9}$$

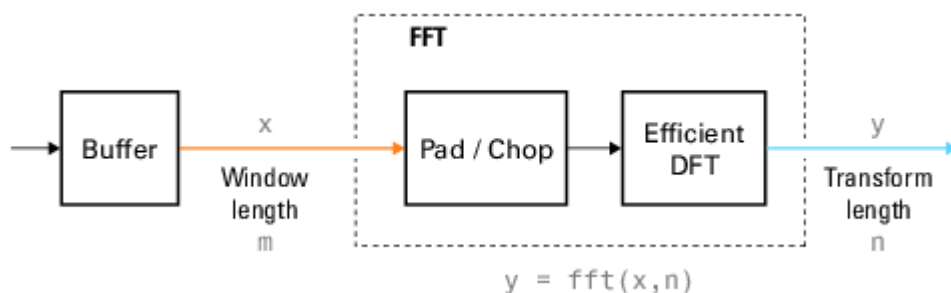
$$A_0 = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N y_n, \quad B_0 = 0 \tag{10}$$

$$A_{N/2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_n \cos(n\pi), \quad B_{N/2} = 0 \tag{11}$$

$$B_p = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N y_n \sin\left(\frac{2\pi p n}{N}\right), \quad p = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \tag{12}$$

Η ενέργεια που προέρχεται από την συνιστώσα  $p$  ισούται με το ημίαθροισμα των τετραγώνων των συντελεστών  $A_p$  και  $B_p$ .

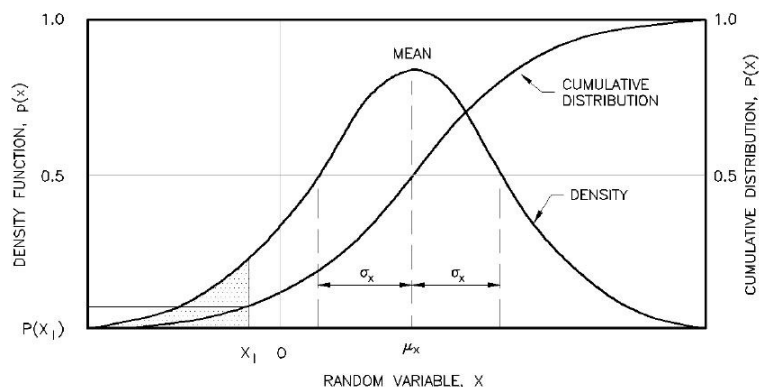
Η φασματική ανάλυση αναφέρεται στην περιγραφή των δεδομένων από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας μέσω του διακριτού μετασχηματισμού Fourier. Για υπολογιστική ευκολία έχει αναπτυχθεί και εφαρμόζεται εδώ και αρκετό καιρό ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT). Ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier (FFT) είναι ένας αλγόριθμος, ο οποίος υπολογίζει τον διακριτό μετασχηματισμό(DFT) που αναφέρθηκε παραπάνω και τον αντίστροφο του (IDFT). Η δυνατότητα που προσφέρει ο αλγόριθμος, δηλαδή της υπολογιστικής ευκολίας και την εξοικονόμησης χρόνου έχει συντελέσει στην εφαρμογή του σε πολλούς και διάφορους προσανατολισμούς των επιστημών, π.χ. της μηχανικής, των μαθηματικών, της φυσικής, της ωκεανογραφίας, κλπ. Η βασική ιδέα του αλγόριθμου αυτού δημοσιεύτηκε το 1965 από τους Cooley and Tukey.



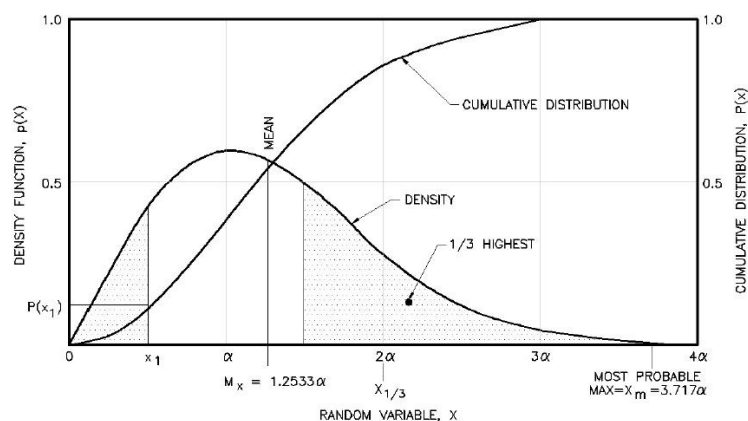
**Εικόνα 5.** Αναπαράσταση λειτουργίας του αλγόριθμου fft στην γλώσσα προγραμματισμού Matlab.

### 1.5. Στατιστική κατανομή και χαρακτηριστικά κυματισμών

Οι ανεμογενείς κυματισμοί σπάνια προσεγγίζουν μορφολογικά τους μονοχρωματικούς κυματισμούς, παρουσιάζουν μια τυχαία (στοχαστική) μορφή, η οποία εξελίσσεται στο χώρο και στο χρόνο ως αποτέλεσμα μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ διαφορετικών αρμονικών συνιστωσών και η πρόγνωση τους επιτυγχάνεται μέσω στατιστικών μεθόδων. Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατανομές πιθανοτήτων στη μελέτη των τυχαίων κυματισμών είναι η κατανομή Gauss [Εικ.6] και η κατανομή Rayleigh [Εικ.7]. Ο Rice (1944-1945) ανέπτυξε τη στατιστική θεωρία των τυχαίων σημάτων για την ανάλυση του ηλεκτρικού θορύβου και έπειτα ο Longuet Higgins(1952) εφάρμοσε αυτή τη θεωρία στην τυχαία ανύψωση της επιφάνειας του νερού για τα ωκεάνια κύματα για να περιγράψει την στατιστική συμπεριφορά τους, χρησιμοποιώντας απλοποιημένες υποθέσεις, διαπιστώνοντας ότι οι βασικές παράμετροι τους (ύψος κύματος, κυματική περίοδος) ακολουθούν συγκεκριμένους πιθανολογικούς νόμους κατανομής. Η στατιστική κατανομή των θαλάσσιων κυμάτων και των τυχαίων επιφανειών έχει καταγραφεί και περιγραφεί από τον Longuet Higgins (1952, 1957). Η στατιστική επαλήθευση της προαναφερόμενης θεωρίας έδειξε ότι το ύψος και το πλάτος κύματος ακολουθούν την κατανομή Rayleigh. Η θεώρηση αυτή χρησιμοποιείται για κυματισμούς που η ενέργεια τους συγκεντρώνεται σε ένα στενό εύρος περιόδων (narrow bands condition). Υπό αυτήν την προϋπόθεση τα ύψη κύματος ακολουθούν την κατανομή Rayleigh (Longuet-Higgins 1952, 1975, 1983).



**Εικόνα 6.** Απεικόνιση κανονικής κατανομής (Gauss) που ακολουθεί η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας(CEM,2008).



**Εικόνα 7.** Απεικόνιση κατανομής για το ύψος κύματος και αθροιστική κατανομή του (CEM 2008).

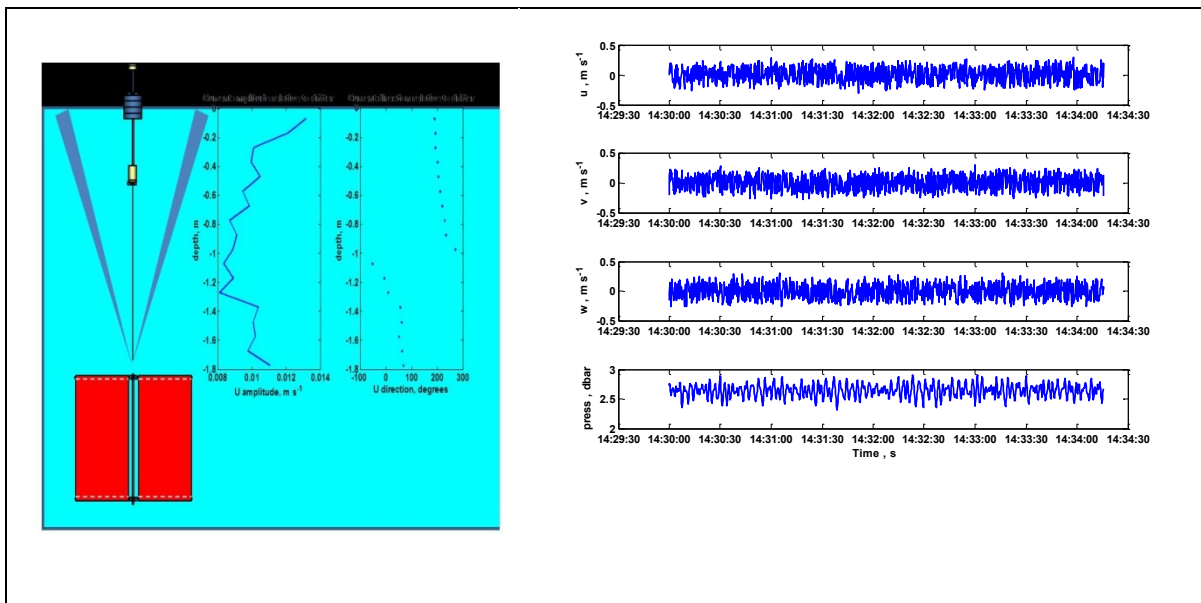
Η κατανομή Gauss χρησιμοποιείται περισσότερο για την εύρεση των πιθανοτήτων για την βραχυπρόθεσμη ανύψωση της θαλάσσιας επιφάνειας, ενώ η δεύτερη κατανομή περιγράφει την κατανομή των κυματικών υψών, προσδιορίζοντας ταυτόχρονα και κάποιες εκτιμήσεις για τα χαρακτηριστικά ύψη κύματος. Τα χαρακτηριστικά των κυματικών υψών αναφέρονται στο σημαντικό ύψος κύματος ( $H_s$ ), μέσο ύψος κύματος ( $\bar{H}$ ), μέγιστο πιθανό ύψος κύματος ( $H_{max}$ ) και στην μέση τετραγωνική τιμή ύψους κύματος ( $H_{rms}$ ). Το σημαντικό ύψος κύματος είναι η πιο σημαντική ποσότητα που χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η κατάσταση της θάλασσας και η έννοια του εισήχθη για πρώτη φορά από τους Sverdrup και Munk (1947). Το σημαντικό ύψος κύματος ( $H_s$ ), εκφράζει την μέση τιμή του ανώτερου 33% των υψών κύματος κατά την διάρκεια μιας δειγματοληψίας (Longuet-Higgins, 1952; Dean and Dalrymple, 1991). Η τιμή  $H_s$ , χρησιμοποιείται συχνά διότι συμπίπτει με την τιμή ύψους κύματος που δίνει ένας ναυτικός από την οπτική παρατήρηση της θάλασσας (Kinsman, 1965). Η εκτίμηση του σημαντικού ύψους παρέχει ένα εύχρηστο εργαλείο, χρήσιμο για δραστηριότητες ωκεάνειας μηχανικής (Goda, 1997).

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1. Καταγραφή δεδομένων

Τα δεδομένα λήφθηκαν κατά τη διεξαγωγή πειράματος από το Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας (Τ.Ε.Θ) του Πανεπιστημίου Αιγαίου σε ωκεανογραφικό πλόα του Ω/Κ Φιλία μεταξύ 2 και 7 Οκτώβρη σε περιοχή του Βόρειου Αιγαίου, ανατολικά της Λήμνου, μέσου βάθους 45 μέτρων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα καταγραφής της ταχύτητας του νερού για τις 6 Οκτώβρη. Η ανάγκη για την μέτρηση ρευμάτων και κυμάτων σε μια επιλεγόμενη συχνότητα ταυτόχρονα απαιτεί την πόντιση δύο εργαλείων, για την προκειμένη περίπτωση του πειράματος στην ανατολική ακτή της Λήμνου επιλέχθηκε ελεύθερα παρασυρόμενος πλωτήρας με ενσωματωμένο υψίσυχο ακουστικό τομογράφο (HF ADCP). Για την πραγματοποίηση των in-situ μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε ένας CODE-type drifter (Davis, 1985) χαμηλού κόστους σχεδιασμένος από το Πανεπιστήμιο

Αιγαίου (Zervakis, *et al.*,2009) εξοπλισμένος με Nortek Aquadopp HF ADCP 2MHz. Ο ελεύθερα παρασυρόμενος πλωτήρας (surface drifter) εφοδιασμένος με τον υψίσυχο ακουστικό τομογράφο, στραμμένο προς τα πάνω (upward-looking) ποντίστηκε με σκοπό την εκτίμηση των σχετικών τροχιακών συνιστωσών της ταχύτητας των σωματιδίων του νερού και της *in situ* πίεσης για τα ανώτερα 2 m της υδάτινης στήλης, σε 18 κελιά βάθους(bins). Ελήφθησαν 6 ριπές (Burst) δειγματοληψίας, με συχνότητα δειγματοληψίας στα 4 Hz, ενώ η απόσταση ανάμεσα σε διαδοχικά κελιά ορίστηκε στα 0.1 m. Συγκεκριμένα η καταγραφή των επιφανειακών ρευμάτων πραγματοποιήθηκε στις συνιστώσες της ταχύτητας ( $v_1, v_2, v_3$ ) κατά μήκος της κάθε ηχητικής δέσμης με το πρώτο κελί βάθους στα 1.8 m (bin 1) και το τελευταίο μετρούμενο κελί στα 0.1 m (bin 18). Η χρονική διάρκεια κάθε ριπής ήταν 300s, η χρονική απόσταση διαδοχικών ριπών 1800s, και το πείραμα διήρκησε συνολικά 2,5 ώρες.



**Εικόνα 8.** Καταγραφή επιφανειακών ρευμάτων στην ανατολική ακτή της Λήμνου μέσω ελεύθερα παρασυρόμενου πλωτήρα και ADCP για τα ανώτερα 2 m της υδάτινης στήλης (αριστερά), χρονοσειρές των ρευμάτων στις συνιστώσες ( $v_1, v_2, v_3$ ) και της πίεσης (δεξιά).

## 2.2. Προ-Επεξεργασία δεδομένων

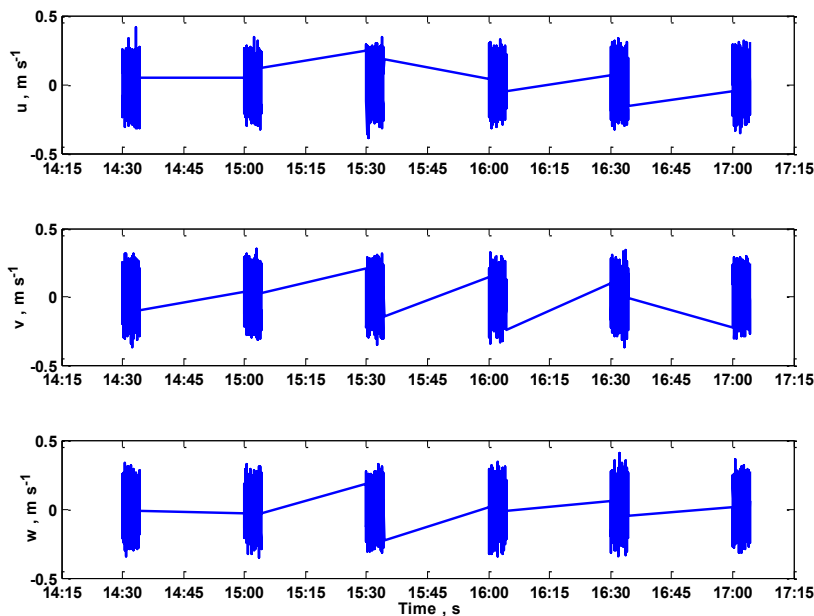
Τα δεδομένα που καταγράφηκαν από τον ακουστικό τομογράφο ρευμάτων (ADCP) και αφορούν τιμές της πίεσης και των συνιστωσών της ταχύτητας στο πεδίο του χρόνου για κάθε ριπή της δειγματοληψίας, υπέστησαν την επεξεργασία που περιγράφεται παρακάτω:

α) Αρχικά από τη χρονοσειρά της πίεσης αφαιρέθηκε η μέση τιμή των μετρήσεων που έγιναν πριν από την πόντιση του οργάνου (που αντιστοιχεί στην ατμοσφαιρική πίεση), ώστε πλέον οι εναπομένουσες τιμές να αντιστοιχούν σε υδροστατική συν κυματική πίεση, και να μπορεί από αυτές να υπολογιστεί το μέσο βάθος μέτρησης σε κάθε ριπή [Εικ. 15 και 16].

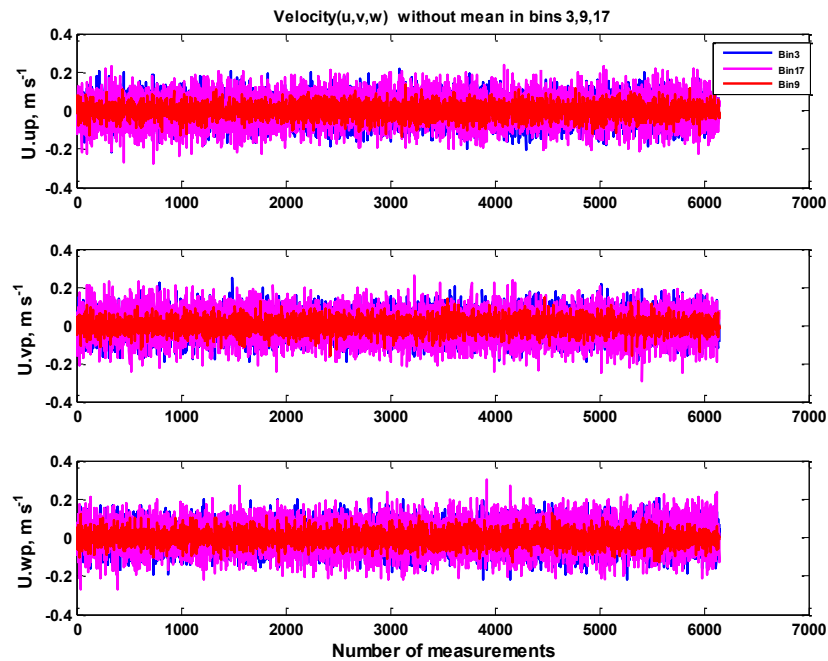
β) Σε μια προσπάθεια απομόνωσης της μέσης κίνησης του οργάνου από τις κυματικές κινήσεις του νερού, θεωρήσαμε ότι σε κάθε χρονική στιγμή, η μέση τιμή της ταχύτητας που καταγράφεται κατά μήκος της κάθε ηχητικής δέσμης οφειλόταν (τουλάχιστον ως επί το πλείστον) στις κινήσεις και ιδιοσταλαντώσεις της πλατφόρμας στο νερό. Έτσι, σε κάθε χρονική στιγμή, αφαιρέθηκε η εκάστοτε μέση τιμή υπολογισθείσα κατά μήκος κάθε ηχητικής δέσμης έτσι ώστε να περιοριστεί η επίδραση της κίνησης του πλωτήρα για χρήση στην μετέπειτα φασματική ανάλυση και την καλύτερη παρατήρηση και εστίαση στην κινηματική και ενεργειακή συμπεριφορά των επιφανειακών κυματισμών. Τα δεδομένα δίχως μέσους για τα bins 3,9,17 συγκρίθηκαν με τα αρχικά δεδομένα για κάθε bin [Εικ. 9 και 10]. Ο διαχωρισμός της κίνησης του πλωτήρα από τον κυματισμό στις καταγραφές του ρεύματος, επιτεύχθηκε ως εξής :

$$u'_{ij}(t) = u_{ij}(t) - \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} u_{ij}(t) \quad (13)$$

Το μήκος κύματος(L) των επιφανειακών κυματισμών που καταγράφηκαν και αναλύθηκαν για το βάθος των 45 m, υπολογίστηκε μέσω των παραγώγων συναρτήσεων της (3) και αφορούν τον υπολογισμό του μήκους κύματος σε βαθιά νερά(5) και τον υπολογισμό του μήκους κύματος στα ενδιάμεσα νερά μέσω της (6).



**Εικόνα 9.** Χρονοσειρές των συνιστωσών (u,v,w) της ταχύτητας σε όλα τα μετρούμενα βάθη(bins).



**Εικόνα 10.** Απεικόνιση των συνιστωσών της ταχύτητας ( $U_{up}$ ,  $U_{vp}$ ,  $U_{wp}$ ) μετά την αφαίρεση των μέσων ανά δέσμη τιμών για τα βάθη των 1.6 m (μπλε), 1.0 m (κόκκινο), 0.2 m (μωβ) συναρτήσει του συνολικού αριθμού των μετρήσεων για όλες τις ριπές (Burst) της δειγματοληψίας. Στο γράφημα παρουσιάζονται όλες μαζί οι μετρήσεις, χωρίς διαχωρισμό τους σε διακριτές ριπές.

Οι μέγιστες τιμές για τις μέσες ταχύτητες βρέθηκαν στα  $0.41 \text{ m s}^{-1}$  για την συνιστώσα  $u$  στο 1<sup>ο</sup> Burst,  $0.35 \text{ m s}^{-1}$  για την συνιστώσα  $v$  στο 2<sup>ο</sup> Burst και για την συνιστώσα  $w$  στα  $0.40 \text{ m s}^{-1}$  και για το 5<sup>ο</sup> Burst. Στην απεικόνιση των ταχυτήτων δίχως μέσους για τα βάθη των 0.2, 1.6 και 1.0 m διαπιστώνεται η ταύτιση των τιμών των περισσότερων μετρήσεων για το ρηχό και το βαθύ κελί για τα 2 beam, ενώ μικρές διαφορές παρουσιάζονται στο beam 3, με τις μέγιστες τιμές των επιφανειακών ρευμάτων να βρίσκονται για την πρώτη συνιστώσα στα  $0.23 \text{ m s}^{-1}$ , για την συνιστώσα  $v$  στα  $0.25 \text{ m s}^{-1}$ , ενώ στην συνιστώσα  $w$  η μέγιστη τιμή στο βάθος των 1.6 m βρέθηκε στα  $0.20 \text{ m s}^{-1}$  και για τα 0.2 m στα  $0.36 \text{ m s}^{-1}$ . Για το βάθος του 1.0 m η μέγιστη ταχύτητα των ρευμάτων υπολογίστηκε και για τις 3 συνιστώσες στα  $0.13 \text{ m s}^{-1}$  υποδεικνύοντας μια μέση κατάσταση σε σχέση με τα δυο παραπάνω μετρούμενα βάθη.

### 2.3. Φασματική Ανάλυση

Ακολούθησε φασματική ανάλυση για δύο λόγους: (α) για να εντοπιστούν μέσω του φάσματος οι κυματικές περίοδοι που περιέχουν την περισσότερη ενέργεια, και (β) γιατί μέσω του μετασχηματισμού Fourier που προηγείται προκύπτουν οι συντελεστές Fourier που συνθέτουν το περιοδόγραμμα της εκάστοτε χρονοσειράς της ταχύτητας. Επειδή οι κυματικές εξισώσεις (3)-(6) που συνδέουν το μήκος κύματος με την περίοδο του κυματισμού, είναι απαραίτητη η εφαρμογή του μετασχηματισμού Fourier ώστε το φάσμα των περιόδων να μπορεί να

μετατραπεί σε φάσμα μηκών κύματος. Η φασματική ανάλυση προϋποθέτει την αφαίρεση της κάθε γραμμικής τάσης και μέσης τιμής από τα δεδομένα πριν αυτά εισαχθούν και αναλυθούν στο πεδίο των συχνοτήτων για την καλύτερη παρατήρηση των φαινομένων που μελετώνται. Ο υπολογισμός των φασμάτων χρησιμοποιήθηκε απαιτεί τα δεδομένα να παρουσιάζουν συνέχεια στο πεδίο του χρόνου. Για τον υπολογισμό των φασμάτων χρησιμοποιήθηκε ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier. Για τις συνιστώσες της ταχύτητας και των δεδομένων της πίεσης που καταγράφηκαν από τον ακουστικό τομογράφο η φασματική διαδικασία έλαβε χώρα με συχνότητα Nyquist στα 2 Hz, διότι το βήμα χρόνου της δειγματοληψίας ήταν στα 0.25 s του χρησιμοποιήθηκε το φάσμα της πυκνότητας ισχύος μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier. Για τις συνιστώσες της ταχύτητας και των δεδομένων της πίεσης που καταγράφηκαν από τον ακουστικό τομογράφο η φασματική διαδικασία έλαβε χώρα με συχνότητα Nyquist στα 2 Hz, διότι το βήμα χρόνου της δειγματοληψίας ήταν στα 0.25 s. Η συχνότητα Nyquist προκύπτει από την σχέση (14).

$$f_n = 1/(2dt) \quad (14)$$

Ο υπολογισμός του φάσματος της ταχύτητας των σωματιδίων του νερού στις 3 συνιστώσες (u,v,w) και της πίεσης πραγματοποιήθηκε από το πεδίου χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων για παράθυρα μήκους 512 τιμών. Αρχικά η φασματική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στα δεδομένα των ταχυτήτων με μέση τιμή και έπειτα στα δεδομένα δίχως μέση τιμή ανά bin συναρτήσει της συχνότητας **[Εικ.14 και 15]**.

Το φάσμα της πίεσης με διαστήματα εμπιστοσύνης 95% συγκρίθηκε με τα φάσματα των συνιστωσών u,v,w δίχως μέση τιμή **[Εικ.16]**. Η φασματική ανάλυση της ταχύτητας στα 3 beam δίχως τους μέσους που πραγματοποιήθηκε στα bin 3,9,17 συγκρίθηκε με το φάσμα της πίεσης για την καλύτερη διεξαγωγή συμπερασμάτων για την συμπεριφορά και την ένταση του κυματικού πεδίου. Για την εξέταση της ενεργειακής κατανομής για τα ανώτερα 2 m της υδάτινης στήλης επιλέχτηκαν τρία ενδεικτικά μετρούμενα βάθη, τα οποία αναφέρονται στα 0.2,1.0,1.6 m. Το επόμενο βήμα στην φασματική ανάλυση αφορά την αναπαράσταση των φασμάτων στα bin 3,17 συναρτήσει της συχνότητας **[Εικ.17]** και του μήκους κύματος **[Εικ.18]** με σκοπό την εύρεση των υψηλότερα ενεργειακά συχνοτήτων και μηκών κύματος και την εύρεση της διαφοράς στην ενεργειακή κατανομή αυτών των δυο βαθών πριν και μετά από τη αφαίρεση των μέσων.

Η εκτίμηση της μέσης κυματικής περιόδου ( $T_p$ ) στις 6 ριπές της δειγματοληψίας επιτεύχθηκε μέσω της εύρεσης των κυρίαρχων φασματικών συχνοτήτων ( $f_p$ ) από τις φασματικές συνιστώσες του ύψους κύματος ( $H_f$ ) για τα μετρούμενα βάθη των 0.2,1.0,1.6 m, για την κάθε συνιστώσα βρέθηκε η μέση τιμή της συχνότητας με τις μεγαλύτερες τιμές φάσματος στα παραπάνω βάθη και η τυπική απόκλιση που εμφάνισαν οι τιμές της περιόδου στα bin 3,9,17.

Η εστίαση της περαιτέρω φασματικής ανάλυσης και στατιστικής ανάλυσης λόγω των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, πραγματοποιήθηκε στο bin 3 και στο bin 17, σε κάθε ριπή για την εύρεση του ύψους κύματος, του σημαντικού ύψους κύματος, της μέσης μέγιστης ενεργειακής περιόδου και της κυματικής κατεύθυνσης, με το bin9 να παρουσιάζει την λιγότερη ενέργεια αφού αντιστοιχεί περισσότερο στη μέση κίνηση του οργάνου, η οποία έχει αφαιρεθεί.

### 2.3.1. Υπολογισμός Ύψους κύματος

Για την εύρεση του ύψους κύματος και των φασματικών συνιστωσών του στα παραπάνω bin πραγματοποιήθηκε ο μετασχηματισμός των ταχυτήτων των σωματιδίων του νερού με αφαιρεμένους μέσους από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων για μήκος 1024 τιμών για κάθε Burst μέσω του γρήγορου μετασχηματισμού FFT (Fast Fourier Transform). Η διαδικασία του γρήγορου μετασχηματισμού αναπτύχθηκε από τους Cooley και Tukey (1965).

Στα αποτελέσματα των ταχυτήτων μετά από την αφαίρεση των μέσων από κάθε ηχητική δέσμη πραγματοποιήθηκε μετασχηματισμός Fourier από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων,  $u'_{ij}(t) \rightarrow U_{ij}(f)$ . Τα νέα δεδομένα υποβλήθηκαν ακολούθως σε μετασχηματισμό Fourier, και χρησιμοποιήσαμε τους κατά Fourier συντελεστές  $U_f$  που προέκυψαν για την εκτίμηση της συνεισφοράς της εκάστοτε κυματικής συχνότητας  $f$  στο ύψος κύματος  $H_f$ .

Για την εκτίμηση του ύψους κύματος από τις ταχύτητες που καταγράφονται σε κάθε βάθος χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση που συνδέει τις δύο παραμέτρους σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία των κυματισμών:

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(k(d+z))}{\sinh(kd)} \cos(kx - \sigma t) \quad (15)$$

όπου  $T$  η περίοδος κύματος,  $k = 2\pi/L$  κυματικός αριθμός,  $d$  βάθος περιοχής μελέτης,  $z$  μέση τιμή κάθε μετρούμενου βάθος, δηλαδή για κάθε bin,  $H$  η στιγμιαία ανύψωση της στάθμης θάλασσας λόγω του κύματος και  $u$  οι στιγμιαίες ταχύτητες που καταγράφονται σε βάθος  $z$  λόγω του κυματισμού.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εξίσωση (15) ισχύει για μονοχρωματικούς κυματισμούς κυματαριθμού  $k$  και περιόδου  $\sigma$ . Έτσι, η εφαρμογή της εξίσωσης θα έπρεπε να λάβει χώρα για συγκεκριμένους μονοχρωματικούς κυματισμούς χωριστά, ώστε από την τροχιακή ταχύτητα που αντιστοιχεί σε κάθε κυματισμό να βρεθεί το ύψος κύματος που αντιστοιχεί σε αυτόν, και μετά να γίνει η υπέρθεση όλων των υψών των διαφόρων μονοχρωματικών κυματισμών για την αναπαραγωγή της μορφής της επιφάνειας της θάλασσας όσον αφορά μόνο το κυματικό πεδίο. Για αυτό το λόγο, ακολουθήθηκε η παρακάτω περιγραφόμενη μέθοδος:

- (α) κατ' αρχήν καθορίστηκε το εύρος του κυματικού φάσματος επάνω στο διάγραμμα του συνολικού φάσματος της ταχύτητας, με την επιλογή ελάχιστης,  $\sigma_{min}$ , και μέγιστης,  $\sigma_{max}$ , συχνότητας του κυματικού φάσματος.



(β) στη συνέχεια έλαβε χώρα γρήγορος μετασχηματισμός Fourier για τον υπολογισμό των (μιγαδικών) συντελεστών Fourier  $U_f$  των ταχυτήτων  $u(t)$  σε κάθε bin.

(γ) ακολούθως, επιλύθηκε η σχέση

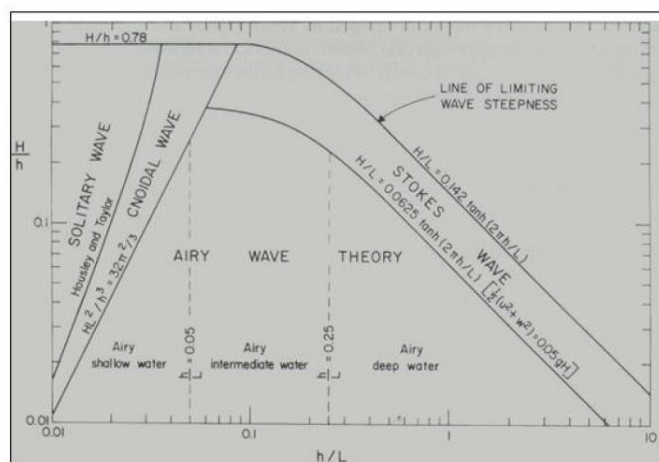
$$H_f = \frac{U_f T}{\pi} \frac{\sinh(kD)}{\cosh(k(D+z))} \tag{16}$$

που προκύπτει από την (15) μετασχηματισμένη κατά Fourier, και από την οποία προκύπτουν οι συντελεστές Fourier  $H_f$  του ύψους κύματος του μονοχρωματικού κυματισμού που αντιστοιχεί στη συχνότητα  $f$ .

(δ) μετά, οι συντελεστές Fourier  $H_f$  του ύψους κύματος του εκάστοτε μονοχρωματικού κυματισμού υπέστησαν αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier ώστε από την υπέρθεσή τους να προκύψει η μεταβλητότητα της στάθμης θάλασσας  $H(t)$  που οφείλεται στον κυματισμό, όπως αυτή αναπαράγεται από κάθε bin μέτρησης της ταχύτητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή των βημάτων (γ) και (δ) περιορίστηκε στο εύρος των συχνοτήτων μεταξύ της ελάχιστης,  $\sigma_{min}$ , και μέγιστης,  $\sigma_{max}$ , συχνότητας του κυματικού φάσματος.

Η βασική προϋπόθεση που ορίστηκε για τον υπολογισμό αυτών των μεγεθών αφορά το οριζόντιο μήκος κύματος, το οποίο πρέπει να επιτρέπει την αίσθηση του κύματος στο βάθος μέτρησης. Συγκεκριμένα, ο λόγος του κάθε μέσου μετρούμενου βάθος ( $z$ ) προς το μήκος κύματος ( $L$ ) δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 0.2, έτσι ώστε να γίνεται πραγματικά αισθητό το κύμα στο συγκεκριμένο βάθος.



**Εικόνα 11.** Κατανομές κυματικών παραμέτρων και θεωριών βασισμένες στην σχέση  $h/L$ , όπου  $h$  =βάθος και  $L$  =μήκος κύματος (Komar,1998).

## 2.4. Στατιστική Ανάλυση

Για την εύρεση του σημαντικού ύψους κύματος ακολουθήθηκε η στατιστική κατανομή Rayleigh. Στα τυχαία σήματα των κυματισμών σε στενά κανάλια (narrow bands) έχει αποδειχθεί ότι τα ύψη κύματος ακολουθούν την κατανομή Rayleigh (Longuet-Higgins, 1952). Στην περίπτωση που η κυματική ενέργεια είναι συγκεντρωμένη σε ένα πολύ στενό φάσμα της περιόδου κύματος, τότε τα μέγιστα κυματικά προφίλ θα συμπίπτουν με τις κορυφές των κυμάτων, ενώ τα ελάχιστα προφίλ συγκεντρώνονται στις κοιλίες των κυμάτων, αυτό ορίζεται ως κατάσταση στενής ζώνης. Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, τα κυματικά ύψη αντιπροσωπεύονται από την κατανομή Rayleigh (Longuet-Higgins 1952, 1975, 1983). Η εκτίμηση του σημαντικού ύψους κύματος  $H_s$  για την εκάστοτε δέσμη ( $j$ ) και το κάθε bin( $i$ ) επιτεύχθηκε μέσω των χρονοσειρών της θέσης της θαλάσσιας επιφάνειας  $\eta_{ij}(t)$ , με βάση την ανάλυση Rayleigh. Η εκτίμηση του σημαντικού ύψους κύματος, προϋποθέτει αρχικά την εκτίμηση της μέσης τετραγωνικής ρίζας ( $H_{rms}$ ) της στάθμης. Η διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τις 6 ριπές της δειγματοληψίας.

Οι μετρήσεις πεδίου μερικές φορές αποκλίνουν από την κατανομή Rayleigh, και η απόκλιση φαίνεται να αυξάνει με την αύξηση του ύψους των κυμάτων, και μειώνεται καθώς το φάσμα των κυμάτων παρουσιάζει απότομες κορυφές.

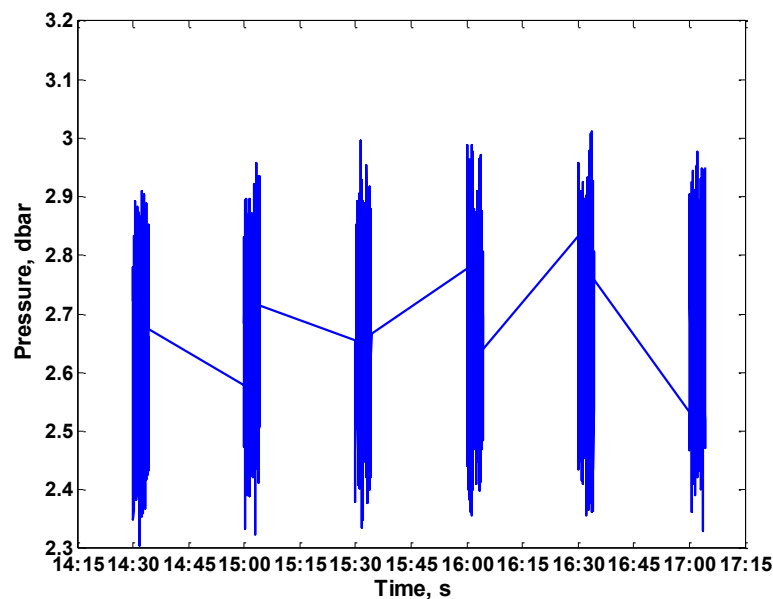
$$H_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^{18} \frac{(\eta_{ij}(t))^2}{N}} \quad (17)$$

$$H_s = \sqrt{2} H_{rms} \quad (18)$$

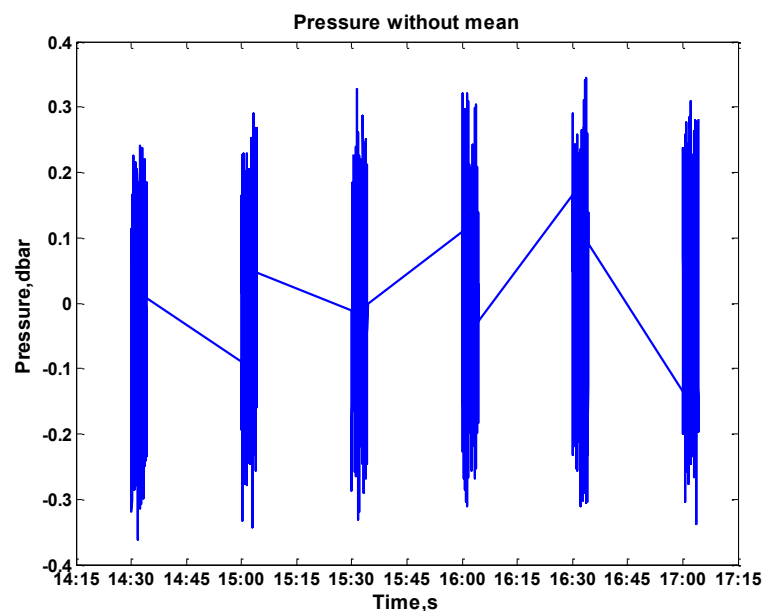
Η στατιστική ανάλυση για τους επιφανειακούς κυματισμούς επιτεύχθηκε για τις 6 ριπές της δειγματοληψίας και συσχετίστηκαν με τις μέσες τιμές των μετρούμενων βαθών για κάθε συνιστώσα για τον έλεγχο σε ποια βάθη εμφανίζονται οι υψηλότεροι κυματισμοί με τα αποτελέσματα να εμφανίζουν τις μεγαλύτερες τιμές στα βάθη των 0.2 και 1.6 m. Σε κάθε συνιστώσα και ριπή υπολογίστηκε η μέση τιμή του σημαντικού ύψους κύματος στα 2 παραπάνω βάθη και στο βάθος του 1.0 m και η τυπική απόκλιση που εμφάνισαν μεταξύ τους. Οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε ριπή και συνιστώσα συγκρίθηκαν στην μέση χρονική διάρκεια της κάθε ριπής.

### 3. Αποτελέσματα

#### 3.1. Ανάλυση στα δεδομένα της πίεσης



**Εικόνα 12.** Απεικόνιση της πίεσης με μέση τιμή συναρτήσει της κάθε χρονικής διάρκειας για τις 6 ριπές (Burst) της δειγματοληψίας.

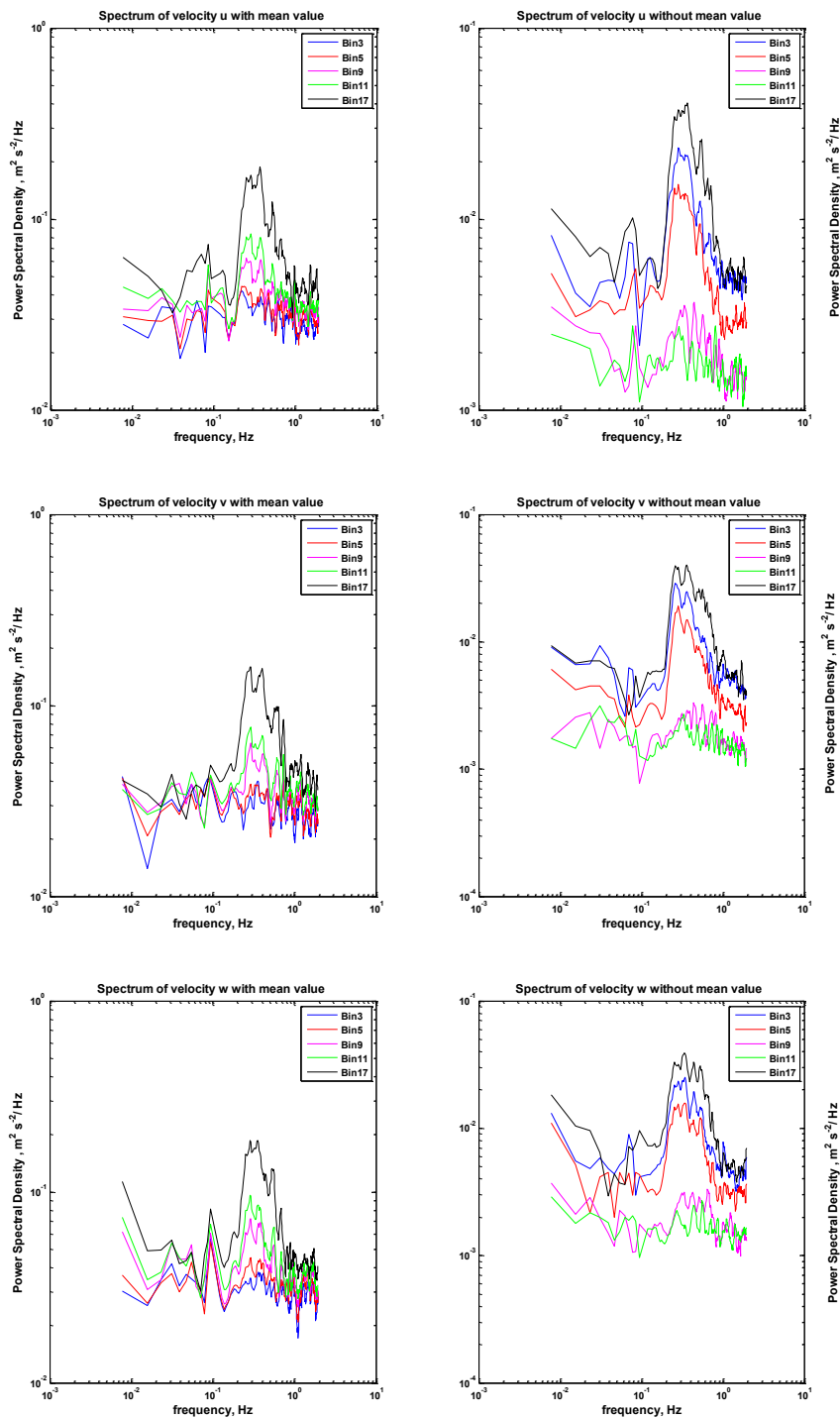


**Εικόνα 13.** Απεικόνιση της πίεσης δίχως μέση τιμή συναρτήσει του συνολικού αριθμού των μετρήσεων για όλες τις ριπές (Burst) της δειγματοληψίας.

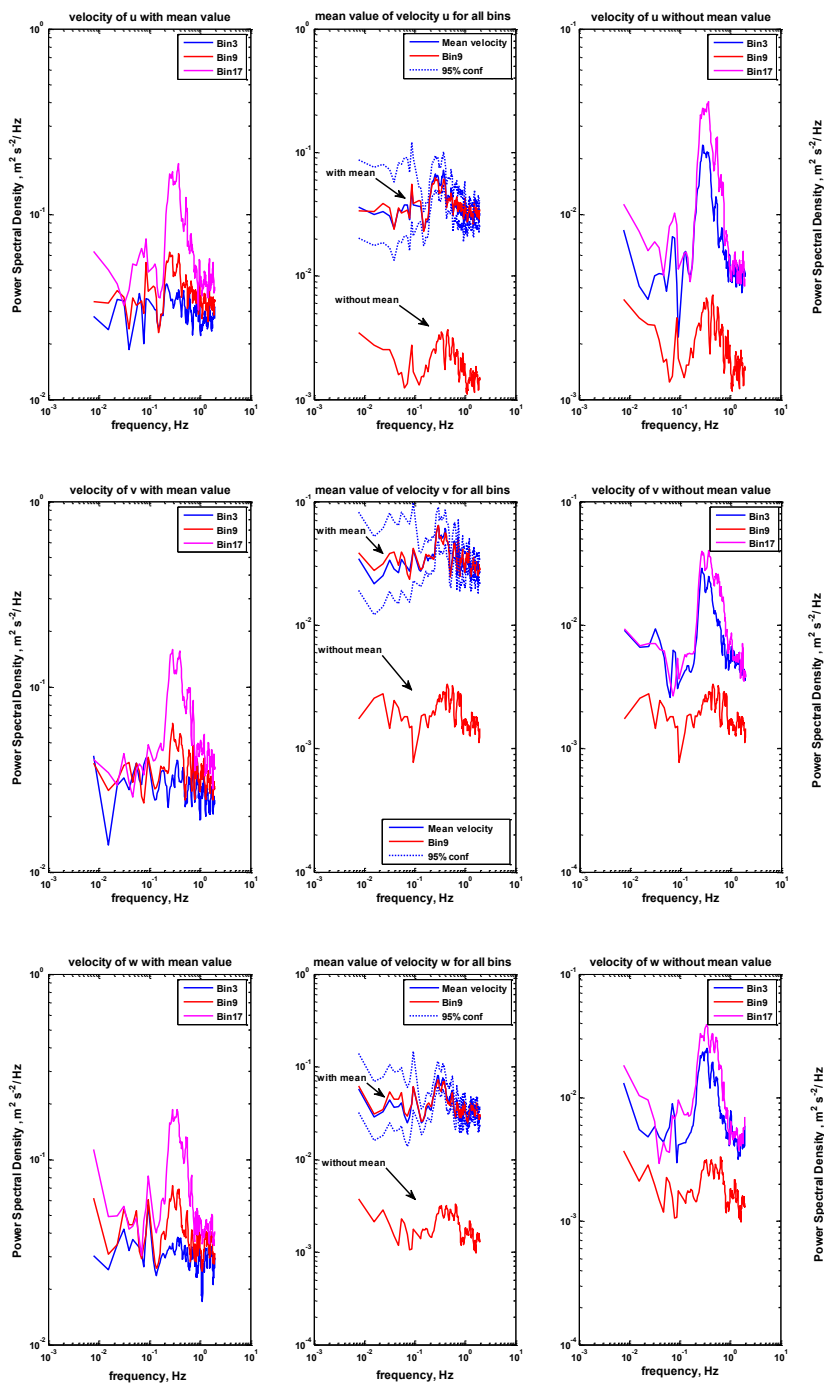
### 3.2. Φασματική ανάλυση επιφανειακών ρευμάτων στις συνιστώσες u,v,w

Η φασματική ανάλυση πραγματοποιήθηκε στα βάθη των 0.2, 1.0, 1.6 m για τα δεδομένα των συνιστωσών της ταχύτητας (u,v,w) με/δίχως μέση τιμή και των μέσω τιμών της ταχύτητας σε όλα τα μετρούμενα βάθη για μήκος 512 μετρήσεων με σκοπό αρχικά να διαχωριστεί η κίνηση που διαγράφει ο πλωτήρας από την κίνηση των επιφανειακών κυματισμών, και έπειτα μέσω της σύγκρισης των υψών κύματος στο ρηχό και βαθύ μετρούμενο βάθος διακρίθηκε η κοινή συμπεριφορά τους και οι μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους. Στα δεδομένα που εμπεριέχουν τις μέσες τιμές παρατηρείται ότι στο bin 3 εμφανίστηκαν οι μικρότερες τιμές σε σχέση με τα bin 9, 17. Τα φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας κατά τη σύγκριση τους με τα φάσματα του μεσαίου μετρούμενου βάθους (bin 9) εμφάνισαν παρόμοια ποσά ενέργειας, ενώ αρκετά κοντινές τιμές εμφάνισαν τα φάσματα που ήταν απαλλαγμένα από μέσους στο ρηχό και βαθύ κελί. Η αφαίρεση της μέσης ανά δέσμη τιμής προκαλεί σημαντικότερη μείωση της ενέργειας που καταγράφεται στα μεσαία bins, και κάνει συγκρίσιμες τις ενέργειες που καταγράφονται στα ακραία bins εντός του εύρους βαθών μέτρησης. Συγκεκριμένα οι μέγιστες τιμές για τις μέσες συνιστώσες της ταχύτητας και του βάθους του 1.0 m διακυμαίνονται από 0.06 έως 0.08  $m^2 s^{-2} / Hz$  με πολύ μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους στα επίπεδα ενέργειας το οποίο διακρίνεται και από την **[Εικ.15]** και με τις μέγιστες συχνότητες να παρατηρούνται από 0.25 Hz έως 0.37 Hz με τις συνιστώσες v,w να εμφανίζουν τις μέγιστες συχνότητες για 0.29 Hz.

Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν την επιρροή που ασκεί η μέση τιμή στα δεδομένα για το βάθος του 1.0 m, διότι πριν την αφαίρεση του μέσου παρουσίαζε κατά μέσο όρο στις συνιστώσες μέγιστη φασματική ενέργεια στα 0.07  $m^2 s^{-2} / Hz$ , ενώ με την αφαίρεση η τιμή της μέγιστης ενέργειας μειώθηκε στα 0.003  $m^2 s^{-2} / Hz$ . Για τα bin 3 και 17 παρατηρήθηκαν ποσά ενέργειας από 0.02 έως 0.04  $m^2 s^{-2} / Hz$ , το οποίο υποδηλώνει αρχικά την καλή ενεργειακή συμφωνία των δύο βαθών και έπειτα την σημαντική επιρροή που ασκεί η κίνηση του πλωτήρα στην καταγραφή των ταχυτήτων των ρευμάτων κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας και το μεγάλο βαθμό επιρροής στα δεδομένα που αφορούν το ρηχό κελί βάθους. Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό, αναφέρουμε ότι στα 0.2 m η μέγιστη φασματική ενέργεια αντιστοιχούσε στα 0.19  $m^2 s^{-2} / Hz$ , ενώ μετά την αφαίρεση της μέσης ταχύτητας δέσμης η τιμή μειώθηκε σημαντικά στα 0.04  $m^2 s^{-2} / Hz$ .

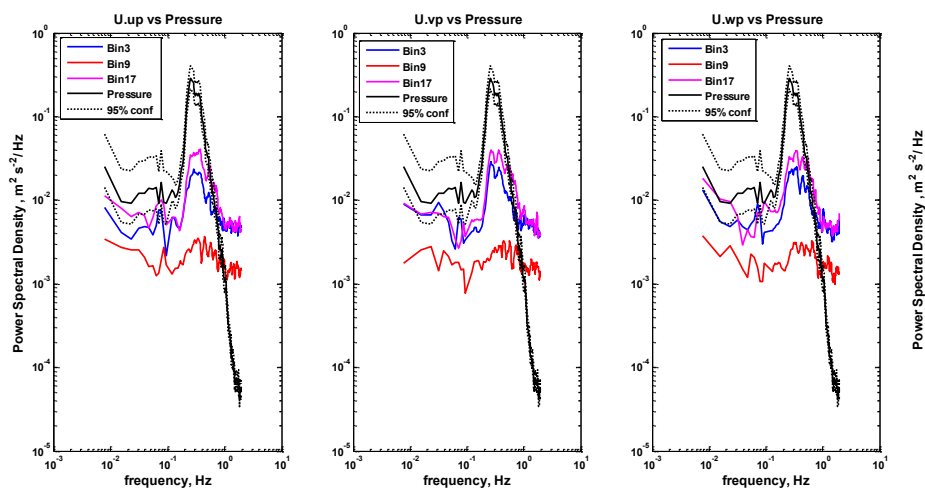


**Εικόνα 14.** Φασματική ανάλυση των συνιστωσών της ταχύτητας με (αριστερά)/ δίχως (δεξιά) μέσους στα βάθη των 0.2 m(μαύρο ),0.8 m(πράσινο χρώμα),1.0 m(μωβ),1.4 m(κόκκινο),1.6 m(μπλε). Με την συνιστώσα u (πάνω), συνιστώσα v(κέντρο), συνιστώσα w (κάτω).



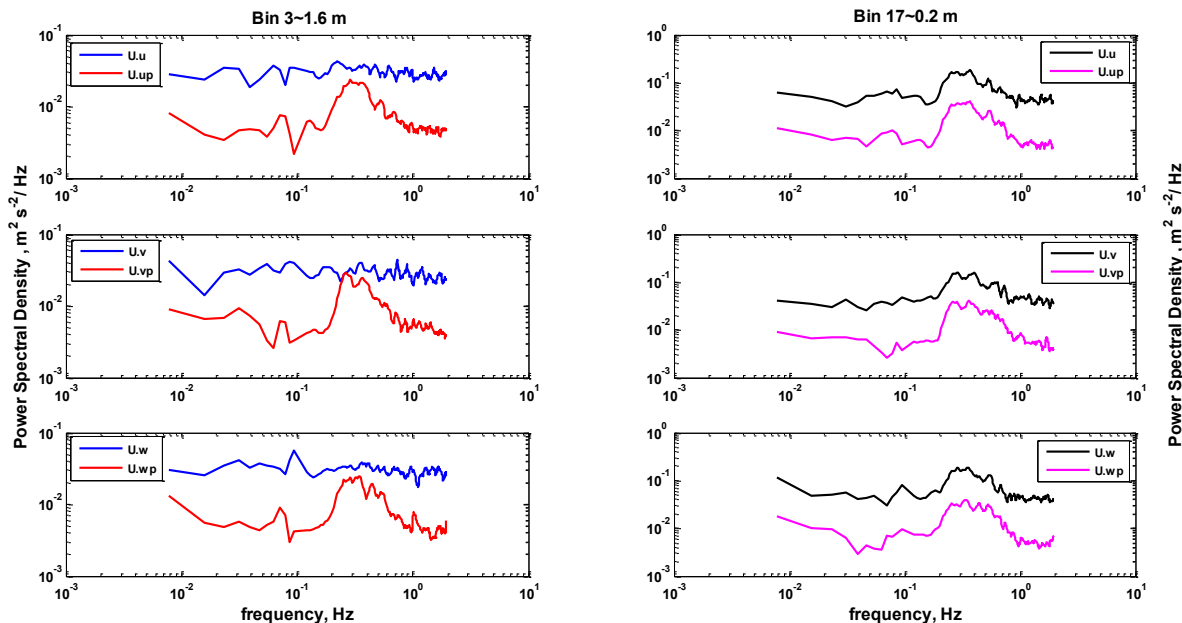
**Εικόνα 15.** Φασματική αναπαράσταση των συνιστωσών της ταχύτητας (u,v,w) με μέση τιμή (αριστερά) στα bin 3,9,17, της μέσης ταχύτητας για όλα τα βάθη σε κάθε συνιστώσα (κέντρο) σε σύγκριση με το bin 9 με/δίχως μέση τιμή, των συνιστωσών της ταχύτητας δίχως μέση τιμή στα bin 3,9,17 (δεξιά) συναρτήσεως της συχνότητας. Για τα φάσματα των μέσων τιμών της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκαν διαστήματα εμπιστοσύνης 95%.

Η σύγκριση των φασματικών συνιστωσών των ταχυτήτων που αναφέρονται στις τροχιακές κινήσεις του νερού με το φάσμα της πίεσης αποσκοπεί στην εύρεση του εύρους των συχνοτήτων, στο οποίο εμφανίστηκε η έναρξη διάδοσης και καταγραφής αλλά και απόσβεσης, των μέγιστων τιμών κατά την διάρκεια καταγραφής των ανώτερων 2 m της υδάτινης στήλης. Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν μέσω της παραπάνω διαδικασίας φαίνεται ότι στα φάσματα των ταχυτήτων στις συνιστώσες  $u, v$  για τα βάθη των 0.2 και 1.6 m το εύρος στο οποίο εμφανίστηκαν οι μέγιστες τιμές του φάσματος και η απόσβεση τους παρατηρήθηκε από 0.16 έως 0.47 Hz. Για την συνιστώσα δέσμης  $w$  το αντίστοιχο εύρος συχνοτήτων παρατηρήθηκε από 0.14 έως 0.60 Hz. Το βάθος του 1.0 m, παρουσίασε πιο μικρές τιμές ενέργειας από τα bin 3 και 17 και με αντίστοιχο εύρος συχνοτήτων από 0.19 έως 0.62 Hz για τις συνιστώσες  $u, v$  ενώ για την συνιστώσα  $w$  από 0.25 έως 0.77 Hz. Για το φάσμα της πίεσης υψηλή μεταβλητότητα παρατηρήθηκε μεταξύ των συχνοτήτων από 0.13 έως 0.36 Hz, σε αυτό το εύρος συμπίπτουν και οι μέγιστες τιμές των βαθών 0.2 και 1.6 m, ενώ για το bin 9 να εμφανίζει τις μέγιστες τιμές σε μεγαλύτερες συχνότητες με αποτέλεσμα να διαδίδεται με μικρότερες περιόδους.



**Εικόνα 16.** Φασματική σύγκριση των συνιστωσών της ταχύτητας στα βάθη των 0.2,1.0,1.6 m δίχως μέσους με το φάσμα της πίεσης για μήκος 512 τιμών συναρτήσεως της συχνότητας. Βάθος των 1.6 m (μπλε χρώμα), βάθος του 1.0 m (κόκκινο χρώμα), βάθος των 0.2 m (μωβ χρώμα), πίεση (μαύρο χρώμα), διαστήματα εμπιστοσύνης 95% (διακεκομμένη μαύρη γραμμή).

3.2.1. Φασματική σύγκριση κυματικών τροχιακών ταχυτήτων συναρτήσει συχνότητας



Εικόνα 17. Φασματική σύγκριση των u,v,w συνιστωσών της ταχύτητας με (μπλε και μαύρο) / δίχως (κόκκινο και μωβ) μέση τιμή συναρτήσει της συχνότητας για το bin3 και το bin17.

Πίνακας 2. Καταγραφή μέγιστων τιμών ενέργειας και των αντίστοιχων συχνοτήτων στο Bin 17.

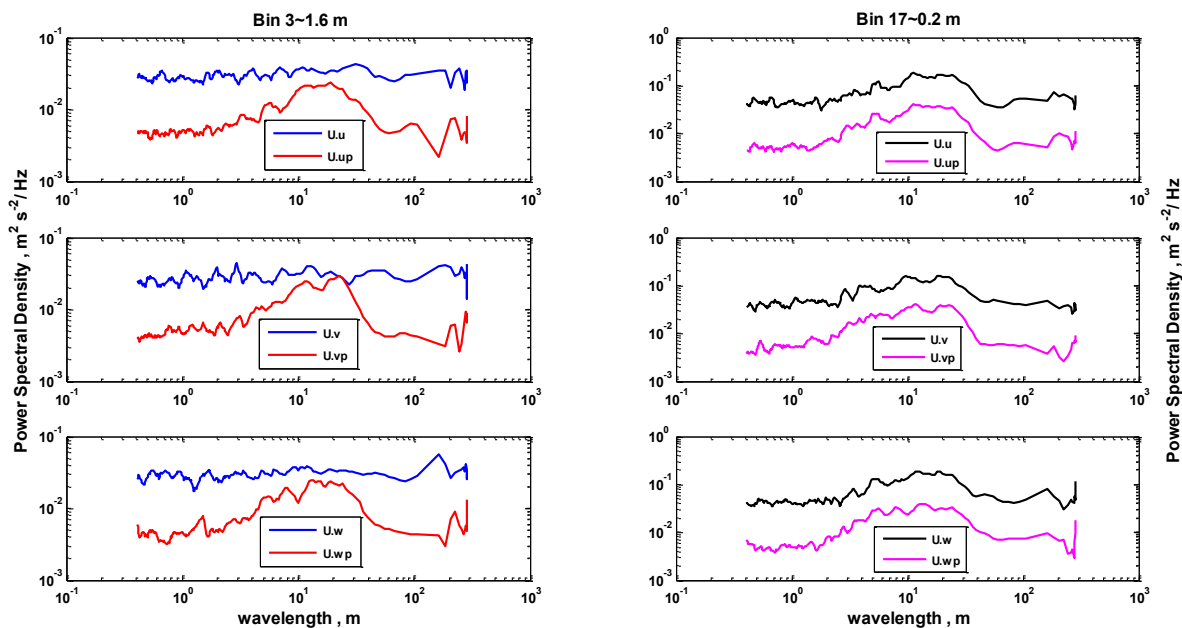
Συνιστώσες ταχύτητας Bin 17~0.2 m	Μέγιστη ενέργεια m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> Hz <sup>-1</sup>	Συχνότητα (Hz)
U.u	0.19	0.37
U.v	0.16	0.29
U.w	0.19	0.29
U.up	0.04	0.37
U.vp	0.04	0.36
U.wp	0.04	0.34

Πίνακας 3. Καταγραφή μέγιστων τιμών ενέργειας και των αντίστοιχων συχνοτήτων στο Bin 3.

Συνιστώσες ταχύτητας Bin 3~1.6 m	Μέγιστη ενέργεια m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> Hz <sup>-1</sup>	Συχνότητα (Hz)
U.u	0.04	0.22
U.v	0.04	0.73
U.w	0.04	0.50
U.up	0.02	0.29
U.vp	0.03	0.26
U.wp	0.02	0.35



3.2.2. Φασματική σύγκριση κυματικών τροχιακών ταχυτήτων σε σχέση με μήκος κύματος



Εικόνα 18. Φασματική σύγκριση των u,v,w συνιστωσών της ταχύτητας με (μπλε και μαύρο) / δίχως (κόκκινο και μωβ) μέση τιμή συναρτήσει του μήκους κύματος για το bin3 και το bin17.

Πίνακας 4. Καταγραφή μέγιστων τιμών ενέργειας και του αντίστοιχου μήκους κύματος στο Bin 17.

Συνιστώσες ταχύτητας Bin 17~0.2 m	Μέγιστη ενέργεια $m^2 s^{-2} Hz^{-1}$	Μήκος Κύματος (m)
U.u	0.19	11.3
U.v	0.16	18.2
U.w	0.19	19.2
U.up	0.04	11.3
U.vp	0.04	11.8
U.wp	0.04	13.5

Πίνακας 5. Καταγραφή μέγιστων τιμών ενέργειας και του αντίστοιχου μήκους κύματος στο Bin 3.

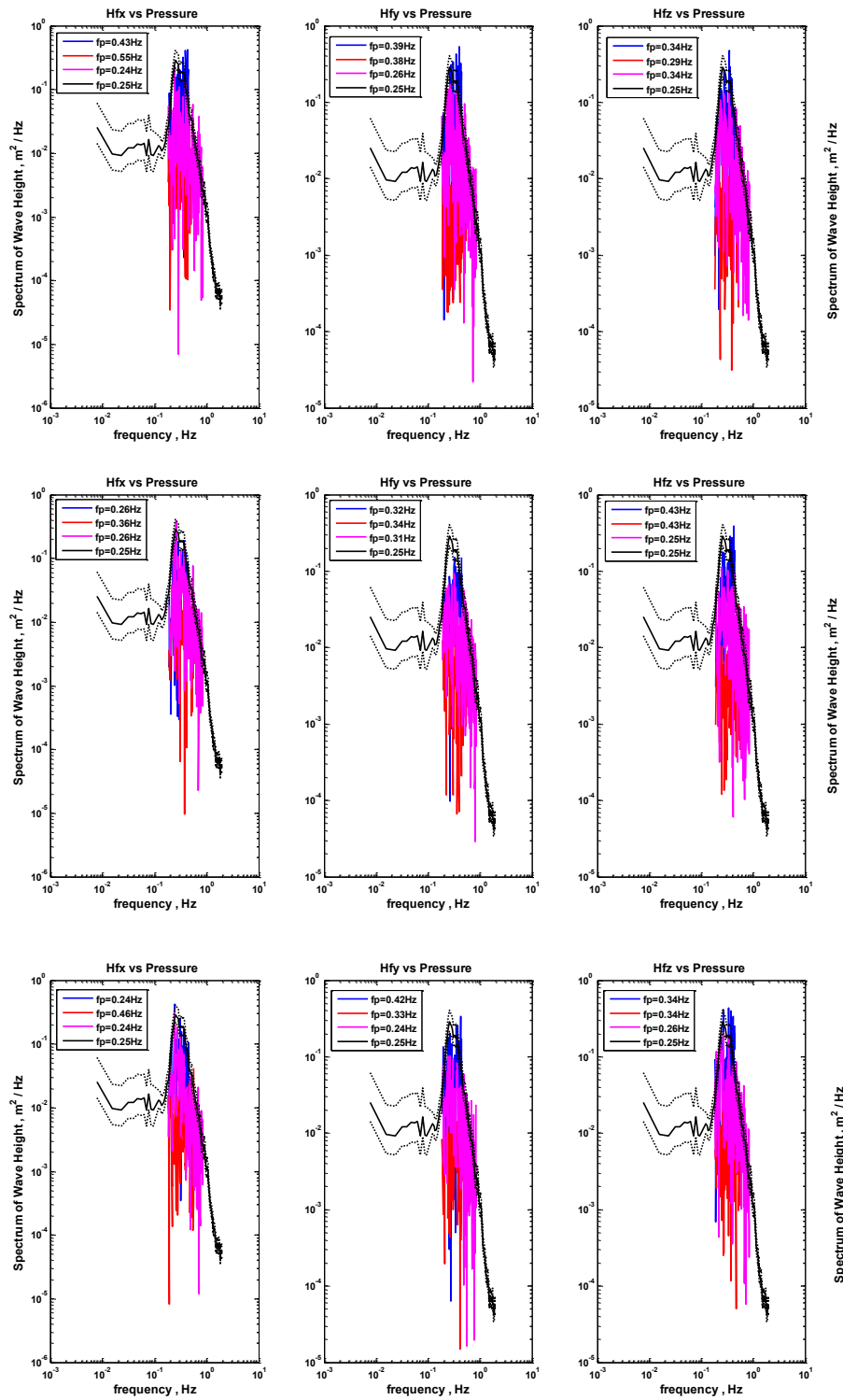
Συνιστώσες ταχύτητας Bin 3~1.6 m	Μέγιστη ενέργεια $m^2 s^{-2} Hz^{-1}$	Μήκος Κύματος (m)
U.u	0.04	31.5
U.v	0.04	12.4
U.w	0.04	22.8
U.up	0.02	19.2
U.vp	0.03	11.8
U.wp	0.02	12.9

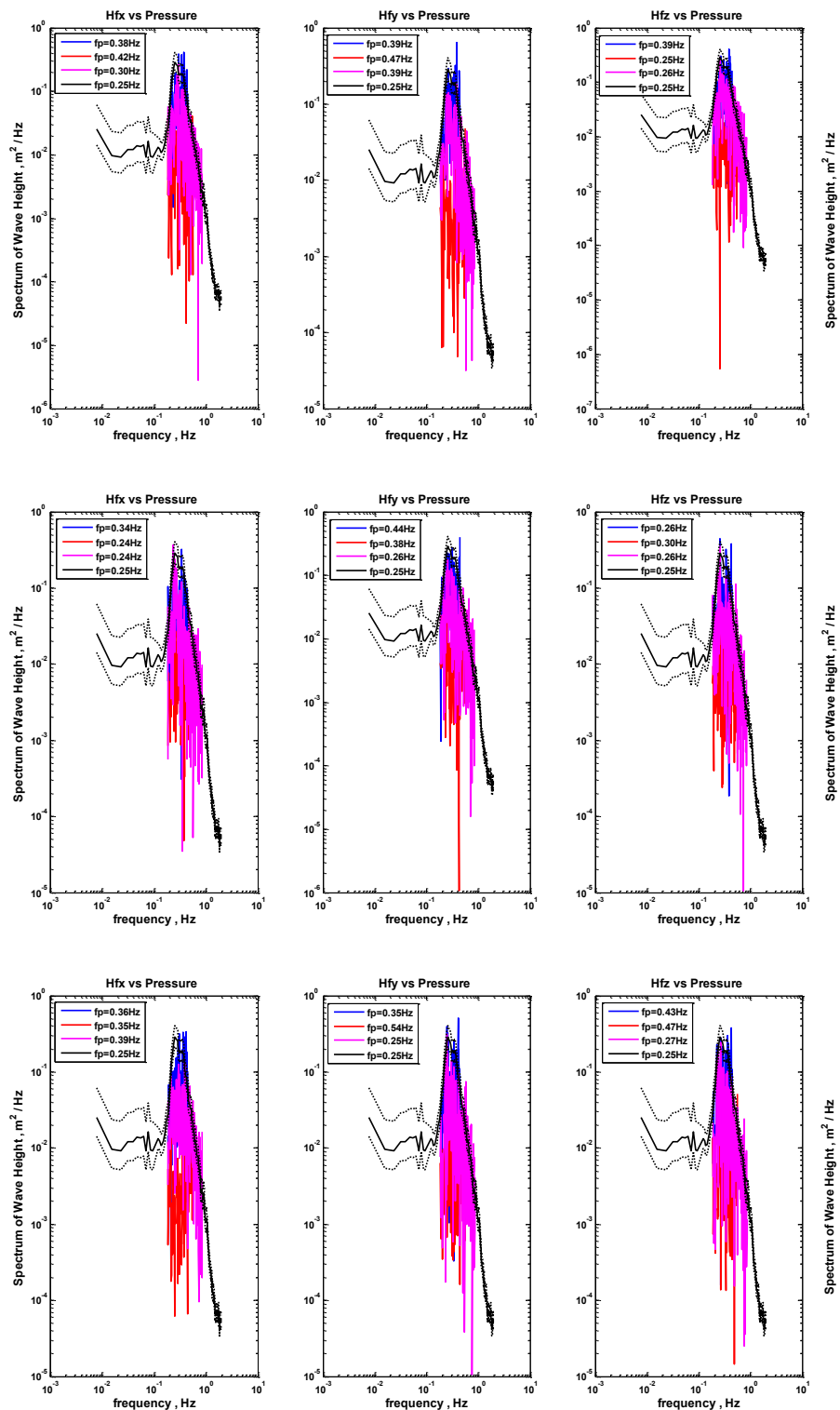
### 3.3. Φασματική ανάλυση κυματικών τροχιακών ταχυτήτων στις συνιστώσες δέσμης ανά ριπή

Στην ανάλυση των φασματικών συνιστωσών του ύψους κύματος οι συχνότητες που εμφανίστηκαν οι μέγιστες τιμές κυματικής ενέργειας για τα βάθη των 0.2,1.0,1.6 m για την κάθε ριπή της δειγματοληψίας, παρατηρήθηκαν για το 1<sup>ο</sup> Burst και το bin 3 από 0.34 έως 0.43 Hz ,για το bin 17 από 0.24 έως 0.39 Hz ,ενώ για το bin 9 που παρουσίασε τα μικρότερα ποσά ενέργειας οι συχνότητες κυμάνθηκαν από 0.29 έως 0.55 Hz. Στο 2<sup>ο</sup> Burst και για το bin 3 το εύρος των συχνοτήτων βρέθηκε από 0.35 έως 0.43 Hz ,για το bin 17 από 0.25 έως 0.39 Hz και για το bin 9 από 0.35 έως 0.47 Hz. Στο 3<sup>ο</sup> Burst και για το bin 3 από 0.26 έως 0.43 Hz,για το bin 17 από 0.25 έως 0.31 Hz και για το bin 9 από 0.34 έως 0.43 Hz. Στο 4<sup>ο</sup> Burst και για το bin 3 η συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας εμφανίζεται από τις συχνότητες των 0.26 έως 0.44 Hz,για το bin 17 από 0.24 έως 0.26 Hz,ενώ για το bin 9 από 0.23 έως 0.38Hz. Στο 5<sup>ο</sup> Burst και για το bin 3 η συγκέντρωση της μέγιστης κυματικής ενέργειας απαντάται στις συχνότητες από 0.24 έως 0.42 Hz,για το bin 17 από 0.24 έως 0.26 Hz και για το bin 9 από 0.33 έως 0.46 Hz. Στο 6<sup>ο</sup> Burst και για το bin 3 η συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας εμφανίζεται από συχνότητες από 0.38 έως 0.39 Hz,για το bin 17 με συχνότητες από 0.26 έως 0.39 Hz και για το bin 9 από 0.25 έως 0.47 Hz. Η διακύμανση των μέγιστων τιμών ενέργειας για τις φασματικές συνιστώσες του ύψους κύματος παραθέτονται στον **Πίνακα 6**.

**Πίνακας 6.** Διακύμανση τιμών των φασματικών συνιστωσών του ύψους κύματος ( $H_f$ ).

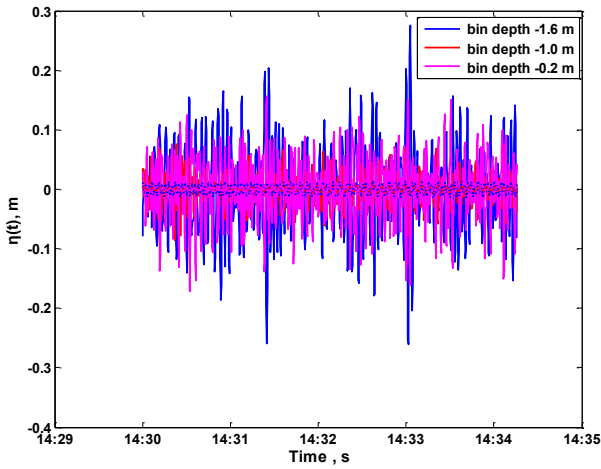
<b>Αριθμός Ριπής</b>	<b>Bin 3 (<math>m^2 Hz^{-1}</math>)</b>	<b>Bin 9 (<math>m^2 Hz^{-1}</math>)</b>	<b>Bin 17 (<math>m^2 Hz^{-1}</math>)</b>
Ριπή 1	0.41-0.54	0.03-0.05	0.14-0.23
Ριπή 2	0.04-0.38	0.03-0.04	0.13-0.31
Ριπή 3	0.15-0.38	0.02-0.04	0.10-0.38
Ριπή 4	0.32-0.45	0.04-0.05	0.18-0.37
Ριπή 5	0.33-0.43	0.02-0.03	0.10-0.31
Ριπή 6	0.40-0.63	0.03	0.18-0.29



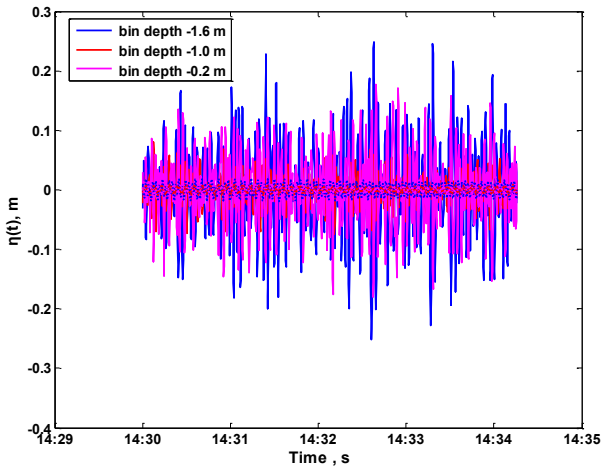


**Εικόνα 19.** Φασματική αναπαράσταση των συνιστωσών του ύψους κύματος στα 6 Burst της δειγματοληψίας και για τα bin 3,9,17, συναρτήσει της συχνότητας και σύγκριση τους με το φάσμα της πίεσης, με την συνιστώσα x(αριστερά), συνιστώσα y(κέντρο) και συνιστώσα z (δεξιά) για κάθε διάγραμμα. Οι αντιστοιχίες των μέσων μετρούμενων βαθών είναι οι εξής: βάθος 0.2 m (μωβ χρώμα), βάθος 1.0 m (κόκκινο χρώμα) ,βάθος 1.3 m (μπλε χρώμα), το φάσμα της πίεσης (μαύρο χρώμα) και σε κάθε διάγραμμα αναφέρονται και οι μέγιστες φασματικές συχνότητες που αντιστοιχούν στο ανάλογο μετρούμενο βάθος.

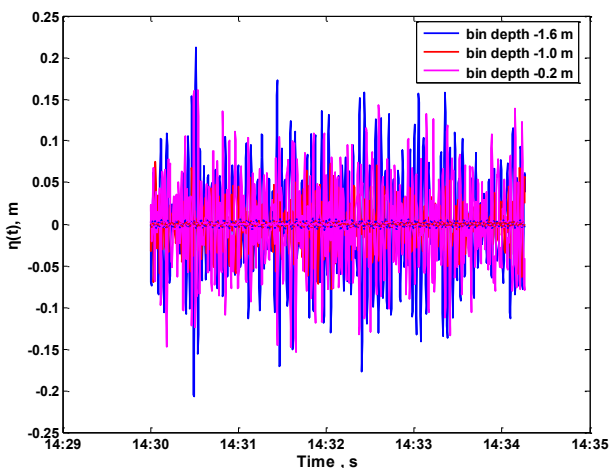
### 3.4. Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου για τις συνιστώσες του ύψους κύματος ανά ριπή



Στιγμαϊκές κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 0.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα x εμφανίζονται στα 0.28, 0.08, 0.16 m.

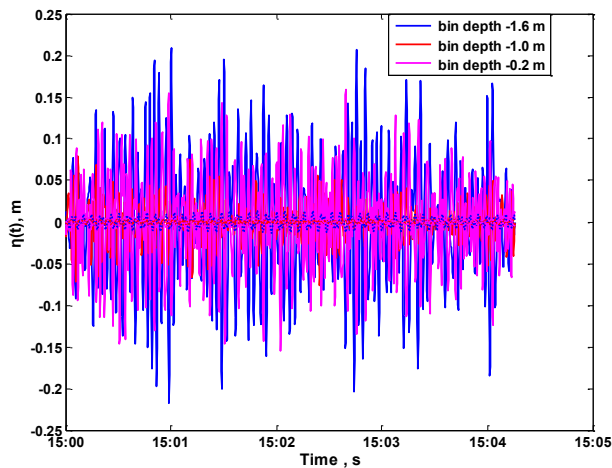


Στιγμαϊκές κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα y εμφανίζονται στα 0.25, 0.08, 0.18 m.

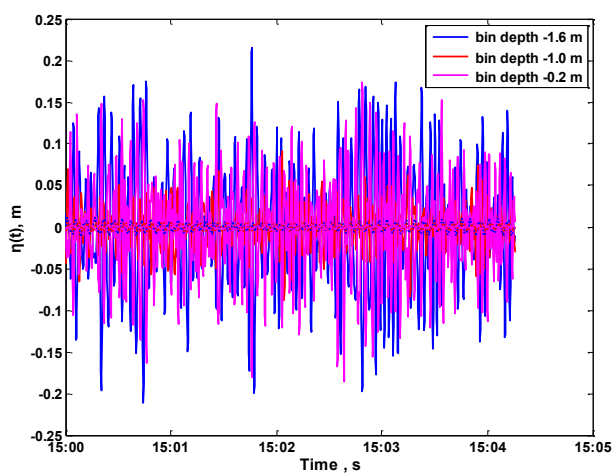


Στιγμαϊκές κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα z εμφανίζονται στα 0.21, 0.08, 0.16 m.

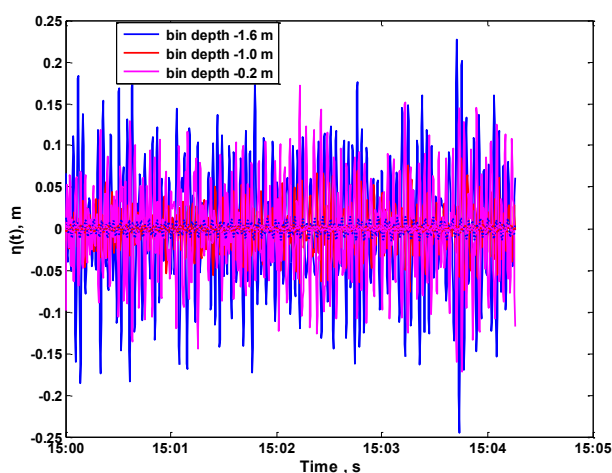
**Εικόνα 20.** Απεικόνιση χρονοσειρών της θέσης της θαλάσσιας επιφάνειας στις 3 συνιστώσες (x,y,z) και των φανταστικών συνιστωσών της ως δείκτη στατιστικού λάθους για τα bin 3, 9, 17 και το 1<sup>ο</sup> Burst.



Στιγμαίεες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα  $x$  εμφανίζονται στα 0.21, 0.08, 0.16 m.

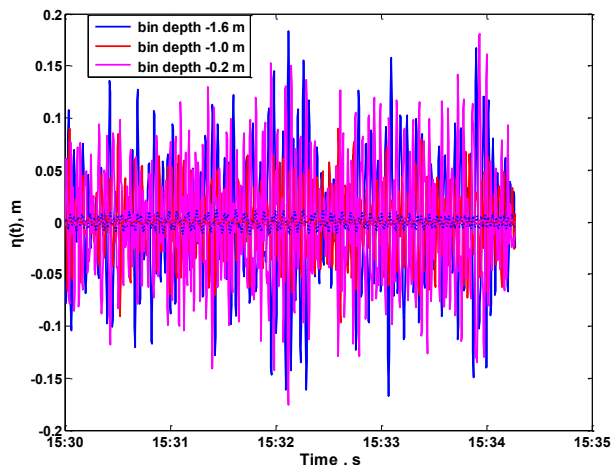


Στιγμαίεες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα  $y$  εμφανίζονται στα 0.22, 0.09, 0.17 m.

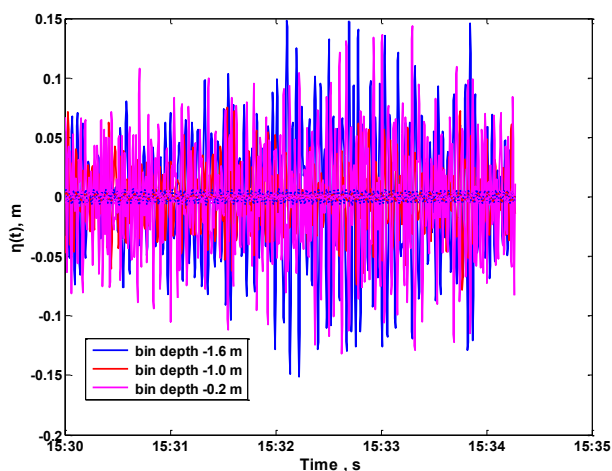


Στιγμαίεες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα  $z$  εμφανίζονται στα 0.23, 0.08, 0.17 m.

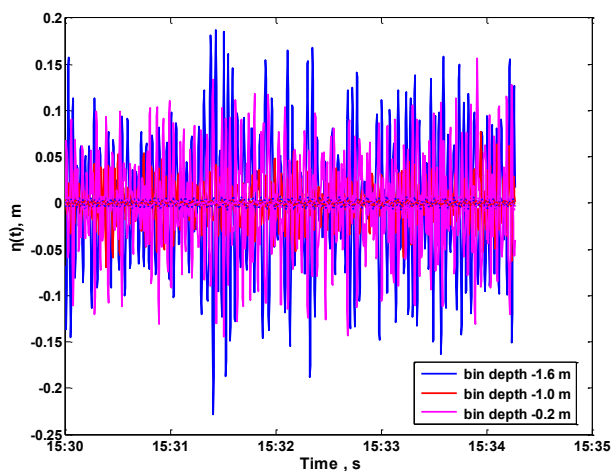
**Εικόνα 21.** Απεικόνιση χρονοσειρών της θέσης της θαλάσσιας επιφάνειας στις 3 συνιστώσες ( $x, y, z$ ) και των φανταστικών συνιστωσών της ως δείκτη στατιστικού λάθους για τα bin 3, 9, 17 και το 2<sup>ο</sup> Burst.



Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα x εμφανίζονται στα 0.18, 0.09, 0.18 m.

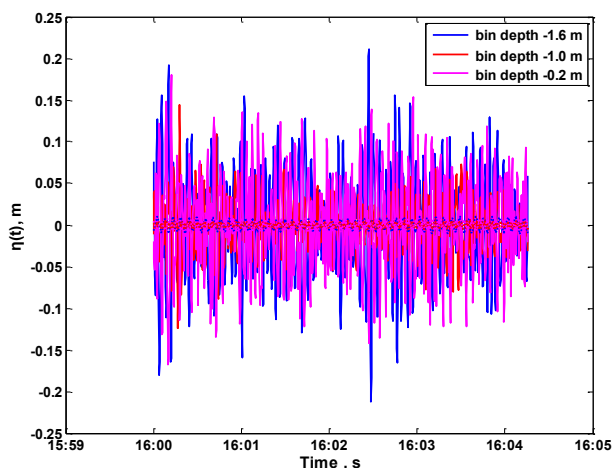


Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα y εμφανίζονται στα 0.15, 0.07, 0.14 m.

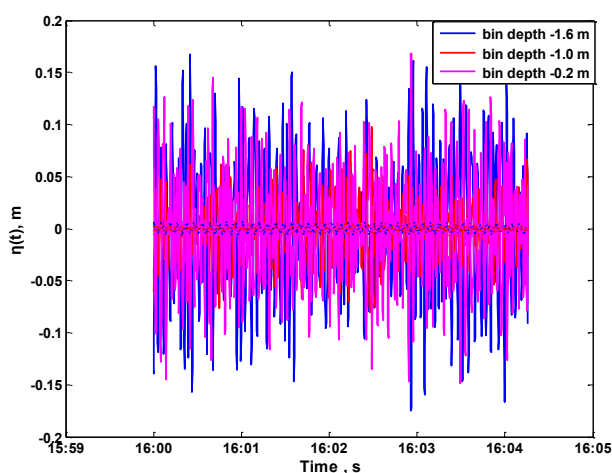


Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα z εμφανίζονται στα 0.19, 0.08, 0.16 m.

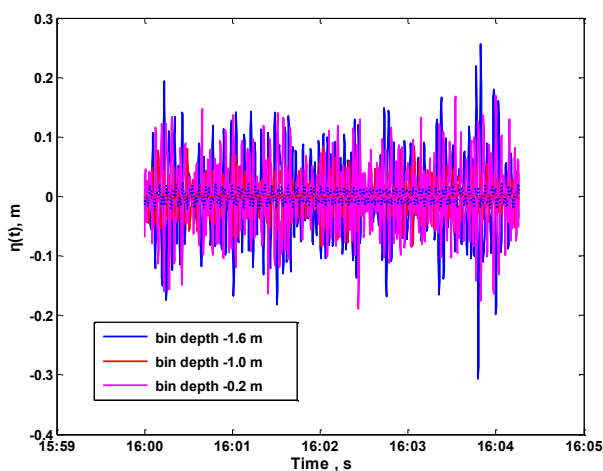
**Εικόνα 22.** Απεικόνιση χρονοσειρών της θέσης της θαλάσσιας επιφάνειας στις 3 συνιστώσες (x,y,z) και των φανταστικών συνιστωσών της ως δείκτη στατιστικού λάθους για τα bin 3, 9, 17 και το 3<sup>ο</sup> Burst.



Στιγμαϊές κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m(μπλέ),1.0 m(κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m(μωβ) για την συνιστώσα x εμφανίζονται στα 0.21,0.14,0.18 m.



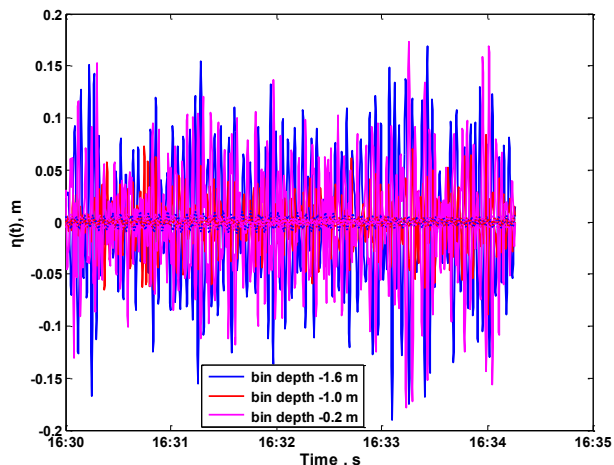
Στιγμαϊές κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα y εμφανίζονται στα 0.17, 0.10, 0.17 m.



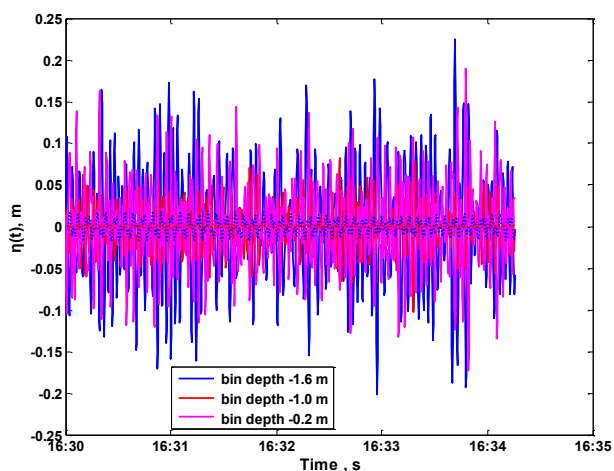
Στιγμαϊές κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα z εμφανίζονται στα 0.26, 0.09, 0.17 m.

**Εικόνα 23.** Απεικόνιση χρονοσειρών της θέσης της θαλάσσιας επιφάνειας στις 3 συνιστώσες (x,y,z) και των φανταστικών συνιστωσών της ως δείκτη στατιστικού λάθους για τα bin 3, 9, 17 και το 4<sup>ο</sup> Burst.

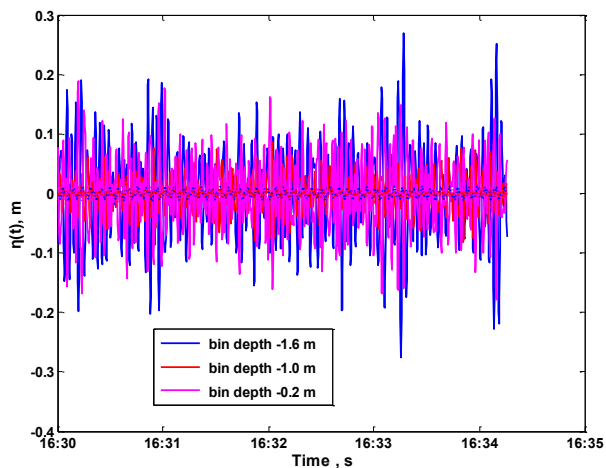




Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίστηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m(μπλέ),1.0 m(κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m(μωβ) για την συνιστώσα x εμφανίζονται στα 0.17,0.08,0.17 m.

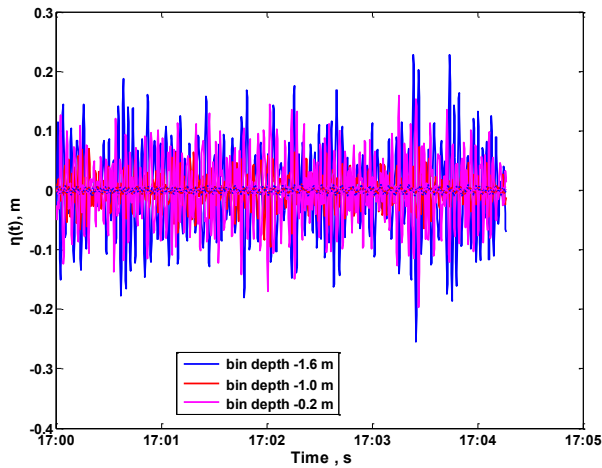


Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίστηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m(μπλέ),1.0 m(κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m(μωβ) για την συνιστώσα y εμφανίζονται στα 0.23,0.08,0.19 m.

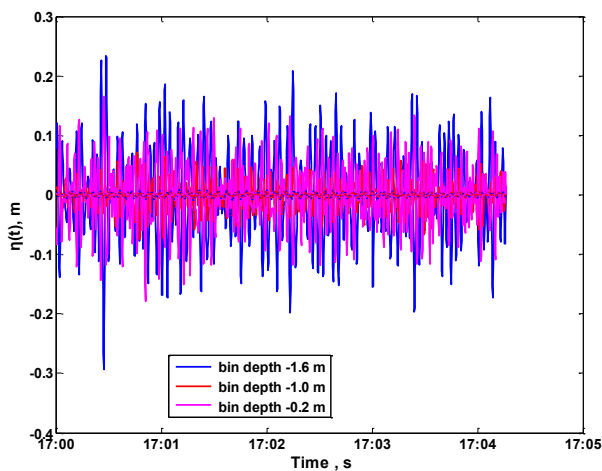


Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίστηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m(μπλέ),1.0 m(κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m(μωβ) για την συνιστώσα z εμφανίζονται στα 0.27,0.09,0.19 m.

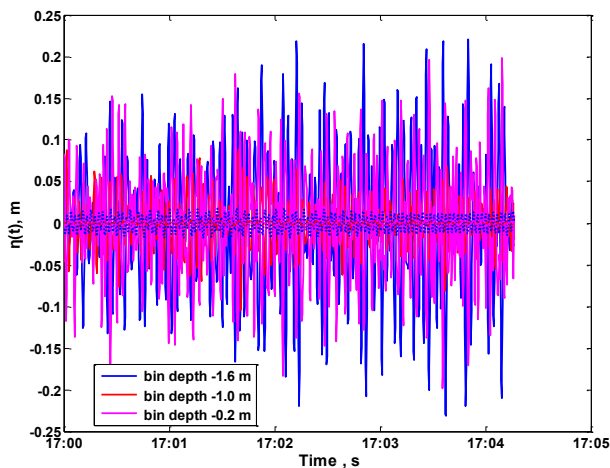
**Εικόνα 24.** Απεικόνιση χρονοσειρών της θέσης της θαλάσσιας επιφάνειας στις 3 συνιστώσες (x,y,z) και των φανταστικών συνιστωσών της ως δείκτη στατιστικού λάθους για τα bin 3, 9, 17 και το 5<sup>ο</sup> Burst.



Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα x εμφανίζονται στα 0.23, 0.07, 0.16 m.



Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα y εμφανίζονται στα 0.23, 0.07, 0.17 m.

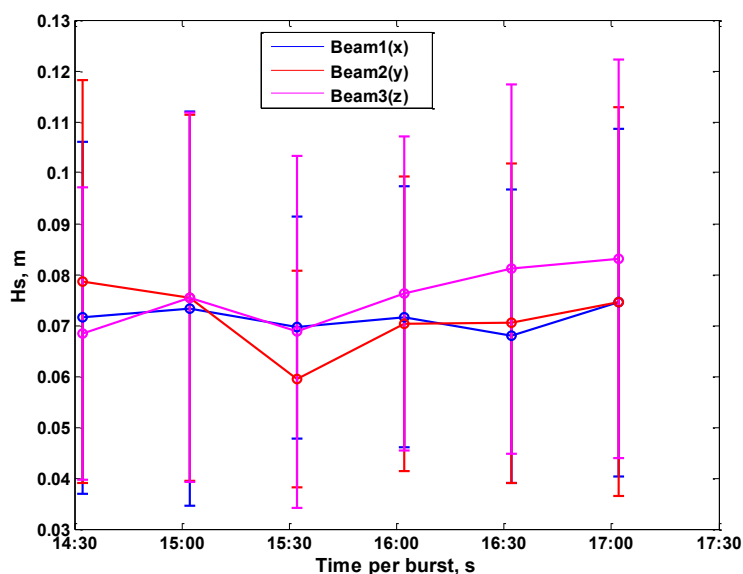


Στιγμαίαιες κυματικές τιμές μεταβολής της στάθμης θάλασσας όπως υπολογίσθηκαν από το κελί μέσου βάθους των 1.6 m (μπλέ), 1.0 m (κόκκινο) και για το βάθος των 0.2 m (μωβ) για την συνιστώσα z εμφανίζονται στα 0.22, 0.09, 0.20 m.

**Εικόνα 25.** Απεικόνιση χρονοσειρών της θέσης της θαλάσσιας επιφάνειας στις 3 συνιστώσες(x,y,z) και των φανταστικών συνιστωσών της ως δείκτη στατιστικού λάθους για τα bin 3, 9, 17 και το 6<sup>ο</sup> Burst.

### 3.4.1. Διαγραμματική απεικόνιση μέσου σημαντικού ύψους κύματος στο πεδίο του χρόνου

Από την εύρεση των μέσων τιμών του σημαντικού ύψους κύματος στις 3 συνιστώσες για τα βάθη των 0.2,1.0,1.6 m παρατηρείται για την πρώτη συνιστώσα (x) ότι οι τιμές του σημαντικού ύψους κύματος για τις 6 ριπές δεν παρουσιάζουν διακύμανση στα 0.07 m και με τυπική απόκλιση από 0.02 έως 0.04 m, για την συνιστώσα y παρατηρείται σημαντικό ύψος κύματος από 0.06 έως 0.08 m και με τυπική απόκλιση από 0.02 έως 0.04 m, ενώ για την συνιστώσα z έχουμε σημαντικό ύψος κύματος από 0.07 έως 0.08 m με τις τιμές των αποκλίσεων από 0.03 έως 0.04 m. Οι μέσες τιμές του σημαντικού ύψους και των αποκλίσεων για τις 6 ριπές και για την συνιστώσα x είναι 0.07 m, για την συνιστώσα y στα 0.07 m και 0.08 m για την συνιστώσα z, με τυπικές αποκλίσεις αντίστοιχα για κάθε συνιστώσα στα 0.03, 0.03 και 0.035 m.



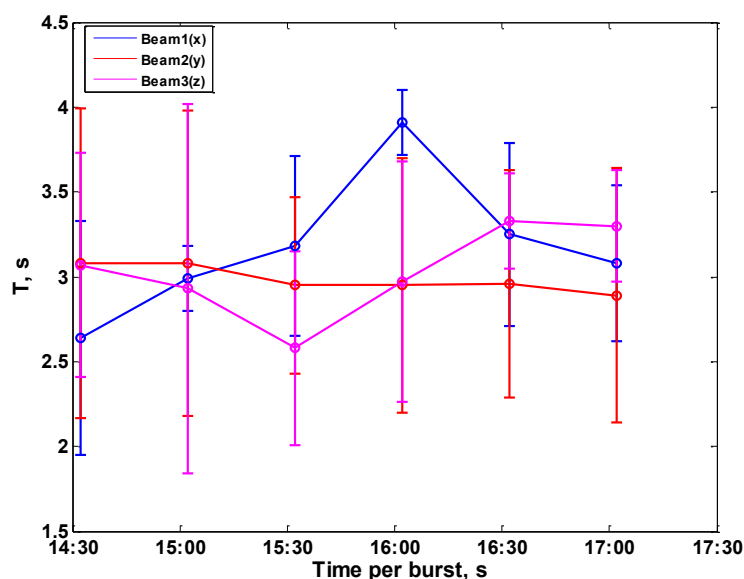
**Εικόνα 26.** Μέση τιμή και τυπική απόκλιση σημαντικού ύψους ( $H_s$ ) κύματος για τις συνιστώσες x,y,z συναρτήσει του μέσου χρόνου για κάθε ριπή.

**Πίνακας 7.** Μέση Τιμή και Τυπική απόκλιση Σημαντικού Ύψους Κύματος ( $H_s$ ).

Αριθμός Ριπής	Συνιστώσα x(m)	Συνιστώσα y(m)	Συνιστώσα z(m)
Ριπή 1	0.07±0.03	0.08±0.04	0.07±0.03
Ριπή 2	0.07±0.04	0.08±0.04	0.08±0.04
Ριπή 3	0.07±0.02	0.06±0.02	0.07±0.03
Ριπή 4	0.07±0.03	0.07±0.03	0.08±0.03
Ριπή 5	0.07±0.03	0.07±0.03	0.08±0.04
Ριπή 6	0.07±0.03	0.07±0.04	0.08±0.04

### 3.4.2. Διαγραμματική απεικόνιση μέσης κυματικής περιόδου στο πεδίο του χρόνου

Για την μέση τιμή της ενεργειακά μέγιστης περιόδου διακρίνεται για την συνιστώσα  $x$  η διακύμανση των τιμών της από 2.64 έως 3.91 s και με τις τιμές των τυπικών αποκλίσεων από 0.19 έως 0.69 s, για την συνιστώσα  $y$  έχουμε τιμές περιόδων από 2.89 έως 3.08 s και αποκλίσεις από 0.52 έως 0.91 s, ενώ για την συνιστώσα  $z$  βρέθηκαν οι τιμές των περιόδων από 2.58 έως 3.30 s και με αποκλίσεις από 0.33 έως 1.09 s. Η μέση τιμή της κυματικής περιόδου υπολογίστηκε για τις 6 ριπές στην συνιστώσα  $x$  στα 3.2 s και με τυπική απόκλιση στα 0.43 s, για την συνιστώσα  $y$  μέση τιμή περιόδου στα 3 s και με τυπική απόκλιση στα 0.8 s και για την συνιστώσα  $z$  μέση κυματική περίοδος στα 3 s και απόκλιση στα 0.6 s.



**Εικόνα 27.** Μέση τιμή και τυπική απόκλιση μέγιστα ενεργειακής περιόδου ( $T_p$ ) κύματος για τις συνιστώσες  $x, y, z$  συναρτήσει του μέσου χρόνου για κάθε ριπή.

**Πίνακας 8.** Μέση Τιμή και Τυπική απόκλιση Κυματικής Περιόδου ( $T_p$ ).

Αριθμός Ριπής	Συνιστώσα $x(s)$	Συνιστώσα $y(s)$	Συνιστώσα $z(s)$
Ριπή 1	2.64±0.69	3.08±0.91	3.07±0.66
Ριπή 2	2.99±0.19	3.08±0.90	2.93±1.09
Ριπή 3	3.18±0.53	2.95±0.52	2.58±0.57
Ριπή 4	3.91±0.19	2.95±0.75	2.97±0.71
Ριπή 5	3.25±0.54	2.96±0.67	3.30±0.28
Ριπή 6	3.08±0.46	2.89±0.75	3.30±0.33

## 4. Συμπεράσματα-Συζήτηση

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας εξελίχθηκε μια νέα πειραματική μέθοδος εκτίμησης κυματισμών μέσω μετρήσεων ταχύτητας από ανεστραμμένο ακουστικό τομογράφο ρευμάτων καταγράφοντα την ανώτερη στήλη του νερού, αναρτημένου σε υδραετό ελεύθερα παρασυρόμενου πλωτήρα.

Στα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου και στις 3 ηχητικές ακτίνες, στην χρονική μεταβλητότητα των 6 ριπών της δειγματοληψίας, παρατηρήθηκε συγκρίσιμη μεταβλητότητα της στάθμης θάλασσας  $\eta(t)$  για τα στρωματίδια στα βάθη 0.2 και 1.6 m. Η μικρότερη διασπορά των τιμών στο κεντρικό στρωματίδιο οφείλεται στο γεγονός ότι οι ταχύτητές του «πλησιάζουν» περισσότερο αυτές της μέσης τιμής της κάθε δέσμης, και άρα αυτές που συνδέονται με την κίνηση της πλατφόρμας. Μέσω της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε από τις χρονοσειρές της θαλάσσιας στάθμης, η εκτίμηση του μέσου σημαντικού ύψους κύματος υπέδειξε μικρές αποκλίσεις στις 3 ακτίνες κατά μήκος των ηχητικών δεσμών και σημαντική υποεκτίμηση σε σχέση με τις προγνώσεις του προγνωστικού μοντέλου Poseidon, αναμενόμενο λόγω του περιορισμού της μεθόδου, αφού η λύση αφορά την πόντιση ακουστικού τομογράφου ρευμάτων σε βάθος τουλάχιστον ίσου με το μισό του εκτιμώμενου μέγιστου μήκους κύματος, με αποτέλεσμα η εκτίμηση της κίνησής της διάταξης να αφαιρεί σημαντικό χαμηλόσυχο κομμάτι του κυματικού σήματος, όταν το μήκος κύματος των κυρίαρχων κυματισμών ξεπερνάει το διπλάσιο του βάθους πόντισης του ακουστικού τομογράφου ρευμάτων.

Για την ανάλυση των δεδομένων στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την μεθοδολογία αλλά και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων παραθέτονται στο Παράρτημα με επεξηγήσεις.

## 5. Βιβλιογραφία

Airy, G.B. 1845. Tides and Waves, Encyc. Metrop., Article 192 pp 241-396.

CEM, *Coastal Engineering Manual*, 2008 In: <http://chl.erdc.usace.army.mil/cem>

Cooley, J. W. and Tukey, J. W. 1965. "An Algorithm for the Machine Computation of Complex Fourier Series," *Math. Comp.*, Vol 19, pp 297-301.

Davis, R., 1985. Drifter observations of coastal surface currents during CODE: The method and descriptive view. *Journal of Geophysical Research*, 90, 4741-4755.

Dean, R. G. and Dalrymple, R. A. 1991. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Pub. Co., Teaneck, NJ.

Garrison, T., 1996. *Oceanography, An Invitation to Marine Science*, New York: Wadsworth Publishing Company.

Georgakas, K., 2014. *Climatology via applied Satellite Remote Sensing Chlorophyll blooms in the North Aegean*. M.Sc.(Environmental Oceanography), University Of Patras, Dept. of Geology Graduate.

Goda, Y., 1997. Ocean wave measurement and analysis: proceedings of the third International Symposium WAVES 97 : November 3-7, 1997 , Virginia, USA, Vol 2.

Komar, P.D., 1998, *Beach Process and Sedimentation*, Second edition, Prentice Hall.

Kinsman, B. 1965. *Wind Waves*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Leger, G. T., 1991. Surface-tracked Lagrangian Drifters. *Sea Technology*, 32 (8): 27-30.

Longuet-Higgins, M.S. 1952. "On the Statistical Distribution of the Wave Heights of Sea Waves," *Jour. Marine Res.*, Vol 11, pp 245-266.

Longuet-Higgins, M.S. 1957. "Statistical Analysis of a Random, Moving Surface," *Phil Trans. Roy. Soc. London, Series A*, Vol 249, pp 321-387.

Longuet-Higgins, M. S. 1975. "On the Joint Distribution of the Periods and Amplitudes of Sea Waves," *Journal of Geophysical Research*, Vol 80, pp 2688-2694.

Longuet-Higgins, M. S. 1983. "On the Joint Distribution of Wave Period and Amplitudes in a Random Wave Field," *Proc. Roy. Soc. London, Series A*, Vol 389, pp 241-258.

---

Massel, S.R., 1989, *Hydrodynamics of Coastal Zones*, Elsevier Oceanography Series.

Rice, S. O. 1944-1945. "Mathematical Analysis of Random Noise," *Bell System Tech. Jour.*, Vol 23, pp 282-332.; Vol 24, pp 45-156.

Rosby, T., Dorson D. and Fontaine, J., 1986. The RAFOS system, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 3, pp. 672–679.

Rowe, F. and J. Young, "An ocean current profiler using doppler sonar," in *OCEANS '79*, sept.1979, pp 292-297.

Sverdrup, H.U., and Munk, W.H. 1947. *Wind, Sea and Swell: Theory of Relations for Forecasting*, U.S. Navy Hydro. Office, Publication No.601.

Swallow, J. C., 1955. A neutral buoyancy float for measuring deep currents. *Deep Sea Research*, 3, pp.74-81.

Thurman, H., Trujillo, A., 2001. *Essentials Of Oceanography* (7<sup>th</sup> edition). Prentice Hall, Chapter 8, pp. 239-241.

Zervakis, V., Kalampokis, A., Kakagiannis, G., Georgakarakos, S., Saridakis, J., 2009. Low-cost drifters for coastal use. p. 333-337. In: *9th Hellenic Symposium of Oceanography and Fisheries*, Patras, 13-16 May 2009, HCMR, Athens.

## Παράρτημα

```

function [U, temp, press, Nburst, avginterval, T] = readaquadopp(filecode)
%
% Usage [U, temp, press, Nburst, avginterval, T] = readaquadopp(filecode)
%
% This function reads the files containing all the components of the
% velocity (components recorded as follows:
% component u in 'filecode'.v1 file,
% component v in 'filecode'.v2 file, and
% component w in 'filecode'.v3 file, and
% computes and plots the magnitude and direction of the horizontal
% currents and the vertical current
% Input: the string that determines the filename (filecode)
% output:
% (1) the variable structure U, containing:
%   U.u:    W-E component
%   U.v:    S-N component
%   U.w:    down-up component
%   U.ampl: horizontal amplitude
%   U.dir:  horizontal direction
%   U.timer: time of each measurement
%   U.z:    depth of each measurement
% (2): temp: the temperature time-series
% (3): press: the pressure time-series
% (4): the regular variable Nburst, containing the number of samples per
% burst. If Nburst = 0, there is no burst sampling.
% (5): avginterval: the time interval of averaging for each measurement
% (sec)
% (6): T: the Aquadopp profiler's Transformation matrix
% ~~~~~~
% Vassilis Zervakis, University of the Aegean, Mytilene, 2010.
% ~~~~~~
ufile = strcat(filecode, '.v1');
vfile = strcat(filecode, '.v2');
wfile = strcat(filecode, '.v3');
hdrfile = strcat(filecode, '.hdr');
senfile = strcat(filecode, '.sen');
%
sendata = load(senfile);
press = sendata(:,16);
senmonth = sendata(:,1);
senday = sendata(:,2);
senyear = sendata(:,3);
senhour = sendata(:,4);
senminute = sendata(:,5);
sensecond = sendata(:,6);
U.timer = datenum(senyear, senmonth, senday, senhour, senminute, sensecond);
%
% plot the pressure data in order to exclude the bad ones
%
figure

```



```

plot(U.timer, press)
ylabel( 'pressure at sensor head, dbar')
datetick('x')
A = axis;
x1 = 0.8*A(1)+0.2*A(2);
y1 = 0.8*A(3)+0.2*A(4);
text(x1, y1, 'point which part of the time-series to use')
[t1,y]=ginput(1);
[t2,y]=ginput(1);
istart = find(U.timer >= t1, 1 );
iend = find(U.timer <= t2, 1, 'last' );
%
% isolate the atmospheric pressure
%
atmpress = [press(1:istart-1) press(iend+1 : length(press))]
if (abs(mean(press(1:istart-1)) - mean(press(iend+1:length(press)))) < 0.2),
    atmpr = mean(atmpress)
else
    atmpr = min(mean(press(1:istart-1)),mean(press(iend+1 : length(press))))
end
%
% isolate the data selected
%
clear press atmpress
clear U.timer senyear senmonth senday senhour senminute sensecond
press = sendata(istart:iend,16);
senmonth = sendata(istart:iend,1);
senday = sendata(istart:iend,2);
senyear = sendata(istart:iend,3);
senhour = sendata(istart:iend,4);
senminute = sendata(istart:iend,5);
sensecond = sendata(istart:iend,6);
U.timer = datenum(senyear, senmonth, senday, senhour, senminute, sensecond);
%
[Dt, Dz, numcells, avginterval, blank, Nburst, T] = readhdrfile(hdrfile);
udata = load(ufile);
vdata = load(vfile);
wdata = load(wfile);
[m,n]=size(udata);
U.u = udata(istart:iend,3:n);
U.v = vdata(istart:iend,3:n);
U.w = wdata(istart:iend,3:n);
clear udata vdata wdata;
U.ampl = sqrt( U.u .^2 + U.v .^2 );
U.dir = 90-180*atan2( U.v, U.u )/pi;
jneg = find(U.dir < 0);
U.dir(jneg) = U.dir(jneg)+360;
size(U.u);
U.numcells = numcells;
headpres = sendata(istart:iend,16);
U.heading = sendata(istart:iend,13);
U.pitch = sendata(istart:iend,14);
U.roll = sendata(istart:iend,15);
temp = sendata(istart:iend,17);
size(U.timer);
z = zeros(length(U.timer), numcells);

```

```

size(z);
%
% estimate the depth of each pressure cell taking into consideration the
% atmospheric pressure
%
for i = 1:numcells,
    z(:,i) = headpres - atmpr;
%    z(:,i) = z(:,i) + headpres - atmpr;
end
for i = 1:length(U.timer),
    z(i,:) = z(i,:) + blank + Dz * ([1:numcells]+3) + Dz/2;
end
U.z = -z;
%
%Calculation the mean value of the velocity components for all depth
cells(bins)
U.umean= mean(U.u,2);
U.vmean= mean(U.v,2);
U.wmean= mean(U.w,2);
%
% plot the velocity data
%
figure
subplot(211)
plot(U.timer, U.u(:,17))
datetick('x')
ylabel('Velocity, m s^{-1}')
A = axis;
x1 = 0.3*A(1)+0.7*A(2);
y1 = 0.15*A(3)+0.85*A(4);
text(x1,y1,'cell 17')
subplot(212)
plot(U.timer, U.u(:,2))
datetick('x')
ylabel('Velocity, m s^{-1}')
axis(A);
text(x1,y1,'cell 2')
%
figure
Ustd = std(U.u,1);
Uz = mean(U.z,1);
plot(Ustd, Uz, '+')
xlabel('Velocity standard deviation, m s^{-1}')
ylabel('depth, m')

% Vassilis Zervakis and Antonis Vourlakos, University of the Aegean,
% Mytilene, 2014.
%
%remove the mean value of all bins for each beam
U.up = U.u - mean(U.u,2)*ones(1,U.numcells);
U.vp = U.v - mean(U.v,2)*ones(1,U.numcells);
U.wp = U.w - mean(U.w,2)*ones(1,U.numcells);
%remove the mean value from the pressure
press2=press-mean(press)
%
% plot the mean velocity data and the components without mean

```

```

%
subplot(3,1,1)
plot(U.timer,U.umean)
datetick('x')
ylabel('u,m s^{-1}','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
subplot(3,1,2)
plot(U.timer,U.vmean)
datetick('x')
ylabel('v,m s^{-1}','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
subplot(3,1,3)
plot(U.timer,U.wmean)
datetick('x')
ylabel('w,m s^{-1}','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
xlabel('Time,s','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
figure
subplot(3,1,1)
plot(U.up(:,3))
hold on
plot(U.up(:,17),'m')
plot(U.up(:,9),'r')
ylabel('U.up, m s^{-1}
','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
legend
({'Bin3','Bin17','Bin9}','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
title({'Velocity(u,v,w)without means in bins
3,9,17}','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
subplot(3,1,2)
plot(U.vp(:,3))
hold on
plot(U.vp(:,17),'m')
plot(U.vp(:,9),'r')
ylabel('U.vp, m s^{-1}
','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
subplot(3,1,3)
plot(U.wp(:,3))
hold on
plot(U.wp(:,17),'m')
plot(U.wp(:,9),'r')
ylabel('U.wp, m s^{-1}
','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
xlabel('Number of measurements
','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
figure
plot(U.timer,press)
xlabel('Time,s','Fontname','Arial','FontSize',14,'FontWeight','bold')
ylabel('Pressure,dbar','Fontname','Arial','FontSize',14,'FontWeight','bold')
figure
plot(press2)
ylabel('Pressure,dbar','Fontname','Arial','FontSize',14,'FontWeight','bold')
xlabel('Number of
measurements','Fontname','Arial','FontSize',14,'FontWeight','bold')
title({'Pressure without
mean}','Fontname','Arial','FontSize',14,'FontWeight','bold')
return

```

```

function L = surf_wavelength(T, d)
%
% Usage L = surf_wavelength(T, d)
%
% This function uses the full dispersion relation to calculate the
% wavelentgh (L) of a sea surface gravity wave as a function of its period (T)
% and water depth (d).
% Use S.I. units
%
% Vassilis Zervakis and Antonis Vouurlakos, University of the Aegean,
% Mytilene, 2014.
%
g = 9.81;
% computation of deep-water wavelength L0
L0 = g * T.^2 / (2*pi);
%
%
L = L0 .* tanh(2*pi*d./L0);
dL = abs(L - L0);
% start the iterations to get convergence
while dL > 0.1,
    L2 = L0 .* tanh(2*pi*d./L);
    dL = abs(L2 - L);
    L = L2;
end
return

function [ Pxx, freqs, conf ] = powerspectrum3(x, Nfft, over, win, dt, frthr,
fraver, a, plotflag)
%
% Usage [ Pxx, freqs, conf ] = powerspectrum3(x, Nfft, over, win, dt, frthr,
fraver, a, plotflag)
%
% This subroutine computes the power spectrum of the time series x.
% if x is complex, the subroutine will compute the rotary spectrum following
Gonella (1972).
% Inputs:
% x      : the time series
% Nfft   : the length of each time series segment of fft transforming
% over   : the portion of overlay for each time series segment to be used. 0 <
over < 1
% win    : parameter defining the use of sampling window. Takes the values:
%          0 for boxcar (square)
%          1 for Bartlett (triangular)
%          2 for Hanning
%          3 for Hamming
% dt     : sampling interval, in units of time
% frthr  : vector containing the threshold frequencies above which there will
be cross-frequency averaging
% fraver : vector containing the number of frequency peaks to be averaged per
band
% a      : desired level of confidence for estimation of confidence limits
% plotflag: 0 for no plotting.
%          1 for confidence intervals plotted as lines around 1

```

```

%           2 for confidence intervals plotted as lines around the power
spectral values
% Outputs:
% Pxx      : The power spectrum
% freqs    : vector containing the frequencies, in cycles per unit time as given
in dt
% conf     : confidence limits corresponding to a confidence level
%
%
% Vassilis Zervakis, University of the Aegean,
% Mytilene, 2013.

% load the weights of the sampling window
% for boxcar window:
    win = ones(Nfft,1);
% for triangular window:
    win = bartlett(Nfft);
% for Hamming window:
    win = hamming(Nfft);
% for Hanning window:
    win = hanning(Nfft);
%
%
% break the time series into a number of segments overlaid by over.
Nsegments = floor(length(x) / (Nfft*(1-over))) - 1;
xx = zeros(Nfft, Nsegments)*nan;
for i = 1:Nsegments
    j1 = floor((i-1)*Nfft*(1-over)+1);
    j2 = j1+Nfft-1;
    xx(:,i) = win.*x(j1:j2);
end
%
if ~isreal(mean(xx)),
    Ureal = xx*nan;
    Uimag = xx*nan;
    Vreal = xx*nan;
    Vimag = xx*nan;
    Aplus = xx*nan;
    Aminus = xx*nan;
    U = fft(real(xx));
    Ureal = real(U);
    Uimag = imag(U);
    V = fft(imag(xx));
    Vreal = real(V);
    Vimag = imag(V);
    Aplus = 0.5*sqrt((Ureal+Vimag).^2+(Uimag-Vreal).^2);
    Aminus = 0.5*sqrt((Ureal-Vimag).^2+(Uimag+Vreal).^2);
    % Compute the mean power counterclockwise and clockwise spectra
    Pplus = 4*pi^2*dt*mean(Aplus.^2,2)/(Nfft);
    Pminus = 4*pi^2*dt*mean(Aminus.^2,2)/(Nfft);
    % check Parseval's theorem
    ST = sum(conj(x).*x)*dt
    SF = sum(Pplus+Pminus)/(dt*Nfft)
% pause
else

```

```

% Compute the Fourier transform of each column;
XX = xx*nan;
XX = fft(xx);

%
% Compute the mean power spectrum
Pxx = 2*pi^2*dt*mean(conj(XX).*XX,2)/(Nfft);
% check Parseval's theorem
ST = sum(x.*x)*dt;
SF = sum(Pxx)/(dt*Nfft);
% pause
end
% Compute the frequencies
Nfregs = Nfft/2;
freqs = [ 0 : Nfregs ] / (Nfft*dt);
NDF = ones(size(freqs))*Nsegments; % NDF contains the number of degrees of
freedom
conf(:,1) = NDF ./ chi2inv(a, NDF);
conf(:,2) = NDF ./ chi2inv(1-a, NDF);

if plotflag ~= 0,
% plot the power spectrum
    if ~isreal(mean(xx)),
        loglog(freqs, Pminus(1:Nfregs+1), 'k')
        hold on
        loglog(freqs, Pplus(1:Nfregs+1), 'b')
        hold on
    else
        loglog(freqs, Pxx(1:Nfregs+1), 'k')
        hold on
    end
%     loglog(freqs(2:Nfregs), Pxx(Nfft:-1:Nfregs+2), 'r')
%     hold on
    if plotflag == 1,
        loglog(freqs, conf(:,1), 'k:')
        if ~isreal(mean(xx))
            leg3 = strcat(num2str(max(a, (1-a))*100), '% conf. intervals')
            legend('clockwise', 'counterclockwise', leg3, 'position', 'northeast')
        end
        loglog(freqs, conf(:,2), 'k:')
    end
    if plotflag == 2,
        if ~isreal(mean(xx)),
            loglog(freqs, conf(:,1).*Pplus(1:Nfregs+1), 'k:')
            leg3 = strcat(num2str(max(a, (1-a))*100), '% conf. intervals')
            legend('clockwise', 'counterclockwise', leg3, 'position', 'northeast')
            loglog(freqs, conf(:,2).*Pplus(1:Nfregs+1), 'k:')
            loglog(freqs, conf(:,1).*Pminus(1:Nfregs+1), 'b:')
            loglog(freqs, conf(:,2).*Pminus(1:Nfregs+1), 'b:')
        else
            loglog(freqs, conf(:,1).*Pxx(1:Nfregs+1), 'k:')
            loglog(freqs, conf(:,2).*Pxx(1:Nfregs+1), 'k:')
        end
    end
end
end

```

```

% perform the cross-frequency averaging
naver = length(frthr);
J = zeros(naver+1,1);
for i = 1:naver,
    J(i) = min(find(freqs >= frthr(i)));
end
J(naver+1,1) = Nfreqs - fraver(naver,1);
fr1 = freqs(1:J(1)-1);
if ~isreal(mean(xx)),
    Pplus1 = Pplus(1:J(1)-1);
    Pminus1 = Pminus(1:J(1)-1);
else
    Pxx1 = Pxx(1:J(1)-1);
end
NDF = ones(size(fr1))*Nsegments; % NDF contains the number of degrees of
freedom
for i = 1:naver,
    for j = J(i):J(i+1)
        fr1 = [fr1 mean(freqs(j:j+fraver(i)))];
        if ~isreal(mean(xx)),
            Pplus1 = [Pplus1; mean(Pplus(j:j+fraver(i)))];
            Pminus1 = [Pminus1; mean(Pminus(j:j+fraver(i)))];
        else
            Pxx1 = [Pxx1; mean(Pxx(j:j+fraver(i)))];
        end
        NDF = [NDF Nsegments*fraver(i)];
    end
end
if ~isreal(mean(xx)),
    clear freqs Pplus Pminus
    Pplus = Pplus1;
    Pminus = Pminus1;
else
    clear freqs Pxx
    Pxx = Pxx1;
end
freqs = fr1;
%
% estimate confidence intervals vectors
conf = zeros(length(NDF),2)*nan;
conf(:,1) = NDF ./ chi2inv(a, NDF);
conf(:,2) = NDF ./ chi2inv(1-a, NDF);
%
if plotflag ~= 0,
    figure
% plot the power spectrum
    if ~isreal(mean(xx)),
        loglog(freqs, Pminus, 'k')
        hold on
        loglog(freqs, Pplus, 'b')
        hold on
    else
        loglog(freqs, Pxx, 'k')
        hold on
    end
end
if plotflag == 1,

```

```

    loglog(freqs, conf(:,1), 'k:')
    if ~isreal(mean(xx))
        leg3 = strcat(num2str(max(a, (1-a))*100), '% conf. intervals')
        legend('clockwise', 'counterclockwise', leg3, 'position', 'northeast')
    end
    loglog(freqs, conf(:,2), 'k:')
end
if plotflag == 2,
    if ~isreal(mean(xx)),
        loglog(freqs, conf(:,1).*Pplus, 'k:')
        leg3 = strcat(num2str(max(a, (1-a))*100), '% conf. intervals')
        legend('clockwise', 'counterclockwise', leg3, 'position', 'northeast')
        loglog(freqs, conf(:,2).*Pplus, 'k:')
        loglog(freqs, conf(:,1).*Pminus, 'b:')
        loglog(freqs, conf(:,2).*Pminus, 'b:')
    else
        loglog(freqs, conf(:,1).*Pxx, 'k:')
        loglog(freqs, conf(:,2).*Pxx, 'k:')
    end
end
xlabel('frequency, cycles per unit time')
ylabel('Power Spectral Density')
end
if ~isreal(mean(xx)),
    Pxx = [Pplus Pminus];
end

return

function velocity_spectrum(U,dt,press)
%
% usage  velocity_spectrum(U,dt,press)
%
% Input:
%       dt:sampling interval, in units of time
% Vassilis Zervakis and Antonis Vourlakos, University of the Aegean,
% Mytilene, 2014.
%
%Calculation the mean value of the velocity components  for all depth
cells(bins)
U.umean= mean(U.u,2);
U.vmean= mean(U.v,2);
U.wmean= mean(U.w,2);
%remove the mean value of all bins for each beam
U.up = U.u - mean(U.u,2)*ones(1,U.numcells);
U.vp = U.v - mean(U.v,2)*ones(1,U.numcells);
U.wp = U.w - mean(U.w,2)*ones(1,U.numcells);
%remove the mean value from the pressure
press2=press-mean(press);
%
%estimate the spectra for all bins with/without mean value
% for i = 1:U.numcells,
for i = 1:U.numcells,
    [Bin(i).Pxx, freqs, Bin(i).confx ] = powerspectrum3(U.u(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]', [5 10]', 0.95, 0);

```



```

    [Bin(i).Pyy, freqs, Bin(i).confy ] = powerspectrum3(U.v(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]', [5 10]', 0.95, 0);
    [Bin(i).Pzz, freqs, Bin(i).confz ] = powerspectrum3(U.w(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]', [5 10]', 0.95, 0);
    [Bin(i).Px, freqs, Bin(i).confx ] = powerspectrum3(U.up(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]', [5 10]', 0.95, 0);
    [Bin(i).Py, freqs, Bin(i).confy ] = powerspectrum3(U.vp(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]', [5 10]', 0.95, 0);
    [Bin(i).Pz, freqs, Bin(i).confz ] = powerspectrum3(U.wp(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]', [5 10]', 0.95, 0);
end
%
%estimate the spectra for the mean velocity of all bins for each beam
    [Pxx, freqs, confx ] = powerspectrum3(U.umean, 512, 0, 2, 0.25, [0.1 1]',
[5 10]', 0.95, 0);
    [Pyy, freqs, confy ] = powerspectrum3(U.vmean, 512, 0, 2, 0.25, [0.1 1]',
[5 10]', 0.95, 0);
    [Pzz, freqs, confz ] = powerspectrum3(U.wmean, 512, 0, 2, 0.25, [0.1 1]',
[5 10]', 0.95, 0);
%
%compute and plot the spectrum of pressure
    [ Ppp, freqs, confp ] = powerspectrum3(press2, 512, 0, 2, 0.25, [0.1 1]', [5
10]', 0.95, 0);
%
%calculate the wavelenght(L) of a sea surface gravity wave as a function of
its period (T)
% and water depth (d).
%
T = 1./freqs;
L = surf_wavelength1(T,45);
%Plot the results for the u component and for the bins 3,5,9,11,17
figure
subplot(1,2,1)
loglog(freqs,Bin(3).Pxx)
hold on
loglog(freqs,Bin(5).Pxx,'r')
loglog(freqs,Bin(9).Pxx,'m')
loglog(freqs,Bin(11).Pxx,'g')
loglog(freqs,Bin(17).Pxx,'k')
hold off
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend
({'Bin3','Bin5','Bin9','Bin11','Bin17'},'Fontname','Arial','FontSize',8,'FontW
eight','bold')
title('Spectrum of velocity u with mean value '
,'Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
subplot(1,2,2)
loglog(freqs,Bin(3).Px)
hold on
loglog(freqs,Bin(5).Px,'r')
loglog(freqs,Bin(9).Px,'m')
loglog(freqs,Bin(11).Px,'g')
loglog(freqs,Bin(17).Px,'k')
hold off

```

```

xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend
({'Bin3', 'Bin5', 'Bin9', 'Bin11', 'Bin17'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontW
eight', 'bold')
title('Spectrum of velocity u without mean value '
, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
%Plot the results for the v component and for the bins 3,5,9,11,17
figure
subplot(1,2,1)
loglog(freqs, Bin(3).Pyy)
hold on
loglog(freqs, Bin(5).Pyy, 'r')
loglog(freqs, Bin(9).Pyy, 'm')
loglog(freqs, Bin(11).Pyy, 'g')
loglog(freqs, Bin(17).Pyy, 'k')
hold off
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend
({'Bin3', 'Bin5', 'Bin9', 'Bin11', 'Bin17'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontW
eight', 'bold')
title('Spectrum of velocity v with mean value '
, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
subplot(1,2,2)
loglog(freqs, Bin(3).Py)
hold on
loglog(freqs, Bin(5).Py, 'r')
loglog(freqs, Bin(9).Py, 'm')
loglog(freqs, Bin(11).Py, 'g')
loglog(freqs, Bin(17).Py, 'k')
hold off
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend
({'Bin3', 'Bin5', 'Bin9', 'Bin11', 'Bin17'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontW
eight', 'bold')
title('Spectrum of velocity v without mean value '
, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
%Plot the results for the w component and for the bins 3,5,9,11,17
figure
subplot(1,2,1)
loglog(freqs, Bin(3).Pzz)
hold on
loglog(freqs, Bin(5).Pzz, 'r')
loglog(freqs, Bin(9).Pzz, 'm')
loglog(freqs, Bin(11).Pzz, 'g')
loglog(freqs, Bin(17).Pzz, 'k')
hold off
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')

```

```

legend
({'Bin3', 'Bin5', 'Bin9', 'Bin11', 'Bin17'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontW
eight', 'bold')
title('Spectrum of velocity w with mean value '
, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
subplot(1,2,2)
loglog(freqs, Bin(3).Pz)
hold on
loglog(freqs, Bin(5).Pz, 'r')
loglog(freqs, Bin(9).Pz, 'm')
loglog(freqs, Bin(11).Pz, 'g')
loglog(freqs, Bin(17).Pz, 'k')
hold off
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend
({'Bin3', 'Bin5', 'Bin9', 'Bin11', 'Bin17'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontW
eight', 'bold')
title('Spectrum of velocity w without mean value '
, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
%
% compare the spectrum of velocity components(u,v,w) with mean value in
% the bins 3,9,17 for the frequency domain, the spectrum of mean velocity
% components against the spectrum with/without mean for bin 9, the spectrum
% for the bins 3,9,17 without mean value
%
% plot the results versus frequency(freqs) for the component u of velocity
figure
subplot(1,3,1)
loglog(freqs, Bin(3).Pxx)
hold on
loglog(freqs, Bin(9).Pxx, 'r')
loglog(freqs, Bin(17).Pxx, 'm')
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend
({'Bin3', 'Bin9', 'Bin17'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
title(' velocity of u with mean value '
, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
subplot(1,3,2)
loglog(freqs, Pxx)
hold on
conf_up = Pxx(:,1) .* confx(:,1);
conf_dn = Pxx(:,1) .* confx(:,2);
conf=[conf_up conf_dn];
loglog(freqs, Bin(9).Pxx, 'r')
loglog(freqs, conf, 'b:')
loglog(freqs, Bin(9).Px, 'r')
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'Mean velocity', 'Bin9', '95%
conf'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
title('mean value of velocity u for all bins '
, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
subplot(1,3,3)

```

```

loglog(freqs,Bin(3).Px)
hold on
loglog(freqs,Bin(9).Px,'r')
loglog(freqs,Bin(17).Px,'m')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend
({'Bin3','Bin9','Bin17}','Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
title(' velocity of u without mean value '
,'Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')

%
% plot the results versus frequency(freqs) for the component v of velocity
figure
subplot(1,3,1)
loglog(freqs,Bin(3).Pyy)
hold on
loglog(freqs,Bin(9).Pyy,'r')
loglog(freqs,Bin(17).Pyy,'m')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend
({'Bin3','Bin9','Bin17}','Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
title(' velocity of v with mean value '
,'Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
subplot(1,3,2)
loglog(freqs,Pyy)
hold on
conf_up = Pyy(:,1) .* confy(:,1);
conf_dn = Pyy(:,1) .*confy(:,2);
conf=[conf_up conf_dn];
loglog(freqs,Bin(9).Pyy,'r')
loglog(freqs,conf,'b:')
loglog(freqs,Bin(9).Py,'r')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend({'Mean velocity','Bin9','95%
conf}','Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
title('mean value of velocity v for all bins '
,'Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
subplot(1,3,3)
loglog(freqs,Bin(3).Py)
hold on
loglog(freqs,Bin(9).Py,'r')
loglog(freqs,Bin(17).Py,'m')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend
({'Bin3','Bin9','Bin17}','Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
title(' velocity of v with mean value '
,'Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')

%
% plot the results versus frequency(freqs) for the component w of velocity

```

```

figure
subplot(1,3,1)
loglog(freqs,Bin(3).Pzz)
hold on
loglog(freqs,Bin(9).Pzz,'r')
loglog(freqs,Bin(17).Pzz,'m')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend
({'Bin3','Bin9','Bin17'},'Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
title(' velocity of w with mean value '
,'Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
subplot(1,3,2)
loglog(freqs,Pzz)
hold on
conf_up = Pzz(:,1) .* confz(:,1);
conf_dn = Pzz(:,1) .*confz(:,2);
conf=[conf_up conf_dn];
loglog(freqs,Bin(9).Pzz,'r')
loglog(freqs,conf,'b:')
loglog(freqs,Bin(9).Pz,'r')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend ({'Mean velocity','Bin9','95%
conf'},'Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
title('mean value of velocity w for all bins '
,'Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
subplot(1,3,3)
loglog(freqs,Bin(3).Pz)
hold on
loglog(freqs,Bin(9).Pz,'r')
loglog(freqs,Bin(17).Pz,'m')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
legend
({'Bin3','Bin9','Bin17'},'Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
title('velocity of w with mean
value','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
%
% pressure spectrum vs velocity spectrum without mean value for bins 3,9,17
%
figure
subplot(1,3,1)
loglog(freqs,Bin(3).Px)
hold on
loglog(freqs,Bin(9).Px,'r')
loglog(freqs,Bin(17).Px,'m')
loglog(freqs,Ppp,'k')
conf_up = Ppp(:,1) .* confp(:,1);
conf_dn = Ppp(:,1) .*confp(:,2);
conf=[conf_up conf_dn];
loglog(freqs,conf,'k:')
xlabel (' frequency, Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz','Fontname','Arial','FontSize',10,'FontWeight','bold')

```

```

legend
({'Bin3', 'Bin9', 'Bin17', 'Pressure', '95%conf'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8,
'FontWeight', 'bold')
title('U.up vs Pressure', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
subplot(1, 3, 2)
loglog(freqs, Bin(3).Py)
hold on
loglog(freqs, Bin(9).Py, 'r')
loglog(freqs, Bin(17).Py, 'm')
loglog(freqs, Ppp, 'k')
conf_up = Ppp(:,1) .* confp(:,1);
conf_dn = Ppp(:,1) .* confp(:,2);
conf=[conf_up conf_dn];
loglog(freqs, conf, 'k:')
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend
({'Bin3', 'Bin9', 'Bin17', 'Pressure', '95%conf'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8,
'FontWeight', 'bold')
title('U.vp vs Pressure', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
subplot(1, 3, 3)
loglog(freqs, Bin(3).Pz)
hold on
loglog(freqs, Bin(9).Pz, 'r')
loglog(freqs, Bin(17).Pz, 'm')
loglog(freqs, Ppp, 'k')
conf_up = Ppp(:,1) .* confp(:,1);
conf_dn = Ppp(:,1) .* confp(:,2);
conf=[conf_up conf_dn];
loglog(freqs, conf, 'k:')
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('Power Spectral Density , m^{2} s^{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'Bin3', 'Bin9', 'Bin17', 'Pressure', '95%
conf'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
title('U.wp vs Pressure', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold')
%
% velocity spectrum for bins 3,17 with/without mean value for each beam
% versus frequency(freqs)
%
figure
subplot(3, 2, 1)
loglog(freqs, Bin(3).Pxx)
hold on
loglog(freqs, Bin(3).Px, 'r')
title(' Bin 3~1.6 m', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.u', 'U.up'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3, 2, 2)
loglog(freqs, Bin(17).Pxx, 'k')
hold on
loglog(freqs, Bin(17).Px, 'm')
title(' Bin 17~0.2 m', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.u', 'U.up'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3, 2, 3)
loglog(freqs, Bin(3).Pyy)
hold on
loglog(freqs, Bin(3).Py, 'r')

```

```

ylabel ('Power Spectral Density , m{2} s{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.v', 'U.vp'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3,2,4)
loglog(freqs, Bin(17).Pyy, 'k')
hold on
loglog(freqs, Bin(17).Py, 'm')
ylabel ('Power Spectral Density , m{2} s{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.v', 'U.vp'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3,2,5)
loglog(freqs, Bin(3).Pzz)
hold on
loglog(freqs, Bin(3).Pz, 'r')
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.w', 'U.wp'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3,2,6)
loglog(freqs, Bin(17).Pzz, 'k')
hold on
loglog(freqs, Bin(17).Pz, 'm')
xlabel (' frequency, Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.w', 'U.wp'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
%
% velocity spectrum for bins 3,17 with/without mean value for each beam
% versus wavelength(L)
%
figure
subplot(3,2,1)
loglog(L, Bin(3).Pxx)
hold on
loglog(L, Bin(3).Px, 'r')
title(' Bin 3~1.6 m', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.u', 'U.up'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3,2,2)
loglog(L, Bin(17).Pxx, 'k')
hold on
loglog(L, Bin(17).Px, 'm')
title(' Bin 17~0.2 m', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.u', 'U.up'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3,2,3)
loglog(L, Bin(3).Pyy)
hold on
loglog(L, Bin(3).Py, 'r')
ylabel ('Power Spectral Density , m{2} s{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.v', 'U.vp'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3,2,4)
loglog(L, Bin(17).Pyy, 'k')
hold on
loglog(L, Bin(17).Py, 'm')
ylabel ('Power Spectral Density , m{2} s{-2}/
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
legend ({'U.v', 'U.vp'}, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold')
subplot(3,2,5)
loglog(L, Bin(3).Pzz)
hold on

```

```

loglog(L,Bin(3).Pz,'r')
xlabel('wavelength, m','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
legend({'U.w','U.wp'},'Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')
subplot(3,2,6)
loglog(L,Bin(17).Pzz,'k')
hold on
loglog(L,Bin(17).Pz,'m')
xlabel('wavelength, m','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
legend({'U.w','U.wp'},'Fontname','Arial','FontSize',8,'FontWeight','bold')

```

```

function [H, Hf] = retrieve_height(Uf, T, z, D)
%
% usage [H, Hf] = retrieve_height(Uf, T, z, D)
%
% this function uses the fourier components Uf of a water particle velocity
% time series (after they have been produced via the fft Matlab routine),
% the corresponding vector of periods T (of N/2 - 1 length, where N the
% length of Uf), the measurement depth z and water column depth D, and
% estimates the corresponding fourier component of the wave height, Hf,
% as well as the time-series of sea-surface elevation, H.
% H has both real and imaginary parts, the imaginary is an estimate of the
% error.
%
% Vassilis Zervakis and Antonis Vourlakos, University of the Aegean,
% Mytilene, 2014.
%
% fill in a new period vector, symmetric at the Nyquist frequency
N = length(Uf);
T1 = zeros(N,1);
T1(1) = T(1);
T1(N/2+1) = T(N/2+1);
for i = 0:N/2
    T1(i+1) = T(i+1);
    T1(N-i) = T1(i+1);
end
%
clear T
T = T1;
clear T1
%
% fill the vector of wavenumbers
L = surf_wavelength1(T, D);
k = 2*pi ./ L;
%
% find the spectral components whose horizontal wavelength permits the
% sensing if the wave at the measurement depth
J = find(abs(z./L) < 0.2);
%
% estimate the spectral components of the wave height from the eligible
% spectral components
Hf(J) = Uf(J) .* T(J) .* sinh(k(J)*D) ./ (pi.*cosh(k(J)*(D+z)));
%
% perform zero-padding at the non-eligible points.

```



```

K = find(isnan(Hf));
Hf(K) = nanmean(Hf);
%
H = ifft(Hf);
return

function waveanalysis(U,press,Nburst,avginterval, D)
%
% usage waveanalysis (U,press,Nburst,avginterval, D)
%
% this analysis exploits spactral analysis to estimate the wave height
% through aquadopp measurements.
%
% Vassilis Zervakis and Antonis Vourelakos, University of the Aegean,
% Mytilene, 2014

% estimate sampling frequency within each burst
dt = (U.timer(2,1)-U.timer(1,1))*24*3600;
% remove the mean value of all bins for each beam
U.up = U.u - mean(U.u,2)*ones(1,U.numcells);
U.vp = U.v - mean(U.v,2)*ones(1,U.numcells);
U.wp = U.w - mean(U.w,2)*ones(1,U.numcells);
%
% estimate the spectra for all bins
% for i = 1:U.numcells,
for i = 1:U.numcells,
    [Bin(i).Pxx, freqs, Bin(i).confx ] = powerspectrum3(U.up(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]',' [5 10]',' 0.95, 0);
    [Bin(i).Pyy, freqs, Bin(i).confy ] = powerspectrum3(U.vp(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]',' [5 10]',' 0.95, 0);
    [Bin(i).Pzz, freqs, Bin(i).confz ] = powerspectrum3(U.wp(:,i), 512, 0, 2,
0.25, [0.1 1]',' [5 10]',' 0.95, 0);
end
%
close all
figure
T = 1./freqs;
L = surf_wavelength1(T,45);
loglog(L, Bin(1).Pxx)
hold on
conf_up = Bin(1).Pxx(:,1) .* Bin(1).confx(:,1);
conf_dn = Bin(1).Pxx(:,1) .* Bin(1).confx(:,2);
loglog(L, conf_up, ':')
loglog(L, conf_dn, ':')
% loglog(L, Bin(U.numcells).Pxx,'r')
% loglog(L, Bin(U.numcells).confx,':','r')
display('Show start of wave spectrum')
[inL1,insp1]=ginput(1)
display('Show end of wave spectrum')
[inL2,insp2]=ginput(1)
J2 = min(find(inL1 >= L))
J1 = max(find(inL2 <= L))
display(' minimum - maximym wavelengths: ')
L(J1)
L(J2)

```

```

display(' minimum - maximym waveperiods: ')
T(J1)
T(J2)
disp(['min. frequency ',num2str(freqs(J1)), ' cps']);
disp(['max. frequency ',num2str(freqs(J2)), ' cps']);
%
% estimate the waveheight from the recorded velocities
N = 1024;
j = 0;
for i = 1:1:U.numcells,
    for l=1:6,
lstart=(l-1)*N+1;
lend=N*l;
    Ufx = fft(U.up(lstart:lend,i), N);
    Ufy = fft(U.vp(lstart:lend,i), N);
    Ufz = fft(U.wp(lstart:lend,i), N);
    % map the frequencies
    fr = [1/(N*dt):1/(N*dt):N/(N*dt)];
%
    %figure
    %plot(real(Ufx));

    % blank the part of the spectrum that is outside the wave frequency
    % range
    JJ1 = max(find(fr(1:N/2) < freqs(J1)));
    JJ2 = min(find(fr(1:N/2) > freqs(J2)));
    Ufx(1:JJ1) = 0;
    Ufx(JJ2:N/2) = 0;
    Ufx(N:-1:N-JJ1) = 0;
    Ufx(N-JJ2:-1:N/2) = 0;
    Ufy(1:JJ1) = 0;
    Ufy(JJ2:N/2) = 0;
    Ufy(N:-1:N-JJ1) = 0;
    Ufy(N-JJ2:-1:N/2) = 0;
    Ufz(1:JJ1) = 0;
    Ufz(JJ2:N/2) = 0;
    Ufz(N:-1:N-JJ1) = 0;
    Ufz(N-JJ2:-1:N/2) = 0;

    %hold on
    %plot(real(Ufx),'r')

    % estimate the wave height time series
    [Burst(l,i).Hx, Burst(l,i).Hfx] = retrieve_height1(Ufx, 1./fr,
mean(U.z(:,i)), D);
    [Burst(l,i).Hy, Burst(l,i).Hfy] = retrieve_height1(Ufy, 1./fr,
mean(U.z(:,i)), D);
    [Burst(l,i).Hz, Burst(l,i).Hfz] = retrieve_height1(Ufz, 1./fr,
mean(U.z(:,i)), D);
    end
end

% Plot the results in one figure
for l=1:6

```

```

    N=1024;
    lstart=(l-1)*N+1;
    lend=N*l;
figure
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,3).Hx))
ylabel('η(t), m','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
hold on
zbin1 = num2str(mean(U.z(:,3)),'%4.1f');
lab1 = [' bin depth ', zbin1, ' m'];
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,9).Hx), 'r')
zbin2 = num2str(mean(U.z(:,9)),'%4.1f');
lab2 = [' bin depth ', zbin2, ' m'];
datetick('x')
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,17).Hx), 'm')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,3).Hx), ':')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,9).Hx), 'r:')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,17).Hx), 'm:')
datetick('x')
zbin3 = num2str(mean(U.z(:,17)),'%4.1f');
lab3 = [' bin depth ', zbin3, ' m'];
legend (lab1 ,lab2, lab3)
xlabel (' Time , s','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
figure
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,3).Hy))
ylabel('η(t), m','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
hold on
zbin1 = num2str(mean(U.z(:,3)),'%4.1f');
lab1 = [' bin depth ', zbin1, ' m'];
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,9).Hy), 'r')
zbin2 = num2str(mean(U.z(:,9)),'%4.1f');
lab2 = [' bin depth ', zbin2, ' m'];
datetick('x')
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,17).Hy), 'm')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,3).Hy), ':')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,9).Hy), 'r:')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,17).Hy), 'm:')
datetick('x')
zbin3 = num2str(mean(U.z(:,17)),'%4.1f');
lab3 = [' bin depth ', zbin3, ' m'];
legend (lab1 ,lab2, lab3)
xlabel (' Time , s','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
figure
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,3).Hz))
ylabel('η(t), m','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
hold on
zbin1 = num2str(mean(U.z(:,3)),'%4.1f');
lab1 = [' bin depth ', zbin1, ' m'];
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,9).Hz), 'r')
zbin2 = num2str(mean(U.z(:,9)),'%4.1f');
lab2 = [' bin depth ', zbin2, ' m'];
datetick('x')
plot(U.timer(lstart:lend),real(Burst(l,17).Hz), 'm')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,3).Hz), ':')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,9).Hz), 'r:')
plot(U.timer(lstart:lend),imag(Burst(l,17).Hz), 'm:')
datetick('x')

```

```

zbin3 = num2str(mean(U.z(:,17)), '%4.1f');
lab3 = [' bin depth ', zbin3, ' m'];
legend (lab1 ,lab2, lab3)
xlabel (' Time , s', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
end
%
%Pressure spectrum
press2=press-mean(press);
[Pxx, freqs, confx ] = powerspectrum3(press2, 512, 0, 2, 0.25, [0.1 1]', [5
10]', 0.95, 0);
conf_up = Pxx(:,1) .* confx(:,1);
conf_dn = Pxx(:,1) .* confx(:,2);
conf=[conf_up conf_dn];
%
% plot the spectra
%
for l=1:6
    N=1024;
    lstart=(l-1)*N+1;
    lend=N*l;
N2 = N/2
fr = [1/(N*dt):1/(N*dt):N2/(N*dt)];
size(Burst(l,5).Hfx)
size(fr)
figure
subplot(131)
S3x = real(Burst(l,3).Hfx(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,3).Hfx(1:N/2)).^2;
S9x = real(Burst(l,9).Hfx(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,9).Hfx(1:N/2)).^2;
S17x = real(Burst(l,17).Hfx(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,17).Hfx(1:N/2)).^2;
loglog(fr, S3x/N2)
ylabel ('Spectrum of Wave Height , m^{2} /
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
hold on
loglog(fr, S9x/N2, 'r')
loglog(fr, S17x/N2, 'm')
loglog(freqs, Pxx, 'k')
loglog(freqs, conf, 'k:')
xlabel (' frequency ,
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
%axis([0.001 10 0.00001 100])
S3y = real(Burst(l,3).Hfy(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,3).Hfy(1:N/2)).^2;
S9y = real(Burst(l,9).Hfy(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,9).Hfy(1:N/2)).^2;
S17y = real(Burst(l,17).Hfy(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,17).Hfy(1:N/2)).^2;
subplot(132)
loglog(fr, S3y/N2)
hold on
loglog(fr, S9y/N2, 'r')
loglog(fr, S17y/N2, 'm')
loglog(freqs, Pxx, 'k')
loglog(freqs, conf, 'k:')
xlabel (' frequency ,
Hz', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
%axis([0.001 10 0.00001 100])
subplot(133)
S3z = real(Burst(l,3).Hfz(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,3).Hfz(1:N/2)).^2;
S9z = real(Burst(l,9).Hfz(1:N/2)).^2+imag(Burst(l,9).Hfz(1:N/2)).^2;

```

```

S17z = real(Burst(1,17).Hfz(1:N/2)).^2+imag(Burst(1,17).Hfz(1:N/2)).^2;
loglog(fr,S3z/N2)
ylabel('Spectrum of Wave Height , m{2} /
Hz','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
hold on
loglog(fr,S9z/N2,'r')
loglog(fr,S17z/N2,'m')
loglog(freqs,Pxx,'k')
loglog(freqs,conf,'k:')
xlabel(' frequency ,
Hz','Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
%axis([0.001 10 0.00001 100])
end
%
% calculate significant waveheight
dep = [];
Hsigx = []
Hsigy = []
Hsigz = []

% figure
for i = 1:U.numcells
    for l=1:6
        H1 = real(Burst(l,i).Hx);
        Burst(l,i).H1mean = mean(H1);
        Burst(l,i).Hsig1 = sqrt(2)*sqrt(sum(H1.^2)/N);
        H2 = real(Burst(l,i).Hy);
        Burst(l,i).H2mean = mean(H2);
        Burst(l,i).Hsig2 = sqrt(2)*sqrt(sum(H2.^2)/N);
        H3 = real(Burst(l,i).Hz);
        Burst(l,i).H3mean = mean(H3);
        Burst(l,i).Hsig3 = sqrt(2)*sqrt(sum(H3.^2)/N);
        Bur(l).Hsx=[Burst(l,3).Hsig1 Burst(l,9).Hsig1 Burst(l,17).Hsig1];
        Bur(l).Hsy=[Burst(l,3).Hsig2 Burst(l,9).Hsig2 Burst(l,17).Hsig2];
        Bur(l).Hsz=[Burst(l,3).Hsig3 Burst(l,9).Hsig3 Burst(l,17).Hsig3];
        Bur(l).Hsxd=std(Bur(l).Hsx);
        Bur(l).Hsx=mean(Bur(l).Hsx);
        Bur(l).Hsyd=std(Bur(l).Hsy);
        Bur(l).Hsy=mean(Bur(l).Hsy);
        Bur(l).Hszd=std(Bur(l).Hsz);
        Bur(l).Hsz=mean(Bur(l).Hsz);
        Hsigx = [Hsigx; Burst(l,i).Hsig1];
        Hsigy = [Hsigy; Burst(l,i).Hsig2];
        Hsigz = [Hsigz; Burst(l,i).Hsig3];
        dep = [dep; mean(U.z(:,i),1)];
    end
end
Hsx=[Bur(1).Hsx Bur(2).Hsx Bur(3).Hsx Bur(4).Hsx Bur(5).Hsx Bur(6).Hsx];
Hsy=[Bur(1).Hsy Bur(2).Hsy Bur(3).Hsy Bur(4).Hsy Bur(5).Hsy Bur(6).Hsy];
Hsz=[Bur(1).Hsz Bur(2).Hsz Bur(3).Hsz Bur(4).Hsz Bur(5).Hsz Bur(6).Hsz];
Hsxd=[Bur(1).Hsxd Bur(2).Hsxd Bur(3).Hsxd Bur(4).Hsxd Bur(5).Hsxd
Bur(6).Hsxd];
Hsyd=[Bur(1).Hsyd Bur(2).Hsyd Bur(3).Hsyd Bur(4).Hsyd Bur(5).Hsyd
Bur(6).Hsyd];
Hszd=[Bur(1).Hszd Bur(2).Hszd Bur(3).Hszd Bur(4).Hszd Bur(5).Hszd
Bur(6).Hszd];

```

```

%Calculate the mean time of each burst measurement
for l=1:6
    N=1024;
    lstart=(l-1)*N+1;
    lend=N*l;
    Bur(l).Timer=mean(U.timer(lstart:lend));
end
Timer=[Bur(1).Timer Bur(2).Timer Bur(3).Timer Bur(4).Timer Bur(5).Timer
Bur(6).Timer];

figure
errorbar(Timer,Hsx,Hsxd)
hold on
errorbar(Timer,Hsy,Hsyd,'r')
errorbar(Timer,Hsz,Hszd,'m')
hold on
plot(Timer,Hsx,'o')
plot(Timer,Hsy,'ro')
plot(Timer,Hsz,'mo')
datetick('x')
legend
({'Beam1','Beam2','Beam3'},'Fontname','Arial','FontSize',12,'FontWeight','bold')
xlabel('Time per burst,
s','Fontname','Arial','FontSize',14,'FontWeight','bold')
ylabel('Hs, m','Fontname','Arial','FontSize',14,'FontWeight','bold')
%
%Calculate the mean wave maximum energy period for bin 3,9,17 , for each burst
and beam
%and the standard deviation between the 3 bins for each burst and beam
%the periods retrieve from the peak frequencies in the wave spectra
%of bin 3,9,17

Tx=[2.64;2.99;3.18;3.91;3.25;3.08];
Ty=[3.08 3.08 2.95 2.95 2.96 2.89];
Tz=[3.07 2.93 2.58 2.97 3.3 3.3];
Tsx=[0.69 0.19 0.53 0.19 0.54 0.46];
Tsy=[0.91 0.9 0.52 0.75 0.67 0.75];
Tsz=[0.66 1.09 0.57 0.71 0.28 0.33];
%
%Plot the mean wave period with standard deviation vs mean time of each
%burst measurements

figure
errorbar(Timer,Tx,Tsx)
hold on
errorbar(Timer,Ty,Tsy,'r')
errorbar(Timer,Tz,Tsz,'m')
hold on
plot(Timer,Tx,'o')
plot(Timer,Ty,'ro')
plot(Timer,Tz,'mo')
datetick('x')

```

```
legend
({ 'Beam1 (x) ', 'Beam2 (y) ', 'Beam3 (z) ' }, 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold')
xlabel ('Time per burst,
s', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold')
ylabel ('T, s', 'Fontname', 'Arial', 'FontSize', 14, 'FontWeight', 'bold')

return
```