

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ
ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΜΕΣΩ ΑΓΩΓΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΣΕ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΜΕΤΩΠΟ**

ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ ΚΩΦΟΥ



Επιβλέποντες Καθηγητές:

Δρ. Βασιλική Χ. Κατσαρδή, Λέκτορας

Δρ. Θεοφάνης Γ. Γραμμένος, Επίκουρος Καθηγητής

Ακ. Έτος: 2015-2016



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 15054/1
Ημερ. Εισ.: 03-10-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2016
ΚΩΦ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2016

© 2016 Σταυρούλα Κωφού

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτη Εξετάστρια (Επιβλέπουσα) Δρ. Βασιλική Χ. Κατσαρδή
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής (Συνεπιβλέπων) Δρ. Θεοφάνης Γ. Γραμμένος
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Αντώνιος Λιακόπουλος
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας Δρ. Βασιλική Κατσαρδή, Λέκτορα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, όχι μόνο για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή της, αλλά και για το γεγονός ότι με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ μ' ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον αντικείμενο. Αποτέλεσε κίνητρο και παράδειγμα για μένα και της είμαι ευγνώμων διότι με βοήθησε να αντιληφθώ ότι θα ήθελα να εμβαθύνω περισσότερο γύρω από το συγκεκριμένο αντικείμενο στο μέλλον. Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τον θαυμασμό και την εκτίμηση μου για τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Θεοφάνη Γραμμένο, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τον ευχαριστώ για την άριστη συνεργασία μας και για το σύνολο των γνώσεων που μου μετέδωσε. Οφείλω ευχαριστίες στο τρίτο μέλος της εξεταστικής επιτροπής Δρ. Αντώνιο Λιακόπουλο, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την προσεκτική ανάγνωση της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την εργασία στους γονείς μου, στους οποίους είμαι πραγματικά ευγνώμων για την ολόψυχη αγάπη και την υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Σταυρούλα Κωφού

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ
ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ ΜΕΣΩ ΑΓΩΓΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΗΣ ΣΕ
ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΜΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟ ΜΕΤΩΠΟ**

Σταυρούλα Κωφού

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2016

Επιβλέποντες Καθηγητές:

Δρ. Βασιλική Χ. Κατσαρδή, Λέκτορας

Δρ. Θεοφάνης Γ. Γραμμένος, Επίκουρος Καθηγητής

Περίληψη

Ένας απλός τρόπος εξασφάλισης της ποιότητας των παράκτιων υδάτων είναι η κατασκευή αγωγών ανανέωσης σε χαρακτηριστικές θέσεις των εξωτερικών λιμενικών έργων (κυματοθραύστες). Με σκοπό την έρευνα της μετάδοσης των κυματισμών κατά τη διέλευσή τους μέσα από αυτούς τους αγωγούς ανανέωσης και την προσπάθεια καλύτερης κατανόησης των παραγόντων που επιδρούν σ' αυτούς, όπως τα κυματικά χαρακτηριστικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών ανανέωσης, πραγματοποιήθηκαν μία σειρά από 59 πειραματικές μετρήσεις στη δεξαμενή τριών διαστάσεων του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων (Ε.Λ.Ε.) στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με μία απλή διάταξη κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία γίνεται η επεξεργασία και η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων.

Αρχικά, επεξεργάστηκαν μέσω της μελέτης της χρονοϊστορίας των κυματισμών και μέσω φασματικής ανάλυσης οι μετασχηματισμοί των κυματισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διείσδυση των κυμάτων μέσω των αγωγών ανανέωσης. Έτσι έγιναν κατανοητές οι συνέπειές στους στη μεταφορά ενέργειας σε αρμονικές ανώτερης τάξης.

Στη συνέχεια, έγινε ο υπολογισμός των συντελεστών διείσδυσης κυματισμού σε τέσσερις θέσεις κατόπιν του αγωγού ανανέωσης, και εξετάστηκε το πώς επηρεάζονται από τα κυματικά χαρακτηριστικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών. Παρατηρήθηκε πως κυρίαρχη θέση στην πρόβλεψη των συντελεστών διείσδυσης κατέχουν τόσο το πλάτος του αγωγού, όσο και η περίοδος του κυματισμού.

Τέλος, έγινε σύγκριση των πειραματικών συντελεστών διείδυσης με μία εμπειρική εξίσωση υπολογισμού τους που πρότειναν οι Tsoukala et al. (2010), η οποία αποδείχτηκε μη επιτυχής. Ο αριθμός των πειραμάτων δεν ήταν ικανοποιητικός για την σαφή κατανόηση του προβλήματος.

3D WAVE TRANSFORMATIONS THROUGH OPENINGS IN BREAKWATERS

Kofou Stavroula

University of Thessaly, Department of Civil Engineering

2016

Abstract

A simple way to counteract a decline in water quality in harbour basins is the placement of flushing culverts at characteristic sites of external harbour structures (breakwaters). A series of 59 experiments were conducted in a physical model of a simple vertical-front breakwater in a 3D basin, in the Laboratory of Harbor Works of the National Technical University of Athens, in order to investigate the wave propagation through flushing culverts and the effect of the wave properties as well as the geometrical characteristics of the flushing culverts. In this thesis, we have focused on the experimental analysis.

First, the wave transformation was examined by the use of spectral analysis in order to investigate the harmonic generation and energy transfer.

Then, the experimental transmission coefficients were calculated in four positions and the effects of the wave properties and the geometrical characteristics of the flushing culvert were investigated graphically. It was observed that the width of the culvert as well as the wave period are dominant for the prediction of the transmission coefficients.

Finally, the experimental transmission coefficients were compared with the calculated ones, using an empirical equation proposed by Tsoukala et al. (2010). However, this comparison was not successful. The number of the experiments was not fulfilling for a better comprehension of the problem.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	Εισαγωγή	1
1.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	1
1.2	Κίνητρο	4
1.3	Περιγραφή του πειράματος	4
1.4	Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας.....	9
Κεφάλαιο 2	Μετασχηματισμοί των κυματισμών κατά τη διέλευσή τους μέσα από τον αγωγό ανανέωσης	10
2.1	Διαγράμματα χρονοσειρών ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας και αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων	12
2.2	Συμπεράσματα.....	79
Κεφάλαιο 3	Συντελεστής διείσδυσης κυματισμού K_t	81
3.1	Συντελεστές διείσδυσης για τους μετρητές P6, P8,P9 και P11.....	82
3.2	Θεωρητικοί συντελεστές περίθλασης.....	97
Κεφάλαιο 4	Εναλλακτικός υπολογισμός του συντελεστή διείσδυσης κυματισμού K_t	101
4.1	Εμπειρικός τύπος υπολογισμού του συντελεστή διείσδυσης Tsoukala et al. 2010	102
4.2	Αποτελέσματα.....	103
Κεφάλαιο 5	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	106
5.1	Συμπεράσματα.....	106
5.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	108
	Βιβλιογραφία	109

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: <i>Χαρακτηριστικά Πειραματικών Διατάξεων.</i>	7
Πίνακας 1-2: <i>Πίνακας κυματικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών αγωγών ανανέωσης.</i>	8
Πίνακας 3-1: <i>Πειραματικοί και θεωρητικοί συντελεστές περίθλασης για τις θέσεις των μετρητών 6,8,9 και 11.</i>	99

Κατάλογος Σχημάτων

- Σχήμα 1-1: Αγωγός ανανέωσης των υδάτων με τρεις περιοχές διερεύνησης: (1) ανάντη, (2) αγωγός ανανέωσης, (3) κατάντη.2
- Σχήμα 1-2: Φυσικό προσομοίωμα κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο και αγωγό ανανέωσης χωρίς άνω όριο.5
- Σχήμα 1-3: Σκαρίφημα της διάταξης των πειραματικών μετρήσεων στη δεξαμενή.6
- Σχήμα 2-1: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 5 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.13
- Σχήμα 2-2: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 5 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.14
- Σχήμα 2-3: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 9 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.15
- Σχήμα 2-4: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 9 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.16
- Σχήμα 2-5: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 3 για $bf=0$, $hf=0$ και 7 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.17

- Σχήμα 2-6: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 3 για $bf=0$, $hf=0$ και 7 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων. 18
- Σχήμα 2-7: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 6 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων 19
- Σχήμα 2-8: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 6 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων. 20
- Σχήμα 2-9: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 10 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων. 21
- Σχήμα 2-10: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 10 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων..... 22
- Σχήμα 2-11: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 8 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων. 23
- Σχήμα 2-12: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 8 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων..... 24

- Σχήμα 2-13: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....25
- Σχήμα 2-14: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....26
- Σχήμα 2-15: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 13 για $bf=0$, $hf=0$ και 19 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....27
- Σχήμα 2-16: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 13 για $bf=0$, $hf=0$ και 19 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....28
- Σχήμα 2-17: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 14 για $bf=0$, $hf=0$ και 27 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....29
- Σχήμα 2-18: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 14 για $bf=0$, $hf=0$ και 27 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....30

- Σχήμα 2-19: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 15 για $bf=0$, $hf=0$ και 21 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....31
- Σχήμα 2-20: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 15 για $bf=0$, $hf=0$ και 21 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....32
- Σχήμα 2-21: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 22 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....33
- Σχήμα 2-22: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 22 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....34
- Σχήμα 2-23: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 29 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....35
- Σχήμα 2-24: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 29 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....36

- Σχήμα 2-25: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 23 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....37
- Σχήμα 2-26: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 23 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....38
- Σχήμα 2-27: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 30 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....39
- Σχήμα 2-28: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 30 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....40
- Σχήμα 2-29: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 18 για $bf=0$, $hf=0$ και 24 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....41
- Σχήμα 2-30: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 18 για $bf=0$, $hf=0$ και 24 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....42

- Σχήμα 2-31: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 18 για $bf=0$, $hf=0$ και 30 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....43
- Σχήμα 2-32: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 18 για $bf=0$, $hf=0$ και 30 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....44
- Σχήμα 2-33: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 25 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....45
- Σχήμα 2-34: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 25 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....46
- Σχήμα 2-35: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 20 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....47
- Σχήμα 2-36: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 20 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....48

- Σχήμα 2-37: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 28 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....49
- Σχήμα 2-38: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 28 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....50
- Σχήμα 2-39: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 38 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....51
- Σχήμα 2-40: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 38 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....52
- Σχήμα 2-41: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 43 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....53
- Σχήμα 2-42: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 43 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....54

- Σχήμα 2-43: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 40 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....55
- Σχήμα 2-44: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 40 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....56
- Σχήμα 2-45: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 45 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....57
- Σχήμα 2-46: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 45 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....58
- Σχήμα 2-47: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 41 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....59
- Σχήμα 2-48: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 41 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....60

- Σχήμα 2-49: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 46 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....61
- Σχήμα 2-50: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 46 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....62
- Σχήμα 2-51: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 54 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....63
- Σχήμα 2-52: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 54 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....64
- Σχήμα 2-53: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 57 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....65
- Σχήμα 2-54: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 57 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....66

- Σχήμα 2-55: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 48 για $bf=0$, $hf=0$ και 55 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....67
- Σχήμα 2-56: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 48 για $bf=0$, $hf=0$ και 55 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....68
- Σχήμα 2-57: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 49 για $bf=0$, $hf=0$ και 56 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....69
- Σχήμα 2-58: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 49 για $bf=0$, $hf=0$ και 56 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....70
- Σχήμα 2-59: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 53 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....71
- Σχήμα 2-60: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 53 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....72

- Σχήμα 2-61: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 58 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....73
- Σχήμα 2-62: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 58 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....74
- Σχήμα 2-63: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 39 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....75
- Σχήμα 2-64: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 39 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....76
- Σχήμα 2-65: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 44 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....77
- Σχήμα 2-66: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 44 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.....78

Σχήμα 3-1: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 90°	83
Σχήμα 3-2: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 120°	83
Σχήμα 3-3: Διαγράμματα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 90° (διαφοροποίηση ανάλογα με την περίοδο T).	84
Σχήμα 3-4: Διαγράμματα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 120° (διαφοροποίηση ανάλογα με την περίοδο T)...	85
Σχήμα 3-5: Διαγράμματα του συντελεστή διείσδυσης K_{t6} συναρτήσει της παραμέτρου H_1/gT^2 για (α) γωνία πρόσπτωσης 90° και (β) γωνία πρόσπτωσης 120°	86
Σχήμα 3-6: Διαγράμματα του συντελεστή διείσδυσης K_{t8} συναρτήσει της παραμέτρου H_1/gT^2 για (α) γωνία πρόσπτωσης 90° και (β) γωνία πρόσπτωσης 120°	86
Σχήμα 3-7: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t συναρτήσει της περιόδου T για $H_1=0.03m$ και $b=0$	87
Σχήμα 3-8: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t συναρτήσει της περιόδου T για $H_1=0.0027m$ και $b=0.85m$	88
Σχήμα 3-9: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t συναρτήσει της περιόδου T για $H_1=0.037m$ και $b=0.1m$	88
Σχήμα 3-10: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης K_{t6} συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 90°	89
Σχήμα 3-11: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης K_{t6} συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 120°	90

Σχήμα 3-12: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης K_{t8} συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 90°	90
Σχήμα 3-13: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης K_{t8} συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 120°	91
Σχήμα 3-14: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t σε κάθε θέση μετρητή. Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5cm$ ($H_1=1.62cm$) και $b=10cm$ ($H_1=1.49cm$), $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90°	92
Σχήμα 3-15: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-14) για τους μετρητές 6-11 ($T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90°).	92
Σχήμα 3-16: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t σε κάθε θέση μετρητή. Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5cm$ ($H_1=1.52cm$) και $b=10cm$ ($H_1=1.48cm$), $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120°	93
Σχήμα 3-17: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-16) για τους μετρητές 6-11 ($T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120°).	93
Σχήμα 3-18: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t σε κάθε θέση μετρητή. Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5cm$ ($H_1=2.07cm$) και $b=10cm$ ($H_1=1.85cm$), $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90°	94
Σχήμα 3-19: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-18) για τους μετρητές 6-11 ($T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90°).	94
Σχήμα 3-20: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t σε κάθε θέση μετρητή. Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5cm$ ($H_1=2.11cm$) και $b=10cm$ ($H_1=3.84cm$), $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120°	95

Σχήμα 3-21: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-20) για τους μετρητές 6-11 ($T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120°).	95
Σχήμα 3-22: Κυματικό πεδίο υπολογιζόμενο σε παράκτια περιοχή υπό την παρουσία κυματοθραύστη: (α) με και (β) χωρίς άνοιγμα.	98
Σχήμα 4-1: Διαγράμματα σύγκρισης αριθμητικών συντελεστών διείσδυσης με τους πειραματικούς για τους μετρητές: (α) 8, (β) 9, (γ) 11.	104

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

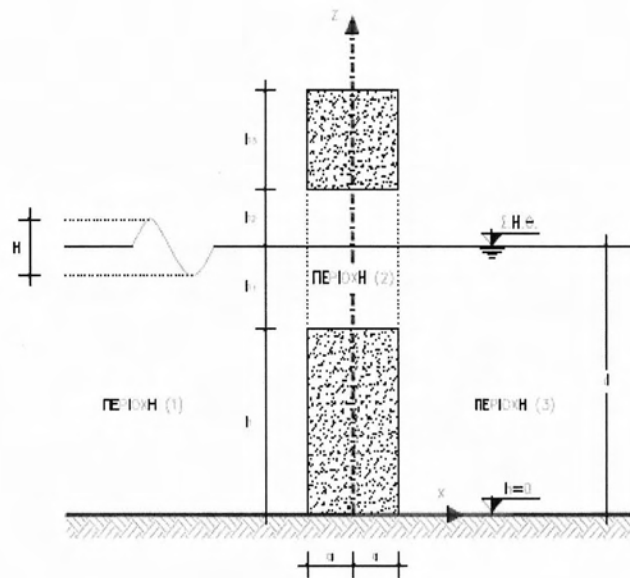
1.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις θαλάσσιων κατασκευών και η επίδρασή τους στην ποιότητα του νερού έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον (Τσουκαλά και άλλοι, Τεχνική Έκθεση ΠΕΒΕ 2013). Σε μαρίνες και αλιευτικά καταφύγια πολλές φορές έχει διαπιστωθεί σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας του νερού, που οφείλεται κατά κύριο λόγο στις λειτουργίες και δραστηριότητες που λαμβάνουν χώρα εντός του έργου. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο σε περιοχές με θερμό κλίμα όπου οι βιολογικές διεργασίες, που επιδρούν αρνητικά στην ποιότητα του νερού, επιταχύνονται. Η μη αντιμετώπιση του προβλήματος οδηγεί σε αυξανόμενη υποβάθμιση της ποιότητας του νερού της λιμενολεκάνης και των γύρω περιοχών. Ένας επιτυχής τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι η περιοδική ανανέωση του νερού εντός της λιμενολεκάνης με αυτό της ανοιχτής θάλασσας, που όπως έχουν δείξει έρευνες, βελτιώνει την ποιότητα του νερού, μειώνει ή εξαλείφει τη δημιουργία στάσιμου νερού και συμβάλλει στον έλεγχο των βιολογικών διεργασιών.

Μία συνηθισμένη και οικονομική μέθοδος βελτίωσης της ποιότητας του νερού στην περιοχή παράκτιων έργων είναι η διάνοιξη ανοιγμάτων (στομιών) ή η κατασκευή αγωγών ανανέωσης (flushing culverts) μικρού πλάτους (τυπικά μικρότερου του ενός μήκους κύματος) σε χαρακτηριστικές θέσεις των εξωτερικών λιμενικών έργων (κυματοθραύστες). Η μέθοδος αυτή συμφέρει λόγω του μηδενικού

κόστους λειτουργίας και συντήρησης και επιτρέπει τη διείσδυση των εξωτερικών υδάτων στο εσωτερικό του έργου και την αύξηση της κυκλοφορίας με την αύξηση του πεδίου ταχυτήτων του νερού. Έτσι επιτυγχάνεται η μείωση του χρόνου ανανέωσης και η βελτίωση της ποιότητας του νερού με τη μεταφορά οξυγόνου.

Οι αγωγοί ανανέωσης είναι ορθογωνικής ή κυκλικής διατομής από σκυρόδεμα και κατασκευάζονται είτε με την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία να βρίσκεται στο μέσο του ύψους του αγωγού (Σχήμα 1-1), είτε στο μισό περίπου του ύψους του παράκτιου έργου (υποθαλάσσιοι αγωγοί). Στη Μεσόγειο, λόγω των συνθηκών που επικρατούν, και κατ' επέκταση στον ελλαδικό χώρο επιλέγεται η πρώτη περίπτωση εξαιτίας της μικρής παλιρροιογενούς κυκλοφορίας και της ταυτόχρονης μείωσης της μεταφοράς ιζημάτων από τα ανοιχτά στη λιμενολεκάνη.



Σχήμα 1-1: Αγωγός ανανέωσης των υδάτων με τρεις περιοχές διερεύνησης: (1) ανάντη, (2) αγωγός ανανέωσης, (3) κατόντη.

Εκτός όμως από τη βελτίωση της ποιότητας του νερού της λιμενολεκάνης, η κατασκευή αγωγών ανανέωσης προκαλεί αύξηση της κυματικής διαταραχής στο εσωτερικό των έργων, η οποία δυσχεραίνει τη λειτουργία τους αλλά και τη ναυσιπλοΐα. Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο αυτές αντιτιθέμενες παραμέτρους, δηλαδή την ικανοποιητική ανανέωση του νερού και την περιορισμένη κυματική διαταραχή, είναι δυνατό να επιτευχθεί η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού λιμενικών και παράκτιων έργων τόσο με περιβαλλοντικά κριτήρια όσο και κριτήρια λειτουργικότητας.

Η θεωρητική – υπολογιστική και πειραματική διερεύνηση της διάδοσης της κυματικής διαταραχής από την ανάντη πλευρά ενός παράκτιου έργου προς την κατάντη μέσω αγωγών ανανέωσης αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης της ερευνητικής ομάδας του Ε.Μ.Π.. Αρχικά, προσεγγίστηκε το διδιάστατο πρόβλημα μετάδοσης κυματισμών πάνω από έναν ύφαλο κυματοθραύστη πειραματικά, με τη διεξαγωγή μετρήσεων στη διώρυγα δοκιμών του Ε.Λ.Ε., και αριθμητικά, προτείνοντας το καταλληλότερο μοντέλο (μοντέλο συζευγμένων ιδιομορφών (coupled-modes), που αναπτύχθηκε από τους Athanassoulis and Belibassakis (1999), Belibassakis and Athanassoulis (2002) και Athanassoulis and Belibassakis (2007)).

Με σκοπό την προσέγγιση του τριδιάστατου προβλήματος της κυματικής ροής σε άνοιγμα, προτάθηκε ένα νέο μοντέλο συζευγμένων ιδιομορφών, για την αξιοπιστία και την επιβεβαίωση του οποίου ήταν αναγκαία η διεξαγωγή επιπρόσθετων μετρήσεων στην τριδιάστατη δεξαμενή του Ε.Λ.Ε. (για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. Τσουκαλά και άλλοι, 2013).

1.2 Κίνητρο

Για την επιβεβαίωση του τριδιάστατου μοντέλου που αναφέρθηκε προηγουμένως κρίθηκε απαραίτητη η διεξαγωγή επιπρόσθετων πειραματικών μετρήσεων στην τριδιάστατη δεξαμενή του Ε.Λ.Ε..

Επίσης, κρίθηκαν απαραίτητες για την ελαχιστοποίηση των παραγόντων που υπεισέρχονται στη μεταβολή του προσπίπτοντος κυματισμού κατά τη διέλευση του μέσω του αγωγού ανανέωσης και να γίνει πιο κατανοητή η επίδραση των παραγόντων αυτών.

1.3 Περιγραφή του πειράματος

Σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις στη δεξαμενή τριών διαστάσεων του Ε.Λ.Ε. με μία πολύ απλή διάταξη κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο, μεταβάλλοντας τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού καθώς και τα κυματικά χαρακτηριστικά. Σκοπός ήταν η ελαχιστοποίηση των παραγόντων που υπεισέρχονται στη μεταβολή των χαρακτηριστικών του προσπίπτοντος κυματισμού κατά τη διέλευσή του μέσα από τον αγωγό.

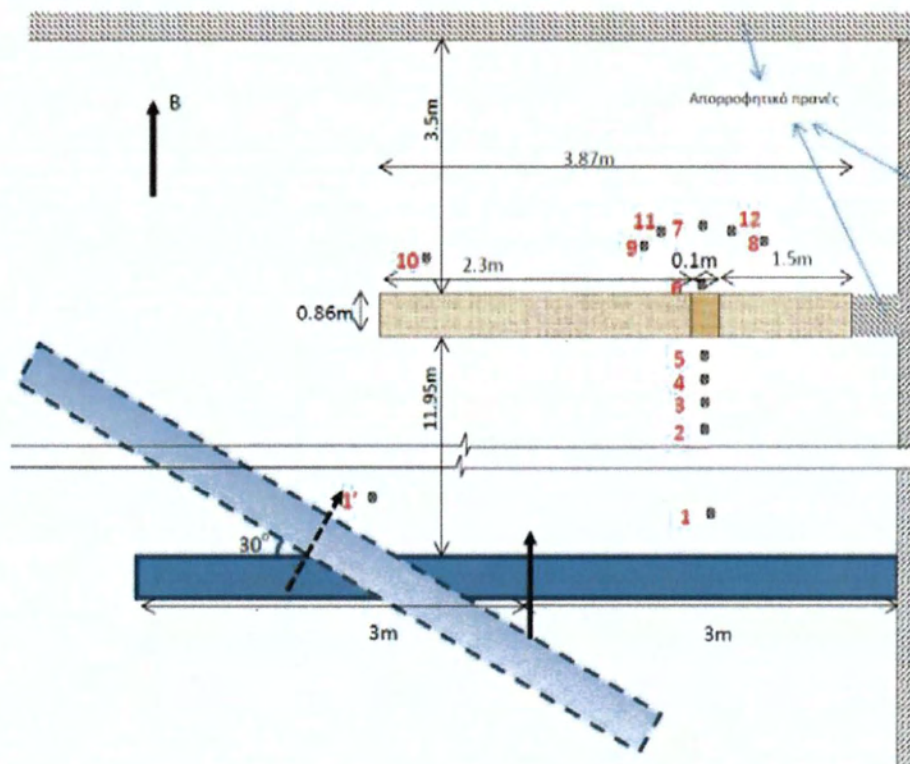


Σχήμα 1-2: Φυσικό προσομοίωμα κυματοθραύστη με κατακόρυφο μέτωπο και αγωγό ανανέωσης χωρίς άνω όριο.

Η τριδιάστατη Δεξαμενή Δοκιμών Δ1 του Ε.Λ.Ε είναι εξοπλισμένη με τα απαιτούμενα όργανα και το κατάλληλο λογισμικό για την εκτέλεση ανάλογων δοκιμών. Έχει διαστάσεις 26.80 x 24.30m, βάθος 1.00m και εντός αυτής υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα παραγωγής μονοχρωματικών και τυχαίων κυματισμών. Για την απορρόφηση των προσπιπτόντων κυμάτων έχουν κατασκευασθεί στα τοιχώματά της αποσβεστικές επενδύσεις από λιθορριπή με κλίση πρανών 1:2 και κοκκομετρία τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται πολύ χαμηλός συντελεστής ανάκλασης, ενώ στην περιοχή των κυματιστήρων, τμήμα των αποσβεστικών επενδύσεων έχει καλυφθεί με γεωύφασμα με σκοπό την ενίσχυση της απορρόφησης των προσπιπτόντων εκεί κυματισμών.

Το φυσικό προσομοίωμα του κυματοθραύστη που κατασκευάστηκε έχει πλάτος 0.86m, ύψος 0.225m και μήκος 3.87m. Επιλέχθηκε κατακόρυφο μέτωπο στον

κυματοθραύστη με σκοπό την απομείωση της απορρόφησης της κυματικής ενέργειας κατά την πρόσπτωσή του σε επικλινές πρανές και πριν τη μετάδοσή του στην κατάντη πλευρά μέσω του αγωγού ανανέωσης. Στο σχήμα 3-1 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φυσικού ομοιώματος.



Σχήμα 1-3: Σκαρίφημα της διάταξης των πειραματικών μετρήσεων στη δεξαμενή.

Τα πειράματα εκτελέστηκαν για τρεις διαφορετικές διατάξεις του έργου και για δύο διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1..

α/α	Πλάτος αγωγού ανανέωσης b_f (cm)	Υψος αγωγού ανανέωσης h_f (cm)	Μήκος αγωγού ανανέωσης l_f (cm)	Γωνία πρόσπτωσης κυμάτων φ
Διάταξη 1.1	10.0	10.0	86.0	90.0
Διάταξη 1.2	10.0	10.0	86.0	120.0
Διάταξη 2.1	8.5	10.0	86.0	90.0
Διάταξη 2.2	8.5	10.0	86.0	120.0
Διάταξη 3.1	χωρίς αγωγό ανανέωσης	10.0	86.0	90.0
Διάταξη 3.2	χωρίς αγωγό ανανέωσης	10.0	86.0	120.0

Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά Πειραματικών Διατάξεων.

Για την καταγραφή των κυματικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 12 μετρητές. Όλοι οι μετρητές παρέμεναν σταθερά στις ίδιες θέσεις με εξαίρεση τον P1, ο οποίος άλλαζε θέση ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης. Οι θέσεις των μετρητών παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.3. Οι μετρητές με κατάλληλη βαθμονόμηση έδιναν τη χρονοσειρά της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας.

Κατά την πειραματική διαδικασία παράγονταν μονοχρωματικοί κυματισμοί με ύψος κύματος H εύρους από 1.38 έως 6.19cm για δύο διαφορετικές περιόδους $T_1=0.6\text{sec}$ και $T_2=0.75\text{sec}$ για δύο διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Εξετάστηκαν από σχεδόν γραμμικοί κυματισμοί έως ισχυρά μη γραμμικοί. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν για συνολικό διάστημα 81.92sec με χρονικό βήμα καταγραφής 0.01sec ή 100Hz.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία.

α/α	Κυματικά Χαρακτηριστικά			Χαρακτηριστικά Αγωγού Ανανέωσης (FC)		
	T (s)	H (cm)	Γωνία Πρόσπτωσης φ	b_f (cm)	h_f (cm)	l_f (cm)
1	0.6	1.59	90		No FC	
2	0.6	1.98	90		No FC	
3	0.6	2.53	90		No FC	
4	0.6	3.8	90		No FC	
5	0.6	1.56	90	10	10	86
6	0.6	1.93	90	10	10	86
7	0.6	2.48	90	10	10	86
8	0.6	3.86	90	10	10	86
9	0.6	1.46	90	8.5	10	86
10	0.6	1.86	90	8.5	10	86
11	0.6	2.39	90	8.5	10	86
12	0.6	3.69	90	8.5	10	86
13	0.75	1.73	90		No FC	
14	0.75	2.08	90		No FC	
15	0.75	2.44	90		No FC	
16	0.75	2.74	90		No FC	
17	0.75	3.55	90		No FC	
18	0.75	3.75	90		No FC	
19	0.75	1.69	90	10	10	86
20	0.75	2.19	90	10	10	86
21	0.75	2.47	90	10	10	86
22	0.75	2.76	90	10	10	86
23	0.75	3.48	90	10	10	86
24	0.75	3.82	90	10	10	86
25	0.6	2.32	90		No FC	
26	0.75	2.28	90		No FC	
27	0.75	1.97	90	8.5	10	86
28	0.75	2.27	90	8.5	10	86
29	0.75	2.62	90	8.5	10	86
30	0.75	3.67	90	8.5	10	86
31	0.75	4.89	90	8.5	10	86
32	0.75	6.19	90	8.5	10	86
33	0.6	1.52	120		No FC	
34	0.6	2.12	120		No FC	
35	0.6	2.87	120		No FC	
36	0.6	3.78	120		No FC	
37	0.6	2.14	120		No FC	
38	0.6	1.38	120	10	10	86
39	0.6	2.13	120	10	10	86
40	0.6	2.92	120	10	10	86
41	0.6	4.01	120	10	10	86
42	0.6	4.59	120	10	10	86
43	0.6	1.52	120	8.5	10	86
44	0.6	2.13	120	8.5	10	86
45	0.6	2.89	120	8.5	10	86
46	0.6	3.92	120	8.5	10	86
47	0.6	4.38	120	8.5	10	86
48	0.75	1.98	120		No FC	
49	0.75	2.42	120		No FC	
50	0.75	2.83	120		No FC	
51	0.75	3.69	120		No FC	
52	0.75	4.744	120		No FC	
53	0.75	3.76	120	10	10	86
54	0.75	2.75	120	10	10	86
55	0.75	2	120	8.5	10	86
56	0.75	2.4	120	8.5	10	86
57	0.75	2.71	120	8.5	10	86
58	0.75	3.7	120	8.5	10	86
59	0.75	4.61	120	8.5	10	86

Πίνακας 1-2: Πίνακας κυματικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών αγωγών ανανέωσης.

1.4 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Το υπόλοιπο της διπλωματικής εργασίας χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2-5, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2, που αφορά τη μελέτη των μετασχηματισμών των κυματισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διείσδυση των κυμάτων μέσω των αγωγών ανανέωσης και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη μεταφορά ενέργειας μέσω της ανάπτυξης αρμονικών.

Στο Κεφάλαιο 3, όπου παρουσιάζονται οι συντελεστές διείσδυσης για τα πειραματικά δεδομένα σε τέσσερις θέσεις, καταλήγουμε σε συμπεράσματα σχετικά με την επίδρασή τους από τα κυματικά χαρακτηριστικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού και γίνεται σύγκριση των πειραματικών συντελεστών για κλειστό αγωγό με τους θεωρητικούς συντελεστές περίθλασης.

Στο Κεφάλαιο 4 οι συντελεστές διείσδυσης κυματισμού υπολογίζονται από μία εμπειρική εξίσωση που πρότειναν οι Tsoukala et al. (2010) και συγκρίνονται με τις πειραματικές τιμές.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα τελικά συμπεράσματα και ορισμένες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2 Μετασχηματισμοί των κυματισμών κατά τη διέλευσή τους μέσα από τον αγωγό ανανέωσης

Η διακοπή προέλασης του κυματισμού από μία παράκτια κατασκευή, όπως ένας ύφαλος κυματοθραύστης, διαταράσσει τη ροή. Αυτό έχει σημαντικές συνέπειες στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής. Ένας κυματοθραύστης με αγωγό ανανέωσης μπορεί να θεωρηθεί ως ένας συγκεκριμένος τύπος μιας τέτοιας παράκτιας κατασκευής (Τσουκαλά και άλλοι, 2013).

Οι μετασχηματισμοί των κυματισμών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διέλευση των κυμάτων μέσα στη λιμενολεκάνη μέσω των αγωγών ανανέωσης έχουν επισημανθεί από τους Tsoukala and Moutzouris (2009) και περιλαμβάνουν:

- Μερική ανάκλαση εξαιτίας της απότομης αλλαγής του πυθμένα στο όριο του κυματοθραύστη,
- Παραγωγή αποσβενόμενων ιδιομορφών (evanescent modes) που συνδέονται επίσης με τις απότομες αλλαγές του πυθμένα,
- Πιθανή θραύση των κυματισμών,
- Έντονη παραγωγή αρμονικών ανώτερης τάξης, δηλαδή μέρος της κυματικής ενέργειας μεταφέρεται σε αρμονικές ανώτερης τάξης μέσα στον αγωγό και στη συνέχεια αυτές μεταδίδονται στα βαθύτερα ύδατα κατάντη του αγωγού ως ελεύθεροι κυματισμοί όπου, ακολούθως και μακριά από τον αγωγό, αποσβένονται.

Επίσης, όπως επισημαίνεται από οπτικές παρατηρήσεις κατά τις πειραματικές διαδικασίες, η διέλευση των κυμάτων μέσα από τους αγωγούς ανανέωσης εμφανίζει στοιχεία τυρβώδους ροής με ελεύθερη επιφάνεια κυρίως λόγω της στένωσης από πλευρικά όρια στην είσοδο των αγωγών.

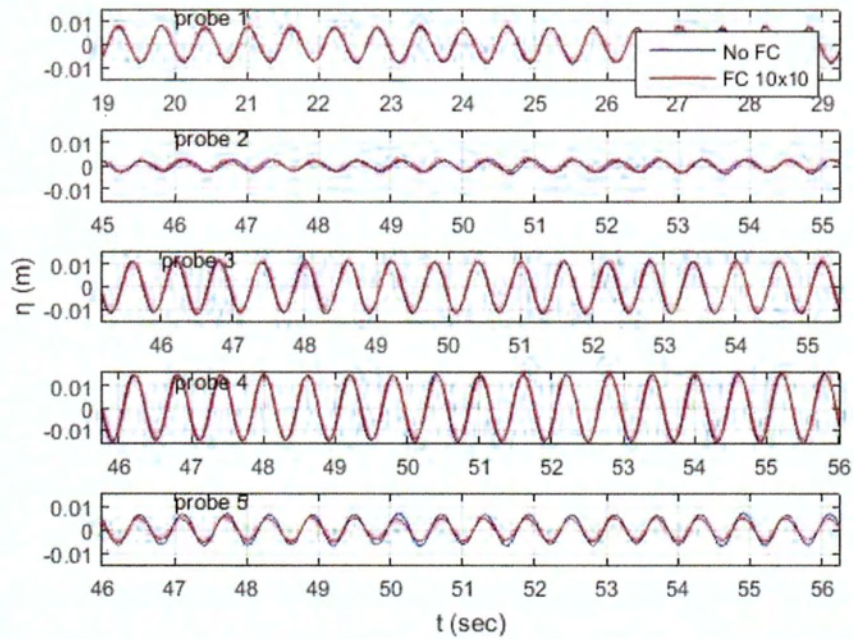
Για να γίνουν κατανοητοί οι μετασχηματισμοί των κυματισμών και το φαινόμενο της ανάπτυξης αρμονικών, έγινε επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων μέσω φασματικής ανάλυσης. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω του Ταχέως Μετασχηματισμού Fourier στο πλαίσιο του λογισμικού MATLAB. Ο Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) είναι ένα σημαντικό και χρήσιμο εργαλείο για την ανάλυση σημάτων, καθώς μας βοηθά να εντοπίσουμε την παρουσία αρμονικών και να προσδιορίσουμε τα ποσοτικά τους χαρακτηριστικά (E. Oran Brigham, 1988 και K.R.Rao, D.N.Kim, J.J.Hwang, 2010)

Το υπόλοιπο του κεφαλαίου οργανώνεται ως εξής. Στο Υποκεφάλαιο 2.1 παρουσιάζονται για όλες τις περιπτώσεις, όπως εμφανίζονται στα Σχήματα 2.1-2.66, οι χρονοσειρές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για κλειστό (NO FC) και ανοιχτό (FC) αγωγό και τα αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων στην προσήνεμη και στην υπήνεμη πλευρά του αγωγού ανανέωσης. Στο Υποκεφάλαιο 2.2 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των χρονοσειρών και των αντίστοιχων φασμάτων.

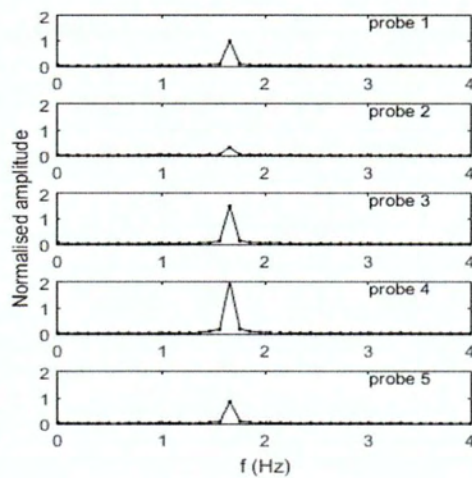
2.1 Διαγράμματα χρονοσειρών ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας και αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων

Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται για όλες τις περιπτώσεις κυματισμών που έχουν εξεταστεί, οι χρονοσειρές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και τα αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων για τους μετρητές 1,2,3,4,5 και 6,8,9,11,10.

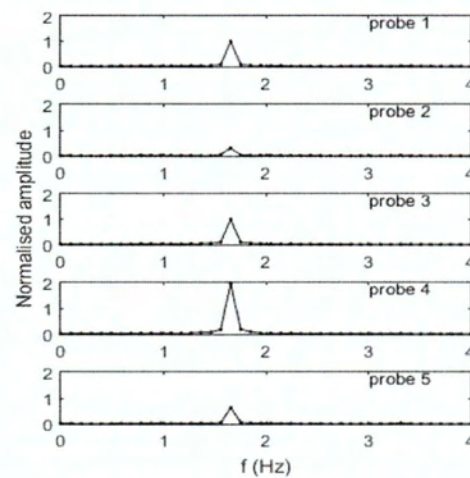
Επισημαίνεται πως για όλες τις περιπτώσεις, στα διαγράμματα φασμάτων τα πλάτη έχουν κανονικοποιηθεί ως προς αυτό του μετρητή 1 (normalised amplitudes).



(α)

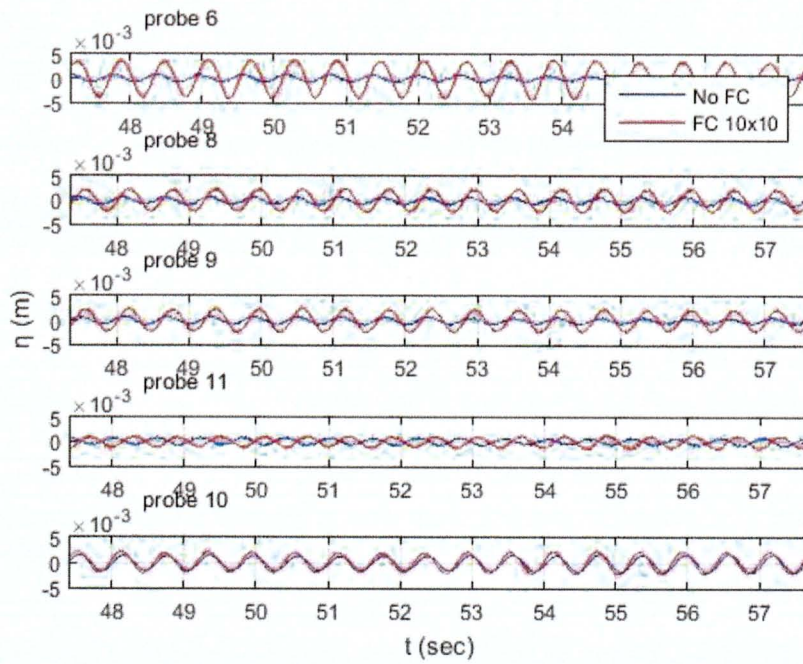


(β)

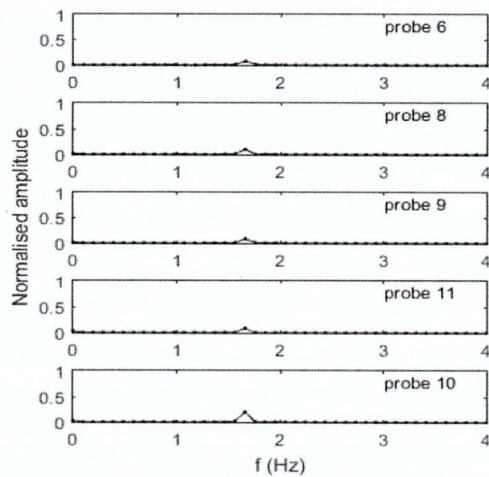


(γ)

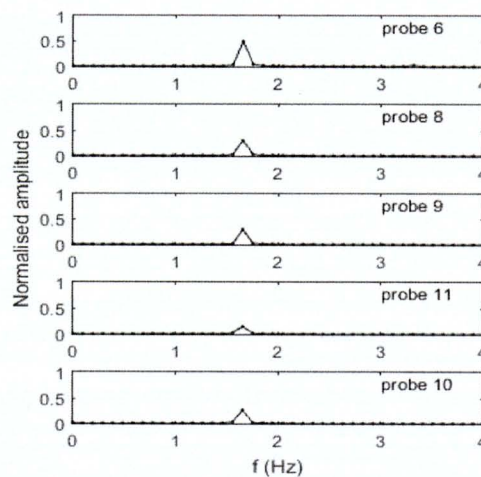
Σχήμα 2-1: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 5 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

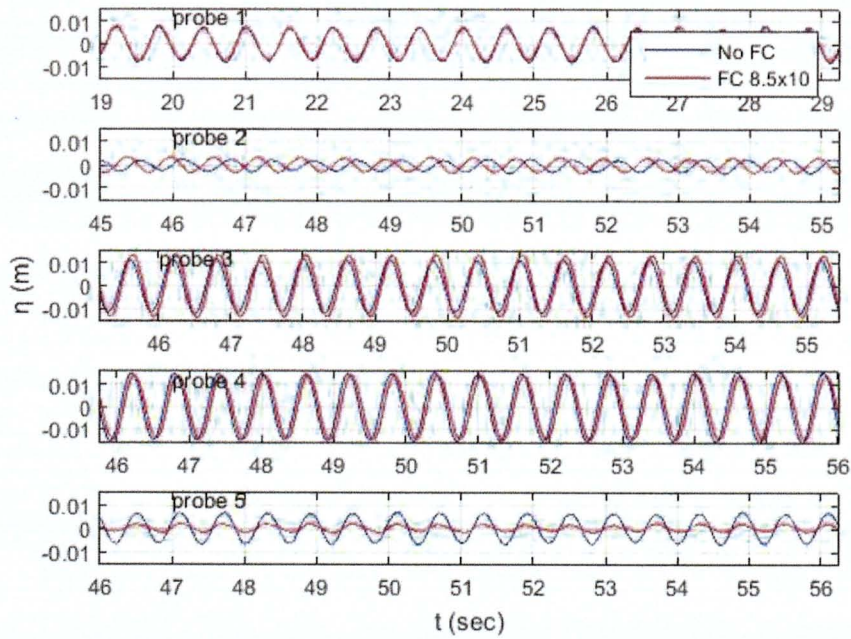


(β)

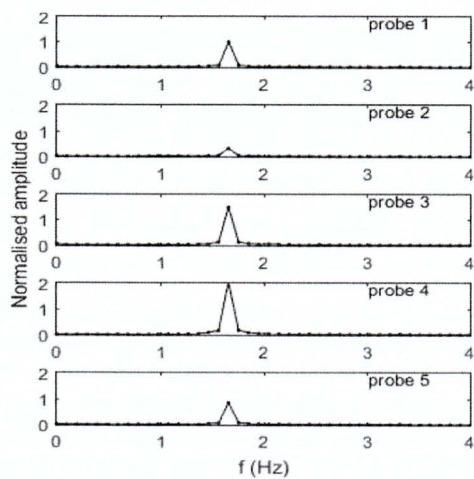


(γ)

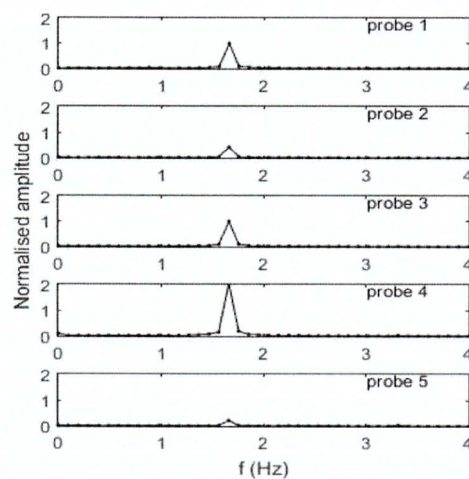
Σχήμα 2-2: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 5 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

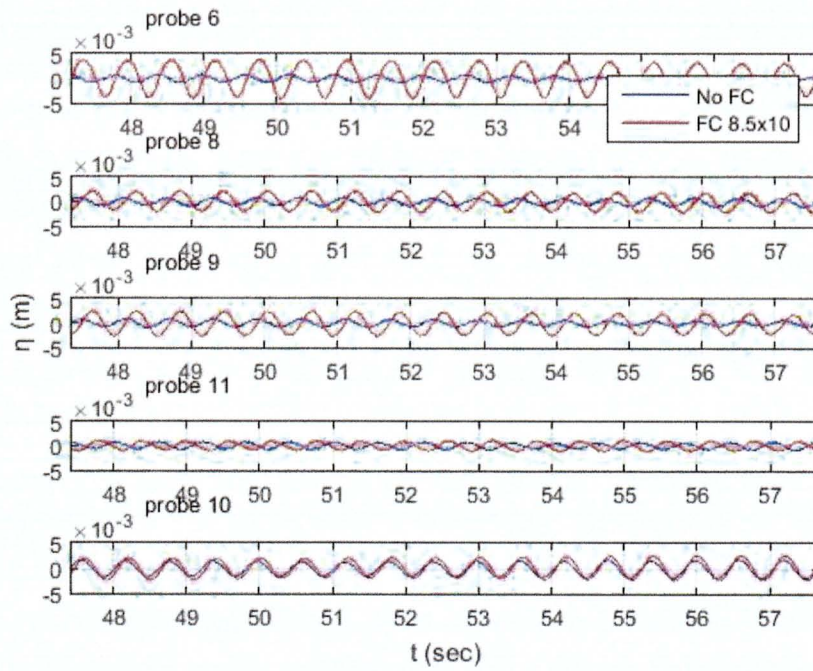


(β)

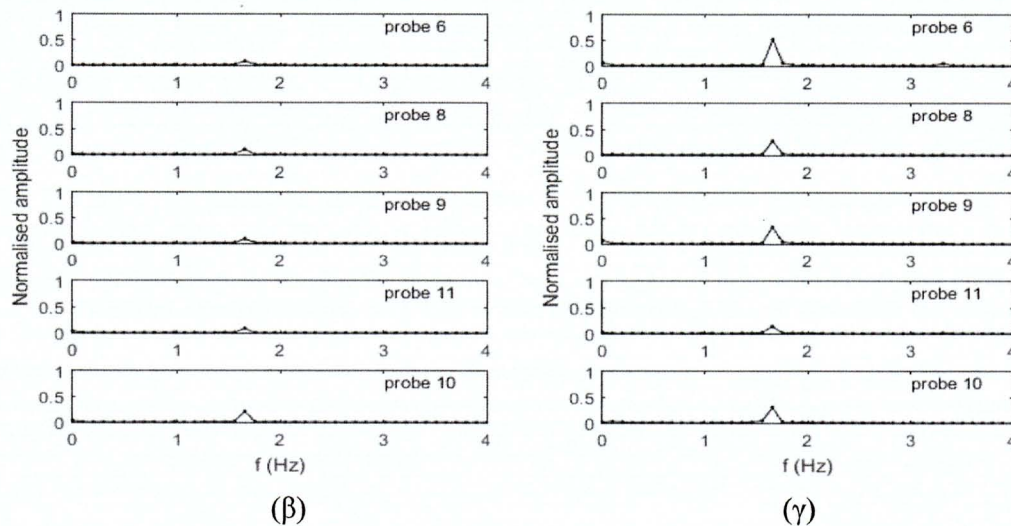


(γ)

Σχήμα 2-3: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 9 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



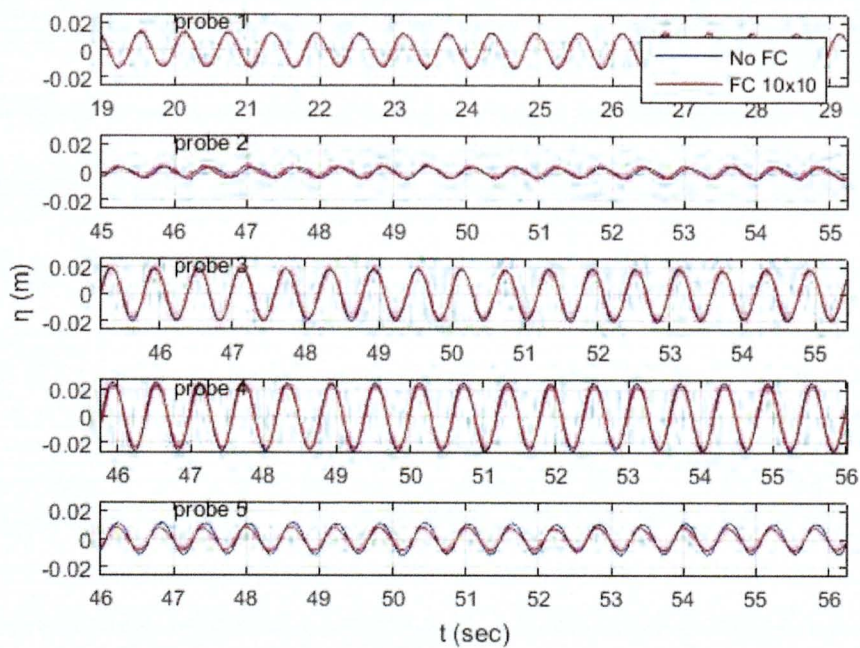
(α)



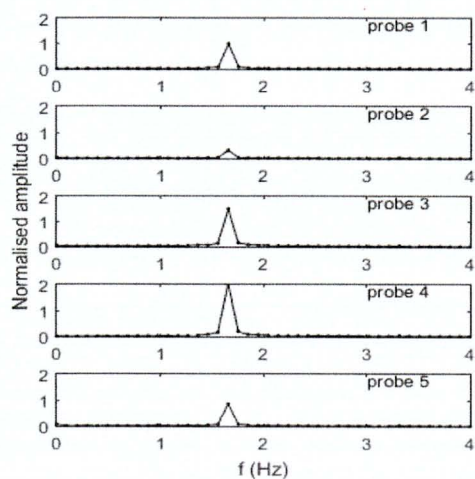
(β)

(γ)

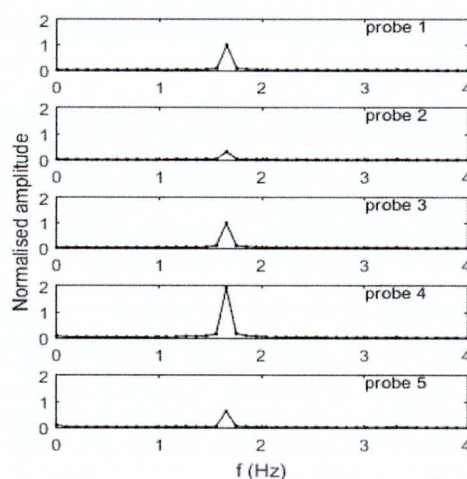
Σχήμα 2-4: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 1 για $bf=0$, $hf=0$ και 9 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

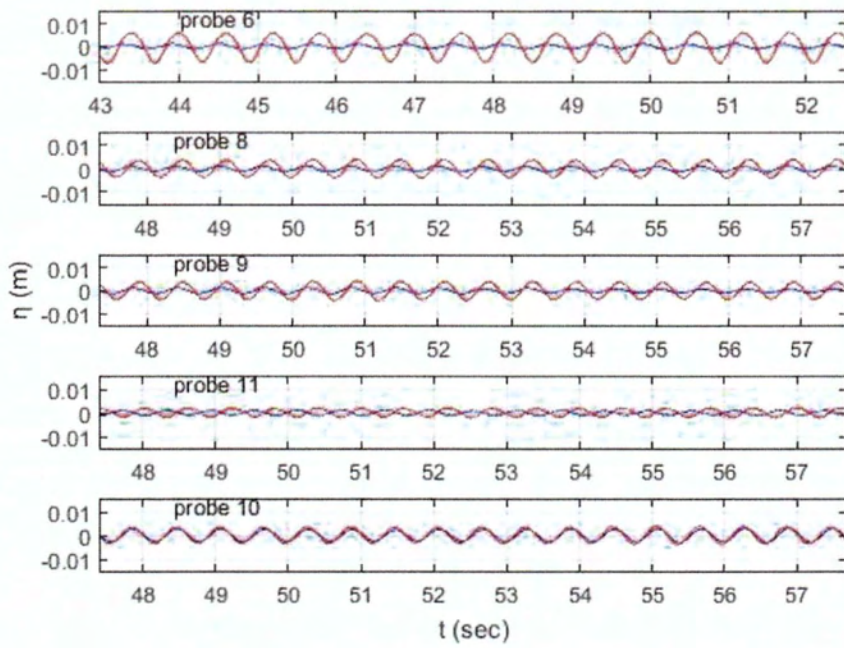


(β)

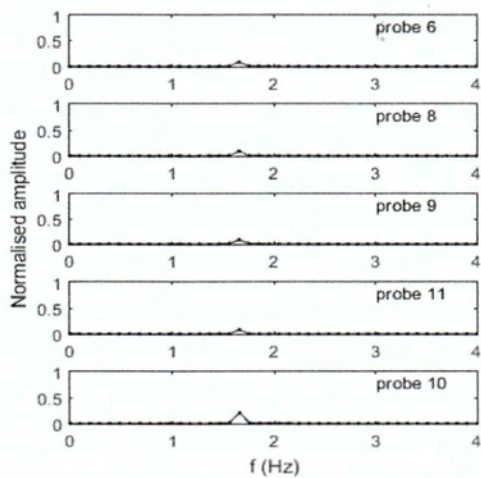


(γ)

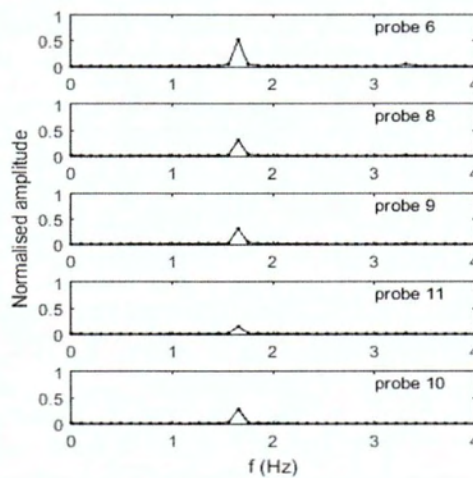
Σχήμα 2-5: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 3 για $bf=0$, $hf=0$ και 7 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

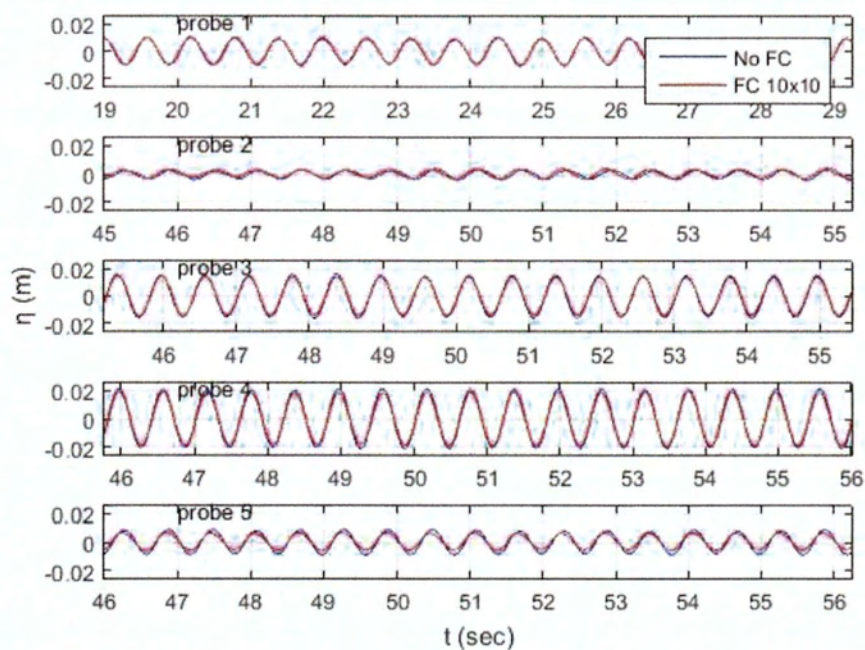


(β)

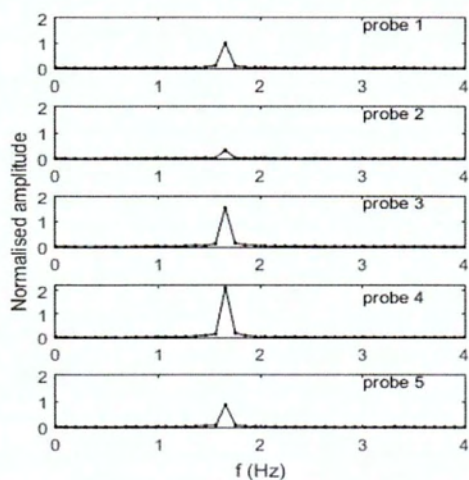


(γ)

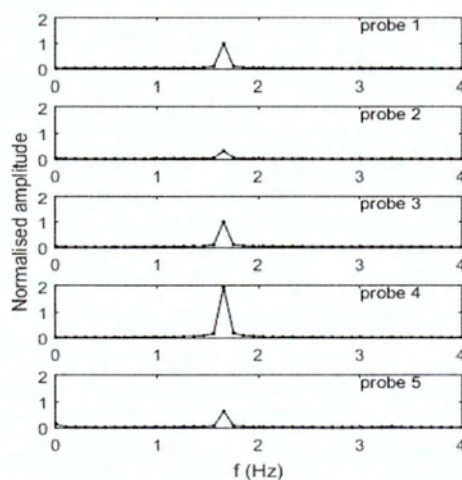
Σχήμα 2-6: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 3 για $bf=0$, $hf=0$ και 7 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

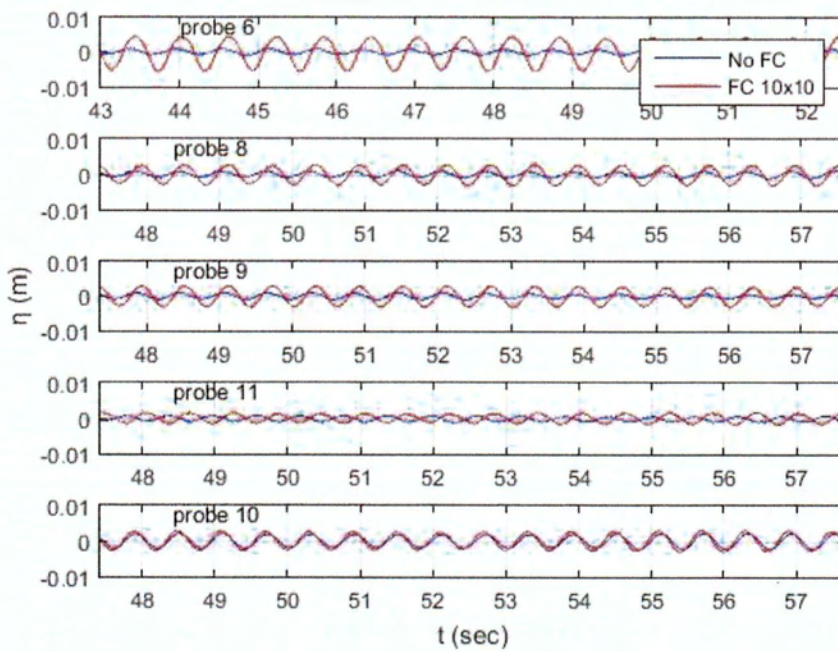


(β)

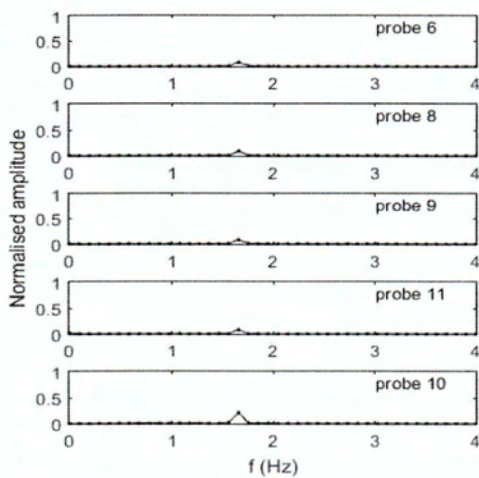


(γ)

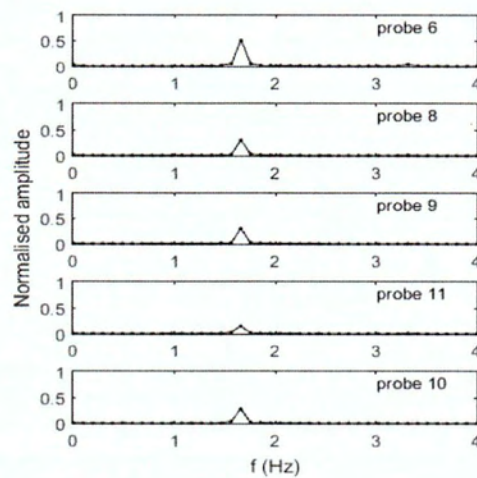
Σχήμα 2-7: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 6 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων



(α)

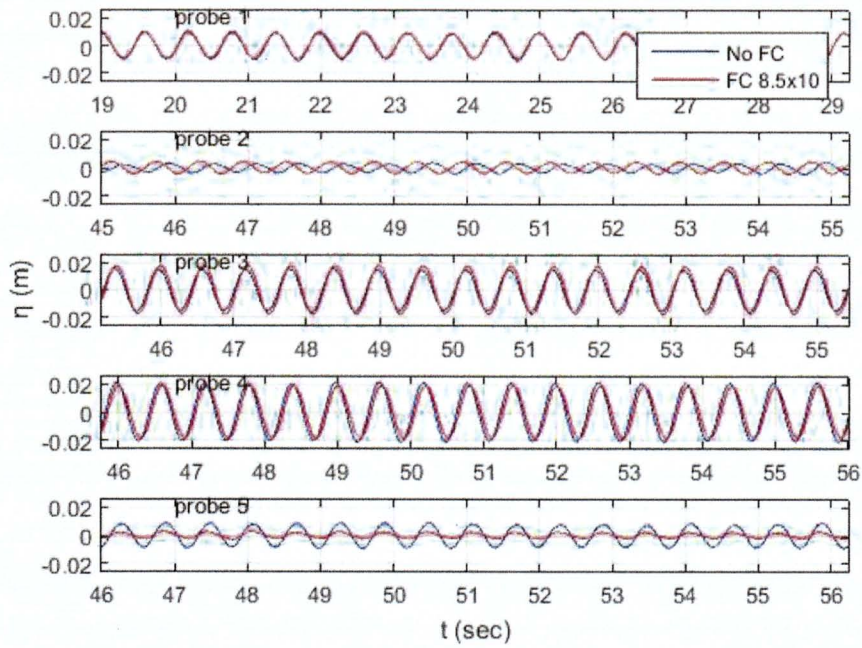


(β)

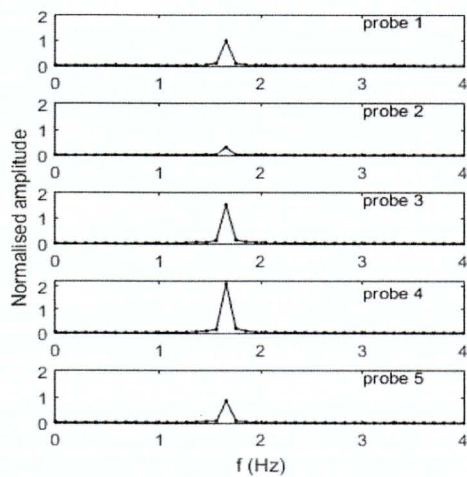


(γ)

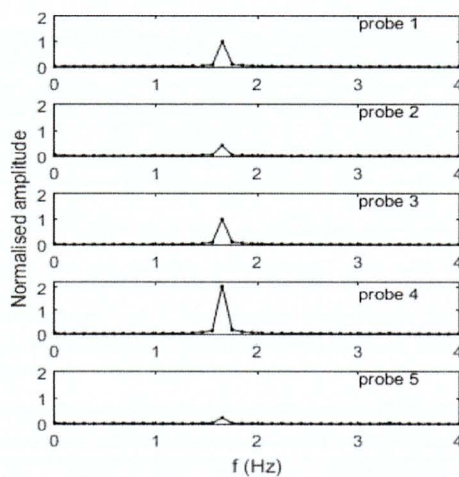
Σχήμα 2-8: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 6 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

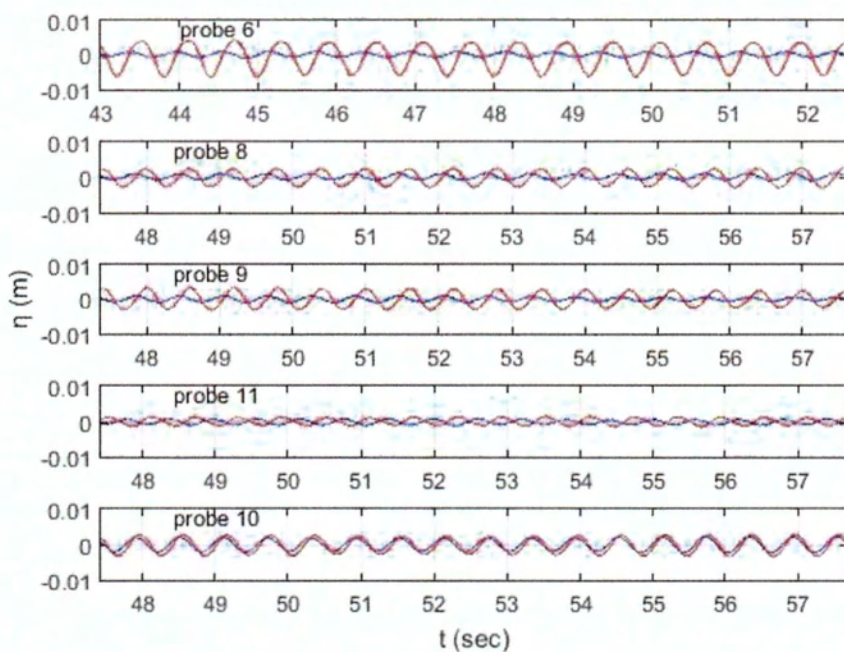


(β)

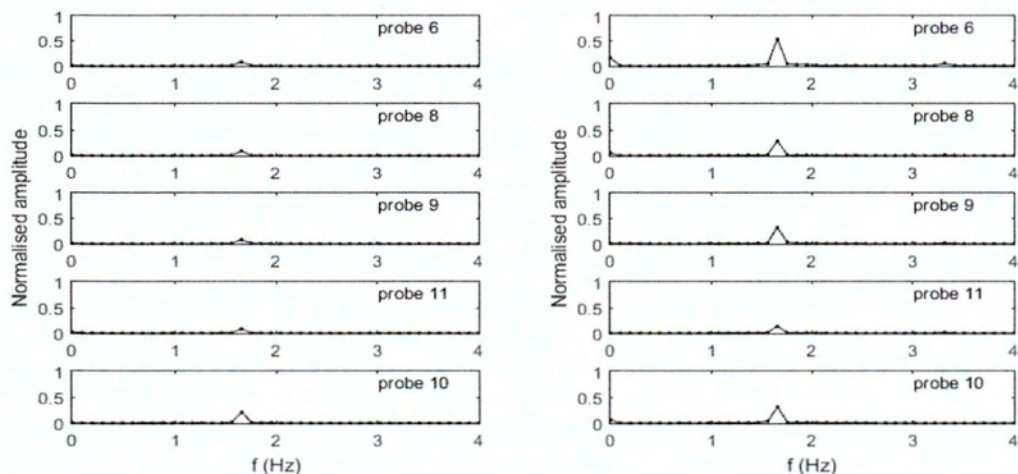


(γ)

Σχήμα 2-9: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 10 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



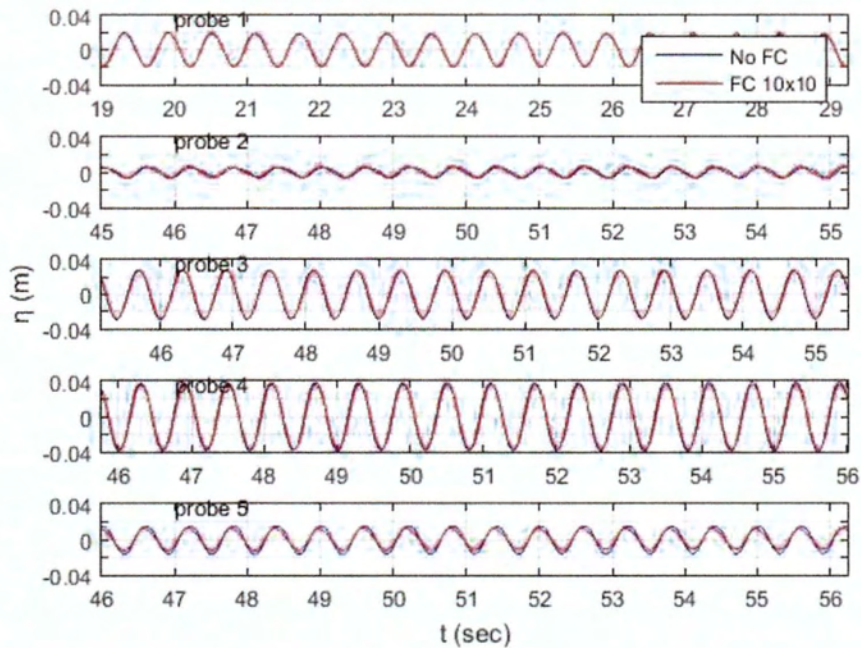
(α)



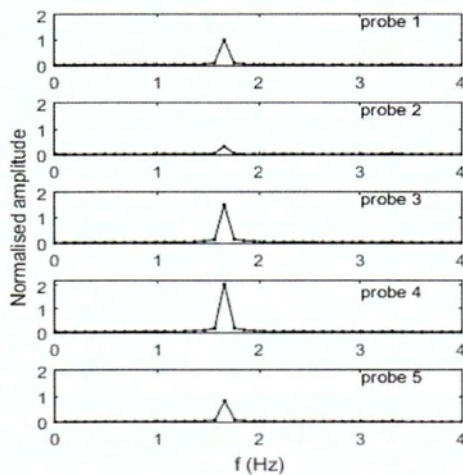
(β)

(γ)

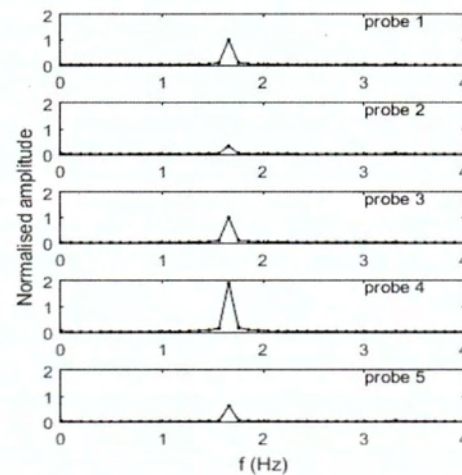
Σχήμα 2-10: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 2 για $bf=0$, $hf=0$ και 10 για $bf=8.5\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

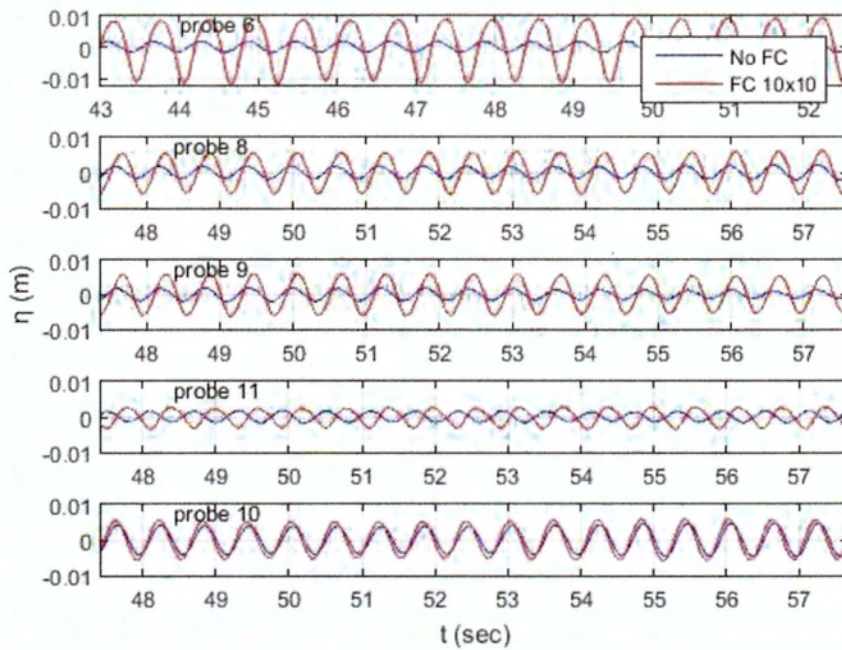


(β)

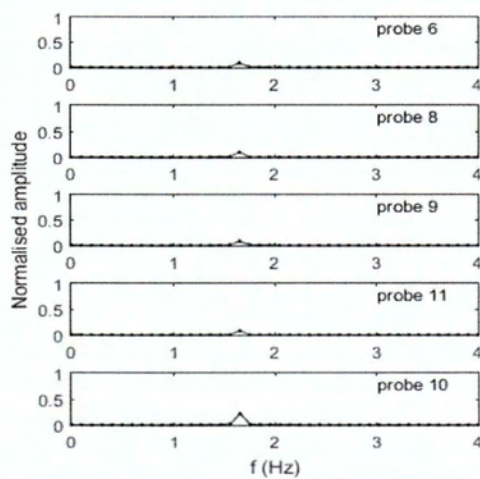


(γ)

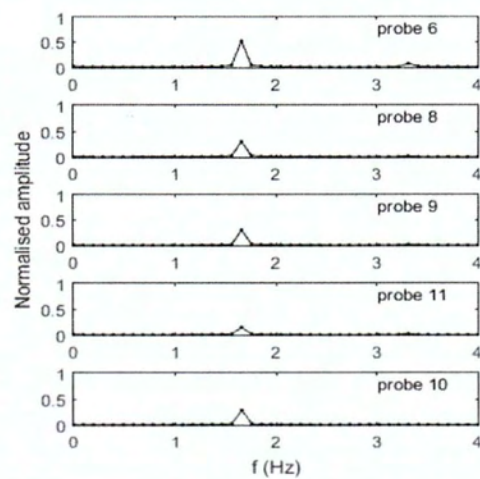
Σχήμα 2-11: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 8 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

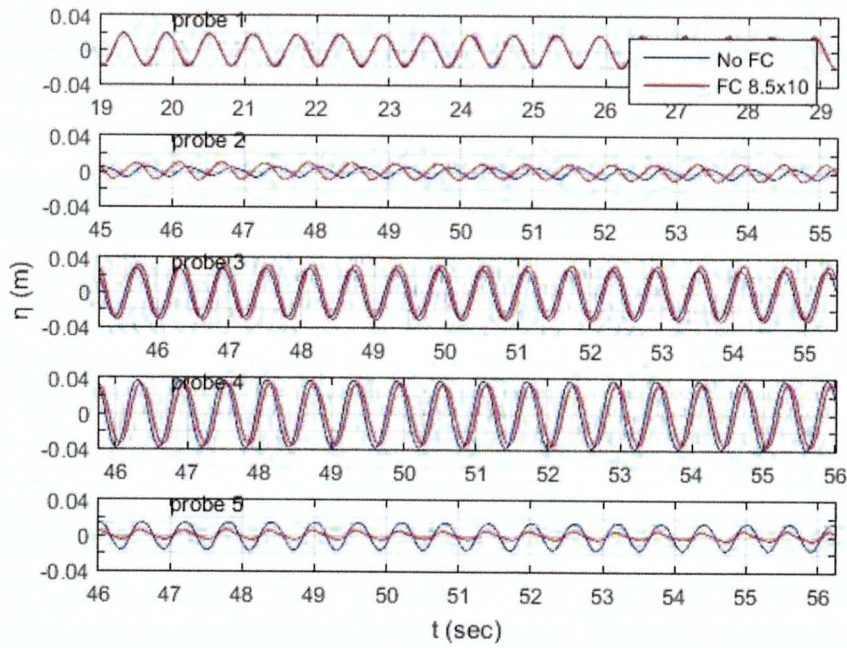


(β)

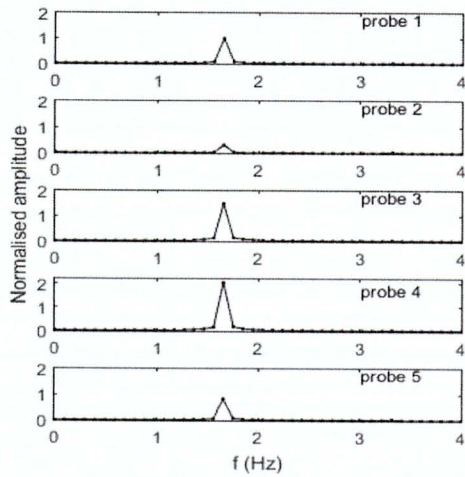


(γ)

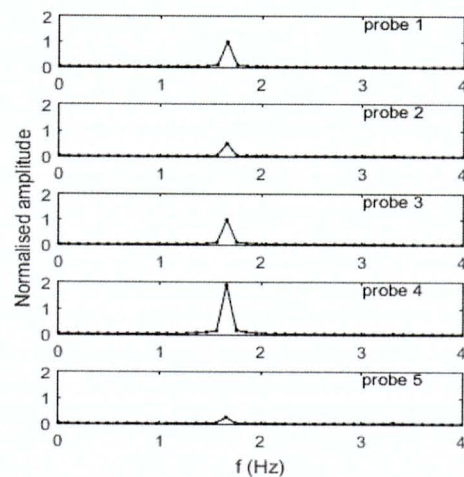
Σχήμα 2-12: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 8 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

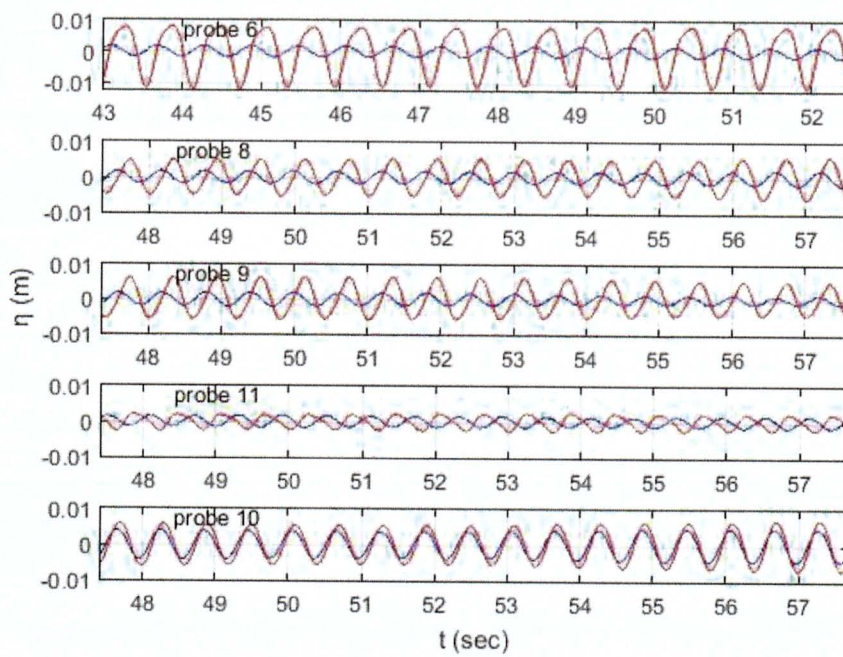


(β)

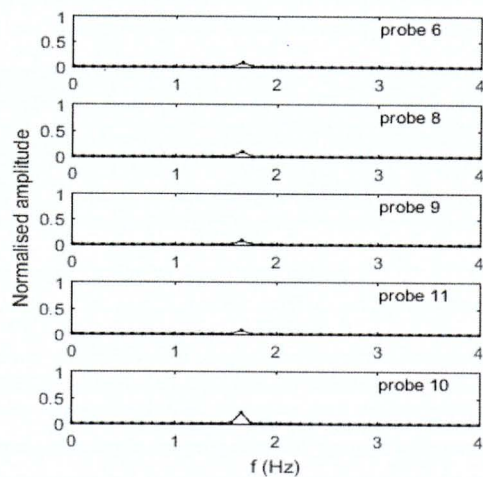


(γ)

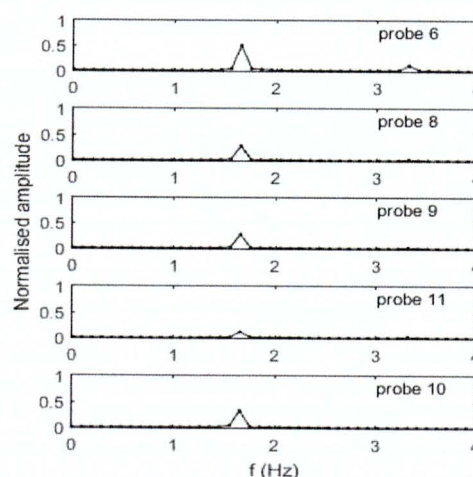
Σχήμα 2-13: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

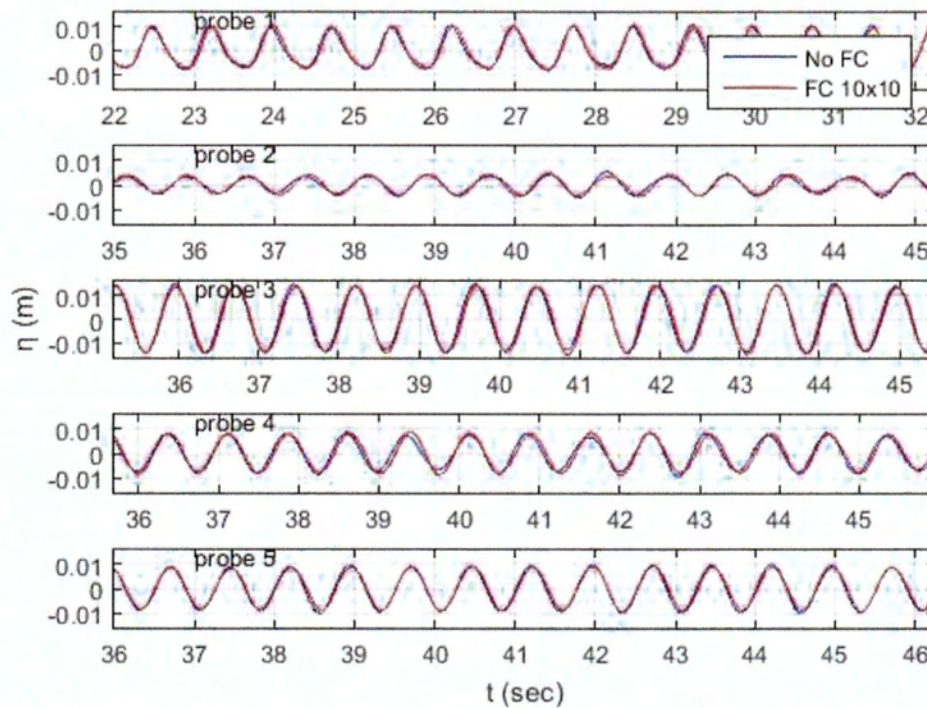


(β)

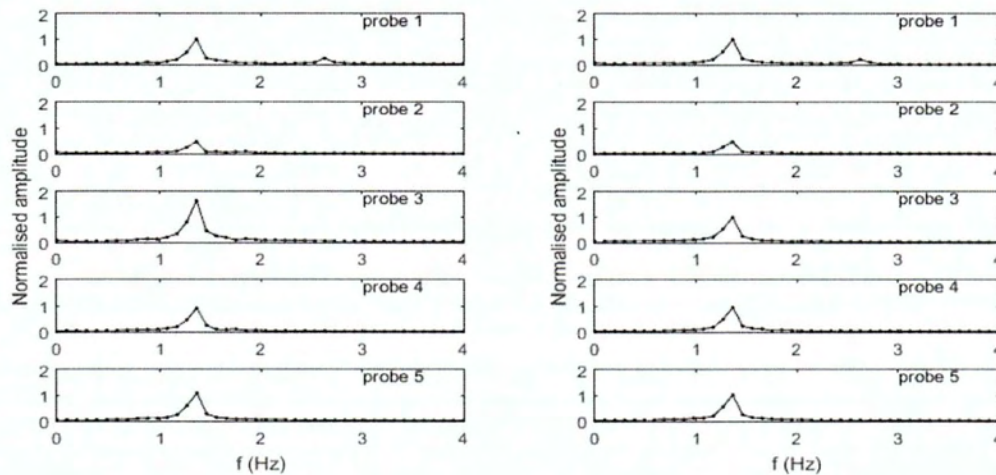


(γ)

Σχήμα 2-14: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 4 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



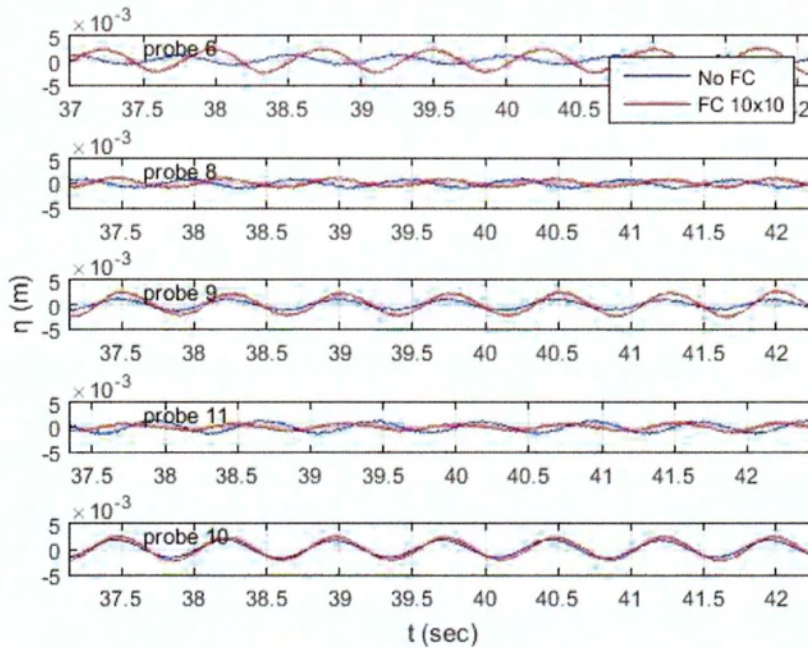
(α)



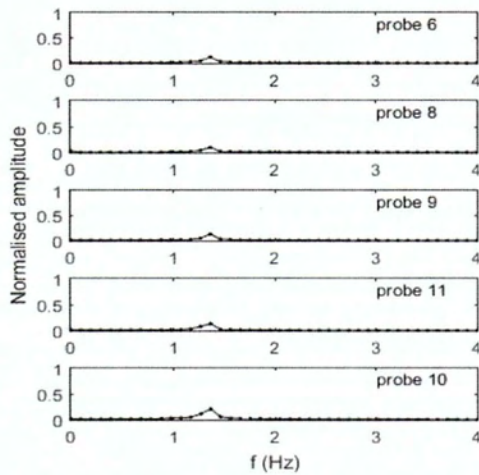
(β)

(γ)

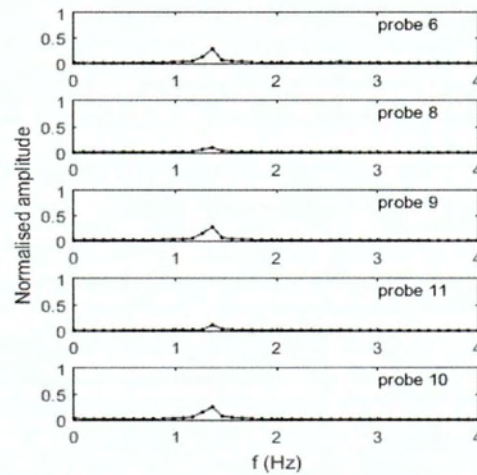
Σχήμα 2-15: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 13 για $bf=0$, $hf=0$ και 19 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

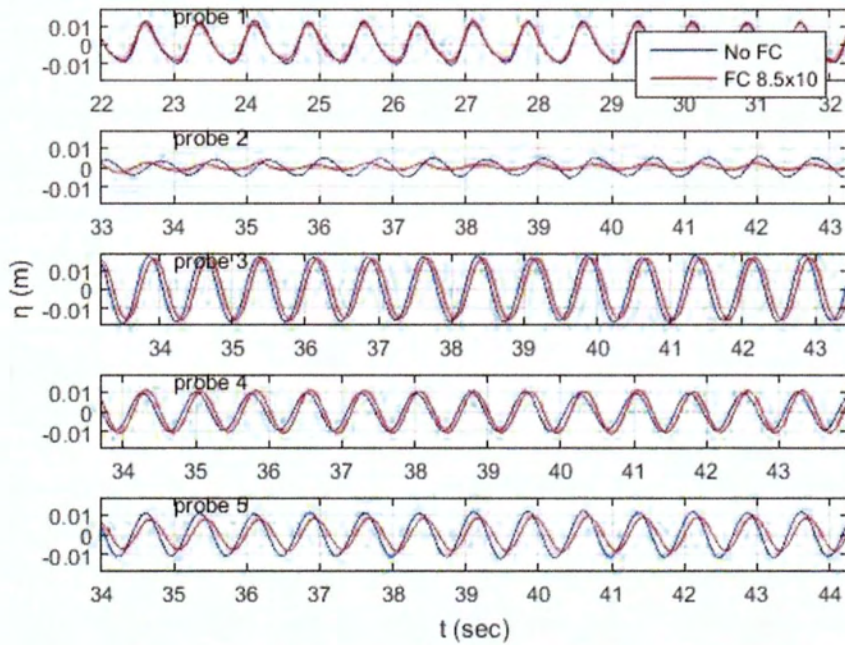


(β)

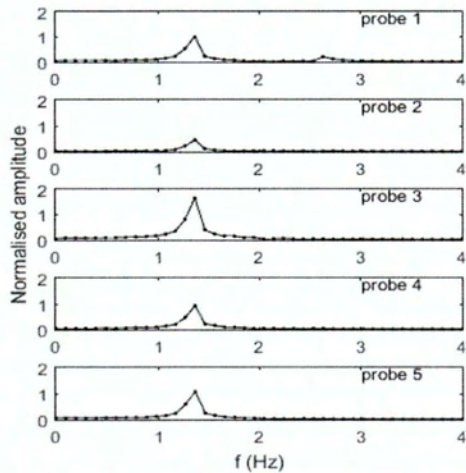


(γ)

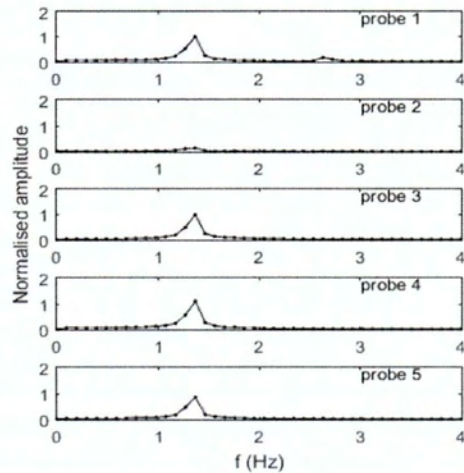
Σχήμα 2-16: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 13 για $bf=0$, $hf=0$ και 19 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

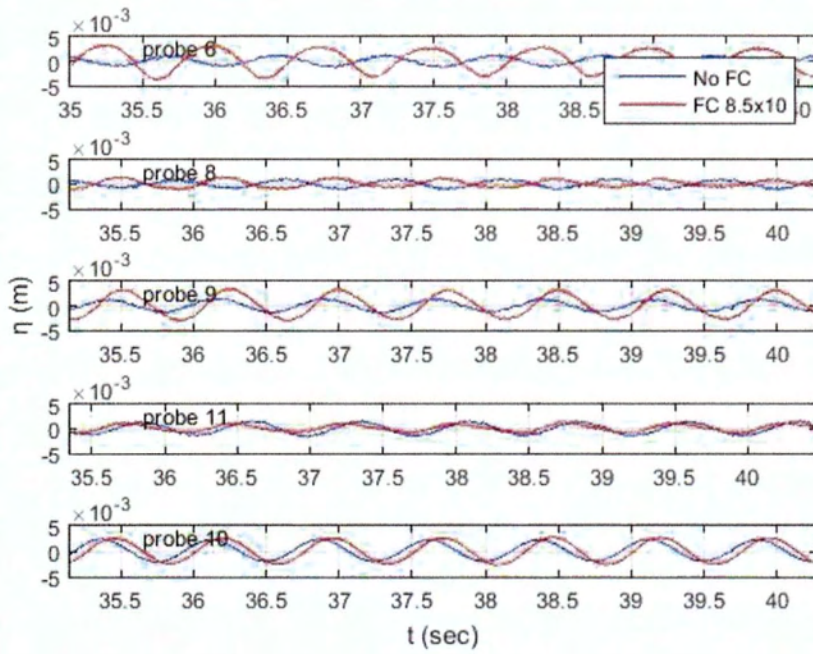


(β)

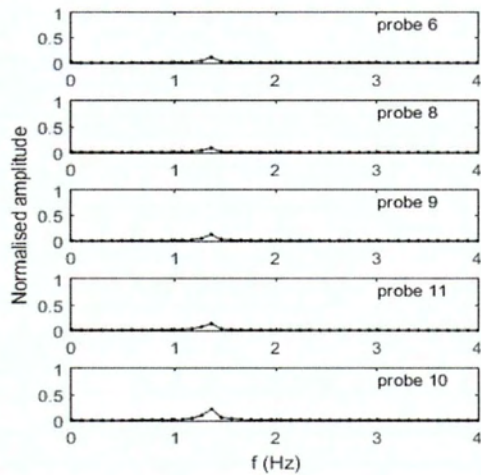


(γ)

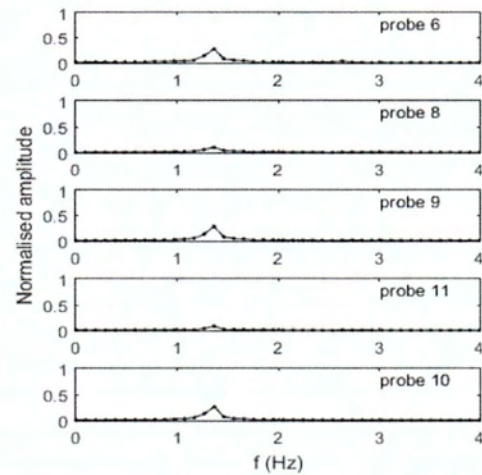
Σχήμα 2-17: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 14 για $bf=0$, $hf=0$ και 27 για $bf=8.5\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

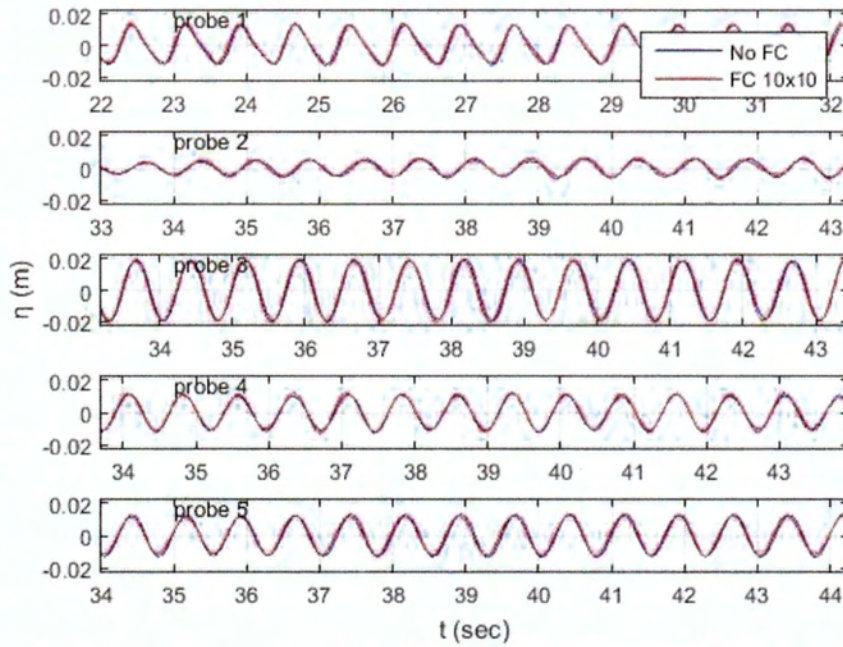


(β)

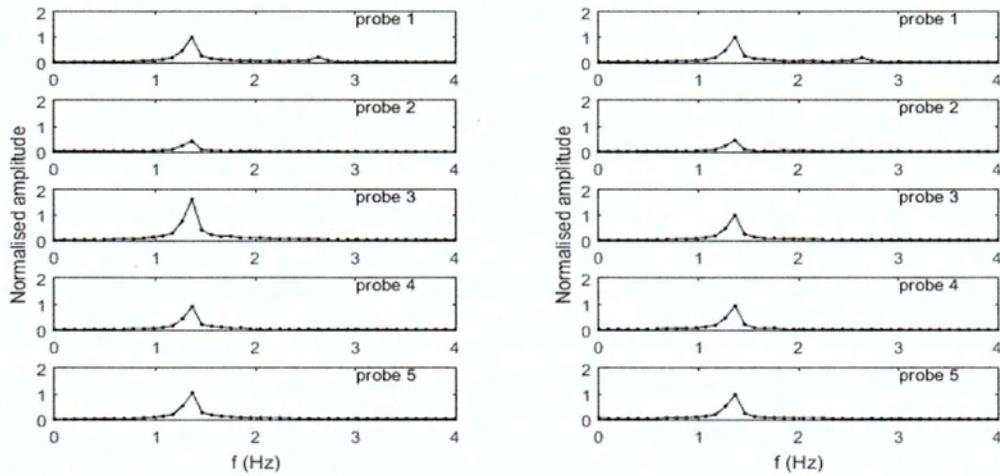


(γ)

Σχήμα 2-18: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 14 για $bf=0$, $hf=0$ και 27 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



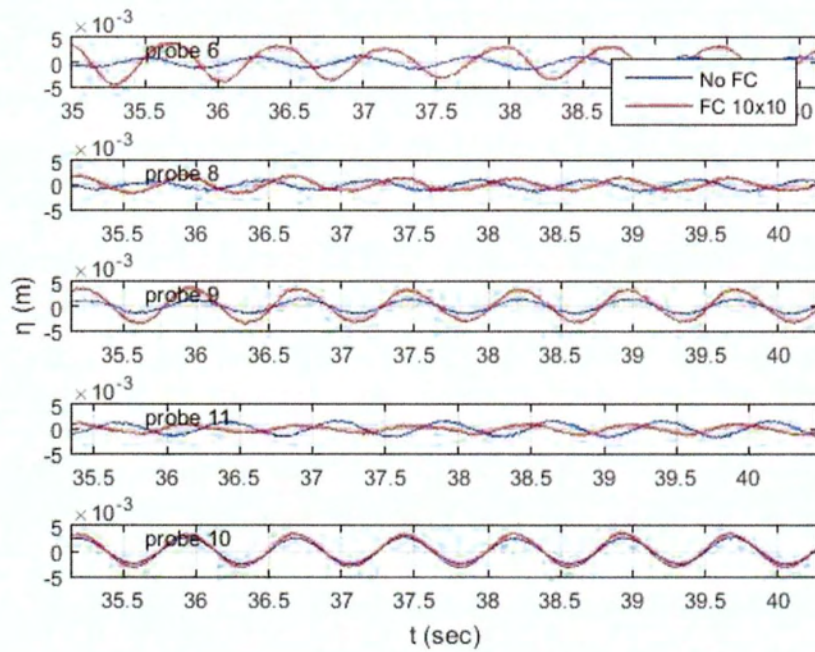
(α)



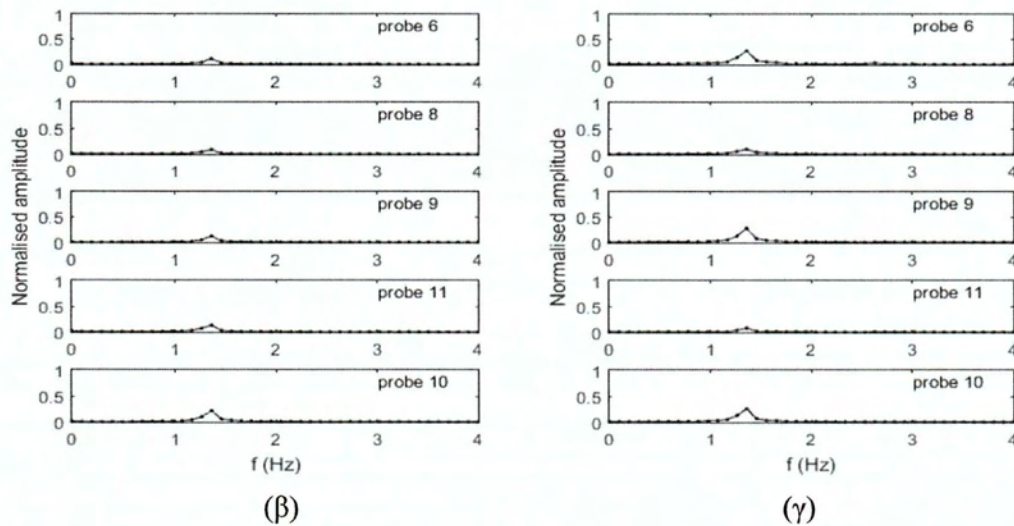
(β)

(γ)

Σχήμα 2-19: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 15 για $bf=0$, $hf=0$ και 21 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



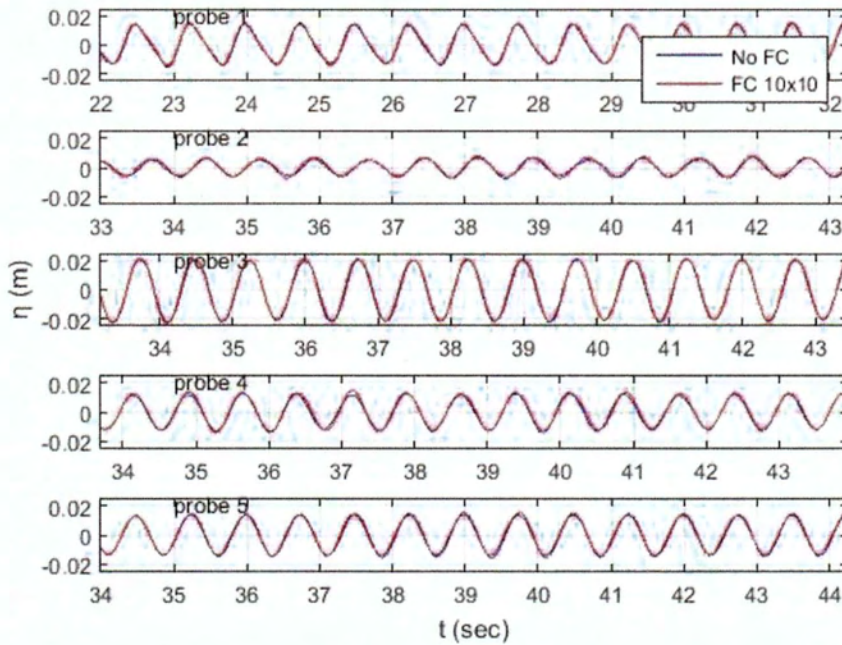
(α)



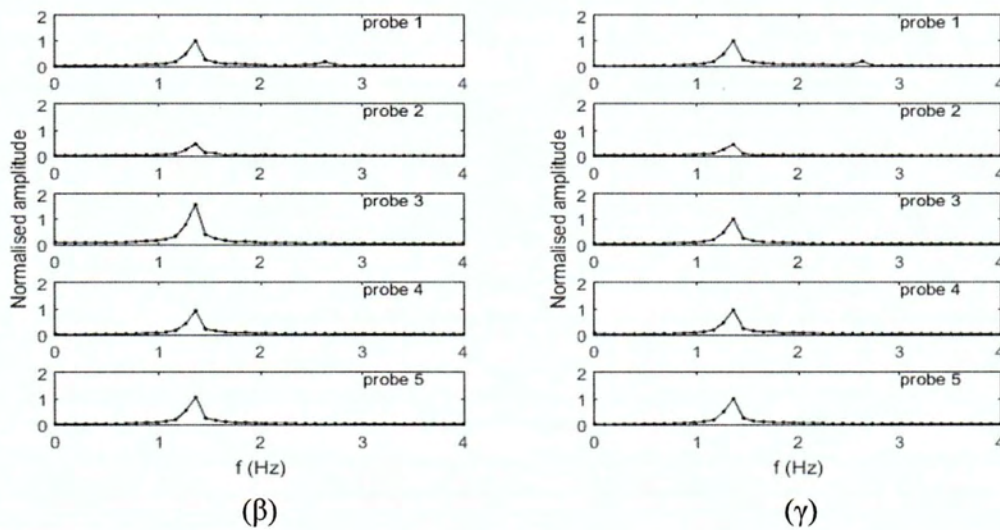
(β)

(γ)

Σχήμα 2-20: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 15 για $bf=0$, $hf=0$ και 21 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



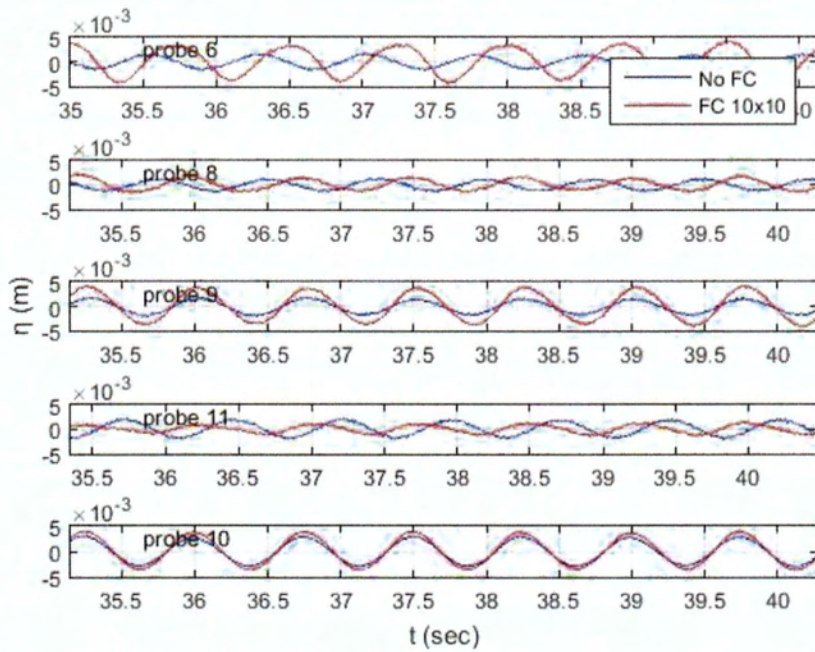
(α)



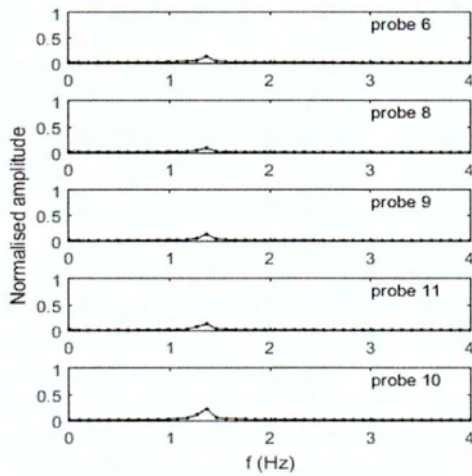
(β)

(γ)

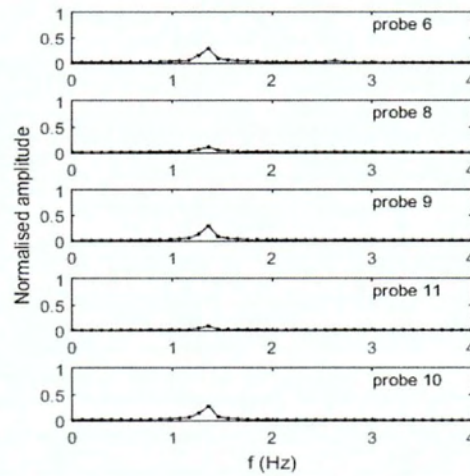
Σχήμα 2-21: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 22 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

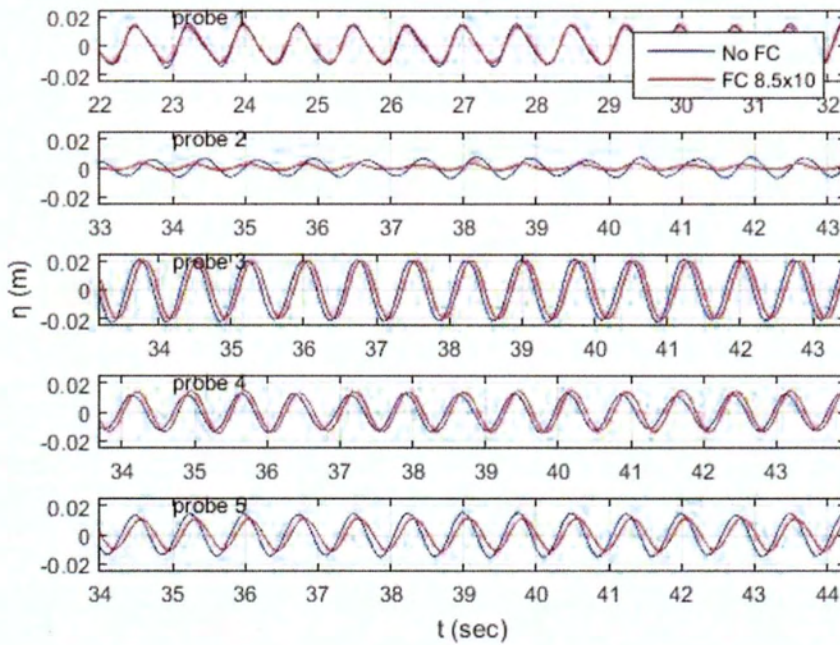


(β)

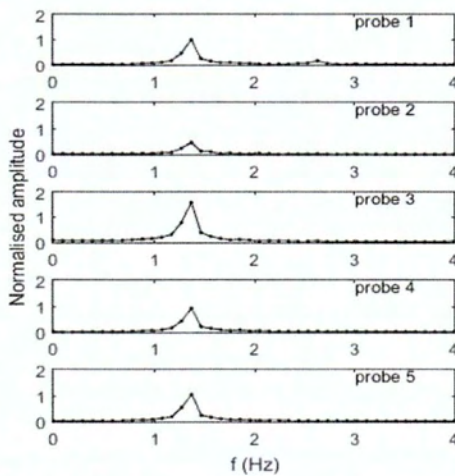


(γ)

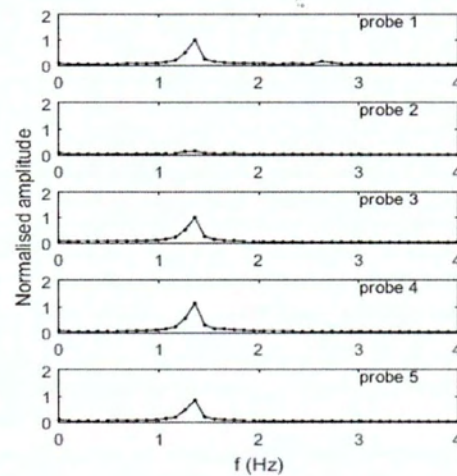
Σχήμα 2-22: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 22 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

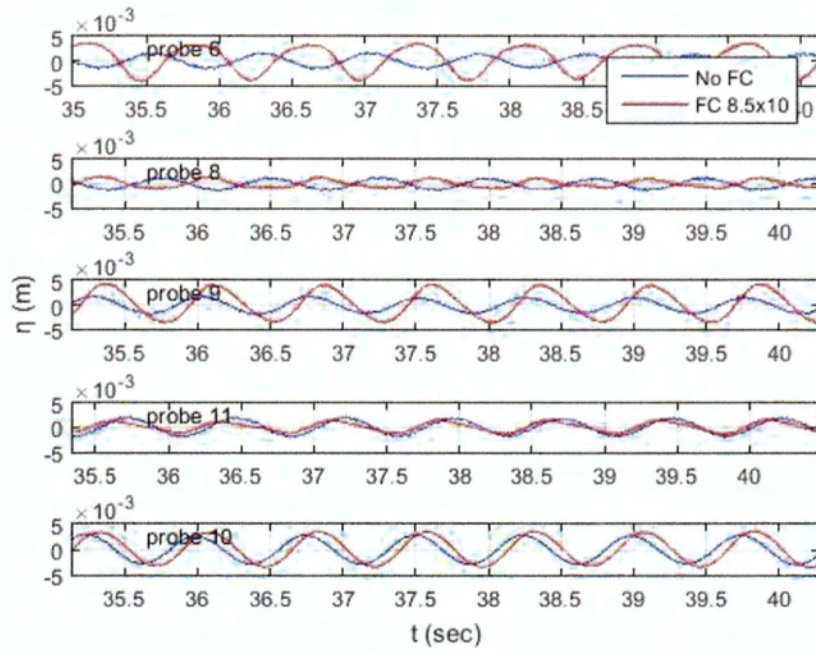


(β)

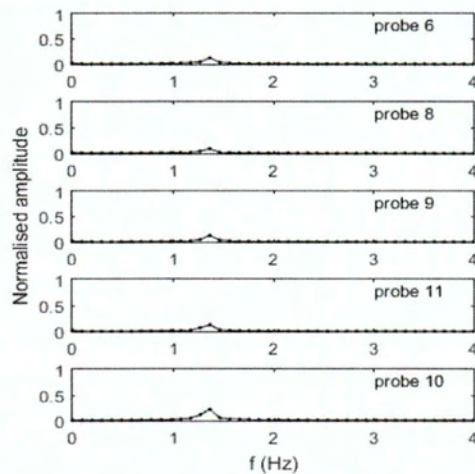


(γ)

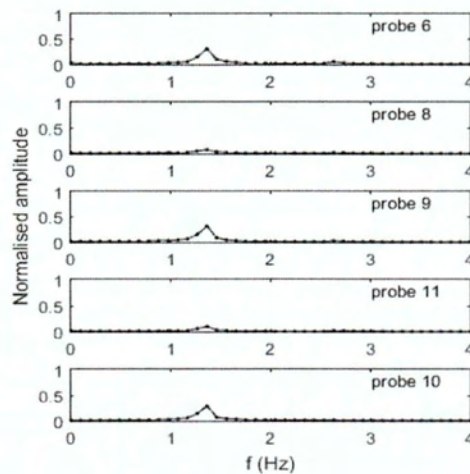
Σχήμα 2-23: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 29 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

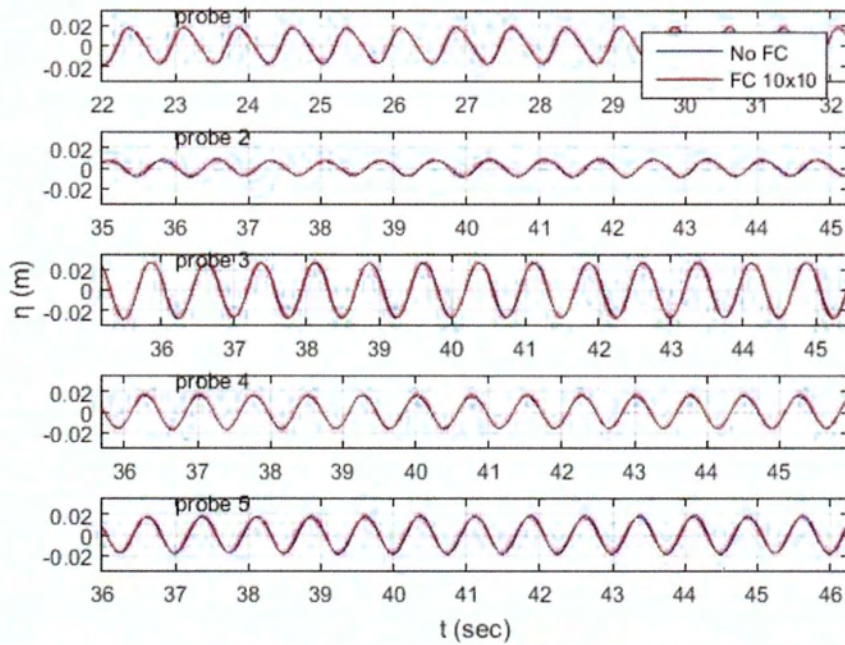


(β)

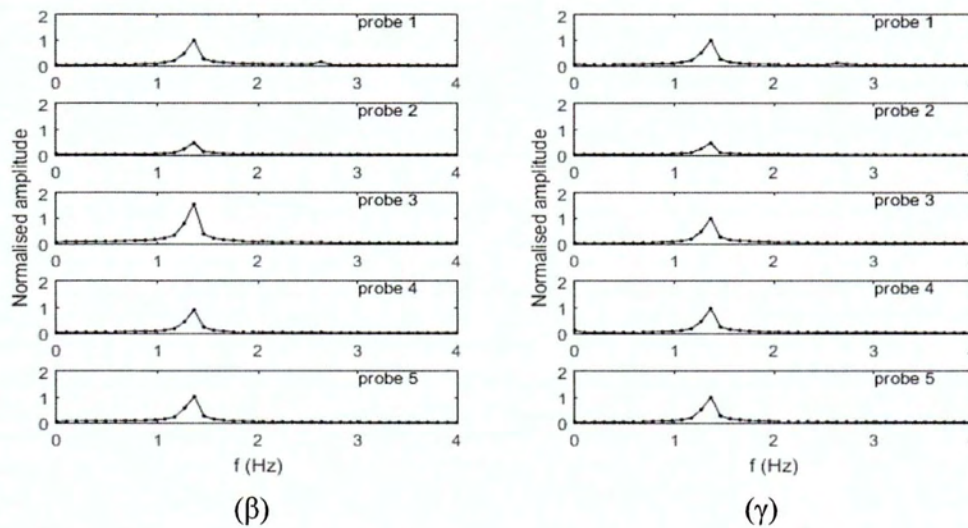


(γ)

Σχήμα 2-24: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 16 για $bf=0$, $hf=0$ και 29 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



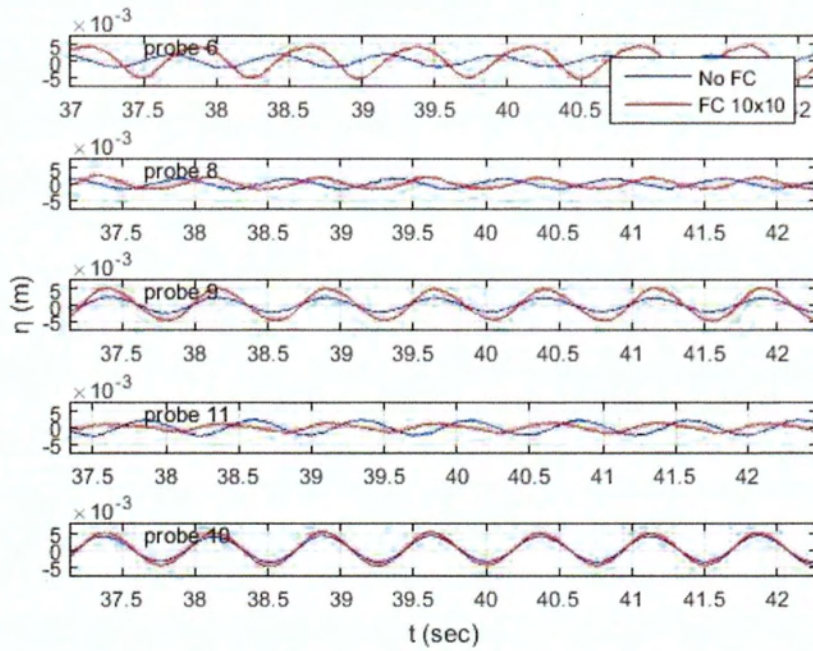
(α)



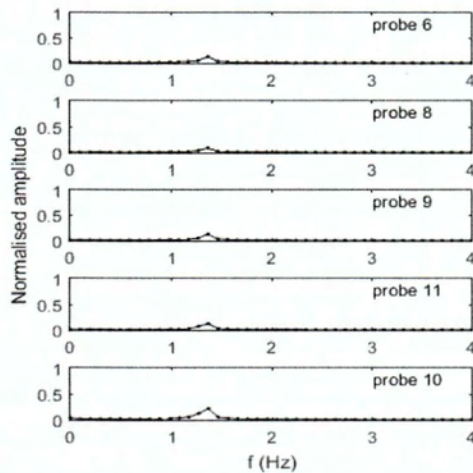
(β)

(γ)

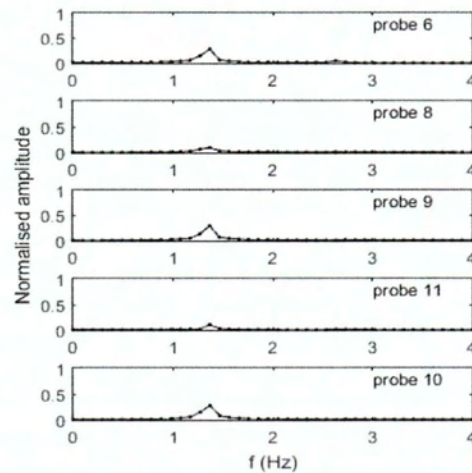
Σχήμα 2-25: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 23 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

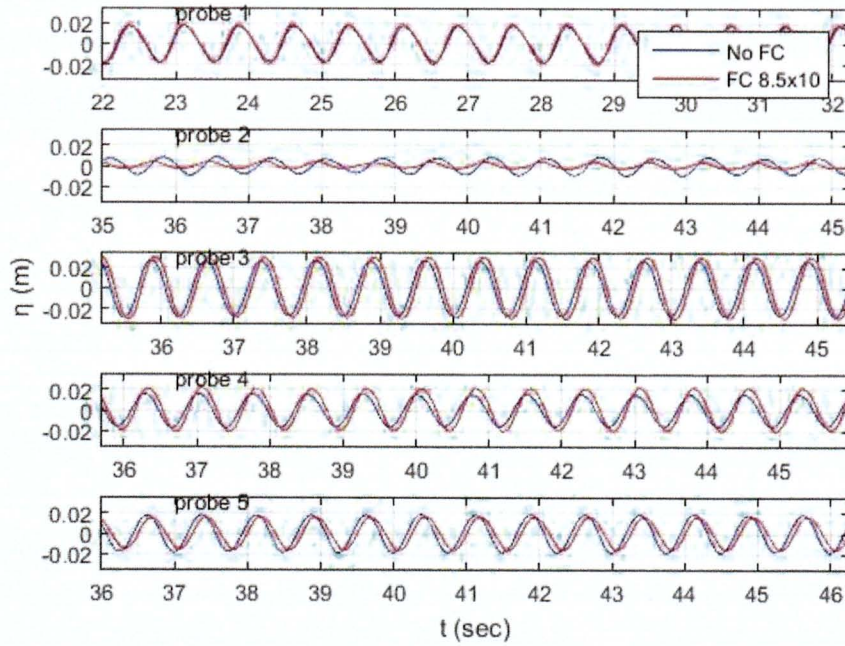


(β)

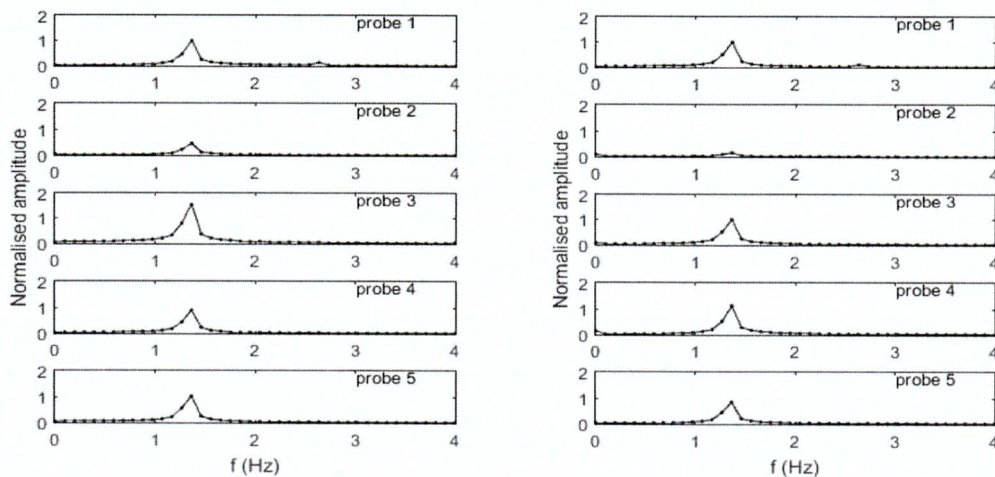


(γ)

Σχήμα 2-26: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 23 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



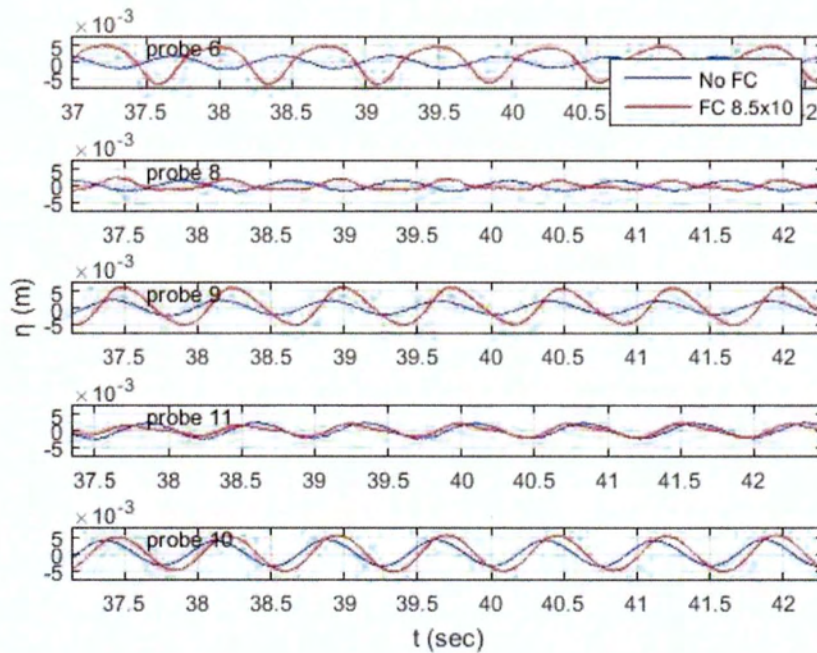
(α)



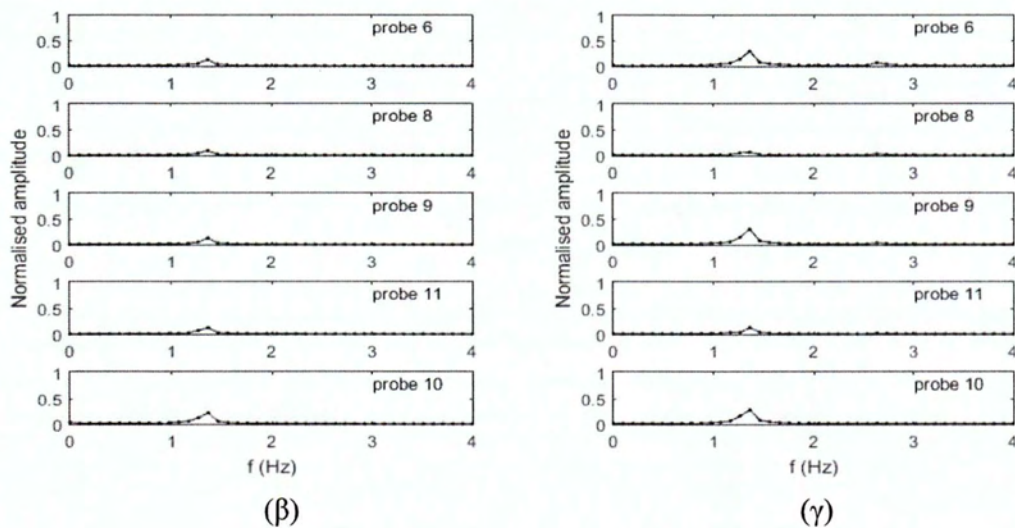
(β)

(γ)

Σχήμα 2-27: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 30 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



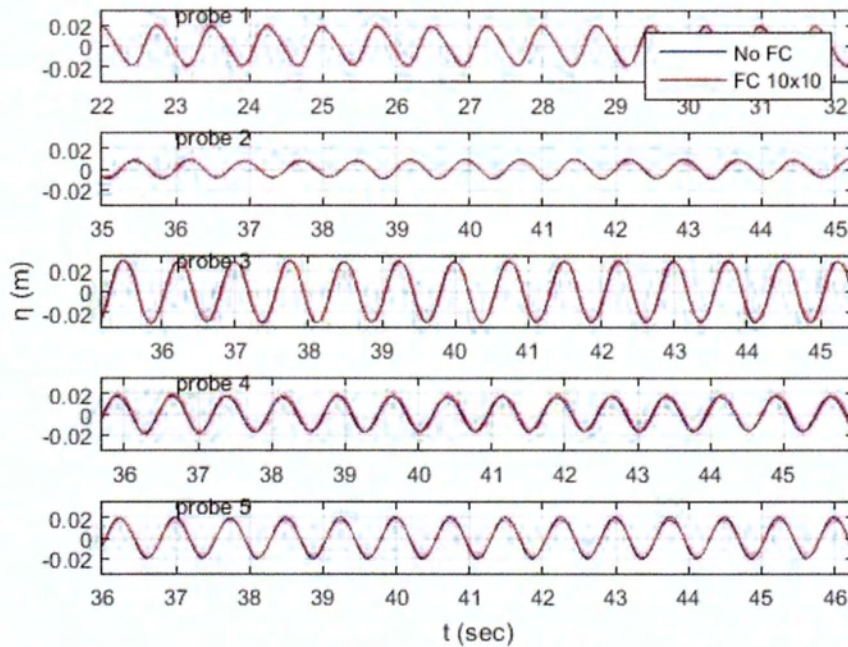
(α)



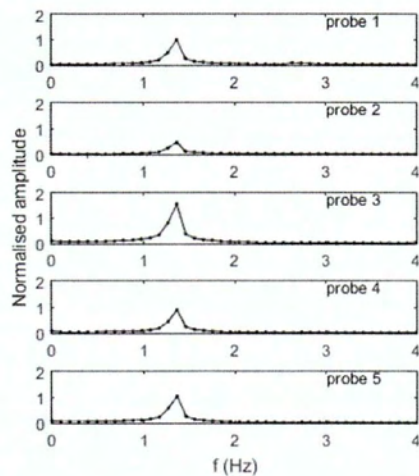
(β)

(γ)

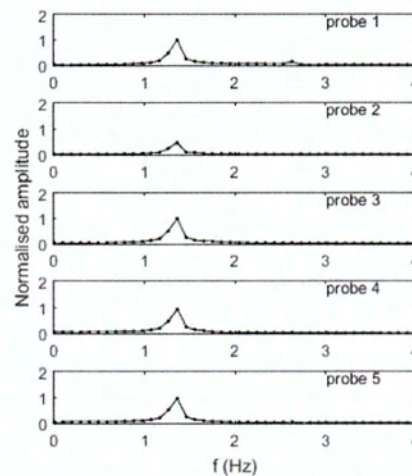
Σχήμα 2-28: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 17 για $bf=0$, $hf=0$ και 30 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

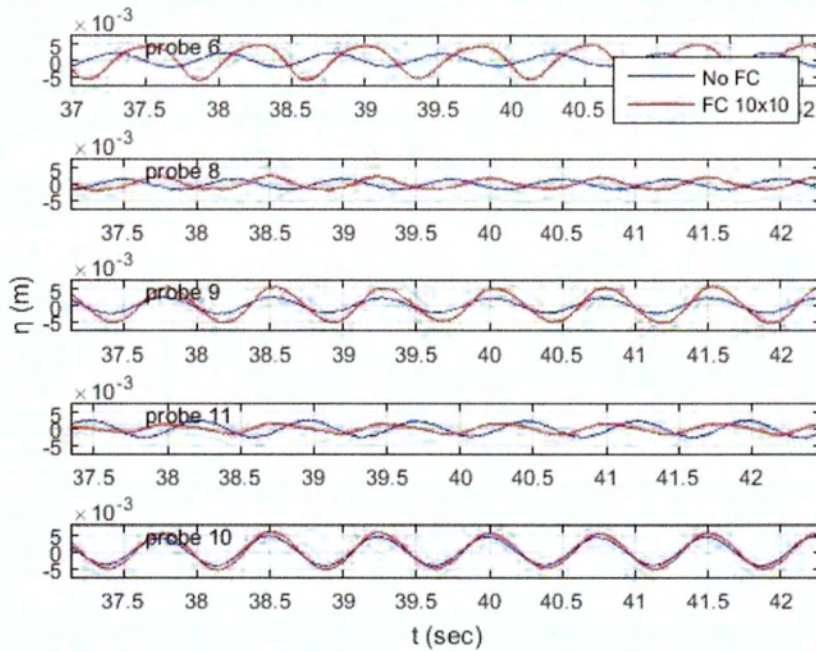


(β)

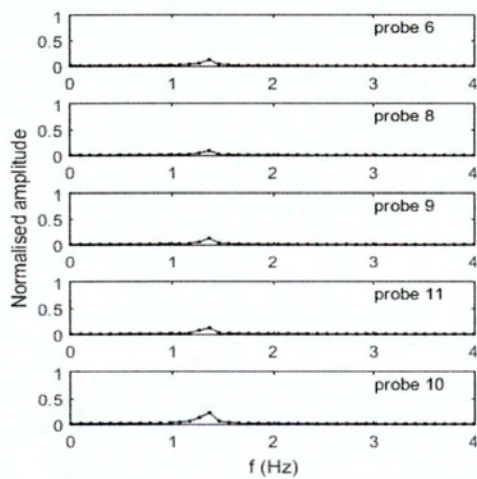


(γ)

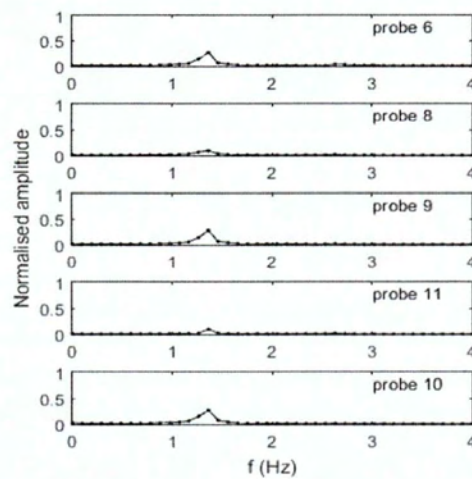
Σχήμα 2-29: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 18 για $bf=0$, $hf=0$ και 24 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

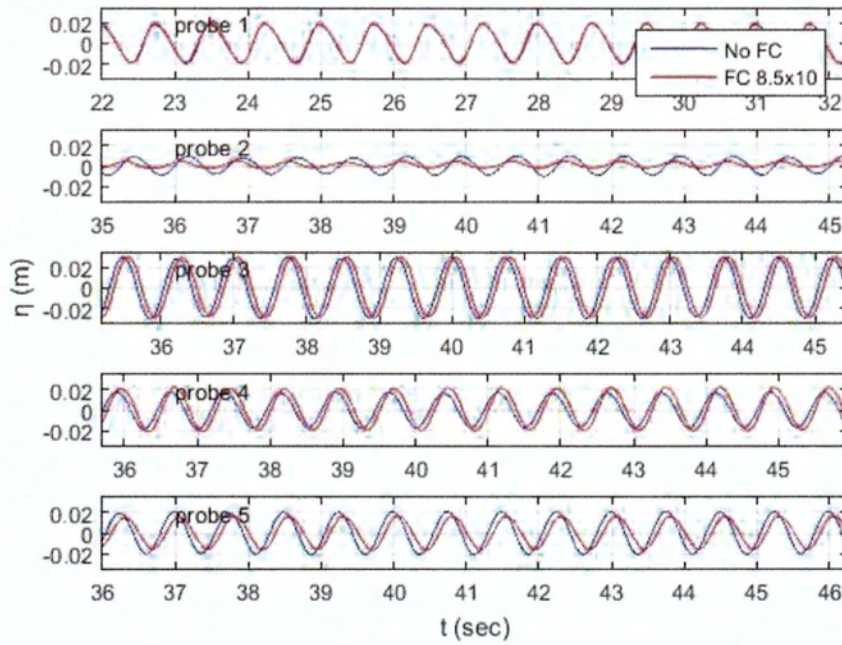


(β)

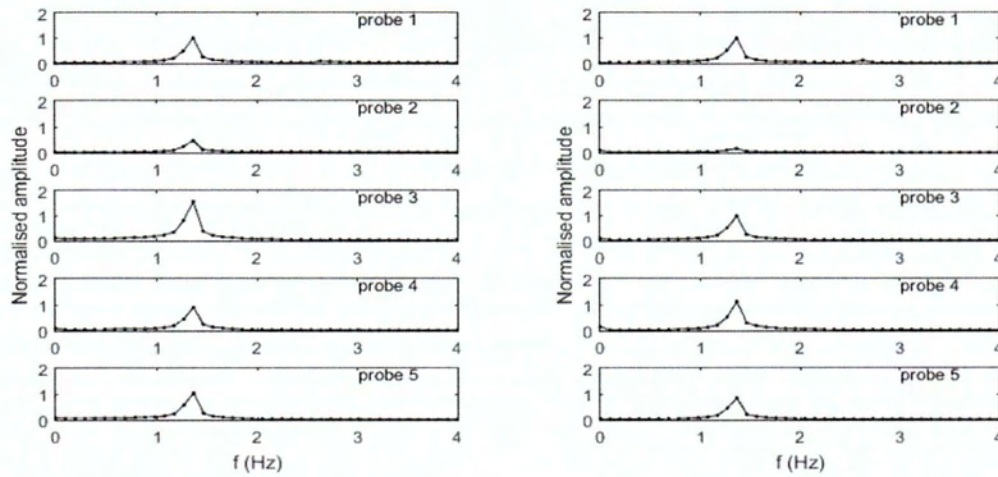


(γ)

Σχήμα 2-30: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 18 για $bf=0$, $hf=0$ και 24 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



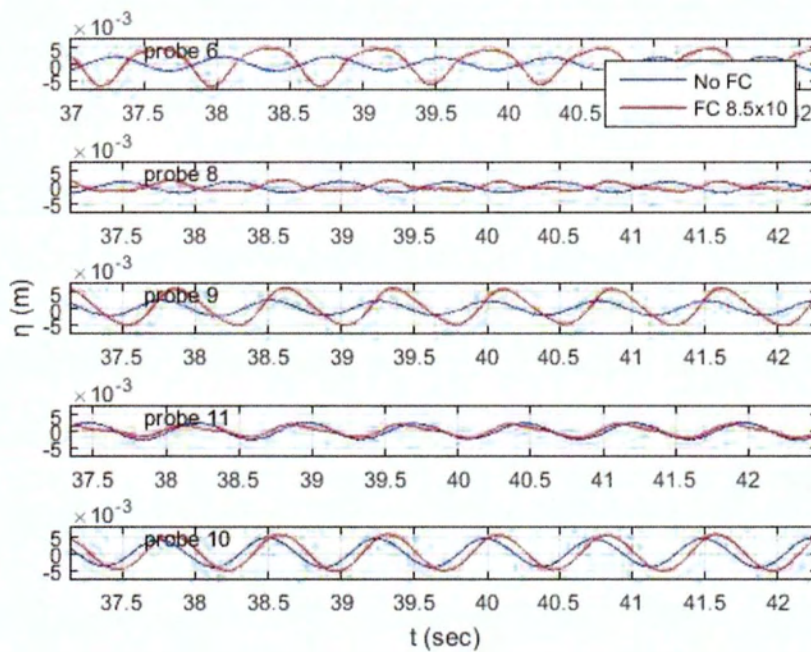
(α)



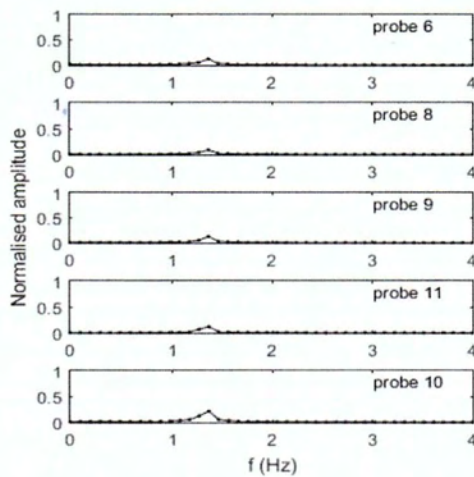
(β)

(γ)

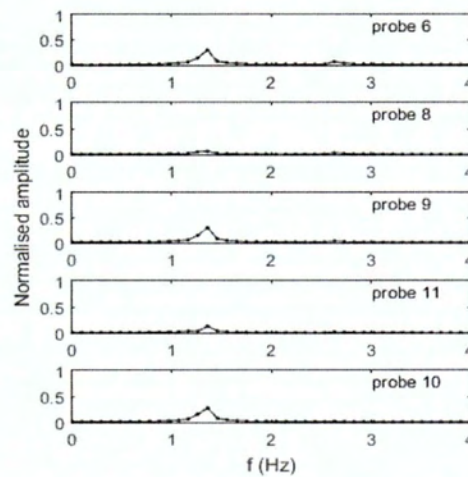
Σχήμα 2-31: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 18 για $hf=0$, $hf=0$ και 30 για $hf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

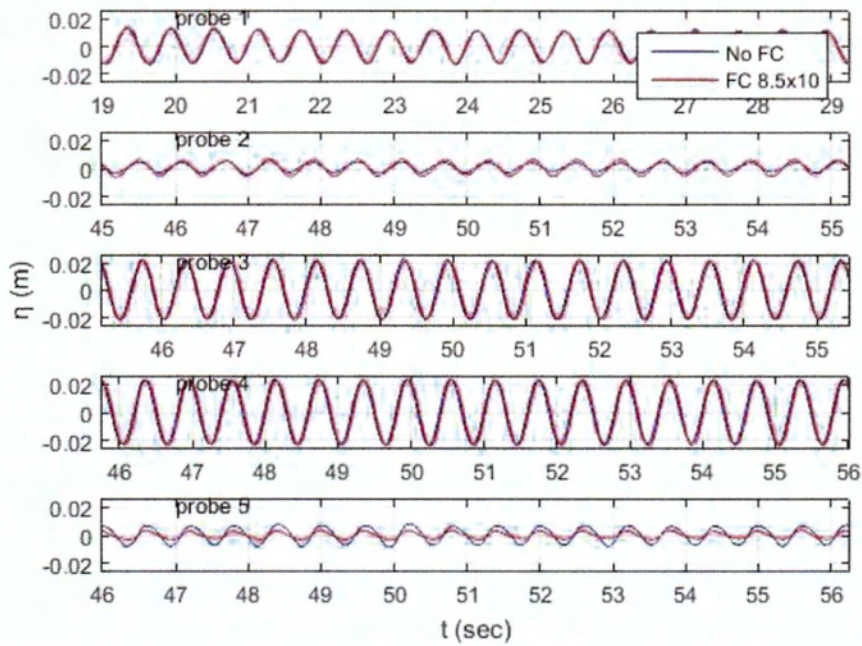


(β)

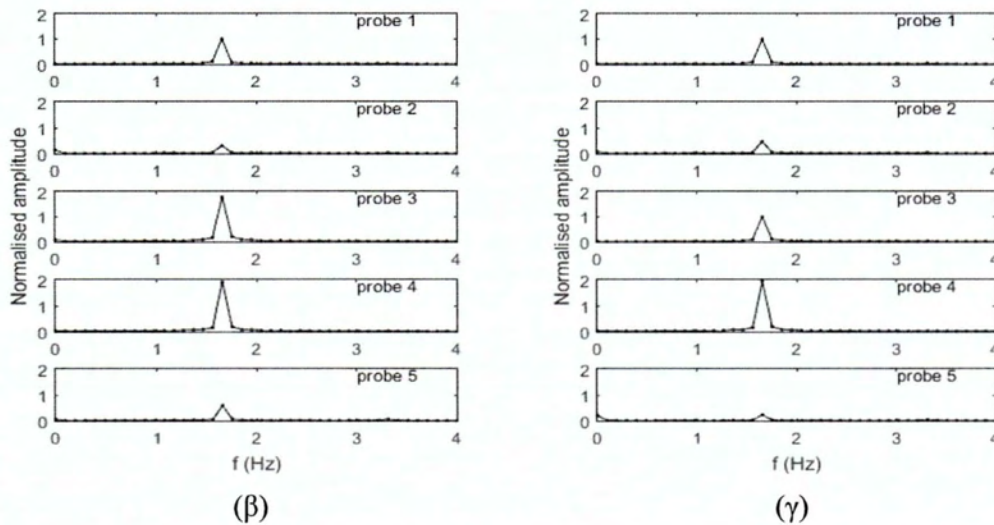


(γ)

Σχήμα 2-32: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 18 για $bf=0$, $hf=0$ και 30 για $bf=8.5\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



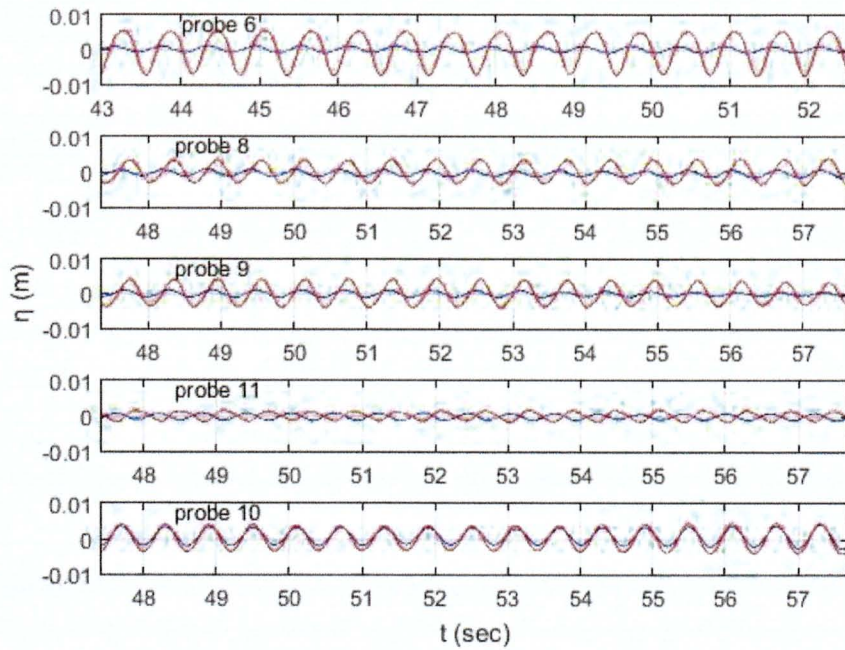
(α)



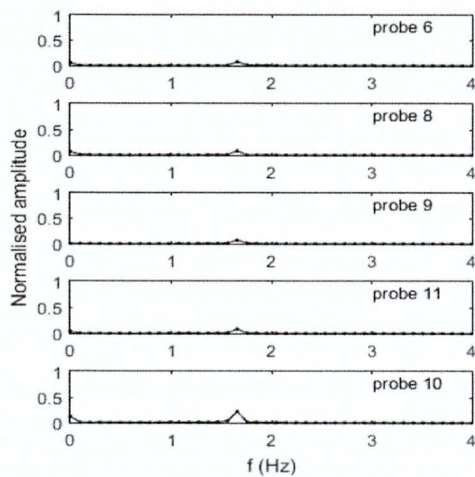
(β)

(γ)

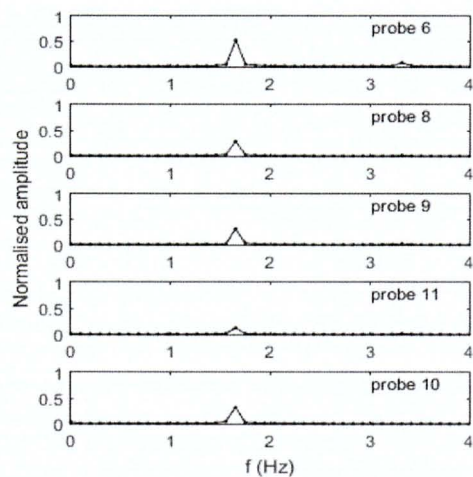
Σχήμα 2-33: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 25 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

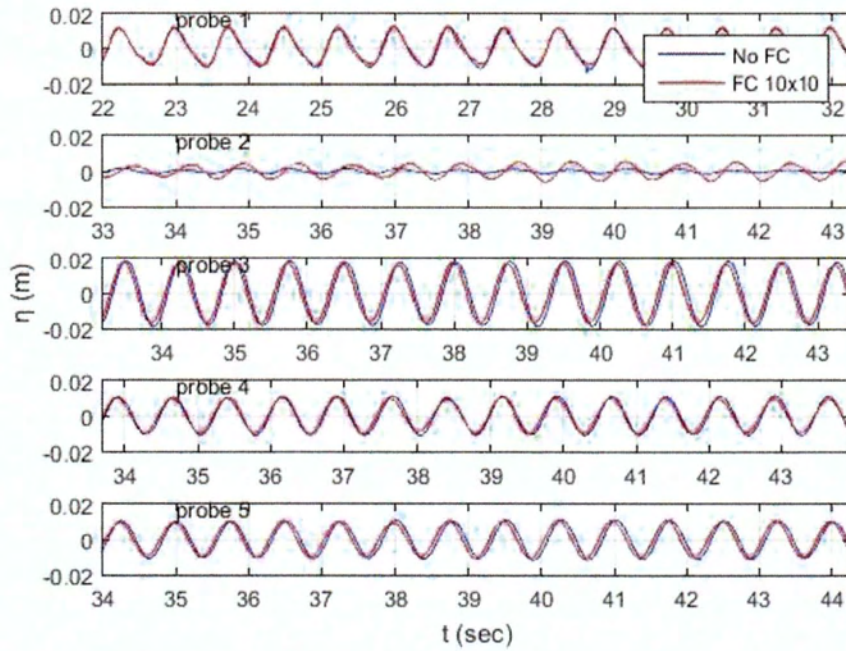


(β)

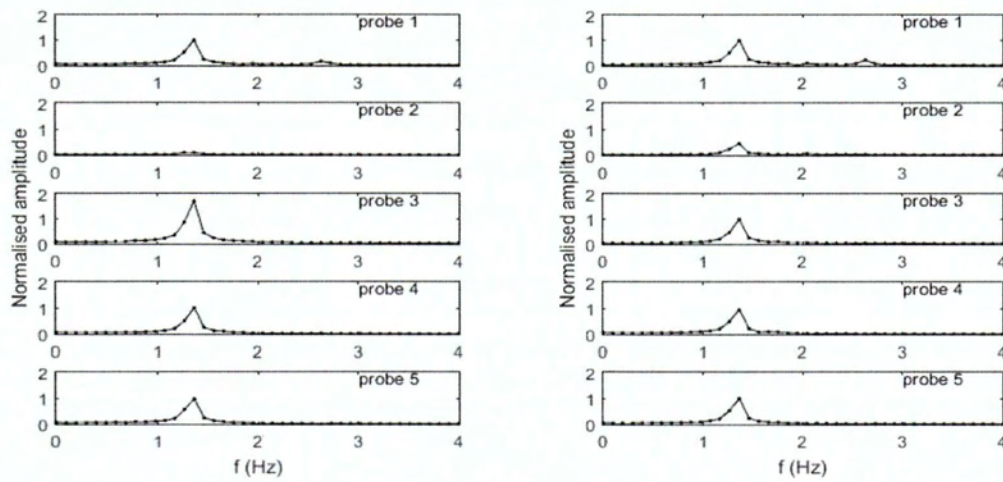


(γ)

Σχήμα 2-34: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 25 για $bf=0$, $hf=0$ και 12 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



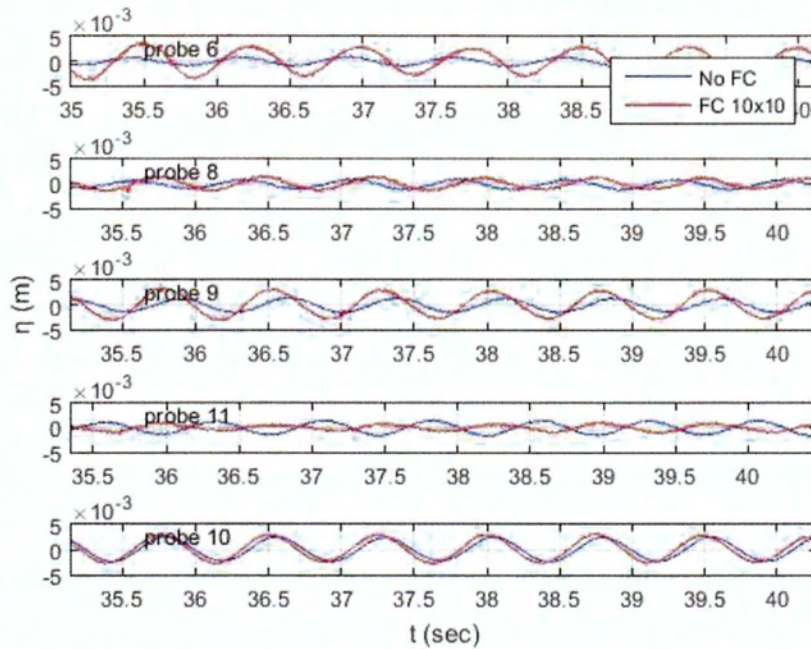
(α)



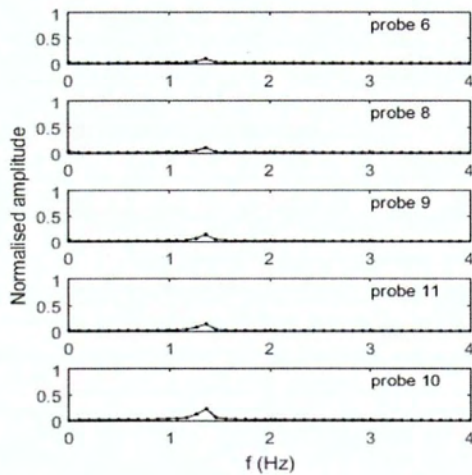
(β)

(γ)

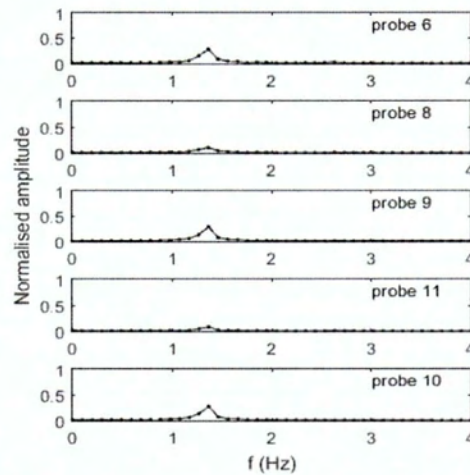
Σχήμα 2-35: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 20 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

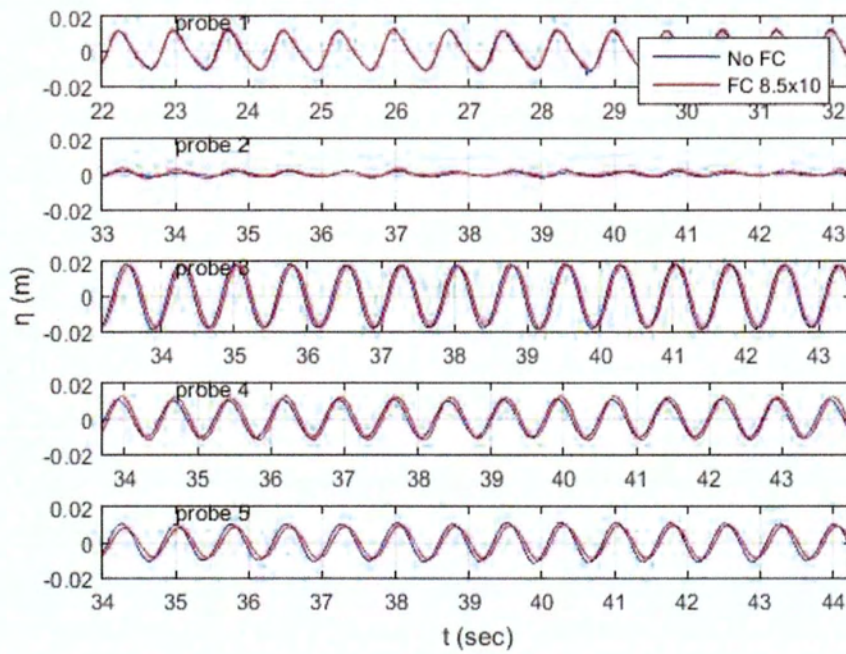


(β)

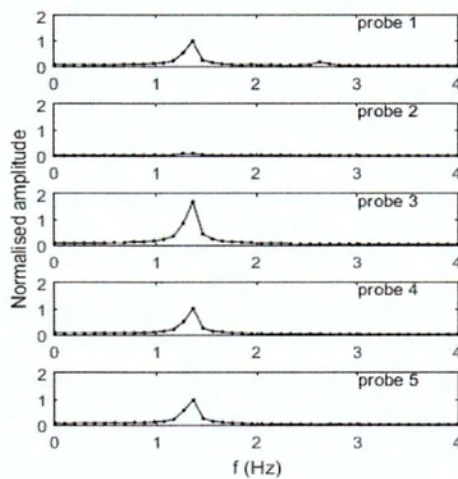


(γ)

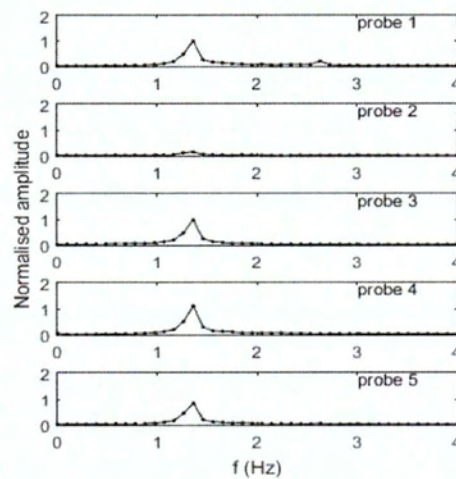
Σχήμα 2-36: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 20 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

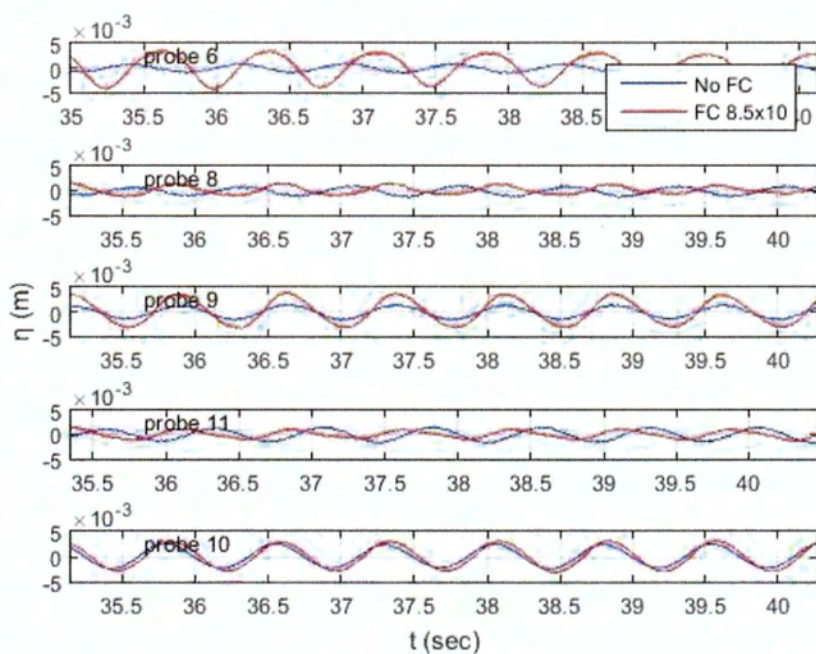


(β)

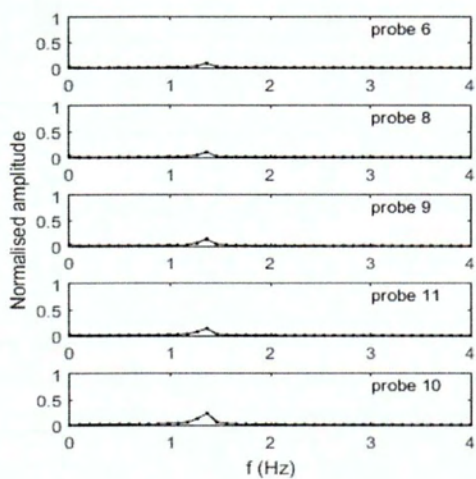


(γ)

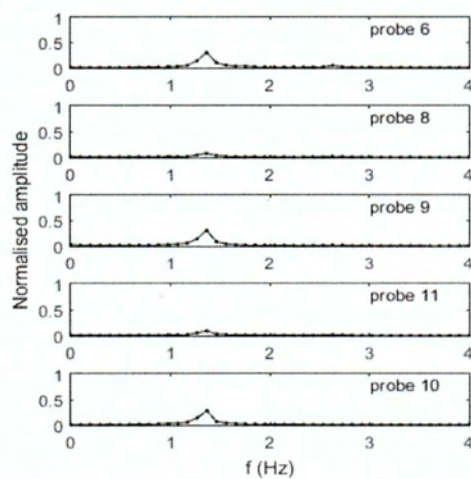
Σχήμα 2-37: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 28 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



α)

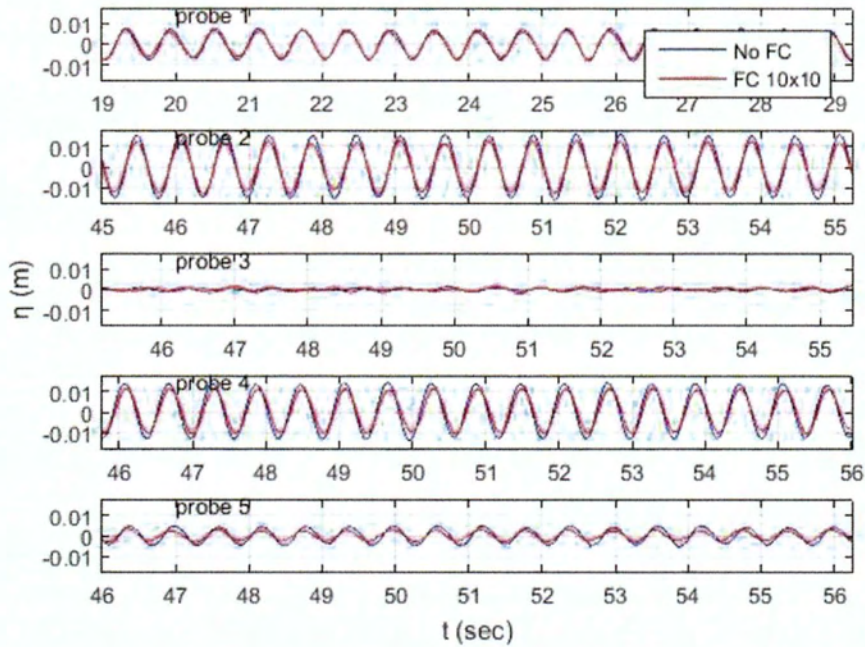


(β)

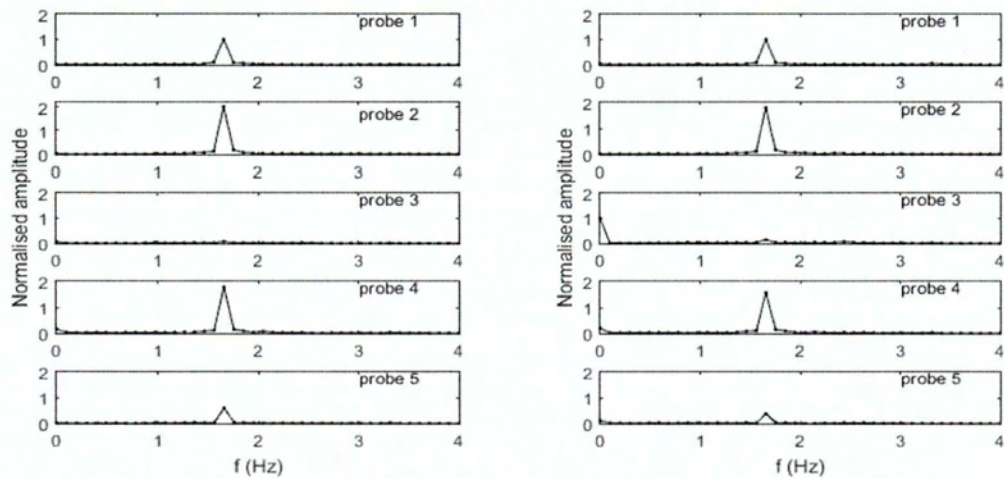


(γ)

Σχήμα 2-38: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 26 για $bf=0$, $hf=0$ και 28 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 90° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



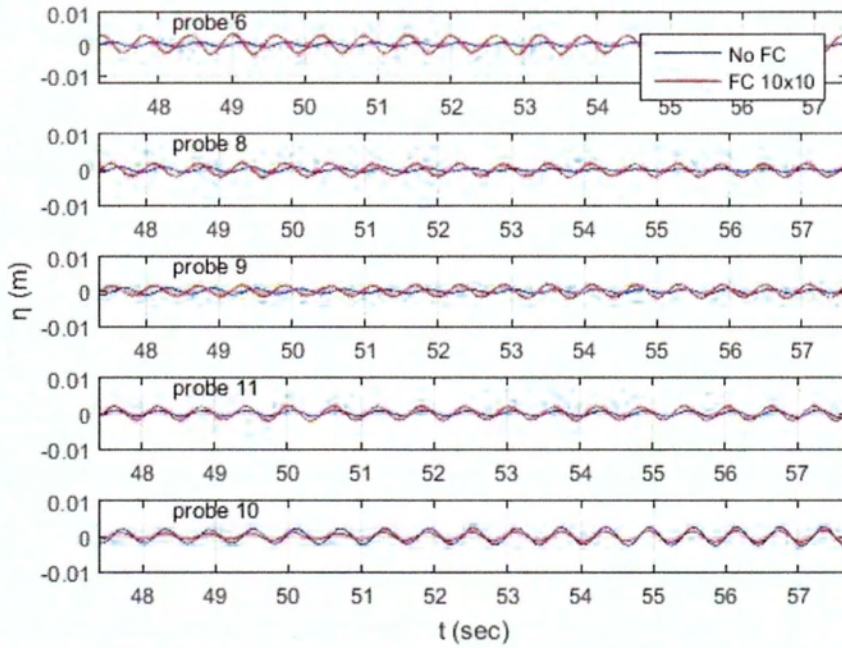
(α)



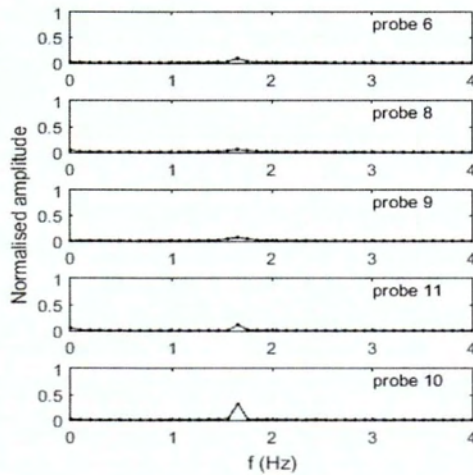
(β)

(γ)

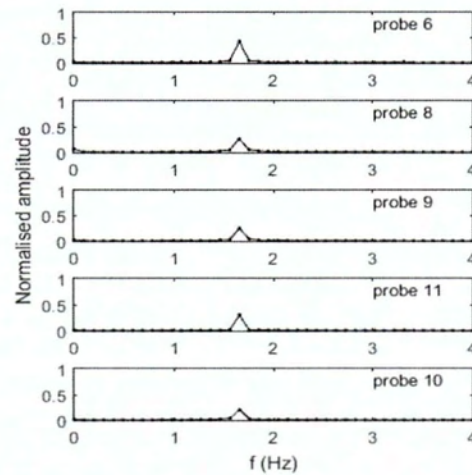
Σχήμα 2-39: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 38 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

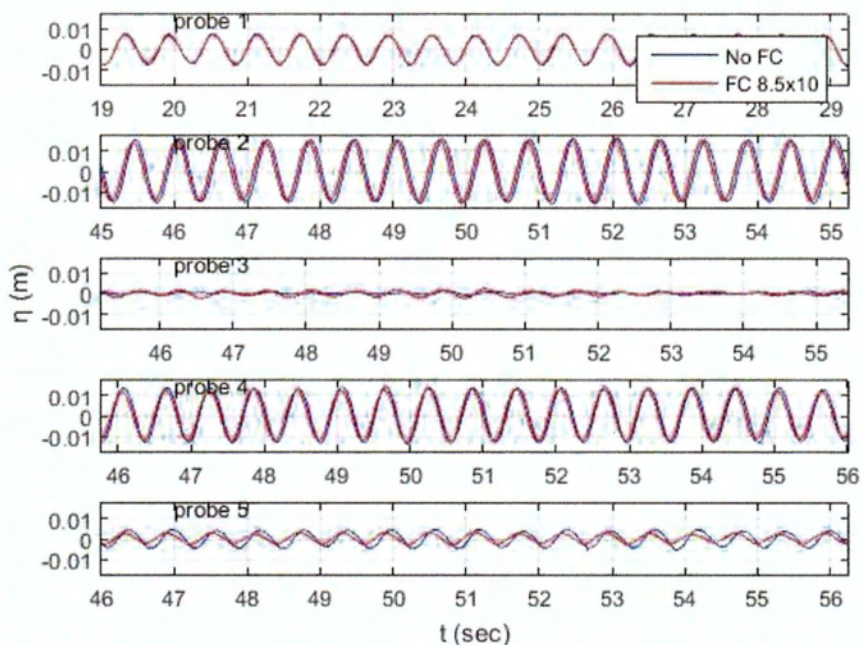


(β)

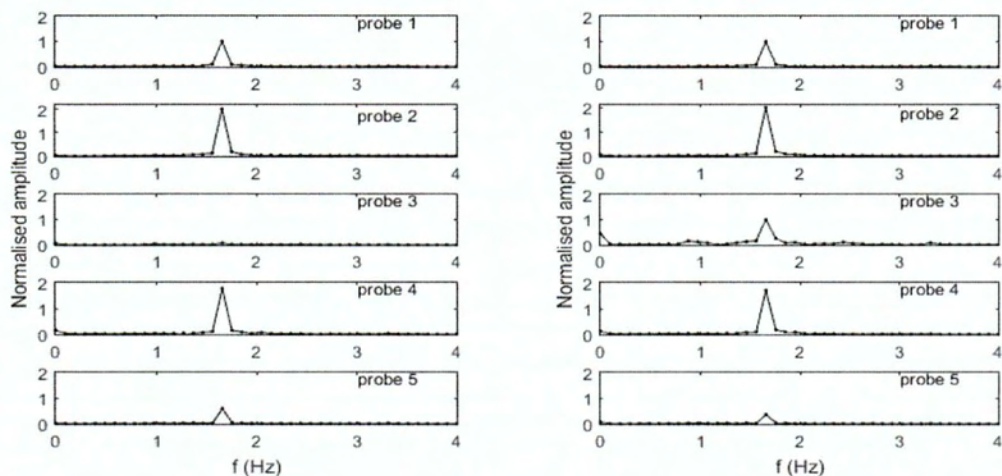


(γ)

Σχήμα 2-40: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 38 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



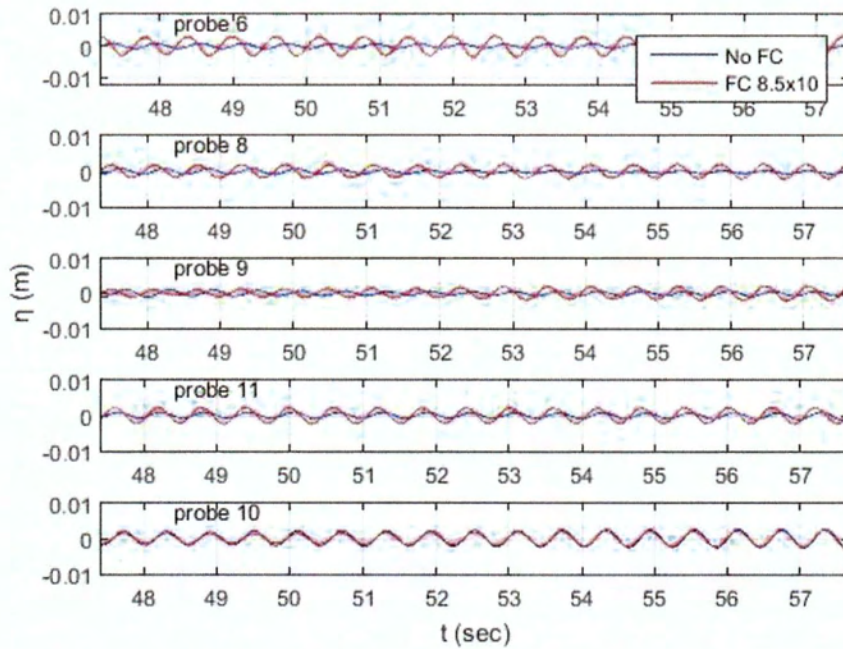
(α)



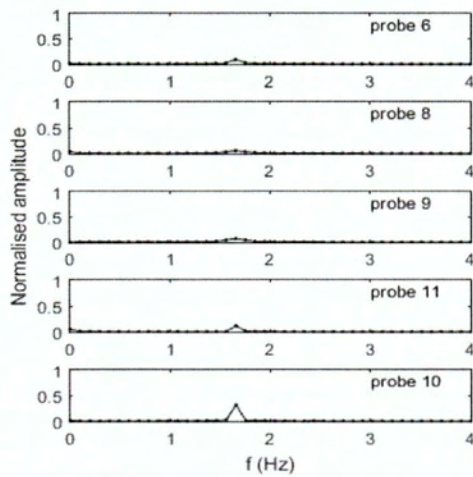
(β)

(γ)

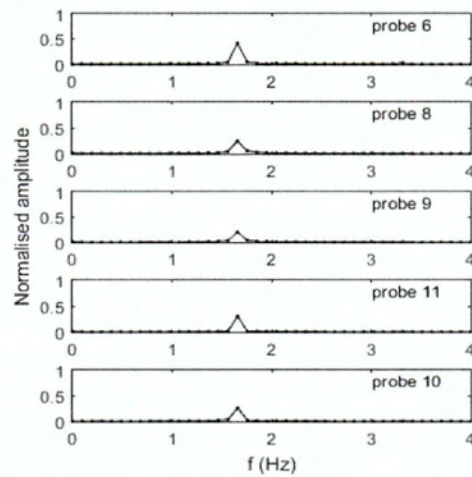
Σχήμα 2-41: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 43 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

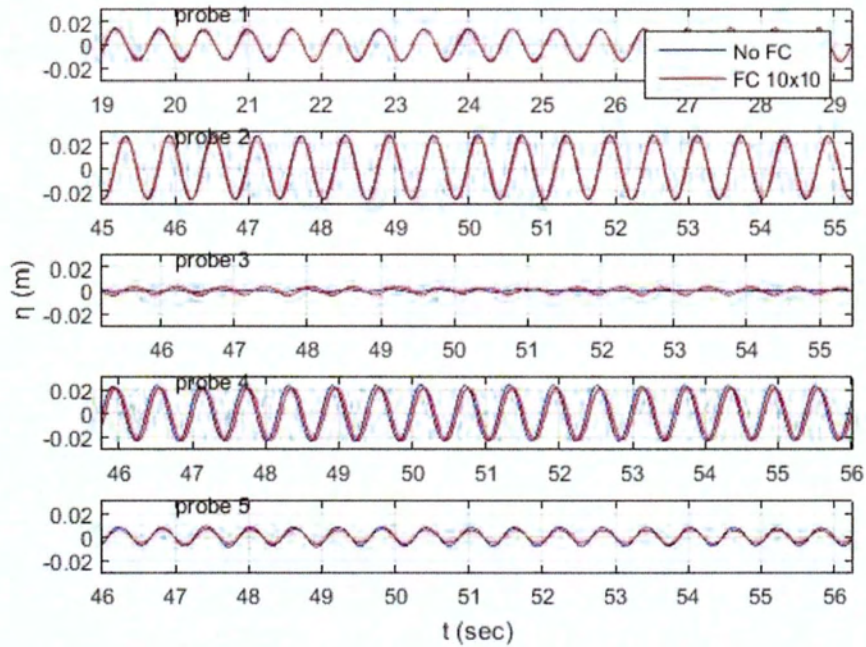


(β)

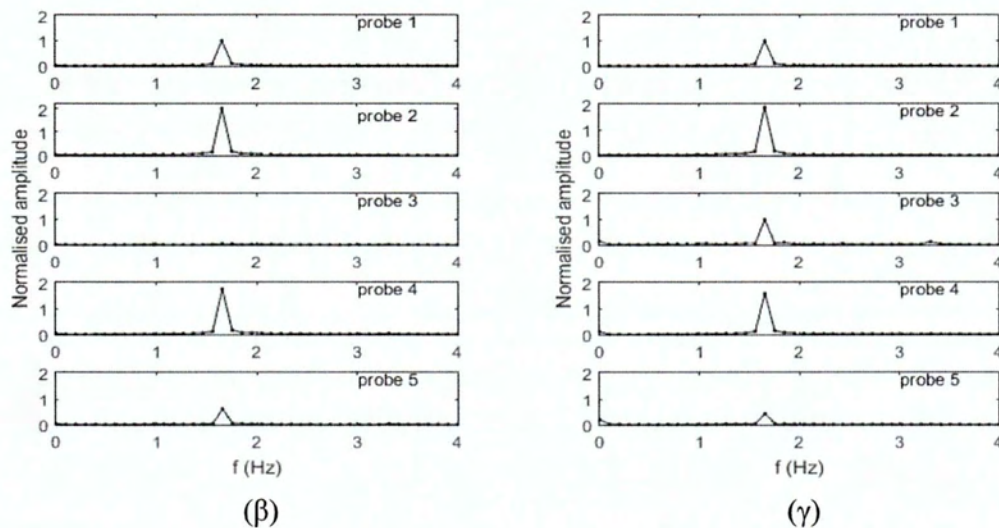


(γ)

Σχήμα 2-42: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 33 για $bf=0$, $hf=0$ και 43 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



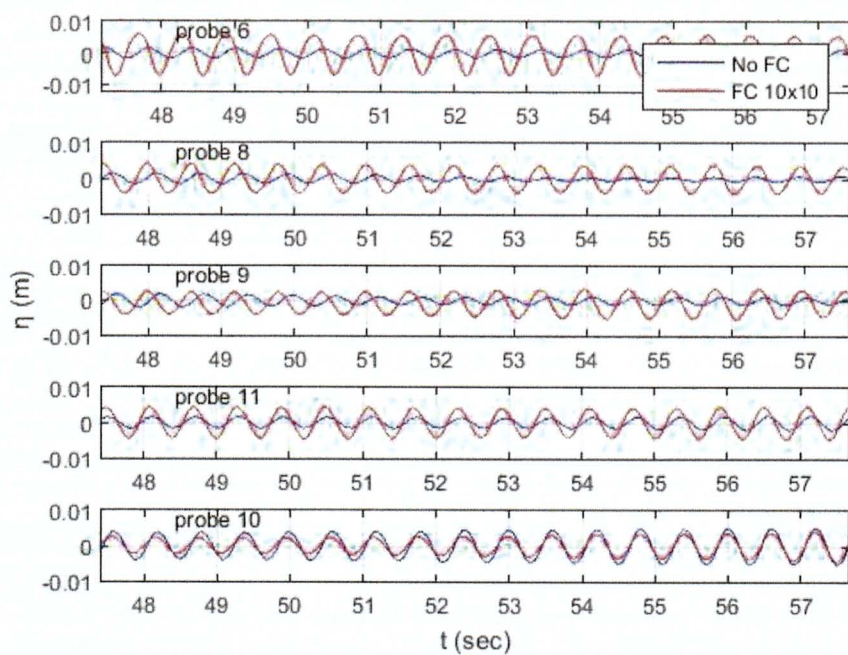
(α)



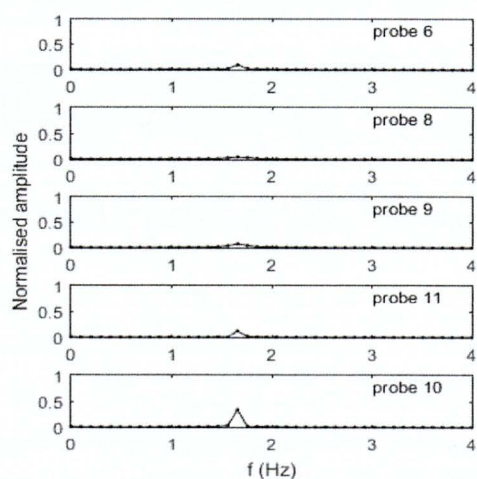
(β)

(γ)

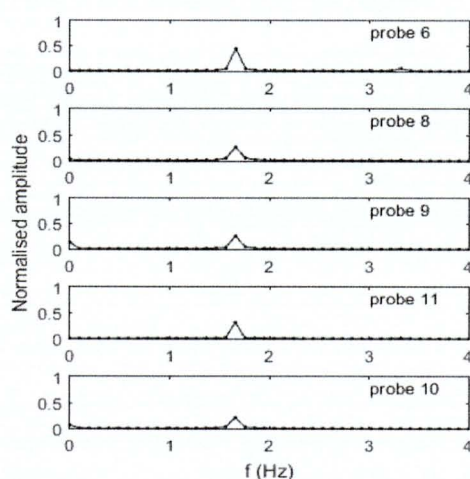
Σχήμα 2-43: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 40 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

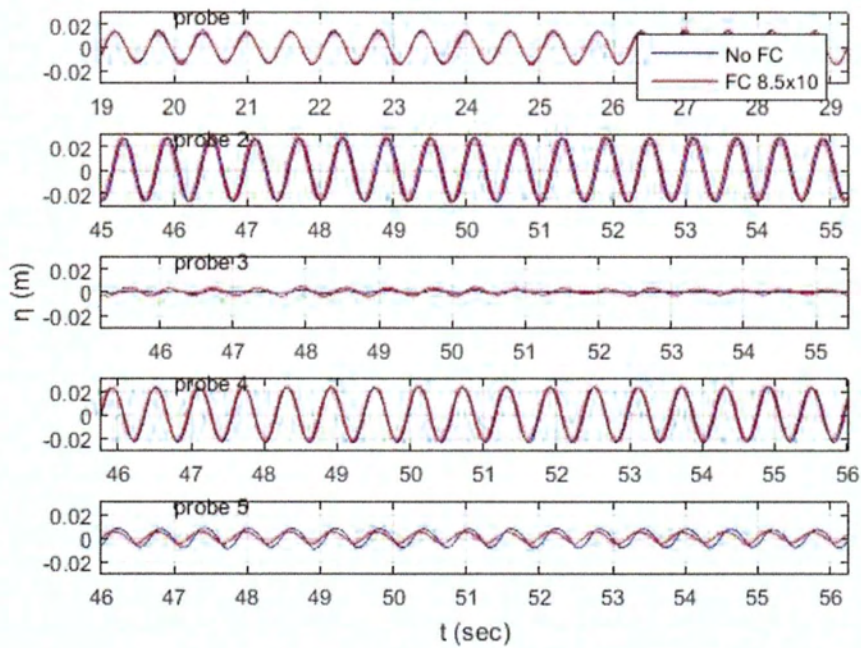


(β)

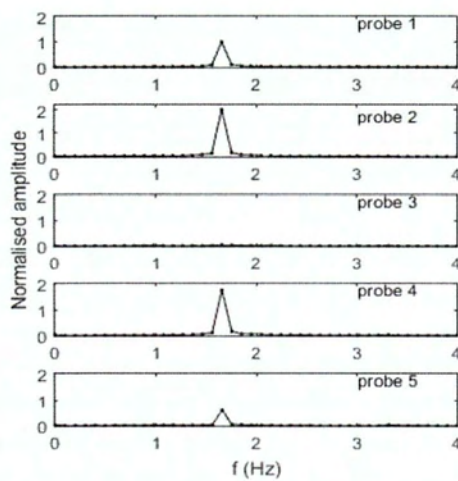


(γ)

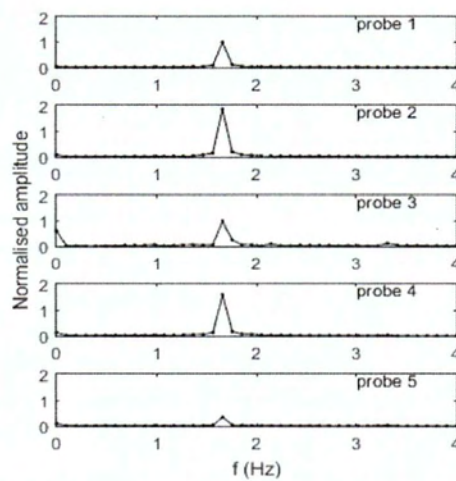
Σχήμα 2-44: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 40 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανόμωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

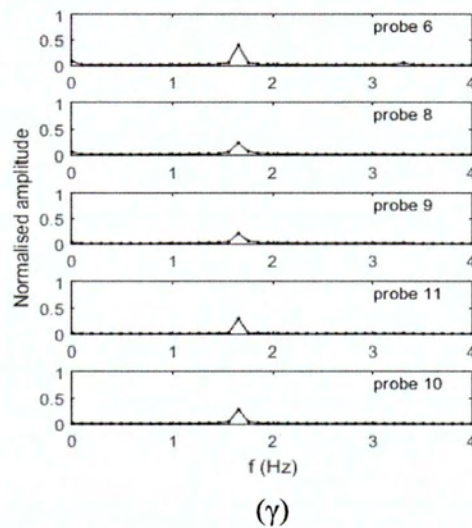
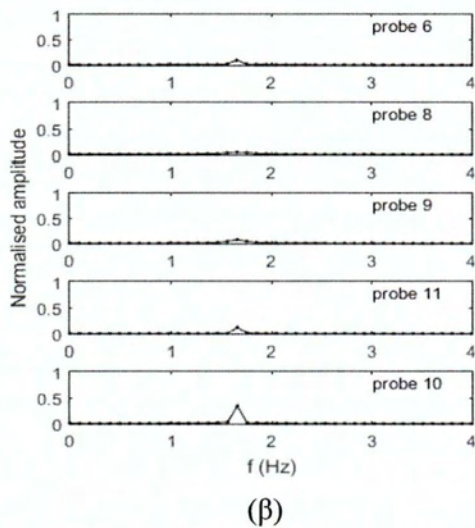
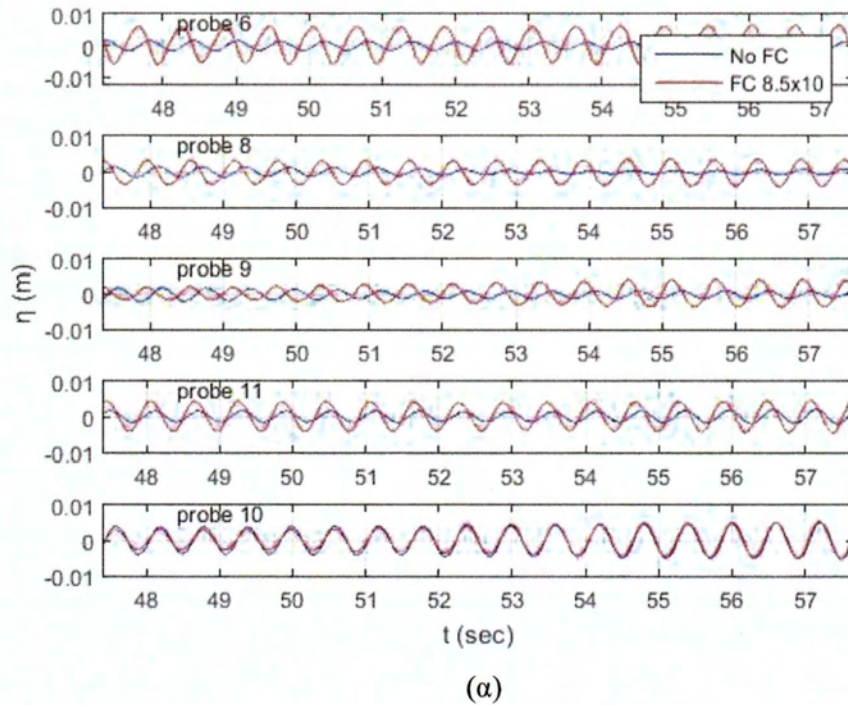


(β)

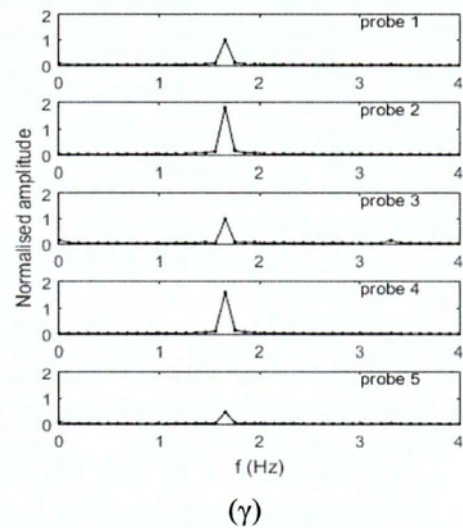
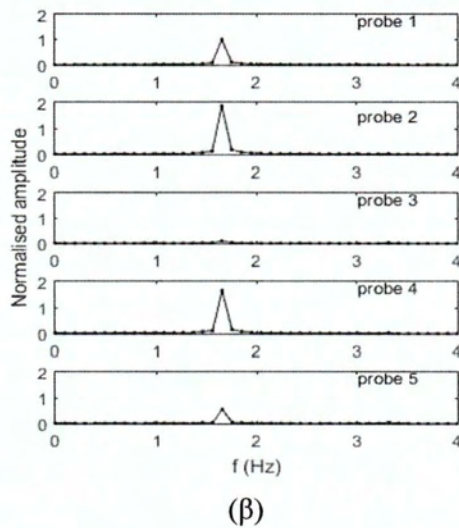
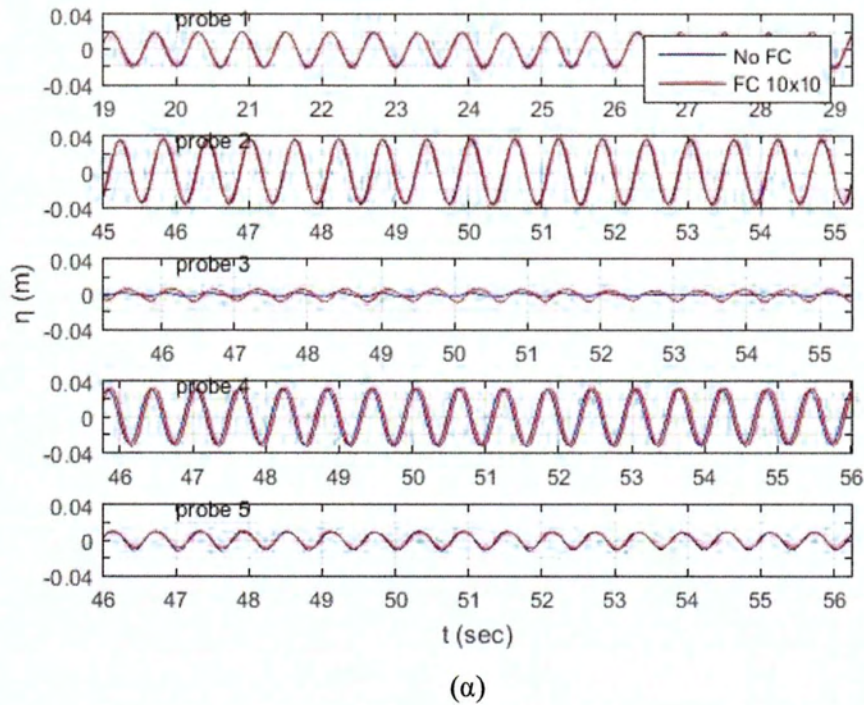


(γ)

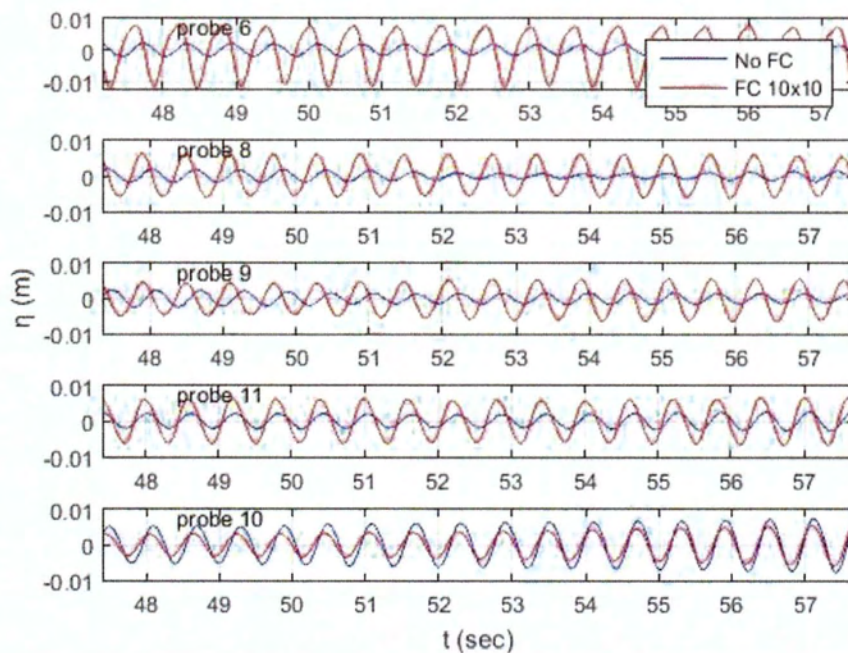
Σχήμα 2-45: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 45 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνότητας.



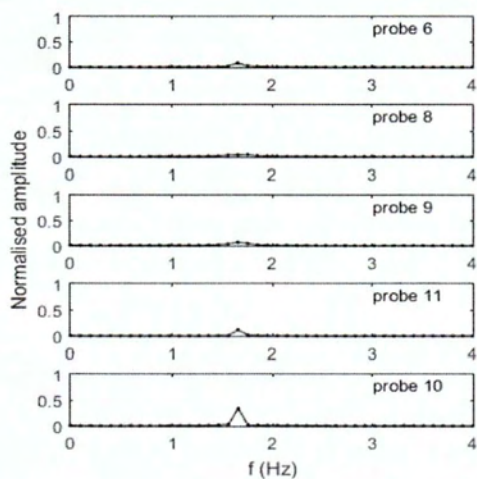
Σχήμα 2-46: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 35 για $bf=0$, $hf=0$ και 45 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



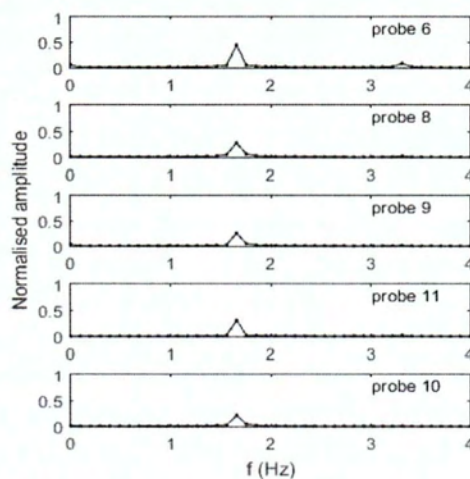
Σχήμα 2-47: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 41 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

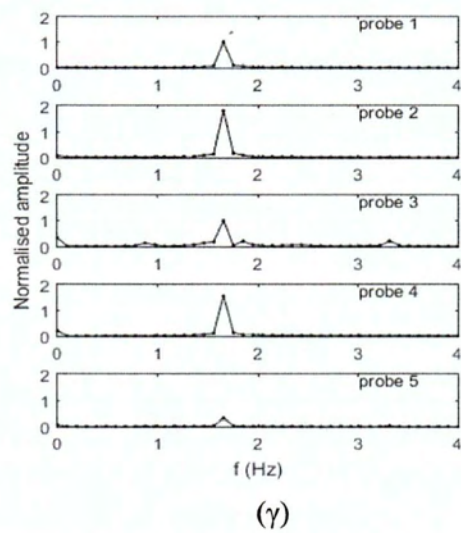
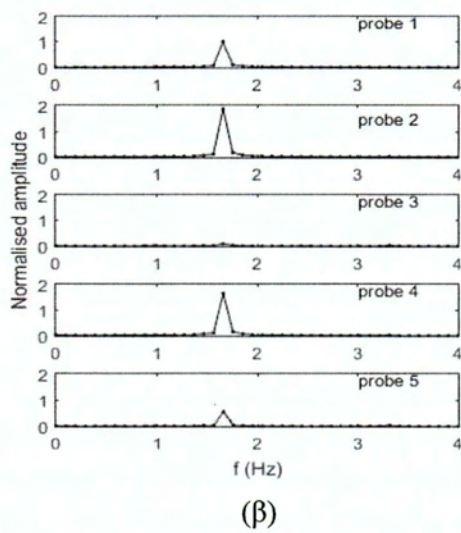
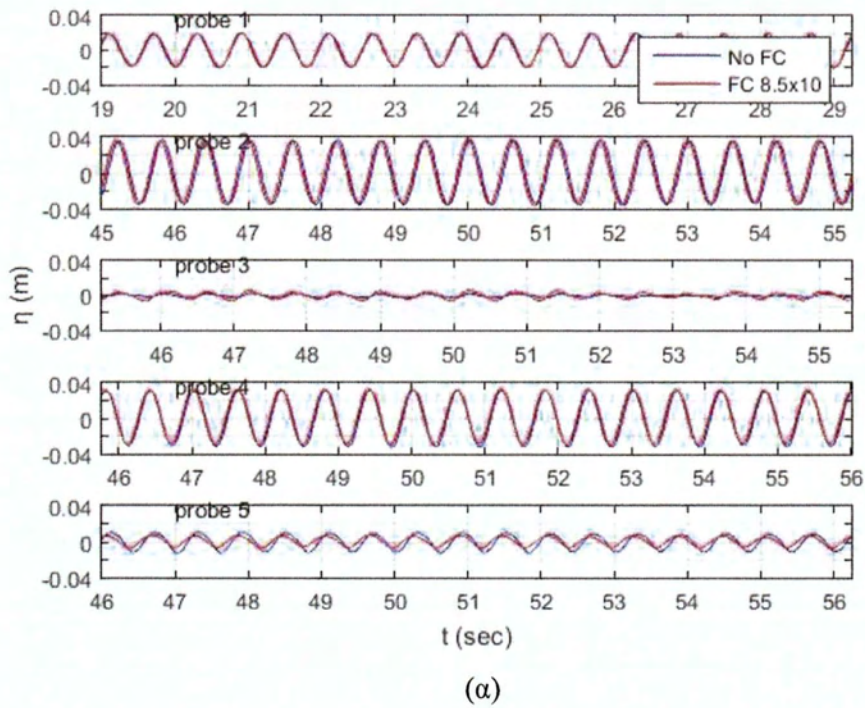


(β)

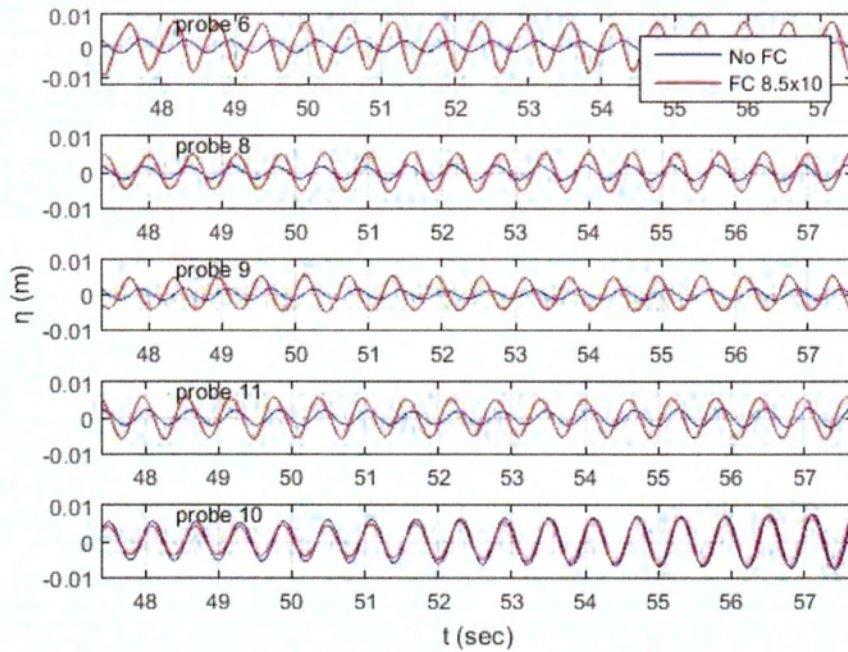


(γ)

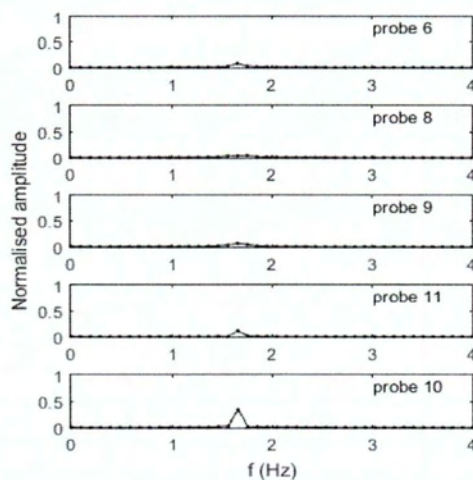
Σχήμα 2-48: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 41 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



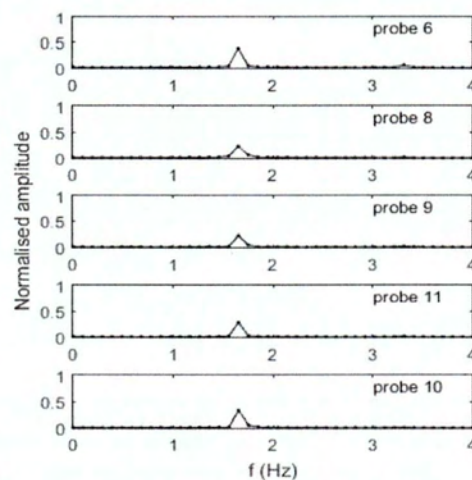
Σχήμα 2-49: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 46 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

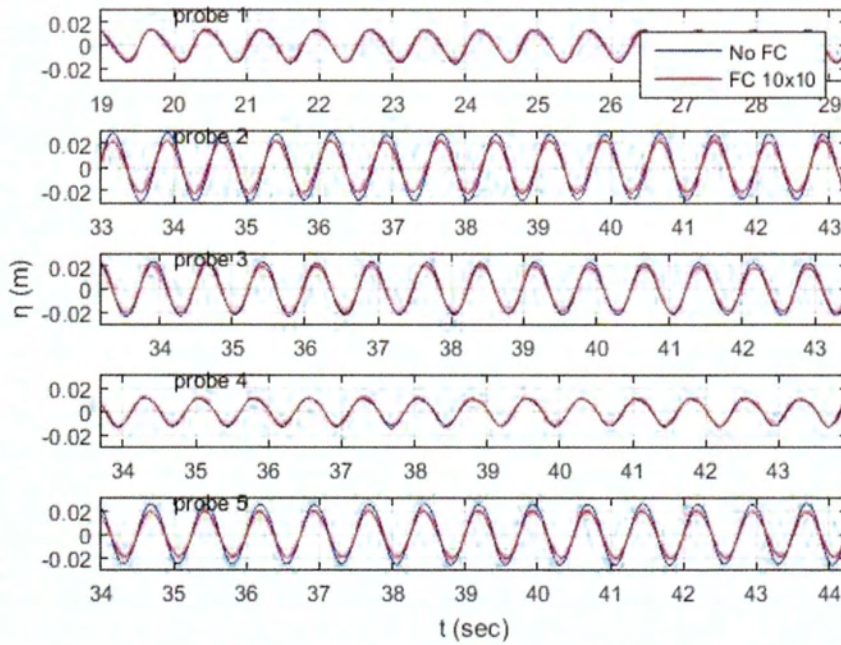


(β)

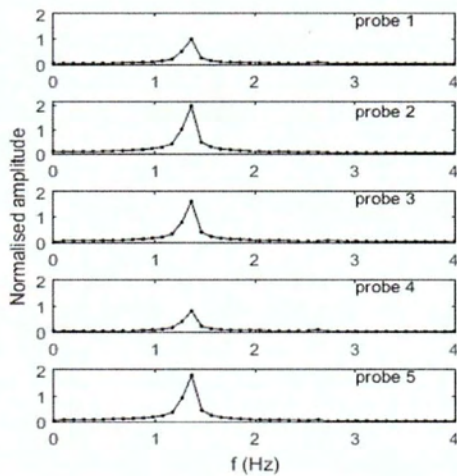


(γ)

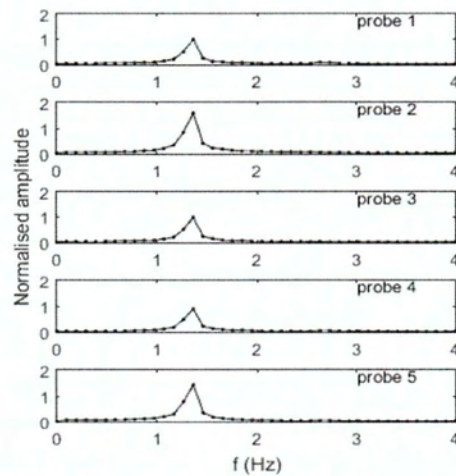
Σχήμα 2-50: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 36 για $bf=0$, $hf=0$ και 46 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

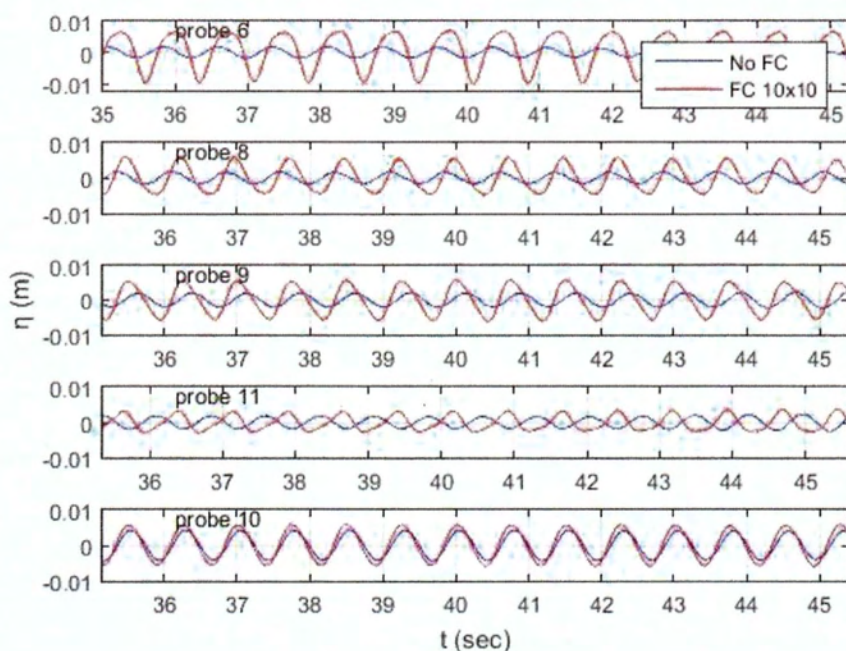


(β)

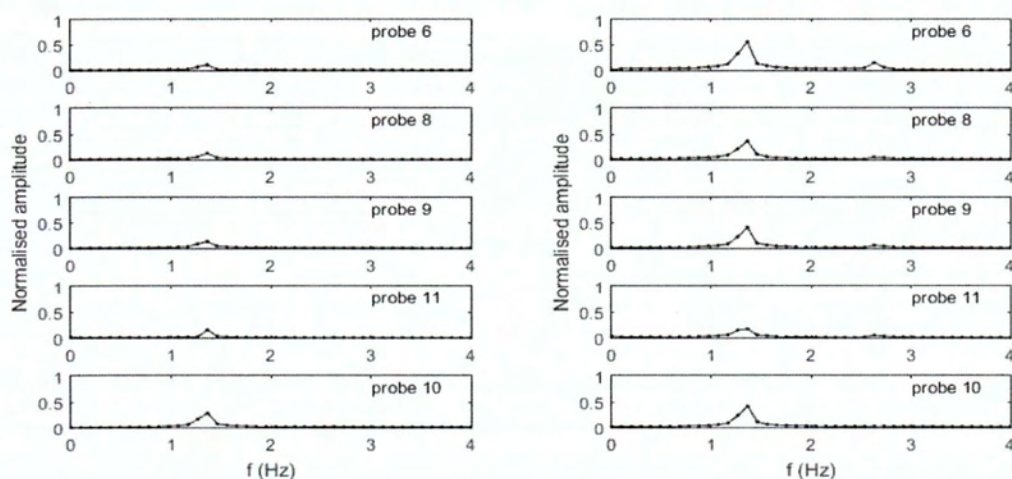


(γ)

Σχήμα 2-51: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 54 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



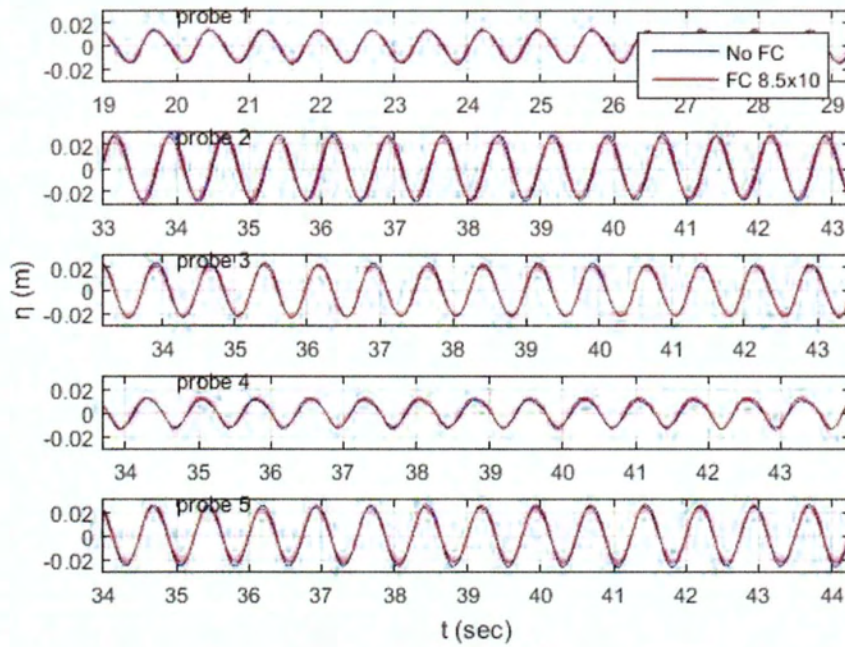
(α)



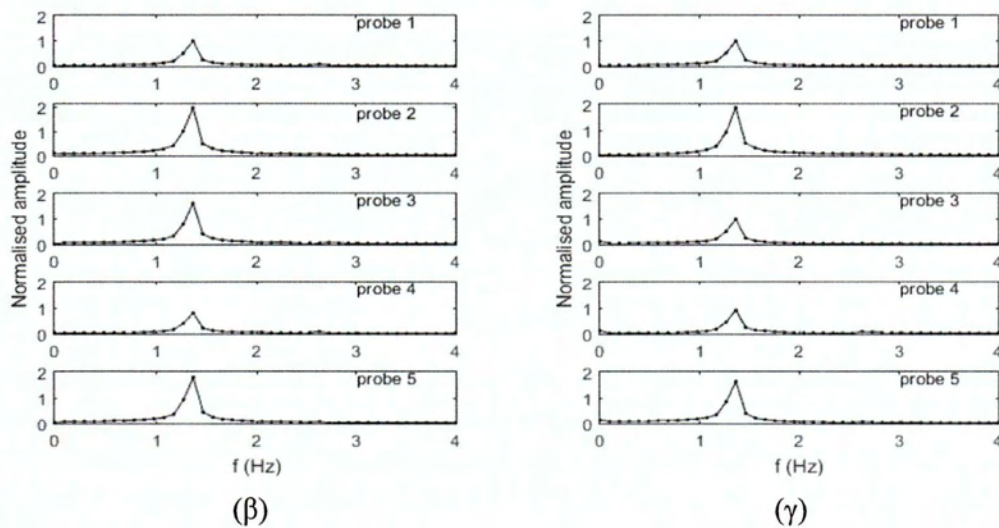
(β)

(γ)

Σχήμα 2-52: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 54 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



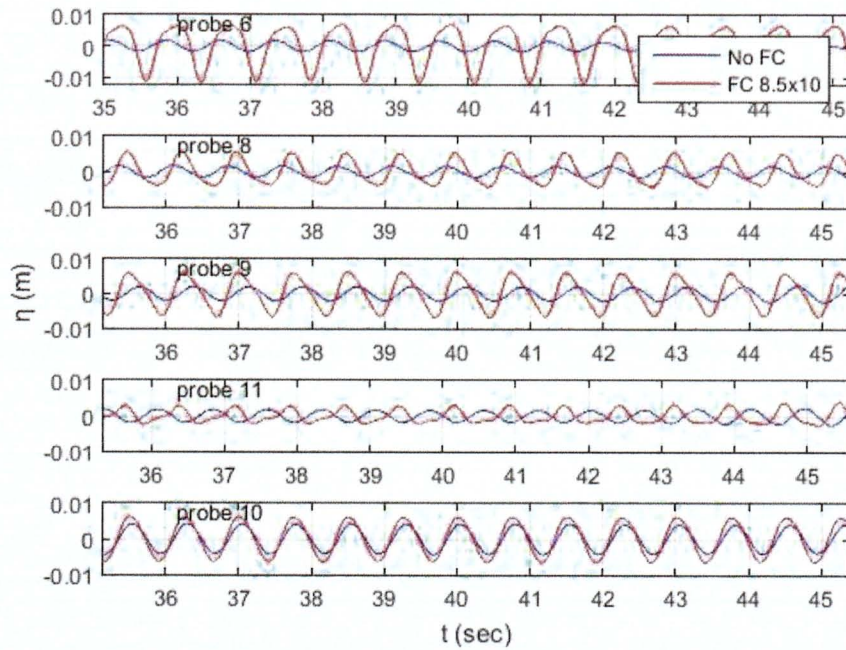
(α)



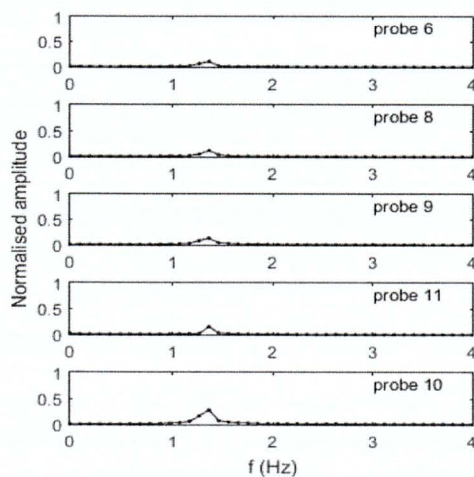
(β)

(γ)

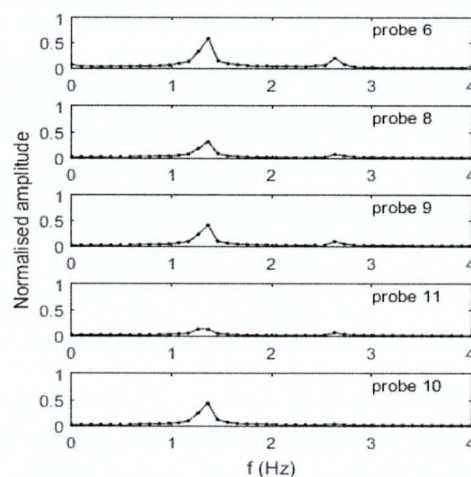
Σχήμα 2-53: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 57 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

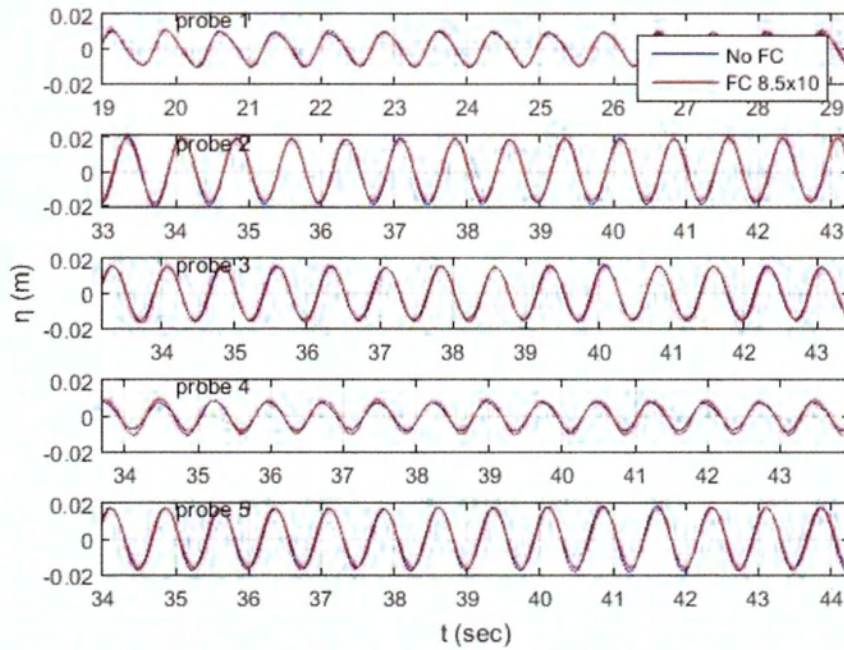


(β)

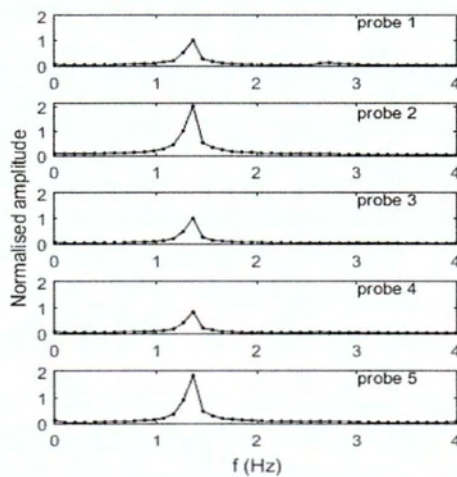


(γ)

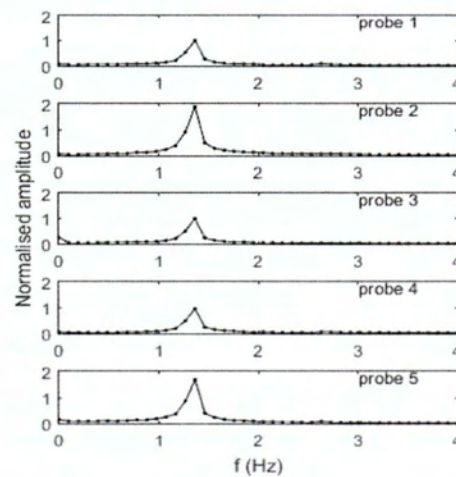
Σχήμα 2-54: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 50 για $bf=0$, $hf=0$ και 57 για $bf=8.5\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

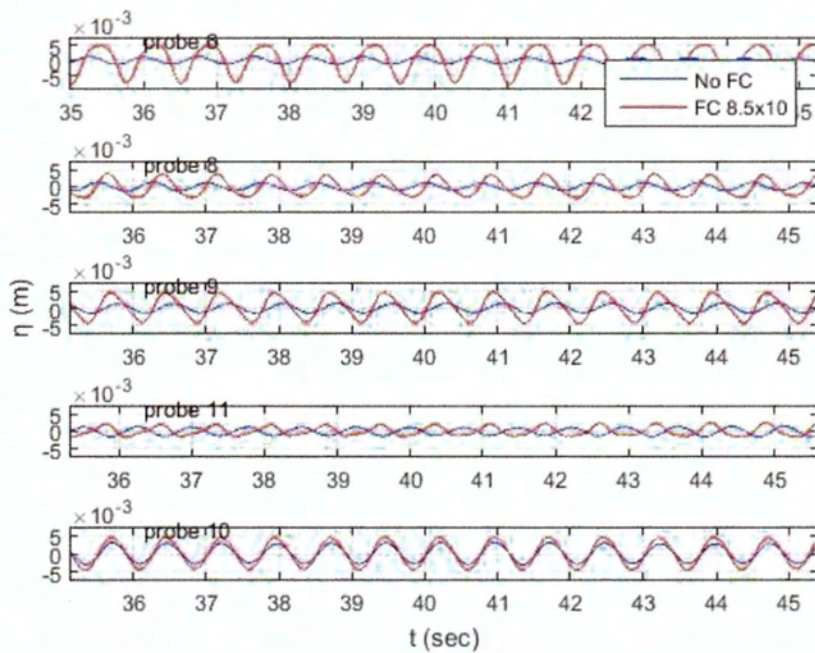


(β)

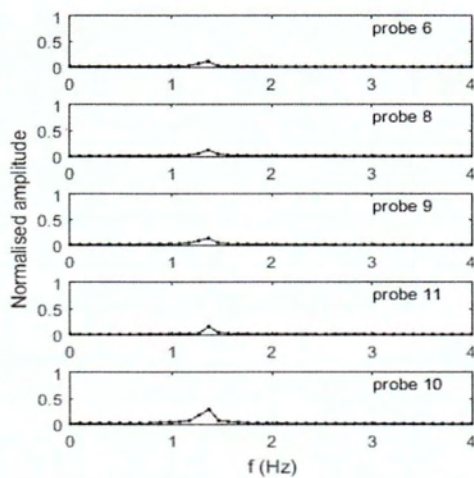


(γ)

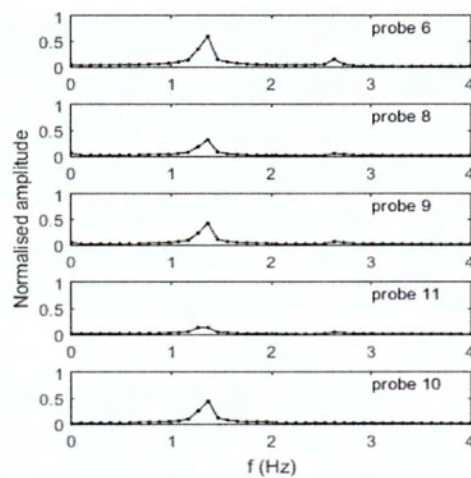
Σχήμα 2-55: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 48 για $bf=0$, $hf=0$ και 55 για $bf=8.5\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

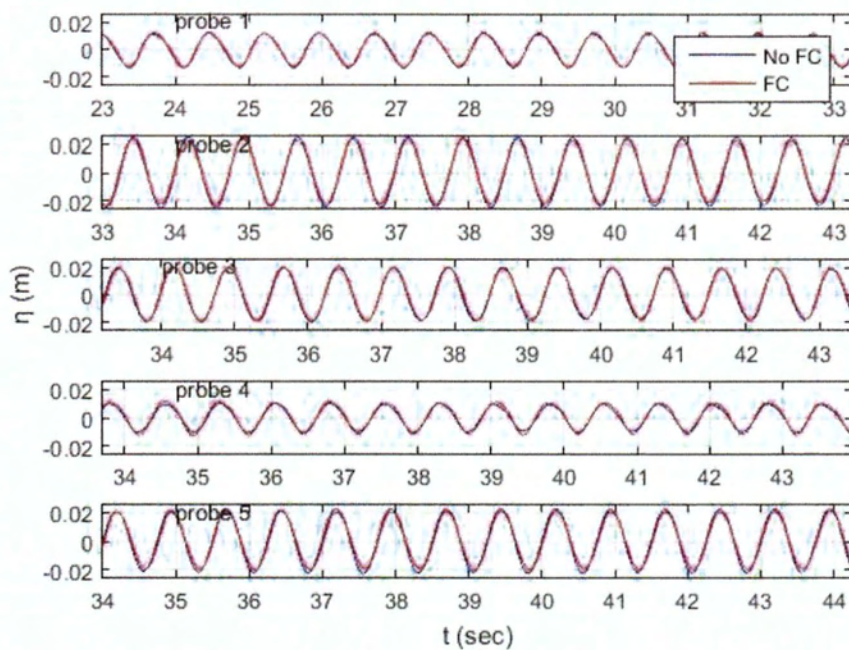


(β)

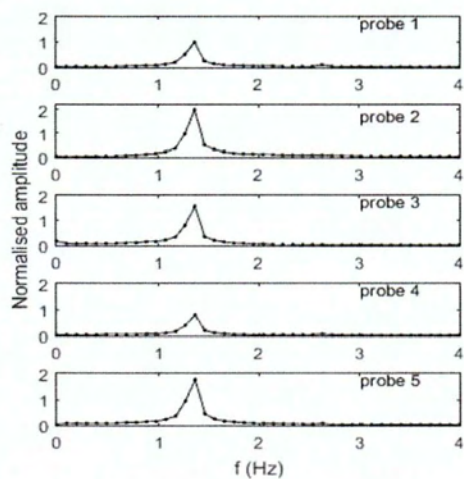


(γ)

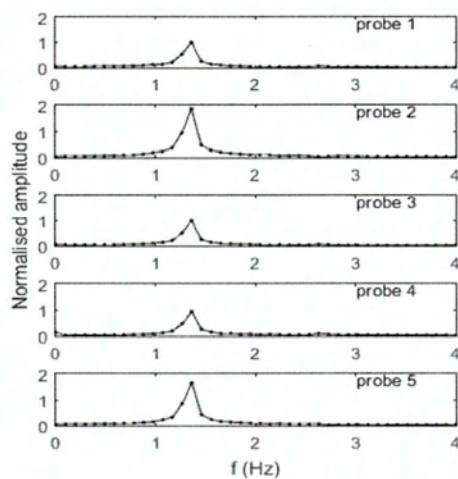
Σχήμα 2-56: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 48 για $bf=0$, $hf=0$ και 55 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

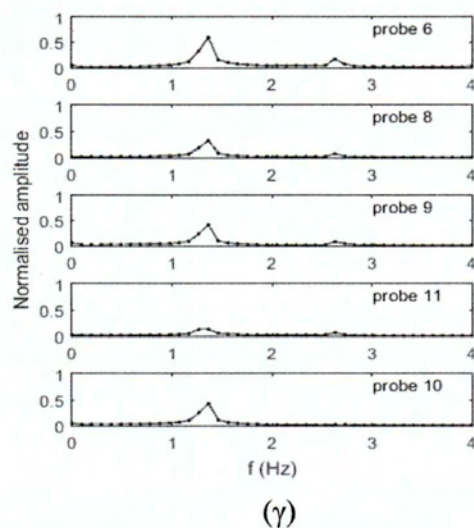
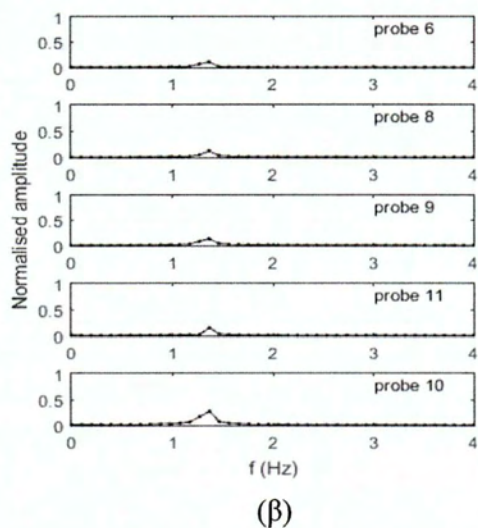
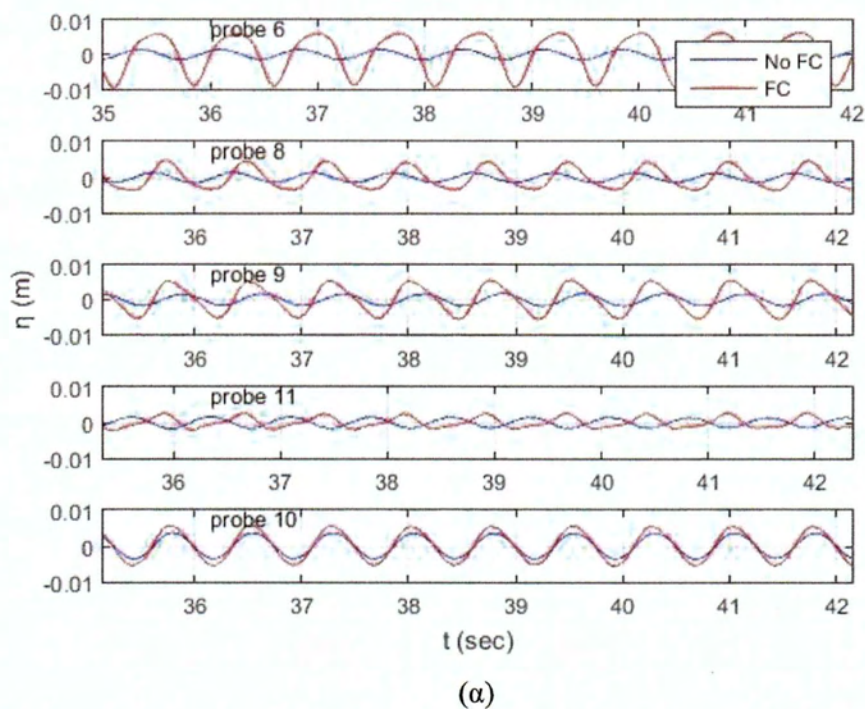


(β)

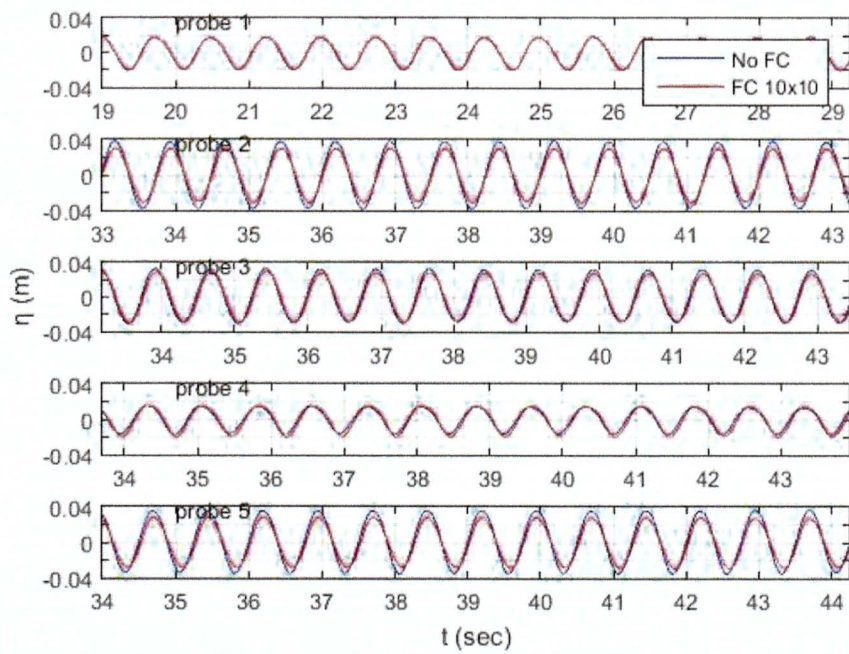


(γ)

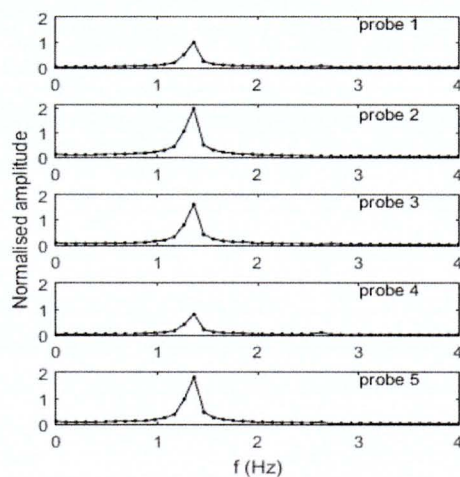
Σχήμα 2-57: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 49 για $bf=0$, $hf=0$ και 56 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



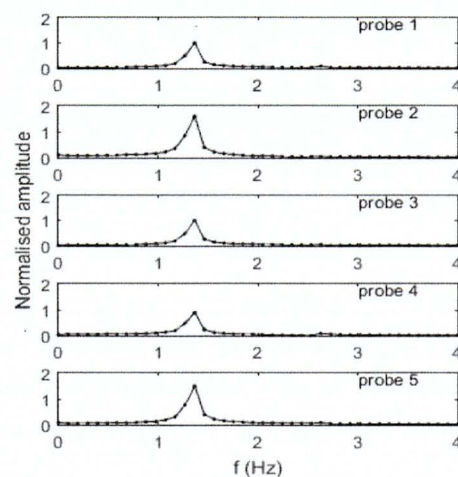
Σχήμα 2-58: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 49 για $bf=0$, $hf=0$ και 56 για $bf=8.5\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

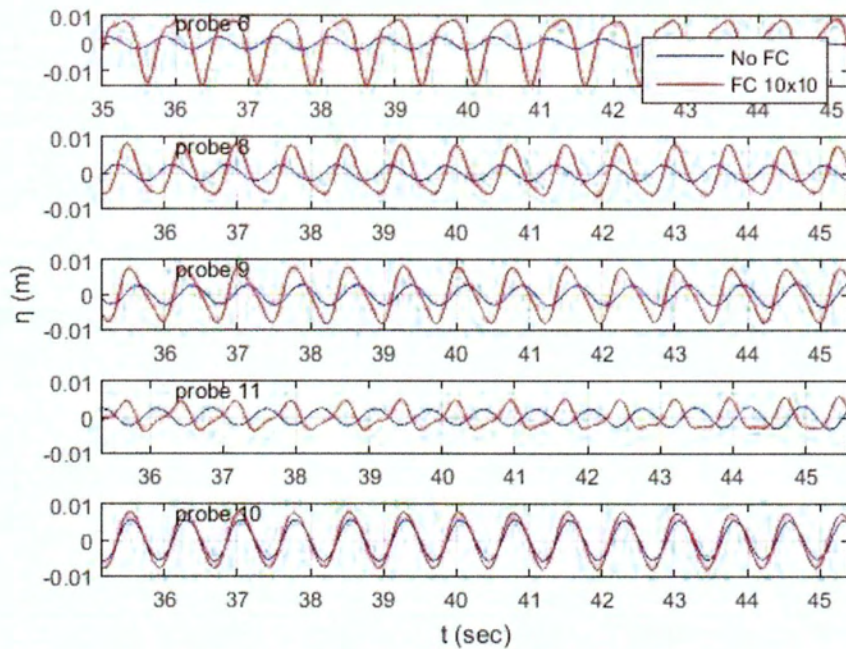


(β)

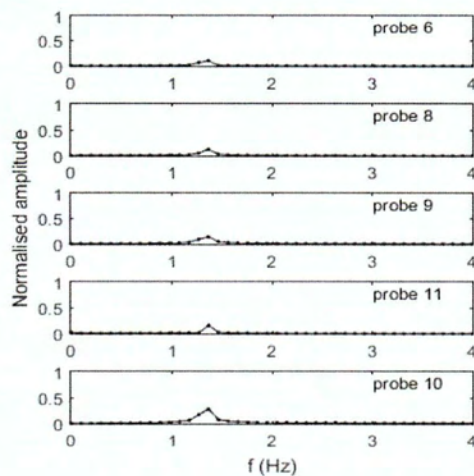


(γ)

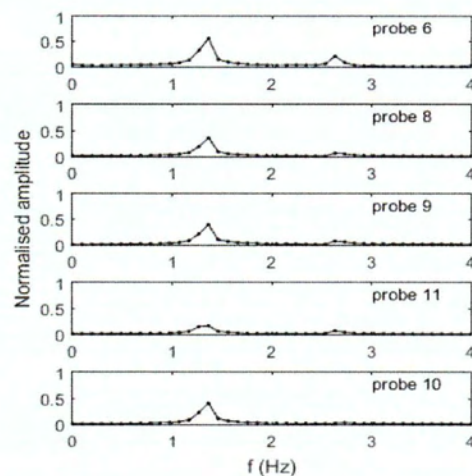
Σχήμα 2-59: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 53 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

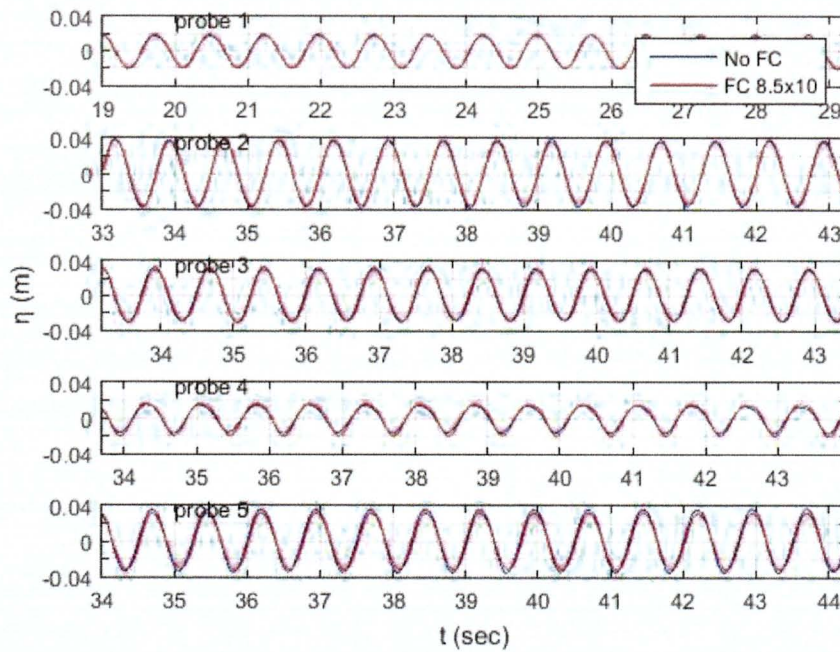


(β)

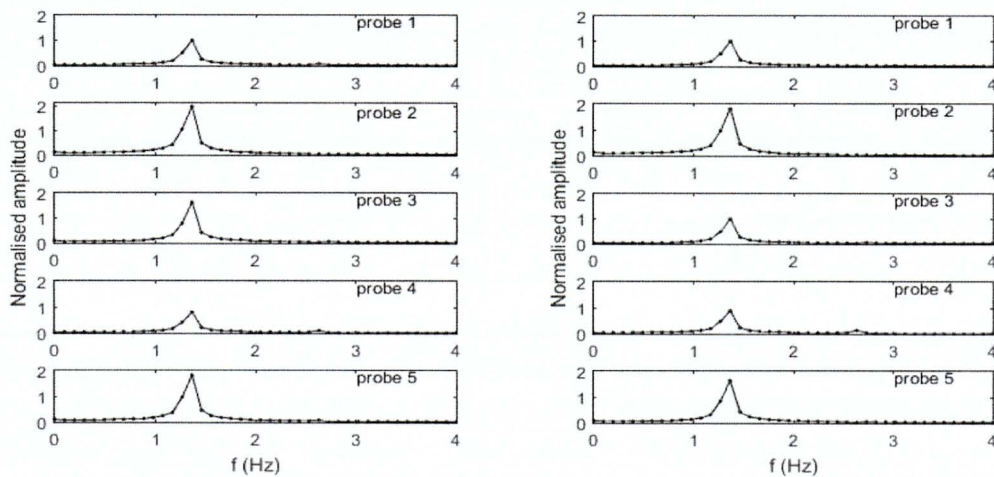


(γ)

Σχήμα 2-60: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 53 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



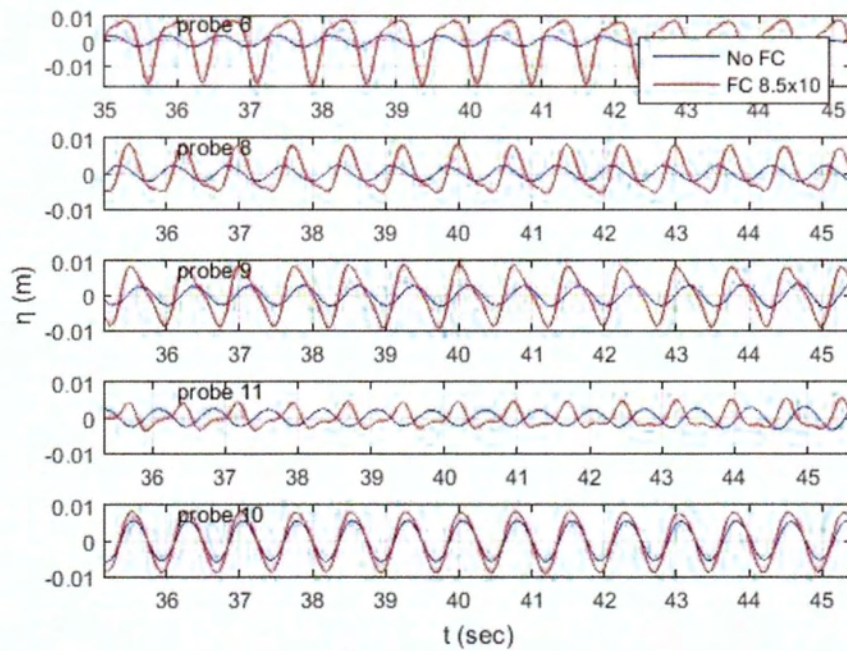
(α)



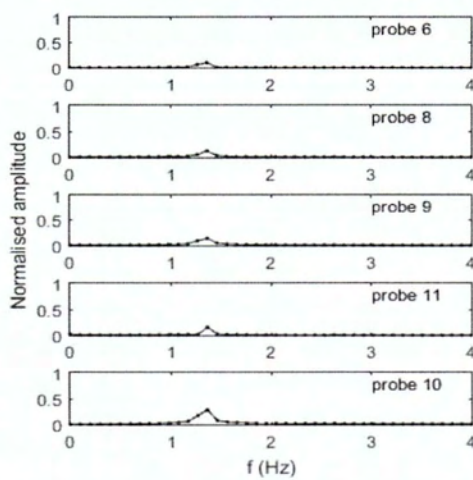
(β)

(γ)

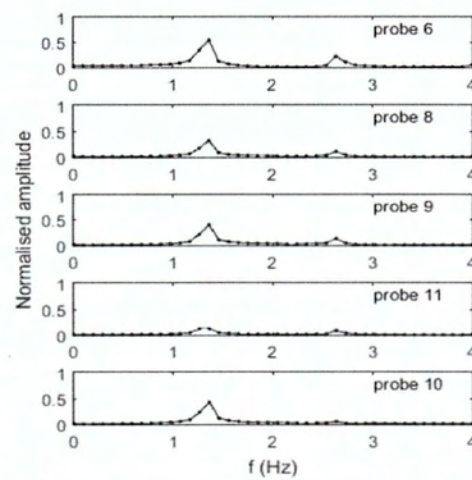
Σχήμα 2-61: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 58 για $bf=8.5\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανόψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

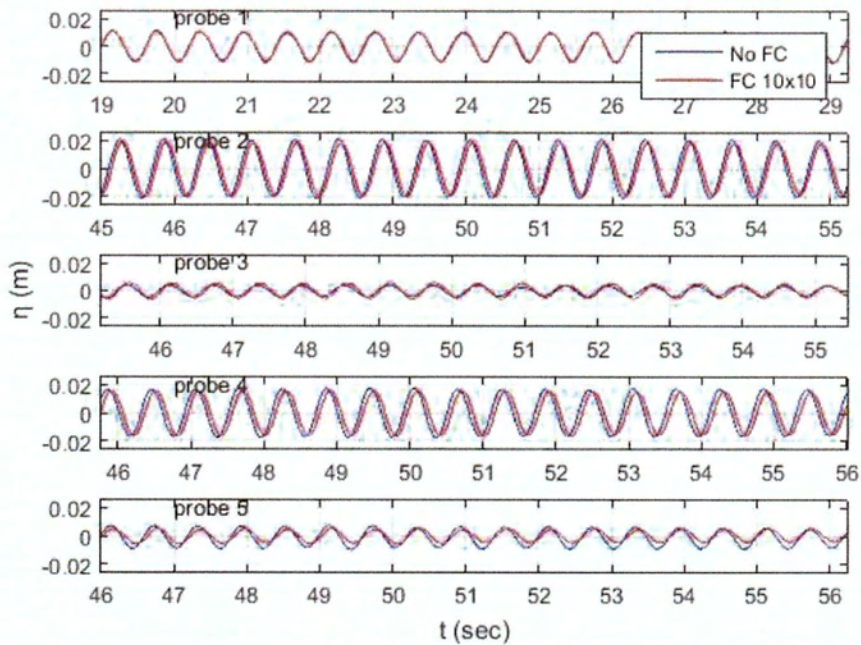


(β)

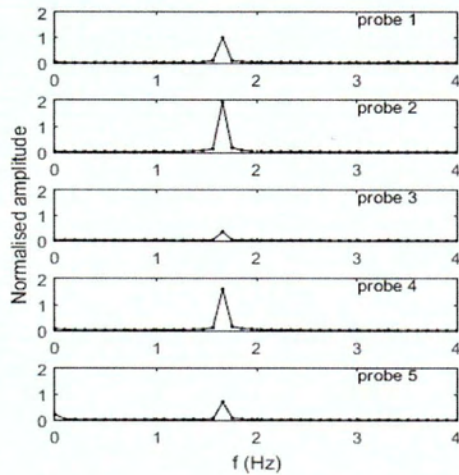


(γ)

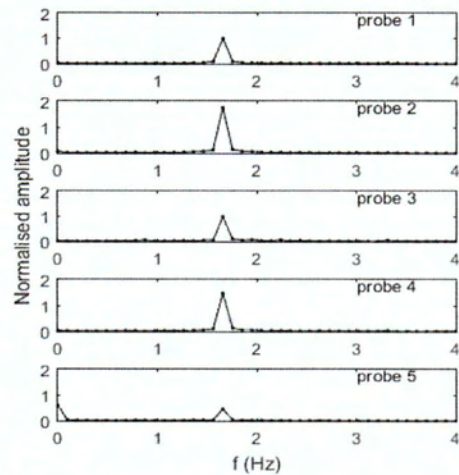
Σχήμα 2-62: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 51 για $bf=0$, $hf=0$ και 58 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.75sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανώψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

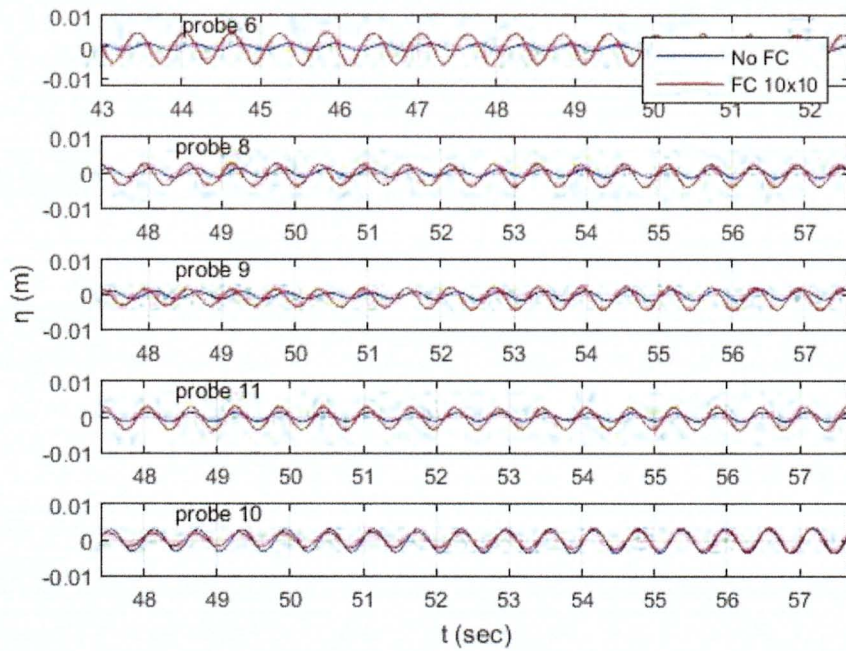


(β)

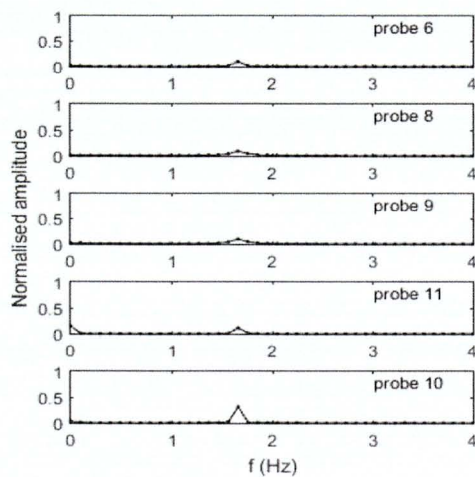


(γ)

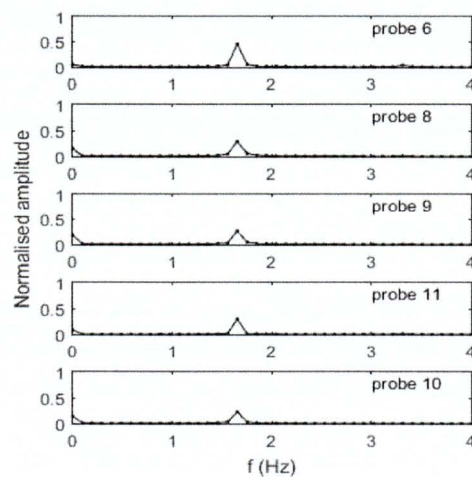
Σχήμα 2-63: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 39 για $bf=10\text{cm}$, $hf=10\text{cm}$, $T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

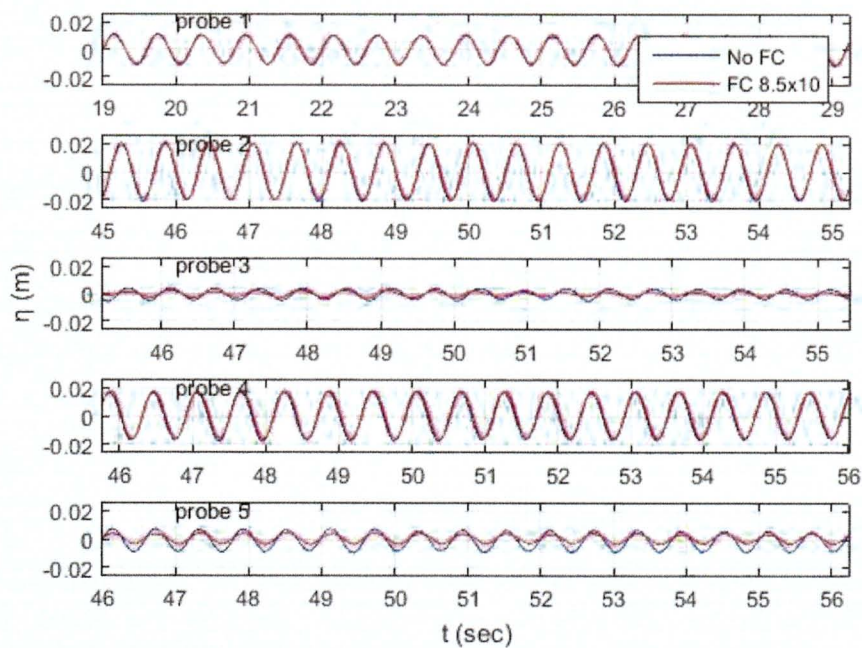


(β)

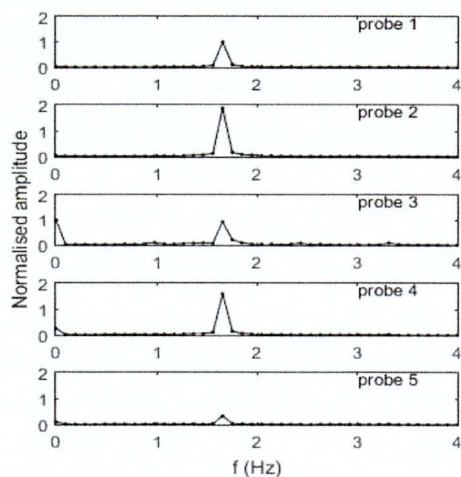


(γ)

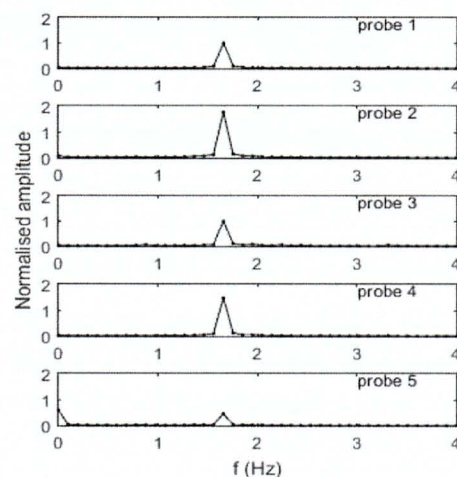
Σχήμα 2-64: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 39 για $bf=10cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)

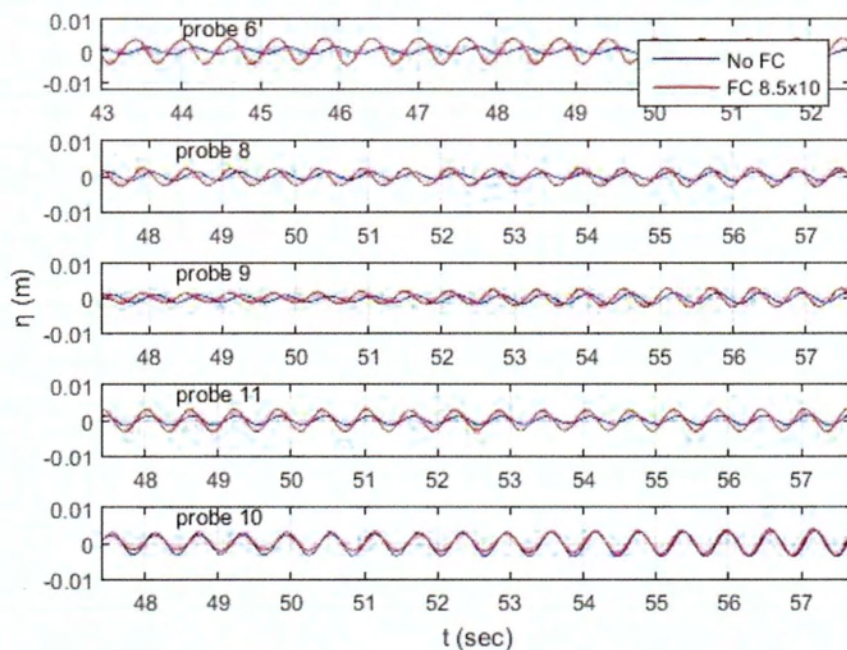


(β)

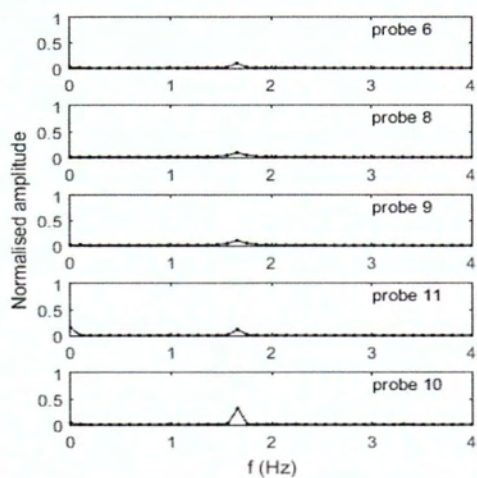


(γ)

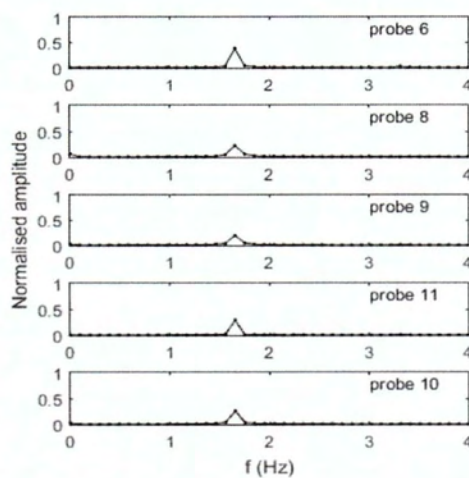
Σχήμα 2-65: Για τους μετρητές 1-5: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 44 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 2-66: Για τους μετρητές 6-11: Περίπτωση 37 για $bf=0$, $hf=0$ και 44 για $bf=8.5cm$, $hf=10cm$, $T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° , (α) καταγεγραμμένη ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας και (β), (γ) αντίστοιχα φάσματα πλάτους συχνοτήτων.

2.2 Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα διαγράμματα, αντιλαμβανόμαστε αρχικά ότι οι χρονοσειρές τείνουν να παρουσιάσουν μια γραμμικότητα των κυματικών μορφών. Για τους μετρητές 1-4 οι χρονοσειρές είναι περίπου οι ίδιες για κλειστό και ανοιχτό αγωγό, γεγονός που δείχνει πως δεν επηρεάζονται από την παρουσία του αγωγού σε μεγάλο βαθμό. Για τον μετρητή 5 ωστόσο, βλέπουμε πως σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις έχουμε μικρότερη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας όταν ο αγωγός είναι ανοιχτός, καταγράφει δηλαδή την επίδραση του αγωγού. Επίσης οφείλεται στην απότομη αλλαγή της βαθυμετρίας σε συνδυασμό με την απότομη στένωση. Όλες οι χρονοσειρές διαχωρίζονται σε μικρότερα κύματα στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη (μετρητές 6-11) μεταδιδόμενες προς την άλλη πλευρά της δεξαμενής.

Είναι γεγονός επίσης πως τα μεταδιδόμενα φάσματα είναι διαφορετικά από τα προσπίπτοντα. Είναι ευδιάκριτο το φαινόμενο της ανάπτυξης αρμονικών στην υπήνεμη πλευρά, όπως διαπιστώθηκε και από τους Tsoukala et al. (2014). Τα κύματα που μεταδίδονται μέσω του αγωγού ανανέωσης παράγουν δύο ή περισσότερα καινούρια κατάντη του αγωγού (π.χ. Σχήμα 2-15 (β), (γ) και 2-54 (β) και (γ)), όπου η αύξηση των αρμονικών 2^{ης} και 3^{ης} τάξης είναι προφανής. Η ανάπτυξη των αρμονικών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταφορά ενέργειας κατάντη του αγωγού. Συγκρίνοντας τα φάσματα για τους μετρητές κατάντη του κυματοθραύστη για κλειστό και ανοιχτό αγωγό, αντιλαμβανόμαστε τη διαφορά, καθώς όταν ο αγωγός είναι ανοιχτός είναι πιο έντονο το φαινόμενο της ανάπτυξης αρμονικών και έχουμε υψηλότερες συχνότητες, συνεπώς και μεταφορά ενέργειας. Υψηλότερες συχνότητες εντοπίζονται επίσης στα προσπίπτοντα και όχι στα μεταδιδόμενα φάσματα, στις οποίες είναι παρούσα

περισσότερη ενέργεια. Συγκρίνοντας όλες τις περιπτώσεις, παρατηρούμε πως για τους αγωγούς 2 και 4 τα φάσματα έχουν την τάση να παρουσιάζουν υψηλότερες συχνότητες σε σχέση με τους άλλους μετρητές (π.χ. Σχήμα 2-43 (β) και (γ)), οι οποίες πιθανόν οφείλονται σε ανακλάσεις.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι καταγραφές του μετρητή 6, ο οποίος βρίσκεται αμέσως μετά τον αγωγό ανανέωσης. Στον μετρητή 6 παρατηρείται μεγάλη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, η οποία οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη αρμονικής 2^{ης} τάξης. Επίσης, οφείλεται και σε μία σειρά από άλλα αίτια. Σημαντικό ρόλο κατέχει η συνεισφορά των περιθλώμενων κυματισμών αμέσως μετά την έξοδο από τον αγωγό. Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως ο αγωγός ανανέωσης λειτουργεί σαν ένα ανοιχτός αγωγός. Έτσι, κατά τη διέλευση των κυματισμών διαμέσου του αγωγού, αυξάνεται η ταχύτητα ροής καθώς μικραίνει απότομα το πλάτος. Δημιουργείται επιπλέον Stokes drift (A.D.D. Craik, 2005) λόγω της μη γραμμικότητας στο εσωτερικό του αγωγού. Πιθανή είναι η δημιουργία ρευμάτων εντός του αγωγού λόγω θραύσης των κυματισμών.

Γενικότερα, συμπεραίνουμε πως η ανάπτυξη των αρμονικών ανώτερης τάξης κατέχει δεσπόζουσα θέση σε όλες τις περιπτώσεις, και ότι το βασικό χαρακτηριστικό της ροής τέτοιου είδους κυματισμών που μεταδίδονται μέσω αγωγών ανανέωσης είναι πως η δομή αυτή λειτουργεί ως πηγή νέων κυματισμών. Η σύνθεση των νέων αυτών κυματισμών αποτελεί το κυματικό προφίλ στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη (Τσουκαλά και άλλοι, 2013). Λεπτομερέστερα εξετάζεται στο επόμενο κεφάλαιο ο τρόπος με τον οποίο η αλλαγή των κυματικών χαρακτηριστικών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού επηρεάζει το πρόβλημα.

Κεφάλαιο 3 Συντελεστής διείσδυσης κυματισμού K_t

Ένας τρόπος να ελέγξουμε αν εξασφαλίζεται η ποιότητα του νερού σε έργα όπου έχουν κατασκευαστεί αγωγοί ανανέωσης είναι ο χρόνος ανανέωσης, ο χρόνος δηλαδή που απαιτείται για την πλήρη ανανέωση του νερού της λιμενολεκάνης από την ανοιχτή θάλασσα. Ο χρόνος ανανέωσης συνδέεται με την ανεμογενή και την κυματογενή κυκλοφορία μέσα στο λιμένα και επομένως, όταν οι παλίρροιες είναι αμελητέες, μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τους μετασχηματισμούς των κυματισμών από την ανοιχτή θάλασσα κατά τη μετάδοσή τους διαμέσου των αγωγών ανανέωσης, και ειδικότερα, με το συντελεστή διείσδυσης των κυματισμών (transmission coefficient), K_t (Τσουκαλά και άλλοι, 2013). Ο συντελεστής διείσδυσης ορίζεται ως ο λόγος του μεταδιδόμενου ύψους κύματος, H_t , προς το προσπίπτον, H_i :

$$K_t = \frac{H_t}{H_i}$$

Ο συντελεστής διείσδυσης K_t είναι αδιάστατη παράμετρος και συνδέεται τόσο με τα κυματικά χαρακτηριστικά όσο και με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών χρησιμοποιώντας αδιάστατη, παραμετρική και παλινδρομική ανάλυση.

Ο συντελεστής διείσδυσης υπολογίστηκε για τέσσερις θέσεις κατάντη του αγωγού, ως ο λόγος του διεισδύοντος κυματισμού, αμέσως μετά τον αγωγό (μετρητής P6) και περαιτέρω κατάντη του αγωγού (μετρητές P8,P9,P11), προς το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού (μετρητής P1). Επισημαίνεται ότι επιλέχθηκαν για τους

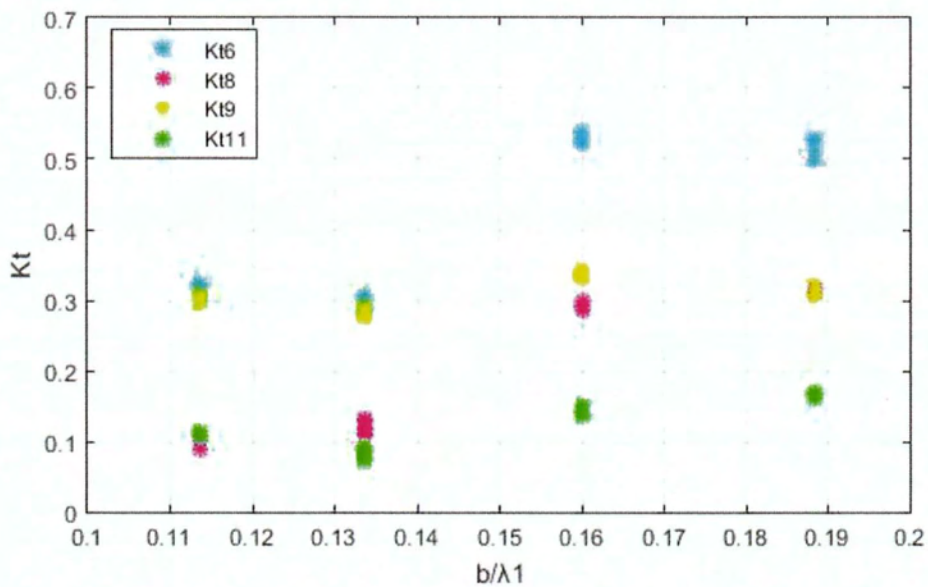
υπολογισμούς τα χαρακτηριστικά ύψη των κυμάτων H_s . Η ευαισθησία του συντελεστή διείσδυσης αναφορικά με διαστατές και αδιάστατες παραμέτρους εξετάστηκε εμπειριστικά με σκοπό να ορίσουμε ποιες παράμετροι θα μπορούσαν να προβλέψουν αποτελεσματικά τον συντελεστή διείσδυσης κυματισμού (Tsoukala, Moutzouris, 2009).

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, παρουσιάζονται στο Υποκεφάλαιο 3.1 τα διαγράμματα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει διάφορων παραμέτρων και καταλήγουμε σε συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των κυματικών χαρακτηριστικών και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού, και στο Υποκεφάλαιο 3.2 οι θεωρητικοί συντελεστές περίθλασης συγκρίνονται με αυτούς των πειραματικών μετρήσεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

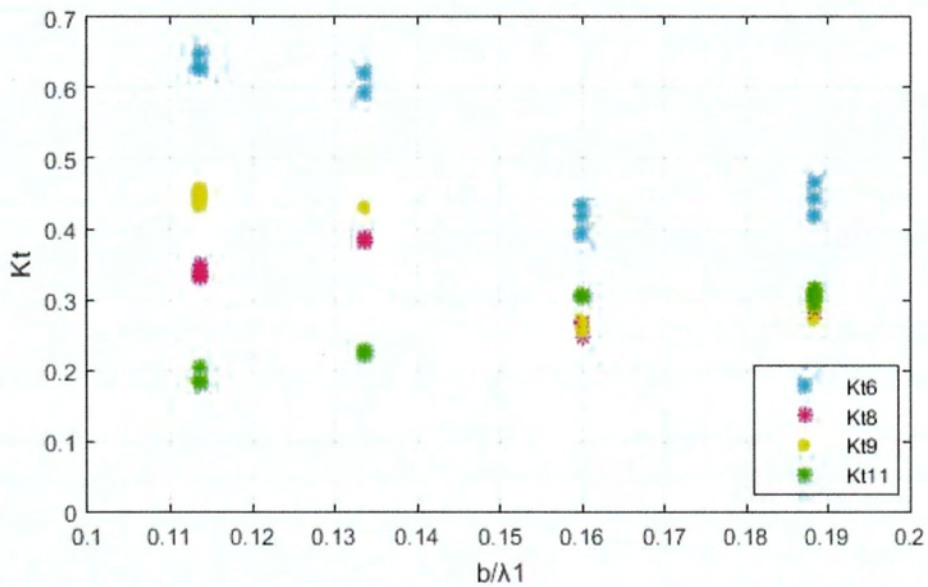
3.1 Συντελεστές διείσδυσης για τους μετρητές P6, P8, P9 και P11

Η ανάλυση του συντελεστή διείσδυσης και η επίδραση των διάφορων παραμέτρων (διαστατές και αδιάστατες) στον K_t εξετάστηκαν γραφικά. Σκοπός της ανάλυσης ήταν να ορίσουμε ποιες παράμετροι μπορούν να προβλέψουν πιο αποτελεσματικά τον συντελεστή διείσδυσης. Η διαφοροποίηση του συντελεστή διείσδυσης εξετάστηκε συναρτήσει των αδιάστατων παραμέτρων b/λ_1 και H_1/gT^2 , της περιόδου T και του πλάτους b .

Αρχικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής των τεσσάρων συντελεστών διείσδυσης K_{t6} , K_{t8} , K_{t9} , K_{t11} συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου b/λ_1 . Όπως είναι φυσικό εξετάζονται μόνο οι περιπτώσεις όπου ο αγωγός είναι ανοιχτός, καθώς για κλειστό η παράμετρος μηδενίζεται ($b=0$).



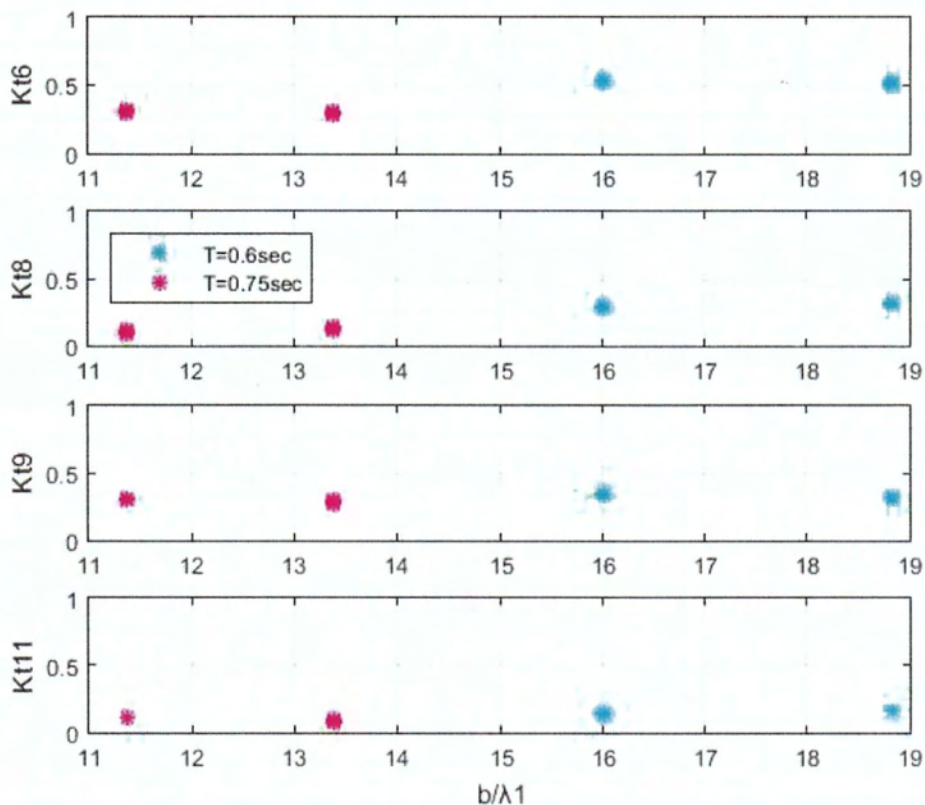
Σχήμα 3-1: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 90° .



Σχήμα 3-2: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 120° .

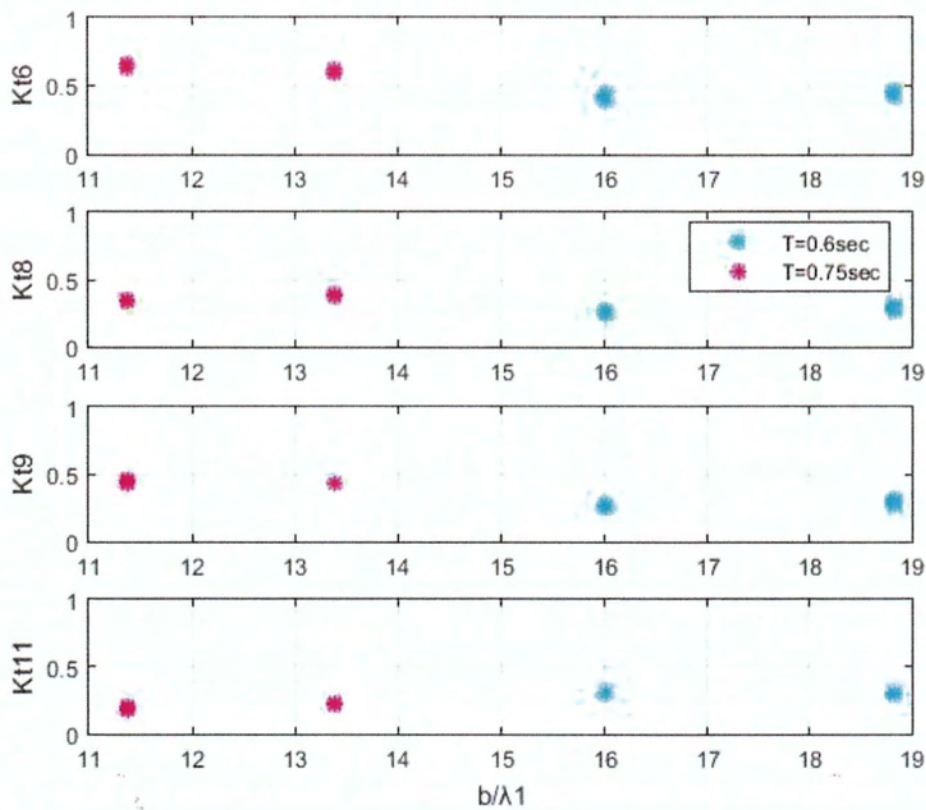
Παρατηρώντας τα δύο αυτά διαγράμματα, αντιλαμβανόμαστε πως υπάρχει μία τάση αύξησης των συντελεστών διείσδυσης καθώς ο λόγος b/λ_1 αυξάνεται για 90° και μια τάση μείωσης για 120° , άρα επηρεάζονται από το πλάτος του αγωγού b . Η διαφοροποίηση όμως της συμπεριφοράς των K_t για 90° και 120° , μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως η επίδραση της γωνίας είναι καταλυτική και δεν μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα τους συντελεστές.

Στη συνέχεια εξετάσαμε λεπτομερέστερα τα προηγούμενα διαγράμματα και είδαμε πως επηρεάζεται ο κάθε συντελεστής διείσδυσης ξεχωριστά ανάλογα με την περίοδο του κύματος.



Σχήμα 3-3: Διαγράμματα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου

b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 90° (διαφοροποίηση ανάλογα με την περίοδο T).

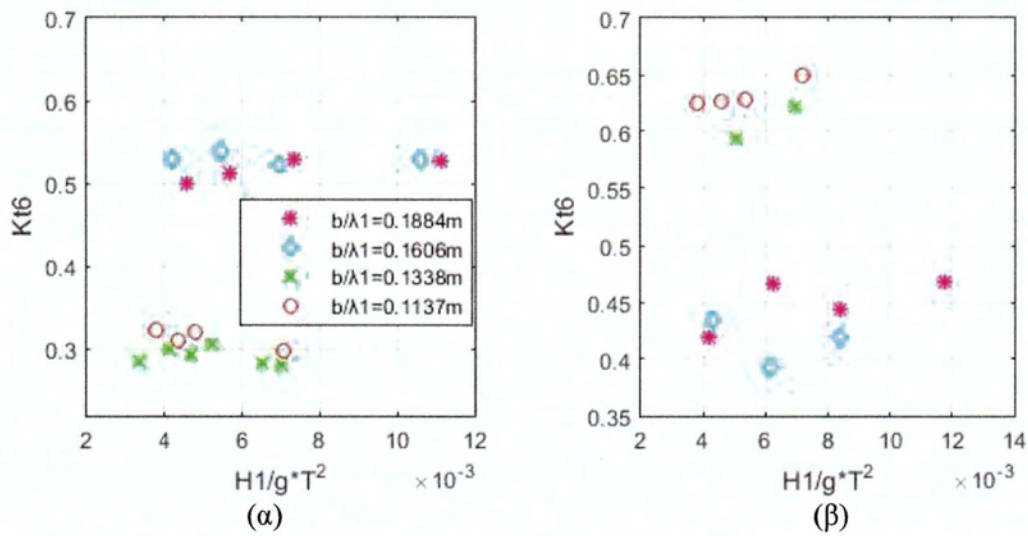


Σχήμα 3-4: Διαγράμματα των συντελεστών διείσδυσης συναρτήσει της παραμέτρου b/λ_1 για γωνία πρόσπτωσης 120° (διαφοροποίηση ανάλογα με την περίοδο T).

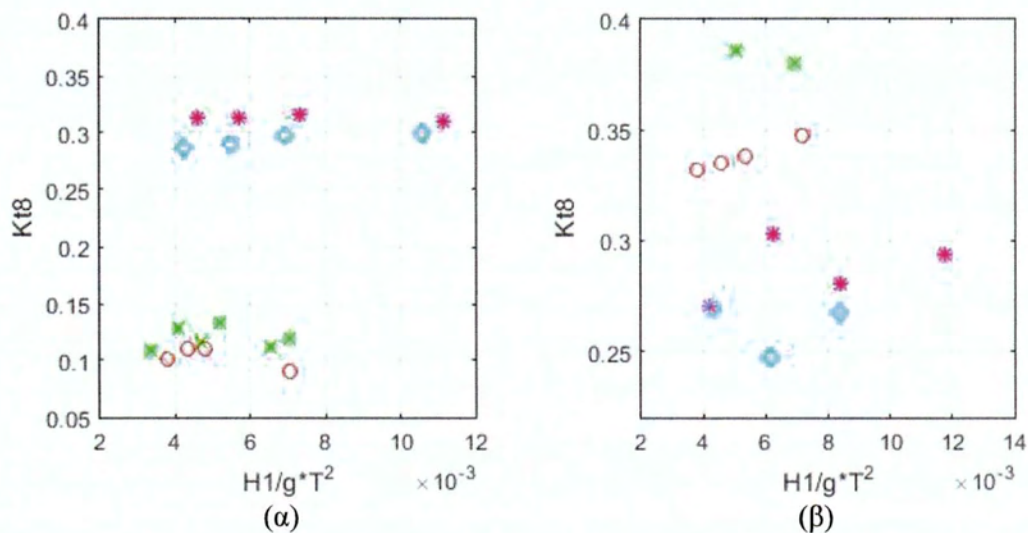
Παρατηρούμε πως για γωνία πρόσπτωσης 90° οι συντελεστές διείσδυσης έχουν την τάση να αυξάνονται για μικρότερη περίοδο, ενώ για γωνία πρόσπτωσης 120° έχουν την τάση να μειώνονται για μικρότερη περίοδο. Αντιλαμβανόμαστε ότι οι συντελεστές επηρεάζονται από την περίοδο του κύματος, αλλά και πάλι η επίδραση της γωνίας δεν μας επιτρέπει να έχουμε ένα σαφές συμπέρασμα για την επίδραση της περιόδου στους συντελεστές διείσδυσης.

Μελετήσαμε επίσης περιπτώσεις οι οποίες είχαν την ίδια τιμή του λόγου b/λ_1 και διαπιστώσαμε πώς μεταβάλλεται ο κάθε συντελεστής διείσδυσης συναρτήσει της αδιάστατης παραμέτρου H_1/gT^2 , όπως φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Εξετάστηκαν τα διαγράμματα μόνο για τους συντελεστές διείσδυσης των θέσεων 6 και 8, οι οποίοι όπως παρατηρήσαμε δίνουν πιο ακριβή συμπεράσματα.



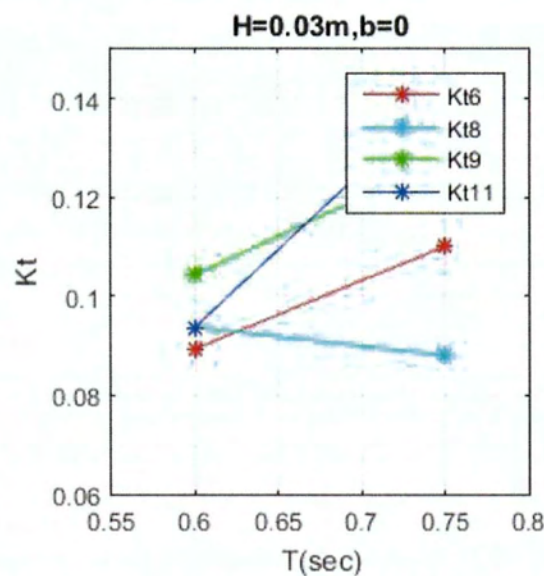
Σχήμα 3-5: Διαγράμματα του συντελεστή διείσδυσης K_{t6} συναρτήσει της παραμέτρου H_1/gT^2 για (α) γωνία πρόσπτωσης 90° και (β) γωνία πρόσπτωσης 120° .



Σχήμα 3-6: Διαγράμματα του συντελεστή διείσδυσης K_{t8} συναρτήσει της παραμέτρου H_1/gT^2 για (α) γωνία πρόσπτωσης 90° και (β) γωνία πρόσπτωσης 120° .

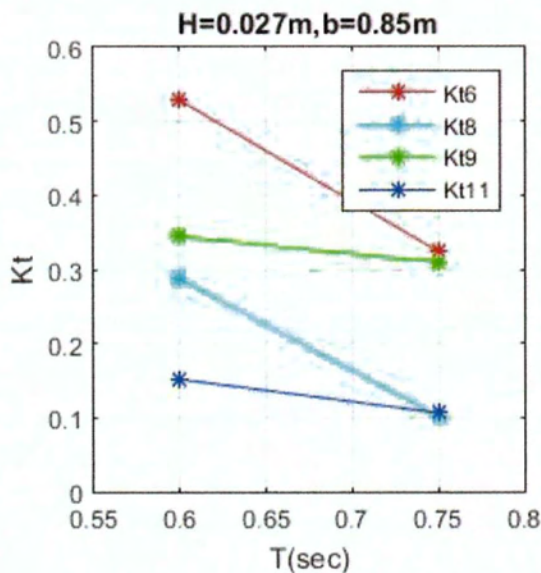
Τα παραπάνω διαγράμματα μας οδηγούν ξανά στο συμπέρασμα για την κυρίαρχη θέση που κατέχει το πλάτος του αγωγού ανανέωσης στο φαινόμενο. Όμως και πάλι δεν μπορούμε να έχουμε μια ξεκάθαρη αντίληψη για το πώς επηρεάζονται οι συντελεστές διείσδυσης, καθώς δεν παρουσιάζουν κοινή συμπεριφορά. Είναι γεγονός ότι υπάρχει μια τάση αύξησης για $b/\lambda_1=0.1884m$ $b/\lambda_1=0.1606m$, ωστόσο για $b/\lambda_1=0.1338m$ $b/\lambda_1=0.1137m$ τα δεδομένα δεν είναι αρκετά για να μας βοηθήσουν να προβλέψουμε τους συντελεστές διείσδυσης.

Στη συνέχεια εντοπίσαμε σημεία τα οποία είχαν περίπου το ίδιο προσπίπτον ύψος κύματος για πλάτος $b=0$, $b=8,5cm$ και $b=10cm$, και είδαμε πώς επηρεάζονται από την περίοδο του κύματος.



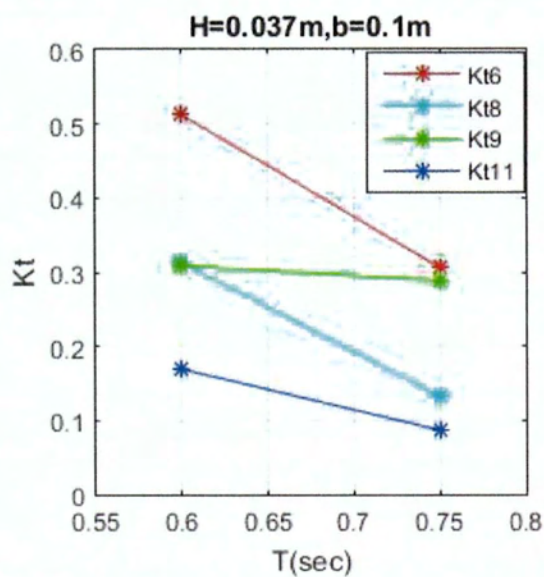
Σχήμα 3-7: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t συναρτήσει της περιόδου T για

$$H_1=0.03m \text{ και } b=0.$$



Σχήμα 3-8: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t συναρτήσει της περιόδου T για

$H_1=0.0027m$ και $b=0.85m$.

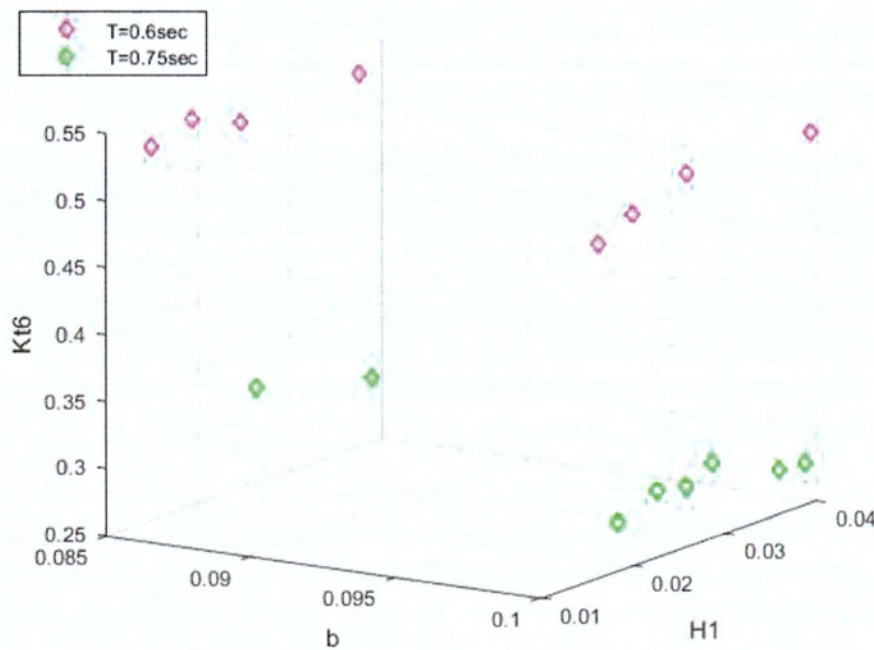


Σχήμα 3-9: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t συναρτήσει της περιόδου T για

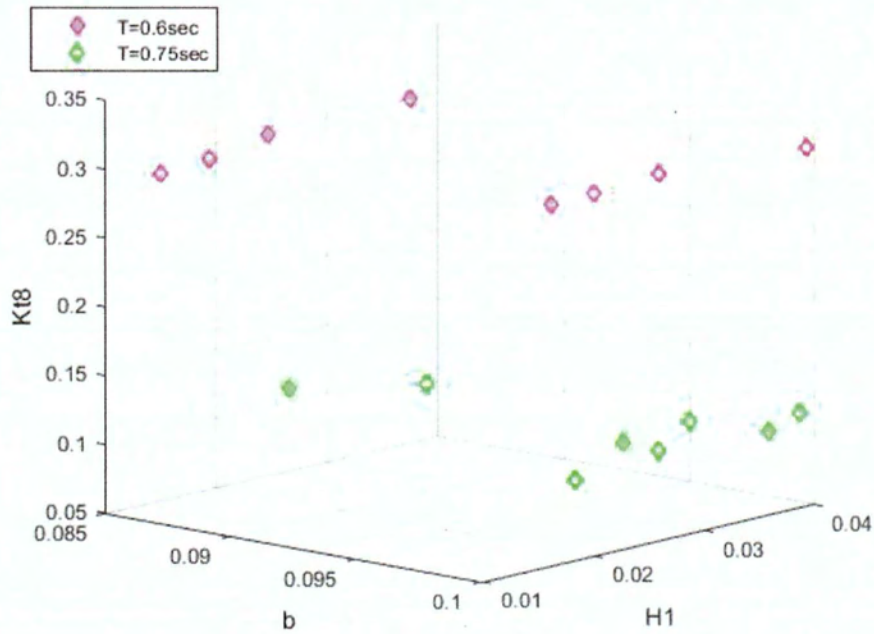
$H_1=0.037m$ και $b=0.1m$.

Παρατηρούμε πως όταν ο αγωγός είναι κλειστός ($b=0$) οι συντελεστές διείσδυσης αυξάνονται καθώς αυξάνεται η περίοδος. Περιμέναμε να συμβεί αυτό, καθώς κυριαρχεί το φαινόμενο της περίθλασης. Στις δύο περιπτώσεις όπου ο αγωγός είναι ανοιχτός ($b=0.85\text{m}$, $b=0.1\text{m}$) οι συντελεστές διείσδυσης μειώνονται καθώς η περίοδος αυξάνει. Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν πόσο επηρεάζονται οι συντελεστές από την περίοδο των κυματισμών, αλλά και από τις αλλαγές στο πλάτος του αγωγού.

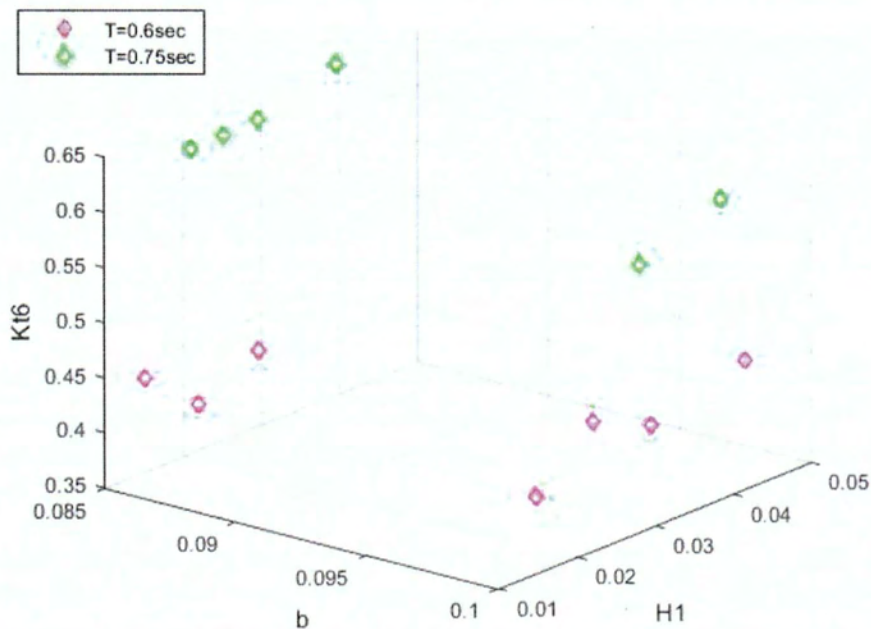
Έγινε μία προσπάθεια να κατανοήσουμε την επιρροή του πλάτους του αγωγού ταυτόχρονα με τις μεταβολές στο ύψος των κυματισμών στους συντελεστές διείσδυσης. Όπως φαίνεται στα τριδιάστατα διαγράμματα που ακολουθούν, εξετάστηκαν μόνο οι περιπτώσεις των συντελεστών K_{t6} και K_{t8} .



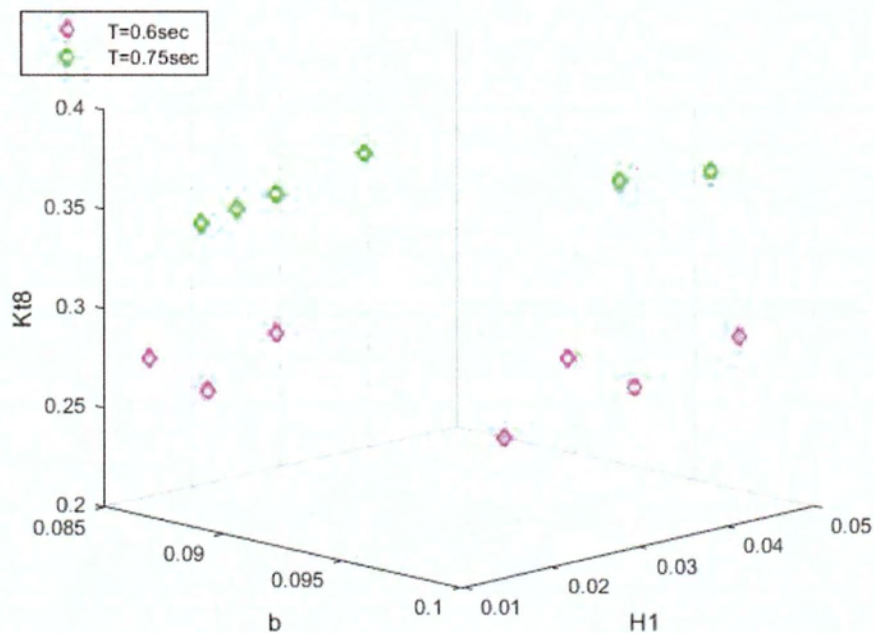
Σχήμα 3-10: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης K_{t6} συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 90° .



Σχήμα 3-11: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης K_{t8} συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 120° .



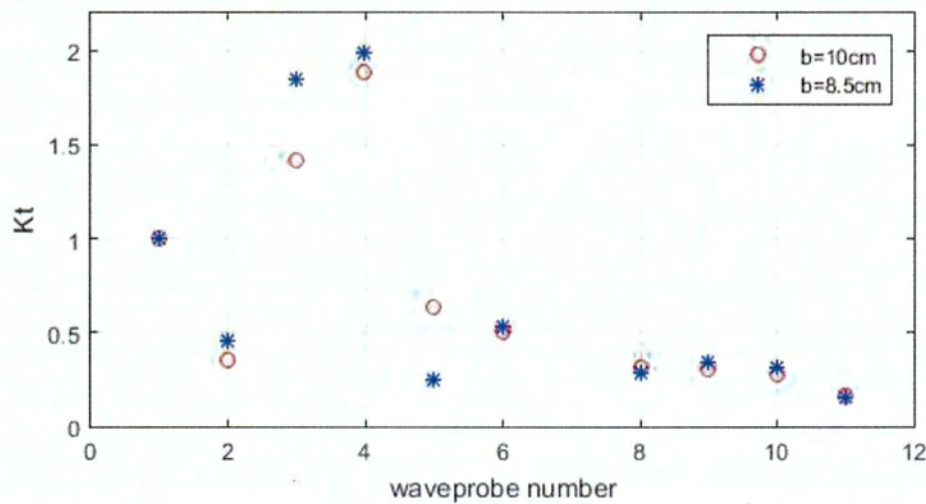
Σχήμα 3-12: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης K_{t6} συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 90° .



Σχήμα 3-13: Διάγραμμα του συντελεστή διείσδυσης $Kt\delta$ συναρτήσει του πλάτους b και του προσπίπτοντος ύψους κύματος H_1 για γωνία πρόσπτωσης 120° .

Συμπεραίνουμε, με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, πως η επιρροή του ύψους κύματος είναι μικρότερη σε σχέση με την επιρροή του πλάτους. Τα πλάτος κατέχει και πάλι δεσπόζουσα θέση στην επίδραση των συντελεστών διείσδυσης. Η τριδιάστατη μορφή των διαγραμμάτων μας βοηθά να διαμορφώσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για την επίδραση των παραγόντων στο πρόβλημα.

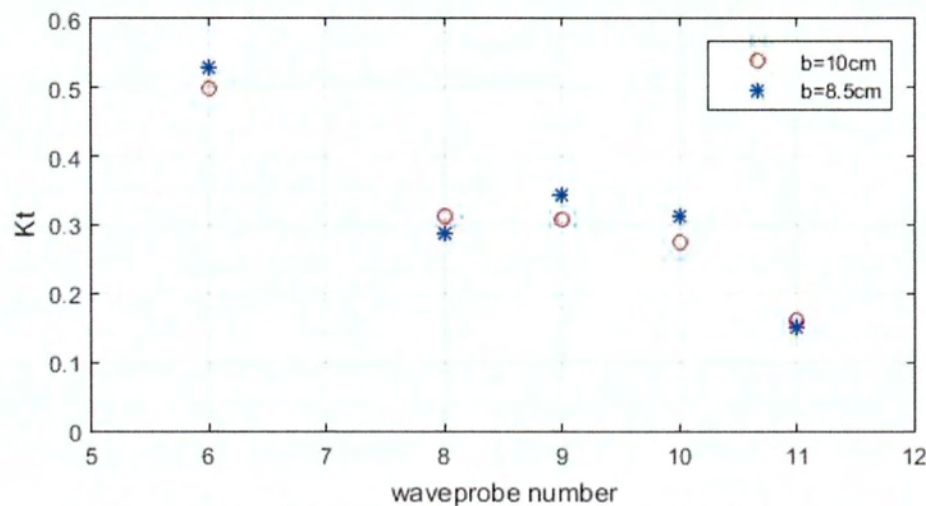
Τέλος, θέλοντας να έχουμε μια γενικότερη εικόνα για την επίδραση των δύο διαφορετικών πλατών $b=8.5\text{cm}$ και $b=10\text{cm}$, υπολογίσαμε τους συντελεστές διείσδυσης για όλες τις θέσεις των μετρητών και συγκρίναμε δύο περιπτώσεις με διαφορετικό πλάτος για διαφορετικές περιόδους και γωνίες πρόσπτωσης.



Σχήμα 3-14: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t σε κάθε θέση μετρητή.

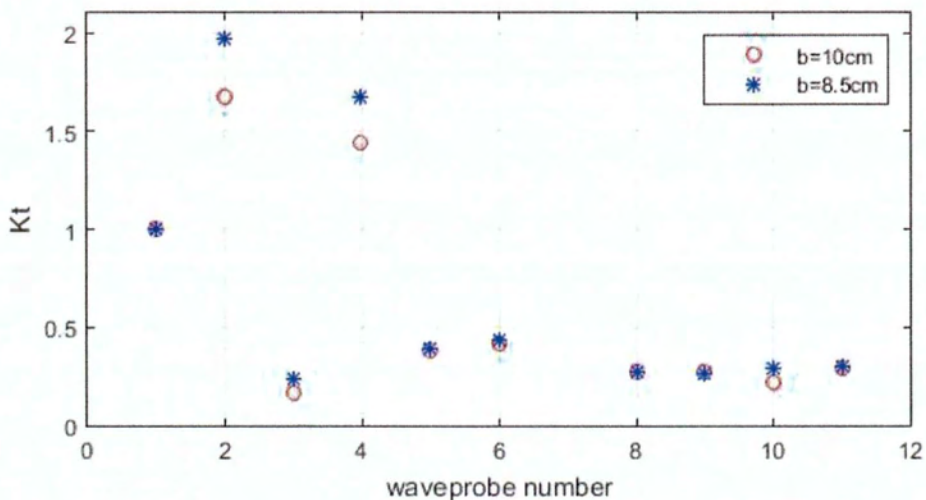
Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5\text{cm}$ ($H_1=1.62\text{cm}$) και $b=10\text{cm}$ ($H_1=1.49\text{cm}$),

$T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° .



Σχήμα 3-15: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-14) για τους

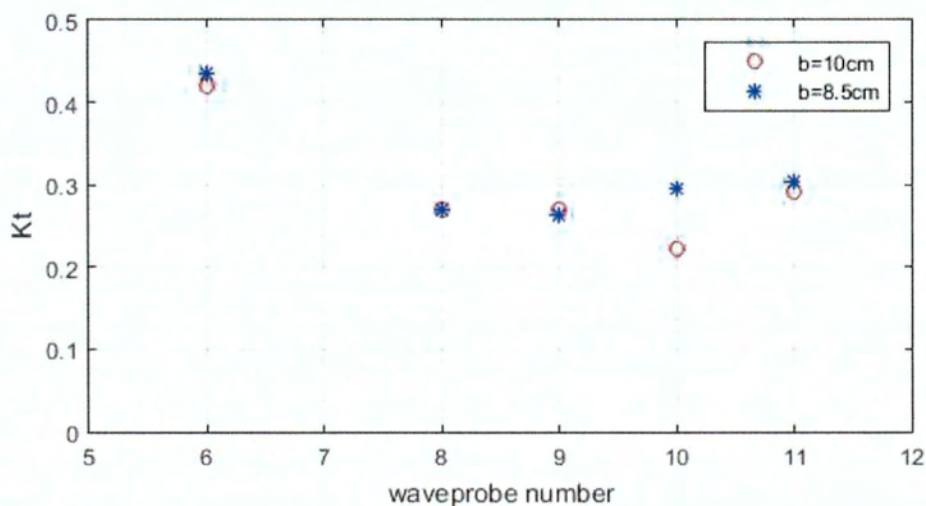
μετρητές 6-11 ($T=0.6\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90°).



Σχήμα 3-16: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης Kt σε κάθε θέση μετρητή.

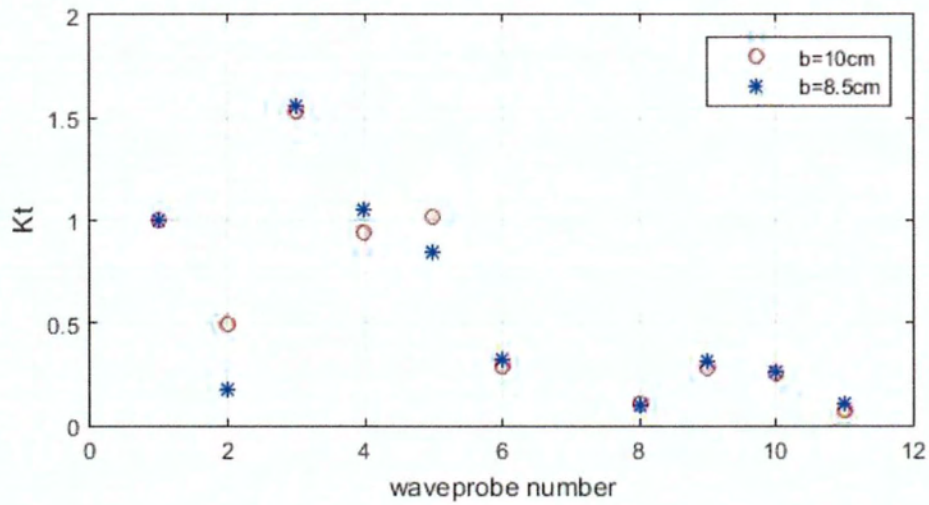
Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5cm$ ($H_1=1.52cm$) και $b=10cm$ ($H_1=1.48cm$),

$T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120° .



Σχήμα 3-17: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-16) για τους

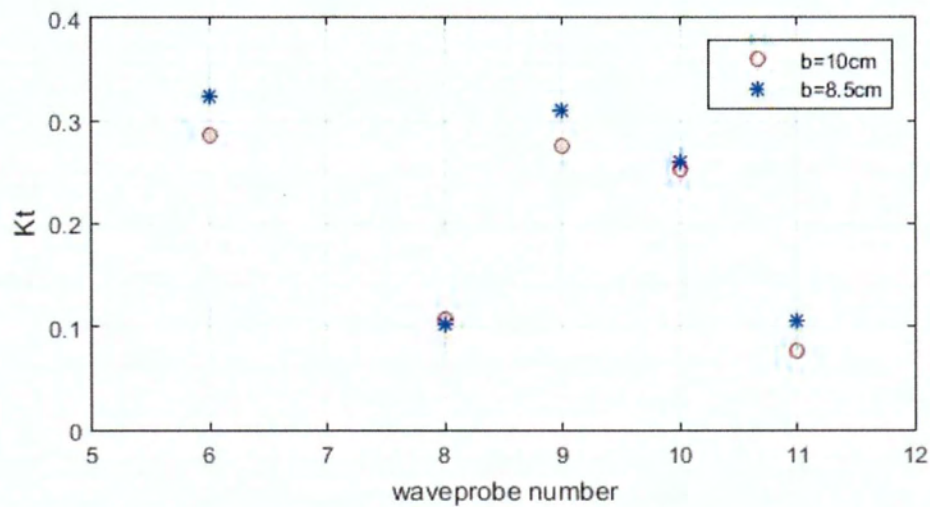
μετρητές 6-11 ($T=0.6sec$, γωνία πρόσπτωσης 120°).



Σχήμα 3-18: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t σε κάθε θέση μετρητή.

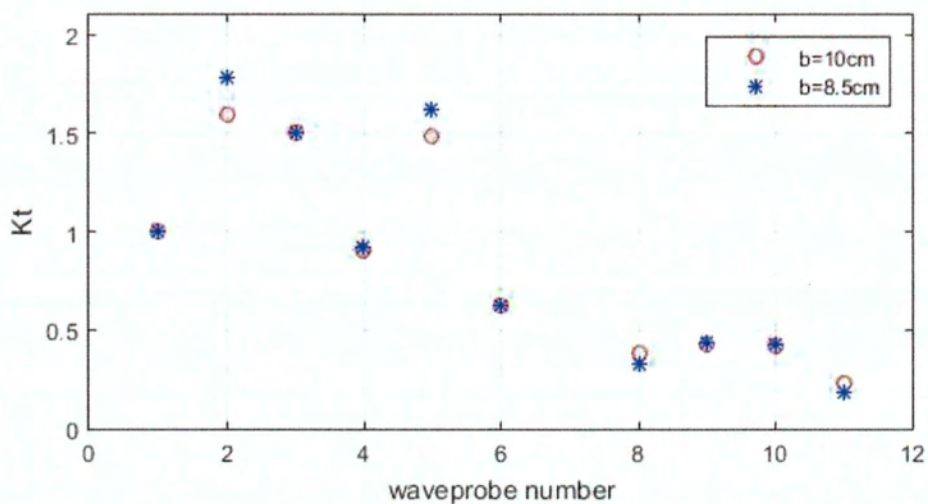
Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5\text{cm}$ ($H_1=2.07\text{cm}$) και $b=10\text{cm}$ ($H_1=1.85\text{cm}$),

$T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90° .



Σχήμα 3-19: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-18) για τους

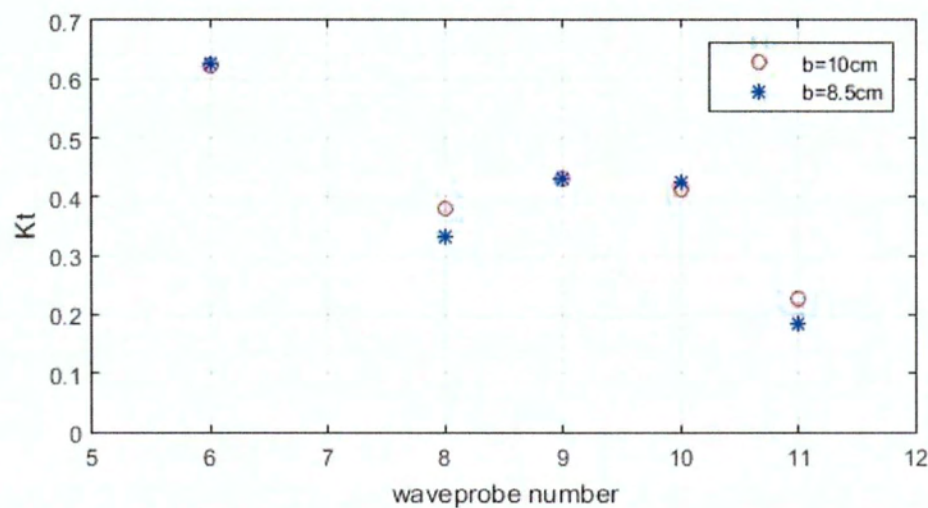
μετρητές 6-11 ($T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 90°).



Σχήμα 3-20: Διάγραμμα των συντελεστών διείσδυσης K_t σε κάθε θέση μετρητή.

Διαφοροποίηση για πλάτη $b=8.5\text{cm}$ ($H_1=2.11\text{cm}$) και $b=10\text{cm}$ ($H_1=3.84\text{cm}$),

$T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120° .



Σχήμα 3-21: Λεπτομέρειες του προηγούμενου διαγράμματος (Σχήμα 3-20) για τους

μετρητές 6-11 ($T=0.75\text{sec}$, γωνία πρόσπτωσης 120°).

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των Belibassakis et al. (2013) για τη σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με το προτεινόμενο τριδιάστατο αριθμητικό μοντέλο, συμπεραίνουμε πως έχουν παρόμοια μορφή. Επιβεβαιώνεται λοιπόν η χρήση του μοντέλου για γραμμικούς κυματισμούς.

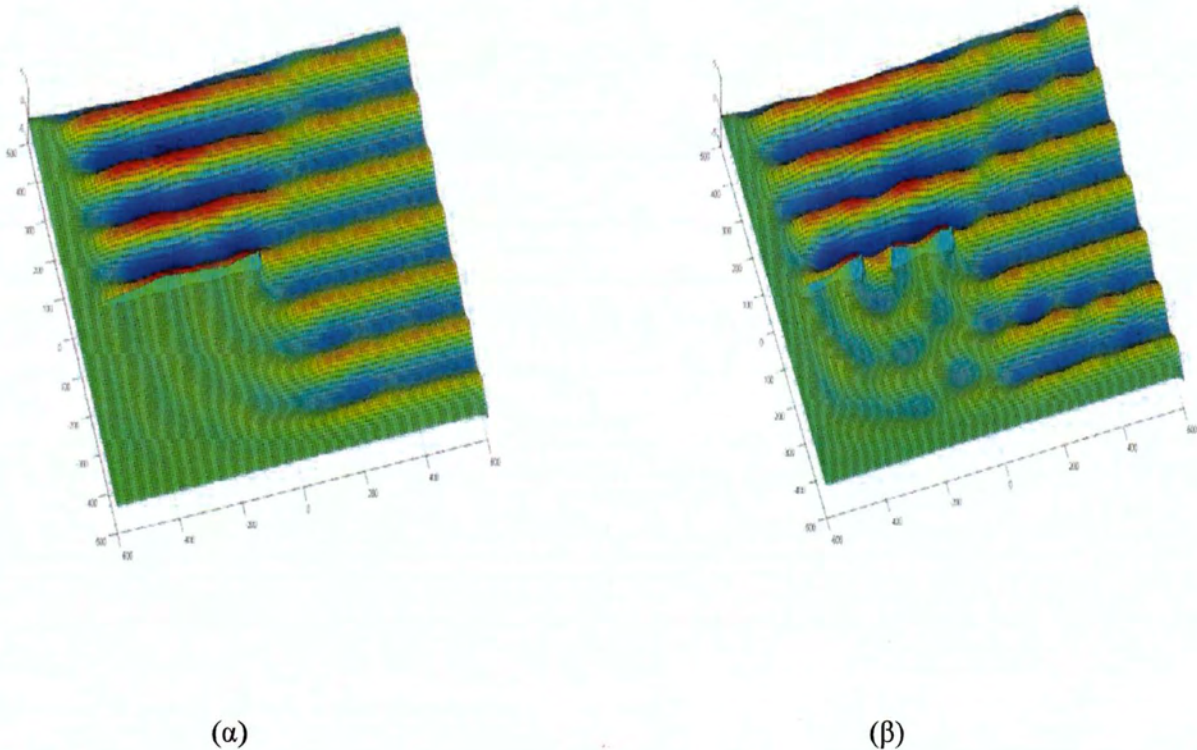
Γενικότερα, εξετάζουμε ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο στο οποίο υπεισέρχονται ποικίλες παράμετροι και καθιστούν δύσκολη την πρόβλεψη των συντελεστών διείδυσης. Επίσης, τα δεδομένα δεν είναι επαρκή, ώστε να μας οδηγήσουν σε σαφή συμπεράσματα. Είναι εμφανές όμως, λαμβάνοντας υπόψη τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν σε αυτό το υποκεφάλαιο, πως τόσο το πλάτος του αγωγού ανανέωσης, όσο και η περίοδος των κυματισμών και η γωνία πρόσπτωσης ασκούν μεγάλη επιρροή στους συντελεστές διείδυσης.

3.2 Θεωρητικοί συντελεστές περίθλασης

Οι μετασχηματισμοί των κυματισμών μέσα από ανοίγματα κυριαρχούνται από τις συνέπειες της τριδιάστατης περίθλασης εξαιτίας της απότομης αλλαγής της βαθυμετρίας (K.A. Belibassakis, V.K. Tsoukala, V. Katsardi , 2013).

Όταν οι κυματισμοί κατά τη μετάδοσή τους συναντήσουν τον κυματοθραύστη, τότε παρατηρείται καμπύλωση των κορυφογραμμών και μεταδίδονται στην κατάντη πλευρά υπό τη μορφή ομόκεντρων κυκλικών τόξων συνεχώς ελαττωμένου ύψους.

Ενδεικτικά, για να γίνει κατανοητό το φαινόμενο της περίθλασης, στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα υπολογισμού του κυματικού πεδίου υπό την παρουσία ενός ευθύγραμμου κυματοθραύστη για κάθετα προσπίπτοντες κυματισμούς (K.A. Belibassakis, V.K. Tsoukala, V. Katsardi, 2013).



Σχήμα 3-22: Κυματικό πεδίο υπολογιζόμενο σε παράκτια περιοχή υπό την παρουσία
κυματοθραύστη: (α) με και (β) χωρίς άνοιγμα.

Δεδομένου του φαινομένου της τριδιάστατης περίθλασης, έγινε λοιπόν υπολογισμός των θεωρητικών συντελεστών περίθλασης με τη σχέση των Penny and Price (1944) και για τις τέσσερις θέσεις των μετρητών, για κλειστό αγωγό ανανέωσης (για γωνία πρόσπτωσης 60°). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

α/α Πειράματος	P6		P8		P9		P11					
	Kt6	Kd6	Kt8	Kd8	Kt9	Kd9	Kt11	Kd11				
33	0.107	0.165	0.088	0.148	0.113	0.172	0.119	0.163				
43	0.434		0.27		0.263		0.302					
35	0.108		0.091		0.119		0.133					
45	0.419		0.267		0.27		0.307					
36	0.105		0.087		0.108		0.131					
41	0.467		0.294		0.294		0.316					
37	0.113		0.126		0.14		0.126					
44	0.393		0.246		0.251		0.306					
48	0.119		0.195		0.119		0.182		0.148	0.23	0.138	0.24
55	0.626				0.332				0.431		0.185	
49	0.126	0.121		0.148	0.131							
56	0.626	0.335		0.447	0.18							
50	0.126	0.122		0.149	0.146							
57	0.628	0.338		0.442	0.182							
51	0.122	0.122		0.163	0.156							
53	0.622	0.38		0.43	0.226							

Πίνακας 3-1: Πειραματικοί και θεωρητικοί συντελεστές περίθλασης για τις θέσεις των μετρητών 6,8,9 και 11.

Γίνεται σύγκριση σε κάθε περίπτωση με τους πειραματικούς συντελεστές διείσδυσης K_t για κλειστό και για ανοιχτό αγωγό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1.

Παρατηρείται πως οι θεωρητικοί συντελεστές περίθλασης είναι αρκετά κοντά στους πειραματικούς. Οι αποκλίσεις πιθανώς να οφείλονται σε παραδοχές κατά τη θεωρητική κατάστρωση των σχέσεων περίθλασης. Επίσης, οι συντελεστές αυξάνουν για μεγαλύτερη περίοδο (Περιπτώσεις 48-51, $T=0.75$ sec). Αντιλαμβανόμαστε πως οι πειραματικοί συντελεστές όταν ο αγωγός είναι ανοιχτός είναι μεγαλύτεροι, το οποίο ήταν αναμενόμενο λόγω της συμβολής των δύο περιθλάσεων (π.χ. Σχήμα 3-22 β).

Επισημαίνεται επίσης πως κατά τον υπολογισμό των συντελεστών διείσδυσης για τις πειραματικές μετρήσεις λαμβάνεται υπόψη ο προσπίπτων κυματισμός H_1 (στη θέση του μετρητή 1), ενώ κατά τον υπολογισμό των θεωρητικών συντελεστών περίθλασης λαμβάνεται υπόψη το $H_{incident}$ στην ακμή του κυματοθραύστη, το οποίο είναι γραμμικό και περιέχει ανακλάσεις και τριβές. Πιθανόν να οφείλεται και σ' αυτό η διαφοροποίηση των τιμών στους πειραματικούς και τους θεωρητικούς συντελεστές.

Κεφάλαιο 4 Εναλλακτικός υπολογισμός του συντελεστή διείσδυσης κυματισμού K_t

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο συντελεστής διείσδυσης σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των κυματισμών, με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αγωγών ανανέωσης, καθώς επίσης και με το βάθος του νερού, και υπολογίζεται από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων ως ο λόγος του μεταδιδόμενου ύψους κύματος διαμέσου του αγωγού ανανέωσης προς το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού. Η διεξαγωγή όμως εργαστηριακών πειραμάτων είναι αρκετά δαπανηρή και χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό προτείνεται η χρήση ημι-εμπειρικών εξισώσεων που βασίζονται σε ήδη υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις, ή η χρήση αλγοριθμικών μοντέλων όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ), εμπνευσμένων από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα.

Το υπόλοιπο κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής. Στο Υποκεφάλαιο 4.1 περιγράφονται λεπτομέρειες σχετικά με μία εμπειρική εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή διείσδυσης K_t που πρότειναν οι Tsoukala et al. (2010). Στο Υποκεφάλαιο 4.2 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εξίσωση με τους πειραματικούς συντελεστές για τους μετρητές 8,9 και 11.

4.1 Εμπειρικός τύπος υπολογισμού του συντελεστή διείσδυσης Tsoukala et al. 2010

Ο συντελεστής διείσδυσης είναι δυνατό να υπολογιστεί εναλλακτικά με τη χρήση ημι-εμπειρικών εξισώσεων που βασίζονται σε ήδη υπάρχουσες πειραματικές μετρήσεις, και όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα χρήσης τέτοιων εξισώσεων προτείνεται η χρήση εργαλείων όπως τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) που συνδυάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα με κάποιο είδος σφάλματος διόρθωσης.

Είναι σημαντικό να επισημανθεί πως ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο μπορεί να παρομοιαστεί με ένα μαθηματικό μοντέλο που εκπαιδεύεται, αποθηκεύοντας εμπειρική γνώση ώστε να μπορεί να προσαρμόζεται σε παρόμοιες εφαρμογές. Τα ΤΝΔ προσομοιώνουν τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, τον τρόπο δηλαδή που αυτός επεξεργάζεται και αποθηκεύει πληροφορίες (βλ. π.χ. F.U. Dowla, L.L. Rogers, 2003).

Οι Tsoukala et al. (2010), λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη διώρυγα κυματισμών στο Ε.Λ.Ε. , πρότειναν μία έκφραση για το συντελεστή διείσδυσης κυματισμού K_t , μέσω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διατομής του αγωγού ανανέωσης και των χαρακτηριστικών του προσπίπτοντος κυματισμού. Η έκφραση, η οποία προκύπτει μέσω γραμμικής παλινδρόμησης, έχει την ακόλουθη μορφή (V.K. Tsoukala, Th. Pyrgiri, M. Chondros, V.Katsardi, 2015):

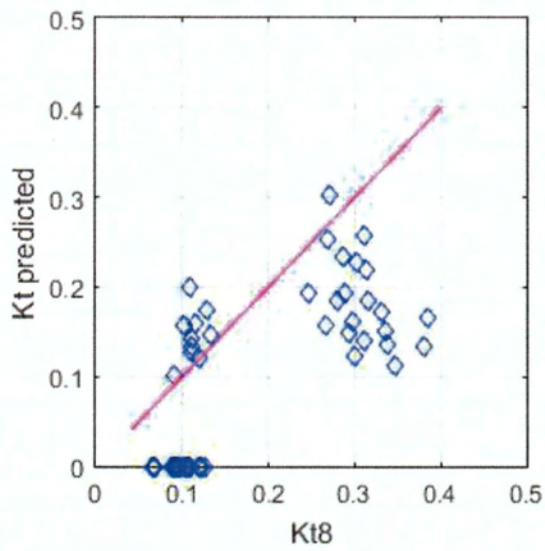
$$K_t = \frac{H_t}{H_i} = \left(0.135 \frac{b}{H_i} + 0.048 \frac{2h_s}{H_i} - 0.030 \frac{h_f}{H_i} - 0.026 \frac{d}{H_i} + 0.036 \frac{l}{H_i} \right) * \mu^{-0.681}$$

όπου:

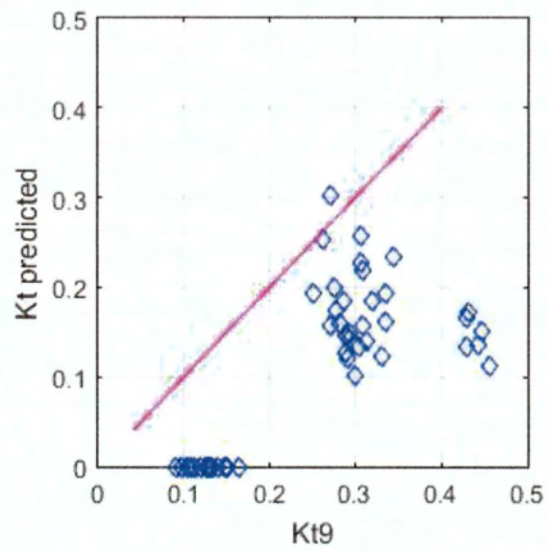
- h_f η απόσταση του πυθμένα του αγωγού ανανέωσης από τον πυθμένα της θάλασσας στα ανάντη,
- μ αδιάστατη παράμετρος $\left(\mu = \sin\phi / \sqrt{\frac{2\pi H_i}{gT^2}}\right)$,
- b το πλάτος του αγωγού ανανέωσης,
- h_s το μισό του ύψους του αγωγού ανανέωσης,
- d το βάθος του νερού,
- l το μήκος του αγωγού ανανέωσης,
- T η περίοδος του κύματος,
- H_i το ύψος του προσπίπτοντος κυματισμού.

4.2 Αποτελέσματα

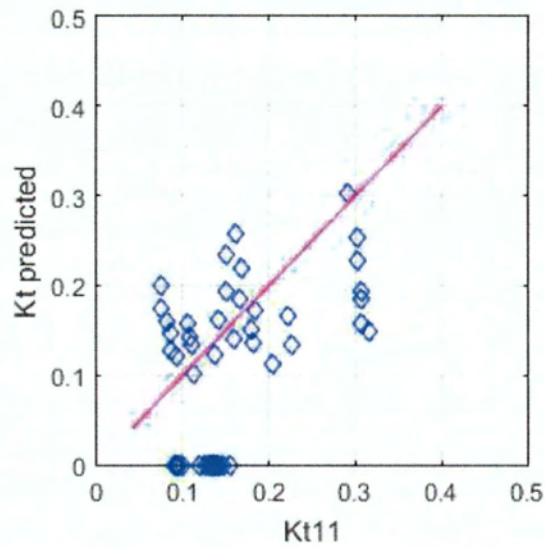
Κάνοντας χρήση της εμπειρικής εξίσωσης υπολογίσαμε τον συντελεστή διείσδυσης K_t για όλες τις περιπτώσεις. Στο διάγραμμα (Σχήμα 4.1) που ακολουθεί γίνεται σύγκριση αυτού με τους συντελεστές διείσδυσης K_{t8} , K_{t9} , K_{t11} όπως αυτοί υπολογίστηκαν από τις πειραματικές μετρήσεις. Δεν έγινε σύγκριση με αυτούς του μετρητή 6, καθώς αυτός βρίσκεται αμέσως μετά τον αγωγό ανανέωσης και όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 επηρεάζεται από ποικίλους παράγοντες.



(α)



(β)



(γ)

Σχήμα 4-1: Διαγράμματα σύγκρισης αριθμητικών συντελεστών διεύθυνσης με τους πειραματικούς για τους μετρητές: (α) 8, (β) 9, (γ) 11.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα (Σχήμα 4.1) , συμπεραίνουμε πως η πιο πάνω εμπειρική εξίσωση δεν περιγράφει επαρκώς τα αποτελέσματα των συντελεστών διεύθυνσης για τις πειραματικές μετρήσεις. Δεδομένου όμως της πολυπλοκότητας του φαινομένου κατά την τριδιάστατη διάδοση της κυματικής διαταραχής μέσω του αγωγού ανανέωσης, παρουσιάζει αποκλίσεις. Είναι δύσκολο να προβλέψει τους συντελεστές διεύθυνσης με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς η εξίσωση είναι εμπειρική και έχει βασιστεί κυρίως στο διδιάστατο φυσικό μοντέλο. Πιθανώς στο μέλλον να υπάρξει τροποποίηση της εξίσωσης, λαμβάνοντας υπόψη σε μεγαλύτερο βαθμό τις ποικίλες παραμέτρους που υπεισέρχονται στο πρόβλημα της τριδιάστατης μετάδοσης.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

5.1 Συμπεράσματα

1. Όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 2, παρατηρώντας τους μετασχηματισμούς των κυματισμών καθώς διέρχονται διαμέσου του αγωγού ανανέωσης, συμπεραίνουμε πως η ανάπτυξη των αρμονικών ανώτερης τάξης κατέχει δεσπόζουσα θέση σε όλες τις περιπτώσεις, και πως το βασικό χαρακτηριστικό της ροής τέτοιου είδους κυματισμών που μεταδίδονται μέσω αγωγών ανανέωσης είναι ότι η δομή αυτή λειτουργεί ως πηγή νέων κυματισμών.
2. Σύμφωνα με τα διαγράμματα των συντελεστών διείσδυσης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το πλάτος του αγωγού ανανέωσης, όπως επίσης και η περίοδος του κύματος επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τους συντελεστές. Καταλυτική όμως είναι και η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης του κυματισμού, καθώς δεν μας επιτρέπει να προβλέψουμε με ακρίβεια τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τους συντελεστές διείσδυσης.

3. Ο αριθμός των πειραμάτων δεν ήταν ικανοποιητικός, ώστε να εξετάσουμε ολοκληρωμένα το φαινόμενο και τα χαρακτηριστικά που επιδρούν σ' αυτό.
4. Οι μετασχηματισμοί των κυματισμών κυριαρχούνται από το φαινόμενο της τριδιάστατης περίθλασης και αυτό γίνεται εμφανές κατάντη του αγωγού.
5. Ο αγωγός ανανέωσης λειτουργεί σαν ένα ανοιχτός αγωγός. Έτσι, κατά τη διέλευση των κυματισμών διαμέσου του αγωγού, αυξάνεται η ταχύτητα ροής καθώς μικραίνει απότομα το πλάτος.
6. Δημιουργείται επιπλέον Stokes drift λόγω της μη γραμμικότητας στο εσωτερικό του αγωγού.
7. Πιθανή είναι η δημιουργία ρευμάτων εντός του αγωγού λόγω θραύσης των κυματισμών.
8. Η τριδιάστατη μετάδοση των κυματισμών μέσω του αγωγού ανανέωσης αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο και είναι δύσκολο να απομονωθούν με ακρίβεια τα κυματικά χαρακτηριστικά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού μέσω των οποίων είναι δυνατή η πρόβλεψη των συντελεστών διείδυσης.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

1. Κρίνεται απαραίτητη η διεξαγωγή περισσότερων πειραμάτων με περισσότερες διαφοροποιήσεις των παραμέτρων b , T , H , ώστε να εξεταστεί το φαινόμενο με μεγαλύτερη ακρίβεια.
2. Θα ήταν χρήσιμο να προταθεί μία καινούρια εμπειρική εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή διείσδυσης, τροποποιημένη ως προς την εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη το τριδιάστατο πρόβλημα.
3. Προτείνεται επίσης η σύγκριση όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων με το διδιάστο αριθμητικό μοντέλο συζευγμένων ιδιομορφών (όπως και στο Tsoukala et al., 2014) και το νέο τριδιάστατο μοντέλο συζευγμένων ιδιομορφών (Belibassakis et al, 2014), ώστε να διερευνηθεί η επάρκεια των μοντέλων για το σχεδιασμό των αγωγών.
4. Προτείνεται η χρήση Νευρωνικών Δικτύων για να εξεταστεί η αποτελεσματικότητα των μοντέλων.
5. Τέλος, προτείνεται η επέκταση της έρευνας σε φασματικά κύματα, με και χωρίς κατευθυντικότητα.

Βιβλιογραφία

- Β. Τσουκαλά, Κ. Μπελιμπασάκης, Β. Κατσαρδή, Μ. Χονδρός, Θ. Γιαντσή, Ε. Τσούνης (2013), “Διερεύνηση Διάδοσης Κυματικής Διαταραχής σε Παράκτια Έργα μέσω Αγωγών Ανανέωσης,” Τεχνική Έκθεση ΠΕΒΕ.
- V.K. Tsoukala, V. Katsardi, K.A. Belibassakis (2014) “Wave transformation through flushing culverts operating at seawater level in coastal structures,” *Ocean Engineering* **89**, 211-229.
- V.K. Tsoukala, C.I. Moutzouris (2009) “Wave transmission in harbors through flushing culverts,” *Ocean Engineering* **36**, 434-445.
- K.A. Belibassakis, V.K. Tsoukala, V. Katsardi (2014) “Three-dimensional wave diffraction in the vicinity of openings in coastal structures,” *Applied Ocean Research* **45**, 40-54.
- V.K. Tsoukala, Th. Pyrpiri, M. Chondros, V. Katsardi (2015) “Prediction of wave transmission coefficient using neural networks and experimental measurements,” 16th IMAM, Pula, Croatia, 365-372, Taylor & Francis Group London, ISBN 978-1-138-02887-6.
- Β. Κατσαρδή (2016), Διαλέξεις μαθήματος “Θαλάσσια Υδραυλική και Λιμενικά Έργα”, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

-
- E. Oran Brigham (1988) "The Fast Fourier Transform and its applications," Prentice-Hall.
 - K.R. Rao, D.N. Kim, J.J. Hwang (2010) "Fast Fourier Transform: algorithms and applications," Springer.
 - W.G. Penny and A.T. Price (1944) "Diffraction of water waves by breakwaters," Misc. Weapons Development Technical History 26, Artificial Harbors, Sec. 3D.
 - F.U. Dowla, L.L. Rogers (2003) "Solving problems in environmental engineering and geosciences with artificial neural networks," MIT Press.
 - A.D.D. Craik (2005) "George Gabriel Stokes on water wave theory," Annual Review of Fluid Mechanics 37: 23–42.

- E. Oran Brigham (1988) "The Fast Fourier Transform and its applications," Prentice-Hall.
- K.R. Rao, D.N. Kim, J.J. Hwang (2010) "Fast Fourier Transform: algorithms and applications," Springer.
- W.G. Penny and A.T. Price (1944) "Diffraction of water waves by breakwaters," Misc. Weapons Development Technical History 26, Artificial Harbors, Sec. 3D.
- F.U. Dowla, L.L. Rogers (2003) "Solving problems in environmental engineering and geosciences with artificial neural networks," MIT Press.
- A.D.D. Craik (2005) "George Gabriel Stokes on water wave theory," Annual Review of Fluid Mechanics 37: 23–42.