



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ-ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

## ΤΥΡΒΩΔΗ ΜΕΓΕΘΗ ΣΕ ΥΦΑΛΟΥΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ

Μεταπτυχιακή εργασία

**Διπλάρáκος Νικόλαος**

**Επιβλέπων: Κ. Μέμος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ**

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ  
ΥΔΑΤΙΚΩΝ  
ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Οκτώβριος 2017





# Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα, ομότιμο καθηγητή του ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνο Μέμο για το ιδιαίτερα ενδιαφέρον θέμα της μεταπτυχιακής εργασίας που μου πρότεινε να μελετήσω και για την ευκαιρία που μου δόθηκε να πραγματοποιήσω το σύνολο των πειραμάτων που εξετάστηκαν σε αυτή, στο Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου του Delft, στην Ολλανδία. Το πολύ ευχάριστο και φιλικό περιβάλλον που κατάφερε να δημιουργήσει αλλά και η ουσιαστική καθοδήγηση, το ενδιαφέρον και η εποικοδομητική κριτική που επέδειξε υπήρξαν καθοριστικοί παράγοντες στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή καθηγητή του TUDelft, Henk Jan Verhagen, για την καθοδήγηση και την ουσιαστική βοήθεια που προσέφερε για την επιτυχή εκτέλεση των πειραμάτων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Μαρία Παπανικολάου, τον Ιωάννη Ρούπα και τον υποψήφιο διδάκτορα Αθανάσιο Ζήρο των οποίων η βοήθεια ήταν καθοριστικής σημασίας για την προετοιμασία και την διενέργεια των πειραματικών μετρήσεων, καθώς επίσης και τον υποψήφιο διδάκτορα Ελπιδοφόρο Ρεπούση για την καθοδήγησή του στον αρχικό σχεδιασμό των πειραματικών διατάξεων.

Ακόμα, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Παναγιώτη Βασαρμίδα και Αναστάσιο Σμυρνή για τις εύστοχες παρατηρήσεις και τις πολύτιμες γνώσεις που μοιράστηκαν μαζί μου.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την συνεχή υποστήριξη που μου δείχνει.

Διπλάρακος Νικόλαος

Αθήνα 2017



# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	iii
Ορισμοί συμβόλων.....	vii
Περίληψη .....	ix
Extended abstract .....	xi
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας και ερευνητικοί στόχοι .....	4
1.3 Μεθοδολογία .....	5
1.4 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας.....	5
2. Ύφαλοι κυματοθραύστες .....	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Φυσικές παράμετροι που σχετίζονται με τους ύφαλους κυματοθραύστες .....	7
2.3 Φυσικές διεργασίες που συνδέονται με την παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών .....	9
3. Περιγραφή των πειραματικών διατάξεων και μετρήσεων.....	13
3.1 Εισαγωγή.....	13
3.2 Μοντέλα ύφαλων κυματοθραυστών και κατασκευή .....	14
3.2.1 Κλίμακες ομοιότητας.....	14
3.2.2 Ομοιότητα κατά Froude .....	16
3.2.3 Φυσικά ομοιώματα ύφαλων κυματοθραυστών .....	17
3.3 Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης .....	23
4. Ανάλυση των πειραματικών δεδομένων .....	33
4.1 Φιλτράρισμα των δεδομένων των χρονοσειρών.....	33
4.2 Στατιστική ανάλυση τυρβώδους ροής .....	36
4.2.1 Στατιστικά μεγέθη της τυρβώδους ροής.....	36
4.2.2 Χρονική συσχέτιση .....	42
4.2.3 Χωρική συσχέτιση .....	43
4.2.4 Το φάσμα της κινητικής ενέργειας .....	43
4.3 Ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων των ταχυτήτων.....	45
5. Αποτελέσματα από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων .....	49
5.1 Εισαγωγή.....	49
5.2 Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m.....	49
5.2.1 Κυματικό σενάριο 1-R1 .....	49
5.2.1.1 Αποτελέσματα στην προσήνεμη πλευρά.....	49

5.2.1.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	58
5.2.1.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	61
5.2.2	Κυματικό σενάριο 1-R2 .....	66
5.2.2.1	Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά.....	66
5.2.2.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	74
5.2.2.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	79
5.2.3	Κυματικό σενάριο 1-R3 .....	85
5.2.3.1	Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά.....	85
5.2.3.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	93
5.2.3.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	100
5.2.4	Κυματικό σενάριο 1-R4 .....	105
5.2.4.1	Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά.....	105
5.2.4.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	113
5.2.4.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	121
5.3	Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m.....	127
5.3.1	Κυματικό σενάριο 2-R1 .....	127
5.3.1.1	Αποτελέσματα στην προσήνεμη πλευρά.....	127
5.3.1.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	135
5.3.1.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	142
5.3.2	Κυματικό σενάριο 2-R2 .....	146
5.3.2.1	Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά.....	146
5.3.2.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	154
5.3.2.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	162
5.3.3	Κυματικό σενάριο 2-R3 .....	168
5.3.3.1	Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά.....	168
5.3.3.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	176
5.3.3.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	184
5.3.4	Κυματικό σενάριο 2-R4 .....	189
5.3.4.1	Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά.....	189
5.3.4.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά.....	197
5.3.4.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.....	205
5.4	Προφίλ χαρακτηριστικών οριζόντιων ταχυτήτων $u_{rms}$ .....	211
5.4.1	Φυσικό ομοίωμα SPB1.....	211
5.4.2	Φυσικό ομοίωμα SPB2.....	214

5.4.3	Σύγκριση χαρακτηριστικών ταχυτήτων $u_{rms}$ μεταξύ των φυσικών ομοιωμάτων SPB1 και SPB2	216
5.5	Προφίλ μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας ( $u'_{max}$ )	217
5.5.1	Φυσικό ομοίωμα SPB1	218
5.5.2	Φυσικό ομοίωμα SPB2	220
5.5.3	Σύγκριση μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων $u'_{max}$ μεταξύ του φυσικού ομοιώματος SPB1 και SPB2	223
5.6	Μεταβολή της τυρβώδους έντασης $u'/U$	224
5.6.1	Φυσικό ομοίωμα SPB1	225
5.6.2	Φυσικό ομοίωμα SPB2	228
5.6.3	Σύγκριση των σχετικών τυρβωδών εντάσεων μεταξύ του SPB1 και SPB2	230
5.7	Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας	232
5.7.1	Φυσικό ομοίωμα SPB1	232
5.7.1.1	Αποτελέσματα στην προσήνεμη διατομή	232
5.7.1.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη διατομή	234
5.7.1.3	Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή	236
5.7.2	Φυσικό ομοίωμα SPB2	239
5.7.2.1	Αποτελέσματα στην προσήνεμη πλευρά	239
5.7.2.2	Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά	241
5.7.2.3	Αποτελέσματα στην κεντρική διατομή	244
5.8	Οριζόντιες ταχύτητες στην ανάντη και κατάντη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη	247
5.8.1	Φυσικό ομοίωμα SPB1	247
5.8.2	Φυσικό ομοίωμα SPB2	248
6.	Συμπεράσματα	251
6.1	Γενικά συμπεράσματα	251
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	257
	Βιβλιογραφία	257
	Παράρτημα	259



## Ορισμοί συμβόλων

### A) Σύμβολα με ελληνικά γράμματα

$\rho$ : πυκνότητα νερού

$\omega$ : γωνιακή συχνότητα ( $=2\pi/T$ )

### B) Σύμβολα με λατινικά γράμματα

$B$ : πλάτος στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη

$d$ : συνολικό βάθος νερού

$d_{50}$ : μέση διάμετρος ογκολίθου

$F$ : αριθμός Froude

$f$ : συχνότητα ( $=1/T$ )

$g$ : επιτάχυνση της βαρύτητας

$H_i$ : προσπίπτον ύψος κύματος

$H_t$ : μεταδιδόμενο ύψος κύματος

$h_s$ : βάθος βύθισης (free board)

$L_o$ : μήκος κύματος στα βαθιά

$m$ : προσήνεμη κλίση του πρανούς

$n$ : πορώδες

$R_e$ : αριθμός Reynolds

$T$ : περίοδος κύματος

$u$ : οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας

$V$ : χαρακτηριστική ταχύτητα

$v$ : εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας

$w$ : κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας

$z$ : κατακόρυφη απόσταση από τον πυθμένα

### **Γ) Συντομογραφίες**

ADV: Acoustic Doppler Velocimeter

EMS: Electromagnetic Flow Meter

LDV: Laser Doppler Velocimeter

SPB: Submerged Permeable Breakwater

SWL: Still Water Level



Ένα από τα πιο σημαντικά θέματα, τόσο από οικονομικής όσο και από οικολογικής άποψης, που σχετίζονται με την παράκτια μηχανική είναι η προστασία των παράκτιων περιοχών. Ο τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι η καλή γνώση του κυματικού κλίματος, των θαλασσίων ρευμάτων και οι συνεπαγόμενοι μηχανισμοί στερεομεταφοράς, οι οποίοι εμπλέκονται στον μετασχηματισμό των ακτών. Για την προστασία των περιοχών αυτών, παράκτιες τεχνητές κατασκευές έχουν αναπτυχθεί, όπως είναι οι ύφαλοι κυματοθραύστες.

Τα παράκτια αυτά έργα, των οποίων η στέψη βρίσκεται μόνιμα κάτω από την στάθμη της θάλασσας, κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή και τοποθετούνται παράλληλα και σε απόσταση από την ακτή. Η κύρια λειτουργία τους είναι να προκαλούν τη θραύση των κυματισμών, καθώς αυτά διαδίδονται πάνω από την στέψη τους, αλλά ταυτόχρονα επιτρέπουν ένα μέρος της κυματικής ενέργειας να μεταφερθεί στην υπήνεμη πλευρά τους. Αυτοί οι μηχανισμοί συμβάλουν στην διαμόρφωση ενός ηπιότερου κυματικού κλίματος και στην ευκολότερη ανανέωση των υδάτων στην κατάντη πλευρά τους.

Τα τελευταία χρόνια, όπου η ανάγκη για την προστασία του περιβάλλοντος έχει γίνει επιτακτική ανάγκη, εκτός από την προστασία των ακτών έχει γίνει κατανοητό ότι ο σχεδιασμός τέτοιων έργων θα πρέπει να έχει στόχο την ελάχιστη υποβάθμιση, αν όχι τον εμπλουτισμό του θαλάσσιου περιβάλλοντος (Metallinos & Memos, 2012). Ενώ έχει μελετηθεί εκτενώς η επίδραση των κατασκευών αυτών ως προς την απομείωση της κυματικής ενέργειας, την στερεομεταφορά και εν τέλει την παράκτια προστασία, αντιθέτως η έρευνα ως προς τις υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό τους είναι περιορισμένη. Οι τροχιακές ταχύτητες και οι πιέσεις θεωρούνται βασικές παράμετροι για την εκτίμηση της επίδρασης των ύφαλων κυματοθραυστών στα τοπικά οικοσυστήματα καθώς καθορίζουν την κατανομή και την αφθονία των θαλάσσιων οργανισμών (Siddon & Witman, 2003).

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διενεργήθηκαν πειράματα στο Laboratory of Fluid Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geosciences στο Delft University of Technology στην Ολλανδία. Τα πειράματα αυτά διενεργήθηκαν σε διώρυγα κυματισμών και περιλάμβαναν μονοδιάστατη διάδοση μονοχρωματικών και φασματικών θραυόμενων ή μη κυματισμών. Συνολικά εξετάστηκαν δύο φυσικά ομοιώματα ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών (κλίμακα περίπου 1:10) τραπεζοειδούς διατομής με κλίσεις πρανών 1:1.5 αλλά με διαφορετικό πλάτος στέψης και επίσης δύο διαφορετικά βάθη νερού για κάθε μοντέλο. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η λήψη μετρήσεων που

αφορούσαν τις τροχιακές ταχύτητες και τις υδροδυναμικές πιέσεις, σε θέσεις μέσα και έξω από τα δύο φυσικά ομοιώματα, καθώς επίσης και η μεταβολή της ελεύθερης επιφάνειας του νερού σε συγκεκριμένες θέσεις στη προσήνεμη και την υπήνεμη πλευρά τους.

Από το σύνολο των πειραματικών μετρήσεων που προαναφέρθηκαν, στην παρούσα εργασία αναλύθηκαν μόνο οι χρονοσειρές των ταχυτήτων που ελήφθησαν κατά την διάδοση μονοχρωματικών κυματισμών. Οι χρονοσειρές αναλύθηκαν ως προς την φάση του κυματισμού (phase averaging), τεχνική που δίνει την δυνατότητα της εκτίμησης της μεταβολής της μέσης ταχύτητας των μέσων τυρβωδών διακυμάνσεων και των μέσων διατμητικών τάσεων Reynolds μέσα στην κυματική περίοδο. Επίσης οι χρονοσειρές αναλύθηκαν και στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου εξήχθησαν τα διαγράμματα του αρμονικού πλάτους ταλάντωσης και της κινητικής ενέργειας. Το πρώτο από τα δύο χρησιμεύει στην εκτίμηση της μη γραμμικότητας του πεδίου ροής καθώς οι ύφαλοι κυματοθραύστες συνδέονται στενά με την παραγωγή αρμονικών συνιστωσών και το δεύτερο δίνει την δυνατότητα της εκτίμησης της μεταφοράς ενέργειας σε μεγαλύτερες αρμονικές συχνότητες, της κατακρήμνισης της ενέργειας (energy cascade) από τις μεγαλύτερες στις μικρότερες δίνες της ροής και της τοπικής ομογένειας και ισοτροπίας της ταχύτητας.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες είναι δυνατό να μειώσουν ικανοποιητικά την μεταδιδόμενη κυματική ενέργεια στην υπήνεμη πλευρά τους, κυρίως στις περιπτώσεις όπου οι εισερχόμενοι κυματισμοί θραύονται πάνω από την στέψη τους. Το πλάτος της στέψης, και κατ' επέκταση το συνολικό πλάτος αυτών των κατασκευών, φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στη μείωση των ταχυτήτων στην υπήνεμη πλευρά τους, γεγονός που οφείλεται στην εντονότερη θραύση των κυματισμών πάνω από την στέψη τους και στην αντίσταση που συναντάει η ροή διαμέσου του πορώδους. Παρατηρήθηκε, ακόμα και για μη θραυόμενους κυματισμούς, σημαντική μείωση της ταχύτητας στα κατάντη του ύφαλου κυματοθραύστη έπειτα από διαπλάτυνση της στέψης του. Επιπρόσθετα, η αύξηση του πλάτους της στέψης επέφερε σημαντική μείωση των τυρβωδών διακυμάνσεων στην υπήνεμη πλευρά. Μεγαλύτερα κυματικά χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος του κύματος) συνδέονται με την εμφάνιση περισσότερων και μεγαλύτερων σε πλάτος αρμονικών συνιστωσών. Εντονότερη ενίσχυση των αρμονικών λαμβάνει χώρα στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη, στην στέψη και στον πόρο. Τέλος, από τα φάσματα ενέργειας που υπολογίστηκαν, φάνηκε ότι η τυρβώδης ροή μέσα στο πορώδες είναι τοπικά ομογενής και ισότροπη, και ότι η ανάπτυξη καθώς και το εύρος των συχνοτήτων που καταλαμβάνει το αδρανειακό υπό εύρος εξαρτώνται άμεσα από τον αριθμό Reynolds της ροής.

## INTRODUCTION

Coastal areas over the last decades have concentrated the majority of the worldwide population, mainly due to their economic advantages that they offer. This vast urbanization of the coastal zone is directly linked to the construction of extensive coastal works, sea pollution, degradation of coastal ecosystems and fishing grounds. Nowadays, where the need for environmental awareness has increased, submerged permeable breakwaters (SPB) have received a growing appreciation from engineers, authorities and public, as they appear to be capable of providing coastal protection and, at the same time, avoiding negative impacts on landscape and coastal environment.

Submerged permeable breakwaters have been used in coastal zones for shoreline protection in the past decades to prevent beach erosion. These are often rubble-mound permeable breakwaters whose design is based on empirical rules. Their primary goal of these structures is to reduce the wave energy on the leeward side and the sediment movement which affects eventually the coastal morphology. All these phenomena have been extensively studied by means of in situ measurements, hydraulic experiments and numerical simulations. The interaction between a wave and a submerged permeable breakwater basically consists of two main processes, 1) wave energy reduction caused by reflection, friction due to the porosity of the structure and wave breaking over the crest, and 2) wave spectrum change due to non-linear processes in the shallow water area above the breakwater (Calabrese, et al., 2008).

In contrast to the well-studied phenomena and processes that are related to submerged permeable breakwaters, their aforementioned environmental aspect is a field of relatively recent research. A key parameter to assess a submerged permeable breakwater to the local habitats, is their interior water particle velocity. Orbital velocities, pore pressures and wave forcing are regarded as the primary mechanisms of disturbance in coastal systems determining the distribution and abundance of marine organisms (Siddon & Witman, 2003).

## EXPERIMENTAL SETUP

The hydraulic experiments were conducted at the wave flume in the Laboratory of Fluid Mechanics of TU Delft. The wave flume is 42m long, its width is 0.8m and its height is 1m. The walls consist of glass

allowing a full observation of the process. At the one end, the wave flume is equipped with a piston type wave generator, able to produce both regular and irregular waves. This wave generator has Active Reflection Compensation (ARC) and a second order wave generation technique, which means that the second-order effects of the first and second harmonic of the wave field are taken into account in the wave generator motion.

In total, two physical models of submerged permeable breakwaters were made, namely SPB1 and SPB2. The former of these structures, had a height of 0.5m, and crest width 0.4m. The structure was made of natural stones with  $d_{50} = 0.07 \div 0.12m$ , sloping 1:1.5 at both sides (Figure 1). The latter, differs only in the width of the crest which has been extended about 0.25m (Figure 2) The porosity of the structure, i.e. ratio of voids to the total volume, was equal to 0.4.

The orbital velocities were measured with three different devices. Two EMS (Electromagnetic Flow Meter) velocimeters were used to record the horizontal velocity at the upstream and downstream at the vicinity of the structure. At the offshore and leeward slope of the SPB, an ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) was used to record the three velocity components in three heightwise locations, with 8cm intervals along the vertical. Finally, at the crest and at the pore of the structure, and LDV (Laser Doppler Velocimeter) device was employed to measure the horizontal and vertical component of the velocity.

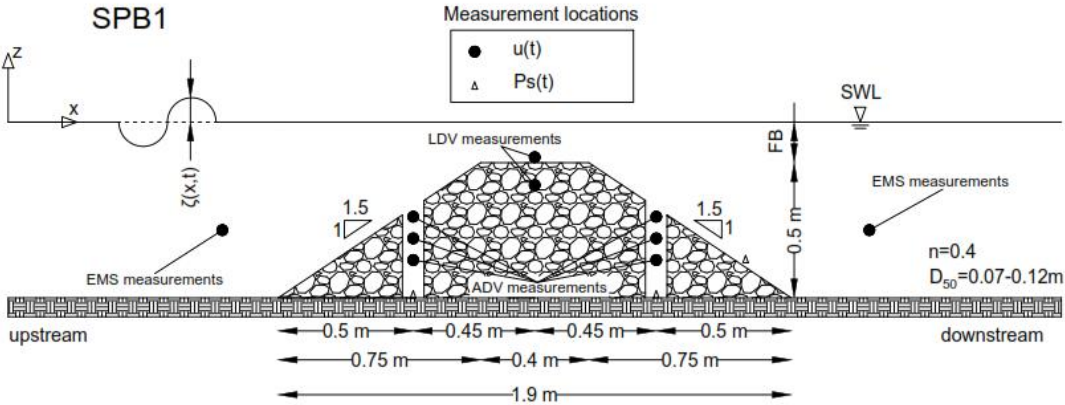


Figure 1 SPB1 physical model and the location of measurements.

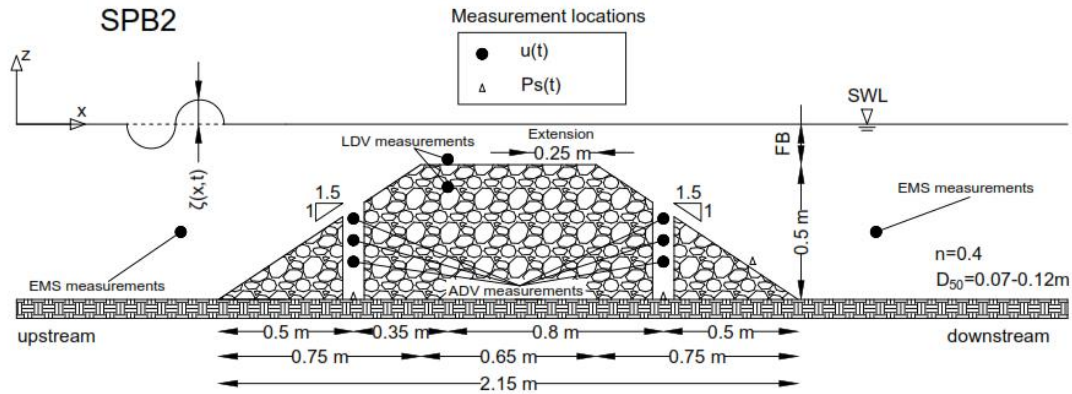


Figure 2 SPB2 physical model and the location of measurements.

In total, four regular and three irregular wave scenarios were tested and two different water depths. In the present master thesis, only the regular waves scenarios were analyzed, whose properties are listed in the table below (Table 1).

Table 1 Waves scenarios tested on SPB1 and SPB2 physical models.

Wave scenarios				
Wave scenario	Wave Height H (m)	Period T (s)	Water Depth	Breaking
1-R1, 1-R5, 2-R1, 2-R5	0.06	1.0	0.65, 0.7	No
1-R2, 1-R6, 2-R2, 2-R6	0.11	1.5		No
1-R3, 1-R7, 2-R3, 2-R7	0.17	2.0		Yes
1-R4, 1-R8, 2-R4, 2-R8	0.23	2.5		Yes

## ANALYSIS OF THE DATA

Before performing any analysis, the collected data of the velocities were filtered in order to remove the spikes that are commonly appear in that kind of records. To do this, the 3-D Phase-Space Despiking method proposed by Goring and Nikora (2002) was employed.

The main scope of the analysis was to evaluate the main turbulent statistics of the flow, such as the turbulent fluctuations, the Reynolds shear stresses, the spectrum of kinetic energy, and also the transformation of the velocity amplitude spectrum in the different measurement locations. Due to the periodicity of the water waves the mean velocity ( $\bar{u}_i$ ) was calculated by applying phase averaging over the velocity record, given by the equation below (1)

$$\bar{u}_i(x, y, z, \omega t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_i(x, y, z, \omega(t + kT)) \quad (1)$$

Where  $N$  is the number of the data whose mean value is being calculated,  $T$  is the period of the waves,  $u_i$  is the instantaneous velocity and  $\omega$  is the angular frequency.

Subsequently, the turbulent fluctuations ( $u'_i$ ) of the flow are given by subtracting the mean from the instantaneous velocity,

$$u'_i(x, y, z, \omega(t + kT)) = u_i(x, y, z, \omega t') - \bar{u}_i(x, y, z, \omega t) \quad (2)$$

where the  $t'$  is related to the period  $T$  and the phase  $\omega t (= 2\pi/T)$ :

$$\omega t' = \omega(t + kT), (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (3)$$

The intensity of the turbulent fluctuations with respect to the position  $(x, y, z)$  and the phase  $\omega t$  for the three velocity components is defined by the following equations

$$\left(\overline{u'^2}\right)^{\frac{1}{2}}(x, y, z, \omega t) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u'^2(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\left(\overline{v'^2}\right)^{\frac{1}{2}}(x, y, z, \omega t) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v'^2(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\left(\overline{w'^2}\right)^{\frac{1}{2}}(x, y, z, \omega t) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w'^2(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Apart from the intensity of the turbulent fluctuations, also the Reynolds shear stresses can be defined with respect to the position  $(x, y, z)$  and the phase  $\omega t$ , given by the following set of equations

$$-\overline{u'v'}(x, y, z, \omega t) = \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u'(x, y, z, \omega(t + kT))v'(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\} \quad (7)$$

$$-\overline{u'w'}(x, y, z, \omega t) = \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u'(x, y, z, \omega(t + kT))w'(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\} \quad (8)$$

$$-\overline{v'w'}(x, y, z, \omega t) = \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v'(x, y, z, \omega(t + kT))w'(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\} \quad (9)$$

All the aforementioned statistics describe their mean variation during a wave period in a certain measurement point. Moreover, the data were analyzed in the frequency domain by computing the amplitude spectrum and the spectrum of kinetic energy. The amplitude spectrum is computed in order to study the harmonic generation which is strongly linked to the presence of these structures as the water waves propagate over their crest. Harmonic generation is the most common nonlinear process for wave energy transfer from low frequency to high frequency. The spectrum of kinetic energy gives valuable information about the distribution of wave energy across the frequencies, the range of inertial subrange and assessment of the local homogeneity and isotropy of the turbulence.

### ANALYSIS EXAMPLE OF A VELOCITY TIME SERIES

In this section, an example of the analysis described in the previous section will be given. A velocity time series recorded at the crest of the physical model SPB2 is shown in Figure 3. In this particular case the wave height is 0.23m, the period is 2.5sec and the water depth is 0.65m.

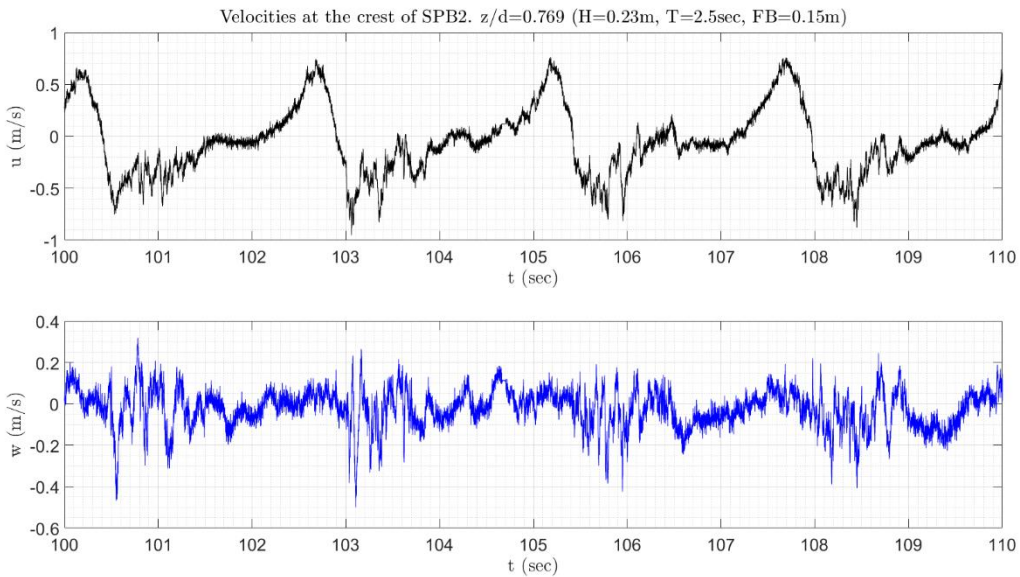


Figure 3 Time series of horizontal (black) and vertical (blue) velocity at the crest of SPB2.  $H=0.23m$ ,  $T=2.5sec$ ,  $d=0.65m$ .

Applying equation (1) to the initial velocity time series the phase averaged velocity shown in Figure 4 can be obtained.

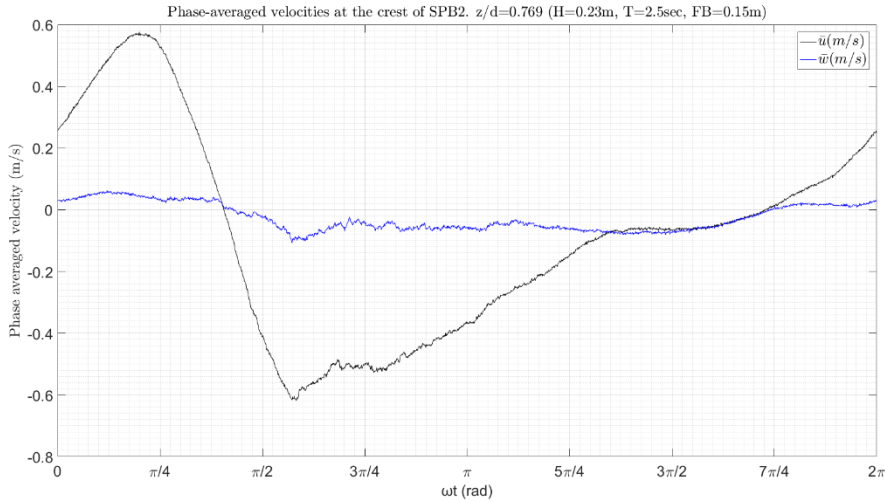


Figure 4 Phase averaged velocity of horizontal (black) and vertical (blue) component at the crest of SPB2.  $H=0.23\text{m}$ ,  $T=2.5\text{sec}$ ,  $d=0.65\text{m}$ .

The turbulent fluctuations are then obtained by applying equation (2) and the result is shown in Figure 5.

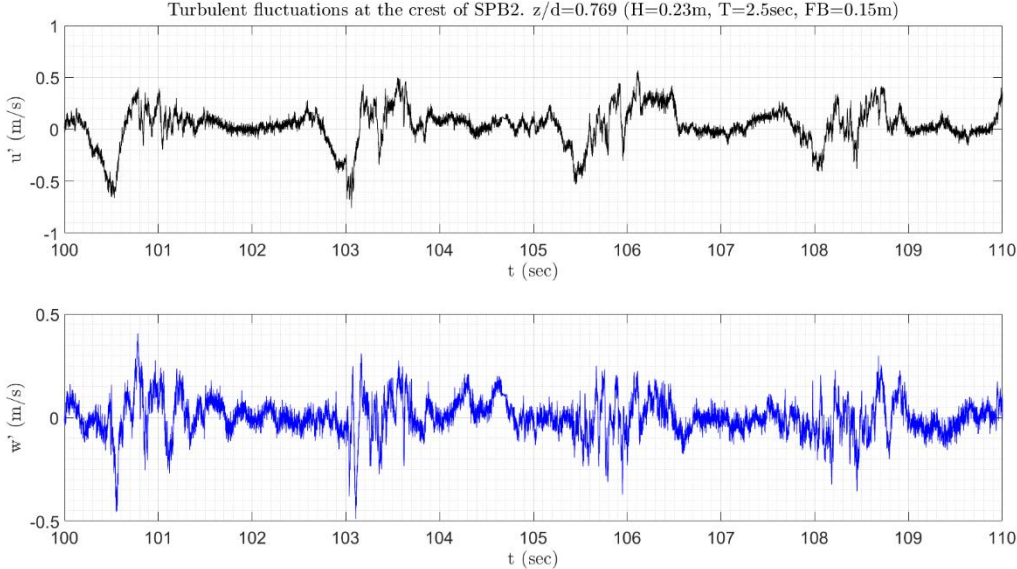


Figure 5 Turbulent fluctuations of horizontal (black) and vertical (blue) velocity at the crest of SPB2.  $H=0.23\text{m}$ ,  $T=2.5\text{sec}$ ,  $d=0.65\text{m}$ .



Having separated the turbulent fluctuations from the initial time series, it is now possible to calculate the turbulent intensity of the fluctuations with respect to the phase of the wave by applying equations (4) and (6). The variation of the turbulent intensity during a wave period is plotted in Figure 6.

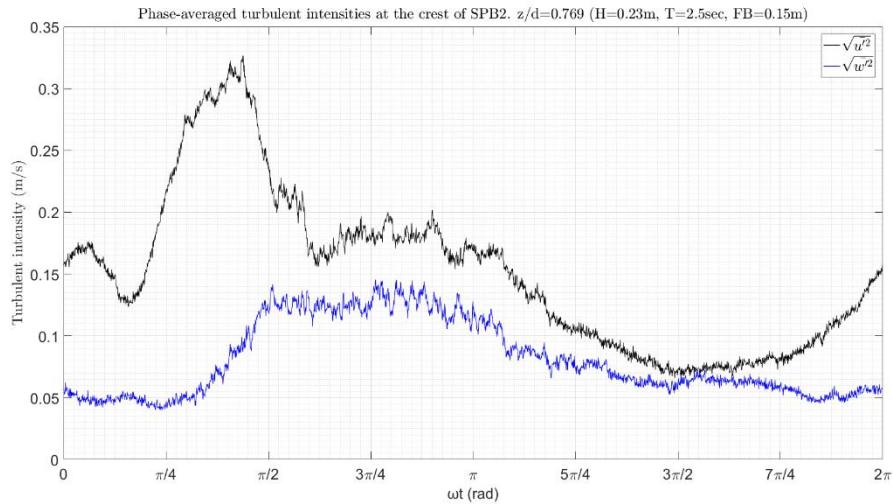


Figure 6 Turbulent intensity of the horizontal (black) and vertical velocity (blue) at the crest of SPB2.  $H=0.23m$ ,  $T=2.5sec$ ,  $d=0.65m$ .

In this case, because only the horizontal and vertical components of the velocity are available, only the Reynolds stresses at the x-z plane can be calculated from equation (8). The Reynolds stresses are shown in the following Figure 7.

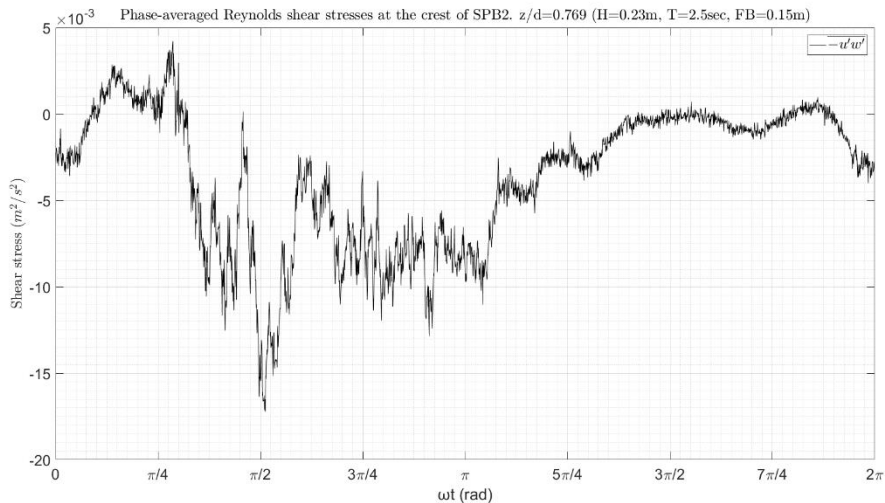


Figure 7 Reynolds shear stresses at the crest of SPB2.  $H=0.23m$ ,  $T=2.5sec$ ,  $d=0.65m$ .

The amplitude spectrum of the horizontal and vertical velocity at the crest of SPB2 is shown in Figure 8. Clearly, the nonlinear interactions that take place in this specific measurement point are strong due to the excitation of a high number of harmonics with amplitudes comparable to the amplitude of the main frequency ( $f = 0.4\text{Hz}$ ).

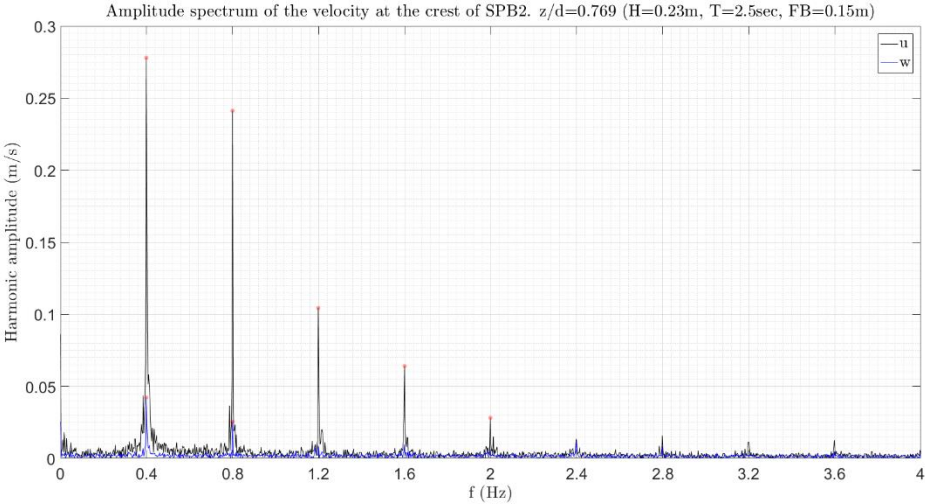


Figure 8 Amplitude spectrum of the horizontal (black) and vertical (blue) velocity at the crest of SPB2.  $H=0.23\text{m}$ ,  $T=2.5\text{sec}$ ,  $d=0.65\text{m}$ .

Finally, the power spectrum of the velocity is computed as shown in Figure 9. From this spectrum, one can see how the energy is distributed across the frequency spectrum. Lower frequencies (small wave numbers) are related to the formation of bigger eddies, containing most of the energy. These eddies are produced by the instability of the mean flow. As can be seen, they are highly anisotropic and represent the configuration of the boundary conditions. These large eddies themselves are prone to instability due to, e.g., the shear stress of the mean flow acting on them. Hence, they break into smaller eddies and this process continues until the eddies are so small that they begin to be affected by viscous forces. Finally then, dissipation transforms the turbulent kinetic energy into heat at the smallest eddy sizes. The picture of eddies breaking up into smaller ones is known as the energy cascade.

The main feature of the spectrum is called *inertial subrange*, here spanning from 4Hz to 100Hz approximately, and it is characterized by the fact that turbulent energy in neither produced nor dissipated but only transported through. Kolmogorov (1941) found by dimensional analysis that the slope of the inertial subrange is about  $-5/3$ , which is clearly manifested at the present spectrum. At this range the spectrum is essentially isotropic as the energy of the two components of the velocity converge.

In the dissipation range (higher frequencies) finally, turbulent energy is transformed into heat by the action of viscous forces.

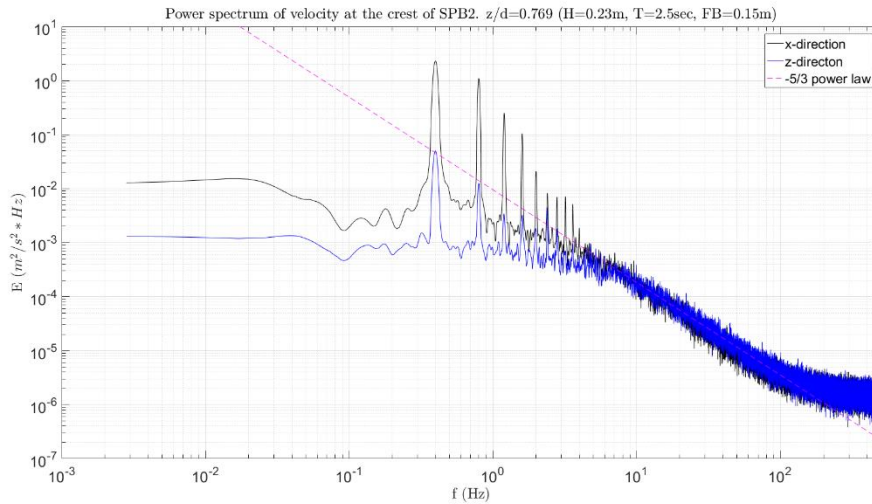


Figure 9 Power spectrum of horizontal (black) and vertical (blue) velocity at the crest of SPB2.  $H=0.23m$ ,  $T=2.5sec$ ,  $d=0.65m$ .

## RESULTS

- *Characteristic horizontal velocities  $u_{rms}$*

The characteristic horizontal velocities  $u_{rms}$  were calculated for both physical models, SPB1 and SPB2, for all the wave scenarios and water depths. Subsequently, plots of the heightwise variation of the  $u_{rms}$  velocity, at the upstream, downstream and middle section of the submerged permeable breakwater were drawn. Here the results obtained from the analysis of the velocity time series related to SPB1 model, for both water depths are shown in the next three figures (Figure 10-Figure 12).

The heightwise variation of the  $u_{rms}$  velocities at the upstream section is shown in Figure 10. From this figure it can be seen that the velocity profiles, for the majority of wave scenarios, follow an almost linear increase as the relative position ( $z/d$ ) increases. Furthermore, the variation of water depth, between 0.65m and 0.7m, doesn't seem to have strong influence at the values of the velocity of homologous relative positions. Nevertheless, higher velocity values are related to the lower water level, as expected.

The corresponding heightwise variation of the velocity at the downstream section of the SPB1 is shown in Figure 11. In this section, a much more different variation can be seen compared to upstream

section. At the lower two relative positions, it can be observed that the  $u_{rms}$  is almost constant. At the upper relative position an abrupt increase of the velocity . This increase of the velocity is possibly caused by a recirculating flow of the mean flow field formed just downstream of the submerged breakwater, and is probably connected to failures detected at the leeward slope of the structure. As at the upstream section, the velocities observed here are greater for the lower water depth. A noteworthy remark is that generally, the velocities are increased at the downstream section compared to the upstream section.

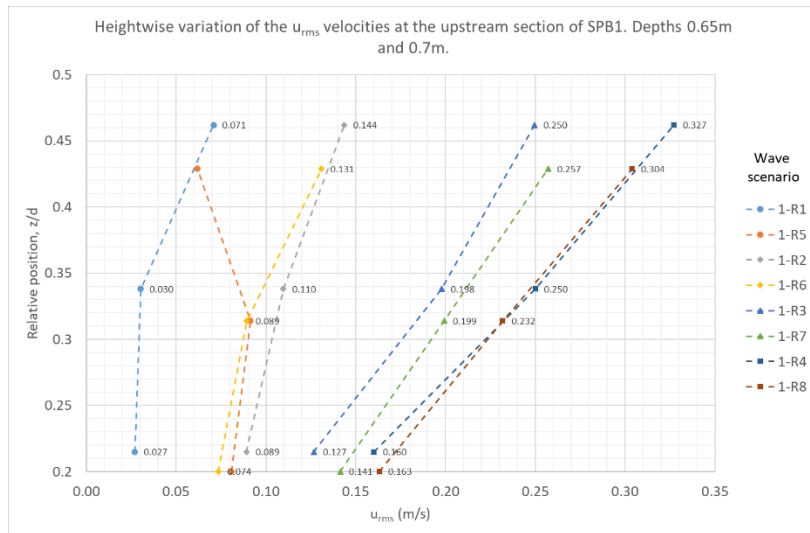


Figure 10 Heightwise variation of the  $u_{rms}$  velocities at the upstream section of SPB1. Depths 0.65m and 0.7m.

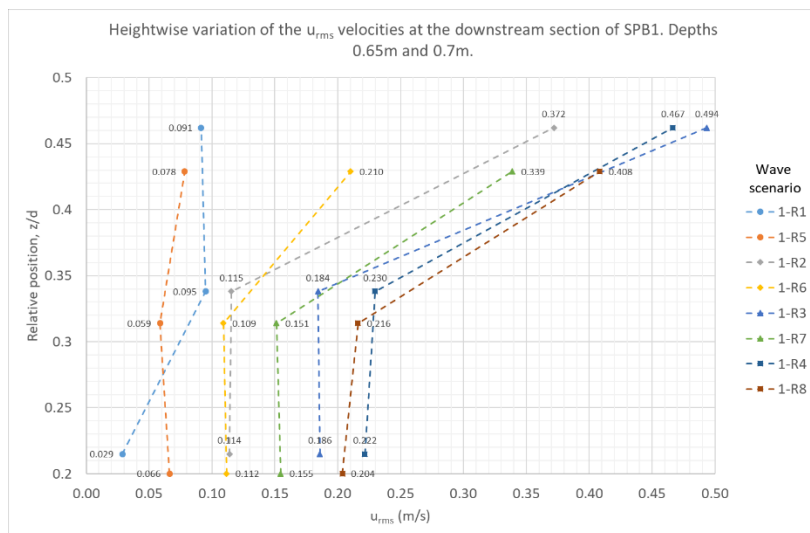


Figure 11 Heightwise variation of the  $u_{rms}$  velocities at the downstream section of SPB1. Depths 0.65m and 0.7m.

The variation of the velocity at the pore and at the crest of the SPB1 physical model is shown in Figure 12. It can be seen that the velocity at the pore ( $z/d=0.654, 0.607$ ) is rather low and changes little as the

wave properties (wave height and period) increase. In contrast, at the crest, high velocities can be observed as the wave height and period increase. As before, higher values of the velocity have been measured for the case of the lower water level.

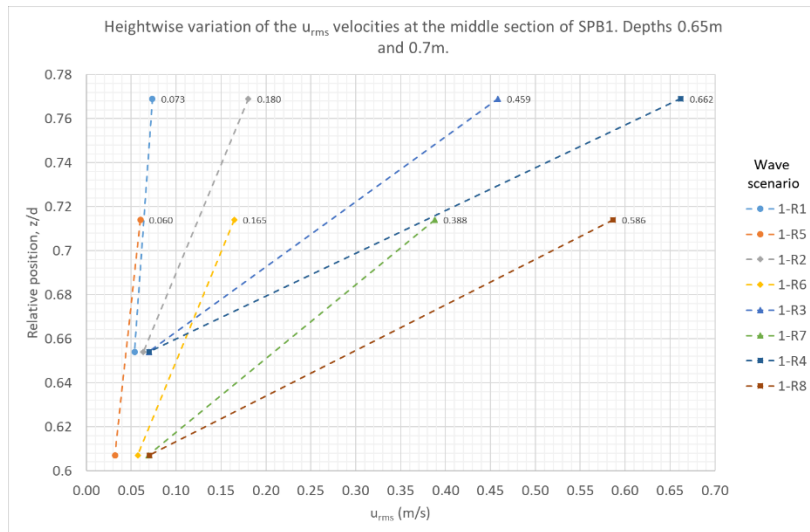


Figure 12 Heightwise variation of the  $u_{rms}$  velocities at the central section of SPB1. Depths 0.65m and 0.7m.

- **Maximum turbulent fluctuations  $u'_{max}$**

The maximum turbulent fluctuations were calculated and plots of their heightwise variation at the upstream, downstream and middle section of the SPB1 physical model are shown below.

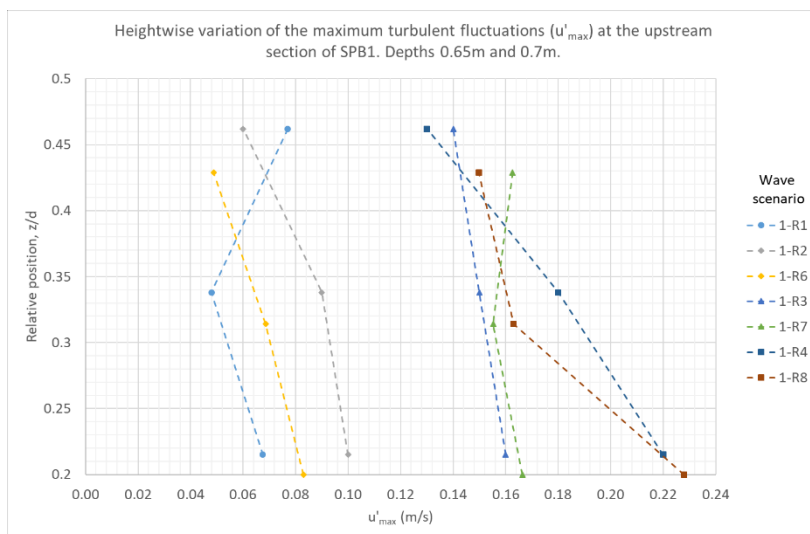


Figure 13 Heightwise variation of the maximum turbulent fluctuations ( $u'_{max}$ ) at the upstream section of SPB1. Depths 0.65m and 0.7m.

The heightwise variation of the maximum turbulent fluctuations at the upstream section is shown in Figure 13. From this figure, it can be seen that in the two relative positions located inside the submerged permeable breakwater are larger compared to fluctuations measured at the upper relative position, near the contour of the breakwater.

The corresponding heightwise variation of the maximum turbulent fluctuations at the downstream section of the SPB1 is shown in Figure 14. Compared to Figure 11 it can be observed that the turbulent fluctuations follow the same pattern. More specifically the turbulent fluctuations have almost the same value inside the submerged breakwater followed by an abrupt increase at the upper relative position. Here the influence of the water depth plays an important role, as the turbulent fluctuations are much greater for the lower water level, at the upper relative position, for the breaking wave conditions.

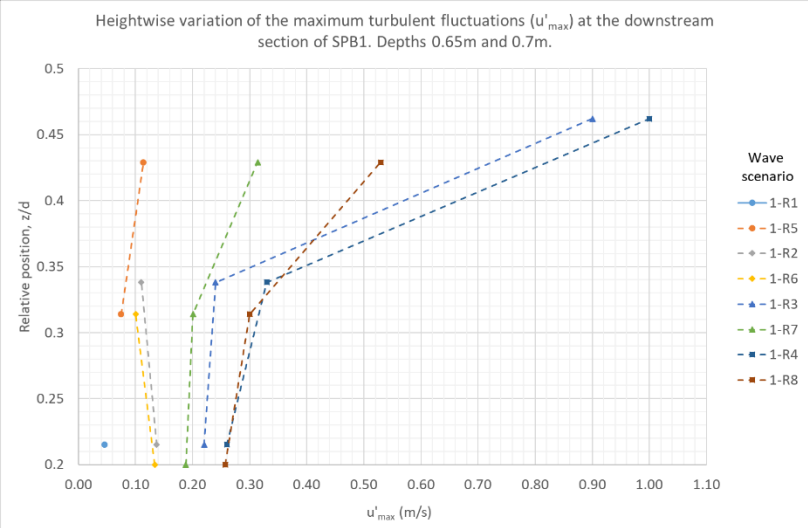


Figure 14 Heightwise variation of the maximum turbulent fluctuations ( $u'_{max}$ ) at the downstream section of SPB1. Depths 0.65m and 0.7m.

Figure 15 shows the heightwise variation of the maximum turbulent fluctuations at middle section of SPB1. At the crest, the turbulent fluctuations increase as the wave height and period increase. The wave scenario 1-R4 (breaking conditions) exhibits a sudden increase of the maximum turbulent fluctuations compared to the rest wave scenarios. At the pore, the maximum turbulent fluctuations have much less variation and remains in lower levels as the wave height and period increase. Finally, the maximum turbulent fluctuations don't show particular difference between the two water levels tested except among the wave scenarios 1-R4 and 1-R8 at the crest.

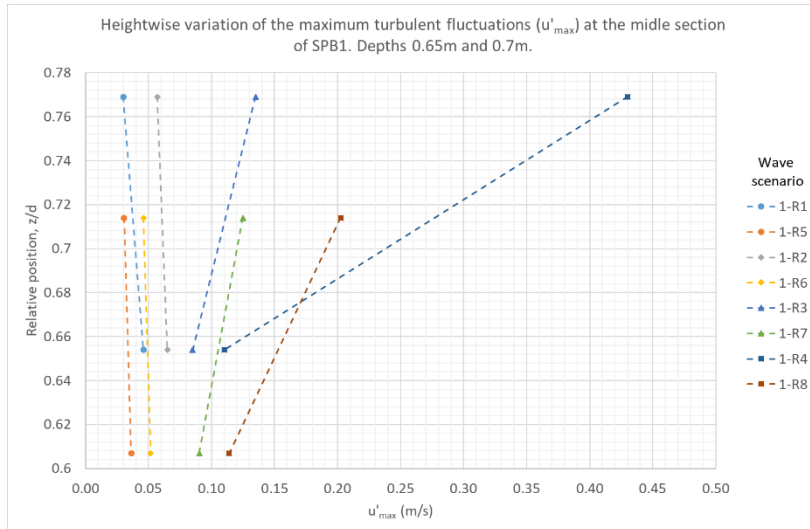


Figure 15 Heightwise variation of the maximum turbulent fluctuations ( $u'_{max}$ ) at the middle section of SPB1. Depths 0.65m and 0.7m.

- Horizontal velocities ( $u_{rms}$ ) at the upstream and downstream of the physical models

Two EMS velocimeters, located at the upstream and downstream of the physical models, were used to measure the horizontal velocities of the incoming and transmitted waves respectively. The rms velocity of each time series and the percent change from upstream to downstream was calculated for each distinct case. The scope is to evaluate, how the presence of these structures under certain conditions, reduces the orbital velocities and consequently the transmitted wave energy at the leeside.

Here, the aforementioned values calculated for SPB1 and SPB2 physical models for the case of 0.65m water depth are shown in the next two tables, Table 2 and Table 3, respectively.

In the case of SPB1 model (Table 2), strong reduction of the horizontal orbital velocities, about 26%, is observed for the wave scenarios 1-R3 and 1-R4. These two wave scenarios correspond to breaking waves conditions, fact that leads to the deduction that the breaking process is the main mechanism for reducing the wave energy transmitted over these structures.

Table 2 Horizontal velocities  $u_{rms}$  (m/s) at the upstream and downstream of SPB1. Depth 0.65m.

Horizontal velocities $u_{rms}$ (m/s) at the upstream and downstream of SPB1. Depth 0.65m.							% change from upstream to downstream
SPB1	Wave scenario	Water depth (m)	Wave height H (m)	Period T (s)	Measurement position		
					Upstream	Downstream	
					Relative position, z/d (z=0→bottom)		
					0.5		
	1-R1	0.65	0.06	1	0.034	0.031	-8.8
	1-R2		0.11	1.5	0.102	0.103	1.0
	1-R3		0.17	2	0.211	0.157	-25.9
	1-R4		0.23	2.5	0.336	0.250	-25.6

In the case of SPB2 model (Table 3), strong reduction of the  $u_{rms}$  can be observed, up to -43.4% for the 2-R4 wave scenario. The main difference from the SPB1 is that significant reduction can be seen for the 2-R2 wave scenario, in contrast to 1-R2 where the velocities remained the same at the upstream and downstream position. This means that also the crest width plays a major role in the reduction of wave energy even in the non-breaking conditions.

Table 3 Horizontal velocities  $u_{rms}$  (m/s) at the upstream and downstream of SPB2. Depth 0.65m.

Horizontal velocities $u_{rms}$ (m/s) at the upstream and downstream of SPB2. Depth 0.65m.							% change from upstream to downstream
SPB2	Wave scenario	Water depth (m)	Wave height H (m)	Period T (s)	Measurement position		
					Upstream	Downstream	
					Relative position, z/d (z=0→bottom)		
					0.5		
	2-R1	0.65	0.06	1	0.042	0.044	3.3
	2-R2		0.11	1.5	0.123	0.087	-29.3
	2-R3		0.17	2	0.197	0.136	-30.8
	2-R4		0.23	2.5	0.339	0.192	-43.4

## CONCLUSIONS

Laboratory experiments were conducted in order to assess the velocity field and turbulence inside and in the vicinity of two submerged permeable breakwaters physical models, under regular non-breaking and breaking wave conditions. The main parameters studied, were the characteristics horizontal velocities ( $u_{rms}$ ), the harmonic generation, the maximum turbulent fluctuations but also their mean variation during a wave cycle, the variation of Reynolds shear stresses during a wave cycle, the kinetic energy spectrum and the turbulence intensity at the various measurement positions.

Concerning the characteristic horizontal velocities  $u_{rms}$ , for the case of SPB1 model, it was observed an increase of the velocity at the lee slope compared to the offshore slope, most likely caused by recirculating flow close to the downstream slope. This secondary flow is believed to be responsible for failures detected at the lee slopes of submerged permeable breakwaters. In contrast to SPB1 physical model, for the case of SPB2 model a reduction of the velocities can be detected. This reduction is due to the widening of the crest and the greater energy dissipation which is implied.

Both physical models exhibit an increase of the maximum turbulent fluctuations at the leeside, compared to the offshore side. The widening of the crest causes significant reduction of the turbulent fluctuations at the leeside, however an increase is detected at the crest. Furthermore, maximum turbulent fluctuations appear to be related with the decelerating phase of the wave but no strong correlation can be supported.

Harmonic generation, which is directly related to presence of submerged breakwaters, becomes more apparent, in terms of number of harmonics and harmonic amplitude, as the wave height and period



increases. Harmonic amplitudes appear always at frequencies which are multiples of the main frequency of the wave. Moreover, the amplitude of higher harmonics is amplified at the leeside of the permeable submerged breakwater due to the strong non-linearity of the wave field induced by the presence of the structure. Also, the depth of the water seems to play crucial role at the amplitude of the first harmonic, and consequently to energy transfer to higher harmonics, for the case of breaking wave conditions. In the case of the lower water level, the amplitude of the first harmonic reaches an upper limit and the excitation of the higher harmonics becomes apparent. In contrast, for the increased water level the first harmonic carries the main wave amplitude while the higher harmonics are more limited.

Finally, from the computed velocity energy spectrums can be deduced that the larger eddies (low frequency range) formed in the flow field, contain the bulk of the energy and, in their majority, are highly anisotropic. Also, strong peaks of the energy are detected at the main frequency of the waves and at higher harmonics due to the process of non-linear interactions. The range of frequencies, where the formation of inertial subrange takes place, strongly depends on the wave properties and consequently on the Reynolds number. Higher water waves are related to a well-developed inertial subrange expanding in a broad range of frequencies, in contrast to lower waves where the inertial subrange is limited to a small frequency range. In the majority of spectrums, the slope of the inertial subrange compares well with the theoretically derived slope of  $-5/3$  by Kolmogorov (1941). Lastly, combining the velocity measurements from the interior of the submerged permeable breakwater and pore, it can be concluded that inside the porous the turbulence is locally homogenous and isotropic ( $u' \approx v' \approx w'$ ).

## **ACKNOWLEDGMENTS**

*The author acknowledges Maria Papanikolaou, Ioannis Roupas and Athanasios Ziros Ph.D candidate (Laboratory of Harbour Works, NTUA, Greece) for their help during the conduct of the experiments. Also, the author acknowledges the support of Constantine Memos, Professor emeritus, NTUA and Henk Jan Verhagen, Associate professor, TUDelft, supervising and assisting substantially this effort.*



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες

Οι ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες έχουν γίνει πρόσφατα ιδιαίτερως ελκυστικοί σαν μέσο παράκτιας προστασίας, κυρίως για οικιστικές παράκτιες περιοχές ή σε παράκτιες περιοχές που απευθύνονται σε αναψυχή λόγω της μειωμένης περιβαλλοντικής και οπτικής τους όχλησης. Καθώς βρίσκονται ολόκληροι κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, υποβάλλονται λιγότερο στη δράση των κυματισμών και κατά συνέπεια δεν εκτίθενται στις έντονες δράσεις των θραυόμενων κυματισμών. Ο επιτυχημένος σχεδιασμός των ύφαλων κυματοθραυστών είναι δυνατό να επιφέρει αποκατάσταση της ακτής παγιδεύοντας τα φυσικά ιζήματα. Το χαμηλότερο κόστος κατασκευής που παρουσιάζουν σε σύγκριση με άλλα είδη αποσπασμένων κυματοθραυστών αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα. Γενικά, τα πλεονεκτήματα των ύφαλων κυματοθραυστών έναντι των συμβατικών κατασκευών, τους καθιστά πιο ελκυστική επιλογή για την προστασία των φυσικών και των τεχνητών ακτών.

Οι ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες είναι κατάλληλοι κυρίως σε ακτές με ήπιο κυματικό κλίμα και μικρό εύρος παλίρροιας. Συχνά κατασκευάζονται για να προσφέρουν προστασία σε μια ακτή ή για να αποκαταστήσουν διαβρωμένες ακτές, ακόμα εφαρμόζονται ως προκαταρκτικό σύστημα άμυνας για την προστασία των κύριων παράκτιων έργων, αναδιανέμουν την παράκτια στερεομεταφορά, δημιουργούν επιθυμητά παράκτια χαρακτηριστικά και ηπιότερο κυματικό κλίμα, αποτρέπουν την προσάμμωση ή μεταθέτουν τις περιοχές όπου γίνεται η εναπόθεση των ιζημάτων σε διαύλους προσέγγισης λιμένων και ναυσιπλοΐας. Επομένως, αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατασκευές παράκτιας μηχανικής οι οποίες παίζουν σημαντικό ρόλο στη προστασία των ακτών και η χρήση τους διαρκώς αυξάνεται. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι ο σχεδιασμός τους είναι αρκετά πολύπλοκος και ότι η επιτυχημένη εφαρμογή τους προϋποθέτει ακριβή και αποτελεσματική μελέτη.

Ο κύριος σκοπός λειτουργίας των ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών είναι να μειώνουν την μεταδιδόμενη κυματική ενέργεια στην εσωτερική παράκτια ζώνη μετασχηματίζοντας τους κυματισμούς και τα θαλάσσια ρεύματα. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω της μερικής ανάκλασης και της καταστροφής της μηχανικής ενέργειας των εισερχόμενων κυματισμών. Η καταστροφή της ενέργειας λαμβάνει χώρα μέσω δύο μηχανισμών, ο πρώτος είναι η αντίσταση και η τριβή που συναντάνε οι κυματισμοί καθώς διαπερνούν το πορώδες του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη και ο δεύτερος

## Ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες

είναι η επιβαλλόμενη θραύση του κυματισμού πάνω από την στέψη του λόγω της απότομης αλλαγής στο βάθος του νερού καθώς οι κυματισμοί συναντούν τη προσήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη.

Η ανάπτυξη παράκτιων έργων προστασίας είναι πρωταρχικής σημασίας στη προστασία της γης, της περιουσίας, των υποδομών και άλλων οικονομικών πόρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές περιοχές παγκοσμίως να κυριαρχούνται από τεχνητές κατασκευές οι οποίες προκαλούν σημαντικές αλλαγές στις παράκτιες περιοχές μέσω της απώλειας, της αντικατάστασης και του κατακερματισμού των φυσικών οικοσυστημάτων. Η αυξημένη ανθρώπινη παρέμβαση στα φυσικά οικοσυστήματα εξασκεί έντονη πίεση στους παράκτιους πόρους και το περιβάλλον και επηρεάζει την δομή και την λειτουργία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.

Στο σημείο αυτό γίνεται φανερός ο διττός ρόλος που δύναται να διαδραματίσουν οι ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες, ο οποίος συνίσταται στην παράκτια προστασία και στην ελάχιστη υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος και των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Η επίδραση των κατασκευών αυτών στις παράκτιες διεργασίες έχει μελετηθεί εκτενώς σε αντίθεση με την περιβαλλοντική η οποία αποτελεί ένα σχετικά πρόσφατο πεδίο έρευνας.

Η προαναφερθείσα περιβαλλοντική διάσταση που μπορούν να έχουν οι εν λόγω παράκτιες κατασκευές είναι πολυσχιδής. Η σημαντική διαπερατότητα που παρουσιάζουν διαμέσου της κατασκευής αλλά και η σχετικά ελεύθερη μετάδοση της κυματικής ενέργειας πάνω από τη στέψη τους επιτρέπει την ευκολότερη κυκλοφορία και ανανέωση των παράκτιων υδάτων στη ζώνη μεταξύ της ακτογραμμής και της κατασκευής, ενισχύοντας την ποιότητα των υδάτων στη περιοχή αυτή (Pinto & Neves, 2003). Επιπρόσθετα το αξιόλογο πορώδες που παρουσιάζουν παρέχει την δυνατότητα να αναπτυχθούν στο εσωτερικό τους κατάλληλες συνθήκες για την αποίκηση των κατασκευών αυτών από συγκεκριμένα είδη θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδας. Τέλος στις περιοχές όπου συνήθως τοποθετούνται τέτοιες κατασκευές τα βενθικά οικοσυστήματα ευημερούν. Για το λόγο αυτό οι ύφαλοι κυματοθραύστες στις περιπτώσεις αυτές αποτελούν μια πιο επιθυμητή επιλογή σε σύγκριση με τους κυματοθραύστες των οποίων η στέψη διαπερνά τη στάθμη της θάλασσας, καθώς καταλαμβάνουν σημαντικά μικρότερη έκταση στο πυθμένα της θάλασσας εξ' αιτίας του μικρότερου ύψους τους και των πρηνών με πιο απότομη κλίση.

Οι αποσπασμένοι ύφαλοι κυματοθραύστες ανταποκρίνονται στην όλο και αυξανόμενη ζήτηση για περιβαλλοντικά φιλικές λύσεις παράκτιας προστασίας. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας την παράκτια προστασία, την περιβαλλοντική επίδραση και το αισθητικό αποτέλεσμα. Παρακάτω συνοψίζονται μερικά από τα κυριότερα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι κατασκευές αυτές:

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

1. Μπορούν να υποστηρίξουν την αποίκηση θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδας προωθώντας την προστασία των θαλάσσιων οικοσυστημάτων.
2. Αποτρέπουν την διάβρωση των ακτών και η γενικότερη επίδρασή τους στην παράκτια στερεομεταφορά είναι ήπια.
3. Επιτρέπουν την ευκολότερη κυκλοφορία και ανανέωση των υδάτων στην υπήνεμη πλευρά τους σε σύγκριση με τους κυματοθραύστες των οποίων η στέψη διαπερνά την ελεύθερη επιφάνεια.
4. Έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής.
5. Παρουσιάζουν καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα αφού η οπτική όχληση είναι ελάχιστη.
6. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι ύφαλοι κυματοθραύστες μπορούν να μειώσουν την κυματική ενέργεια πιο αποτελεσματικά σε σύγκριση με τους έξαλλους κυματοθραύστες.
7. Καταλαμβάνουν μικρότερη επιφάνεια του πυθμένα, οπότε και η επίδρασή τους στα οικοσυστήματα είναι πιο ήπια.

Παρόλο τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ύφαλοι κυματοθραύστες, δεν θα πρέπει να αγνοηθούν και τα μειονεκτήματα τους μερικά από τα οποία είναι:

1. Μια ύφαλη κατασκευή μπορεί να γίνει επικίνδυνη για την πλοήγηση μικρών αλιευτικών σκαφών και σκαφών αναψυχής.
2. Η διέλευση του νερού πάνω από την κατασκευή δημιουργεί ισχυρά τοπικά ρεύματα τα οποία μπορούν να είναι επικίνδυνα για τους κολυμβητές.
3. Η αποτελεσματική λειτουργία ενός ύφαλου κυματοθραύστη δεν είναι προφανής σε περιοχές όπου επικρατούν μεγάλα παλιρροιακά εύρη καθώς αυτή εξαρτάται κυρίως από το βάθος της θάλασσας πάνω από την στέψη του.
4. Η επιθεώρηση των κατασκευών αυτών μπορεί να είναι δύσκολη καθώς βρίσκονται εξ' ολοκλήρου κάτω από την στάθμη της θάλασσας.
5. Ο σχεδιασμός τέτοιων έργων είναι αρκετά δύσκολος και απαιτητικός καθώς η σωστή λειτουργία μιας ύφαλης κατασκευής εξαρτάται από την μέση στάθμη της θάλασσας και τις κυματικές συνθήκες.

## 1.2 Αντικείμενο της εργασίας και ερευνητικοί στόχοι

Στη παρούσα εργασία ύφαλοι διαπερατοί κυματοθραύστες και οι φυσικές διεργασίες που τους συνοδεύουν μελετώνται. Έχει παρατηρηθεί ότι αυτού του τύπου οι κατασκευές εκτός από την προστασία των ακτών από διάβρωση, είναι δυνατό να εμπλουτίσουν, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, τα τοπικά θαλάσσια οικοσυστήματα. Αυτή η λειτουργία των ύφαλων κυματοθραυστών υλοποιείται παρέχοντας καταφύγιο και κατάλληλες συνθήκες για την προσέλκυση της θαλάσσιας ζωής στο εσωτερικό αλλά και γύρω από τις κατασκευές αυτές. Για να εκτιμηθεί η οικολογική τους επίδραση στην θαλάσσια πανίδα και χλωρίδα και για το πως αυτή ανταποκρίνεται στην ύπαρξη τους, είναι πρωταρχικής σημασίας η διερεύνηση του υδροδυναμικού πεδίου στο σώμα της κατασκευής αλλά και στην όμορη περιοχή. Οι πιο καθοριστικές παράμετροι που επηρεάζουν την εγκατάσταση της θαλάσσιας ζωής στις περιοχές αυτές είναι οι τροχιακές ταχύτητες, οι πιέσεις και τα επίπεδα της τύρβης.

Εκτός από την περιβαλλοντική διάσταση των κατασκευών αυτών, θα πρέπει να αξιολογείται και η τεχνική τους αποτελεσματικότητα και αρτιότητα. Αυτή εξαρτάται κυρίως από την μείωση της κυματικής ενέργειας που προκαλείται από τις κατασκευές αυτές. Οι κύριοι μηχανισμοί μείωσης της ενέργειας είναι η θραύση των κυματισμών πάνω από τη στέψη τους και η αντίσταση που συναντάει η ροή διαμέσου του πορώδους της κατασκευής. Η απομείωση της ενέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα ύψη κύματος που διαδίδονται στην υπήνεμη πλευρά τους στην ενδότερη παράκτια ζώνη.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του υδροδυναμικού πεδίου μέσα και γύρω από έναν ύφαλο κυματοθραύστη. Η διερεύνηση αυτή αποτελεί άμεσο επακόλουθο των απαιτήσεων για την ολοκληρωμένη προσέγγιση των ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών, τόσο τεχνικά όσο και περιβαλλοντικά, στη σύγχρονη εποχή. Ωστόσο, θα πρέπει αρχικά να γίνει η προσπάθεια να απαντηθούν μια σειρά από ερωτήματα τα οποία θα μας καθοδηγήσουν για την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων.

- Πως μεταβάλλονται οι τροχιακές ταχύτητες σε διάφορες θέσεις κατά το πλάτος του ύφαλου κυματοθραύστη;
- Πως μεταβάλλεται η ταχύτητα καθ' ύψος σε συγκεκριμένες διατομές στην προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη;
- Πόση είναι η μέση σχετική τυρβώδης ένταση και πως μεταβάλλεται η τυρβώδης ένταση ως προς την φάση του κυματισμού;

- Πως επηρεάζει το βάθος του νερού τα υδροδυναμικά και κυματικά χαρακτηριστικά;
- Πως επηρεάζει το πλάτος της στέψης τα υδροδυναμικά και κυματικά χαρακτηριστικά;
- Μπορούν να εξαχθούν κάποια χαρακτηριστικά για τη δομή της τύρβης;
- Πως επηρεάζει η απελευθέρωση αρμονικών συνιστωσών το υδροδυναμικό και κυματικό πεδίο;

### 1.3 Μεθοδολογία

Για να γίνει εφικτή η απάντηση των ερωτημάτων που τέθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, η διερεύνηση του υδροδυναμικού και του κυματικού πεδίου προσεγγίζεται πειραματικά. Αρχικά είναι σημαντικό να γίνει ενδελεχής ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας για την κατανόηση των διαφόρων μηχανισμών και παραμέτρων που υπεισέρχονται στο εν λόγω πρόβλημα. Στη συνέχεια κατασκευάζονται φυσικά ομοιώματα τα οποία θα προσομοιάσουν όσο το δυνατό ρεαλιστικότερα τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την αλληλεπίδραση των κυματισμών με τους ύφαλους κυματοθραύστες. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να συνταχθεί ένα πλήρες πρόγραμμα που θα περιλαμβάνει τα διάφορα κυματικά σενάρια που θα εξεταστούν, τις θέσεις μέτρησης των ταχυτήτων των πιέσεων και των ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας καθώς επίσης και τις αντίστοιχες διάρκειες μέτρησης. Κατά την διαδικασία εκτέλεσης των πειραμάτων, συνεχής παρακολούθηση και επιθεώρηση των οργάνων μέτρησης είναι απαραίτητη για την διασφάλιση ποιοτικών αποτελεσμάτων. Μετά το πέρας το πειραμάτων και την συλλογή των απαραίτητων δεδομένων, ακολουθεί η ανάλυσή τους και διερευνάται η συμπεριφορά των κυρίων παραμέτρων. Τέλος γίνεται η προσπάθεια να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα και δίνονται συστάσεις και κατευθυντήριες γραμμές για περαιτέρω έρευνα.

### 1.4 Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία διαρθρώνεται σε συνολικά επτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη περιγραφή των ύφαλων κυματοθραυστών, αναφέρονται τα διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, τίθεται το αντικείμενο και οι ερευνητικοί στόχοι και καταγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων.

## Διάρθρωση της μεταπτυχιακής εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια πιο αναλυτική περιγραφή των ύφαλων κυματοθραυστών, των κυρίαρχων φυσικών παραμέτρων που επιδρούν στον μετασχηματισμό των κυματισμών και των φυσικών διεργασιών που σχετίζονται με τις κατασκευές αυτές.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι πειραματικές διατάξεις, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των πειραματικών μετρήσεων, η διαδικασία λήψης τους καθώς επίσης και το σύνολο των κυματικών σεναρίων που εξετάστηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τον τρόπο ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν. Αρχικά παρουσιάζεται η μέθοδος φιλτραρίσματος και στη συνέχεια η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή βασικών μεγεθών όπως είναι η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ταχύτητα, τυρβώδης ένταση και διατμητικές τάσεις. Περιγράφεται το φάσμα της κινητικής ενέργειας και τέλος σχολιάζεται η ποιότητα και η αξιοπιστία των δεδομένων ελήφθησαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που αφορούν τις μέσες ταχύτητες, τις τυρβώδεις εντάσεις, τις διατμητικές τάσεις και τα φάσματα του πλάτους ταλάντωσης και της κινητικής ενέργειας σε κάθε θέση μέτρησης. Επίσης δίνονται τα προφίλ των χαρακτηριστικών ταχυτήτων και των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων στις τρεις διατομές μέτρησης, τη προσήνεμη, την υπήνεμη και τη κεντρική.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που εξάγονται από την εξέταση των αποτελεσμάτων και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.



## 2. Ύφαλοι κυματοθραύστες

### 2.1 Εισαγωγή

Παλαιότερες έρευνες και μελέτες σχετικά με τους ύφαλους κυματοθραύστες δείχνουν ότι οι κατασκευές αυτές προκαλούν φυσικές διεργασίες που έχουν αδιαμφισβήτητη σημασία στο σχεδιασμό τους, στη σταθερότητα της λιθορριπής, στη διάβρωση του πυθμένα κοντά στην κατασκευή, στη διάδοση των κυματισμών στην ενδότερη παράκτια ζώνη και στις διάφορες καταστάσεις της ροής που προκαλεί η παρουσία τους.

Η μετάδοση των κυματισμών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη διαδικασία σχεδιασμού των ύφαλων κυματοθραυστών. Ικανοποιητικό ύψος και πλάτος στέψης του κυματοθραύστη μειώνουν σημαντικά το ύψος των διαδιδόμενων κυμάτων στην υπήνεμη πλευρά του. Επιπρόσθετα ικανοποιητική απόσταση από την ακτογραμμή μειώνει τα επίπεδα της τύρβης στην προστατευόμενη παράκτια περιοχή. Η τραχύτητα του υλικού του κυματοθραύστη βοηθάει σημαντικά στην αποτελεσματική καταστροφή της ενέργειας των εισερχόμενων κυματισμών, ενώ η τριβή του πυθμένα εξασκεί σημαντική διάχυση της ενέργειας και μείωση του ύψους κύματος όταν το βάθος του νερού είναι σχετικά μικρό και το πλάτος στέψης είναι αρκετά μεγάλο.

Η μείωση αυτή της ενέργειας των κυματισμών και της τύρβης στην εσωτερική παράκτια ζώνη παγιδεύει και εναποθέτει το ίζημα που βρίσκεται σε αιώρηση και που μεταφέρεται από το κατά μήκος στην ακτή ρεύμα, αποτρέποντας ουσιαστικά την μεταφορά του υπεράκτια από το βελοειδές ρεύμα (Pilarczyk & Zeidler, 1996). Οπότε, είναι πολύ σημαντικό ο σχεδιασμός τέτοιων έργων να διασφαλίζει ότι η μεταδιδόμενη ενέργεια δεν είναι ικανή να διαβρώσει περαιτέρω την υπό προστασία ακτή.

### 2.2 Φυσικές παράμετροι που σχετίζονται με τους ύφαλους κυματοθραύστες

Ο μετασχηματισμός των κυματισμών καθώς αυτοί διέρχονται πάνω από ένα ύφαλο κυματοθραύστη εξαρτάται από διάφορες φυσικές παραμέτρους, άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο καθοριστικές. Η πιο σημαντική από αυτές είναι το προσπίπτον ύψος κύματος το οποίο ορίζεται ως κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλίας του κύματος όταν αυτό μετρείται στον προσήνεμο πόδα της κατασκευής. Η περίοδος του προσπίπτοντος κυματισμού ορίζεται ως το χρονικό διάστημα

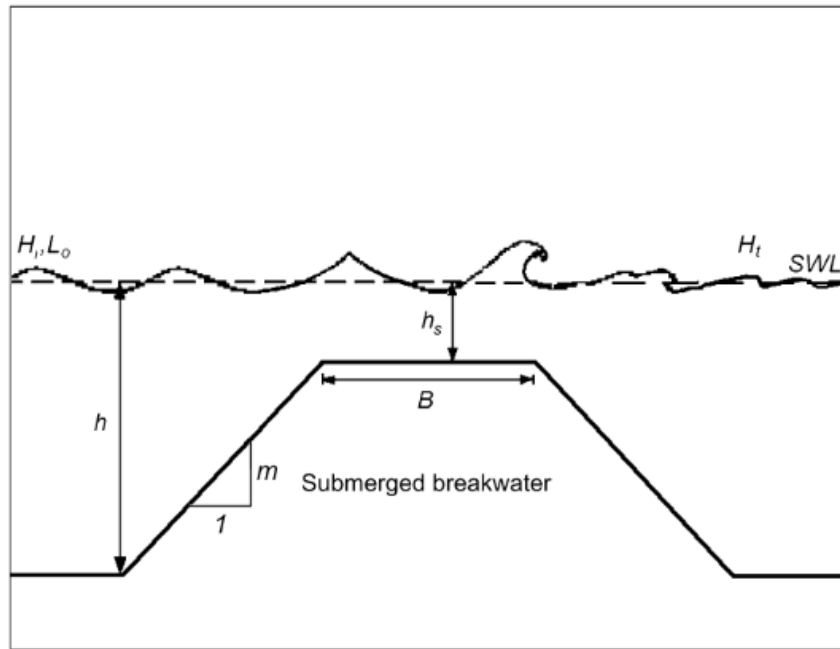
Φυσικές παράμετροι που σχετίζονται με τους ύφαλους κυματοθραύστες

που μεσολαβεί στην διέλευση δύο διαδοχικών κορυφογραμμών σε ένα σταθερό σημείο και συνδέεται άμεσα με το μήκος κύματος και το βάθος του νερού. Το προσπίπτον μήκος κύματος στα βαθιά, το οποίο αντιστοιχεί στην περίοδο του κύματος, ορίζεται ως η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφογραμμών κατά την διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Όσον αφορά το κατασκευαστικό μέρος των ύφαλων κυματοθραυστών, ορίζεται ως ύψος του κυματοθραύστη η κατακόρυφη απόσταση από το πυθμένα έως την στέψη του. Το βάθος του νερού είναι η κατακόρυφη απόσταση από τον πυθμένα έως την στάθμη ηρεμίας του νερού στο προσήνεμο πόδα του κυματοθραύστη, ενώ το βάθος βύθισης ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της επιφάνειας της θάλασσας και της στέψης του κυματοθραύστη. Το πλάτος στέψης ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης ακμής. Η κλίση του προσήνεμου πρानούς της κατασκευής αλλά και η κλίση του πυθμένα επηρεάζουν σημαντικά την αλληλεπίδραση μεταξύ κυμάτων και κατασκευής. Τέλος ορίζονται η μέση διάμετρος των ογκολίθων που αποτελούν την κατασκευή και το πορώδες όπου είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον συνολικό όγκο.

Μερικές από τις φυσικές παραμέτρους οι οποίες εμπλέκονται στον μετασχηματισμό των κυματισμών κατά την αλληλεπίδραση τους με ένα ύφαλο κυματοθραύστη φαίνονται στο Σχήμα 2.2.1. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν το προσπίπτον ύψος κύματος ( $H_i$ ), το μήκος κύματος στα βαθιά ( $L_o$ ), το βάθος του νερού ( $h$ ), το πλάτος στέψης ( $B$ ), το βάθος βύθισης ( $h_s$ ), την προσήνεμη κλίση του πρानούς ( $m$ ) και το μεταδιδόμενο ύψος κύματος ( $H_t$ ) στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη.

Οι παραπάνω παράμετροι που αναφέρθηκαν είναι χαρακτηριστικές για δισδιάστατη διάδοση κυματισμών πάνω από ύφαλους κυματοθραύστες. Στην περίπτωση που μελετώνται τρισδιάστατες διεργασίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν επιπλέον παράμετροι όπως είναι το μήκος του κυματοθραύστη, το μέγεθος των κενών ανάμεσα στους κυματοθραύστες, η απόσταση από την ακτή κ.α.



Σχήμα 2.2.1 Φυσικές παράμετροι που σχετίζονται με την διάδοση κυματισμών πάνω από έναν ύφαλο κυματοθραύστη.

### 2.3 Φυσικές διεργασίες που συνδέονται με την παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών

Οι ύφαλοι κυματοθραύστες συνδέονται με διάφορες φυσικές διεργασίες οι οποίες προκαλούν τον μετασχηματισμό των διαδιδόμενων κυματισμών. Μερικές από αυτές είναι η διάθλαση, η περίθλαση, η ανάκλαση, η ρήγωση, η θραύση των κυματισμών, η δημιουργία κυματισμών με υψηλότερες αρμονικές συχνότητες κ.α. Τα φαινόμενα που συνοδεύουν το μετασχηματισμό των κυματισμών είναι αρκετά πολύπλοκα και εξαρτώνται κυρίως από τα κυματικά χαρακτηριστικά και τις γεωμετρικές ιδιότητες της κατασκευής.

Αρχικά, εξετάζοντας την αλληλεπίδραση των κυματισμών με τους ύφαλους κυματοθραύστες, παρατηρείται επιβράδυνση των εισερχόμενων κυματισμών καθώς αυτοί συναντούν το προσήνεμο πρηνές και προσεγγίζουν μικρότερα βάθη πάνω από τη στέψη του. Στην προσήνεμη πλευρά των κατασκευών αυτών το κυματικό πεδίο μπορεί να είναι ακανόνιστο και περίπλοκο, με παρουσία χαμηλής συχνότητας κυματισμών και αυξημένες μη γραμμικότητες (Liberatore & Petti, 1993) (Petti & Ruol, 1992). Η μείωση της ταχύτητας διάδοσης τους και η αντίστοιχη μείωση του μήκους κύματος τους, επιφέρει αύξηση της ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας η οποία αρχικά επιφέρει μείωση και στην συνέχεια αύξηση του ύψους κύματος μέχρι την θραύση του. Η παραπάνω διεργασία είναι

Φυσικές διεργασίες που συνδέονται με την παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών

γνωστή ως ρήχωση. Κατά την ρήχωση παράγονται μη γραμμικότητες με αρμονικές συχνότητες (bound harmonic waves) ως προς την κύρια συχνότητα των κυματισμών (Beji & Battjes, 1993). Η ρήχωση που προκαλείται από τους ύφαλους κυματοθραύστες μπορεί να αυξήσει σημαντικά τη μη γραμμικότητα του κυματικού πεδίου.

Η διαδικασία της ρήχωσης έχει ως συνέπεια τη παραγωγή μιας κυματογενούς ροής οριζόντιας ορμής η οποία πρέπει να ισορροπηθεί. Αυτό γίνεται εφικτό μέσω της σταδιακής μείωσης της μέσης στάθμης της θάλασσας (set down) από τα βαθιά στα ρηχά και λαμβάνει χώρα πριν τη θραύση των κυματισμών. Από την άλλη πλευρά όμως η αύξηση στο ύψος κύματος λόγω ρήχωσης προκαλεί την απότομη κλίση στην κυματομορφή, η αστάθεια της οποίας επιφέρει την θραύση και την μείωση της ενέργειας των κυματισμών μέσω διάχυσης και μετατροπής σε τυρβώδη κινητική ενέργεια (McCowan, 1891), (Miche, 1944), (Munk, 1949). Η θραύση των κυματισμών στους ύφαλους κυματοθραύστες συνδέεται άμεσα με την προσήνεμη κλίση του πρανούς και το βάθος βύθισης (freeboard) (Smith & Kraus, 1990), (Smith & Kraus, 1991). Η κλίση του πυθμένα επηρεάζει και αυτή σημαντικά την θραύση και τον τύπο της (Zanuttigh & Lamberti, 2006).

Μετά τη θραύση των κυματισμών, η ροή ενέργειας των κυματισμών και οι τάσεις ακτινοβολίας μειώνονται λόγω της διάχυσης της ενέργειας και της μείωσης του ύψους κύματος στην εσωτερική παράκτια ζώνη (surf zone). Η οριζόντια ορμή στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να εξισορροπηθεί ξανά, και αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας. Αυτό έχει ως συνέπεια την δημιουργία μιας βαθμίδας τάσεων ακτινοβολίας η οποία επιφέρει την κυματογενή ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας (set-up). Η τελευταία δημιουργεί με τη σειρά της θαλάσσια ρεύματα κατά μήκος της ακτογραμμής, καθώς και άλλα κυματογενή ρεύματα. Το σύνολο των φαινομένων αυτών παίζει σημαντικό ρόλο στην υδροδυναμική των ύφαλων κυματοθραυστών.

Η ανάκλαση των κυματισμών είναι ένα ακόμα φαινόμενο το οποίο συμβάλει στην αλλαγή της κατεύθυνσης των προσπιπτόντων κυματισμών, καθώς ένα μέρος της ενέργειας τους ανακλάται πίσω προς τα βαθιά. Το ποσό της ενέργειας που ανακλάται εξαρτάται κυρίως από την κλίση του προσήνεμου πρανούς και το βάθος βύθισης του κυματοθραύστη (Ahrens, 1987) (Ahrens, 1988), (Dattari, et al., 1979) (van der Meer, 1991). Τα θαλάσσια κύματα περιθλώνται όταν συναντούν ανοίγματα ή τις άκρες ύφαλων κυματοθραυστών. Η κυματική ενέργεια μεταφέρεται κατά μήκος της κορυφής του κύματος στην προστατευμένη περιοχή λόγω αλλαγών στο ύψος κύματος. Όταν τα κύματα πλησιάζουν έναν ύφαλο κυματοθραύστη υπό γωνία, το τμήμα τους που βρίσκεται σε βαθύτερα νερά διαδίδεται γρηγορότερα σε σχέση με αυτό που βρίσκεται σε ρηχότερα νερά πάνω από το προσήνεμο πρανές και τη στέψη του κυματοθραύστη. Σε αυτή την περίπτωση λαμβάνει χώρα

μια διαφορετική φυσική διεργασία, γνωστή ως διάθλαση, η οποία επιφέρει αλλαγή στη κατεύθυνση διάδοσης των κυματισμών.

Πάνω από τη στέψη του κυματοθραύστη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένα, παρατηρείται υπό συνθήκες μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα των κυματισμών σε υψηλότερες αρμονικές συχνότητες (Driscoll, et al., 1993) (Mei & Unluata, 1972). Αυτή η παραγωγή αρμονικών εξαρτάται σε κάποιο βαθμό από την ανάκλαση και την θραύση των κυματισμών καθώς και από την διάχυση της ενέργειας από το πορώδες της κατασκευής. Μετά την στέψη του κυματοθραύστη οι παραχθείσες υψηλότερες αρμονικές διαχωρίζονται από την κύρια συνιστώσα του κύματος και διαδίδονται ως ελεύθερα κύματα με την δικιά τους ταχύτητα (Beji & Battjes, 1993) (Beji & Battjes, 1994) (Cornett, et al., 1994) (Petti & Ruol, 1992) . Η μεταφορά ενέργειας σε υψηλότερες αρμονικές έχει ως συνέπεια να λαμβάνουν χώρα φαινόμενα που επηρεάζουν σημαντικά την υδροδυναμική και την στερεομεταφορά στη παράκτια ζώνη καθώς επίσης και την σταθερότητα της κατασκευής. Η μεταφορά αυτή θα μπορούσε θεωρητικά να επιτρέψει τον σχεδιασμό ύφαλων κυματοθραυστών ο οποίος θα προωθεί την παραγωγή αρμονικών μειώνοντας τον κίνδυνο να μεταφέρεται το σύνολο της ενέργειας από μία μόνο χαμηλή συχνότητα (Losada, et al., 1997).

Η μορφοδυναμική απόκριση των ύφαλων κυματοθραυστών, συμπεριλαμβανομένης της τοπογραφίας του πυθμένα και του προφίλ της ακτής, θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά τις διάφορες προσομοιώσεις και αναλύσεις εξαιτίας του σημαντικού ρόλου που παίζει στη συνολική αρτιότητα των κατασκευών αυτών. Η πρόβλεψη των αλλαγών στη μορφολογία των παράκτιων περιοχών υπό την παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών αποτελεί μεγάλη πρόκληση στο πεδίο της παράκτιας μηχανικής καθώς θα πρέπει να διερευνηθούν οι θεμελιώδεις διεργασίες που συνδέουν τις υδροδυναμικές συνθήκες με τις μορφοδυναμικές αλλαγές. Η μορφοδυναμική απόκριση δεν έχει μελετηθεί εκτενώς και ακόμα περιλαμβάνει πολλές αβεβαιότητες οι οποίες θα πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά κατά τη διαδικασία σχεδιασμού τέτοιων έργων.

Όλες οι υδροδυναμικές επιδράσεις από τη παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών θα πρέπει να συμπεριληφθούν για την ακριβή μορφοδυναμική ανάλυση. Στη πράξη όμως διαφορετικές μορφοδυναμικές συμπεριφορές μπορούν να παρατηρηθούν οι οποίες οφείλονται σε διάφορους περιβαλλοντικούς και σχεδιαστικούς παράγοντες. Τέτοιοι είναι το κυματικό κλίμα, η στάθμη της θάλασσας, η γεωμετρία και η θέση του κυματοθραύστη, η κατάσταση της ακτής, τα χαρακτηριστικά και η διαθεσιμότητα του ιζήματος, τα υδροδυναμικά μοτίβα κ.α. Η ανάλυση θα πρέπει να περιλαμβάνει την στερεομεταφορά που συνδέεται με το κατά μήκος αλλά και τα κάθετα στην ακτή ρεύματα. Τα κατά μήκος στην ακτή ρεύματα παράγονται κυρίως από τη μη κάθετη πρόσπτωση των κυματισμών στην ακτή, από τον μετασχηματισμό των κυμάτων από τις ύφαλες κατασκευές, από την

Φυσικές διεργασίες που συνδέονται με την παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών

κυματογενή ανύψωση της μέσης στάθμης της θάλασσας κ.α. Ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες κάθετα στην ακτή ρεύματα μπορούν να εμφανιστούν και, από την άποψη της βραχυχρόνιας σταθερότητας της ακτής, μπορούν να την διαβρώσουν σημαντικά. Τα κάθετα στην ακτή ρεύματα προκαλούν ρεύματα επιστροφής (undertow), ενώ προέρχονται από την κυματική ασυμμετρία και από ροές που οφείλονται στην ανάκλαση των κυματισμών. Όλες οι παραπάνω φυσικές διεργασίες που συνδέονται με την παρουσία ύφαλων κυματοθραυστών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για το σωστό σχεδιασμό τέτοιων κατασκευών.

## 3. Περιγραφή των πειραματικών διατάξεων και μετρήσεων

### 3.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα στο Laboratory of Fluid Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geosciences στο Delft University of Technology.

Ο κυρίαρχος στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν να παρθούν εργαστηριακές μετρήσεις των κύριων υδροδυναμικών παραμέτρων, όπως είναι η ταχύτητα, η πίεση και η μεταβολή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού, στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό μέρος ενός ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη υπό την επίδραση κυματισμών.

Η συλλογή των δεδομένων αυτών θα επιτρέψει την ανάλυση των χαρακτηριστικών της τυρβώδους ροής που αναπτύσσεται στις παραπάνω περιοχές έτσι ώστε να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα του διττού ρόλου που μπορούν να διαδραματίσουν τα παράκτια αυτά έργα προστασίας.

1. Δημιουργία ενός τεχνητού οικοτόπου ο οποίος θα είναι σε θέση να υποστηρίξει την πανίδα και την χλωρίδα της περιοχής.
2. Προστασία της ακτής από την διείσδυση ανεμογενών κυματισμών.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε διώρυγα κυματισμών (wave flume) και περιλάμβαναν διάδοση μονοχρωματικών και φασματικών κυματισμών. Συνολικά μελετήθηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες ύφαλων κυματοθραυστών, με δύο διαφορετικές στάθμες νερού για κάθε γεωμετρία.

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις των υπό εξέταση μεγεθών προς ανάλυση ήταν

1. **Laser Doppler Velocimeter (LDV)**. Το όργανο αυτό είναι ικανό να μετρήσει ταυτόχρονα δύο συνιστώσες της ταχύτητας, την οριζόντια και την κατακόρυφη, στο εσωτερικό αλλά και στο εξωτερικό μέρος του ύφαλου κυματοθραύστη.
2. **Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)**. Το όργανο αυτό έχει την δυνατότητα να μετρήσει και τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας, τόσο στο εσωτερικό όσο και στο εξωτερικό μέρος της κατασκευής.
3. **Αισθητήρες πίεσης**. Έπειτα από αφαίρεση της υδροστατικής πίεσης οι αισθητήρες κατέγραφαν την δυναμική πίεση σε τρία διαφορετικά σημεία της ύφαλης κατασκευής.

4. **Μετρητές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας** (wave gauges). Χρησιμοποιήθηκαν συνολικά επτά μετρητές οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη με σκοπό την εύρεση της απομείωσης του ύψους κύματος αλλά και τον προσδιορισμό των ανακλάσεων από τα δύο άκρα της διώρυγας.
5. **EMS**. Δύο μετρητές EMS τοποθετήθηκαν στην προσήνεμη και στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη, στο μέσο βάθος περίπου, για την μέτρηση των οριζόντιων ταχυτήτων στις θέσεις αυτές.

Αναλυτικά οι πειραματικές διατάξεις και οι μετρήσεις στην υδραυλική διώρυγα περιγράφονται στα παρακάτω υποκεφάλαια.

## 3.2 Μοντέλα ύφαλων κυματοθραυστών και κατασκευή

### 3.2.1 Κλίμακες ομοιότητας

Η αντιστοίχιση των διαφόρων παραμέτρων ανάμεσα στο πρωτότυπο και το φυσικό ομοίωμα γίνεται μέσω του συντελεστή κλίμακας, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της τιμής μιας παραμέτρου στο πρωτότυπο προς την τιμή της ίδιας παραμέτρου στο μοντέλο. Συμβολικά αυτό μπορεί να γραφεί ως:

$$N_x = \frac{X_p}{X_m} = \frac{\text{Τιμή της παραμέτρου } X \text{ στο πρωτότυπο}}{\text{Τιμή της παραμέτρου } X \text{ στο μοντέλο}} \quad (3.1)$$

όπου  $N_x$  είναι ο συντελεστής κλίμακας του πρωτότυπου προς το μοντέλο της παραμέτρου  $X$ , και οι δείκτες  $p$  και  $m$  αντιπροσωπεύουν το πρωτότυπο και το μοντέλο αντίστοιχα.

Ένα φυσικό μοντέλο υπό κλίμακα είναι απόλυτα όμοιο με το πρωτότυπο, χωρίς την επίδραση φαινομένων κλίμακας, αν ικανοποιεί την μηχανική ομοιότητα η οποία αποτελείται από τα επόμενα τρία κριτήρια (Yalin, 1971), (Kobus, 1980), (Novak & Cabelka, 1981), (Hughes, 1993), (Heller, 2011):

- Γεωμετρική ομοιότητα
- Κινηματική ομοιότητα
- Δυναμική ομοιότητα

Γεωμετρική ομοιότητα μεταξύ του μοντέλου και του πρωτοτύπου υπάρχει όταν οι λόγοι όλων των αντίστοιχων γραμμικών διαστάσεων είναι ίσοι. Αυτή η σχέση είναι ανεξάρτητη από κάθε είδους κίνηση και περιλαμβάνει ομοιότητα μόνο ως προς την μορφή (Warnock, 1950). Η κινηματική ομοιότητα υποδεικνύει ομοιότητα μεταξύ των κινήσεων των σωματιδίων στο μοντέλο και στο



πρωτότυπο. Για να επιτευχθεί, θα πρέπει οι λόγοι του χρόνου, της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της παροχής να είναι σταθεροί ανάμεσα στο μοντέλο και στο πρωτότυπο (Hudson, 1979). Για να επιτευχθεί δυναμική ομοιότητα, εκτός της γεωμετρικής και της κινηματικής ομοιότητας, θα πρέπει όλοι οι λόγοι των δυνάμεων ανάμεσα στο μοντέλο και το πρωτότυπο να είναι ίσοι. Στη δυναμική των ρευστών οι πιο συχνά εμφανιζόμενες δυνάμεις είναι (Hughes, 1993):

$$\text{Αδρανειακή δύναμη} = (\rho L^3) \left(\frac{V^2}{L}\right) = \rho L^2 V^2 \quad (3.2)$$

$$\text{Δύναμη βαρύτητας} = \rho L^3 g \quad (3.3)$$

$$\text{Δύναμη ιξώδους} = \mu \left(\frac{V}{L}\right) L^2 = \mu V L \quad (3.4)$$

$$\text{Δύναμη επιφανειακής τάσης} = \sigma L \quad (3.5)$$

$$\text{Ελαστική δύναμη συμπίεσης} = E L^2 \quad (3.6)$$

$$\text{Δύναμη πίεσης} = p L^2 \quad (3.7)$$

Οι παράμετροι στις εξισώσεις (3.2)-(3.7) είναι η πυκνότητα του ρευστού  $\rho$ , το χαρακτηριστικό μήκος  $L$ , η χαρακτηριστική ταχύτητα  $V$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας  $g$ , το δυναμικό ιξώδες  $\mu$ , η επιφανειακή τάση  $\sigma$ , το μέτρο ελαστικότητας του Young  $E$  και η πίεση  $p$ . Τυπικές παράμετροι για το χαρακτηριστικό μήκος  $L$  μπορεί να θεωρηθούν το βάθος του νερού, το ύψος κύματος ή η διάμετρος μιας κατασκευής ενώ για την χαρακτηριστική ταχύτητα  $V$  η ταχύτητα προσέγγισης της ροής ή η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Η δυναμική ομοιότητα απαιτεί οι λόγοι μεταξύ των διαφόρων δυνάμεων στις εξισώσεις (3.2)-(3.7) να είναι ταυτόσημοι στο μοντέλο και στο πρωτότυπο (Kobus, 1980). Στο πεδίο της δυναμικής των ρευστών η πιο καθοριστική δύναμη είναι η αδρανειακή οπότε και εμφανίζεται στους συνδυασμούς των λόγων των δυνάμεων:

- Αριθμός Froude (δύναμη αδράνειας/δύναμη βαρύτητας)

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.8)$$

- Αριθμός Reynolds (δύναμη αδράνειας/δύναμη ιξώδους)

Μοντέλα ύφαλων κυματοθραυστών και κατασκευή

$$R = \frac{LV}{\nu} \quad (3.9)$$

- Αριθμός Weber (δύναμη αδράνειας/δύναμη επιφανειακής τάσης)

$$W = \frac{\rho V^2 L}{\sigma} \quad (3.10)$$

- Αριθμός Cauchy (δύναμη αδράνειας/ελαστική δύναμη)

$$C = \frac{\rho V^2}{E} \quad (3.11)$$

- Αριθμός Euler (δύναμη πίεσης/δύναμη αδράνειας)

$$E = \frac{p}{\rho V^2} \quad (3.12)$$

Στην εξίσωση (3.9) το κινηματικό ιξώδες  $\nu = \mu/\rho$  χρησιμοποιήθηκε αντί του δυναμικού ιξώδους  $\mu$ .

### 3.2.2 Ομοιότητα κατά Froude

Όταν εξετάζονται ροές με ελεύθερη επιφάνεια, κατά κανόνα εφαρμόζεται το κριτήριο ομοιότητας Froude, το οποίο προϋποθέτει ότι ο λόγος των δυνάμεων της αδράνειας προς τον λόγο των δυνάμεων της βαρύτητας είναι ίδιος ανάμεσα στο μοντέλο και στο πρωτότυπο:

$$F_m = F_p \quad (3.13)$$

Με την χρήση των εξισώσεων (3.1) και (3.8) προκύπτει

$$\frac{N_V}{\sqrt{N_g N_L}} = 1 \text{ ή } N_{Fr} = 1 \quad (3.14)$$

Η κλίμακα ομοιότητας Froude είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για μοντέλα όπου η επίδραση των δυνάμεων τριβής είναι αμελητέα (π.χ. διάδοση κυματισμών στα βαθιά) ή για σύντομα, πολύ τυρβώδη φαινόμενα (π.χ. υδραυλικό άλμα). Στην πλειοψηφία των μοντέλων στο πεδίο της παράκτιας μηχανικής εφαρμόζεται η κλίμακα ομοιότητας κατά Froude, αφού οι δυνάμεις που σχετίζονται με και την επιφανειακή τάση και τις ελαστικές παραμορφώσεις είναι σχετικά μικρές και μπορούν να αγνοηθούν (Warnock, 1950).

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.2.1) δίνονται οι λόγοι ομοιότητας κατά Froude διαφόρων φυσικών παραμέτρων.

Πίνακας 3.2.1 Λόγοι ομοιότητας διαφόρων παραμέτρων ως προς την κλίμακα Froude.

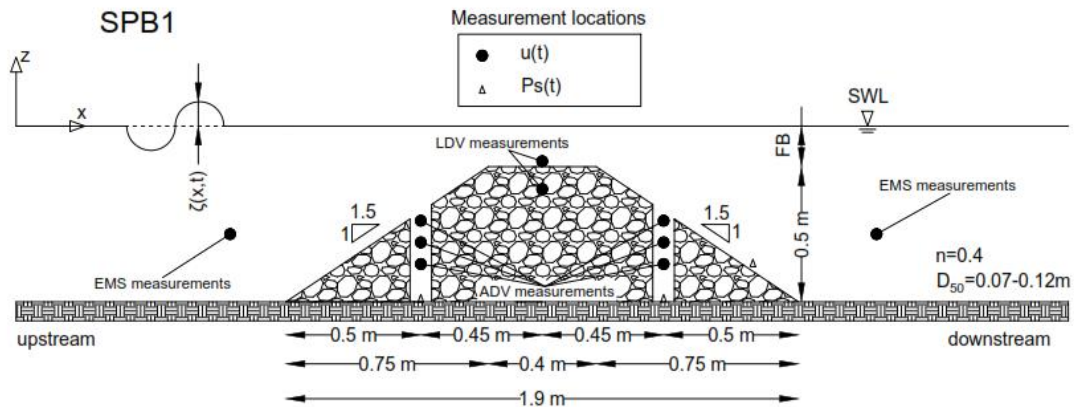
Παράμετρος	Διαστάσεις	Κλίμακα Froude
<b>Γεωμετρική ομοιότητα</b>		
Μήκος	[L]	$N_L$
Επιφάνεια	[L <sup>2</sup> ]	$N_L^2$
Όγκος	[L <sup>3</sup> ]	$N_L^3$
<b>Κινηματική ομοιότητα</b>		
Χρόνος	[T]	$N_L^{1/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{-1/2}$
Ταχύτητα	[LT <sup>-1</sup> ]	$N_L^{1/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$
Επιτάχυνση	[LT <sup>-2</sup> ]	$N_\gamma N_\rho^{-1}$
Παροχή	[L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]	$N_L^{5/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$
Κινηματικό ιξώδες	[L <sup>2</sup> T <sup>-1</sup> ]	$N_L^{3/2} N_\rho^{-1/2} N_\gamma^{1/2}$
<b>Δυναμική ομοιότητα</b>		
Μάζα	[M]	$N_L^3 N_\rho$
Δύναμη	[MLT <sup>-2</sup> ]	$N_L^3 N_\gamma$
Πυκνότητα	[ML <sup>-3</sup> ]	$N_\rho$
Ειδικό βάρος	[ML <sup>-2</sup> T <sup>-2</sup> ]	$N_\gamma$
Δυναμικό ιξώδες	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-1</sup> ]	$N_L^{3/2} N_\rho^{1/2} N_\gamma^{1/2}$
Πίεση και Τάση	[ML <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> ]	$N_L N_\gamma$

### 3.2.3 Φυσικά ομοιώματα ύφαλων κυματοθραυστών

Για την διενέργεια των πειραμάτων στη διώρυγα κυματισμών κατασκευάστηκαν δύο διαπερατοί ύφαλοι κυματοθραύστες (**Submerged Permeable Breakwater, SPB**) τραπεζοειδούς διατομής, από φυσικούς ογκολίθους, με διάμετρο  $d_{50}=7\div 12\text{cm}$ , οι οποίοι στο εξής θα αποκαλούνται **SPB1** και **SPB2**.

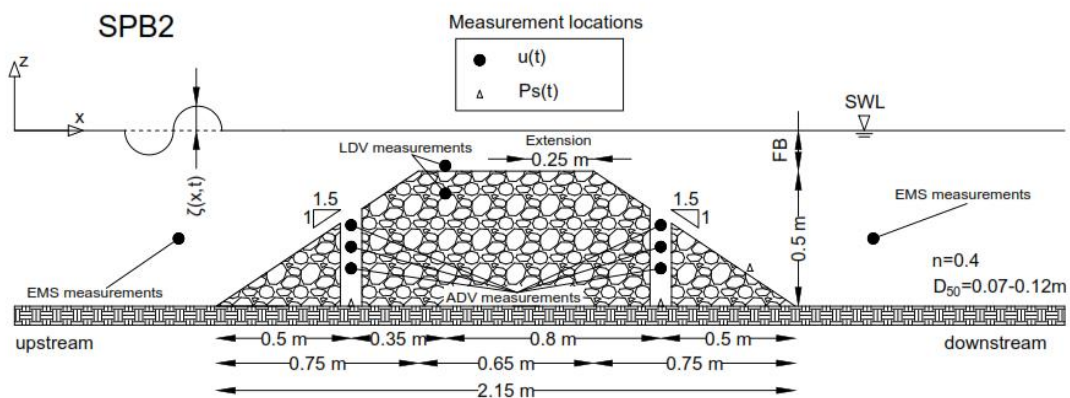
Για το μοντέλο **SPB1** το πλάτος στέψης ήταν 0.4m και το πλάτος στο πυθμένα ήταν 1.9m. Το ύψος του κυματοθραύστη ήταν 0.5m ενώ το πλάτος του μοντέλου κατά την εγκάρσια διεύθυνση του καναλιού ήταν 0.4m. Η κλίση των πρανών στην προσήνεμη και την υπήνεμη πλευρά ήταν η ίδια και ήταν 1:1.5. Το πορώδες (λόγος του όγκου των κενών προς τον συνολικό όγκο) που μετρήθηκε προέκυψε  $n\approx 0.4$ . Τα παραπάνω χαρακτηριστικά φαίνονται σχηματικά στο παρακάτω Σχήμα 3.2.1.

## Μοντέλα ύφαλων κυματοθραυστών και κατασκευή



Σχήμα 3.2.1 Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη SPB1 καθώς και οι θέσεις μέτρησης των ταχυτήτων και των πιέσεων, στο εσωτερικό, το εξωτερικό και στην εγγύς περιοχή του μοντέλου.

Το μοντέλο **SPB2** προήλθε από το μοντέλο **SPB1** με προέκταση της στέψης του κυματοθραύστη κατά 0.25m, οπότε το τελικό πλάτος στέψης που προέκυψε ήταν 0.65m. Αντίστοιχα το πλάτος στον πυθμένα της διώρυγας αυξήθηκε στα 2.15m. Τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία και το πορώδες παρέμειναν τα ίδια όπως στο μοντέλο **SPB1**. Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου **SPB2** φαίνεται στο Σχήμα 3.2.2.



Σχήμα 3.2.2 Σχηματική απεικόνιση της γεωμετρίας του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη SPB2 καθώς και οι θέσεις μέτρησης των ταχυτήτων και των πιέσεων, στο εσωτερικό, το εξωτερικό και στην εγγύς περιοχή του μοντέλου.

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 3.2.2) δίνονται συγκεντρωτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δύο μοντέλων που εξετάστηκαν κατά την διαδικασία των πειραμάτων.

Πίνακας 3.2.2 Συγκεντρωτικός πίνακας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των μοντέλων SPB1 και SPB2.

Μοντέλο	Πορώδες	Πλάτος στέψης (m)	Ύψος (m)	Κλίση πρανών	Όγκος (m <sup>3</sup> )
SPB1	0.4	0.40	0.5	1/1.5	0.19
SPB2	0.4	0.65	0.5	1/1.5	0.24

Τα προαναφερθέντα μοντέλα ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών, **SPB1** και **SPB2**, αποτελούνται από πέντε συνολικά ξεχωριστά μέρη. Πιο συγκεκριμένα αποτελούνται από δύο τριγωνικής διατομής πρανή και από τρεις ορθογωνικής διατομής πλάκες για την διαμόρφωση του κεντρικού τμήματος. Το κάθε ένα από αυτά τα μέρη αποτελείται από συγκολλημένες μεταξύ τους πέτρες. Η συγκόλληση των πετρών έγινε με την χρήση εποξειδικής κόλλας και με την βοήθεια αναδευτήρα για την ομοιόμορφη κατανομή της κόλλας σε όλη την επιφάνεια των πετρών.

Ο λόγος για τον οποίο έγινε η συγκόλληση των πετρών ήταν

- Για να δημιουργηθούν δύο κατακόρυφες τρύπες κυκλικής διαμέτρου 8cm στο προσήνεμο και το υπήνεμο πρανές έτσι ώστε να είναι δυνατή η εισχώρηση του οργάνου **ADV** και των πιεσόμετρων στο εσωτερικό τους (Εικόνα 3.2.1, Εικόνα 3.2.2).
- Για να δημιουργηθούν τρεις εγκάρσιες (ως προς τον διαμήκη άξονα του καναλιού) οπές, μία σε κάθε ορθογωνική πλάκα, διαμέτρου 3cm έτσι ώστε να είναι δυνατή η λήψη των ταχυτήτων στο εσωτερικό της κατασκευής με την χρήση του οργάνου **LDV**. (Εικόνα 3.2.3, Εικόνα 3.2.4).



Εικόνα 3.2.1 Πλάγια όψη του πρανούς τριγωνικής διατομής, κλίσης 1:1.5, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη.

## Μοντέλα ύφαλων κυματοθραυστών και κατασκευή

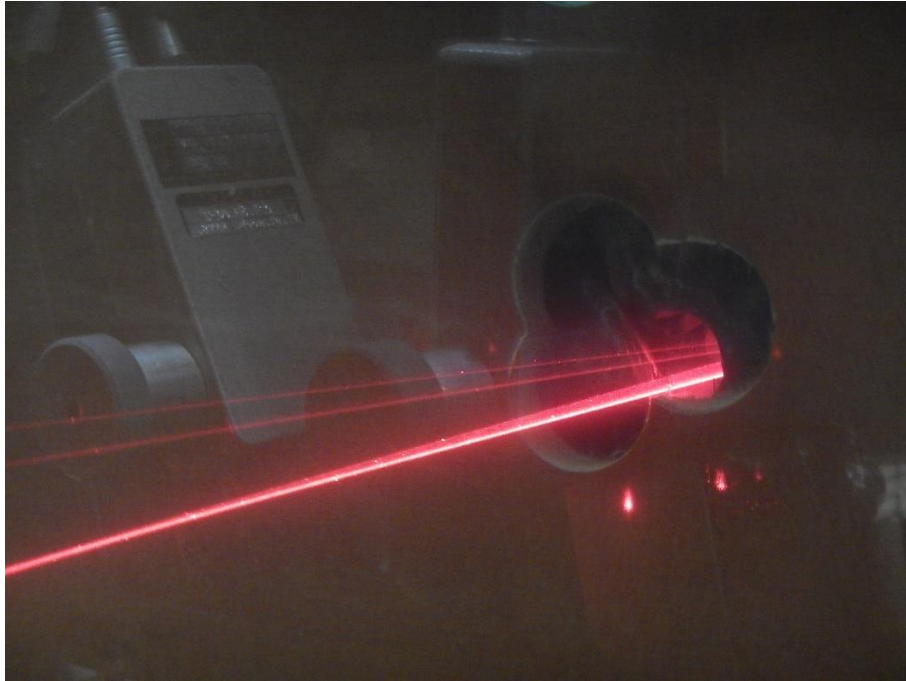


*Εικόνα 3.2.2 Εμπρόσθια όψη του πρανούς από την Εικόνα 5.2.1.*



*Εικόνα 3.2.3 Οι τρεις ορθογωνικής διατομής πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κεντρικού τμήματος του κυματοθραύστη.*





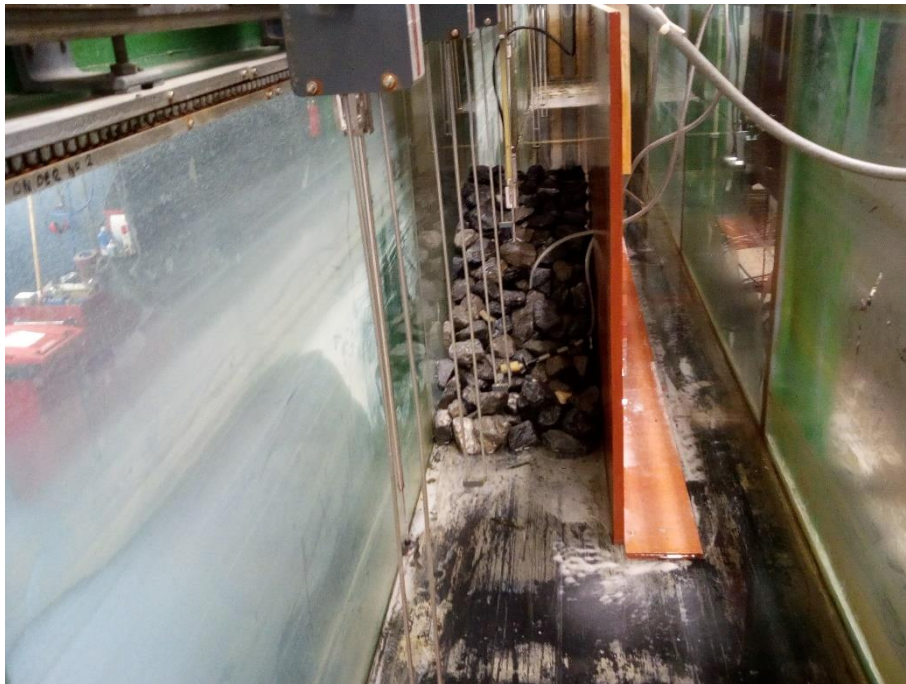
*Εικόνα 3.2.4 Μέτρηση των ταχυτήτων στον πόρο του ύφαλου κυματοθραύστη.*

Τα παραπάνω τμήματα που περιεγράφηκαν, μετά την συγκόλλησή τους, τοποθετήθηκαν κατάλληλα στην διώρυγα κυματισμών έτσι ώστε να διαμορφωθούν τα δύο μοντέλα ύφαλων κυματοθραυστών που μελετήθηκαν. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται η προσήνεμη και η υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη μέσα στην διώρυγα κυματισμών. Λόγω του ότι τα δύο μοντέλα καταλαμβάνουν το μισό του πλάτους του καναλιού, κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε ένα ξύλινο διαχωριστικό το οποίο εξυπηρετεί στην ομοιόμορφη προσέγγιση των κυματισμών στην περιοχή του ύφαλου κυματοθραύστη. (Εικόνα 3.2.5, Εικόνα 3.2.6). Πάνω στο ξύλινο διαχωριστικό διανοίχτηκαν τέσσερις διαμπερείς τρύπες, οι δύο από τις οποίες χρησιμεύουν στην απρόσκοπτη μετάδοση των ακτίνων laser, του οργάνου μέτρησης LDV, από τον πομπό στους δύο αποδέκτες και οι υπόλοιπες δύο για την προσαρμογή των πιεσόμετρων στις θέσεις μέτρησης.

## Μοντέλα ύφαλων κυματοθραυστών και κατασκευή



*Εικόνα 3.2.5 Η προσήνεμη πλευρά του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη μέσα στην διώρυγα των κυματισμών.*



*Εικόνα 3.2.6 Η υπήνεμη πλευρά του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη μέσα στην διώρυγα των κυματισμών.*



### 3.3 Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Τα πειράματα, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, διεξήχθησαν στην διώρυγα κυματισμών του Laboratory of Fluid Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geosciences στο Delft University of Technology.

Η διώρυγα αυτή αποτελείται από ένα οριζόντιο πυθμένα μήκους 42m, έχει πλάτος 0.8m και ύψος 1m. Τα πλευρικά τοιχώματα είναι κατασκευασμένα από γυαλί επιτρέποντας την οπτική παρατήρηση των παραγόμενων κυματισμών (Εικόνα 3.3.1).



Εικόνα 3.3.1 Γενική άποψη της διώρυγας κυματισμών (αριστερά). Πλάτος και ύψος της διώρυγας (δεξιά).

Τα κύματα παράγονται από κυματογεννήτρια τύπου εμβόλου που είναι εγκατεστημένη στην ανάντη πλευρά της διώρυγας και η απομείωση της ενέργειάς τους γίνεται από μία απορροφητική ακτή η οποία βρίσκεται στο κατόντη άκρο της (Εικόνα 3.3.2). Η κυματογεννήτρια κινείται οριζόντια και το μέτωπό της παραμένει κατακόρυφο κατά την διάρκεια της κίνησης. Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει το έμβολο είναι 1m και προς τις δύο πλευρές από την θέση ισορροπίας της. Σημαντικό πλεονέκτημά της είναι ότι διαθέτει έλεγχο ενεργητικής απόσβεσης ανακλώμενων κυματισμών. Το

## Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης

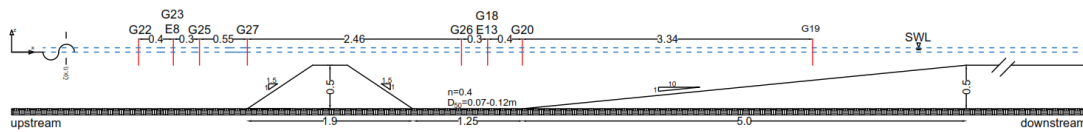
σύστημα αυτό μετράει τα ανακλώμενα κύματα και διορθώνει αναλόγως τη κίνηση της κυματογεννήτριας. Παρόλα αυτά τα ανακλώμενα κύματα από τον ύφαλο κυματοθραύστη υπάρχουν μέσα στη διώρυγα οπότε αυτά θα πρέπει να φιλτραριστούν κατά την ανάλυση των δεδομένων. Η κυματογεννήτρια έχει την δυνατότητα να παράγει πολλά διαφορετικά είδη κυματισμών, μεταξύ των οποίων μονοχρωματικούς και φασματικούς κυματισμούς, οι οποίοι και μελετήθηκαν στα υπό εξέταση πειράματα.



*Εικόνα 3.3.2 Η κυματογεννήτρια τύπου εμβόλου εγκατεστημένη στο ανάντη άκρο της διώρυγας κυματισμών.*

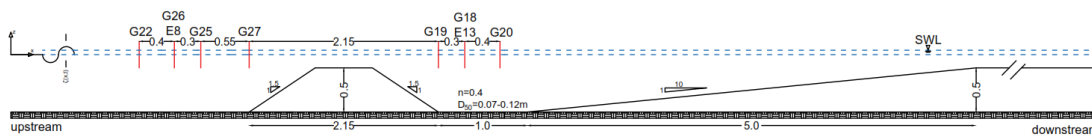
Η πειραματική διάταξη των φυσικών ομοιωμάτων μέσα στην διώρυγα κυματισμών φαίνεται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 3.3.1, Σχήμα 3.3.2). Τα μοντέλα SPB1 και SPB2 τοποθετήθηκαν στο οριζόντιο τμήμα του πυθμένα του καναλιού. Στην κατάντη πλευρά των δύο μοντέλων, και σε απόσταση 1.25m και 1.0m από το υπήνεμο άκρο τους αντίστοιχα, ο πυθμένας λαμβάνει κλίση 1:10 μέχρι να φτάσει σε ύψος 0.5m το οποίο και διατηρεί έως το κατάντη άκρο του καναλιού.

### SPB1 Experimental Layout



Σχήμα 3.3.1 Πειραματική διάταξη και σημεία λήψης των μετρήσεων της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (G) και των οριζόντιων ταχυτήτων (E) (κόκκινες γραμμές) για το φυσικό ομοίωμα SPB1 (τα μήκη σε m).

### SPB2 Experimental Layout



Σχήμα 3.3.2 Πειραματική διάταξη και σημεία λήψης των μετρήσεων της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (G) και των οριζόντιων ταχυτήτων (E) (κόκκινες γραμμές) για το φυσικό ομοίωμα SPB2 (τα μήκη σε m).

Οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας αφορούν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, την μεταβολή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας, τις υδροδυναμικές πιέσεις και τις ταχύτητες στο εσωτερικό και στο εξωτερικό μέρος του ύφαλου κυματοθραύστη. Για τους μονοχρωματικούς κυματισμούς, η χρονική διάρκεια της καταγραφής των παραπάνω μεγεθών ήταν τουλάχιστον 5min ενώ για τους φασματικούς κυματισμούς ο αντίστοιχος χρόνος ήταν τουλάχιστον 20min. Συνολικά, και για τα δύο φυσικά ομοιώματα, μελετήθηκαν δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.70m, τέσσερα μονοχρωματικά και τρία φασματικά κυματικά σενάρια τα οποία δίνονται συνοπτικά στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 3.3.1, Πίνακας 3.3.2).

Η καταγραφή της μεταβολής της ελεύθερης επιφάνειας έγινε από επτά μετρητές, τέσσερις στην προσήνεμη και τρεις στην υπήνεμη πλευρά των μοντέλων<sup>1</sup> (Σχήμα 3.3.1, Σχήμα 3.3.2). Η σχετική θέση του κάθε μετρητή συμβολίζεται με μία κόκκινη γραμμή όπου πάνω από κάθε μία φαίνεται και το όνομα του καθενός (π.χ. G20). Οι μετρητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου αντίστασης και το αναλογικό σήμα που παράγουν είναι γραμμικά ανάλογο ύψους του νερού ανάμεσα στις δύο αισθητήριες ράβδους (Εικόνα 3.3.3). Για τα δύο φυσικά ομοιώματα καταγράφηκαν συνολικά 196 χρονοσειρές της μεταβολής της ελεύθερης επιφάνειας με συχνότητα δειγματοληψίας 50Hz.

<sup>1</sup> Για το μοντέλο SPB1 ελήφθησαν μετρήσεις της ανύψωσης της ελεύθερης πάνω στον πυθμένα κλίσης 1:10 για τρία σενάρια μονοχρωματικών κυματισμών και για τρία σενάρια φασματικών κυματισμών.

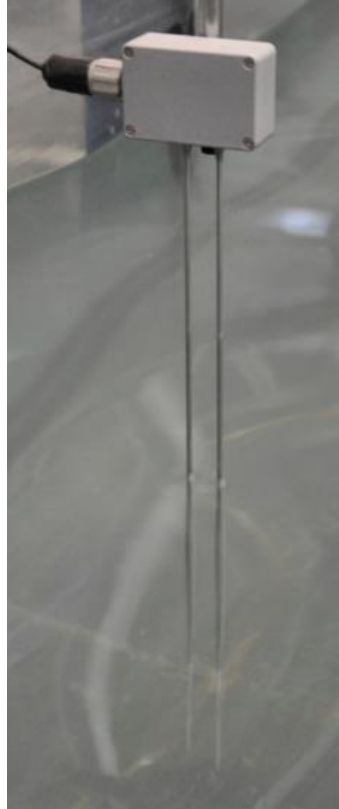
## Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Πίνακας 3.3.1 Κυματικά σενάρια και βάθη νερού για το μοντέλο SPB1.

Μοντέλο	Βάθος νερού d (m)	Κυματικό σενάριο	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (sec)	Σημαντικό ύψος κύματος H <sub>s</sub> (m)	Περίοδος κορυφής T <sub>p</sub> (sec)	Θραύση	
SPB1	0.65	1-R1	0.06	1.0			Όχι	
		1-R2	0.11	1.5			Όχι	
		1-R3	0.17	2.0			Ναι	
		1-R4	0.23	2.5			Ναι	
		1-I1				0.06	1.0	
		1-I2				0.11	1.5	
	1-I3				0.17	2.0		
	0.70	1-R5	0.06	1.0				Όχι
		1-R6	0.11	1.5				Όχι
		1-R7	0.17	2.0				Ναι
		1-R8	0.23	2.5				Ναι
		1-I4				0.06	1.0	
		1-I5				0.11	1.5	
		1-I6				0.17	2.0	

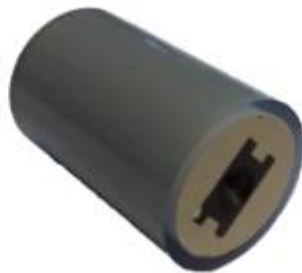
Πίνακας 3.3.2 Κυματικά σενάρια και βάθη νερού για το μοντέλο SPB2.

Μοντέλο	Βάθος νερού d (m)	Κυματικό σενάριο	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (sec)	Σημαντικό ύψος κύματος H <sub>s</sub> (m)	Περίοδος κορυφής T <sub>p</sub> (sec)	Θραύση	
SPB2	0.65	2-R1	0.06	1.0			Όχι	
		2-R2	0.11	1.5			Όχι	
		2-R3	0.17	2.0			Ναι	
		2-R4	0.23	2.5			Ναι	
		2-I1				0.06	1.0	
		2-I2				0.11	1.5	
	2-I3				0.17	2.0		
	0.70	2-R5	0.06	1.0				Όχι
		1-R6	0.11	1.5				Όχι
		2-R7	0.17	2.0				Ναι
		2-R8	0.23	2.5				Ναι
		2-I4				0.06	1.0	
		2-I5				0.11	1.5	
		2-I6				0.17	2.0	



*Εικόνα 3.3.3 Μετρητής μεταβολής της ελεύθερης επιφάνειας.*

Οι πιέσεις μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας τρεις τροποποιημένους αισθητήρες πίεσης κατασκευασμένοι από την εταιρεία Honeywell. Ο τύπος αυτός αισθητήρα πίεσης μετρά την διαφορική πίεση με την χρήση ενός μικρού διαφράγματος. Ο αρχικός αισθητήρας έχει τροποποιηθεί έτσι ώστε να χωράει μέσα σε ένα πλαστικό κυλινδρικό κέλυφος διαμέτρου 20mm. Η μία πλευρά του αισθητήρα είναι ανοιχτή στο νερό ενώ η άλλη είναι συνδεδεμένη, μέσω ενός εύκαμπτου πλαστικού σωλήνα, με την ατμόσφαιρα (Εικόνα 3.3.4).



*Εικόνα 3.3.4 Τροποποιημένος αισθητήρας πίεσης που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές μετρήσεις.*

Η διάταξη των τριών αισθητήρων πίεσης στα δύο φυσικά ομοιώματα φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1 και Σχήμα 3.2.2. Ένας αισθητήρας τοποθετήθηκε στην προσήνεμη και δύο στην υπήνεμη

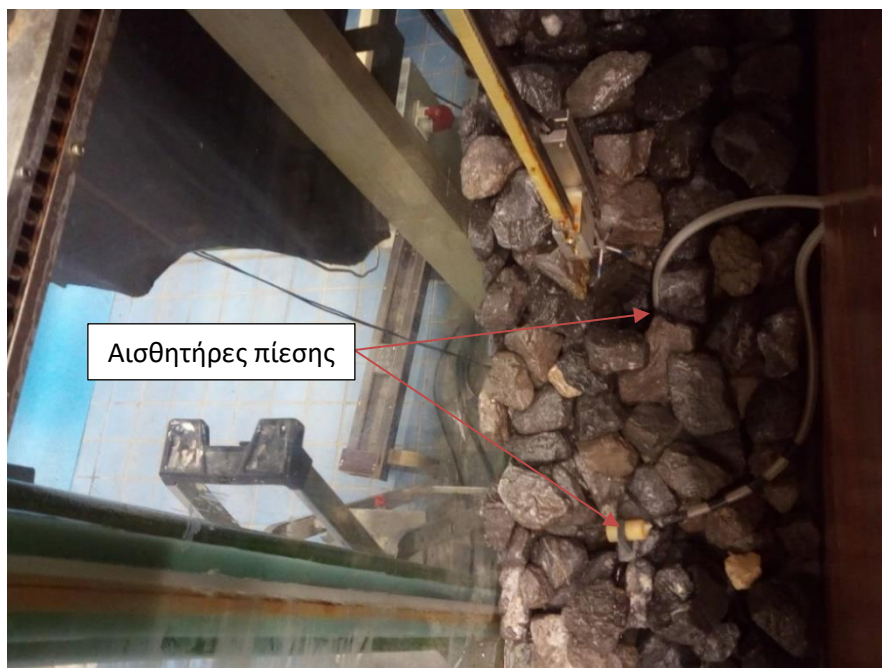


## Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης

πλευρά των δύο φυσικών ομοιωμάτων. Πιο συγκεκριμένα ο πρώτος τοποθετήθηκε στον πυθμένα της προσήνεμης τρύπας, ο δεύτερος στον πυθμένα της υπήνεμης τρύπας και ο τρίτος στην εξωτερική πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη και σε κατακόρυφη απόσταση 14cm από τον πυθμένα (Εικόνα 3.3.5, Εικόνα 3.3.6). Οι τρεις αυτοί αισθητήρες κατέγραφαν την δυναμική πίεση αφού προηγουμένως είχε αφαιρεθεί η υδροστατική πίεση. Συνολικά και για τα δύο μοντέλα καταγράφηκαν 84 χρονοσειρές της δυναμικής πίεσης.



Εικόνα 3.3.5 Θέση του αισθητήρα πίεσης στην προσήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη.



Εικόνα 3.3.6 Θέσεις των αισθητήρων πίεσης στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Η καταγραφή των ταχυτήτων στα διάφορα σημεία του ύφαλου κυματοθραύστη και στην εγγύς περιοχή όπου ήταν τοποθετημένος, έγινε από τρία διαφορετικά όργανα:

1. Laser Doppler Velocimeter (LDV), LDVS-01 system
2. Acoustic Doppler Velocimeter (ADV), Vectrino<sup>+</sup>, Nortek AS
3. Electromagnetic Flow Meter (EMS)

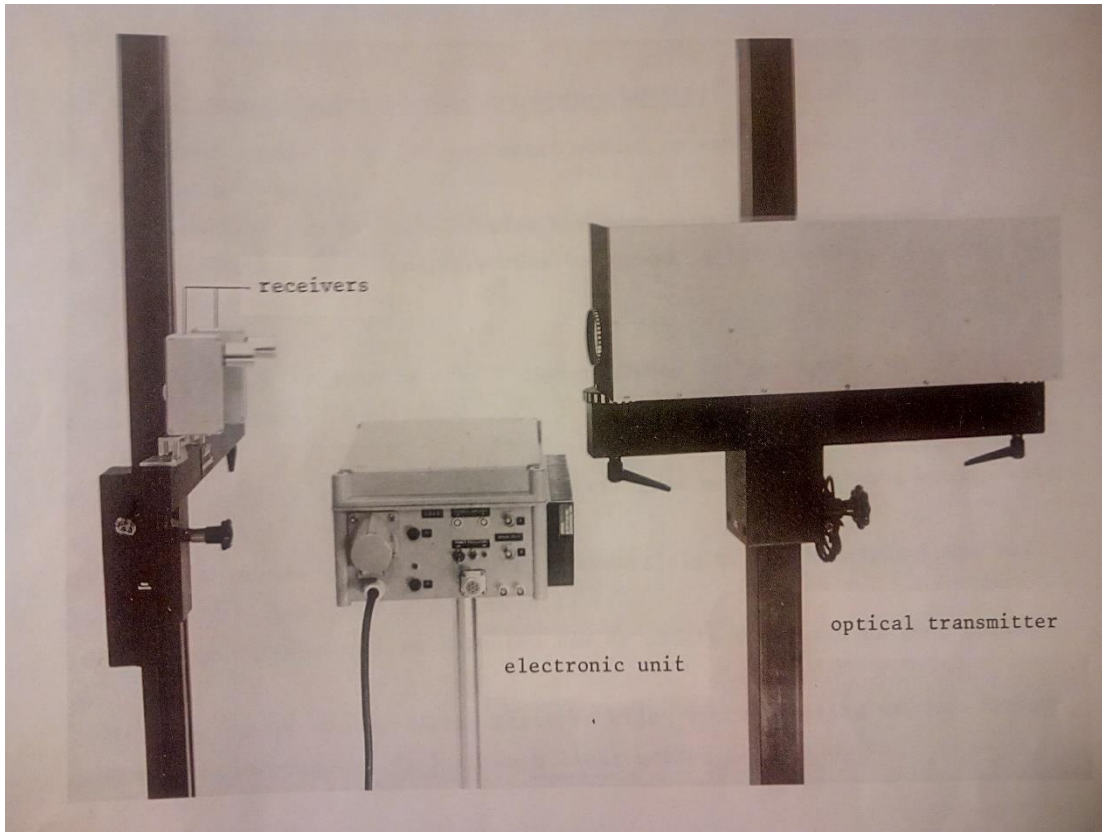
Το Laser Doppler Velocimetry System LDVS-01, το οποίο αναπτύχθηκε στο Delft Hydraulics Laboratory, αποτελεί ένα σύστημα για την μέτρηση δύο συνιστωσών της ταχύτητας σε ένα πεδίο ροής σε ανοικτούς και κλειστούς αγωγούς οι οποίοι είναι εφοδιασμένοι με διάφανα πάνελ. Το σύστημα LDVS-01 βασίζεται στην τεχνική της εμπρόσθιας σκέδασης του φωτός με δέσμη αναφοράς (forward scatter reference beam mode). Η αλλαγή της συχνότητας στη μία από τις δύο εκπεμπόμενες ακτίνες, διαδικασία η οποία είναι απαραίτητη για μετρήσεις των ταχυτήτων σε ταλαντευόμενες ροές (π.χ. ύπαρξη κυματισμών), επιτυγχάνεται με την χρήση πιεζοκρυστάλλων (Bragg-cell). Οι φωτοδιόδοι πυριτίου που χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές του σκεδαζόμενου φωτός, έχουν ως αποτέλεσμα ένα μηχανικά ισχυρό σύστημα το οποίο χρειάζεται χαμηλή παροχή τάσης για τους ανιχνευτές.

Το σύστημα LDVS-01 αποτελείται από τα ακόλουθα εξαρτήματα:

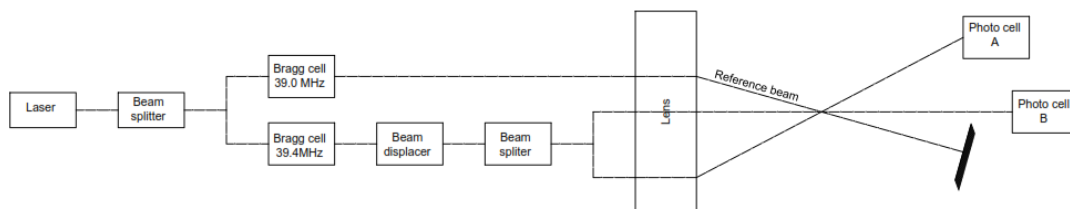
1. Τον **οπτικό πομπό** που περιλαμβάνει το λέιζερ Ηλίου-Νέου (He-Ne), δύο φακούς οι οποίοι διαχωρίζουν τις ακτίνες (beam splitters), ένα φακό ο οποίος μεταθέτει την ακτίνα (beam displacer), δύο πιεζοκρυστάλλους (Bragg-cells), δύο καθρέφτες και ένα εμπρόσθιο φακό.
2. Δύο **αποδέκτες**. Κάθε αποδέκτης περιέχει μια φωτοδίοδο, ένα προενισχυτή και ένα μετρητή σήματος. Ο μετρητής σήματος καθιστά δυνατή την ευθυγράμμιση του συστήματος στο κανάλι με ακρίβεια.
3. Μία **ηλεκτρονική μονάδα** στην οποία περιλαμβάνονται δύο ενισχυτές, δύο φίλτρα χαμηλής και υψηλής διέλευσης (high-pass, low-pass filters), δύο πιεζοκρυστάλλοι (Bragg-cell oscillators), ο ανιχνευτής διέλευσης (tracker-counter), το σύστημα παροχής ενέργειας και ένας ενισχυτής για τα παραγόμενα σήματα από τον ανιχνευτή διέλευσης.

Τα παραπάνω μέρη του οργάνου LDV φαίνονται στην Εικόνα 3.3.7 ενώ ο τρόπος λειτουργίας του δίνεται σε σκαρίφημα στο Σχήμα 3.3.3.

## Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης



Εικόνα 3.3.7 Τα διάφορα μέρη από τα οποία αποτελείται το σύστημα LDVS-01. Από αριστερά, οι αποδέκτες, η ηλεκτρονική μονάδα και ο οπτικός πομπός.



Σχήμα 3.3.3 Σκαριφηματική παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας του συστήματος LDVS-01.

Το όργανο μέτρησης LDV, τοποθετήθηκε στην κεντρική διατομή του ύφαλου κυματοθραύστη όπου αρχικός σκοπός των πειραμάτων ήταν να μετρηθούν οι ταχύτητες σε τέσσερις θέσεις καθ' ύψος. Οι τρεις θέσεις αφορούν σημεία στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και σε απόσταση 15cm η μία από την άλλη και η τέταρτη σε ένα σημείο λίγο πάνω από την στέψη του. Λόγω προβλημάτων στις τρύπες, κυκλικής διατομής διαμέτρου 3cm, που διανοίχτηκαν στις δύο από τις τρεις ορθογωνικές διατομής πλάκες που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του κεντρικού τμήματος του κυματοθραύστη, οι ταχύτητες μετρήθηκαν μόνο στην μία από αυτές (βλ. Σχήμα 3.2.1, Σχήμα 3.2.2). Η θέση της τρύπας αυτής βρισκόταν σε απόσταση 42cm από τον πυθμένα. Πρέπει να τονιστεί ότι οι χρονοσειρές των



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

ταχυτήτων που ελήφθησαν στο εσωτερικό του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη αντιπροσωπεύουν μετρήσεις στο πορώδες του.

Για το μοντέλο SPB1 οι μετρήσεις με το όργανο LDV έγιναν ακριβώς στην κεντρική διατομή του ενώ για το μοντέλο SPB2, που προήλθε από μονόπλευρη προέκταση της στέψης του μοντέλου SPB1 κατά 25cm, οι μετρήσεις αυτές μεταφέρθηκαν προς την προσήνεμη πλευρά του (βλ. Σχήμα 3.2.1, Σχήμα 3.2.2). Η συχνότητα δειγματοληψίας του οργάνου ήταν 1000Hz και καταγράφηκαν συνολικά 49 χρονοσειρές ταχυτήτων και για τα δύο μοντέλα.

Το Vectrino<sup>+</sup> (Εικόνα 3.3.8) που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των τροχιακών ταχυτήτων στην προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά του διαπερατού ύφαλου κυματοθραύστη, είναι ένα όργανο τύπου ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) ικανό να μετρήσει τις ταχύτητες και στις τρεις διαστάσεις ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) ταυτόχρονα. Ο όγκος δειγματοληψίας του είναι κυλινδρικός, με σταθερή διάμετρο 6mm και ύψος με εύρος από 3-15mm που επιλέγεται από τον χρήστη, οπότε και παίρνει τιμές από  $84.8\text{mm}^3$  –  $424\text{mm}^3$ . Η μέγιστη συχνότητα δειγματοληψίας μπορεί να φτάσει τα 200Hz.

Οι μετρήσεις στις δύο διατομές που αναφέρθηκαν παραπάνω έγιναν σε τρία σημεία καθ' ύψος με την μεταξύ τους απόσταση να είναι περίπου 8cm. Οι αποστάσεις των σημείων αυτών από τον πυθμένα ήταν 14cm, 22cm, και 30cm. Ο όγκος δειγματοληψίας ορίστηκε στον ελάχιστο, δηλαδή  $84.8\text{mm}^3$  και η συχνότητα δειγματοληψίας στα 200Hz για τις 168 χρονοσειρές που ελήφθησαν συνολικά.



Εικόνα 3.3.8 Το όργανο μέτρησης των ταχυτήτων Vectrino<sup>+</sup> (πηγή: [www.nortek.no](http://www.nortek.no)).

## Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Για την μέτρηση των οριζόντιων (κατά μήκος του καναλιού) ταχυτήτων εμπρός και πίσω από τον ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη χρησιμοποιήθηκαν δύο όργανα EMS (Electromagnetic fluid velocity meters). Τα όργανα αυτά τοποθετήθηκαν σε απόσταση 0.85m από τον προσήνεμο (E8) και υπήνεμο (E13) πόδα της κατασκευής και σε ύψος περίπου στο μέσο του βάρους και για τις δύο στάθμες ύδατος, 65 και 70cm (Σχήμα 3.3.1 και Σχήμα 3.3.2).

Το όργανο EMS είναι ικανό να μετρήσει ταχύτητες μέχρι και 5mm πάνω από τον πυθμένα. Το εύρος των ταχυτήτων που μπορεί να μετρήσει είναι μεταβλητό, 0,  $\pm 1\text{m/s}$  ή 0,  $\pm 5\text{m/s}$ . Το μέγιστο σφάλμα μέτρησης είναι περίπου  $\pm 1\%$ . Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν η μέγιστη ταχύτητα στις θέσεις αυτές δεν ξεπερνούσε το  $\pm 1\text{m/s}$ , οπότε και επιλέχθηκε το μικρότερο από τα δύο παραπάνω εύρη. Το εύρος της τάσης που μπορούν να δώσουν τα όργανα αυτά είναι  $\pm 10\text{ Volts}$ . Η βαθμονόμηση των οργάνων είναι προκαθορισμένη με την μέγιστη τάση των 10 Volts να αντιστοιχεί στην μέγιστη θετική ταχύτητα 1m/s και την ελάχιστη τάση -10 Volts στην μέγιστη αρνητική -1m/s.

Η συχνότητα δειγματοληψίας των οργάνων EMS ορίστηκε στα 1000Hz και ελήφθησαν συνολικά 56 χρονοσειρές των οριζόντιων ταχυτήτων.

## 4. Ανάλυση των πειραματικών δεδομένων

### 4.1 Φιλτράρισμα των δεδομένων των χρονοσειρών

Τα όργανα ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) αποτελούν βασική επιλογή για την μέτρηση των ταχυτήτων σε εργαστηριακό επίπεδο αλλά και σε μετρήσεις πεδίου (Nikora, 1998), σε αντίθεση με άλλες επιλογές όπως για παράδειγμα τα όργανα LDV (Laser Doppler Velocimeter) τα οποία μπορούν να βρουν εφαρμογή μόνο σε εργαστηριακές μετρήσεις και είναι ουσιαστικά μη πρακτικά σε μετρήσεις πεδίου.

Παρά την διαδεδομένη χρήση τους, τα όργανα αυτά παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα. Ένα από αυτά είναι ο αυξημένος θόρυβος (noise floor) που παρουσιάζουν από διάφορες πηγές θέτοντας ουσιαστικά όριο στην ελάχιστη μέτρηση που μπορεί να καταγραφεί. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που υπεισέρχεται συχνά στις μετρήσεις από ADV είναι η εμφάνιση αιχμών (spikes) στις χρονοσειρές που προκαλούνται από παραποίηση του λαμβανομένου σήματος Doppler. Τέτοιες αιχμές συνήθως οφείλονται σε ταχύτητες οι οποίες ξεπερνάνε το προκαθορισμένο εύρος μέτρησης των ταχυτήτων του οργάνου, όταν υπάρχουν ανακλάσεις της ροής από στερεά όρια πολύπλοκης γεωμετρίας ή στην περίπτωση όπου έχουν εγκλωβιστεί φυσαλίδες αέρα στον υδάτινο όγκο (Nikora, 1998), (Voulgaris, 1998). Τέτοιες καταστάσεις είναι δυνατό να προκληθούν από θραύση κυματισμών οι οποίοι εισάγουν φυσαλίδες αέρα μέσα στο νερό καθώς και από ανακλαστικά όρια και πολύπλοκες γεωμετρίες όπως είναι το εσωτερικό ενός ύφαλου κυματοθραύστη.

Το πρόβλημα που εγείρεται από τις παραπάνω περιπτώσεις, έγκειται στο γεγονός ότι ορισμένες από τις διακυμάνσεις που προκαλούνται από την παραποίηση του λαμβανομένου σήματος, μπορούν εσφαλμένα να δώσουν την εντύπωση ότι πρόκειται για φυσιολογικές διακυμάνσεις της ταχύτητας.

Έχοντας υπόψιν τα παραπάνω προβλήματα, πριν την περαιτέρω ανάλυση των χρονοσειρών, θα πρέπει αρχικά να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα των αιχμών (spikes) και του "καθαρίσματος" των χρονοσειρών της ταχύτητας. Για το λόγο αυτό εφαρμόστηκε, σε όλες τις καταγραφές της ταχύτητας, η μέθοδος 3D Phase-Space Despiking η οποία προτάθηκε από τους Goring και Nikora (2002) και επαληθεύτηκε από τους Mori *et al.* (2007). Η μέθοδος αυτή αποτελεί τον πιο διαδεδομένο και αξιόπιστο τρόπο αφαίρεσης αιχμών που προκύπτει από όργανο μέτρησης ADV.

## Φιλτράρισμα των δεδομένων των χρονοσειρών

Η μέθοδος των Goring και Nikora (2002) περιλαμβάνει δύο βήματα: (1) στον εντοπισμό και (2) στην αντικατάσταση της αιχμής. Παρακάτω παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον καθαρισμό των χρονοσειρών της ταχύτητας.

- υπολογίζονται τα διαφορικά πρώτης και δεύτερης τάξης μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων από τις παρακάτω σχέσεις

$$\Delta u_i = (u_{i+1} - u_{i-1})/2 \quad (4.1)$$

$$\Delta^2 u_i = (\Delta u_{i+1} - \Delta u_{i-1})/2 \quad (4.2)$$

- υπολογίζονται οι τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_u$ ,  $\sigma_{\Delta u}$  και  $\sigma_{\Delta^2 u}$  και το αναμενόμενο μέγιστο  $\lambda_u$  (Universal threshold) από την εξίσωση (4.3)

$$\lambda_u = \sqrt{2 \ln n} \quad (4.3)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των δεδομένων της χρονοσειράς.

- υπολογίζεται η γωνία περιστροφής του κύριου άξονα  $\Delta^2 u_i$  συναρτήσεως του  $u_i$  χρησιμοποιώντας την σχέση

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{\sum u_i \Delta^2 u_i}{\sum u_i^2} \right) \quad (4.4)$$

Για  $\Delta u_i$  συναρτήσεως του  $u_i$  και  $\Delta^2 u_i$  συναρτήσεως του  $\Delta u_i$  η γωνία  $\theta$  είναι μηδέν λόγω συμμετρίας.

- Για κάθε ζεύγος μεταβλητών, υπολογίζεται η έλλειψη η οποία έχει μέγιστα και ελάχιστα ως εξής: για το  $\Delta u_i$  συναρτήσεως του  $u_i$  ο κύριος άξονας είναι  $\lambda_u \sigma_u$  και ο δευτερεύων  $\lambda_u \sigma_{\Delta u}$ , για το  $\Delta^2 u_i$  συναρτήσεως του  $\Delta u_i$  ο κύριος άξονας είναι ο  $\lambda_u \sigma_{\Delta u}$  και ο δευτερεύων  $\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u}$  και τέλος για το  $\Delta^2 u_i$  συναρτήσεως του  $u_i$  ο κύριος και ο δευτερεύων άξονας,  $a$  και  $b$  αντίστοιχα, μπορεί να δοθεί ως λύση του παρακάτω συστήματος:

$$(\lambda_u \sigma_u)^2 = a^2 \cos^2 \theta + b^2 \sin^2 \theta \quad (4.5)$$

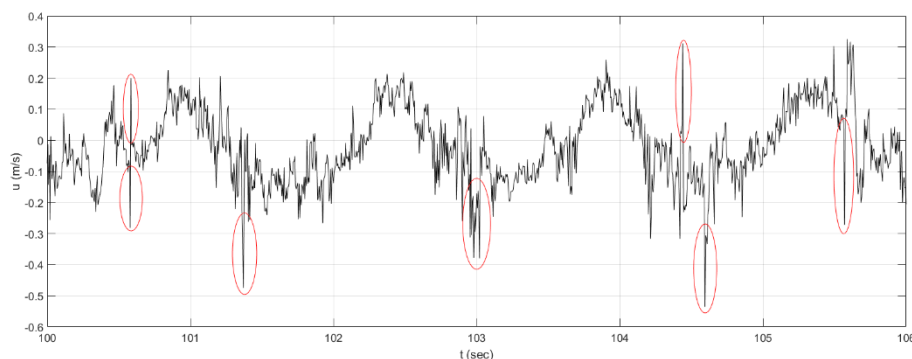
$$(\lambda_u \sigma_{\Delta^2 u})^2 = a^2 \sin^2 \theta + b^2 \cos^2 \theta \quad (4.6)$$

Τελικά διαμορφώνονται τρεις ελλείψεις με άξονες που υπολογίζονται από την παραπάνω διαδικασία. Στη συνέχεια οι προβολές των τριών μεταβλητών,  $u_i$ ,  $\Delta u_i$ ,  $\Delta^2 u_i$  αποτυπώνονται στον τρισδιάστατο χώρο και αναγνωρίζονται τα σημεία που βρίσκονται έξω από τα όρια των τριών παραπάνω ελλείψεων. Τα σημεία αυτά θεωρούνται αιχμές άρα μη πραγματικές μετρήσεις οι οποίες αντικαθίστανται από παρεμβολή πολυωνύμου τρίτης τάξης. Μετά την

αντικατάσταση των τιμών αυτών, η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου απαλειφθούν όλες οι αιχμές από την καταγραφή.

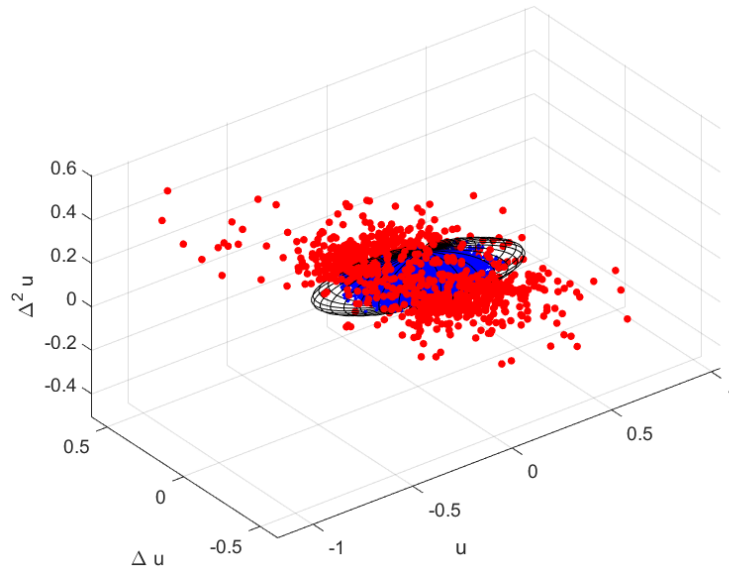
Παρακάτω ακολουθεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της παραπάνω μεθόδου για το κυματικό σενάριο 1-R2 του Πίνακα 3.3.1 και αφορά το σημείο μέτρησης που βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη SPB1 και σε σχετική θέση  $z/d = 0.338$  ( $z=0$  στον πυθμένα).

Στο Σχήμα 4.1.1 απεικονίζεται ένα ενδεικτικό τμήμα της χρονοσειράς, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στην πρωτογενή της μορφή. Στο σχήμα αυτό γίνονται εύκολα αντιληπτές ορισμένες αιχμές οι οποίες προέρχονται από παραποίηση (aliasing) του σήματος. Οι εν λόγω αιχμές εντοπίζονται και αντικαθίστανται εφαρμόζοντας την μέθοδο 3-D Phase-Space Despiking. Στο Σχήμα 4.1.2 φαίνεται το ελλειψοειδές σχήμα που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφεται παραπάνω. Οι κόκκινες κουκίδες αντιπροσωπεύουν τιμές των μεταβλητών  $u_i$ ,  $\Delta u_i$ ,  $\Delta^2 u_i$  οι οποίες βρίσκονται εκτός των ελλείψεων, οπότε και αντικαθίστανται από μία τιμή που προκύπτει από παρεμβολή πολυωνύμου τρίτης τάξης. Στο Σχήμα 4.1.3 γίνεται η σύγκριση μεταξύ της αφιτράριστης και της φιλτραρισμένης καταγραφής που προκύπτει μετά την εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας όπου φαίνεται ότι οι αιχμές του αρχικού σήματος έχουν αφαιρεθεί. Παρόλο που η διαδικασία αυτή αναπτύχθηκε αρχικά για το φιλτράρισμα των χρονοσειρών που προέρχονται από όργανα ADV, στη παρούσα εργασία εφαρμόστηκε και για τις χρονοσειρές που καταγράφηκαν με τη συσκευή LDV παρουσιάζοντας εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα.

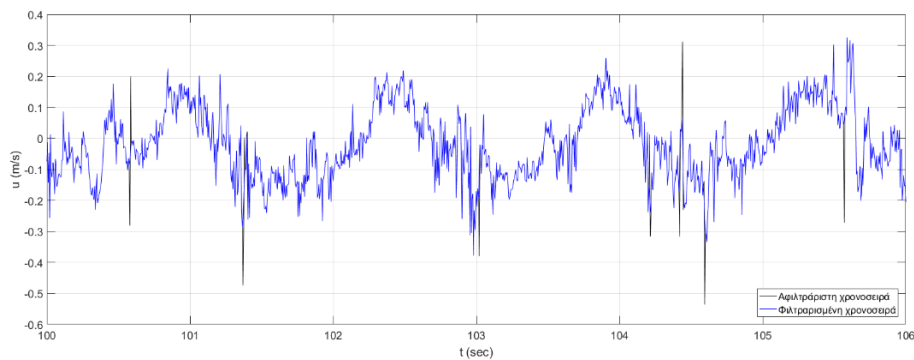


Σχήμα 4.1.1 Ενδεικτική χρονοσειρά της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας πριν το φιλτράρισμά της με την μέθοδο 3-D Phase-Space Despiking. Στις κόκκινες ελλείψεις περικλείονται ορισμένες αιχμές του σήματος. Η καταγραφή προέρχεται από μέτρηση στην υπήνεμη πλευρά του μοντέλου SPB1, για το κυματικό σενάριο 1-R2 και για σχετικό ύψος από τον πυθμένα  $z/d=0.338$ .

## Στατιστική ανάλυση τυρβώδους ροής



Σχήμα 4.1.2 Εντοπισμός των αιχμών (κόκκινες κουκίδες) στην χρονοσειρά της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας με την μέθοδο 3-D Phase-Space Despiking για στην υπήνεμη πλευρά του μοντέλου SPB1, για το κυματικό σενάριο 1-R2 και για σχετικό ύψος από τον πυθμένα  $z/d=0.338$ .



Σχήμα 4.1.3 Σύγκριση της αφιλτράριστης (μαύρο) και της φιλτραρισμένης καταγραφής (μπλε) της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του μοντέλου SPB1, για το κυματικό σενάριο 1-R2 και για σχετικό ύψος από τον πυθμένα  $z/d=0.338$ .

## 4.2 Στατιστική ανάλυση τυρβώδους ροής

### 4.2.1 Στατιστικά μεγέθη της τυρβώδους ροής

Όταν εξετάζονται τυρβώδεις ροές, η πιο συνηθισμένη διαδικασία για την εκτίμηση βασικών παραμέτρων της ροής, όπως είναι η μέση ταχύτητα, οι τυρβώδεις διακυμάνσεις, η ένταση της τύρβης κ.ά., είναι αυτή της ανάλυσης κατά Reynolds. Κατά την ανάλυση Reynolds, η στιγμιαία τιμή της

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

παραμέτρου προς εξέταση γράφεται ως άθροισμα της μέσης τιμής της και της διακύμανσής της. Αυτό μαθηματικά μπορεί να διατυπωθεί (π.χ. για το διάνυσμα της ταχύτητας) ως εξής (Svendsen, 2005):

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (4.7)$$

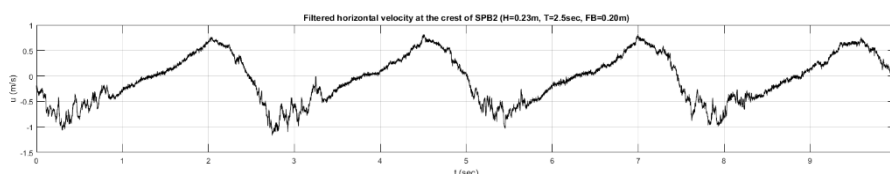
Η μέση ως προς το χρόνο ταχύτητα της ροής,  $\bar{u}_i$  μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση

$$\bar{u}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_{ij} \quad (4.8)$$

Ο δείκτης  $i$  στις παραπάνω εξισώσεις παίρνει τιμές 1, 2 και 3 και συμβολίζει τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας στους άξονες  $x, y, z$  αντίστοιχα, δηλαδή  $u_1 = u, u_2 = v, u_3 = w$ .

Η εξίσωση (4.8) είναι κατάλληλη να αποδώσει την μέση τιμή της ταχύτητας σε στατιστικά σταθερές τυρβώδεις ροές (statistically stationary flows), δηλαδή σε ροές όπου όλες οι στατιστικές τους ιδιότητες είναι σταθερές στο χρόνο.

Πολύ συχνά όμως οι ροές μπορεί να είναι περιοδικές, όπως είναι οι θαλάσσιοι κυματισμοί. Στην σειρά των πειραμάτων που εκτελέστηκαν και περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3, το πεδίο των ταχυτήτων που διαμορφώνεται στις διάφορες θέσεις μέτρησης, προέρχεται από την διάδοση κυματισμών μέσα στο κανάλι. Η περιοδική αυτή διαταραχή από την κυματογεννήτρια παράγει μια ημιτονοειδή μορφή και στις μετρούμενες χρονοσειρές της ταχύτητας. Στο Σχήμα 4.2.1 φαίνεται η καταγραφή της οριζόντιας ταχύτητας σε ένα σημείο στη στέψη του κυματοθραύστη, του μοντέλου SPB2 και για το κυματικό σενάριο 2-R4, όπου παρουσιάζεται η ημιτονοειδής αυτή μορφή κατά την διάδοση μονοχρωματικών κυματισμών.



Σχήμα 4.2.1 Καταγεγραμμένη χρονοσειρά των οριζόντιων ταχυτήτων στην στέψη του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη υπό την δράση μονοχρωματικών κυματισμών, για το μοντέλο SPB2 και κυματικό σενάριο 2-R4 .

Όπως είναι φανερό η μέση τιμή της ταχύτητας δεν παραμένει σταθερή στον χρόνο αλλά μεταβάλλεται περιοδικά. Στη περίπτωση μη θραυόμενων κυματισμών<sup>2</sup> ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας θα

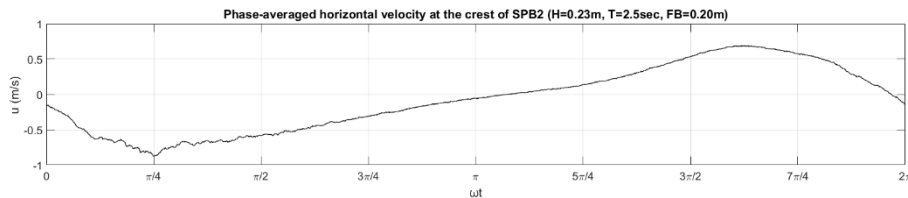
<sup>2</sup> Η ταχύτητα διάδοσης των μη θραυόμενων κυματισμών παραμένει ίδια μέσα στο κανάλι. Κατά την θραύση των κυματισμών, μη γραμμικά φαινόμενα στους κυματισμούς έχουν την τάση να κάνουν τα ελαφρώς μεγαλύτερα

## Στατιστική ανάλυση τυρβώδους ροής

πρέπει να γίνεται ως προς την φάση του κύματος, δηλαδή υπολογίζοντας τον μέσο όρο ομολόγων σημείων μέσα στη χρονοσειρά της ταχύτητας. Η παρακάτω εξίσωση (4.9) δίνει την μέση ταχύτητα ως προς την φάση του κύματος

$$\bar{u}_i(x, y, z, \omega t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u_i(x, y, z, \omega(t + kT)) \quad (4.9)$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των δεδομένων των οποίων λαμβάνεται ο μέσος όρος,  $T$  είναι η περίοδος των κυματισμών και  $u_i$  είναι η στιγμιαία ταχύτητα. Εφαρμόζοντας την εξίσωση (4.9) στην καταγραφή του Σχήματος 4.3.1 λαμβάνεται η μέση ταχύτητα ως προς την φάση του κύματος η οποία φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.2.2.



Σχήμα 4.2.2 Μέση τιμή της οριζόντιας ταχύτητα ως προς την φάση του κύματος για την χρονοσειρά της ταχύτητας του Σχήματος 4.2.1.

Στην συνέχεια, έχοντας υπολογίσει την μέση ως προς την φάση ταχύτητα της καταγραφής, μπορούν να υπολογιστούν οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της καταγραφής χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.10), δηλαδή αφαιρώντας την μέση ταχύτητα από την στιγμιαία

$$u'_i(x, y, z, \omega(t + kT)) = u_i(x, y, z, \omega t') - \bar{u}_i(x, y, z, \omega t) \quad (4.10)$$

όπου ο χρόνος  $t'$  σχετίζεται με την περίοδο  $T$  και την φάση  $\omega t (=2\pi t/T)$ :

$$\omega t' = \omega(t + kT), (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (4.11)$$

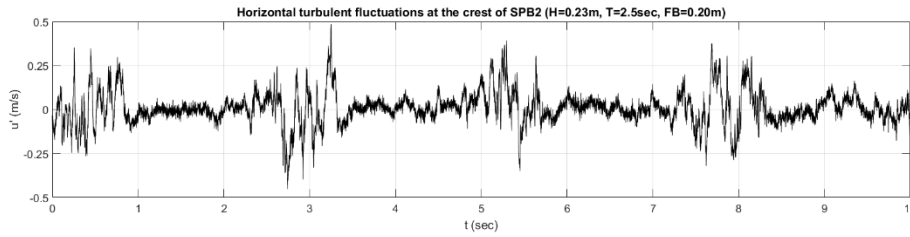
Στο Σχήμα 4.2.3 απεικονίζονται οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της αρχικής καταγραφής του Σχήματος 4.3.1 έπειτα από αφαίρεση της μέσης ως προς την φάση ταχύτητας, του Σχήματος 4.3.2, όπως δίνεται στην εξίσωση (4.10). Όπως είναι εύκολα αντιληπτό το σήμα που προκύπτει είναι απαλλαγμένο από την αρχική περιοδικότητα της καταγραφής.

---

να κινούνται ταχύτερα και να προλαβαίνουν τα ελαφρώς μικρότερα. Το αποτέλεσμα είναι να αλλάζει η περίοδος του κύματος με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να αναγνωρισθεί ποια φάση σε μια περίοδο του κάθε κύματος να χρησιμοποιηθεί για τον μέσο όρο.



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 4.2.3 Τυρβώδεις διακυμάνσεις της οριζόντιας ταχύτητας, έπειτα από αφαίρεση της μέσης ως προς την φάση ταχύτητας, στη στέψη του κυματοθραύστη του μοντέλου SPB2 για το κυματικό σενάριο 2-R4.

Εκτός από τη μέση ταχύτητα που ορίστηκε στις εξισώσεις (4.8) και (4.9) είναι δυνατό να οριστούν και άλλα στατιστικά μεγέθη εξίσου χρήσιμα για την περιγραφή των τυρβωδών ροών. Τέτοια μεγέθη αποτελούν η διακύμανση (variance) και η μέση τετραγωνική ρίζα (root-mean-square, rms). Η διακύμανση ενός δείγματος μιας στοχαστικής ή τυχαίας μεταβλητής δίνεται από την σχέση

$$var(u_i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^N |u_{ij} - \bar{u}_i|^2 \quad (4.12)$$

και η μέση τετραγωνική ρίζα αντίστοιχα από την παρακάτω σχέση

$$u_{rms} = (\overline{u^2})^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^N |u_{ij}|^2} \quad (4.13)$$

Ένα άλλο σημαντικό στατιστικό μέγεθος σε μία χρονοσειρά αποτελεί η τιμή της μέσης τετραγωνικής ρίζας των τυρβωδών διακυμάνσεων, γνωστή και ως τυπική απόκλιση (standard deviation) και ουσιαστικά δείχνει την ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων. Η τυπική απόκλιση δίνεται από εξίσωση (4.14)

$$u'_{rms} = (\overline{u'^2})^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^N |u_{ij} - \bar{u}_i|^2} \quad (5.14)$$

Στην περίπτωση της περιοδικής ροής που εξετάζεται στην παρούσα εργασία, η Εξίσωση (4.14) θα πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να λαμβάνεται υπόψιν η εν λόγω περιοδικότητα καθιστώντας δυνατή την σύνδεση των τυρβωδών διακυμάνσεων με την επιταχυνόμενη ή επιβραδυνόμενη φάση του κύματος. Αυτό θα δώσει χρήσιμες πληροφορίες για την παραγωγή και την απομείωση της τύρβης σε κάθε φάση του κύματος.

## Στατιστική ανάλυση τυρβώδους ροής

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων ορίζεται ως προς την θέση  $(x, y, z)$  και τη φάση  $\omega t$  για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας ως εξής:

$$\left(\overline{u'^2}\right)^{\frac{1}{2}}(x, y, z, \omega t) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u'^2(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

$$\left(\overline{v'^2}\right)^{\frac{1}{2}}(x, y, z, \omega t) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v'^2(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

$$\left(\overline{w'^2}\right)^{\frac{1}{2}}(x, y, z, \omega t) = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} w'^2(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.17)$$

Εκτός από την ένταση της τύρβης που δίνουν οι εξισώσεις (4.15) – (4.17) ως προς την φάση του κύματος, είναι χρήσιμο να προσδιοριστεί η σχετική ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων (Turbulence Intensity) σε αδιάστατη μορφή που θα επιτρέψει συγκρίσεις μεταξύ διαφόρων θέσεων μέσα στα δύο μοντέλα των ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών αλλά και μεταξύ διαφόρων κυματικών σεναρίων που εξετάζονται σε αυτή τη σειρά των πειραμάτων. Αυτή η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων δίνεται από τη γενική σχέση

$$TI = \frac{u'}{U} \quad (4.18)$$

όπου ο αριθμητής  $u'$ , ο οποίος αντιπροσωπεύει το σύνολο των τυρβωδών διακυμάνσεων και όχι μόνο την οριζόντια συνιστώσα, δίνεται από τη σχέση

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})} \quad (4.19)$$

Και ο παρονομαστής υπολογίζεται από τις τρεις μέσες συνιστώσες της ταχύτητας  $U_x, U_y, U_z$  ως εξής

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (4.20)$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης (4.18) στα δεδομένα των ταχυτήτων που ελήφθησαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, παρουσιάζει μια σειρά από περιορισμούς και δυσκολίες όπου θα πρέπει να γίνουν μια σειρά από παραδοχές για να προκύψει κάποιο αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα. Οι δυσκολίες αυτές αφορούν

- Τα όργανα μέτρησης. Η συσκευή LDV έχει τη δυνατότητα να καταγράψει τις δύο συνιστώσες της ροής, την οριζόντια ( $u$ ) και την κατακόρυφη ( $w$ ), οπότε και θα πρέπει να γίνει εκτίμηση της τρίτης συνιστώσας ( $v$ ).
- Την γεωμετρία του ύφαλου κυματοθραύστη. Για την λήψη των ταχυτήτων στην υπήνεμη και προσήνεμη πλευρά των δύο μοντέλων ύφαλων κυματοθραυστών, διαμορφώθηκαν δύο κατακόρυφες τρύπες που επέτρεπαν την εισαγωγή του οργάνου ADV μέσα σε αυτές. Ως προς την οριζόντια ( $x$ ) και την κάθετη ( $y$ ) διεύθυνση της ροής οι μετρήσεις θεωρούνται αντιπροσωπευτικές καθώς υπάρχουν πέτρες για να προσομοιώσουν τις πορώδεις συνθήκες στο εσωτερικό της κατασκευής. Το ίδιο δεν ισχύει όμως και για την κατακόρυφη διεύθυνση ( $z$ ) κατά την οποία η κίνηση της ροή δεν περιορίζεται από τις πέτρες που αποτελούν τον ύφαλο κυματοθραύστη.

Η εκτίμηση της  $v$  συνιστώσας της ταχύτητας έγινε με βάση τις μετρήσεις που ελήφθησαν από τη συσκευή ADV. Πιο συγκεκριμένα επιχειρήθηκε να βρεθεί ένας συντελεστής που να συνδέει τις  $u'_{rms}$  και  $v'^2_{rms}$  και είναι της μορφής

$$c_{ADV} = \frac{v'^2_{rms}}{u'^2_{rms}} \quad (4.21)$$

Για τον υπολογισμό του  $c_{adv}$  λήφθηκαν υπόψιν μόνο οι μετρήσεις στις τέσσερις θέσεις (από τις έξι συνολικά) που βρίσκονται ουσιαστικά στο εσωτερικό του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη. Τελικός σκοπός είναι ο παραπάνω συντελεστής σε συνδυασμό με την  $u'^2_{rms}|_{LDV}$  να δώσει την εκτίμηση για την  $v'^2_{rms}|_{LDV}$ . Ο συντελεστής αυτός βρέθηκε να έχει τιμή  $c_{ADV} = 1.16 \pm 0.1725$ . Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο παραπάνω συντελεστής εφαρμόστηκε μόνο για τις μετρήσεις στον πόρο που βρισκόταν στο κεντρικό τμήμα του ύφαλου κυματοθραύστη και όχι για τις μετρήσεις που έγιναν στην στέψη του.

Αντίστοιχα η  $z$  συνιστώσα εκτιμήθηκε με βάση τις μετρήσεις που ελήφθησαν από την συσκευή LDV. Όπως και με την συσκευή ADV, υπολογίστηκε ένας συντελεστής που συνδέει τις  $u'^2_{rms}$  και  $w'^2_{rms}$  και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$c_{LDV} = \frac{w'^2_{rms}}{u'^2_{rms}} \quad (4.22)$$

Για τον υπολογισμό του  $c_{LDV}$  λήφθηκαν υπόψιν όλες οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πόρο της κεντρικής διατομής για όλα τα κυματικά σενάρια και για τα δύο μοντέλα ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών. Ο παραπάνω συντελεστής της Εξίσωσης (4.22) σε συνδυασμό με την  $u'^2_{rms}|_{ADV}$  θα

## Στατιστική ανάλυση τυρβώδους ροής

δώσει μια καλύτερη εκτίμηση για την  $w'_{rms}|_{ADV}$  που πλησιάζει περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη. Ο συντελεστής αυτός βρέθηκε να έχει τιμή  $c_{LDV} = 0.9575 \pm 0.083$ . Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της τυρβώδους έντασης μόνο στις θέσεις που βρίσκονται στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη.

Εκτός από την ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι δυνατό να εκφραστούν και οι διαμητικές τάσεις Reynolds ως προς την θέση  $(x, y, z)$  και τη φάση  $\omega t$  ως εξής:

$$-\overline{u'v'}(x, y, z, \omega t) = \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u'(x, y, z, \omega(t + kT))v'(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\} \quad (4.23)$$

$$-\overline{u'w'}(x, y, z, \omega t) = \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u'(x, y, z, \omega(t + kT))w'(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\} \quad (4.24)$$

$$-\overline{v'w'}(x, y, z, \omega t) = \left\{ -\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v'(x, y, z, \omega(t + kT))w'(x, y, z, \omega(t + kT)) \right\} \quad (4.25)$$

### 4.2.2 Χρονική συσχέτιση

Οι τιμές των στατιστικών μεγεθών που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, όπως είναι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση, δεν είναι δυνατό να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την δομή της τύρβης στη ροή. Αυτές οι πληροφορίες σχετικά με τη δομή της τύρβης είναι δυνατό να ληφθούν εξετάζοντας τις μεταβλητές σε περισσότερα από ένα σημεία στο χώρο ή στο χρόνο. Όταν μια μεταβλητή εξετάζεται σε ένα σταθερό σημείο στο χώρο η αυτοσυνδιακύμανση (autocovariance) των τυρβωδών διακυμάνσεων  $u'(t)$  σε δύο χρονικές στιγμές  $t$  και  $t'$  ορίζεται ως

$$R_{uu}(t, t') = \overline{u'(t)u'(t')} \quad (4.26)$$

Στην περίπτωση στατιστικά ανεξάρτητων ροών ως προς το χρόνο (stationary), η αυτοσυνδιακύμανση αποτελεί συνάρτηση μόνο της χρονικής διαφοράς  $\tau$ , όπου  $\tau = t' - t$ .

$$R_{uu}(\tau) = \overline{u'(t)u'(t')} \quad (4.27)$$

Μερικά από τα πιο κύρια χαρακτηριστικά της αυτοσυνδιακύμανσης  $R(\tau)$  είναι

- $R(0) = \overline{u'^2}$
- $|R(\tau)| \leq R(0) \forall \tau$
- $R(\tau) = R(-\tau)$

- $R(\tau) \rightarrow 0, \tau \rightarrow \infty$

Το τελευταίο χαρακτηριστικό απεικονίζει την χαοτική φύση της τυρβώδους ροής, καθώς είναι αδύνατο να προβλεφθεί η τύρβη σε μια μεγάλη χρονική διαφορά. Με βάση την αυτοσυνδιακύμανση μπορεί να οριστεί μια κλίμακα χρόνου η οποία δίνεται από την σχέση

$$\tau_A = \frac{1}{u'^2} \int_0^\infty R(\tau) d\tau \quad (4.28)$$

Η κλίμακα χρόνου που ορίζεται από την εξίσωση (4.28) ονομάζεται ολοκληρωτική κλίμακα χρόνου και δείχνει το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο υπάρχει αυτοσυσχέτιση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας.

#### 4.2.3 Χωρική συσχέτιση

Η χωρική συνδιακύμανση είναι η συνδιακύμανση δύο ταυτόχρονων μετρήσεων στα σημεία  $x_1$  και  $x_2$ . Στην ειδική περίπτωση όπου η τύρβη είναι ομογενής η χωρική συνδιακύμανση  $R_{ij}$  είναι ανεξάρτητη της θέσης  $x$  και αποτελεί συνάρτηση μόνο της απόστασης  $r$  των δύο σημείων, δηλαδή  $r = x_1 - x_2$  και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$R_{ij}(r) = \overline{u'_i(x_1)u'_j(x_2)} \quad (4.29)$$

Μερικές ιδιότητες της συνδιακύμανσης  $R_{ij}(r)$  είναι:

- $R_{ij}(0) = \overline{u'_i u'_j}$
- $R_{ij}(r) = R_{ji}(-r)$
- $R_{ij}(r) \rightarrow 0, |r| \rightarrow \infty$

Η τελευταία από τις πιο πάνω ιδιότητες δείχνει ότι το μέγεθος των δινών μέσα στη ροή είναι πεπερασμένο.

#### 4.2.4 Το φάσμα της κινητικής ενέργειας

Το φάσμα της ενέργειας της τύρβης έχει θεωρητικά εξαχθεί από τον Kolmogorov (1941). Ο Kolmogorov υπέθεσε ότι σε επαρκώς υψηλούς αριθμούς Reynolds η ροή είναι τοπικά ομογενής και ισότροπη και ότι βρίσκεται στατιστικά σε ισορροπία στο εύρος των μεγάλων κυματικών αριθμών. Έτσι, στο εύρος αυτό του φάσματος, η τύρβη θα πρέπει να καθορίζεται μόνο από το ρυθμό διάχυσης (dissipation rate)  $\varepsilon$  και το ιξώδες  $\nu$ . Εφαρμόζοντας διαστατική ανάλυση, είναι δυνατό να οριστεί ένα

Στατιστική ανάλυση τυρβώδους ροής

χαρακτηριστικό μήκος  $\lambda$  για τις μικρότερες δίνες (viscous eddies) μέσα στη ροή. Οι παράμετροι οι οποίες εμπλέκονται έχουν τις εξής διαστάσεις:

$$(\lambda) = L \quad (4.32)$$

$$(\nu) = L^2 T^{-1} \quad (4.33)$$

$$(\varepsilon) = L^2 T^{-3} \quad (4.34)$$

οπότε προκύπτει

$$\lambda = \left( \frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \quad (4.35)$$

Το χαρακτηριστικό μήκος της εξίσωσης (4.35) αποκαλείται μικρο-κλίμακα Kolmogorov και σε αυτή η τύρβη μετατρέπεται πλέον σε θερμότητα λόγω επίδραση του ιξώδους του ρευστού.

Η γενική εικόνα της τύρβης είναι ότι η ενέργεια εξάγεται από τη μέση ροή στο εύρος των μικρών κυματικών αριθμών οι οποίοι έχουν τάξη μεγέθους  $K \approx l^{-1}$  όπου  $l$  είναι η ολοκληρωτική κλίμακα μήκους (integral length scale) και  $K$  είναι το μήκος του διανύσματος του κυματικού αριθμού  $\vec{K}$ . Η τυρβώδης κινητική ενέργεια μεταφέρεται (cascade) στη συνέχεια σε υψηλότερους κυματικούς αριθμούς μέσω της διαδικασίας του τεντώματος των στροβίλων (vortex stretching) η οποία οφείλεται στους μη γραμμικούς όρους στις εξισώσεις Navier-Stokes. Όταν η ενέργεια έχει μεταδοθεί πλέον σε μεγάλους κυματικούς αριθμούς όπου οι συνεκτικές δυνάμεις του ιξώδους κυριαρχούν, τότε μετατρέπεται σε θερμότητα. Το εύρος των κλιμάκων μήκους οι οποίες είναι αρκετά μικρότερες από την ολοκληρωτική κλίμακα μήκους ονομάζεται εύρος ισορροπίας (equilibrium range) καθώς εκεί το φάσμα θεωρείται σχεδόν ισότροπο και γενικά σε ισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια στο εύρος ισορροπίας δεν εξαρτάται από το ποσό της ενέργειας που υπάρχει στις μεγάλες κλίμακες της ροής, αλλά εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους που καθορίζουν τη φύση της ροής στις μικρές κλίμακες δηλαδή

$$E = E(K, \varepsilon, \nu) \quad K \gg l^{-1} \quad (4.36)$$

Το υπο-εύρος των κυματικών αριθμών του εύρους ισορροπίας το οποίο δεν επηρεάζεται από τις δυνάμεις ιξώδους ονομάζεται αδρανειακό υπό-εύρος (inertial subrange) και η ενέργειά του εξαρτάται από τις παρακάτω παραμέτρους

$$E = E(K, \varepsilon) \quad \lambda^{-1} \gg K \gg l^{-1} \quad (4.37)$$

Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Ο Kolmogorov εφάρμοσε διαστατική ανάλυση για να εξάγει θεωρητικά τη μορφή του φάσματος στο αδρανειακό υπό-εύρος.

Οι εμπλεκόμενες παράμετροι έχουν τις εξής διαστάσεις:

$$(E) = L^3 T^{-2} \quad (4.38)$$

$$(\varepsilon) = L^2 T^{-3} \quad (4.39)$$

$$(K) = L^{-1} \quad (4.40)$$

οπότε η μορφή του φάσματος θα πρέπει να είναι

$$E(K) = c\varepsilon^{2/3} K^{-5/3} \lambda^{-1} \gg K \gg l^{-1} \quad (4.41)$$

με τη σταθερά  $c$  να παίρνει τιμές από 1.4 και 1.8, και να εξαρτάται ελαφρώς από τον αριθμό Reynolds  $R_e$ . Η εξίσωση (4.41) αποκαλείται νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov.

Για το υπό-εύρος όπου οι συνεκτικές δυνάμεις κυριαρχούν, η διαστατική ανάλυση δεν παρέχει κάποια λύση. Η γενική μορφή ολόκληρου του εύρους ισορροπίας μπορεί να διαμορφωθεί ως

$$E(K) = c\varepsilon^{2/3} K^{-5/3} f(K\lambda) \quad K \gg l^{-1} \quad (4.42)$$

με την αδιάστατη συνάρτηση  $f$ . Διάφορες διατυπώσεις έχουν προταθεί για την  $f$ , όπως είναι του Kovasznay (1948)

$$f(K\lambda) = (1 - 0.5c(K\lambda)^{4/3})^2 \quad (4.43)$$

του Heisenberg (1948)

$$f(K\lambda) = (1 + (1.5c)^2(K\lambda)^4)^{-4/3} \quad (4.44)$$

ή των Corrsin (1946) και Pao (1965)

$$f(K\lambda) = \exp(-1.5c(K\lambda)^{4/3}) \quad (4.45)$$

### 4.3 Ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων των ταχυτήτων

Οι χρονοσειρές των ταχυτήτων που ελήφθησαν κατά την διάρκεια των μετρήσεων δεν έχουν όλες υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία. Αυτό σημαίνει ότι κάποια αποτελέσματα και κατ' επέκταση

## Ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων των ταχυτήτων

συμπεράσματα που εξάγονται έπειτα από την ανάλυση των χρονοσειρών θα πρέπει να αντιμετωπίζονται με ιδιαίτερη προσοχή και επιφυλακτικότητα.

Κατά βάση οι μετρήσεις με το όργανο LDV παρουσιάζουν υψηλή ποιότητα αφού το όργανο αυτό δεν χρειάζεται κάποιο ιδιαίτερη βαθμονόμηση και το μόνο που απαιτείται είναι το νερό μέσα στο κανάλι να είναι απαλλαγμένο από αιωρούμενα σωματίδια που θα παρέμβαιναν στις τρεις δέσμες λέιζερ οι οποίες εκπέμπονται από τον οπτικό πομπό. Αντίθετα μεγαλύτερη μεταβλητότητα στην αξιοπιστία παρατηρείται στις μετρήσεις που ελήφθησαν με το όργανο ADV. Δύο είναι οι κύριοι λόγοι που συντελούν σε αυτό, 1) η μη σωστή ρύθμιση του οργάνου για την μέτρηση του κατάλληλου εύρους ταχυτήτων στο εκάστοτε κυματικό σενάριο και θέση μέσα στην ροή όπου παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες κοντά στον πυθμένα και μέσα στον ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη σε αντίθεση με μεγαλύτερες ταχύτητες κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, και 2) η έλλειψη υψηλής συγκέντρωσης σωματιδίων (σκόνης) μέσα στο κανάλι η οποία ήταν απαραίτητη για την εύρυθμη λειτουργία του οργάνου ADV.

Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται τα ποσοστά που δείχνουν πόσο “καλή”, “ουδέτερη”, ή “κακή” είναι μια καταγεγραμμένη χρονοσειρά ταχυτήτων με το όργανο ADV. Τα ποσοστά αυτά ελήφθησαν από το ηλεκτρονικό πρόγραμμα WinADV32. Ο διαχωρισμός ανάμεσα σε “καλή”, “ουδέτερη”, ή “κακή” μέτρηση είναι υποκειμενικός και έγινε έπειτα από προσεκτική εξέταση των αποτελεσμάτων. Γενικά θεωρήθηκε ότι μια “καλή” μέτρηση έχει ποσοστό πάνω από 80%, μια “ουδέτερη” μέτρηση ποσοστό από 70% έως 80% και μια “κακή” μέτρηση ποσοστό κάτω από 70%.

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 4.3.1-Πίνακας 4.3.4) δίνονται τα ποσοστά αξιοπιστίας για τα δύο μοντέλα, για όλες τις κυματικές συνθήκες και για τα δύο βάθη νερού, των χρονοσειρών που ελήφθησαν με το όργανο ADV. Γενικά παρατηρείται για το μοντέλο SPB1, ότι τα ποσοστά αξιοπιστίας για τα κυματικά σενάρια με το μικρότερο ύψος κύματος (1-R1, 1-R5) είναι γενικά ουδέτερα προς κακά ενώ για τα υπόλοιπα κυματικά σενάρια η αξιοπιστία ανεβαίνει σημαντικά. Το μοντέλο SPB2 παρουσιάζει συγκριτικά καλύτερα ποσοστά αξιοπιστίας, με μόνη εξαίρεση ίσως το κυματικό σενάριο 2-R5 όπου η πλειοψηφία των ποσοστών θεωρείται ουδέτερη.

Πίνακας 4.3.1 Ποιότητα (%) των χρονοσειρών της ταχύτητας για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m.

Ποιότητα των χρονοσειρών των ταχυτήτων (%)												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση στον ύφαλο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη πλευρά			Υπήνεμη πλευρά			στέψη	πόρος
					Σχετικό βάθος z/d, (z=0m → πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	1-R1	0.65	0.06	1	77.13	71.18	73.73	70.49	51.97	52.85	-	-
	1-R2		0.11	1.5	90.91	88.35	85.49	86.36	89.32	53.28	-	-
	1-R3		0.17	2	92.55	87.76	88.24	90.36	88.22	75.89	-	-
	1-R4		0.23	2.5	88.14	88.04	89.37	89.77	83.72	74.88	-	-



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Πίνακας 4.3.2 Ποιότητα (%) των χρονοσειρών της ταχύτητας για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.7m.

Ποιότητα των χρονοσειρών των ταχυτήτων (%)												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση στον ύφαλο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη πλευρά			Υπήνεμη πλευρά			στέψη	πόρος
					Σχετικό βάθος z/d, (z=0m → πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
	1-R5	0.7	0.06	1	66.85	39.86	55.58	48.24	86.78	72.39	-	-
	1-R6		0.11	1.5	90.38	88.72	87.3	86.78	90.04	64.22	-	-
	1-R7		0.17	2	92.01	75.85	90.25	89.57	89.48	83.65	-	-
	1-R8		0.23	2.5	87.32	87.92	88.57	89.22	86.22	72.91	-	-

Πίνακας 4.3.3 Ποιότητα (%) των χρονοσειρών της ταχύτητας για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m.

Ποιότητα των χρονοσειρών των ταχυτήτων (%)												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση στον ύφαλο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη πλευρά			Υπήνεμη πλευρά			στέψη	πόρος
					Σχετικό βάθος z/d, (z=0m → πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	2-R1	0.65	0.06	1	84.48	83.07	81.41	46.53	79.69	81.88	-	-
	2-R2		0.11	1.5	93.79	91.25	88.02	84.72	85.85	85.33	-	-
	2-R3		0.17	2	93.91	91.59	94.43	91.03	92.89	83.88	-	-
	2-R4		0.23	2.5	94.46	86.77	90.29	86.2	90.88	84.15	-	-

Πίνακας 4.3.4 Ποιότητα (%) των χρονοσειρών της ταχύτητας για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.7m.

Ποιότητα των χρονοσειρών των ταχυτήτων (%)												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση στον ύφαλο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη πλευρά			Υπήνεμη πλευρά			στέψη	πόρος
					Σχετικό βάθος z/d, (z=0m → πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
	2-R5	0.7	0.06	1	78.53	79.74	79.69	38.33	79.52	87.26	-	-
	2-R6		0.11	1.5	94.61	93.2	91.35	82.35	85.87	87.77	-	-
	2-R7		0.17	2	92.82	93.35	83.34	92.01	92.89	82.14	-	-
	2-R8		0.23	2.5	94.91	88.64	87.86	85.19	87.93	80.72	-	-



## 5. Αποτελέσματα από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων

### 5.1 Εισαγωγή

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, από το σύνολο των δεδομένων που προέκυψαν κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων, αναλύονται και παρουσιάζονται μόνο οι χρονοσειρές των ταχυτήτων των μονοχρωματικών κυματισμών που ελήφθησαν με τα όργανα ADV, LDV και EMS. Στις παραγράφους 5.2 και 5.3 δίνονται αναλυτικά οι μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού ταχύτητες, η ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων για τον εντοπισμό αρμονικών συνιστωσών, οι μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις διακυμάνσεις και διατμητικές τάσεις Reynolds καθώς επίσης και τα φάσματα της τυρβώδους κινητικής ενέργειας, για το συνολικό βάθος νερού 0.65m, για τα φυσικά ομοιώματα SPB1 και SPB2. Τα αντίστοιχα αναλυτικά αποτελέσματα για το βάθος νερού των 0.7m, λόγω της μεγάλης έκτασης που καταλαμβάνουν, θα δοθούν στο παράρτημα της ηλεκτρονικής μορφής της παρούσας εργασίας. Στις παραγράφους 5.4 - 5.8 παρουσιάζονται πιο συνοπτικά αποτελέσματα που αφορούν τις χαρακτηριστικές οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$ , τις μέγιστες οριζόντιες τυρβώδεις διακυμάνσεις  $u'_{max}$ , τη μεταβολή της σχετικής τυρβώδους έντασης, τα πλάτη των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών και τις ταχύτητες που ελήφθησαν στην προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά στην εγγύς περιοχή του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη.

### 5.2 Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

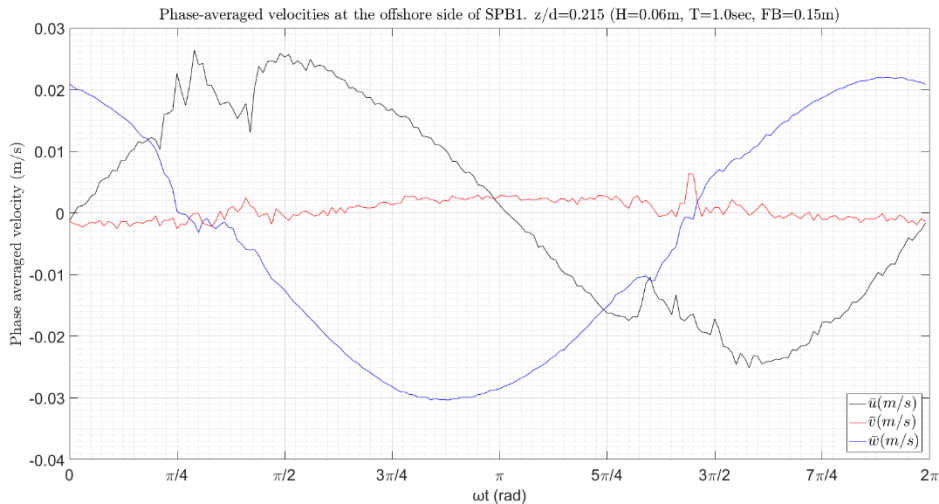
#### 5.2.1 Κυματικό σενάριο 1-R1

##### 5.2.1.1 Αποτελέσματα στην προσήνεμη πλευρά

###### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

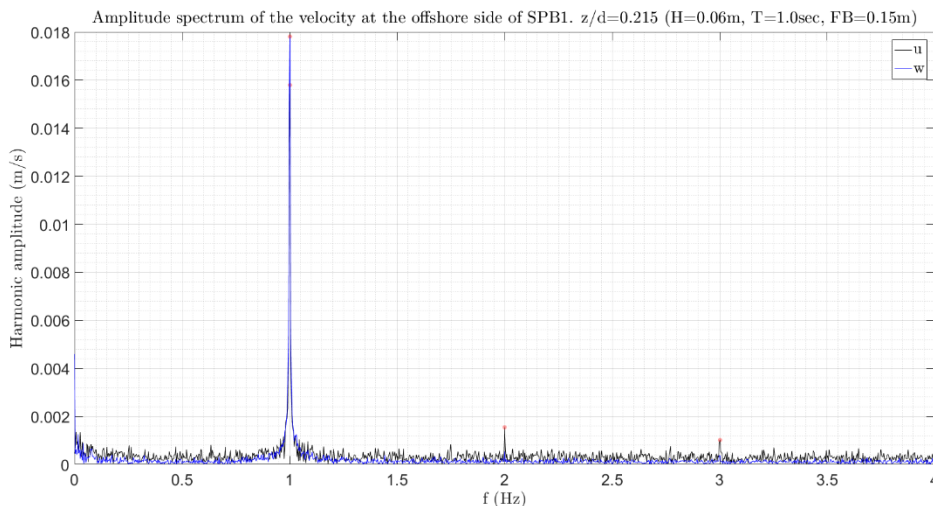
Από το σύνολο της καταγραφής για τη συγκεκριμένη θέση και εφαρμόζοντας την Εξίσωση 4.9 λαμβάνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού οι οποίες φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 5.2.1. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.0251, 0.0264] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.03, 0.022] (m/s), ενώ στη διεύθυνση  $\gamma$  είναι τάξης μεγέθους μικρότερο με εύρος [-0.0025, 0.0064] (m/s).

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.1 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Η εύρεση πιθανών αρμονικών συνιστωσών των ταχυτήτων είναι εφικτή με την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων. Στο Σχήμα 5.2.2 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη ταχύτητα (μπλε). Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 1\text{Hz}$ ) η οποία έχει εύρος  $0.016\text{m/s}$ , παρουσιάζονται δύο ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες  $f = 2\text{Hz}$  και  $f = 3\text{Hz}$  με εύρος  $0.0015\text{m/s}$  και  $0.001\text{m/s}$  αντίστοιχα. Αντίθετα η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται στη κύρια μόνο συχνότητα ( $f = 1\text{Hz}$ ) με εύρος  $0.018\text{m/s}$ .



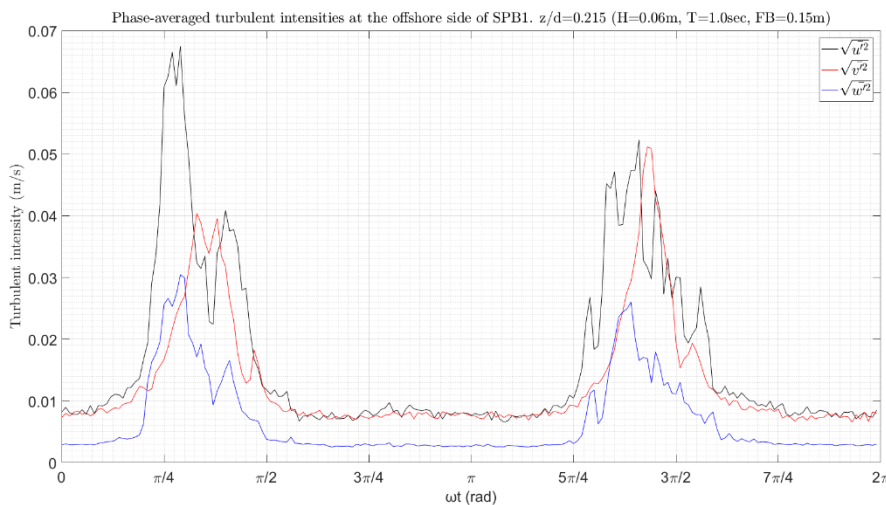
Σχήμα 5.2.2 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  υπολογίζεται από τις εξισώσεις 4.15 – 4.17 και φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.3. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της σχεδόν ταυτόχρονα και στις τρεις διευθύνσεις ( $x, y, z$ ) και δύο φορές μέσα σε μια περίοδο του κύματος.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει δύο μέγιστα, το πρώτο για  $\omega t = 0.91 \text{ rad}$  με τιμή  $0.068 \text{ m/s}$  και το δεύτερο για  $\omega t = 4.43 \text{ rad}$  με τιμή  $0.052 \text{ m/s}$ . Για τη  $y$  διεύθυνση τα δύο μέγιστα λαμβάνονται για  $\omega t = 1.037 \text{ rad}$  και  $\omega t = 4.49 \text{ rad}$  με τιμές  $0.04 \text{ m/s}$  και  $0.051 \text{ m/s}$  αντίστοιχα. Τέλος κατά την διεύθυνση  $z$  η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστο για  $\omega t = 0.91 \text{ rad}$  με τιμή  $0.03 \text{ m/s}$  και για  $\omega t = 4.37 \text{ rad}$  με τιμή  $0.026 \text{ m/s}$ .

Η αρκετά μειωμένη ένταση της τύρβης η οποία παρατηρεί στη  $z$  διεύθυνση σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις πιθανότατα οφείλεται στην έλλειψη ογκολίθων στην διεύθυνση αυτή (βλ. Παράγραφος 3.2.2). Αυτό έχει ως συνέπεια την σχετικά ανεμπόδιση κίνηση του νερού οπότε και μικρότερες τυρβώδεις διακυμάνσεις στη διεύθυνση αυτή.

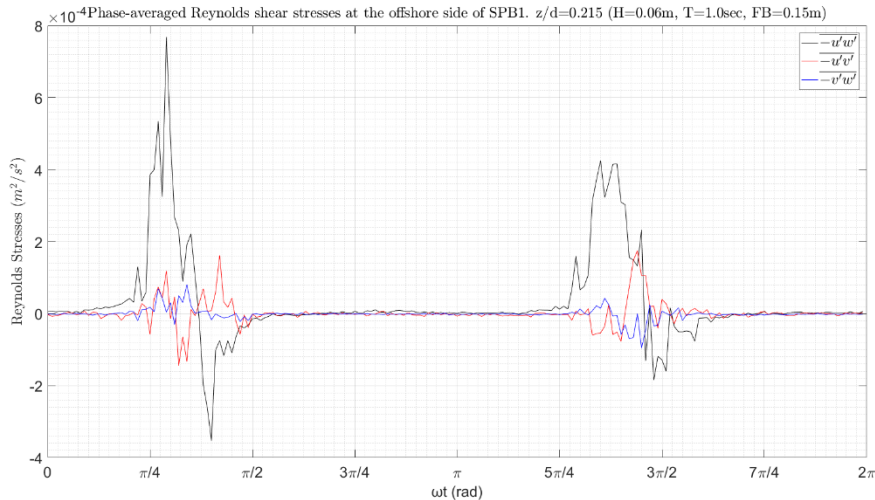


Σχήμα 5.2.3 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Ένα ακόμα μέγεθος που υπολογίστηκε είναι η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού Σχήμα 5.2.4. Και εδώ, όπως και με την ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων, παρουσιάζονται δύο περιοχές μέσα σε μια κυματική περίοδο όπου εκδηλώνεται ισχυρή μεταβολή στις διατμητικές τάσεις Reynolds, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή η ένταση είναι μηδενική. Η μεγαλύτερη τάση εκδηλώνεται στο επίπεδο  $x$ - $z$  για ζεύγη τιμών  $(0.91 \text{ rad}, 7.685 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$ ,  $(1.26 \text{ rad}, -3.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$ ,  $(4.24 \text{ rad}, 4.25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$  και  $(4.65 \text{ rad}, -1.85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$ .

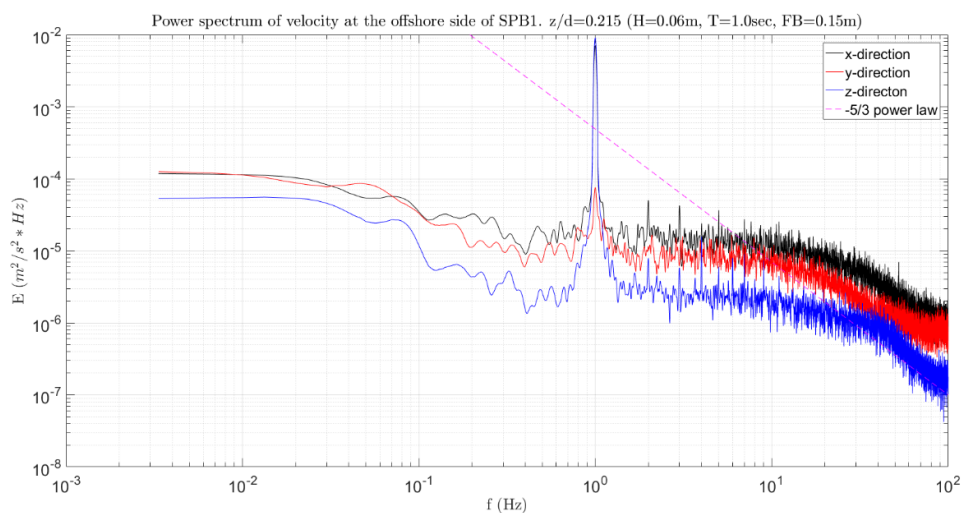
Τέλος, υπολογίστηκαν τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας τα οποία φαίνονται στο Σχήμα 5.2.5. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 1 \text{ Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $7.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ , στη  $y$  είναι  $7.53 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $8.34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.4 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R1, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.

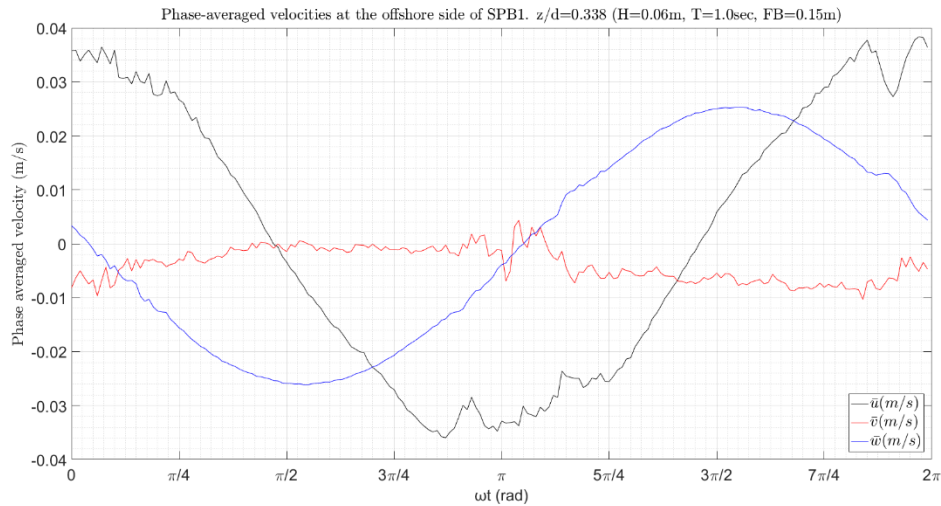
Μεγαλύτερες τιμές της ενέργειας εντοπίζονται στις χαμηλότερες συχνότητες του σχήματος. Γενικά οι μεγάλες δίνες που παρουσιάζονται μέσα στη ροή σχετίζονται με τις μικρές συχνότητες ενώ αντίθετα οι μικρές δίνες σχετίζονται με υψηλότερες συχνότητες. Η μεταφορά της τυρβώδους κινητικής ενέργειας (energy cascade) γίνεται από τις μεγάλες δίνες στις μικρές δίνες όπου οι δυνάμεις τριβής την μετατρέπουν σε θερμότητα. Το αδρανειακό υπό-εύρος (inertial subrange) αντιστοιχεί στο ενδιάμεσο εύρος των κλιμάκων της ροής (αντίστοιχα στις ενδιάμεσες συχνότητες) το οποίο λαμβάνει μια καθολική μορφή που δίνεται από την εξίσωση 4.41. Στο Σχήμα 5.2.5 απεικονίζεται ο νόμος δύναμης  $-\frac{5}{3}$  του Κολμογορον από την διακεκομμένη ευθεία (μωβ). Στη x διεύθυνση το αδρανειακό υπό-εύρος φαίνεται να ξεκινάει από την συχνότητα  $f = 30\text{Hz}$  και να συνεχίζει τουλάχιστον μέχρι τη συχνότητα των  $f = 100\text{Hz}$ , στη y διεύθυνση ξεκινάει από τη συχνότητα  $f = 20\text{Hz}$  και τελειώνει στην  $f = 50\text{Hz}$  και στη z διεύθυνση ξεκινάει από  $f = 40\text{Hz}$  και συνεχίζεται μέχρι τη συχνότητα των  $f = 100\text{Hz}$  τουλάχιστον.



Σχήμα 5.2.5 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R1, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στο νόμο δύναμης -5/3.

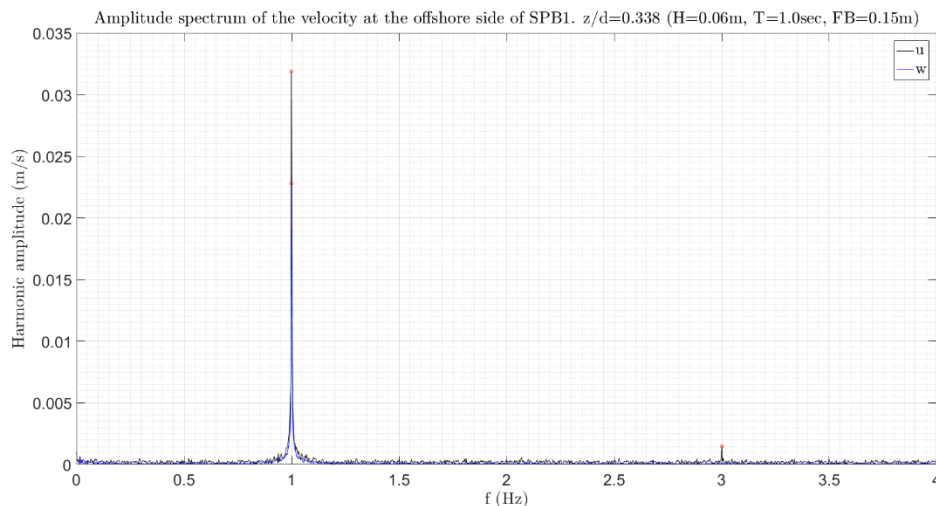
2. Σχετική θέση,  $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.2.6 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.036, 0.038]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.026, 0.025]$  (m/s), ενώ στη διεύθυνση  $y$  το εύρος είναι  $[-0.01, 0.0044]$  (m/s).



Σχήμα 5.2.6 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.7. Το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.032 m/s και της κατακόρυφης είναι 0.023m/s. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει παραγωγή αρμονικών συνιστωσών.



Σχήμα 5.2.7 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

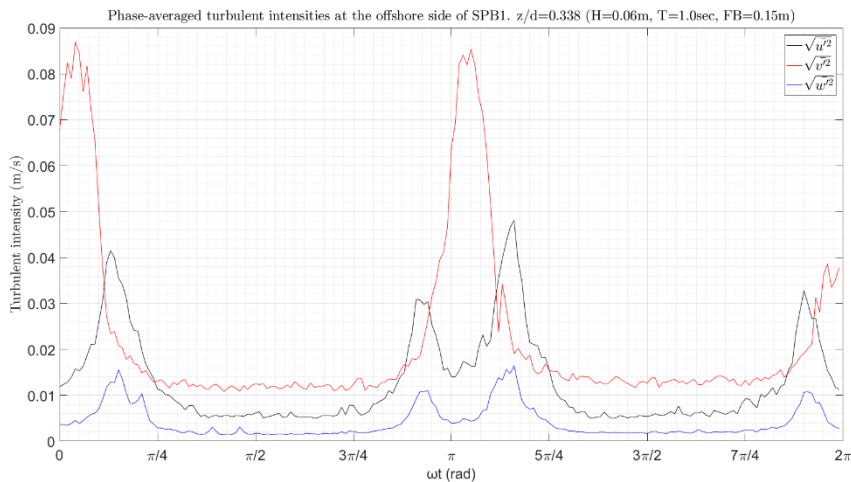
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.8. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της σχεδόν ταυτόχρονα στην οριζόντια και κατακόρυφη



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

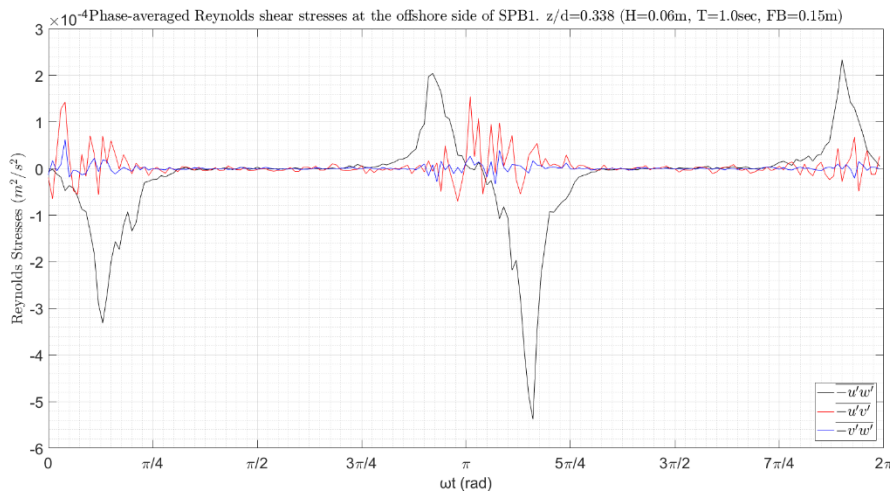
διεύθυνση. Κατά τη διεύθυνση  $y$  η τυρβώδης ένταση λαμβάνει μέγιστες τιμές σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις γεγονός μη αναμενόμενο το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπιστεί με κάποια επιφυλακτικότητα.

Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει τέσσερα μέγιστα. Τα σημεία αυτά είναι  $[0.41 \text{ rad}, 0.042 \text{ m/s}]$ ,  $[2.86 \text{ rad}, 0.031 \text{ m/s}]$ ,  $[3.64 \text{ rad}, 0.048 \text{ m/s}]$ ,  $[5.97 \text{ rad}, 0.033 \text{ m/s}]$ . Για τη  $y$  διεύθυνση οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις εντοπίζονται στα σημεία  $[0.126 \text{ rad}, 0.087 \text{ m/s}]$ ,  $[3.3 \text{ rad}, 0.085 \text{ m/s}]$ ,  $[6.16 \text{ rad}, 0.039 \text{ m/s}]$ . Τέλος κατά την διεύθυνση  $z$  οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις εντοπίζονται στα σημεία  $[0.47 \text{ rad}, 0.016 \text{ m/s}]$ ,  $[2.95 \text{ rad}, 0.011 \text{ m/s}]$ ,  $[3.64 \text{ rad}, 0.016 \text{ m/s}]$  και  $[6 \text{ rad}, 0.011 \text{ m/s}]$ .



Σχήμα 5.2.8 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.9 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο  $x-z$  για ζεύγη τιμών  $(0.41 \text{ rad}, 3.32 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$ ,  $(2.89 \text{ rad}, 2.04 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$ ,  $(3.64 \text{ rad}, -5.38 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$  και  $(6 \text{ rad}, 2.34 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2)$ .

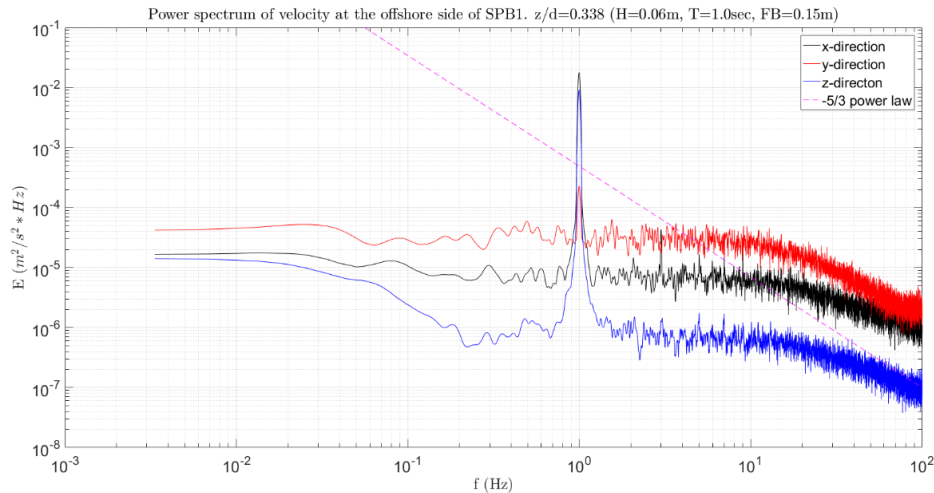


Σχήμα 5.2.9 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x-z$  (μαύρο),  $x-y$  (κόκκινο) και  $y-z$  (μπλε) επίπεδο. 1-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

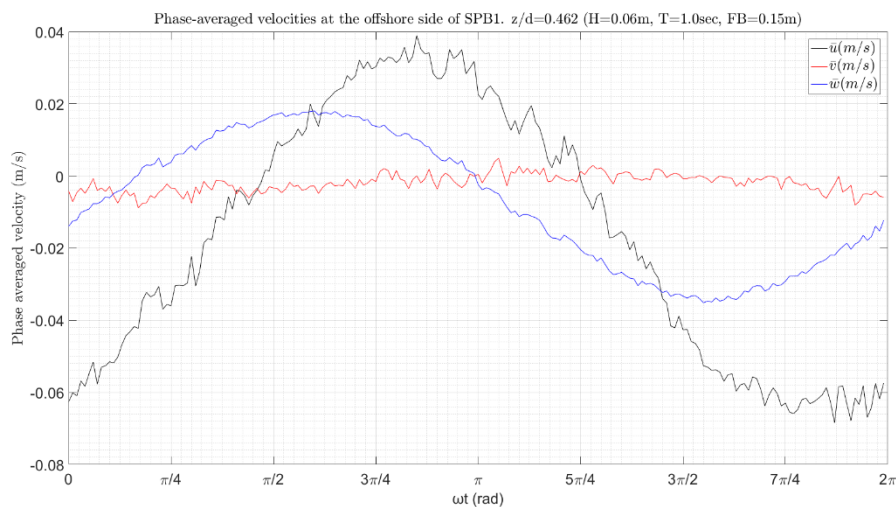
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.10. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $1.79 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ , στη  $y$  είναι  $2.29 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $9.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Το αδρανειακό υπό-εύρος δεν εντοπίζεται για τις συνιστώσες της ταχύτητας στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση παρά μόνο στη  $y$  διεύθυνση όπου εντοπίζεται στο εύρος των συχνοτήτων από 20 – 70 Hz.



Σχήμα 5.2.10 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

### 3. Σχετική θέση, $z/d = 0.462$ .

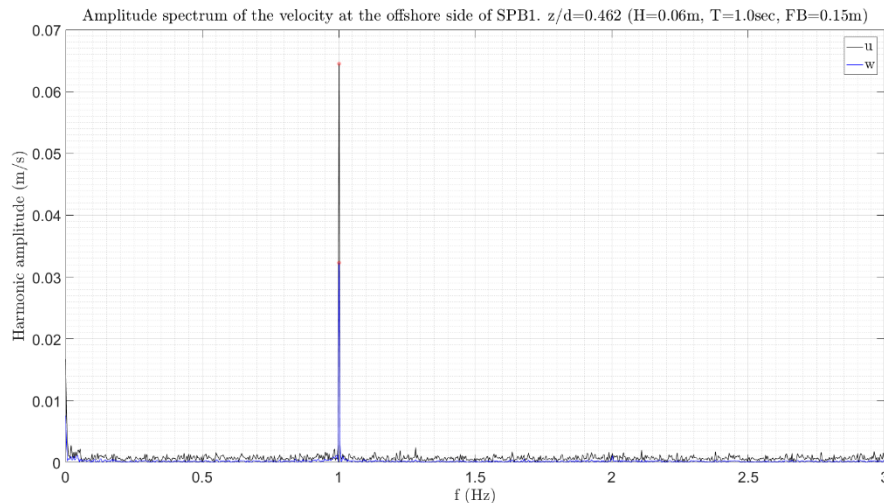
Στο Σχήμα 5.2.11 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.068, 0.039]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.035, 0.018]$  (m/s), ενώ στη διεύθυνση  $y$  το εύρος είναι  $[-0.088, 0.0049]$  (m/s).



Σχήμα 5.2.11 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.12. Το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.0645 m/s και της κατακόρυφης είναι 0.0323m/s. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε η κύρια συχνότητα της περιοδικής μεταβολής της ταχύτητας είναι  $f = 1\text{Hz}$  και ότι δεν υπάρχει παραγωγή αρμονικών συνιστωσών.



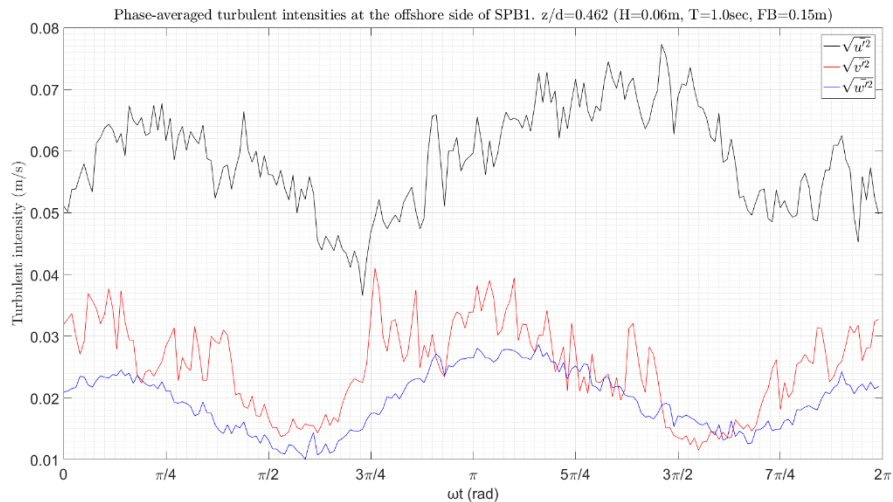
Σχήμα 5.2.12 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R1, z/d=0.462, προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.13. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση της τύρβης κατά την οριζόντια διεύθυνση λαμβάνει τιμές αρκετά υψηλότερες σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις καθ' όλη περίοδο του κυματισμού. Η ένταση της τύρβης κατά τις διευθύνσεις y και z ακολουθεί παρόμοια μεταβολή και παρόμοιες τιμές στο μεγαλύτερο διάστημα.

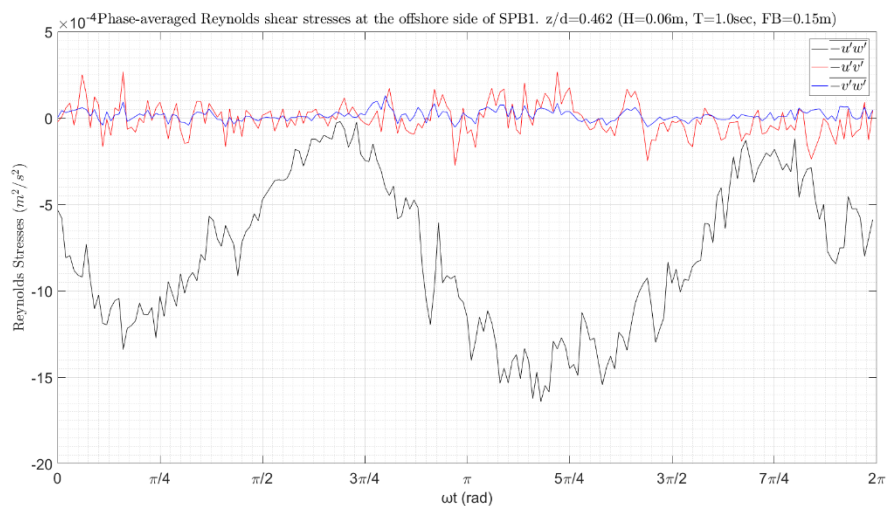
Πιο συγκεκριμένα κατά την x διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει δύο μέγιστα. Τα σημεία αυτά είναι  $[0.75\text{rad}, 0.068\text{ m/s}]$ ,  $[4.59\text{ rad}, 0.077\text{ m/s}]$ . Για τη y διεύθυνση οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις εντοπίζονται στα σημεία  $[0.346\text{ rad}, 0.038\text{ m/s}]$  και  $[2.39\text{ rad}, 0.041\text{ m/s}]$ . Τέλος κατά την διεύθυνση z οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις εντοπίζονται στα σημεία  $[0.44\text{ rad}, 0.025\text{ m/s}]$ ,  $[3.4\text{ rad}, 0.028\text{ m/s}]$ .

Στο Σχήμα 5.2.14 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-z όπου στο σύνολο της περιόδου του κυματισμού η  $-\overline{u'w'}$  διατηρεί αρνητικό πρόσημο. Αντίθετα οι διατμητικές τάσεις  $-\overline{u'v'}$  και  $-\overline{v'w'}$  ταλαντεύονται γύρω από την μηδενική τιμή χωρίς κάποια σαφή τάση. Οι μέγιστες αρνητικές τιμές της διατμητικής τάσης  $-\overline{u'w'}$  εντοπίζεται στα σημεία  $(0.503\text{ rad}, -1.34 * 10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}^2)$  και  $(3.71\text{ rad}, 1.64 * 10^{-3}\text{ m}^2/\text{s}^2)$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.13 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

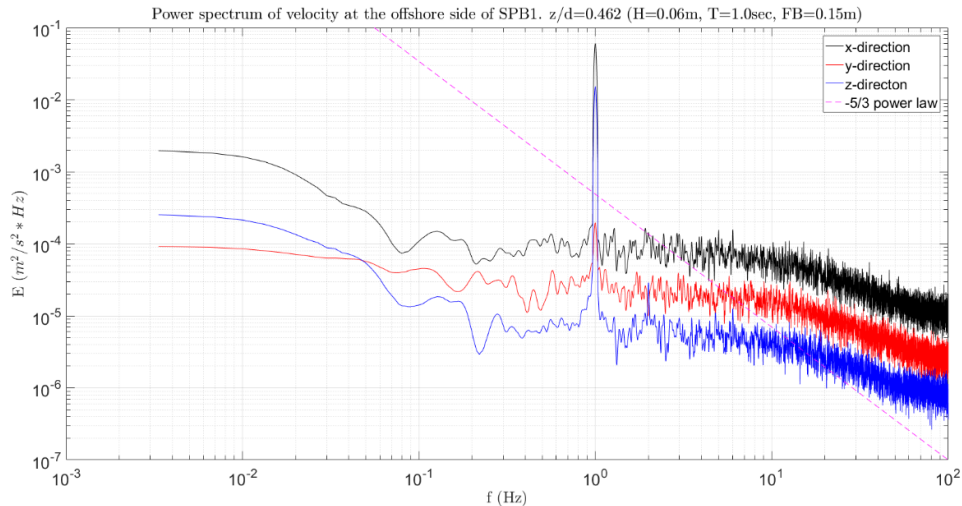


Σχήμα 5.2.14 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατημητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R1,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.15. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.06\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη y είναι  $1.96 * 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.015\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Το αδρανειακό υπό-εύρος δεν φαίνεται να εκδηλώνεται σε καμία συνιστώσα της ταχύτητας καθώς καμία από τις γραφικές παραστάσεις δεν προσεγγίζει την κλίση -5/3 σε κάποιο εύρος συχνοτήτων.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.15 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R1, z/d=0.462, προσήνεμη πλευρά.

### 5.2.1.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

#### 1. Σχετική θέση $z/d = 0.215$ .

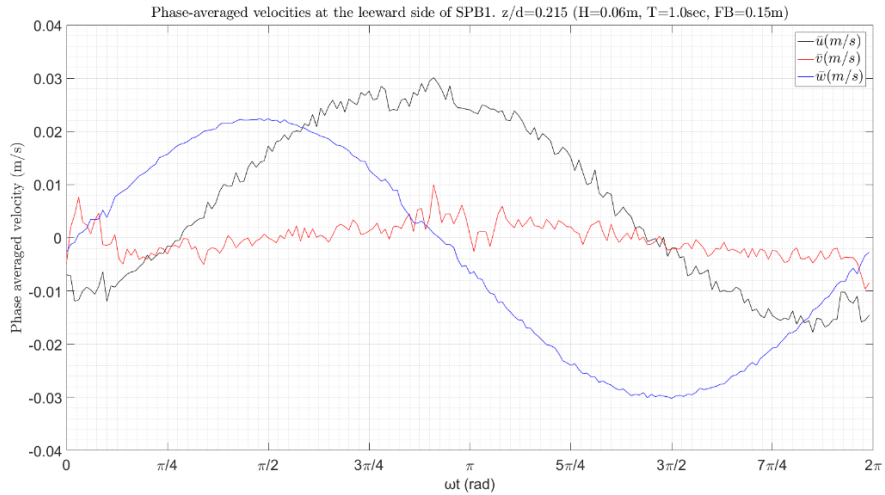
Στο Σχήμα 5.2.16 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.018, 0.03] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.03, 0.022] (m/s), ενώ στη διεύθυνση y το εύρος είναι [-0.01, 0.01] (m/s).

Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.17. Οι δύο αυτές συνιστώσες παρουσιάζουν περιοδικότητα με συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$ . Το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.021 m/s και της κατακόρυφης είναι 0.025m/s. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει παραγωγή αρμονικών συνιστωσών, οπότε όλη η ενέργεια μεταφέρεται από την κύρια συχνότητα του κυματισμού.

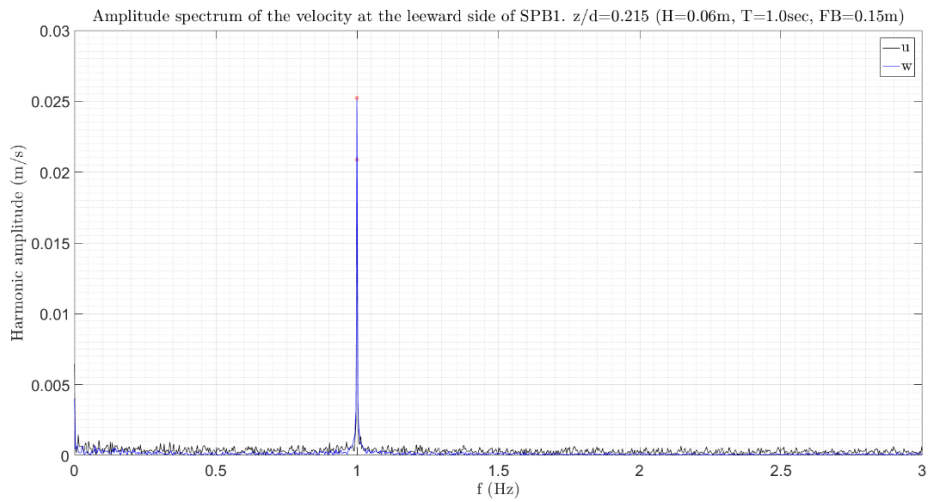
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.8. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της σχεδόν ταυτόχρονα στην οριζόντια (μαύρο) και κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση. Κατά τη διεύθυνση y η τυρβώδης ένταση λαμβάνει μέγιστες τιμές σημαντικά μεγαλύτερες σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις γεγονός μη αναμενόμενο το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπιστεί με κάποια επιφυλακτικότητα.

Πιο συγκεκριμένα κατά την x διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει τέσσερα μέγιστα. Τα σημεία αυτά είναι [0.1257 rad, 0.046 m/s], [2.639 rad, 0.042 m/s], [3.079 rad, 0.033 m/s], [6.126 rad, 0.045 m/s]. Για τη y διεύθυνση οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις εντοπίζονται στα σημεία [0.063 rad, 0.089 m/s], [2.89 rad, 0.081 m/s], [6.252 rad, 0.079 m/s]. Τέλος κατά την διεύθυνση z οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις εντοπίζονται στα σημεία [0.03rad, 0.016 m/s], [2.67 rad, 0.015 m/s], [3.142 rad, 0.0123 m/s] και [6.252 rad, 0.016 m/s].

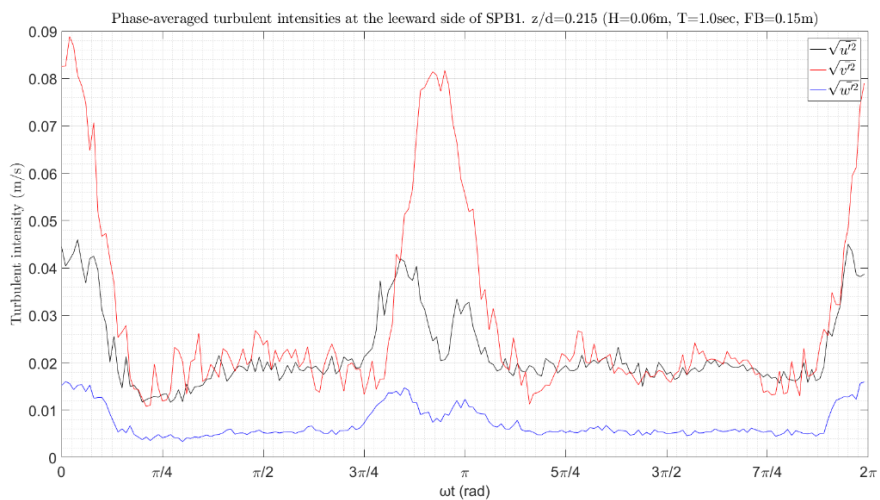
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.16 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.17 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

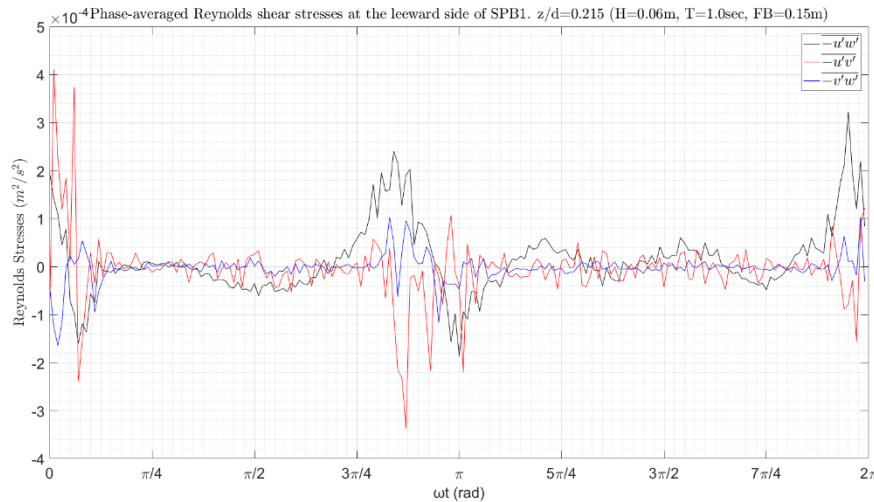


Σχήμα 5.2.18 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



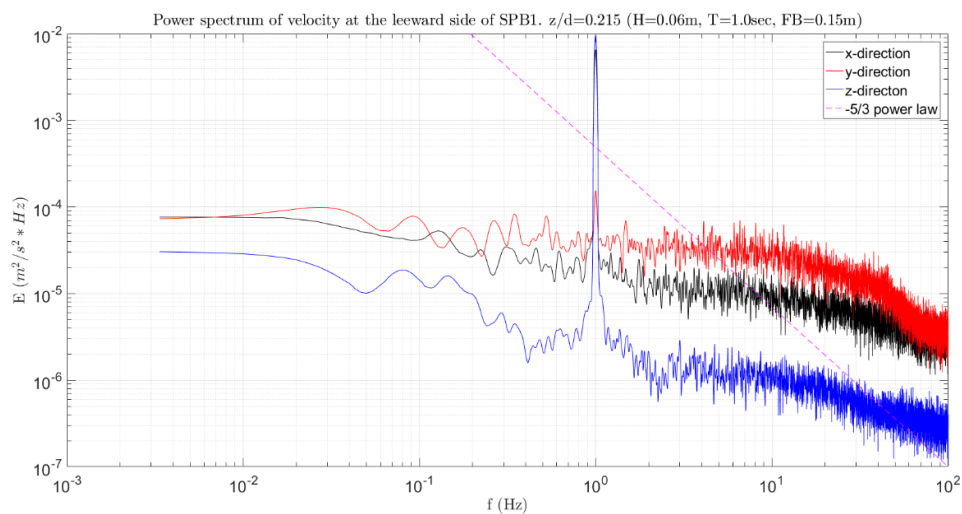
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

Στο Σχήμα 5.2.19 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Σημαντικές διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στα επίπεδα x-z και x-y. Στο επίπεδο x-z η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει δύο μέγιστες τιμές στα σημεία ( $2.64 \text{ rad}, 2.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) και ( $6.13 \text{ rad}, 3.22 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) και δύο ελάχιστες στα σημεία ( $0.22 \text{ rad}, -1.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) και ( $3.14 \text{ rad}, -1.87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ). Αντίστοιχα στο επίπεδο x-y η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη τιμή στο σημείο ( $0.0314 \text{ rad}, 4.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) και ελάχιστη στο σημείο ( $2.73 \text{ rad}, -3.34 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ).



Σχήμα 5.2.19 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R1, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.20. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $6.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ , στη y είναι  $1.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $9.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Το αδρανειακό υπό-εύρος φαίνεται να εκδηλώνεται μόνο στη y συνιστώσα της ταχύτητας καθώς φαίνεται να προσεγγίζει την κλίση -5/3 στο εύρος συχνοτήτων από 40 έως 100Hz.

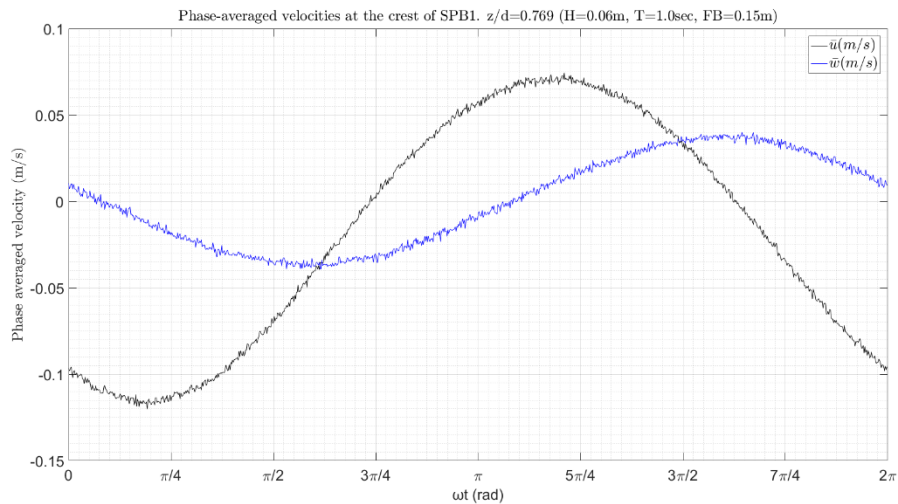


Σχήμα 5.2.20 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R1, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

5.2.1.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

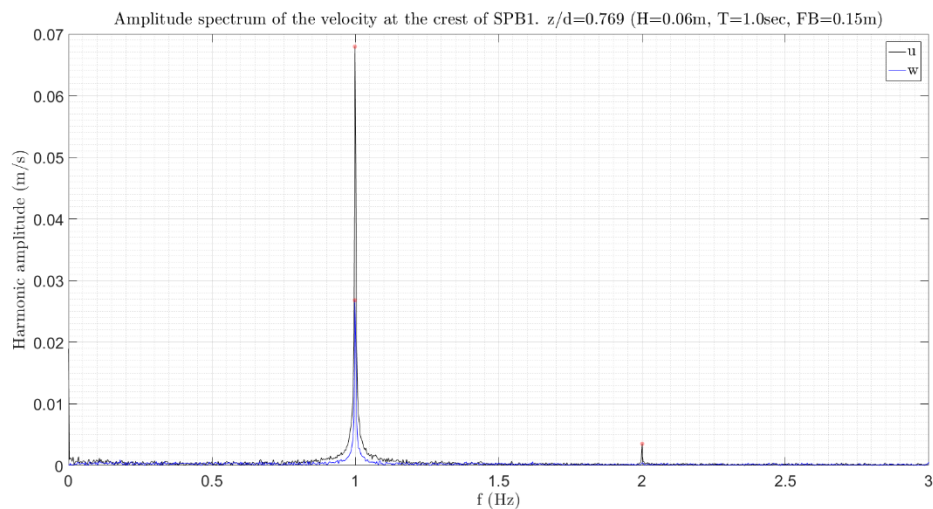
1. Στέψη, σχετική θέση  $z/d = 0.769$ .

Στο Σχήμα 5.2.21 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.12, 0.075]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.04, 0.04]$  (m/s).



Σχήμα 5.2.21 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

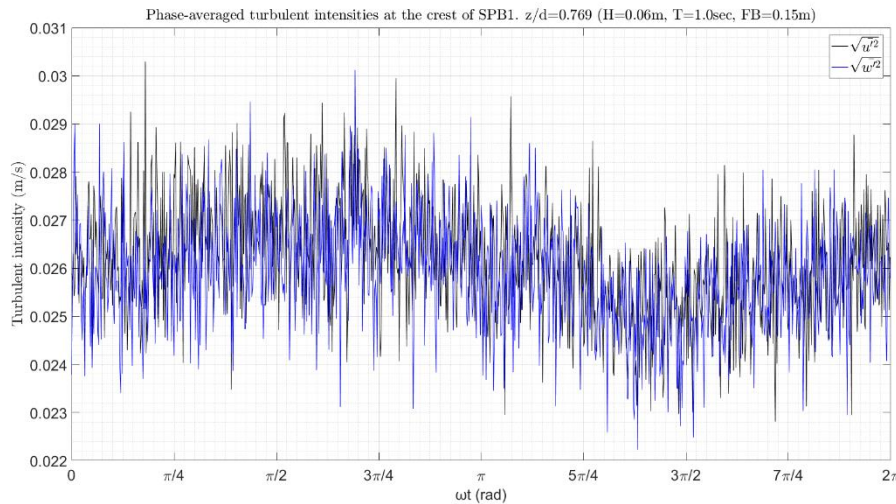
Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.22. Οι δύο αυτές συνιστώσες παρουσιάζουν περιοδικότητα με συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$ . Το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.068 m/s και της κατακόρυφης είναι 0.027m/s. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι παράγεται η πρώτη αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας με συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$  και εύρος 0.0035 m/s.



Σχήμα 5.2.22 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

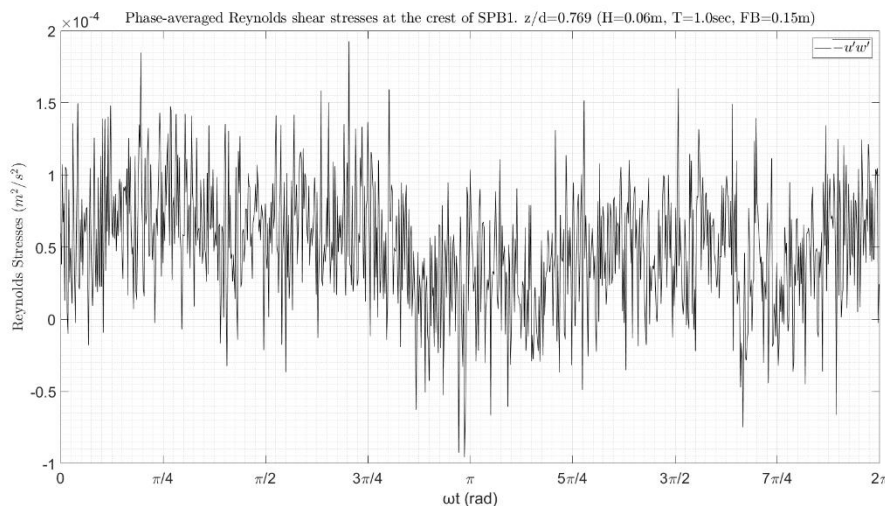
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.23. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων λαμβάνει περίπου ίδιες τιμές σχεδόν ταυτόχρονα στην οριζόντια (μαύρο) και κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι περίπου 0.03 m/s και στις δύο διευθύνσεις.



Σχήμα 5.2.23 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R1, z/d=0.769, στέψη.

Στο Σχήμα 5.2.24 δίνεται η μεταβολή των διαμηθικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο x-z. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $1.93 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-0.96 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



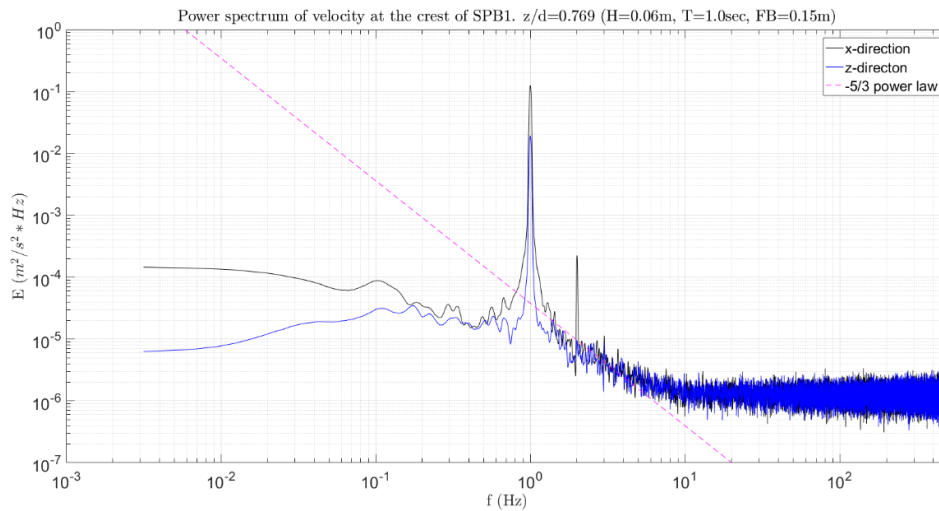
Σχήμα 5.2.24 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμηθικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο) επίπεδο. 1-R1, z/d=0.769, στέψη.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.25. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται μια ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.123 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.017 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα (πρώτη αρμονική) στη δεύτερη



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

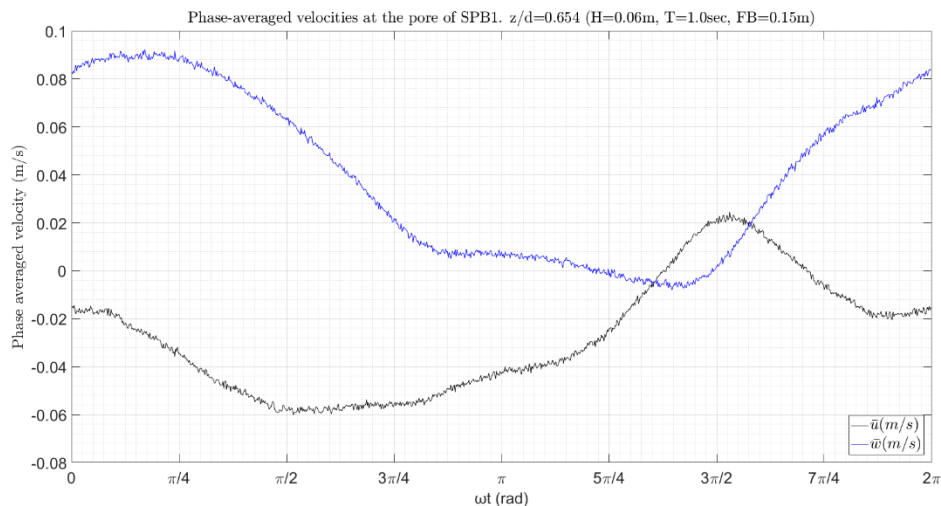
αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας η οποία εκδηλώνεται με συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$  και ενέργεια  $2.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Η κλίση  $-5/3$  η οποία αντιπροσωπεύει το αδρανειακό υπό-εύρος, φαίνεται και στις δύο γραφικές παραστάσεις στο εύρος συχνοτήτων από 1 έως 5Hz.



Σχήμα 5.2.25 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

### 2. Πόρος, σχετική θέση $z/d = 0.654$ .

Στο Σχήμα 5.2.26 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.06, 0.025]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.008, 0.09]$  (m/s).

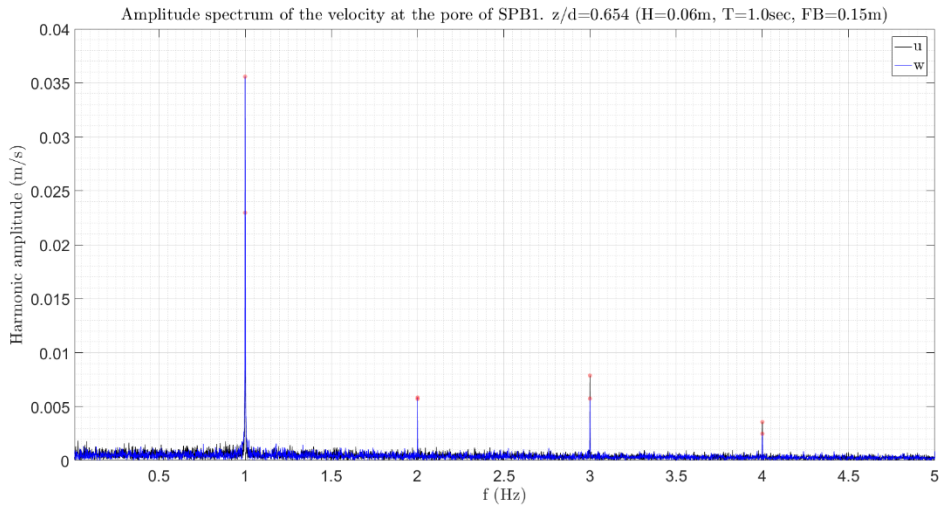


Σχήμα 5.2.26 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.27. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται η παραγωγή τριών επιπλέον αρμονικών συνιστωσών και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας μέσα στο πόρο. Το εύρος της πρώτης και δεύτερης αρμονικής συνιστώσας της κατακόρυφης ταχύτητας είναι μεγαλύτερο

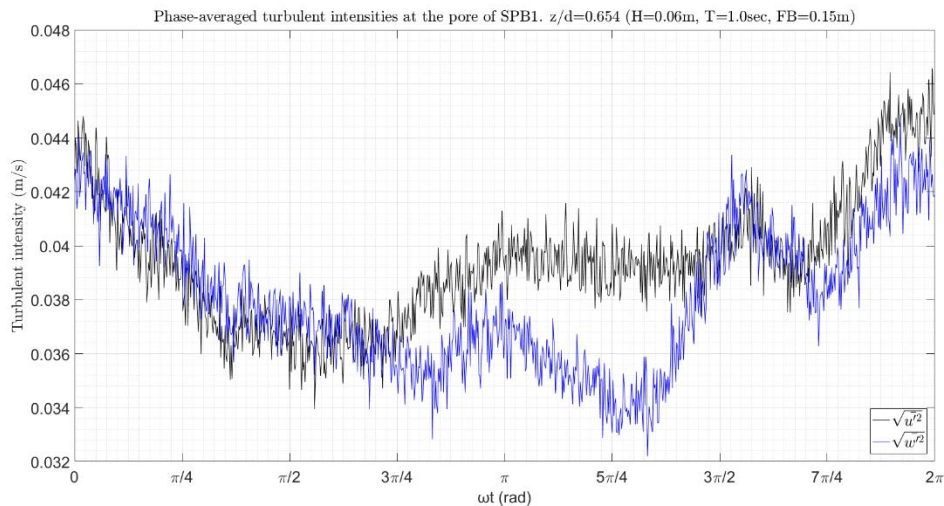
Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

συγκριτικά με τα αντίστοιχα εύρη της οριζόντιας ταχύτητας ενώ παρατηρείται το αντίθετο για τα εύρη της τρίτης και τέταρτης αρμονικής συνιστώσας.



Σχήμα 5.2.27 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R1, z/d=0.654, πόρος.

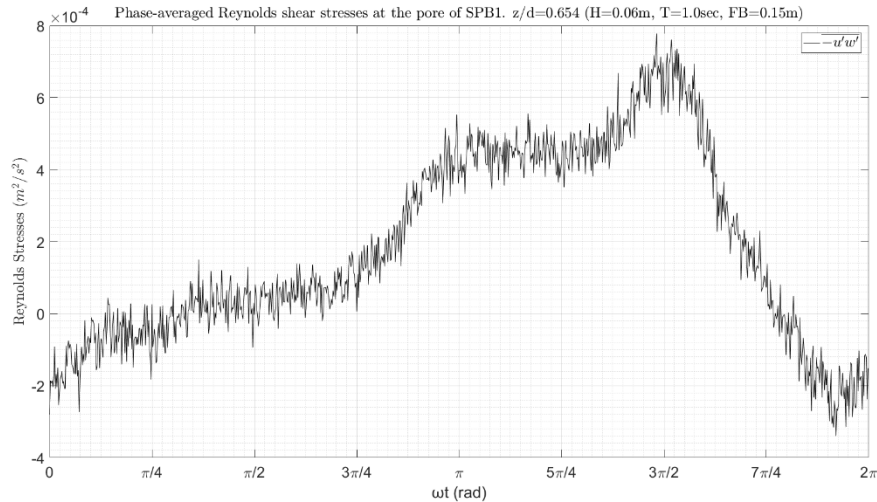
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.28. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων λαμβάνει, στο μεγαλύτερο μέρος της κυματικής περιόδου, περίπου ίδιες τιμές σχεδόν ταυτόχρονα στην οριζόντια (μαύρο) και κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι περίπου 0.046 m/s στη x διεύθυνση και 0.044 m/s στη z διεύθυνση.



Σχήμα 5.2.28 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R1, z/d=0.654, πόρος.

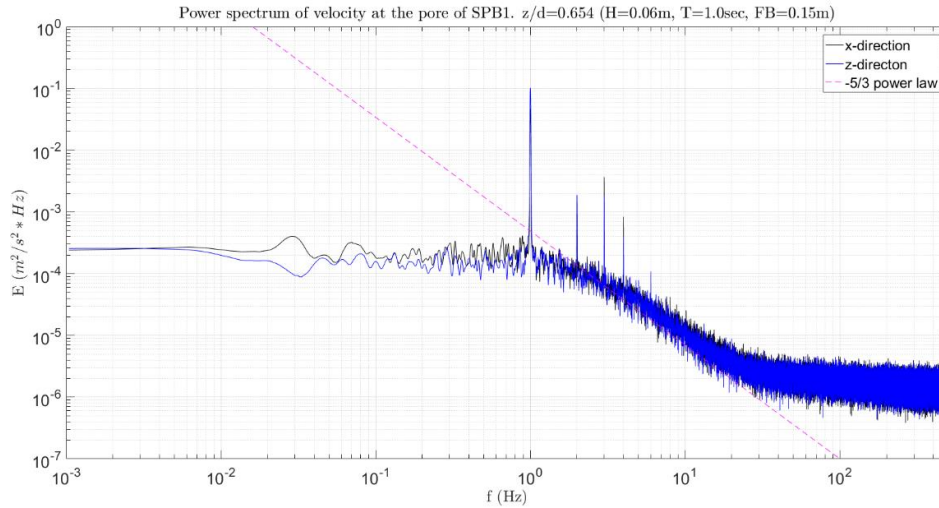
Στο Σχήμα 5.2.29 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο x-z. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $7.8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-3.4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.29 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 1-R1,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.30. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται μια ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.047 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα (πρώτη αρμονική) σε υψηλότερες αρμονικές συνιστώσες. Η κλίση  $-5/3$  η οποία αντιπροσωπεύει το αδρανειακό υπό-εύρος της τύρβης, φαίνεται και στις δύο γραφικές παραστάσεις στο εύρος συχνοτήτων από 2 έως 20Hz.



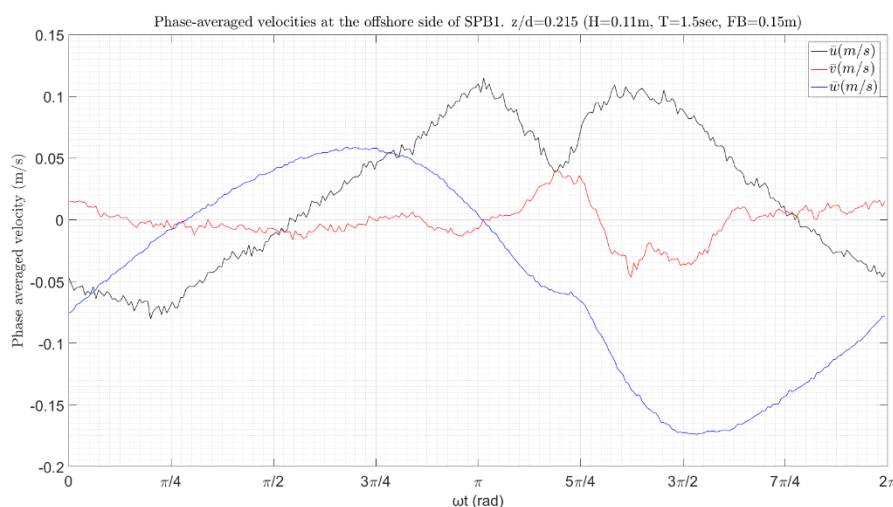
Σχήμα 5.2.30 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R1,  $z/d=0.654$ , πόρος.

## 5.2.2 Κυματικό σενάριο 1-R2

### 5.2.2.1 Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά

#### 1. Σχετική θέση $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.2.31 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.08, 0.12] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.17, 0.06] (m/s) και της ( $\bar{v}$ ) είναι [-0.047, 0.04] (m/s).



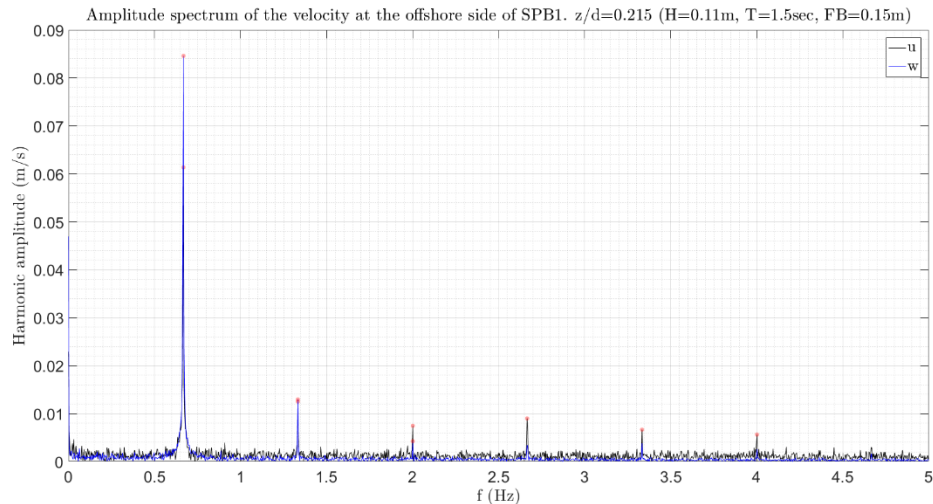
Σχήμα 5.2.31 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.32 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει εύρος 0.06 m/s, παρουσιάζονται πέντε ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της κύριας που φτάνουν μέχρι τη συχνότητα  $f = 4\text{Hz}$ . Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται στη κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) με εύρος 0.085 m/s και σε τέσσερις αρμονικές μέχρι τη συχνότητα  $f = 3.33\text{Hz}$ .

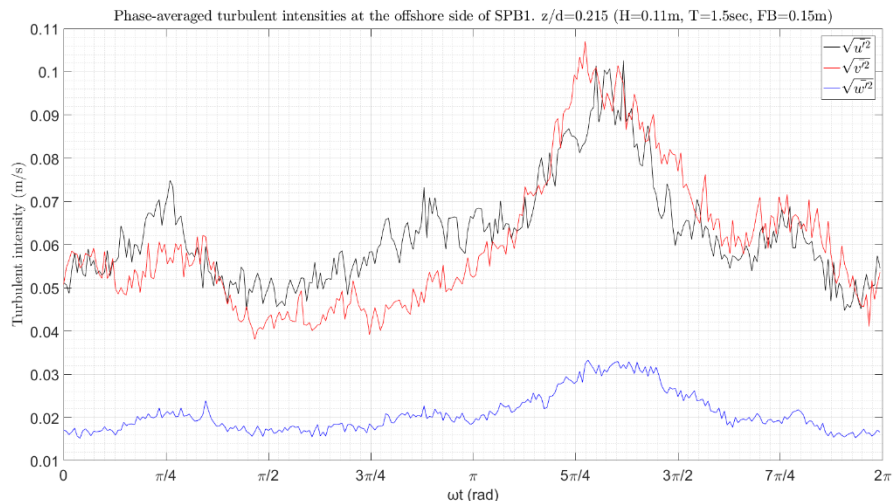
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.33. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων λαμβάνει περίπου ίδιες τιμές και σχεδόν ταυτόχρονα στις διευθύνσεις x και y. Κατά τη διεύθυνση z η τυρβώδης ένταση ακολουθεί περίπου την ίδια μεταβολή αλλά με συγκριτικά πολύ μικρότερες τιμές.

Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.1 m/s περίπου ενώ κατά την διεύθυνση z η ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.033 m/s.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.32 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.33 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.

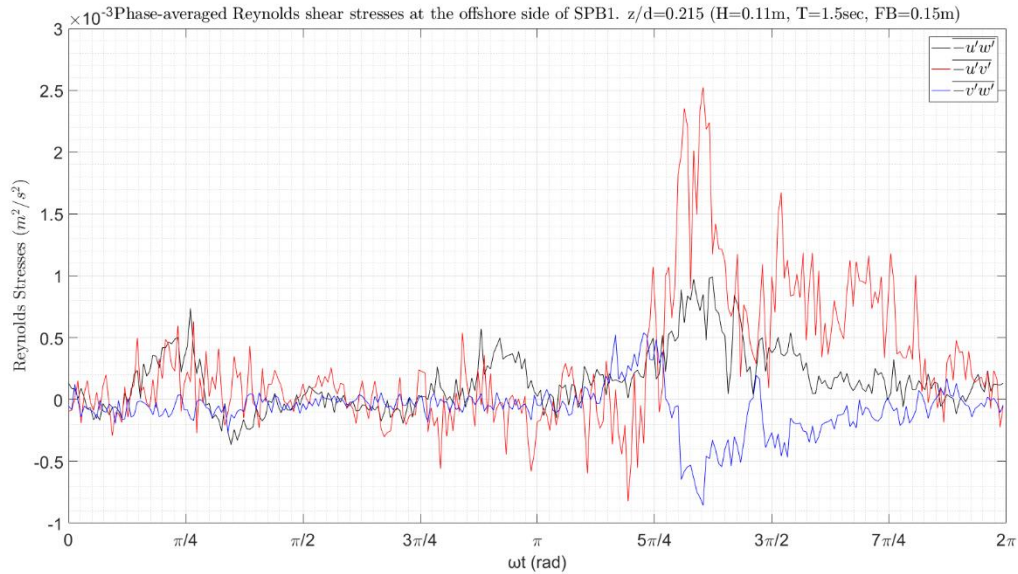
Στο Σχήμα 5.2.34 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.82 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.35. Στα φάσματα ενέργειας της οριζόντιας και κατακόρυφης ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67 \text{ Hz}$  ενώ απουσιάζει εντελώς για την εγκάρσια. Και στα τρία φάσματα παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.0857 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.165 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

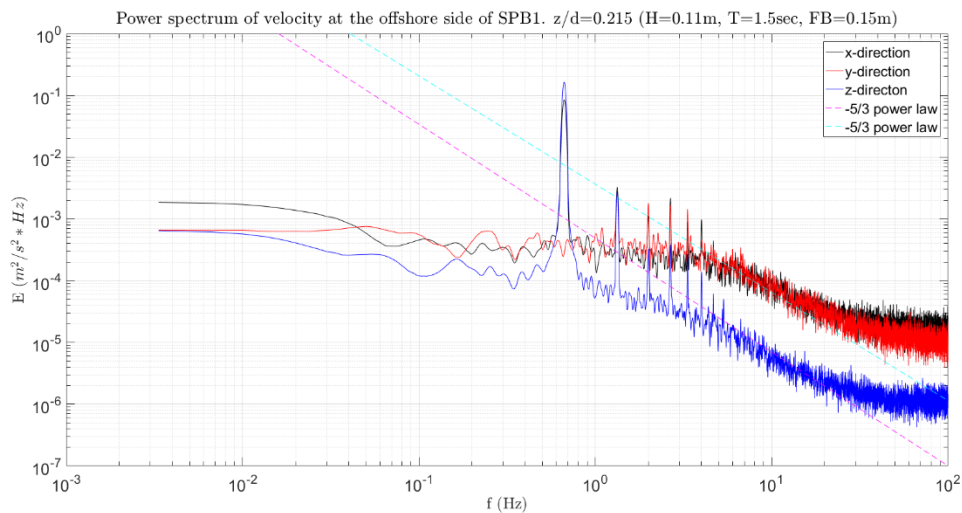
Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στο εύρος των συχνοτήτων από  $f = 3 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 20 \text{ Hz}$ .



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.34 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.35 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

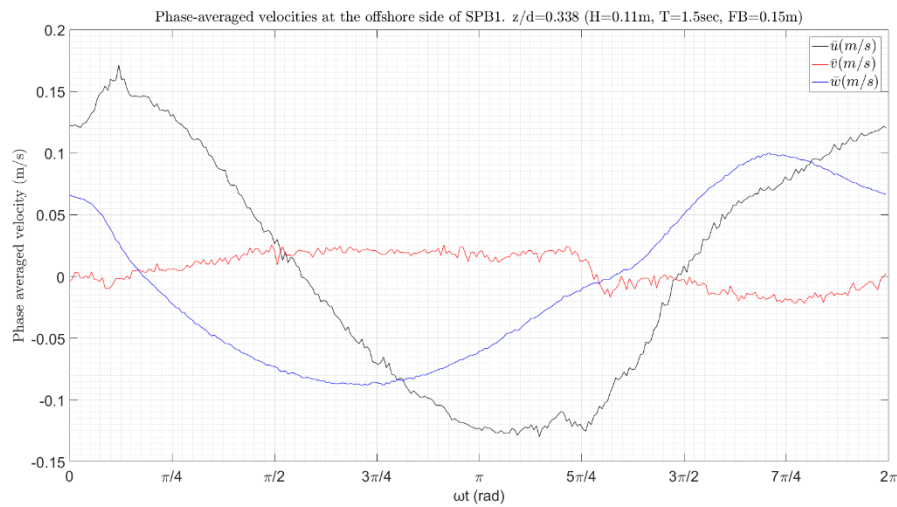
### 2. Σχετική θέση $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.2.36 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.13, 0.17]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.09, 0.1]$  (m/s) και της ( $\bar{v}$ ) είναι  $[-0.022, 0.026]$  (m/s).

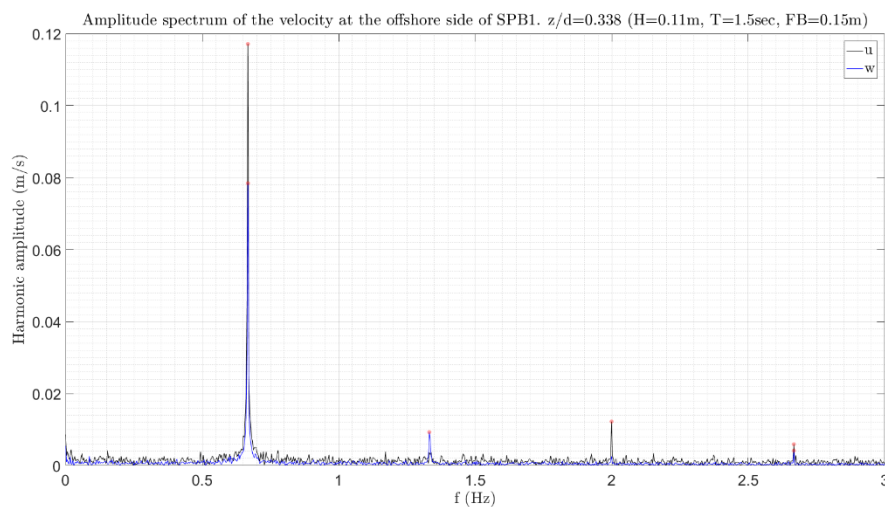
Στο Σχήμα 5.2.37 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει εύρος 0.12m/s, παρουσιάζεται επίσης και η 3<sup>η</sup> αρμονική με συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$  και πλάτος 0.014m/s (11.9% της 1<sup>ης</sup>). Η περιοδική κίνηση στην

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται στη κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) με πλάτος  $0.078\text{m/s}$  στη δεύτερη αρμονική με συχνότητα  $f = 1.33\text{Hz}$  και εύρος  $0.009\text{m/s}$  (11.5% της 1<sup>ης</sup>) και στη τέταρτη με συχνότητα  $f = 2.67\text{Hz}$  εύρος  $0.006\text{m/s}$  (7.6% της 1<sup>ης</sup>).



Σχήμα 5.2.36 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

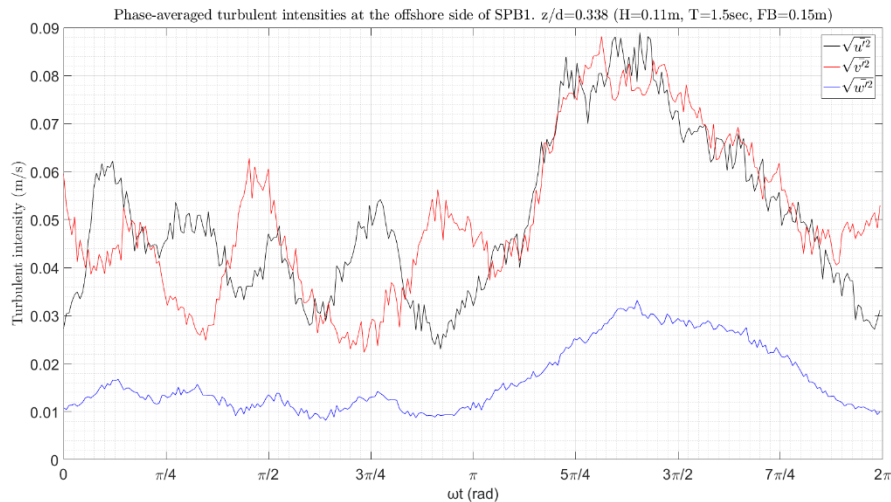


Σχήμα 5.2.37 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.38. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι μέχρι  $\omega t = \pi$  τα τοπικά μέγιστα της έντασης της τύρβης στην οριζόντια διεύθυνση συμπίπτουν σχεδόν με τα τοπικά ελάχιστα στην εγκάρσια διεύθυνση, ενώ για το υπόλοιπο διάστημα οι δύο αυτές εντάσεις συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό. Κατά τη διεύθυνση  $z$  η τυρβώδης ένταση ακολουθεί περίπου την ίδια μεταβολή με τη τυρβώδη ένταση στη διεύθυνση  $x$  αλλά με συγκριτικά πολύ μικρότερες τιμές.

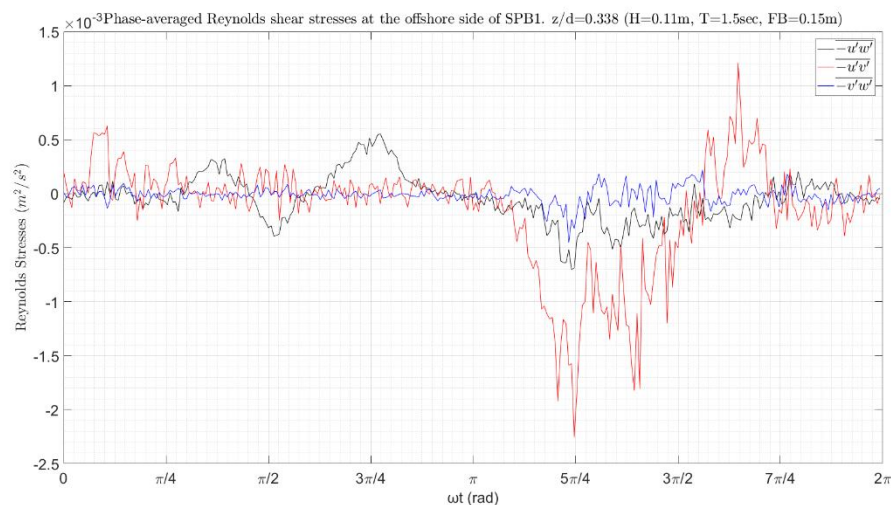
Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή  $0.09\text{ m/s}$  περίπου ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα  $0.033\text{ m/s}$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.38 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.39 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-2.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



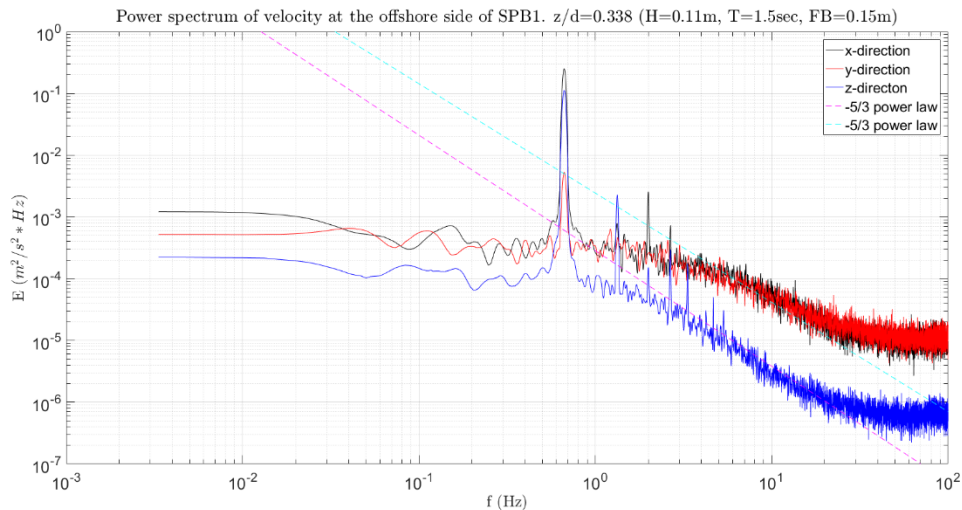
Σχήμα 5.2.39 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R2,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.40. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Στα φάσματα της οριζόντιας και κατακόρυφης ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές ενώ δεν παρατηρείται η αντίστοιχη διεργασία στην εγκάρσια διεύθυνση. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.11 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.005 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στο εύρος των συχνοτήτων από  $f = 4\text{Hz}$  μέχρι  $f = 20\text{Hz}$  για την οριζόντια και την εγκάρσια διεύθυνση και από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 20\text{Hz}$  για την κατακόρυφη διεύθυνση.



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.40 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

### 3. Σχετική θέση, $z/d = 0.462$ .

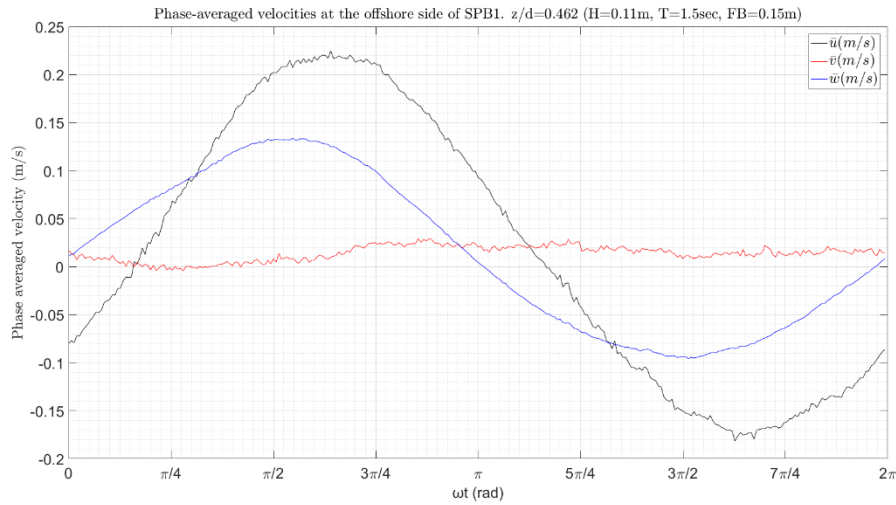
Στο Σχήμα 5.2.41 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.18, 0.225]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.096, 0.134]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) είναι τάξης μεγέθους μικρότερο σε σχέση με τις άλλες δύο διευθύνσεις και κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.004, 0.029]$  (m/s). Λόγω του ότι αυτό το σημείο μέτρησης βρίσκεται στο περίγραμμα του κυματοθραύστη παρατηρείται μια αρκετά πιο ημιτονοειδής μορφή στην οριζόντια και κατακόρυφη ταχύτητα σε σχέση με τα άλλα δύο σημεία μέτρησης που βρίσκονται μέσα στο κυματοθραύστη σε σχετικά βάθη  $z/d = 0.215$  και  $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.2.42 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει εύρος 0.15m/s, παρουσιάζονται δύο ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της κύριας, μία για  $f = 1.334\text{Hz}$  και εύρος 0.011m/s (7.3% της  $1^{\text{ης}}$ ) και μία για  $f = 2\text{Hz}$  με πλάτος ταλάντωσης 0.0045m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνει και αυτή αντίστοιχα τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, 0.088m/s, να εμφανίζεται στη κύρια συχνότητα,  $f = 0.67\text{Hz}$ , και δύο μικρότερα πλάτη ταλάντωσης, 0.0067m/s (7.6% της  $1^{\text{ης}}$ ) και 0.004m/s, στις συχνότητες  $f = 1.334\text{Hz}$  και  $f = 2\text{Hz}$  αντίστοιχα.

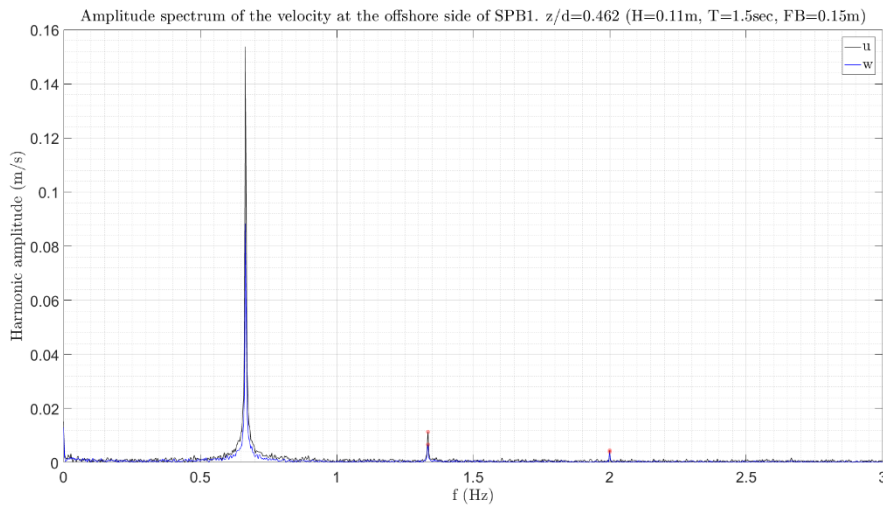
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.43. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι κατά την οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι περίπου ίδια σε μέγεθος και κατά διαστήματα συμπίπτουν, ενώ υπάρχουν στιγμές όπου τα τοπικά μέγιστα του ενός μεγέθους συμπίπτει με τα τοπικά ελάχιστα του άλλου. Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις η τυρβώδης ένταση στη κατακόρυφη διεύθυνση είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

τιμή 0.06 m/s περίπου ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.018 m/s.



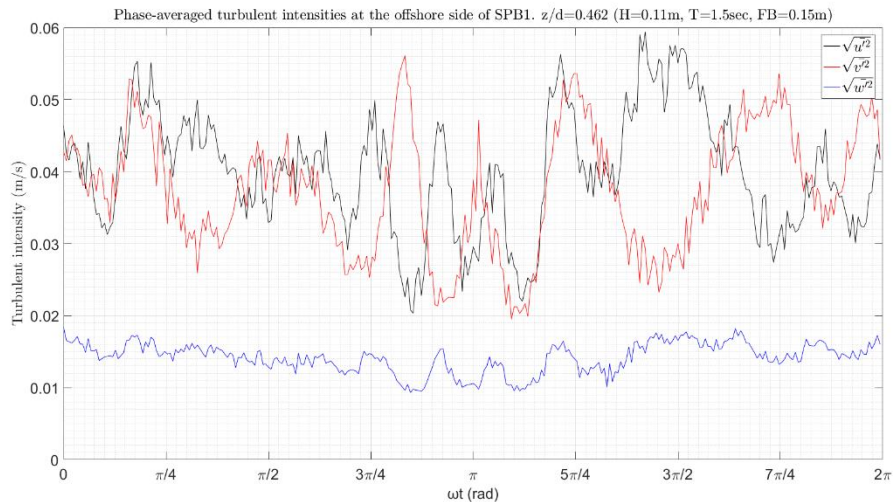
Σχήμα 5.2.41 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.



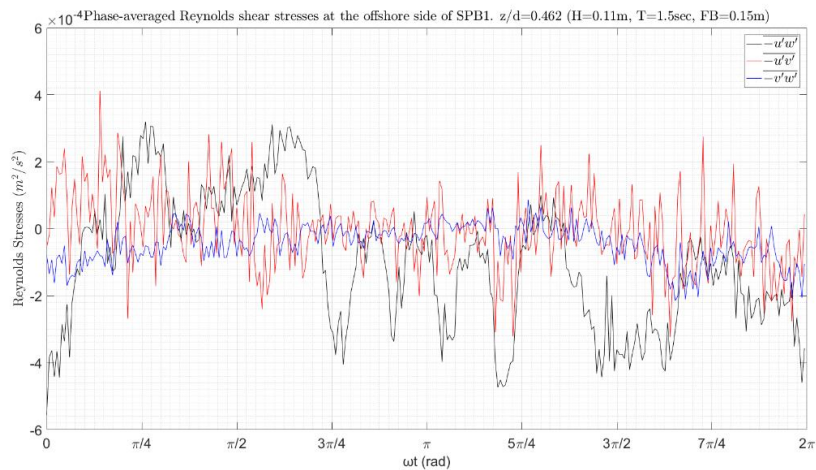
Σχήμα 5.2.42 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.44 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Ένα πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι οι διατμητικές τάσεις στο σημείο αυτό είναι τάξης μεγέθους μικρότερες σε σχέση με αυτές που υπολογίστηκαν στα άλλα δύο σημεία της προσήνεμης διατομής. Μεγάλες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-z όπου η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $3.19 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-5.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ , αλλά και στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $4.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-3.2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.43 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

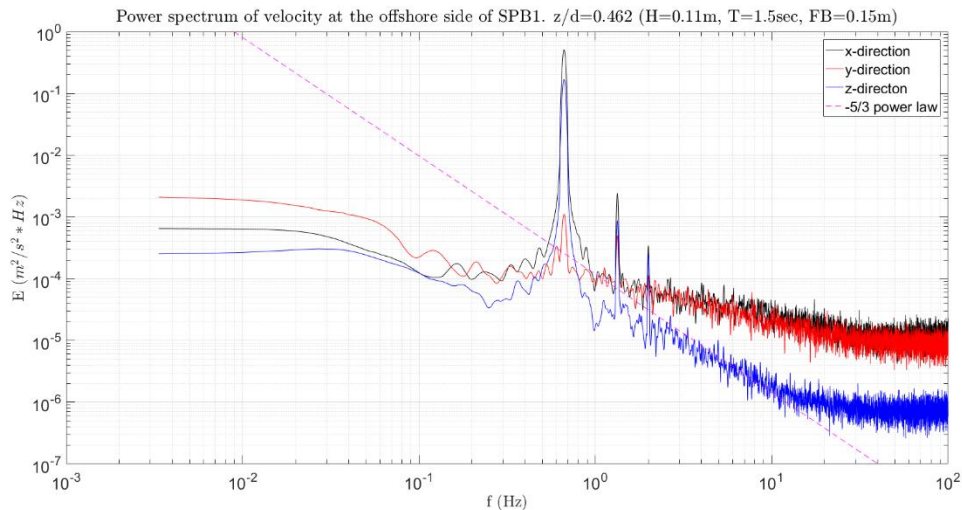


Σχήμα 5.2.44 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.45. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.494\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη z είναι  $0.17\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.001\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας στο εύρος των συχνοτήτων από  $f = 1\text{Hz}$  μέχρι  $f = 10\text{Hz}$ , ενώ το φάσμα για την οριζόντια και την εγκάρσια ταχύτητα ακολουθεί πιο ήπια κλίση αρκετά διαφορετική από  $-5/3$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.45 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

### 5.2.2.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

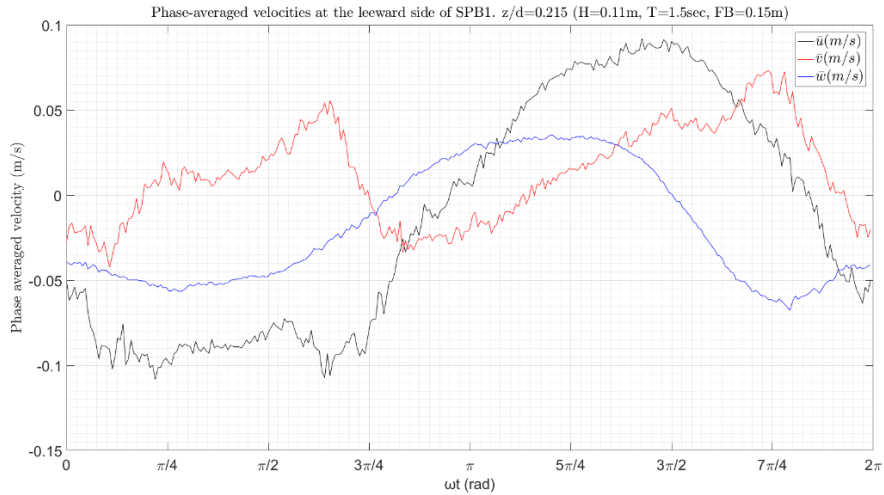
#### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.2.46 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.11, 0.092]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.068, 0.035]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.004, 0.07]$  (m/s).

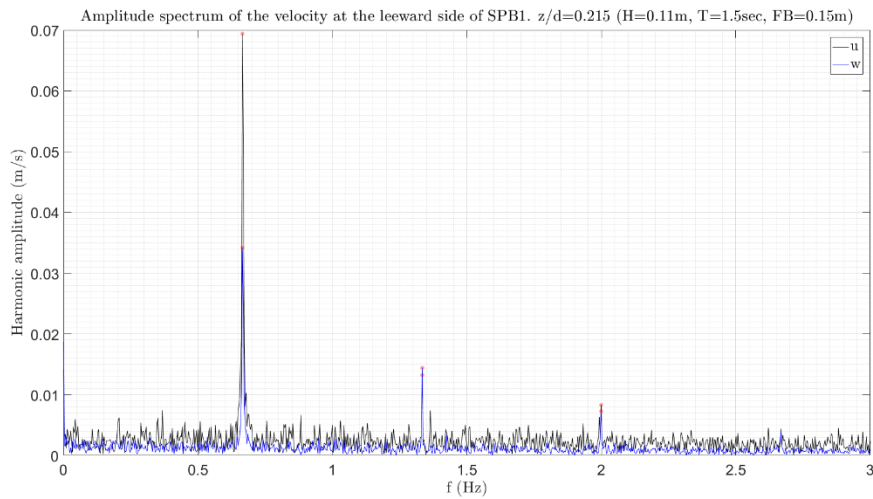
Στο Σχήμα 5.2.47 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει εύρος 0.07 m/s, παρουσιάζονται δύο ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της κύριας, μία για  $f = 1.334\text{Hz}$  και εύρος 0.013 m/s και μία για  $f = 2\text{Hz}$  με πλάτος ταλάντωσης 0.008 m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνει και αυτή αντίστοιχα τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, 0.034 m/s, να εμφανίζεται στη κύρια συχνότητα,  $f = 0.67\text{Hz}$ , και δύο μικρότερα πλάτη ταλάντωσης, 0.014 m/s και 0.007 m/s, στις συχνότητες  $f = 1.334\text{Hz}$  και  $f = 2\text{Hz}$  αντίστοιχα.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.48. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι κατά την οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι περίπου ίδια σε μέγεθος και σχεδόν συμπίπτουν σε όλη τη διάρκεια της κυματικής περιόδου. Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις η τυρβώδης ένταση στη κατακόρυφη διεύθυνση είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.14m/s περίπου ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.045 m/s.

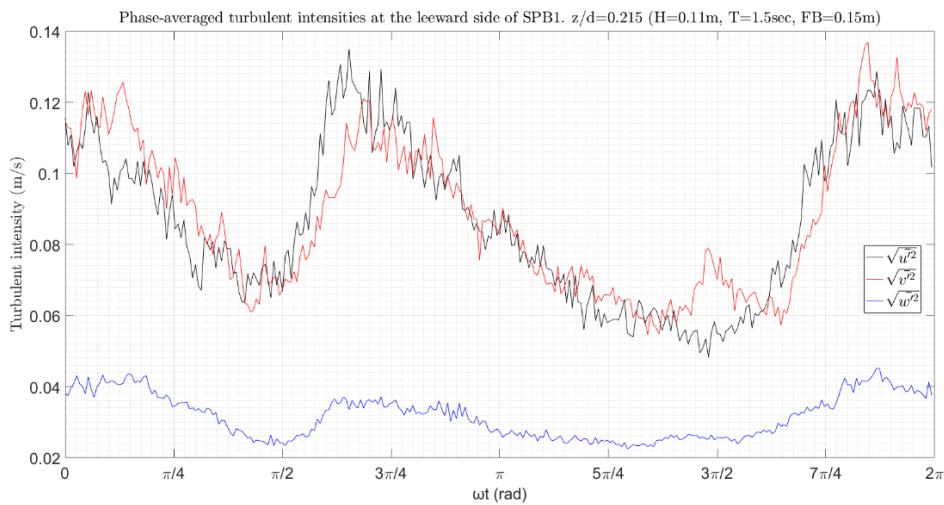
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.46 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.47 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.48 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

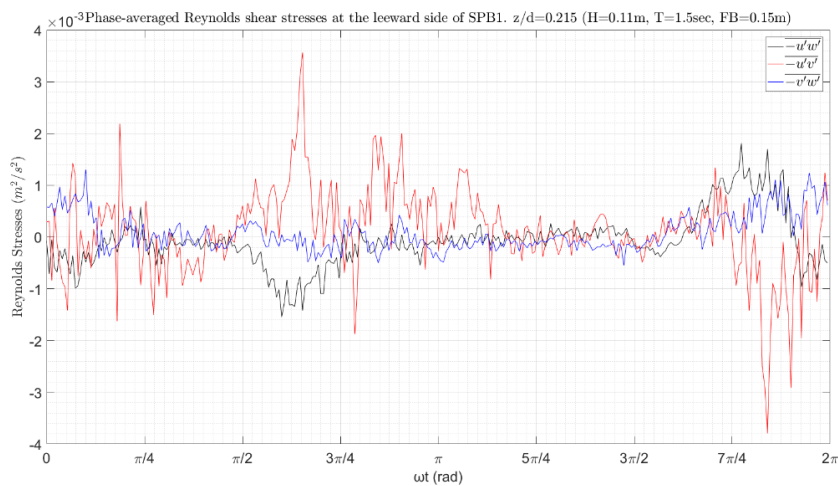


Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

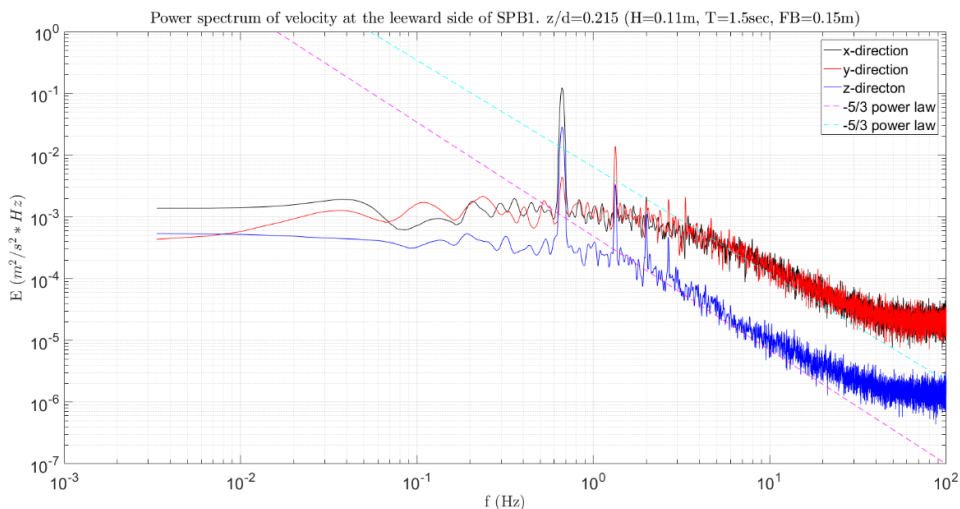
Στο Σχήμα 5.2.49 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Μεγάλες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου  $\overline{-u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-3.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.50. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.11 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.028 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.0044 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 1\text{Hz}$  μέχρι  $f = 20\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 4\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$  περίπου. μ



Σχήμα 5.2.49 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R2, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.



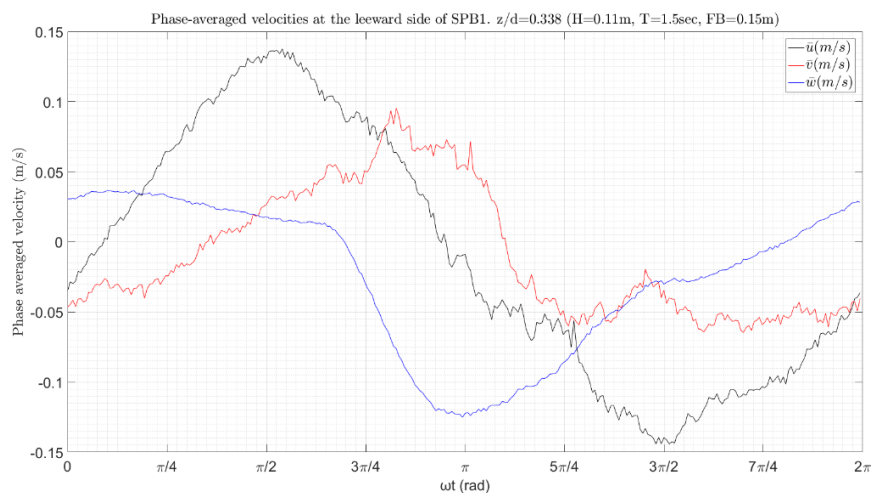
Σχήμα 5.2.50 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

2. Σχετική θέση,  $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.2.51 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.144, 0.138] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.125, 0.037] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.065, 0.095] (m/s).

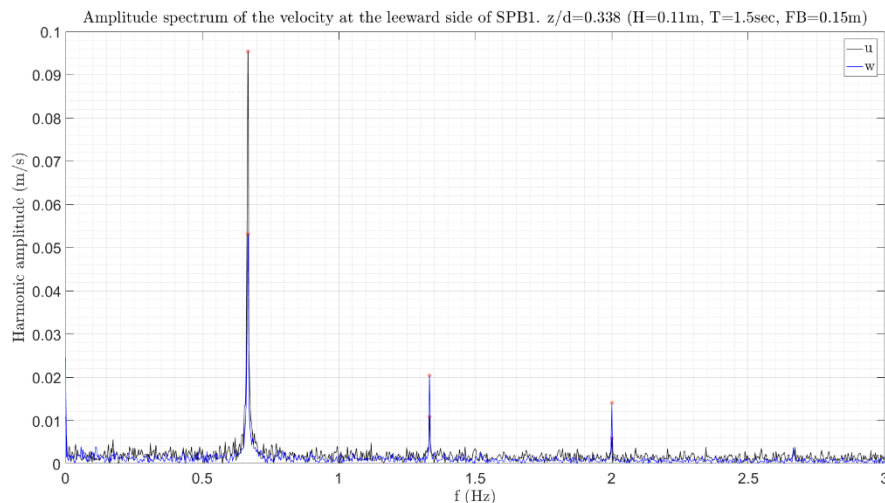
Στο Σχήμα 5.2.52 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει πλάτος ταλάντωσης 0.095 m/s, παρουσιάζονται δύο ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της κύριας, μία για  $f = 1.334\text{Hz}$  και πλάτος 0.011m/s (11.6% της 1<sup>ης</sup>) και μία για  $f = 2\text{Hz}$  με πλάτος ταλάντωσης 0.006m/s (6.3% της 1<sup>ης</sup>). Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνει και αυτή αντίστοιχα σε τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, 0.053m/s, να εμφανίζεται στη κύρια συχνότητα,  $f = 0.67\text{Hz}$ , και δύο μικρότερα πλάτη ταλάντωσης, 0.02m/s (37.7% της 1<sup>ης</sup>) και 0.014m/s (26% της 1<sup>ης</sup>), στις συχνότητες  $f = 1.334\text{Hz}$  και  $f = 2\text{Hz}$  αντίστοιχα.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.53. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή αλλά με διαφορετικό μέγεθος. Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις η τυρβώδης ένταση στη κατακόρυφη διεύθυνση είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.11 m/s και 0.13 m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.048 m/s.

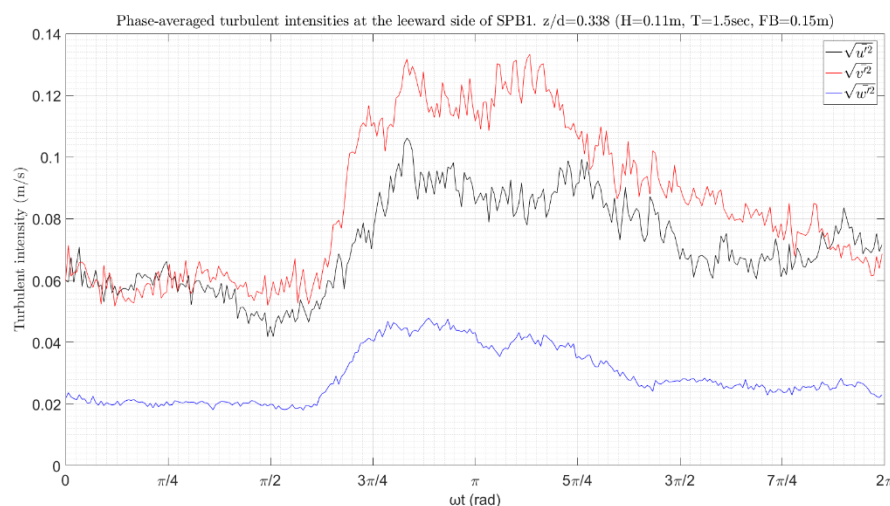


Σχήμα 5.2.51 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.52 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.53 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

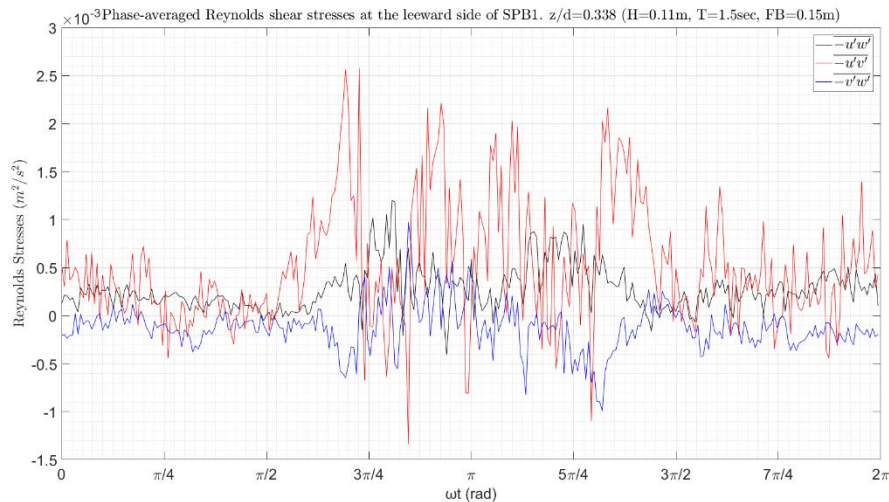
Στο Σχήμα 5.2.54 δίνεται η μεταβολή των διαμηθικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διαμηθικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.34 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.55. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67 \text{ Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.21 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.066 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.048 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

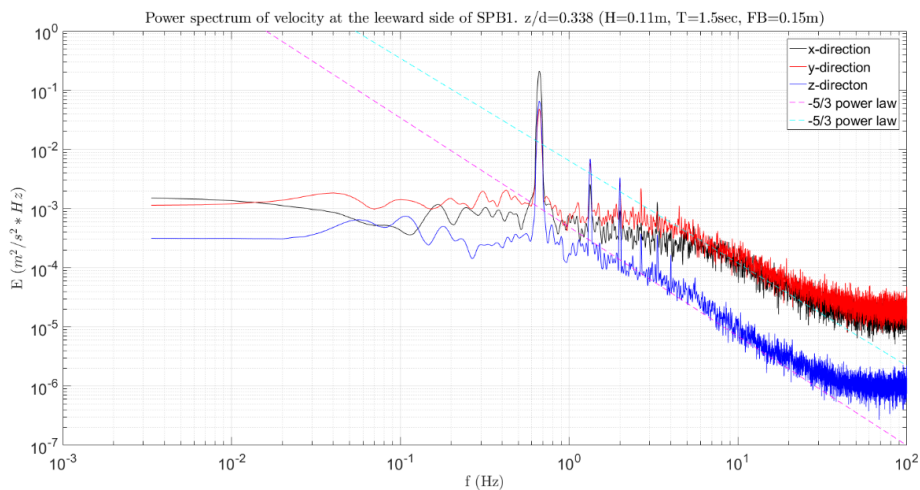
Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 1 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 30 \text{ Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 5 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 30 \text{ Hz}$  περίπου.



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.54 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R2, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.55 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

### 5.2.2.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

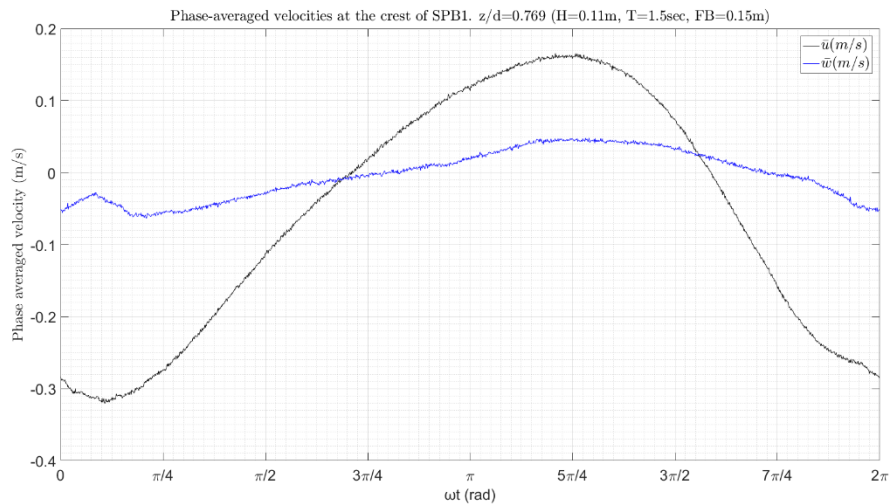
#### 1. Στέψη, σχετική θέση z/d = 0.769.

Στο Σχήμα 5.2.56 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.32, 0.166] (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.064, 0.048] (m/s).

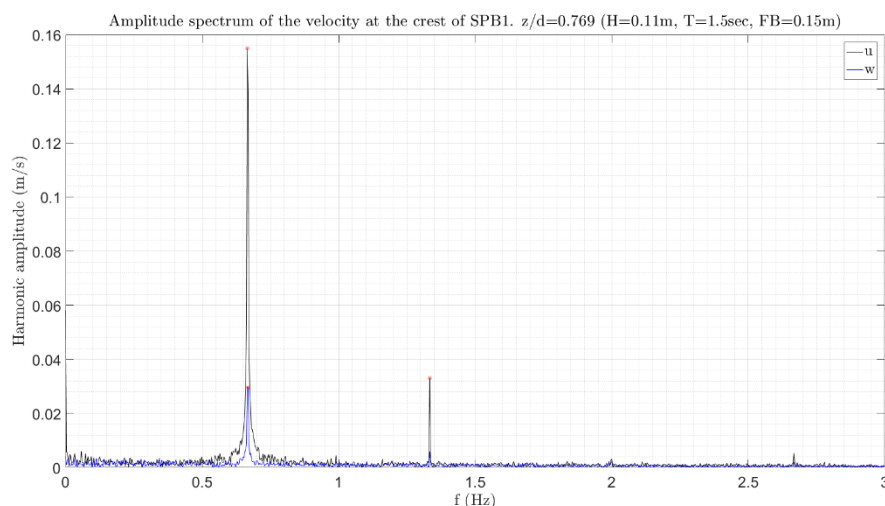
Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.57. Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν η πρώτη και η δεύτερη αρμονική συνιστώσα. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.155m/s και η δεύτερη ( $f = 1.33\text{Hz}$ ) 0.033m/s.

Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται και εδώ οι δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες με πλάτη ταλάντωσης 0.03 m/s και 0.006 m/s.



Σχήμα 5.2.56 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

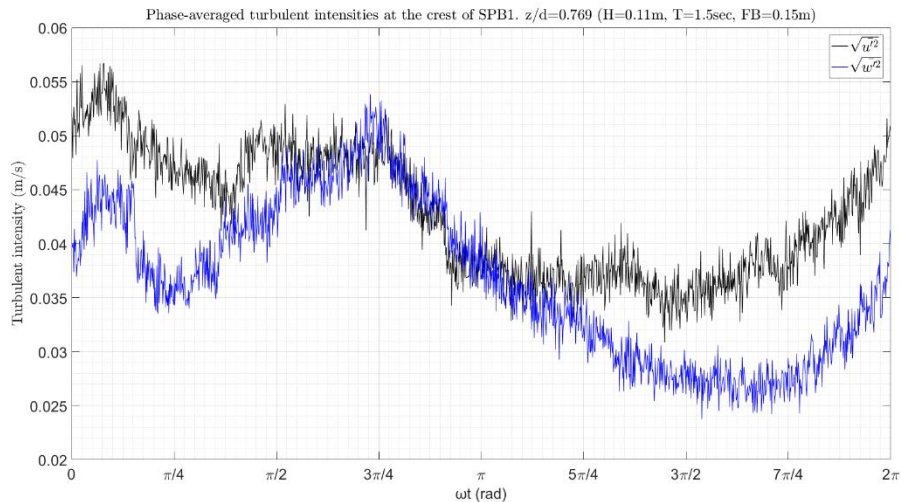


Σχήμα 5.2.57 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

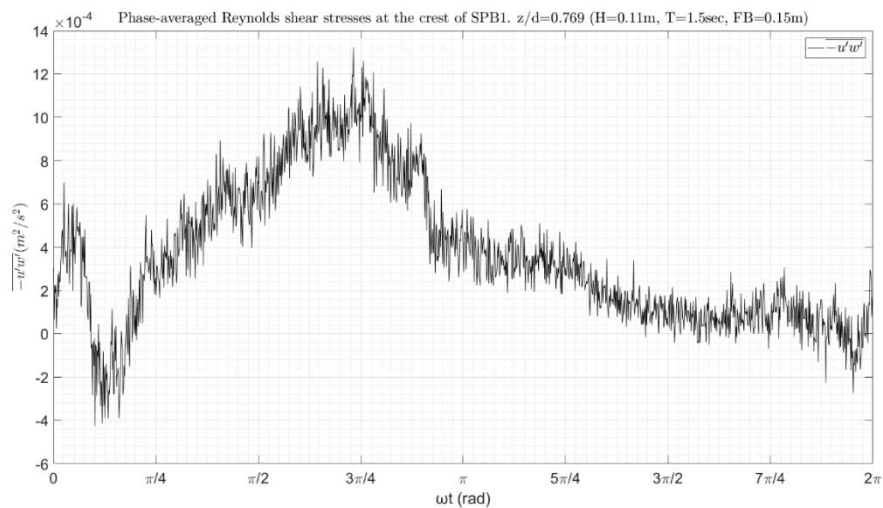
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.58. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερη στην οριζόντια (μαύρο) απ' ό τι στη κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση στο μεγαλύτερο μέρος της κυματικής περιόδου. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.057 m/s και της κατακόρυφης 0.054 m/s.

Στο Σχήμα 5.2.59 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $1.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-4.28 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.58 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

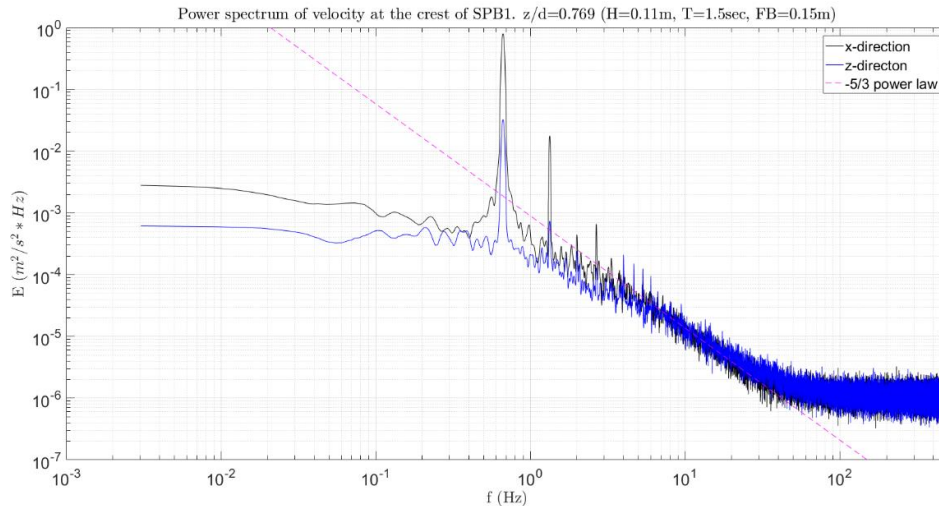


Σχήμα 5.2.59 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 1-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.60. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.72 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα (πρώτη αρμονική) στη δεύτερη αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας η οποία εκδηλώνεται με συχνότητα  $f = 1.34\text{Hz}$  και ενέργεια  $0.017 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 3\text{Hz}$  και  $f = 40\text{Hz}$ .

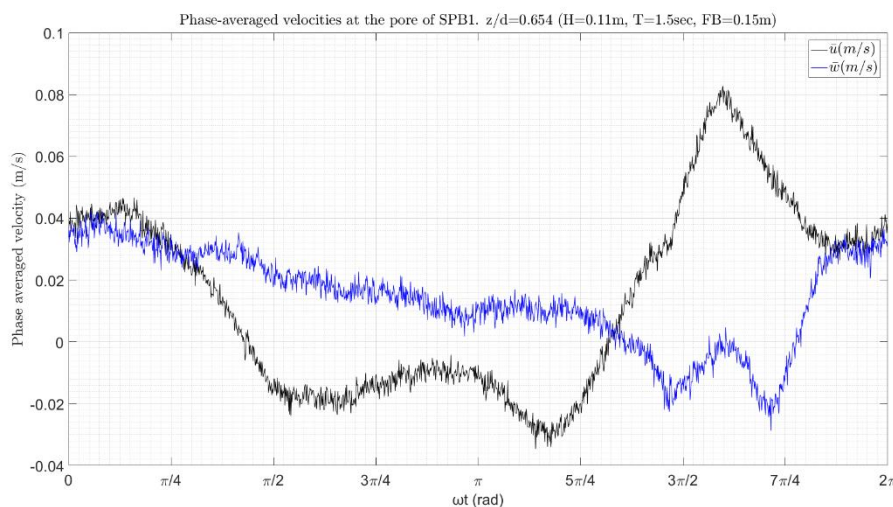
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.60 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

### 2. Πόρος, σχετική θέση $z/d = 0.654$ .

Στο Σχήμα 5.2.61 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.035, 0.083]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.03, 0.042]$  (m/s).



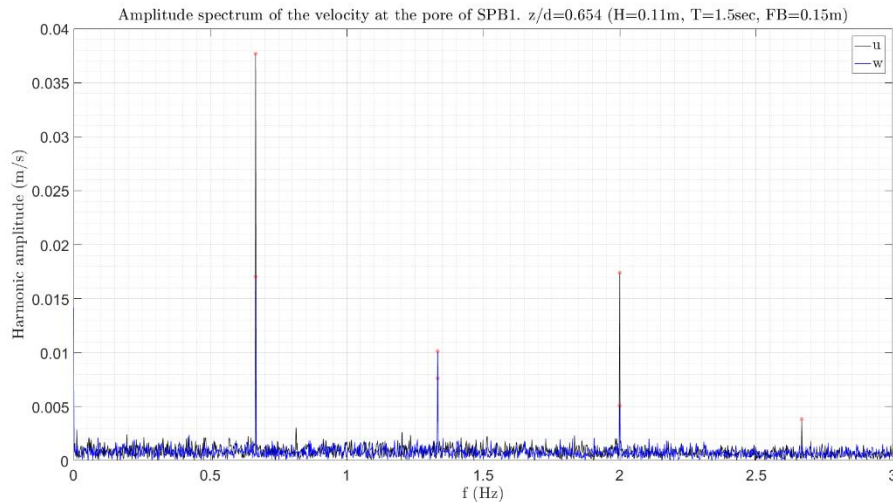
Σχήμα 5.2.61 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R2,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.62. Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν η πρώτη και η τρίτη αρμονική συνιστώσα με την δεύτερη και την τέταρτη αρμονική να είναι ορατές στο σχήμα αλλά με σχετικά μικρότερο αρμονικό πλάτος. Η ταχύτητα στη κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει σημαντικό πλάτος ταλάντωσης στις τρεις πρώτες αρμονικές συνιστώσες. Πιο συγκεκριμένα, για την οριζόντια ταχύτητα, το πλάτος ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής είναι 0.038m/s, της 2<sup>ης</sup> είναι 0.0076m/s (20% της 1<sup>ης</sup>), της 3<sup>ης</sup> είναι 0.0174m/s (45.8% της 1<sup>ης</sup>) και της 4<sup>ης</sup> 0.0038m/s. Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα, το πλάτος



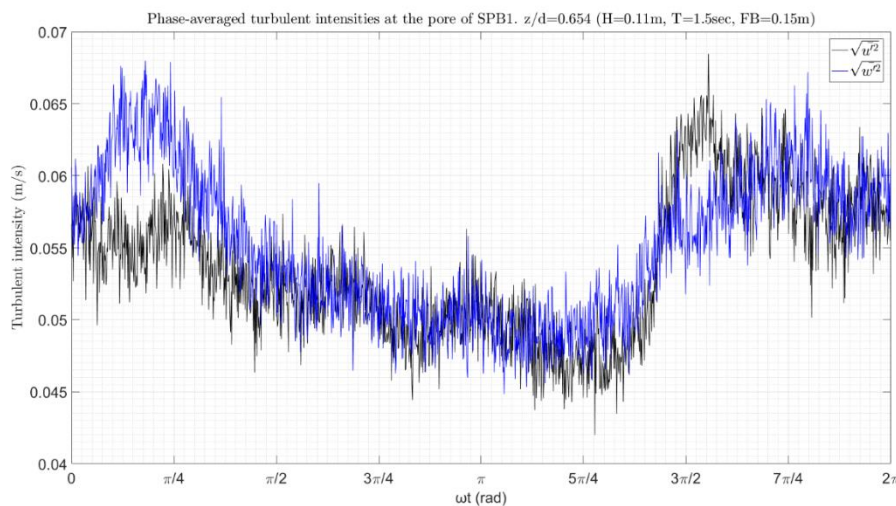
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής είναι 0.017m/s, της 2<sup>ης</sup> είναι 0.01m/s (58.8% της 1<sup>ης</sup>) και της 3<sup>ης</sup> είναι 0.005m/s (29.4% της 1<sup>ης</sup>).



Σχήμα 5.2.62 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.654, πόρος.

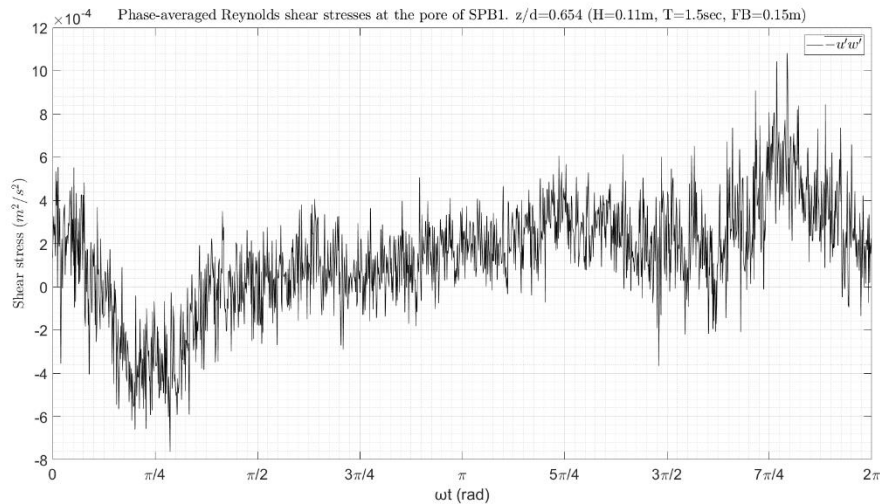
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.63. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων σχεδόν συμπίπτει σε όλη τη διάρκεια της κυματικής περιόδου με απόκλιση μόνο κάποιες μέγιστες τιμές κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στο διάστημα  $(0, \frac{\pi}{4})$ . Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.065m/s και της κατακόρυφης 0.068m/s.



Σχήμα 5.2.63 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.654, πόρος.

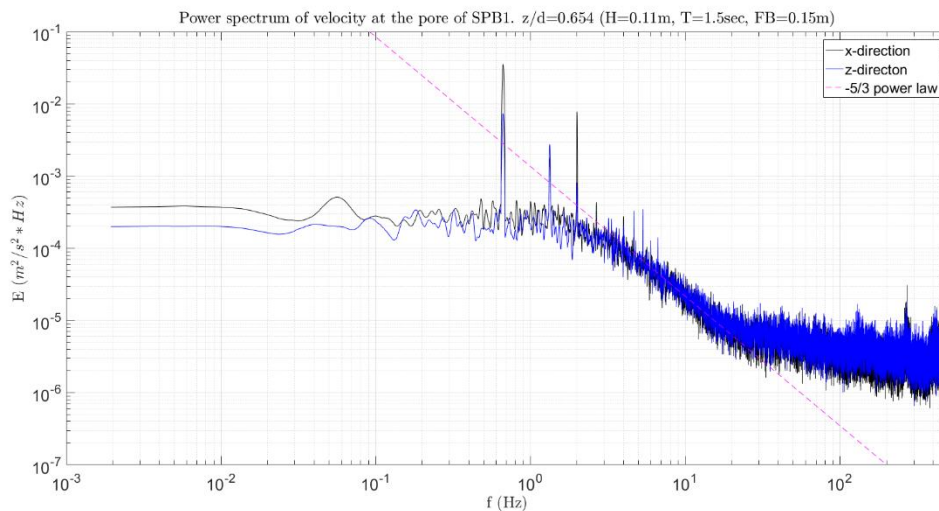
Στο Σχήμα 5.2.64 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο x-z. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $1.08 * 10^{-3} m^2/s^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-0.76 * 10^{-3} m^2/s^2$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.64 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο) επίπεδο. 1-R2, z/d=0.654, πόρος.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.65. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.035\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.007\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα (πρώτη αρμονική) σε υψηλότερες αρμονικές και στις δύο διευθύνσεις. Μια αξιόλογη παρατήρηση είναι ότι η διέγερση της τρίτης αρμονικής στη x διεύθυνση παρουσιάζει ενέργεια ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή της κύριας αρμονικής στη z διεύθυνση. Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 3\text{Hz}$  και  $f = 20\text{Hz}$ .



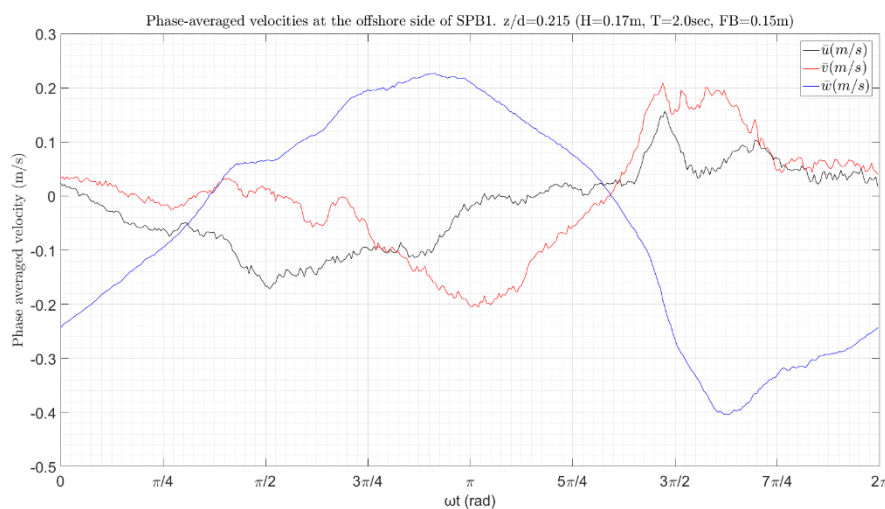
Σχήμα 5.2.65 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R2, z/d=0.654, πόρος.

### 5.2.3 Κυματικό σενάριο 1-R3

#### 5.2.3.1 Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά

##### 1. Σχετική θέση $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.2.66 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.17, 0.157] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.4, 0.22] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.21, 0.21] (m/s).



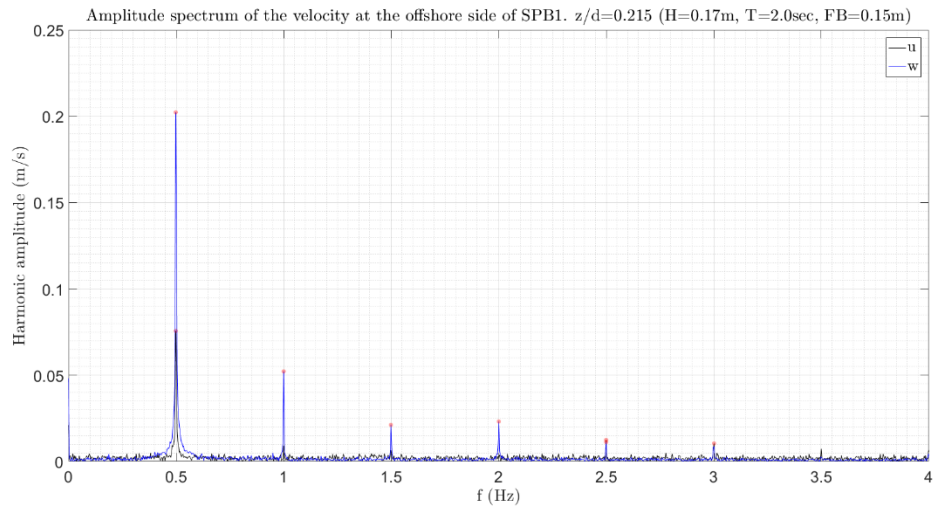
Σχήμα 5.2.66 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.67 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται στη κύρια συχνότητα ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) η οποία έχει πλάτος ταλάντωσης 0.076 m/s ενώ οι ανώτερες αρμονικές έχουν συγκριτικά αμελητέο πλάτος ταλάντωσης.

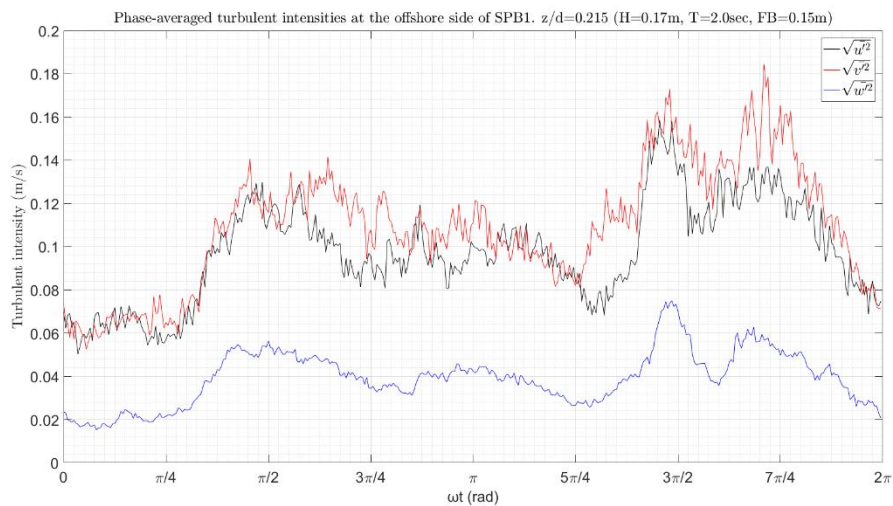
Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνει και αυτή αντίστοιχα σε πέντε συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι 0.2m/s, της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι 0.05m/s (25% της 1<sup>ης</sup>), της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι 0.02m/s (10% της 1<sup>ης</sup>), της 4<sup>ης</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) είναι 0.023m/s (11.5% της 1<sup>ης</sup>) και της 5<sup>ης</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ ) είναι 0.013m/s (6.5% της 1<sup>ης</sup>).

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.68. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.16 m/s και 0.18 m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.075 m/s.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.67 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R3, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.68 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.54 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-6.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Επίσης στο επίπεδο x-z η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $4.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

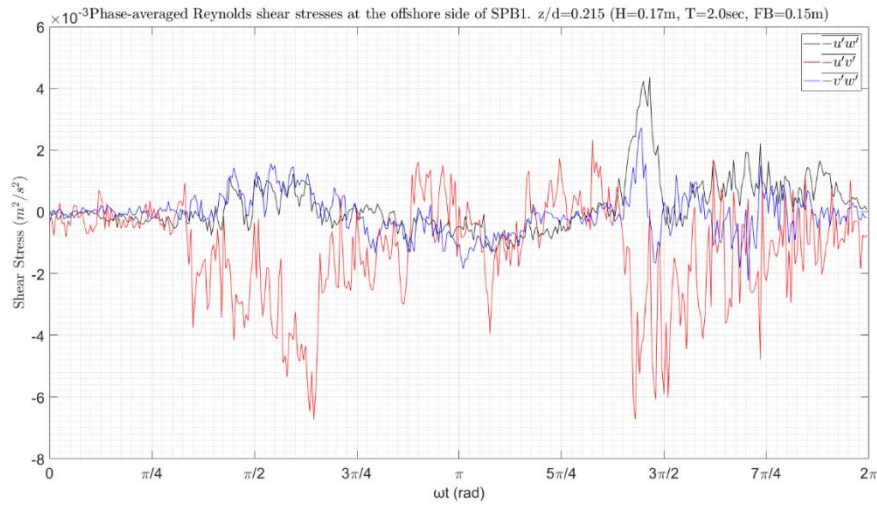
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.70. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.5 \text{ Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.14 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.17 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει

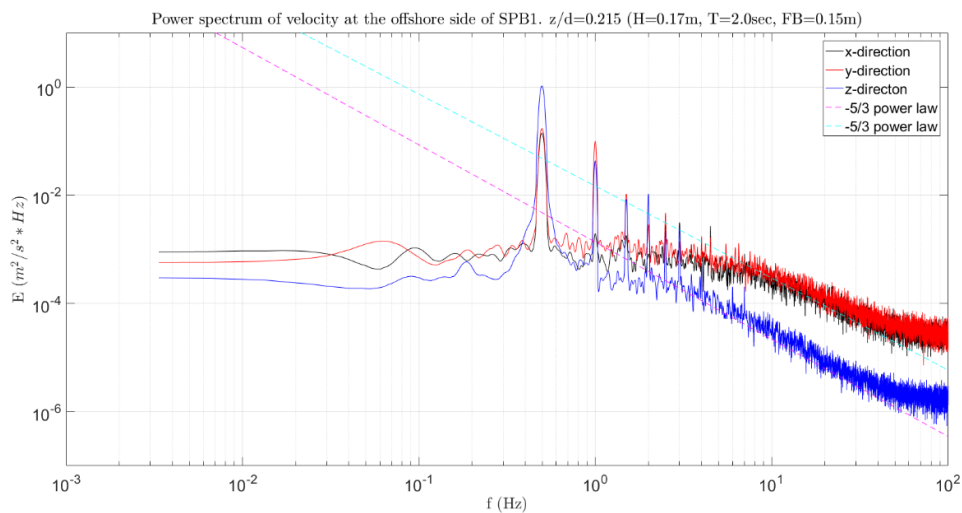


## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.2.69 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R3,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

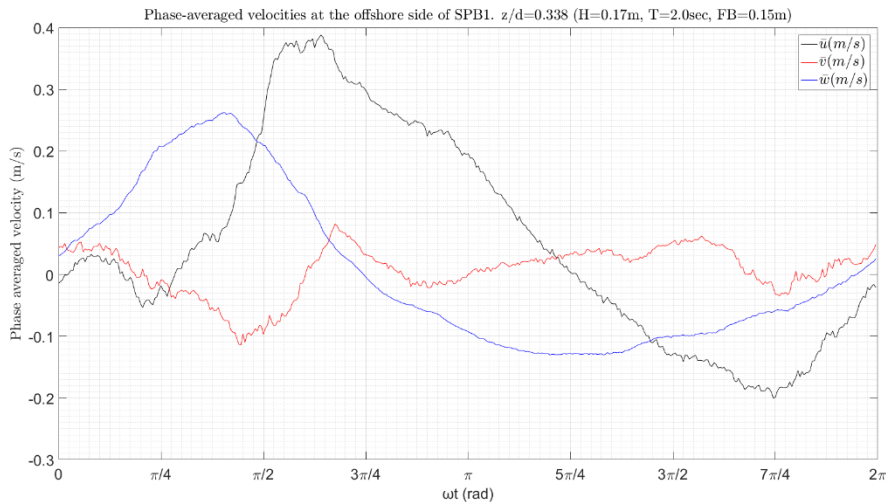


Σχήμα 5.2.70 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

### 2. Σχετική θέση $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.2.71 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.2, 0.39]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.13, 0.26]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.11, 0.08]$  (m/s).

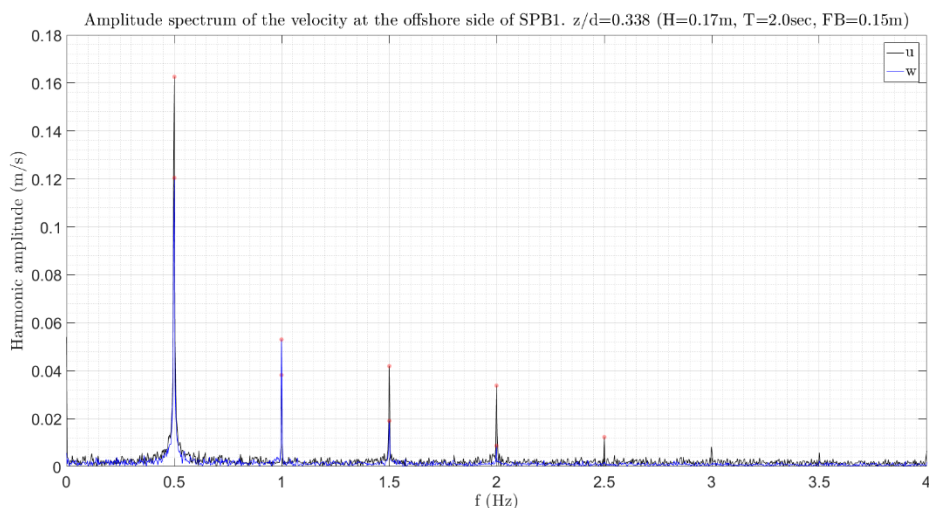
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.71 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.72 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται σε πέντε συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Η 1<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης,  $0.163\text{m/s}$ . Η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1\text{Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος  $0.04\text{m/s}$  (24.5% της 1<sup>ης</sup>), η 3<sup>η</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.042\text{m/s}$  (25.7% της 1<sup>ης</sup>), η 4<sup>η</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ )  $0.034\text{m/s}$  (20.9% της 1<sup>ης</sup>) και η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ )  $0.012\text{m/s}$  (7.4% της 1<sup>ης</sup>).

Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε τέσσερις συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.12\text{m/s}$ , της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι  $0.053\text{m/s}$  (44.2% της 1<sup>ης</sup>), της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.02\text{m/s}$  (16.6% της 1<sup>ης</sup>) και της 4<sup>ης</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) είναι  $0.009\text{m/s}$  (7.5% της 1<sup>ης</sup>).

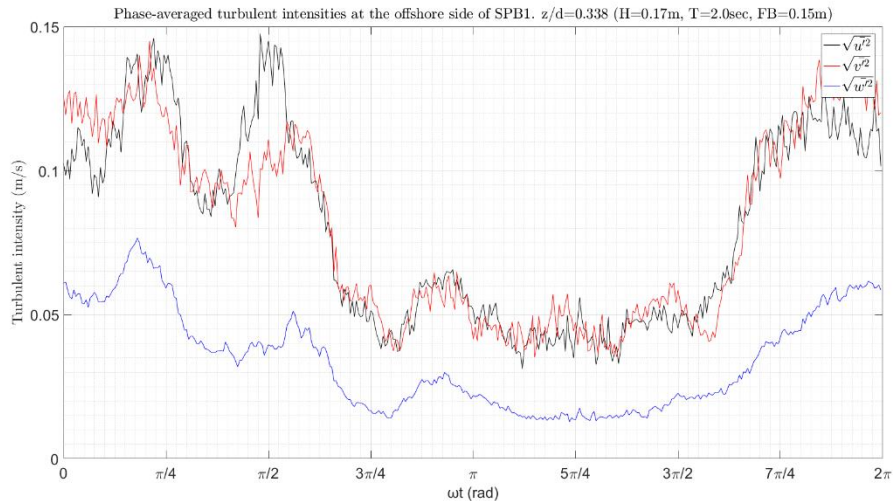


Σχήμα 5.2.72 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.73. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών

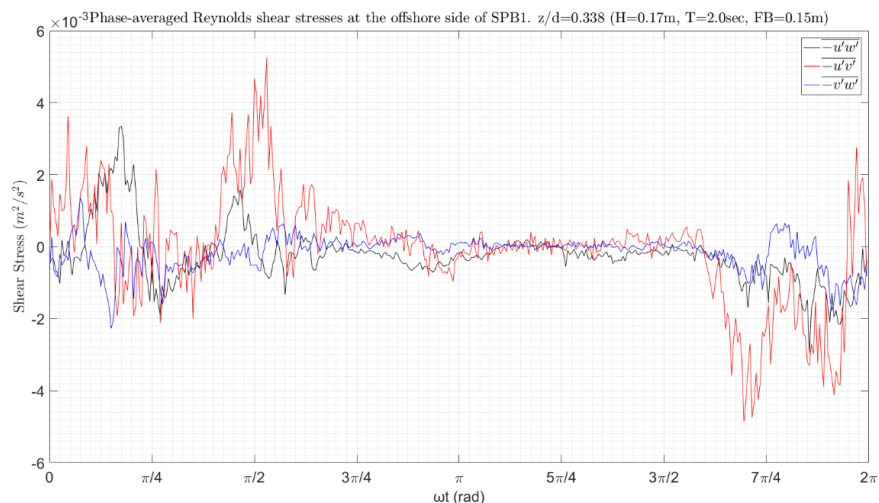
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.15 m/s και 0.145 m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.077 m/s.



Σχήμα 5.2.73 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.74 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο  $x$ - $y$  όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $5.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-4.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



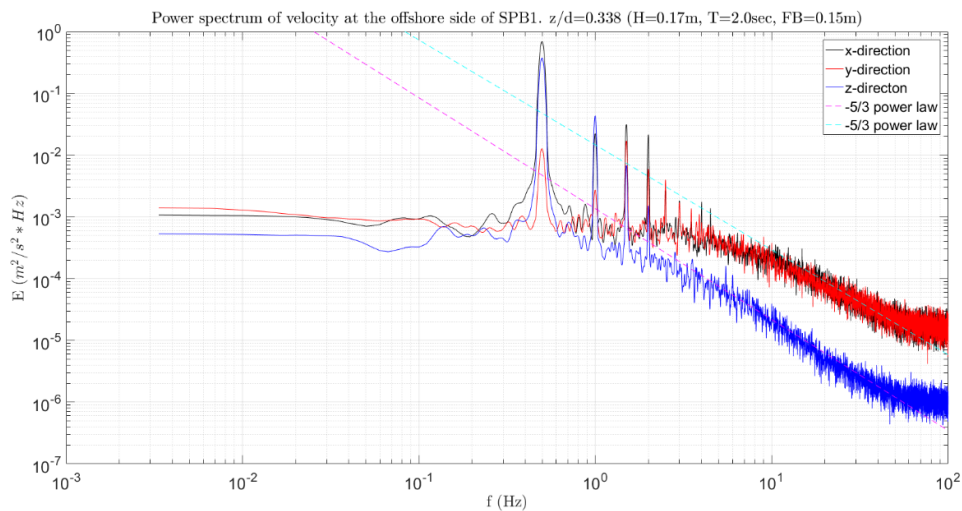
Σχήμα 5.2.74 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο),  $x$ - $y$  (κόκκινο) και  $y$ - $z$  (μπλε) επίπεδο. 1-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.75. Στα φάσματα ενέργειας της οριζόντιας και κατακόρυφης ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.5\text{Hz}$ . Για την εγκάρσια ταχύτητα το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας φαίνεται να μεταφέρεται από την 3<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα ( $f = 1.5\text{Hz}$ ). Και στα τρία φάσματα των

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.64 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη  $z$  είναι  $0.35 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.012 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 3\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 10\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.2.75 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

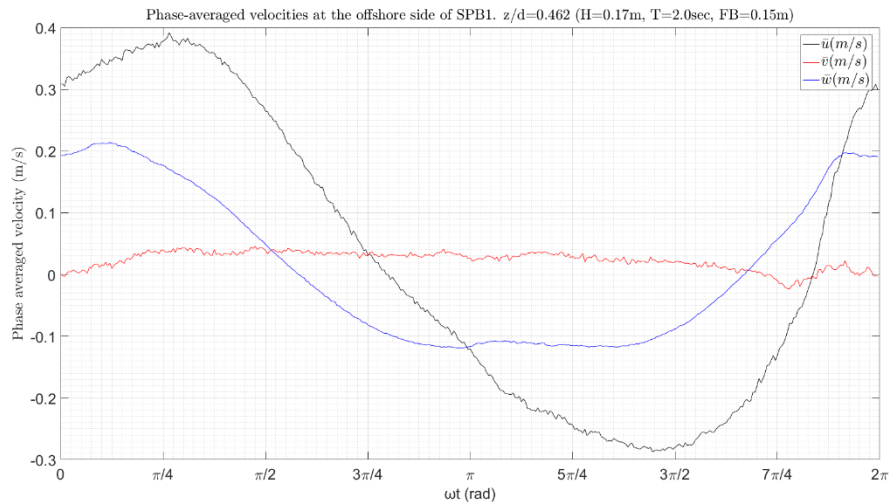
### 3. Σχετική θέση $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.2.76 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.29, 0.39]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.12, 0.21]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.02, 0.05]$  (m/s).

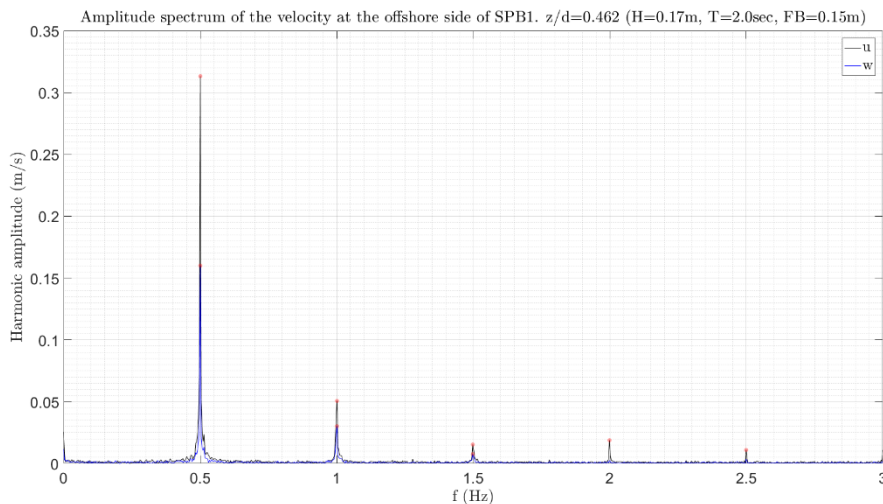
Στο Σχήμα 5.2.77 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται σε πέντε συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Η 1<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης,  $0.313\text{m/s}$ . Η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1\text{Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος  $0.05\text{m/s}$  (16% της 1<sup>ης</sup>), η 3<sup>η</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.015\text{m/s}$ , η 4<sup>η</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ )  $0.019\text{m/s}$  και η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ )  $0.011\text{m/s}$ .

Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.16\text{m/s}$ , της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι  $0.033\text{m/s}$  (20.6% της 1<sup>ης</sup>) και της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.008\text{m/s}$  (5% της 1<sup>ης</sup>).

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.76 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.



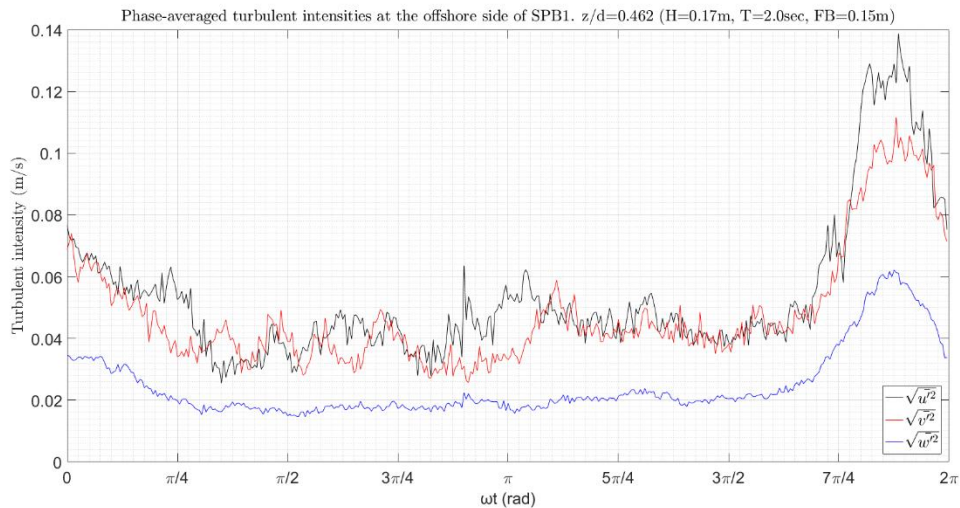
Σχήμα 5.2.77 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.78. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.14 m/s και 0.11 m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.062 m/s.

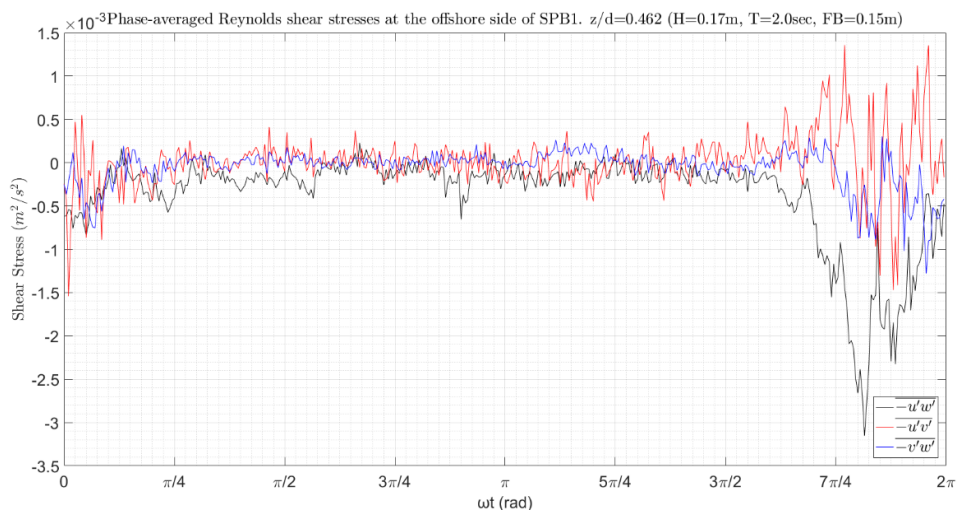
Στο Σχήμα 5.2.79 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες θετικές διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει τιμή  $1.36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική στο επίπεδο x-z όπου η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει τιμή  $-3.32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.78 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

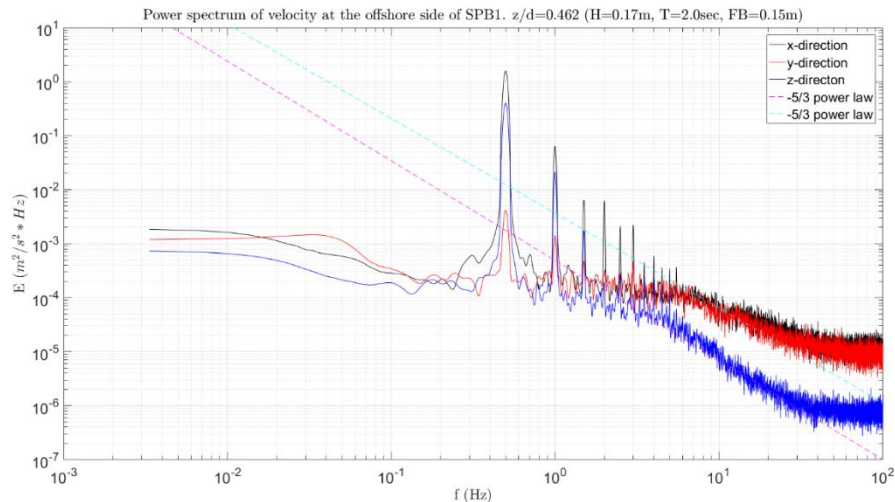


Σχήμα 5.2.79 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.80. Στα τρία φάσματα ενέργειας της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.5\text{Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $1.57\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη z είναι  $0.4\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.004\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται πιο έντονα για την κατακόρυφη ταχύτητα σε σύγκριση με τις άλλες δύο συνιστώσες όπου η κλίση του φάσματος είναι ηπιότερη από τη κλίση  $-5/3$ . Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 4\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$  περίπου.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

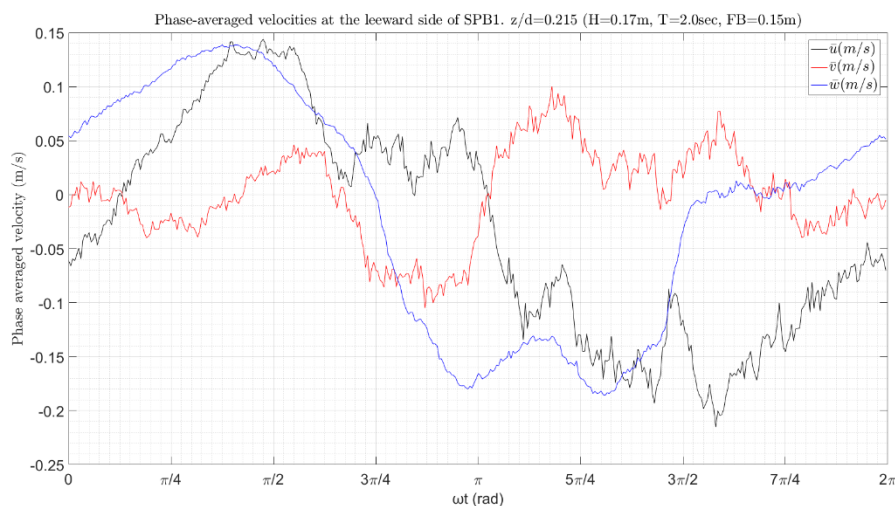


Σχήμα 5.2.80 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

### 5.2.3.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

#### 1. Σχετική θέση $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.2.81 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.22, 0.14]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.19, 0.14]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.1, 0.1]$  (m/s).



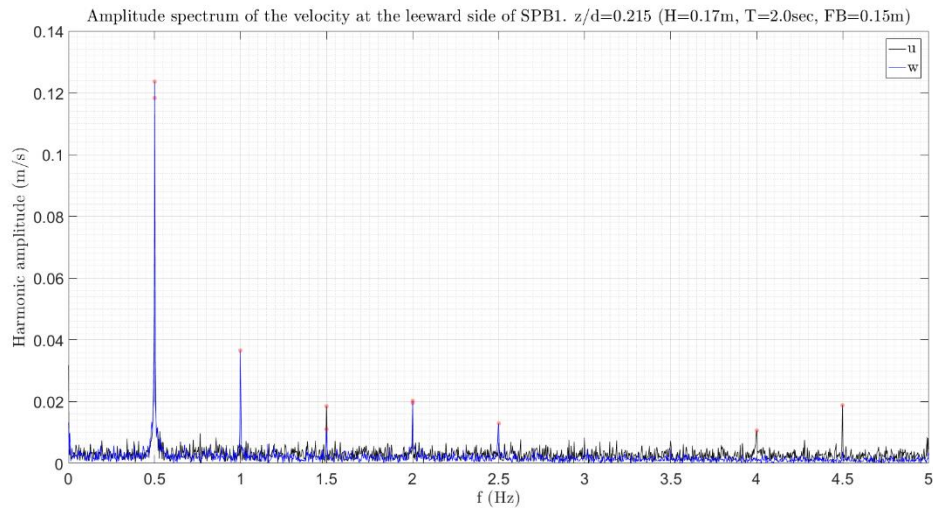
Σχήμα 5.2.81 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.82 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται στη συχνότητα  $f = 0.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.12m/s, στην  $f = 1.5\text{Hz}$  με



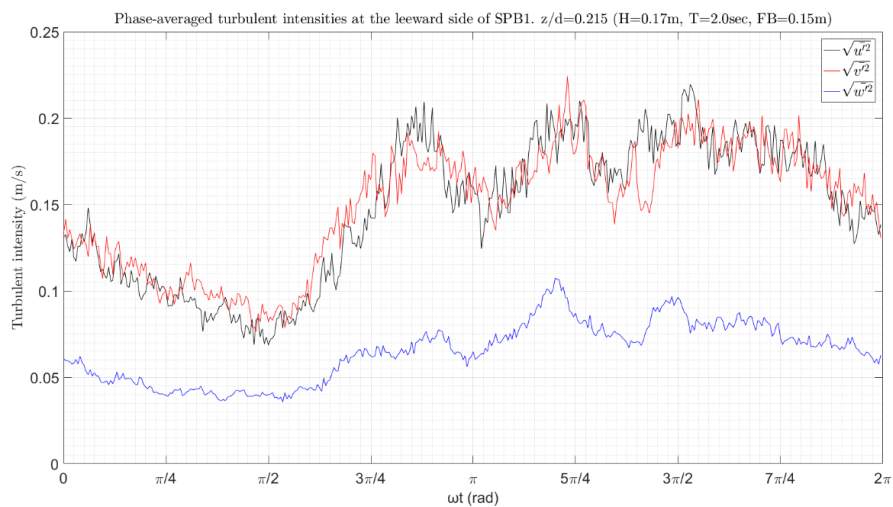
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

πλάτος 0.02m/s (16.7% της 1<sup>ης</sup>), στη συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$  με πλάτος 0.02m/s (16.7% της 1<sup>ης</sup>), στη συχνότητα  $f = 4\text{Hz}$  με πλάτος 0.01m/s και στη συχνότητα  $f = 4.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.02m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε πέντε συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι 0.12m/s, της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι 0.04m/s (33.3% της 1<sup>ης</sup>), της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι 0.01m/s, της 4<sup>ης</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) είναι 0.02m/s και της 5<sup>ης</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ ) είναι 0.01m/s.



Σχήμα 5.2.82 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

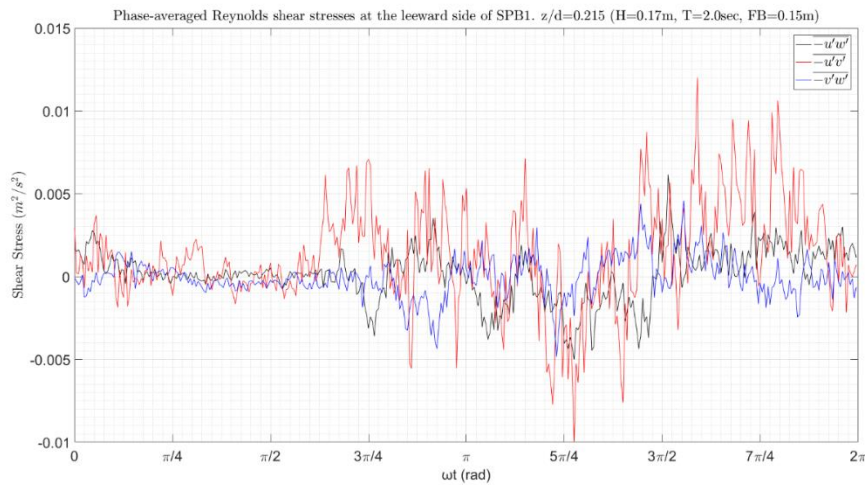
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.83. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.22 m/s ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.11 m/s.



Σχήμα 5.2.83 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

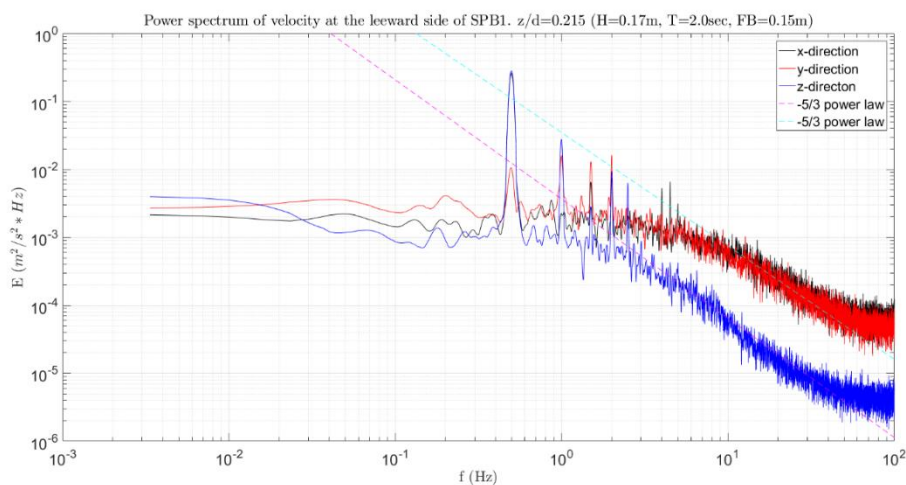
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Στο Σχήμα 5.2.84 δίνεται η μεταβολή των διαμηθικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διαμηθικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.0 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



Σχήμα 5.2.84 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμηθικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R3, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

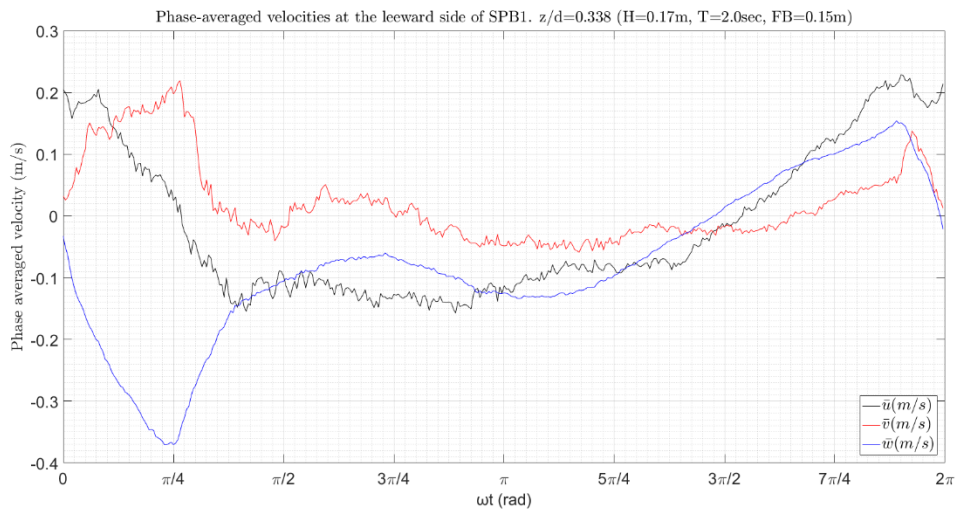
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.85. Στα φάσματα ενέργειας της οριζόντιας και κατακόρυφης ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.5 \text{ Hz}$  ενώ για την εγκάρσια διεύθυνση, οι τέσσερις πρώτες αρμονικές παρουσιάζουν περίπου το ίδιο ποσό ενέργειας. Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.26 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.28 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 40 \text{ Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 8 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 40 \text{ Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.2.85 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

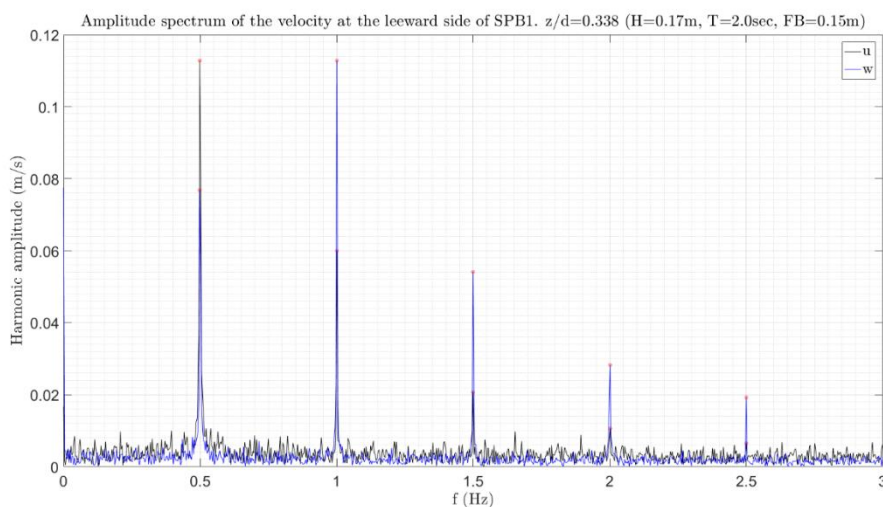
2. Σχετική θέση,  $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.2.86 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.16, 0.23] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.37, 0.15] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.06, 0.22] (m/s).



Σχήμα 5.2.86 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

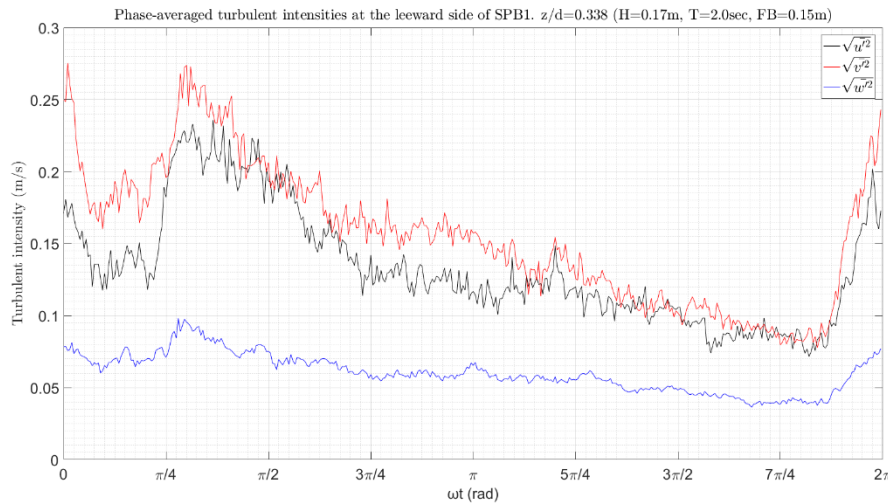
Στο Σχήμα 5.2.87 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται στη συχνότητα  $f = 0.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.11m/s, στην  $f = 1\text{Hz}$  με πλάτος 0.06m/s (54.5% της 1<sup>ης</sup>), στη συχνότητα  $f = 1.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.02m/s (18.2% της 1<sup>ης</sup>) και στη συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$  με πλάτος 0.01m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε πέντε συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι 0.08m/s, της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι 0.11m/s, της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι 0.05m/s, της 4<sup>ης</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) είναι 0.03m/s και της 5<sup>ης</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ ) είναι 0.02m/s.



Σχήμα 5.2.87 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

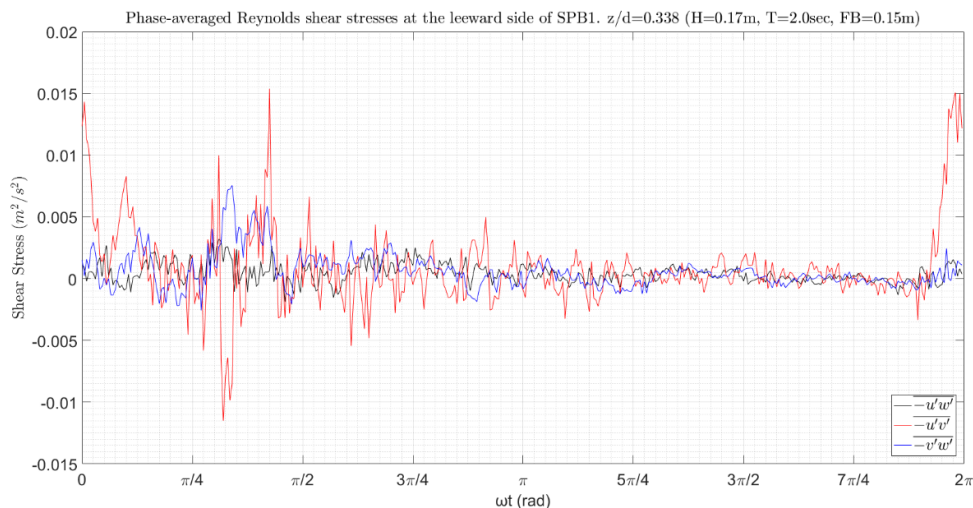
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.88. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.24 m/s και 0.28m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.1 m/s.



Σχήμα 5.2.88 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.99 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο  $x-y$  όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



Σχήμα 5.2.89 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x-z$  (μαύρο),  $x-y$  (κόκκινο) και  $y-z$  (μπλε) επίπεδο. 1-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

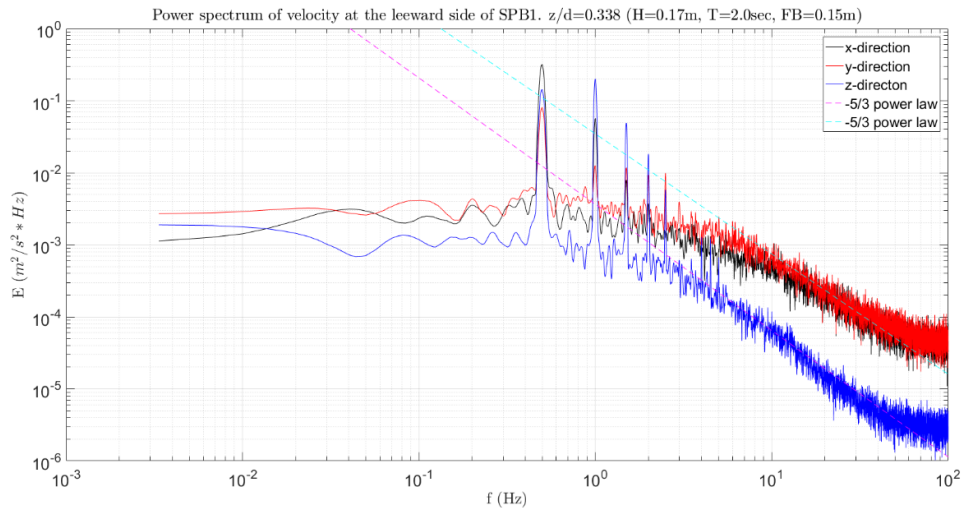
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.90. Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.32 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.14 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.08 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Η υψηλότερη ενέργεια για την κατακόρυφη ταχύτητα εμφανίζεται για συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$  με τιμή  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

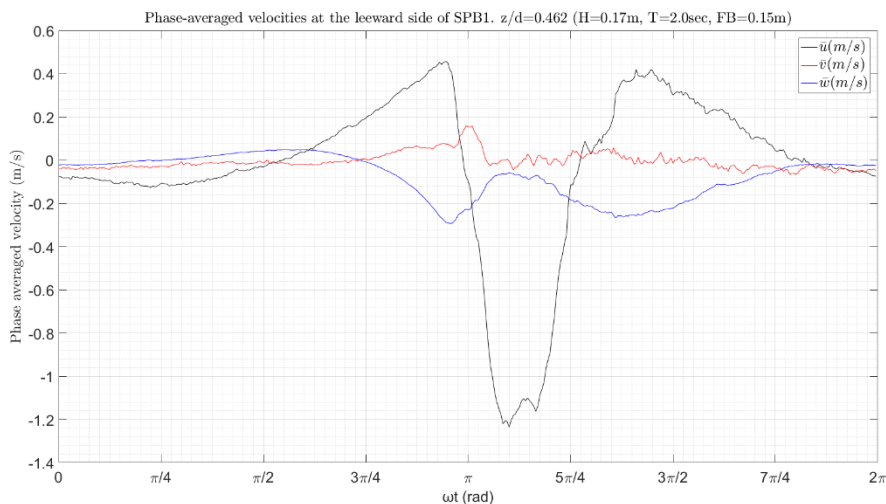
Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 8\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.2.90 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

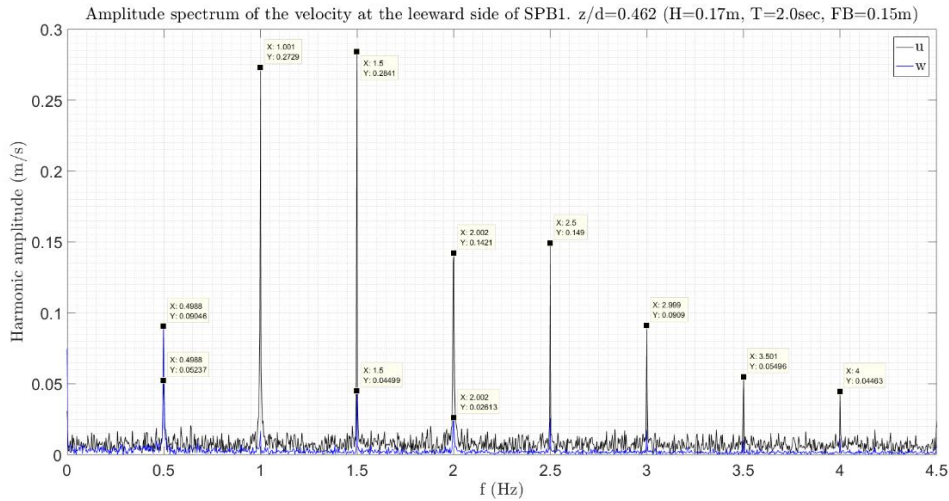
### 3. Σχετική θέση, $z/d = 0.462$ .

Λόγω χαμηλής ποιότητας των δεδομένων που ελήφθησαν στη θέση αυτή (βλ. Πίνακας 4.3.1) θα παρουσιαστούν συνοπτικά κάποια αποτελέσματα που εξήχθησαν αλλά χωρίς ιδιαίτερο σχολιασμό.

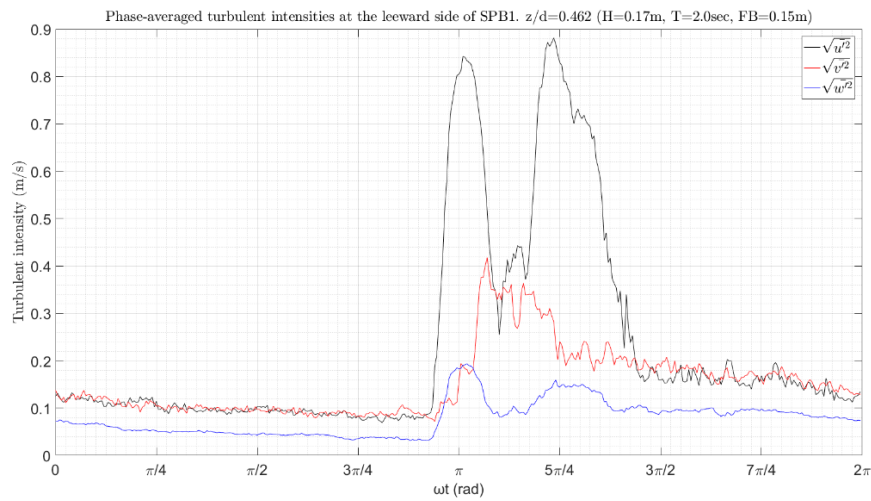


Σχήμα 5.2.91 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

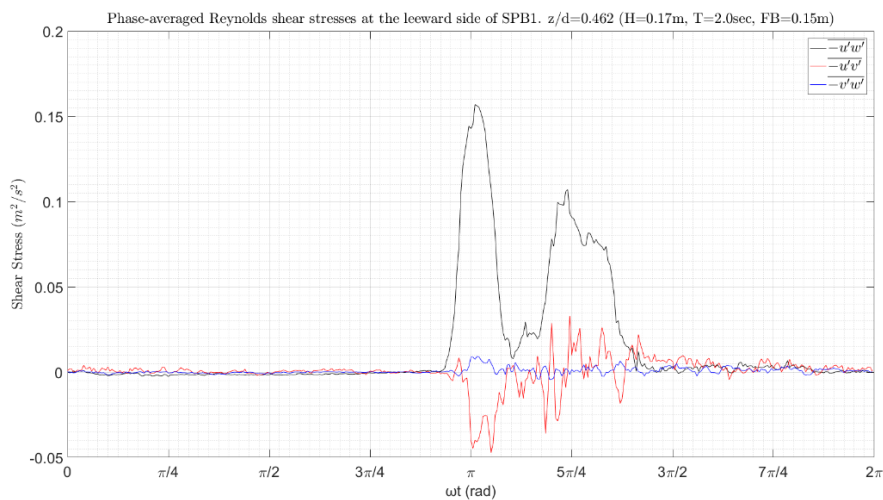
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.92 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά

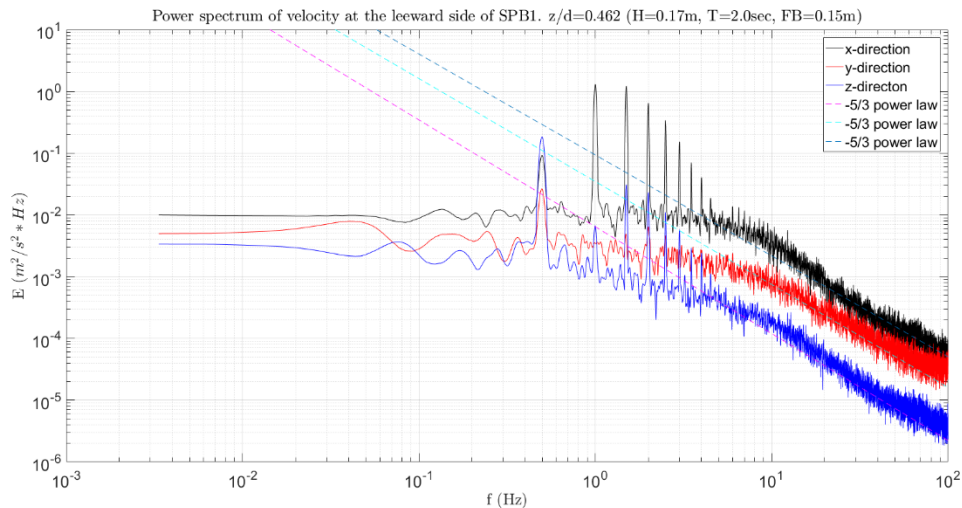


Σχήμα 5.2.93 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.94 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο),  $x$ - $y$  (κόκκινο) και  $y$ - $z$  (μπλε) επίπεδο. 1-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.95 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

### 5.2.3.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή.

#### 1. Στέψη, σχετική θέση $z/d = 0.769$ .

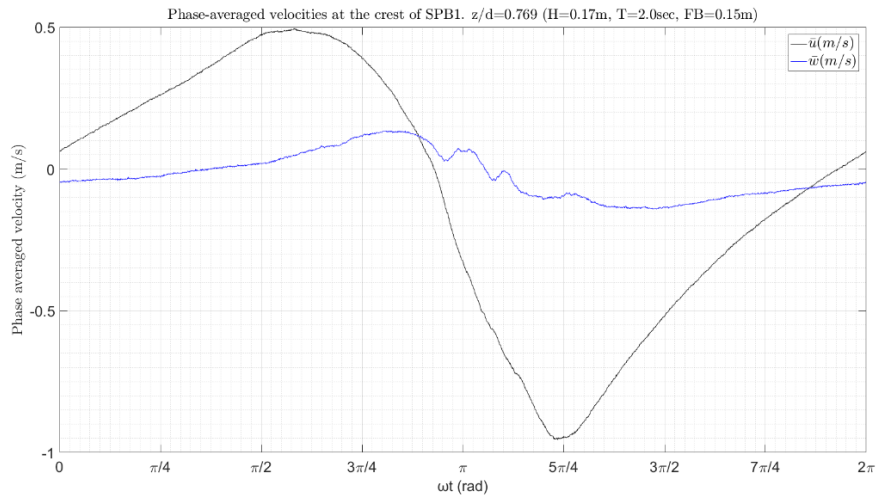
Στο Σχήμα 5.2.96 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.95, 0.5]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.14, 0.13]$  (m/s).

Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.97. Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν η πρώτη και η δεύτερη αρμονική συνιστώσα με την τρίτη και την τέταρτη αρμονική να είναι παρατηρήσιμες στο σχήμα αλλά με αρκετά μικρότερο αρμονικό πλάτος. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.54 m/s, η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1\text{Hz}$ ) 0.16 m/s (29.6% της 1<sup>ης</sup>), η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.05m/s (9.2% της 1<sup>ης</sup>) και η 4<sup>η</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος 0.02m/s. Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται οι δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες, με συχνότητες  $f = 0.5\text{Hz}$  και  $f = 1\text{Hz}$ , και με πλάτη ταλάντωσης 0.09 m/s και 0.04 m/s (44.4% της 1<sup>ης</sup>) αντίστοιχα.

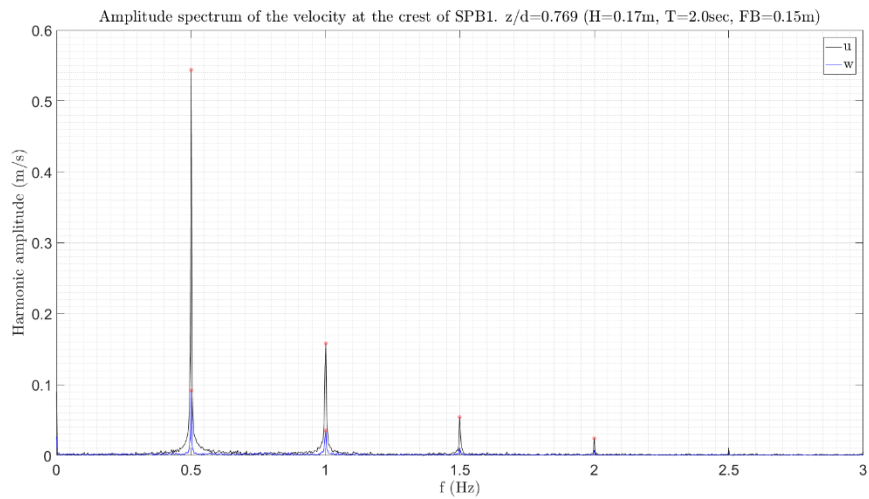
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.98. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερη στην οριζόντια (μαύρο) απ' ό τι στη κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση, αλλά στο μεγαλύτερο μέρος της κυματικής περιόδου συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.135m/s και της κατακόρυφης 0.11 m/s.



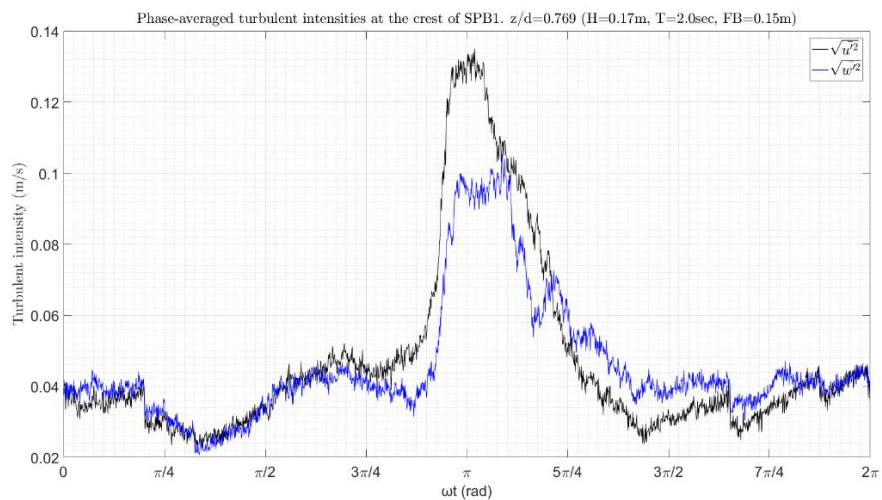
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.96 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.



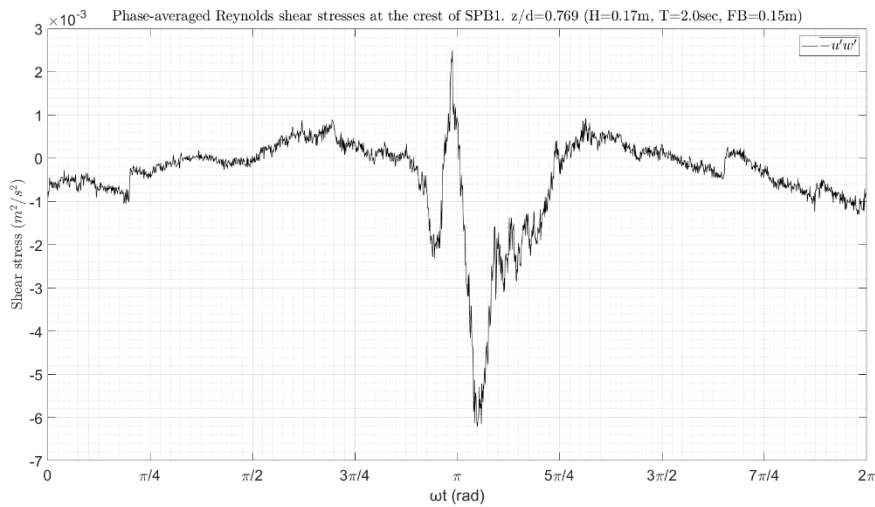
Σχήμα 5.2.97 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.



Σχήμα 5.2.98 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

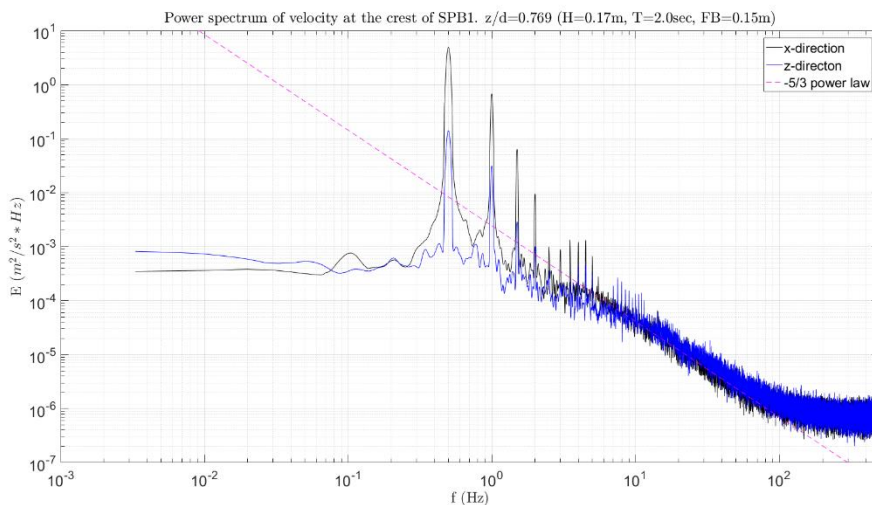
Στο Σχήμα 5.2.99 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο x-z. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-6.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



Σχήμα 5.2.99 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο) επίπεδο. 1-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.100. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται αιχμή στη κύρια συχνότητα των κυματισμών,  $f = 0.5\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $4.62 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.14 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα σε υψηλότερες αρμονικές. Από τη μεταφορά αυτή σημαντική ενέργεια παρατηρείται στις περιοδικές κινήσεις με συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$ , όπου η οριζόντια και η κατακόρυφη ταχύτητα παρουσιάζουν τιμές  $0.68 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και  $0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

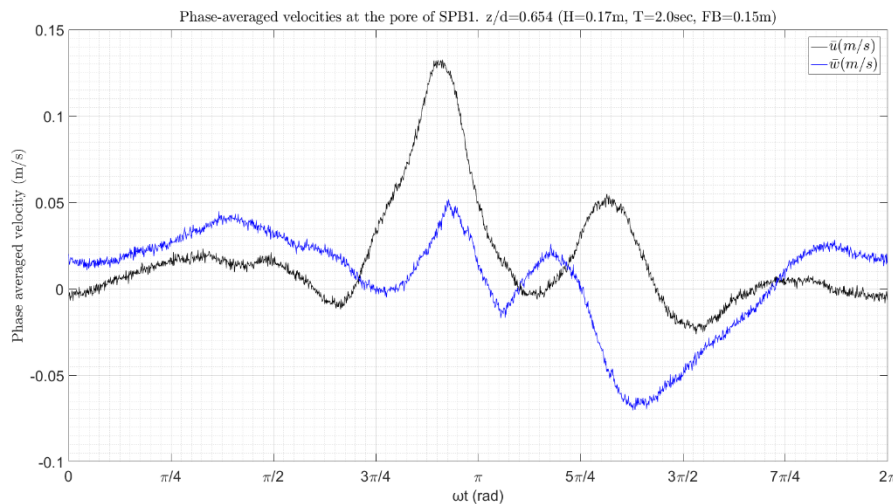
Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 6\text{Hz}$  και  $f = 70\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.2.100 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.

2. Πόρος, σχετική θέση  $z/d = 0.654$ .

Στο Σχήμα 5.2.101 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.03, 0.13] (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.07, 0.05] (m/s).



Σχήμα 5.2.101 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.

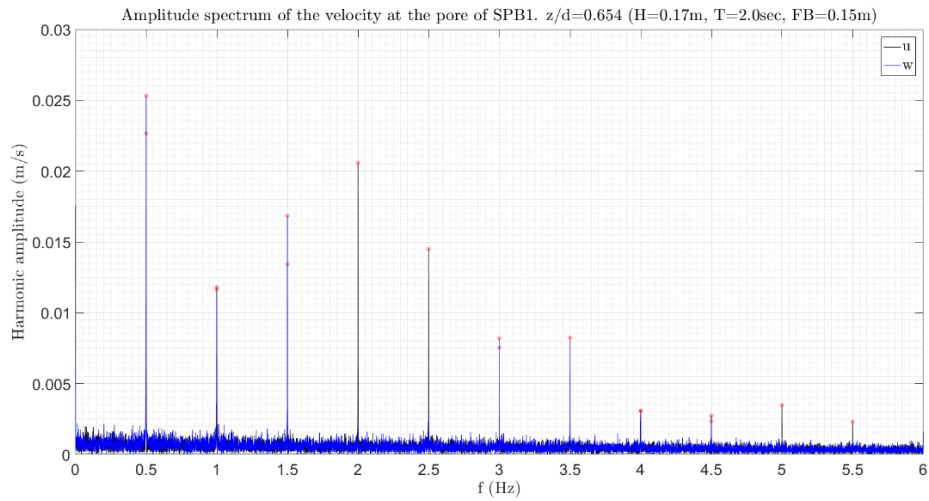
Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.102. Αυτό που παρατηρείται αρχικά, είναι τα σημαντικά πλάτη ταλάντωσης που παρουσιάζουν οι υψηλότερες αρμονικές, τόσο για την οριζόντια όσο και για τη κατακόρυφη ταχύτητα.

Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν οι πέντε πρώτες αρμονικές συνιστώσες και για την κατακόρυφη οι τρεις πρώτες. Εμφανείς είναι ακόμα αρκετές ακόμα υψηλότερες αρμονικές αλλά με μικρότερο πλάτος. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.5Hz$ ) έχει πλάτος 0.023m/s, η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1Hz$ ) 0.012m/s (52.2% της 1<sup>ης</sup>), η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.5Hz$ ) έχει πλάτος 0.013m/s (56.5% της 1<sup>ης</sup>), η 4<sup>η</sup> ( $f = 2Hz$ ) παρουσιάζει πλάτος 0.021m/s (91.3% της 1<sup>ης</sup>) και η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.5Hz$ ) έχει πλάτος 0.015m/s (65.2% της 1<sup>ης</sup>). Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα, στη συχνότητα  $f = 0.5Hz$  παρατηρείται πλάτος 0.025m/s, στη συχνότητα  $f = 1Hz$  έχουμε πλάτος 0.012m/s (48% της 1<sup>ης</sup>) και για  $f = 1.5Hz$  παρουσιάζεται πλάτος 0.017m/s (68% της 1<sup>ης</sup>).

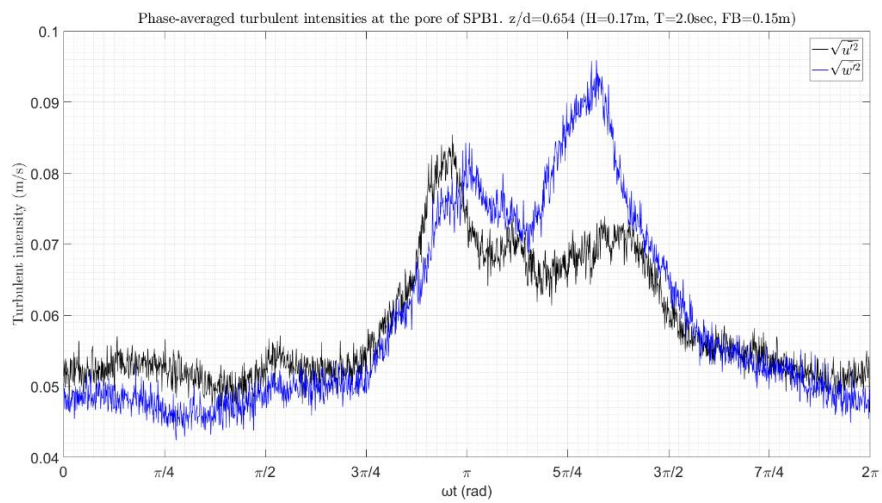
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.103. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερη στη κατακόρυφη (μπλε) απ' ότι στην οριζόντια (μαύρο) διεύθυνση, ωστόσο στο μεγαλύτερο μέρος της κυματικής περιόδου οι τυρβώδεις εντάσεις συμπίπτουν σε μεγάλο βαθμό. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.085m/s και της κατακόρυφης 0.096 m/s.

Στο Σχήμα 5.2.104 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x-z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $1.1 * 10^{-3} m^2/s^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-1.3 * 10^{-3} m^2/s^2$ .

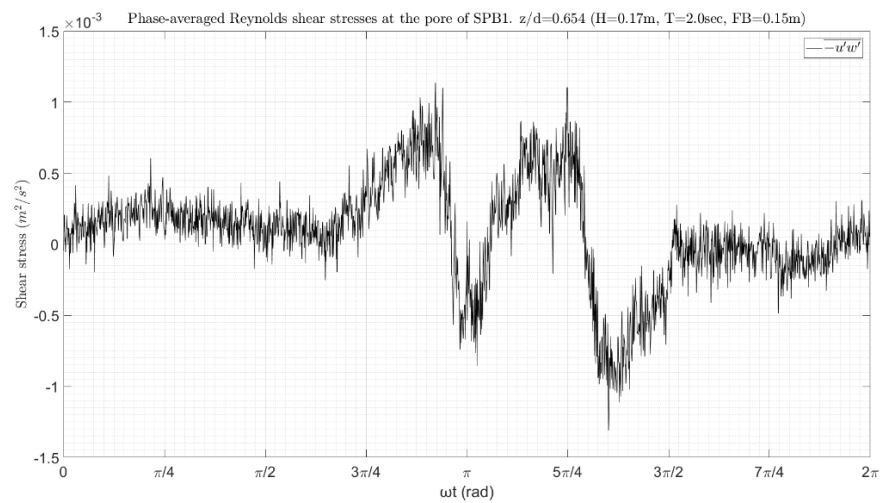
Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.102 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.



Σχήμα 5.2.103 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.

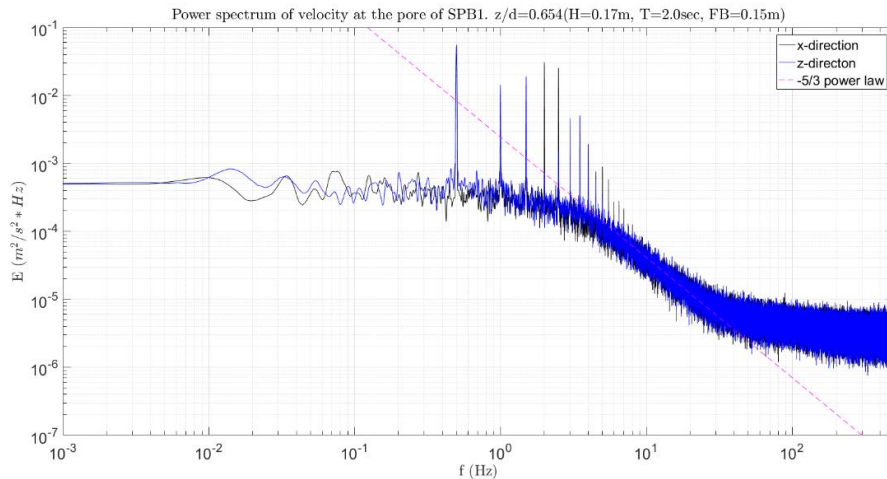


Σχήμα 5.2.104 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 1-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.105. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται αιχμή στη κύρια συχνότητα των κυματισμών,  $f = 0.5\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.06 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα σε υψηλότερες αρμονικές.

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κοιμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 4\text{Hz}$  και  $f = 30\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.2.105 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.

### 5.2.4 Κυματικό σενάριο 1-R4

#### 5.2.4.1 Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά

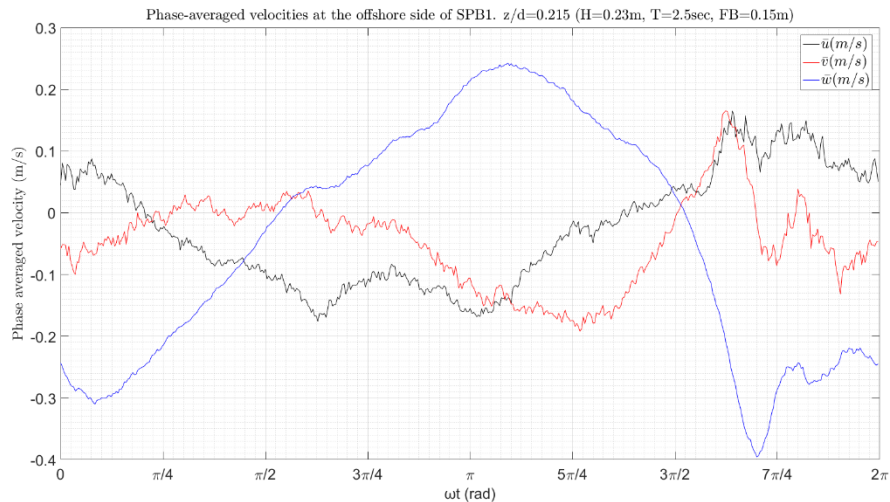
##### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.2.106 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.18, 0.17]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.4, 0.24]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.19, 0.17]$  (m/s).

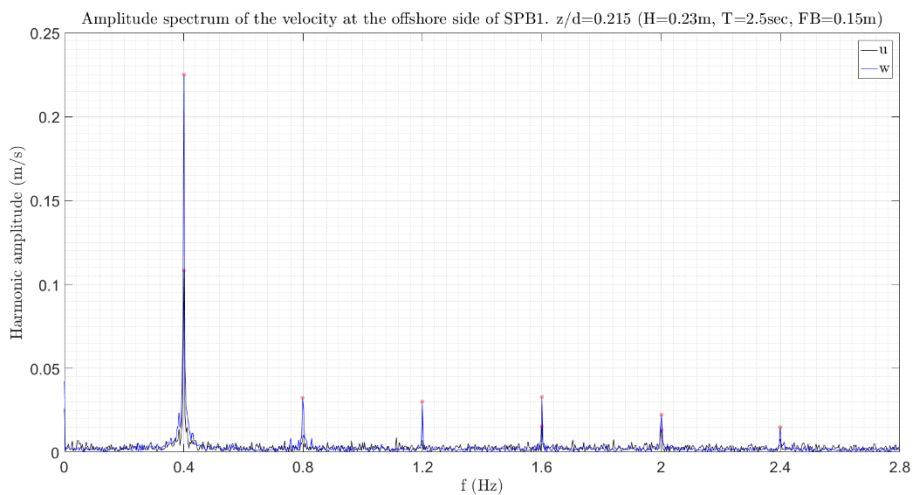
Στο Σχήμα 5.2.107 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται κυρίως στη συχνότητα  $f = 0.4\text{Hz}$  με πλάτος  $0.11\text{m/s}$ , με τις ανώτερες αρμονικές να εκδηλώνονται αλλά με αρκετά μικρότερο πλάτος. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε έξι συνολικά αρμονικές συνιστώσες με το σημαντικότερο πλάτος,  $0.225\text{m/s}$ , να παρουσιάζεται για  $f = 0.4\text{Hz}$ . Οι αρμονικές που αναπτύσσονται έχουν πλάτος μικρότερο από 10% της κύριας.



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.106 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

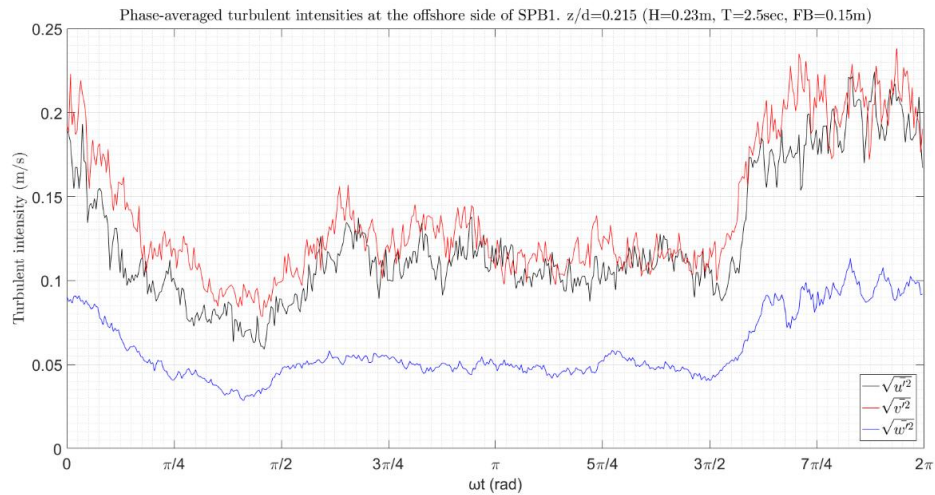


Σχήμα 5.2.107 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

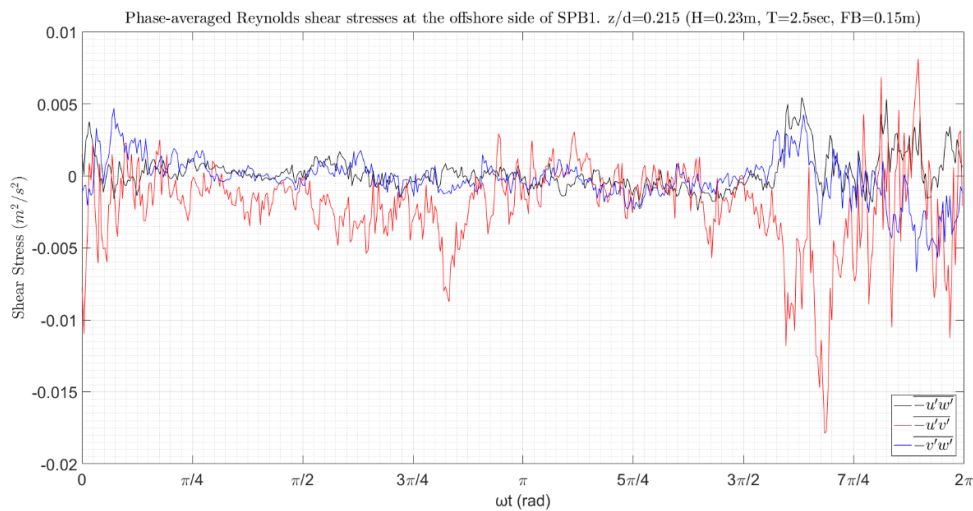
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.108. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι αρκετά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.22 m/s και 0.24m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.11 m/s.

Στο Σχήμα 5.2.109 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $8.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-17.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.108 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.



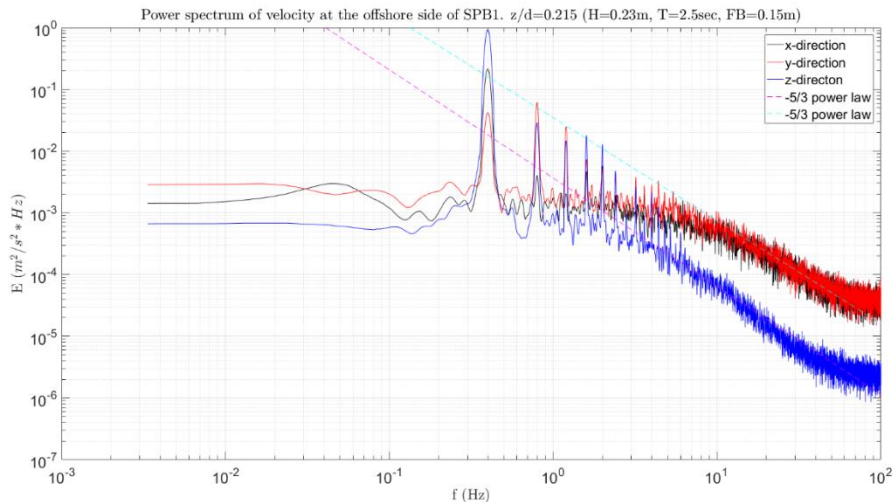
Σχήμα 5.2.109 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο),  $x$ - $y$  (κόκκινο) και  $y$ - $z$  (μπλε) επίπεδο. 1-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.110. Σημαντική μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές παρουσιάζουν η κατακόρυφη και εγκάρσια ταχύτητα. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.22 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη  $z$  είναι  $0.93 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 3\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 10\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$  περίπου.



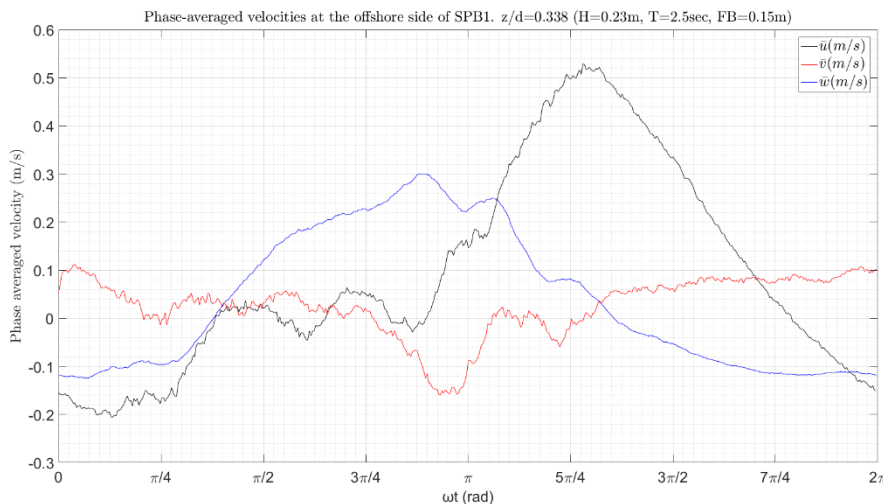
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.110 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.2.111 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.21, 0.53]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.12, 0.3]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.16, 0.11]$  (m/s).

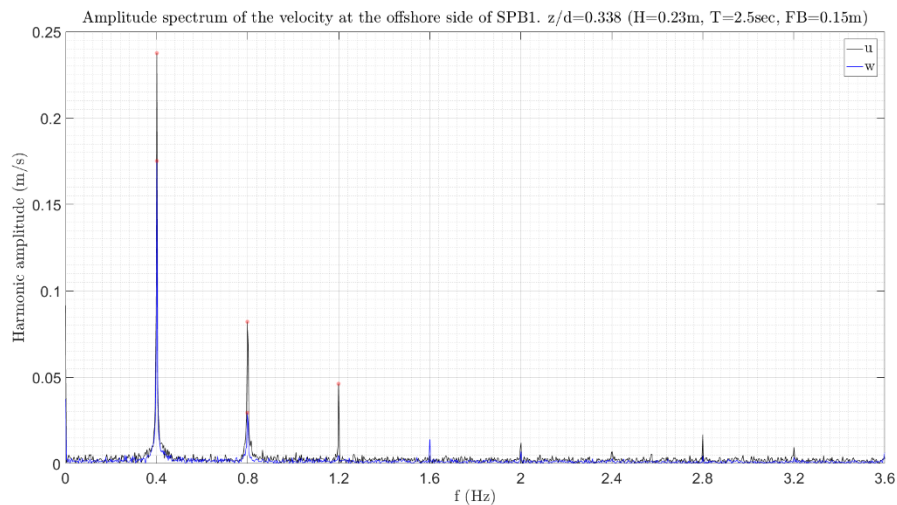


Σχήμα 5.2.111 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.112 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται κυρίως στις τρεις πρώτες αρμονικές συνιστώσες ενώ για την κατακόρυφη στις δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες. Πιο συγκεκριμένα η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.24m/s, 0.08m/s (33.8% της 1<sup>ης</sup>) και 0.05m/s (20.8% της 1<sup>ης</sup>) για

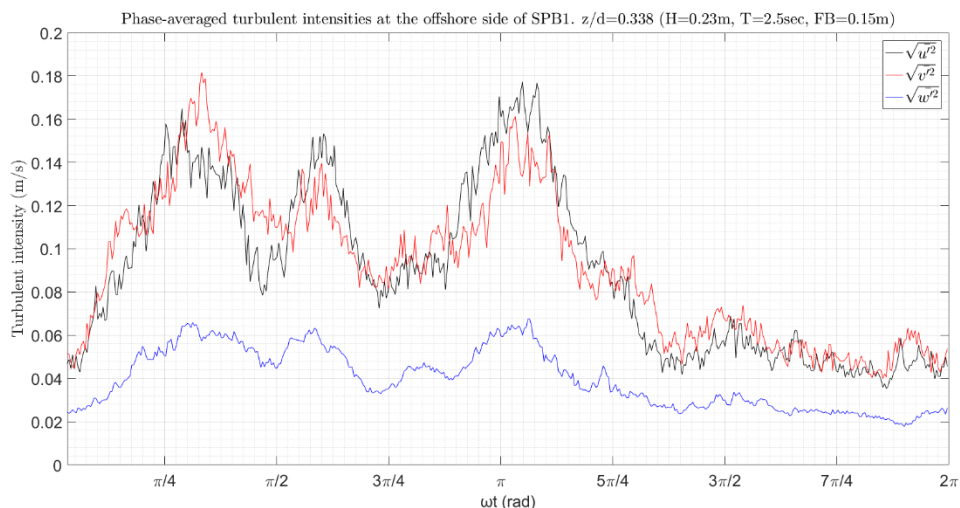
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

0.4Hz, 0.8Hz και 1.2Hz αντίστοιχα. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz, 0.8Hz, πλάτη ταλάντωσης 0.18m/s και 0.03m/s (16.7% της  $1^{\eta\epsilon}$ ) αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2.112 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

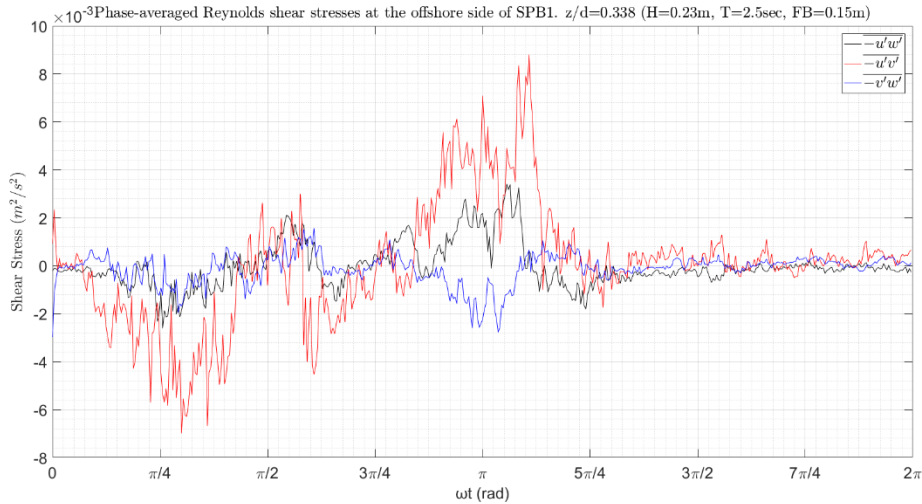
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.113. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι αρκετά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.18 m/s ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.07 m/s.



Σχήμα 5.2.113 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.114 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $8.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-7.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

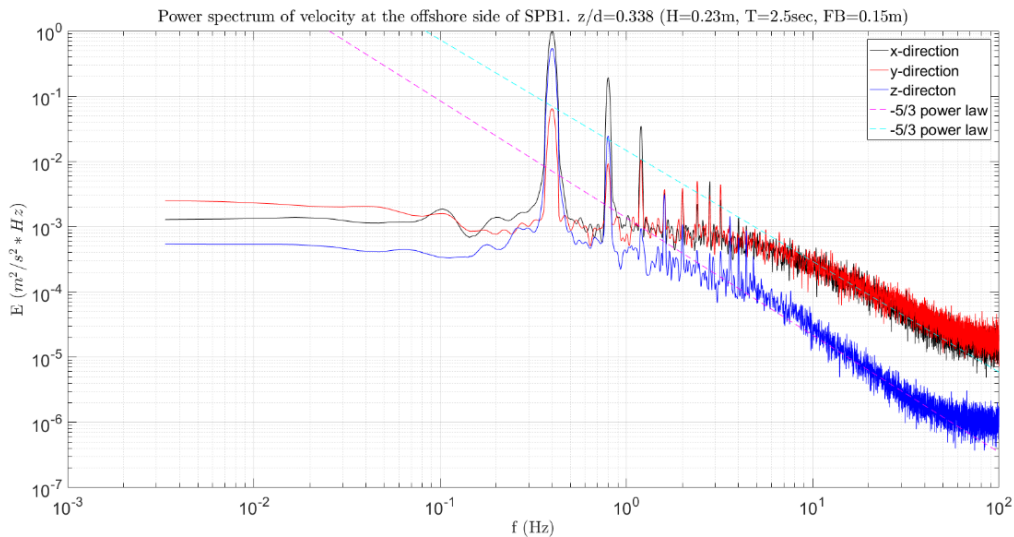
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.114 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμηθικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R4, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.115. Σημαντική μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές παρουσιάζουν και οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $1.0\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.54\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.06\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδραειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδραειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 5\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 8\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$  περίπου.

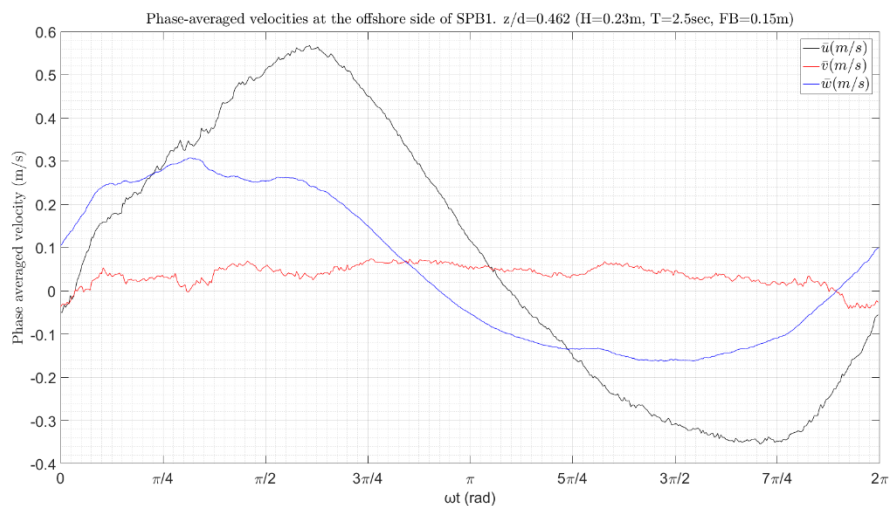


Σχήμα 5.2.115 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

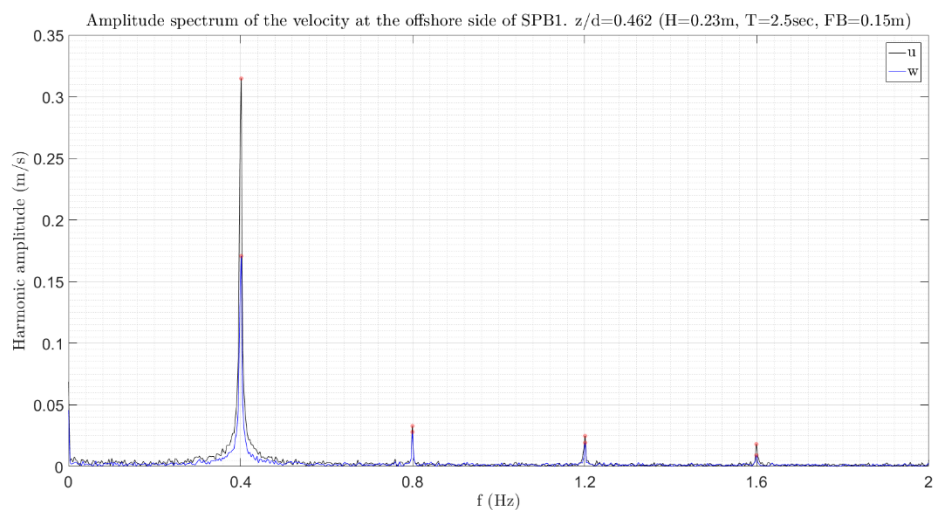
3. Σχετική θέση,  $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.2.116 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.36, 0.57]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.16, 0.31]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.04, 0.07]$  (m/s).

Στο Σχήμα 5.2.117 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια και τη κατακόρυφη ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται κυρίως στη πρώτη αρμονική συνιστώσα, ωστόσο είναι εμφανής η παραγωγή ανωτέρων αρμονικών. Πιο συγκεκριμένα η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.31m/s, 0.03m/s (9.6% της 1<sup>ης</sup>), 0.025m/s και 0.018m/s για 0.4Hz, 0.8Hz, 1.2Hz και 1.6Hz αντίστοιχα. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz, 0.8Hz και 1.2Hz πλάτη ταλάντωσης 0.17m/s, 0.03m/s (17.6% της 1<sup>ης</sup>) και 0.02m/s αντίστοιχα.



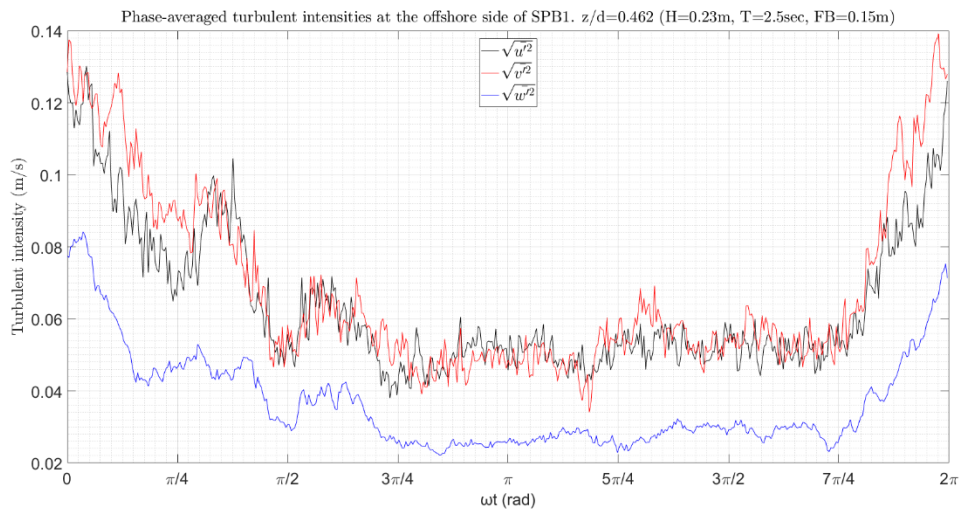
Σχήμα 5.2.116 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.117 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

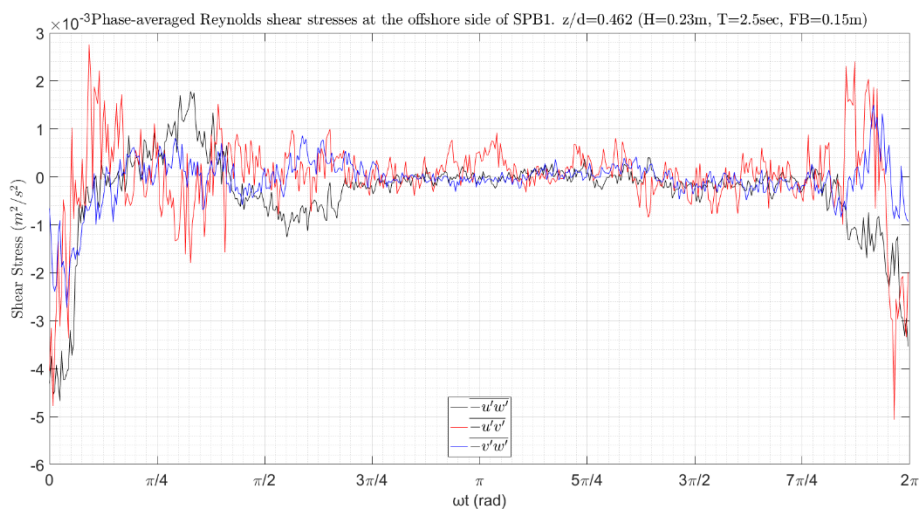
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.118. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.13 m/s 0.14m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.08 m/s.



Σχήμα 5.2.118 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.119 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Η διατμητική τάση  $-u'v'$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο  $x$ - $y$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.8 * 10^{-3} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-5.0 * 10^{-3} m^2/s^2$ . Η διατμητική τάση  $-u'w'$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο  $x$ - $z$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.8 * 10^{-3} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-4.7 * 10^{-3} m^2/s^2$ .



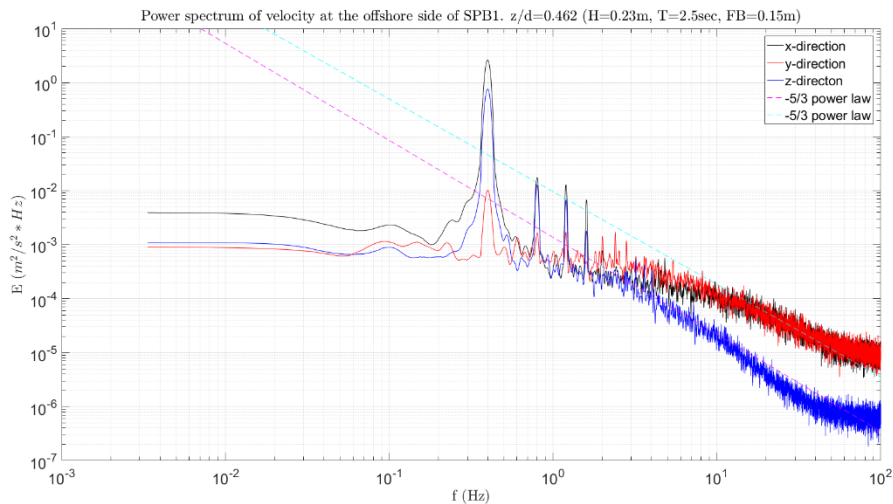
Σχήμα 5.2.119 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο),  $x$ - $y$  (κόκκινο) και  $y$ - $z$  (μπλε) επίπεδο. 1-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.120. Σημαντική μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές παρουσιάζουν και οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $2.6\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη  $z$  είναι  $0.75\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.01\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 3\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 10\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.2.120 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

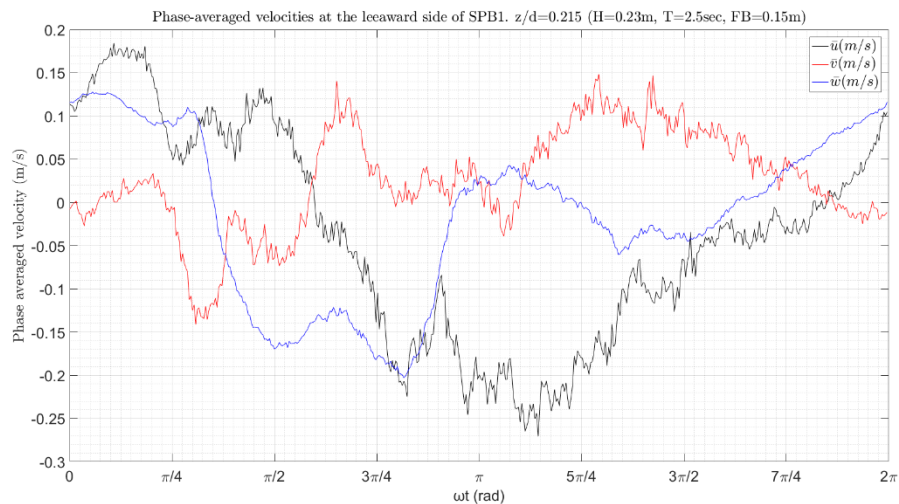
### 5.2.4.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

#### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

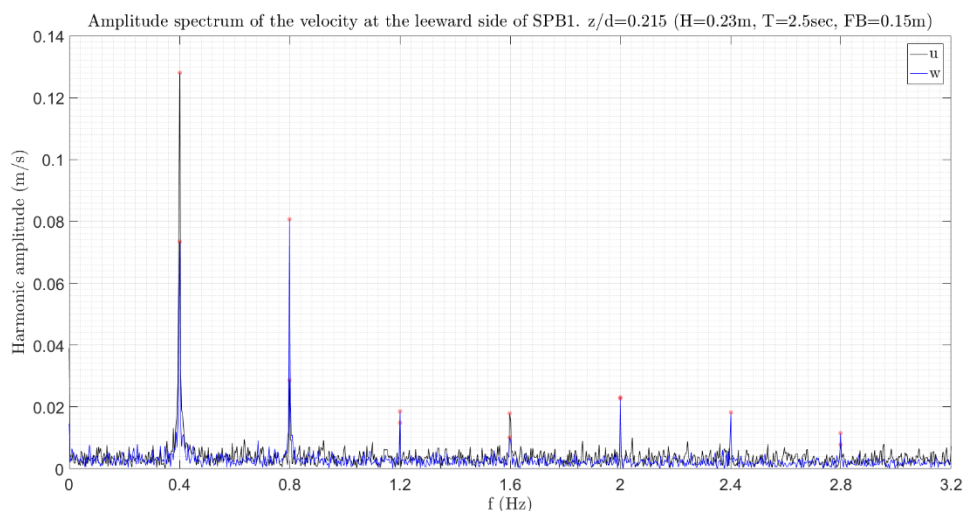
Στο Σχήμα 5.2.121 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.27, 0.18]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.2, 0.13]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.14, 0.15]$  (m/s).

Στο Σχήμα 5.2.122 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης  $0.13\text{m/s}$ ,  $0.03\text{m/s}$  (23% της  $1^{ns}$ ),  $0.015\text{m/s}$ ,  $0.018\text{m/s}$  και  $0.023\text{m/s}$  για  $0.4\text{Hz}$ ,  $0.8\text{Hz}$ ,  $1.2\text{Hz}$ ,  $1.6\text{Hz}$   $2.0\text{Hz}$  αντίστοιχα. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες  $0.4\text{Hz}$  και  $0.8\text{Hz}$  πλάτη ταλάντωσης  $0.07\text{m/s}$  και  $0.08\text{m/s}$  (114% της  $1^{ns}$ ) αντίστοιχα και για αρμονικές συχνότητες από  $1.2\text{Hz}$  μέχρι  $2.4\text{Hz}$  πλάτος  $0.02\text{m/s}$  (28.6% της  $1^{ns}$ ).

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.121 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



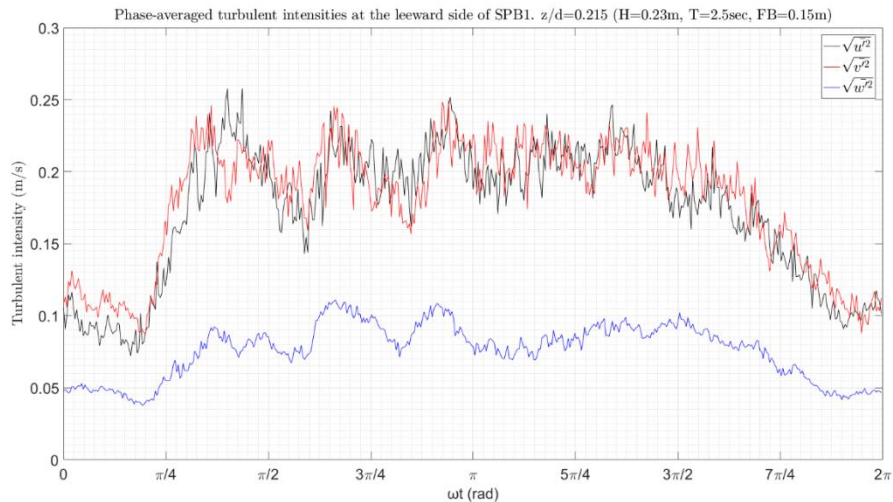
Σχήμα 5.2.122 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.123. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.26 m/s και 0.25m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.11 m/s.

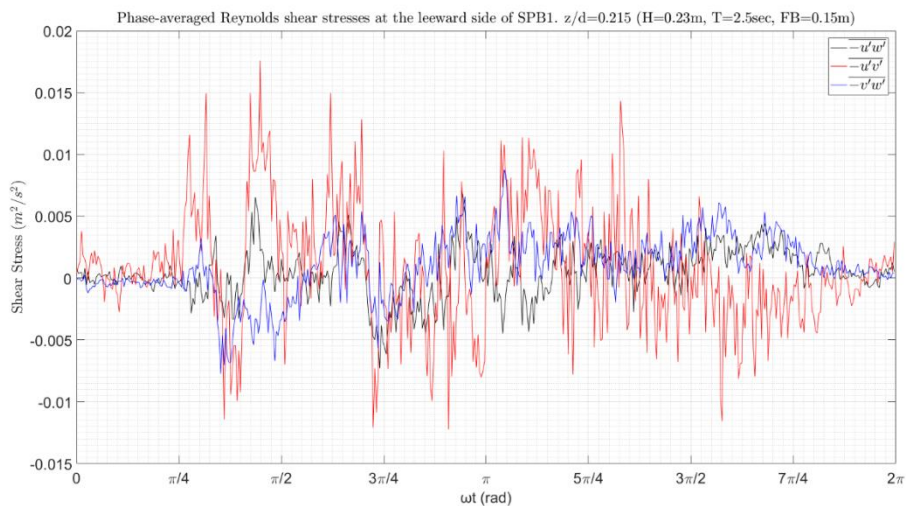
Στο Σχήμα 5.2.124 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Η διατμητική τάση  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο x-y λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.76 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Η διατμητική τάση  $-\overline{u'w'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο x-z λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $7.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-7.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



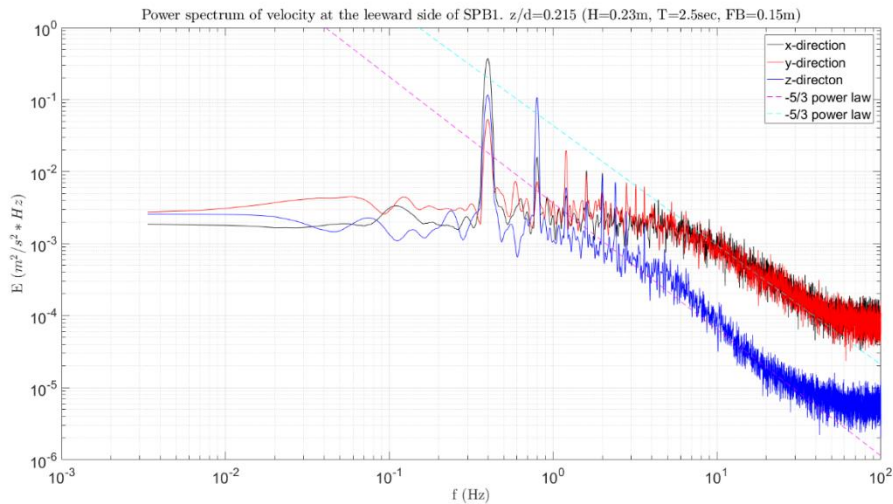
Σχήμα 5.2.123 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.2.124 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R4, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.125. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4Hz$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.37 m^2/s^2 * Hz$ , στη z είναι  $0.12 m^2/s^2 * Hz$  και στη y είναι  $0.05 m^2/s^2 * Hz$ . Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδραειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδραειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 3Hz$  μέχρι  $f = 30Hz$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 7Hz$  μέχρι  $f = 30Hz$  περίπου.

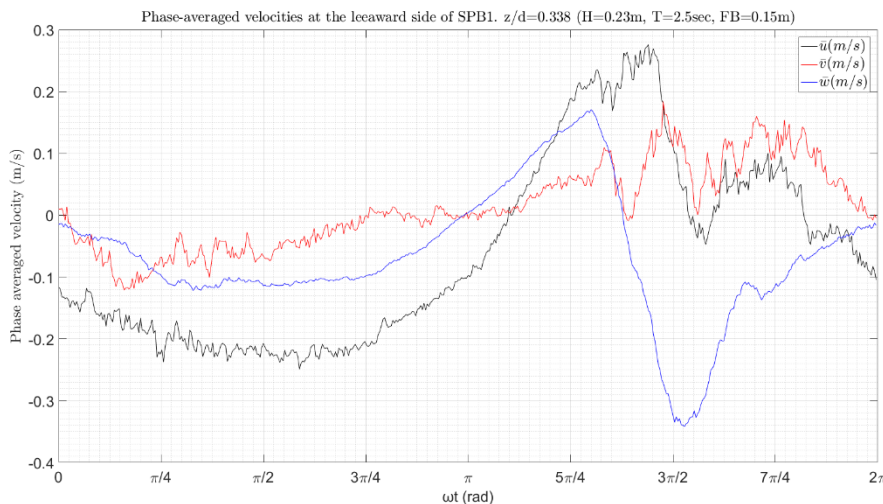
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.125 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

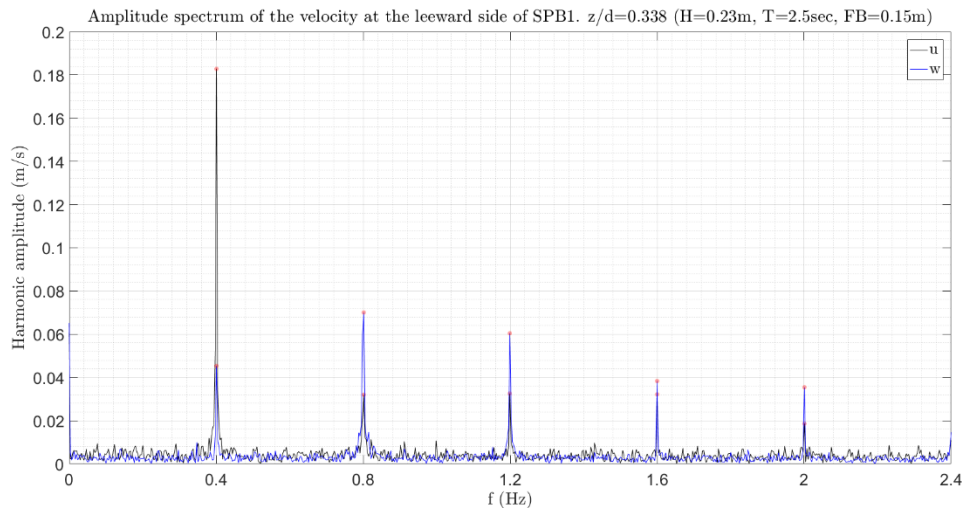
Στο Σχήμα 5.2.126 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.25, 0.28]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.34, 0.17]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.12, 0.18]$  (m/s).



Σχήμα 5.2.126 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

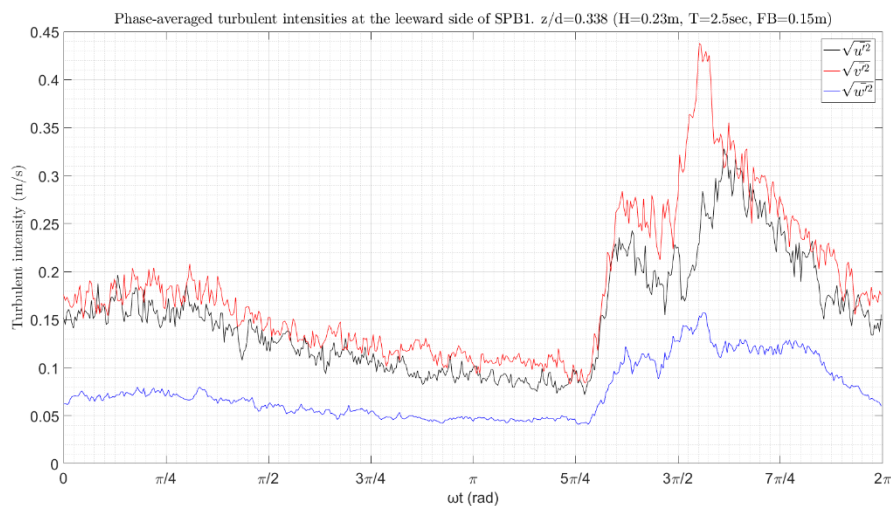
Στο Σχήμα 5.2.127 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.18m/s για συχνότητα 0.4Hz, 0.03m/s (16.7% της 1<sup>ης</sup>) για συχνότητες 0.8Hz, 1.2Hz, 1.6Hz, 0.018m/s και 0.019m/s για συχνότητα 2.0Hz. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz, 0.8Hz, 1.2Hz, 1.6Hz και 2.0Hz πλάτη ταλάντωσης 0.045m/s, 0.07m/s (175% της 1<sup>ης</sup>), 0.06m/s, 0.04m/s και 0.035m/s αντίστοιχα.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.2.127 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

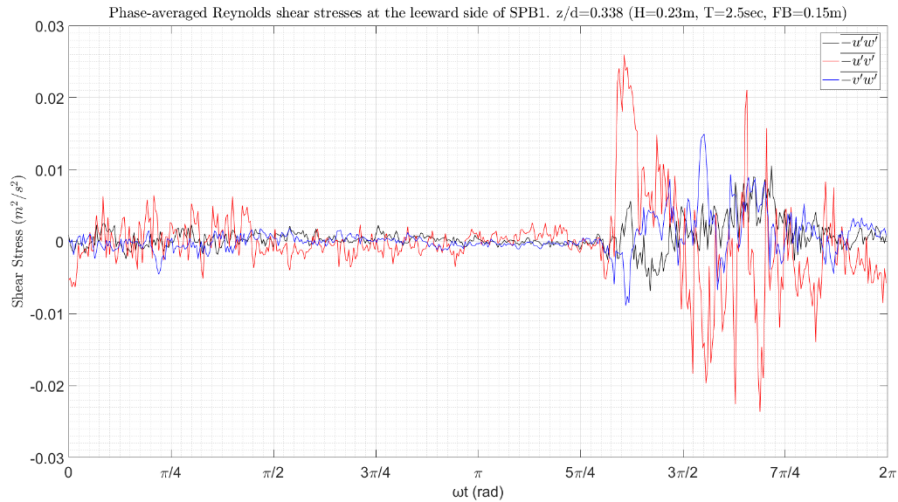
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.128. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.33 m/s και 0.44 m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.16 m/s.



Σχήμα 5.2.128 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.2.129 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η έξαρση των διατμητικών τάσεων σε όλα τα επίπεδα γίνεται μέσα σε ένα περιορισμένο εύρος μέσα στη κυματική περίοδο. Η διατμητική τάση  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο x-y λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.6 * 10^{-2} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-2.4 * 10^{-2} m^2/s^2$ .

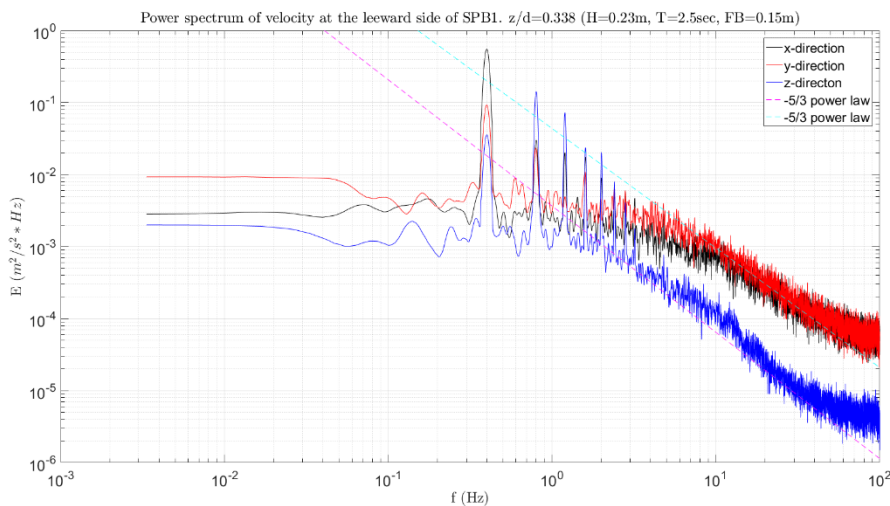
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.129 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R4, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.130. Από το σχήμα αυτό είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.55\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.04\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.09\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Η μεγαλύτερη ενέργεια για την κατακόρυφη ταχύτητα εκδηλώνεται για  $f = 0.8\text{Hz}$  με τιμή  $0.14\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 10\text{Hz}$  μέχρι  $f = 70\text{Hz}$  περίπου.

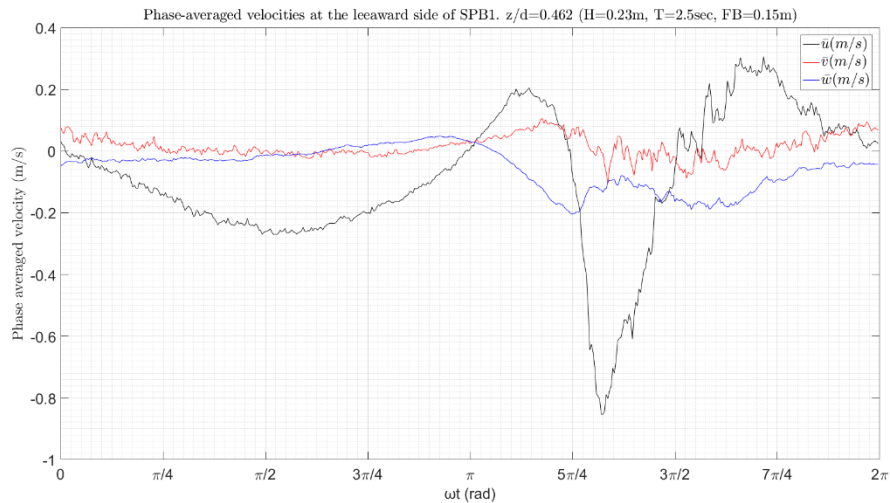


Σχήμα 5.2.130 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.



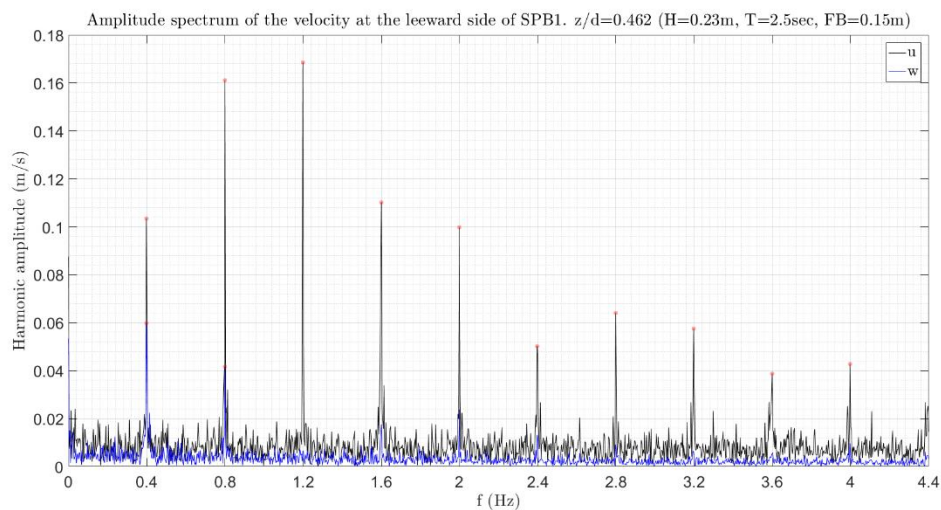
3. Σχετική θέση,  $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.2.131 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.85, 0.31]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.2, 0.05]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.1, 0.11]$  (m/s).



Σχήμα 5.2.131 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

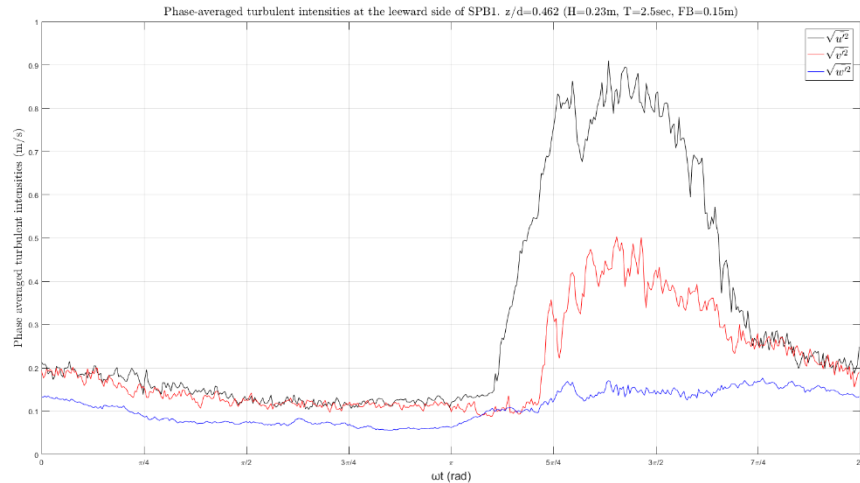
Στο Σχήμα 5.2.132 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει σημαντικά πλάτη ταλάντωσης σε ένα μεγάλο εύρος αρμονικών συνιστωσών ενώ αντίθετα η κατακόρυφη περιορίζεται στις δύο πρώτες αρμονικές. Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.1m/s για συχνότητα 0.4Hz, 0.16m/s για συχνότητα 0.8Hz, 0.017m/s για 1.2Hz, 0.11m/s για 1.6Hz και 0.1m/s για συχνότητα 2.0Hz. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz και 0.8Hz πλάτη ταλάντωσης 0.06m/s και 0.04m/s αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2.132 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

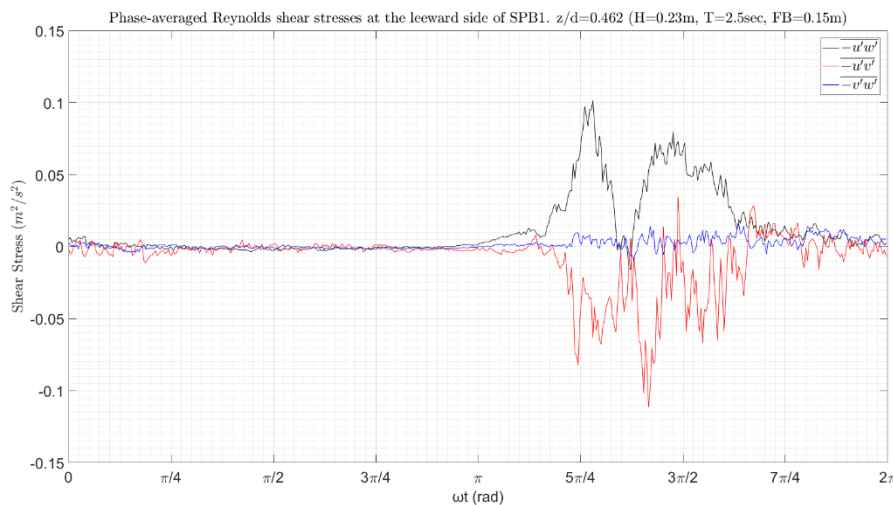
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.133. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή αλλά με πολύ διαφορετικές μέγιστες τιμές μέσα στη κυματική περίοδο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 1 m/s και 0.5m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.18 m/s.



Σχήμα 5.2.133 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

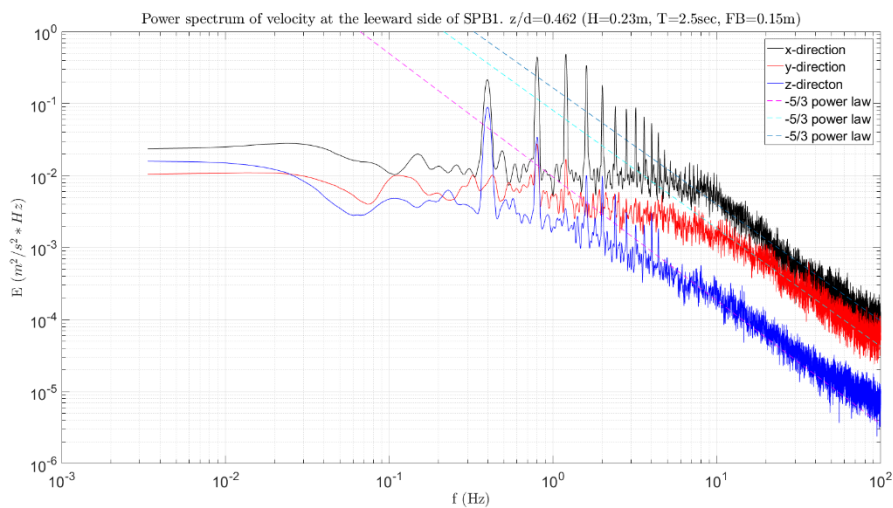
Στο Σχήμα 5.2.134 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η έξαρση των διατμητικών τάσεων είναι εντονότερη στα επίπεδα x-z και x-y, ενώ στο επίπεδο y-z οι διατμητικές τάσεις είναι σχεδόν μηδενικές. Η διατμητική τάση  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο x-y λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $3.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-11.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Αντίστοιχα η διατμητική τάση  $-\overline{u'w'}$  στο επίπεδο x-z, λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $10.2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



Σχήμα 5.2.134 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 1-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.135. Από το σχήμα αυτό είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές κυρίως για την οριζόντια ταχύτητα. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.21\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  είναι  $0.09\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Η μεγαλύτερη ενέργεια για την οριζόντια ταχύτητα εκδηλώνεται για  $f = 1.2\text{Hz}$  με τιμή  $0.485\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , στην οριζόντια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 8\text{Hz}$  μέχρι  $f = 100\text{Hz}$  και για την εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 10\text{Hz}$  μέχρι  $f = 100\text{Hz}$



Σχήμα 5.2.135 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

#### 5.2.4.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

##### 1. Στέψη, σχετική θέση, $z/d = 0.769$ .

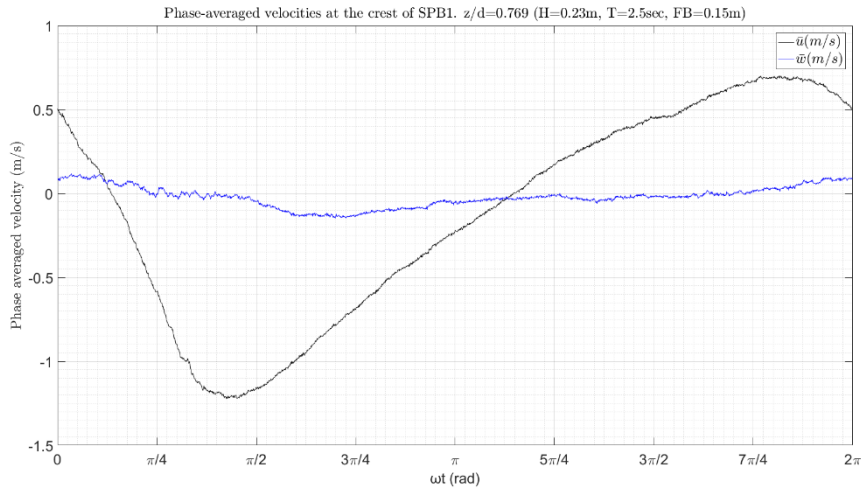
Στο Σχήμα 5.2.136 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-1.22, 0.7]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.15, 0.12]$  (m/s).

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.137. Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν η πρώτη και η δεύτερη αρμονική συνιστώσα με την τρίτη και την τέταρτη αρμονική να εκδηλώνουν αρκετά μικρότερο αρμονικό πλάτος. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.55\text{m/s}$ , η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.8\text{Hz}$ )

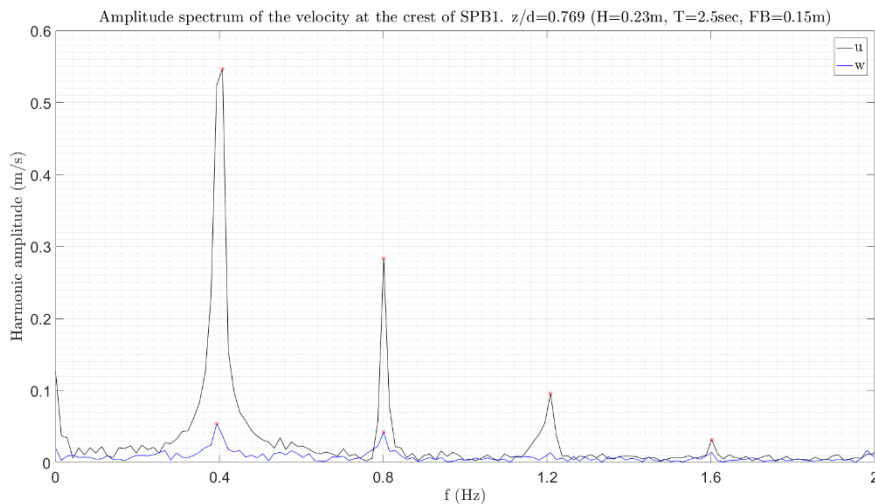


Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

0.28m/s (50.9% της 1<sup>ης</sup>), η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.2\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.1m/s (18.2% της 1<sup>ης</sup>) και η 4<sup>η</sup> ( $f = 1.6\text{Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος 0.03m/s. Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται οι δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες, με συχνότητες  $f = 0.4\text{Hz}$  και  $f = 0.8\text{Hz}$ , και με πλάτη ταλάντωσης 0.054 m/s και 0.04 m/s αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2.136 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.

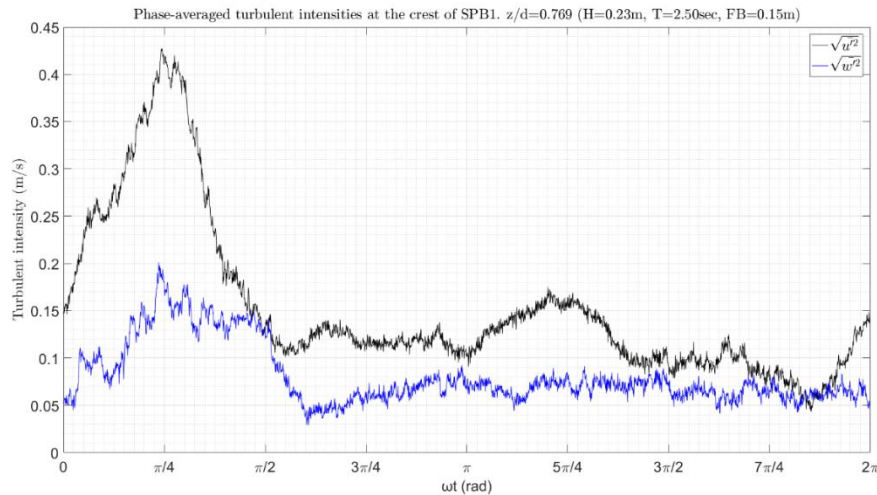


Σχήμα 5.2.137 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.

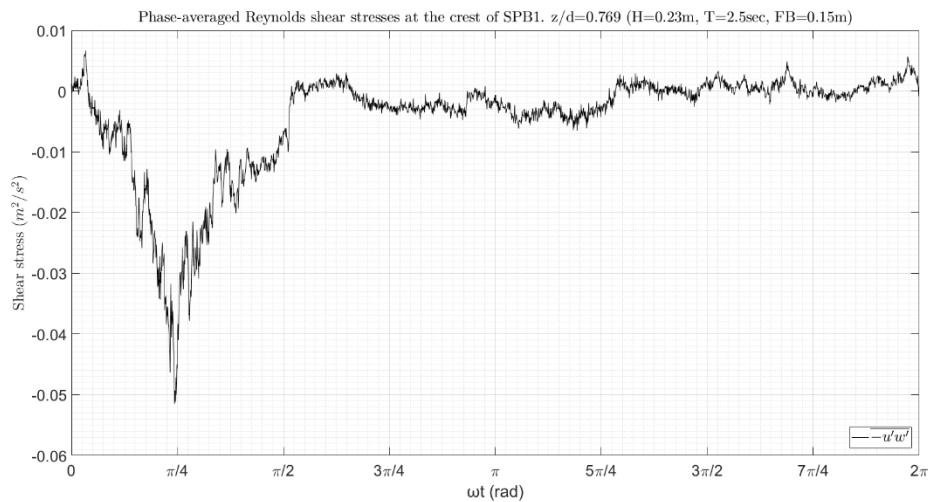
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.138. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερη στην οριζόντια (μαύρο) απ' ό τι στη κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση. Η μέγιστη τυρβώδης ένταση της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.43m/s και της κατακόρυφης 0.2 m/s.

Στο Σχήμα 5.2.139 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $0.67 * 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-5.1 * 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



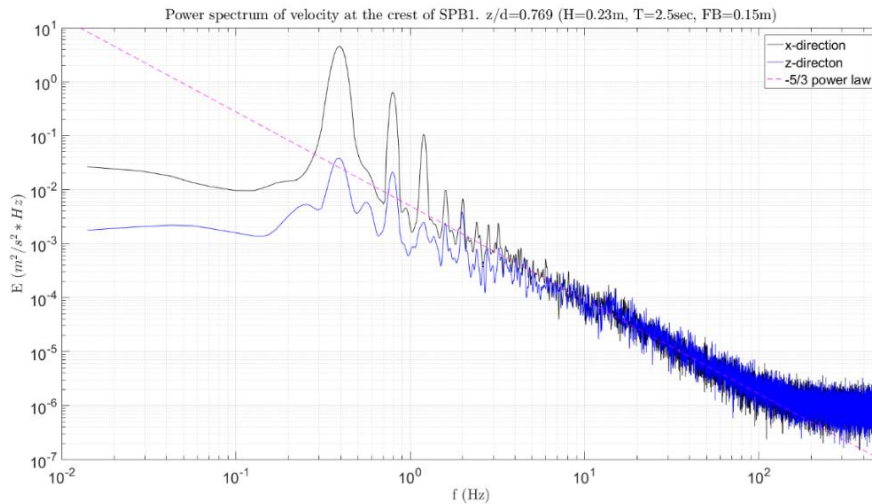
Σχήμα 5.2.138 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.



Σχήμα 5.2.139 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο) επίπεδο. 1-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.140. Από το σχήμα παρατηρείται ότι η ενέργεια σε κάθε αρμονική συχνότητα είναι μεγαλύτερη στην οριζόντια απ' ό,τι στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για τη κύρια συχνότητα των κυματισμών η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $4.56 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα σε υψηλότερες αρμονικές. Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 1\text{Hz}$  και  $f = 100\text{Hz}$ .

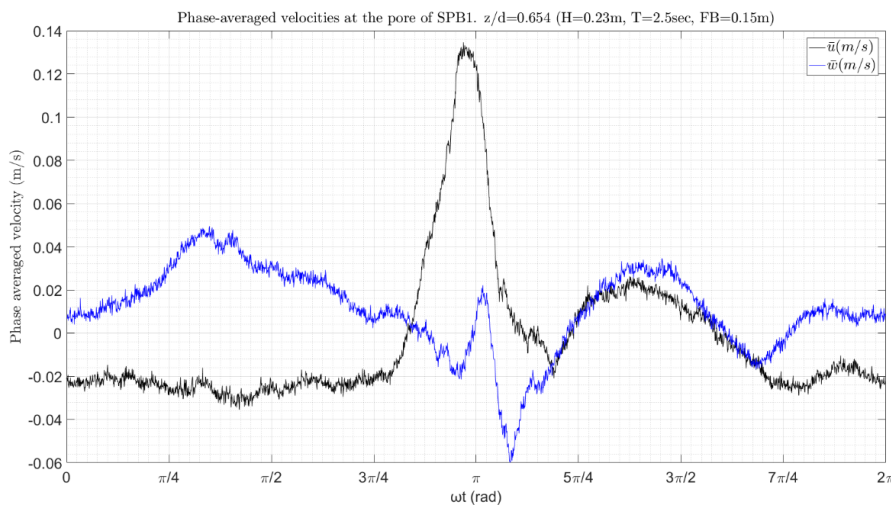
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.140 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.

### 2. Πόρος, σχετική θέση, $z/d = 0.654$ .

Στο Σχήμα 5.2.141 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.035, 0.13]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.06, 0.05]$  (m/s).

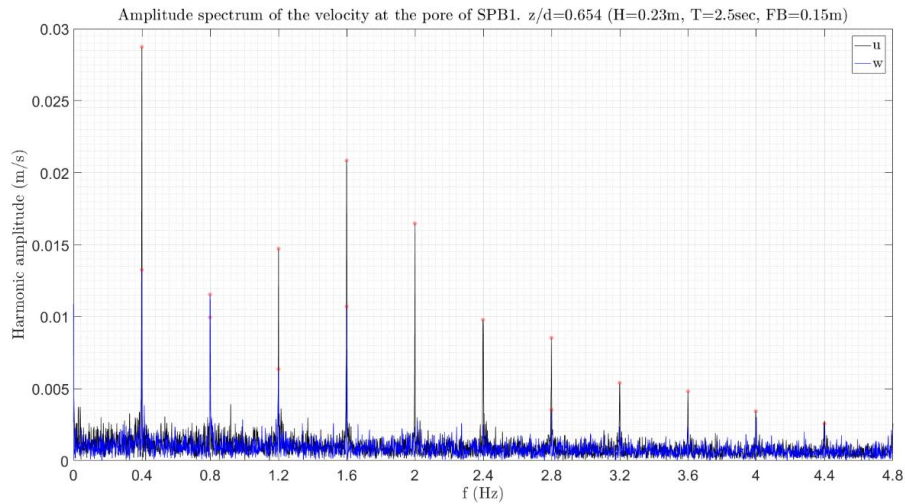


Σχήμα 5.2.141 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.2.142. Από το σχήμα παρατηρείται ότι η οριζόντια ταχύτητα εκδηλώνει ένα μεγάλο εύρος αρμονικών συνιστωσών οι οποίες είναι ορατές μέχρι και την συχνότητα των  $4.4\text{Hz}$ , σε αντίθεση με κατακόρυφη η οποία εμφανίζει συνολικά τέσσερις αρμονικές. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.029\text{m/s}$ , η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.8\text{Hz}$ )  $0.01\text{m/s}$ , η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.2\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.015\text{m/s}$ , η 4<sup>η</sup> ( $f = 1.6\text{Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος  $0.021\text{m/s}$  (72.4% της 1<sup>ης</sup>) και η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.0\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.016\text{m/s}$ . Αντίστοιχα

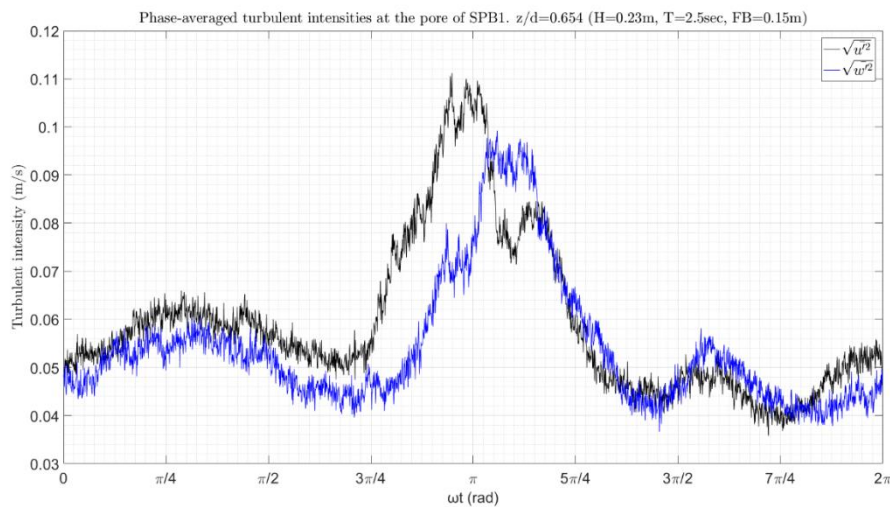
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται πλάτη ταλάντωσης 0.013m/s, 0.01m/s, 0.006m/s και 0.01m/s για συχνότητες 0.4Hz, 0.8Hz, 1.2Hz και 1.6Hz αντίστοιχα.



Σχήμα 5.2.142 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.654, πόρος.

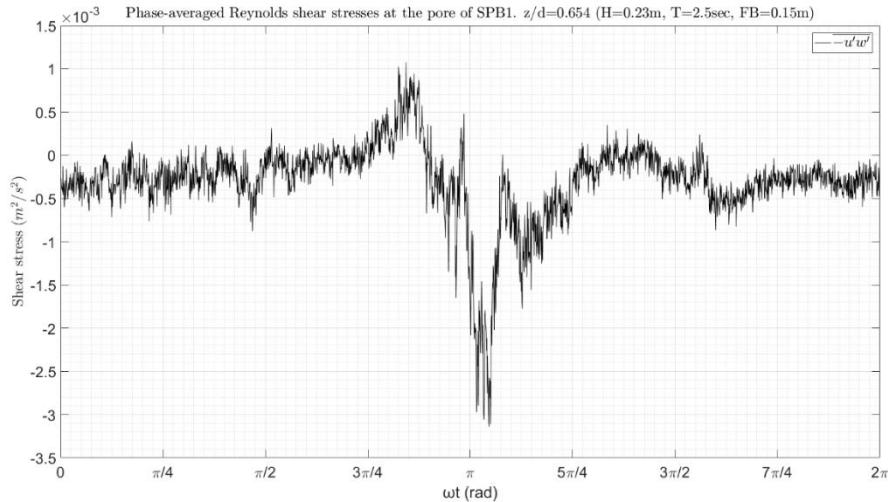
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.2.143. Οι τυρβώδεις εντάσεις ακολουθούν σχεδόν ίδια μεταβολή μέσα στη κυματική περίοδο. Η μέγιστη τυρβώδης ένταση της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.11m/s και της κατακόρυφης 0.1 m/s.



Σχήμα 5.2.143 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.654, πόρος.

Στο Σχήμα 5.2.144 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο x-z. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $1.1 * 10^{-3} m^2/s^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-3.1 * 10^{-3} m^2/s^2$ .

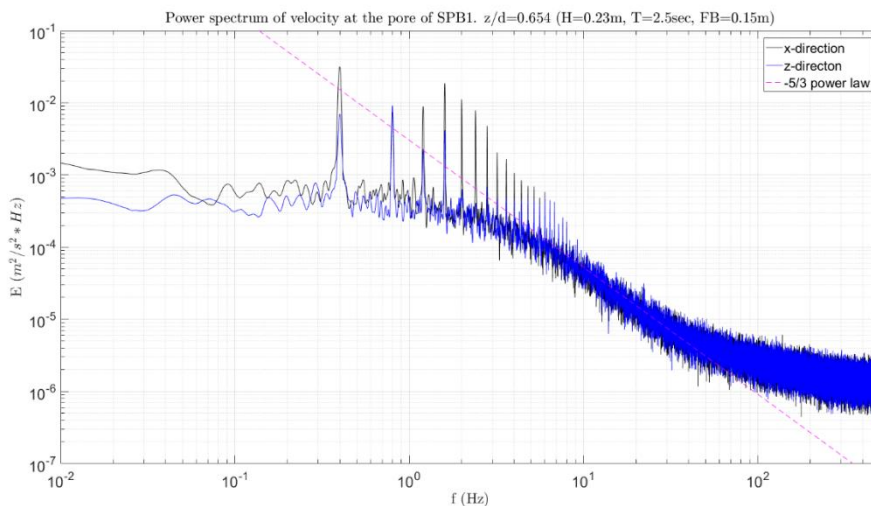
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.2.144 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο) επίπεδο. 1-R4, z/d=0.654, πόρος.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.2.145. Από το σχήμα παρατηρείται ότι υπάρχει σημαντική μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές συνιστώσες και προς τις δύο διευθύνσεις της ταχύτητας. Για τη κύρια συχνότητα των κυματισμών η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.03 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.007 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδραειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 5\text{Hz}$  και  $f = 70\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.2.145 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 1-R4, z/d=0.654, πόρος.



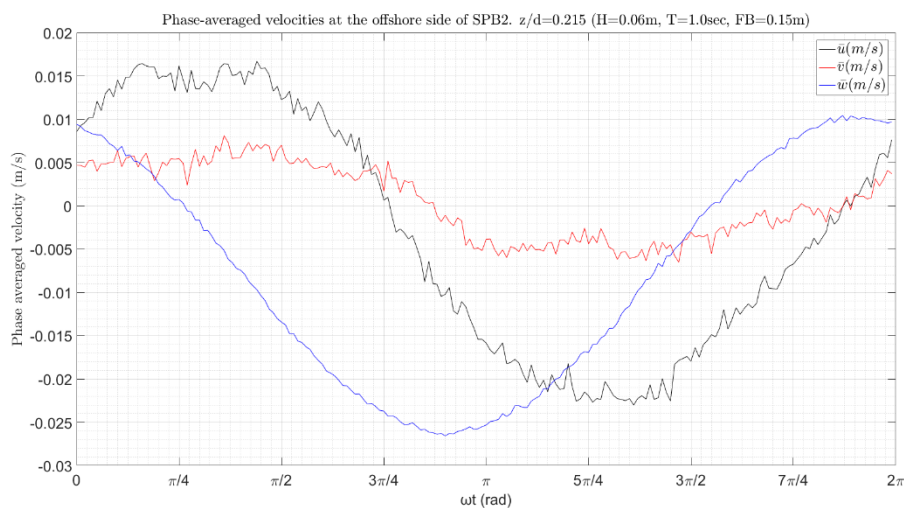
### 5.3 Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

#### 5.3.1 Κυματικό σενάριο 2-R1

##### 5.3.1.1 Αποτελέσματα στην προσήνεμη πλευρά

###### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.3.1 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.02, 0.017] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.027, 0.01] (m/s), ενώ στη διεύθυνση  $y$  το εύρος είναι [-0.007, 0.008] (m/s).



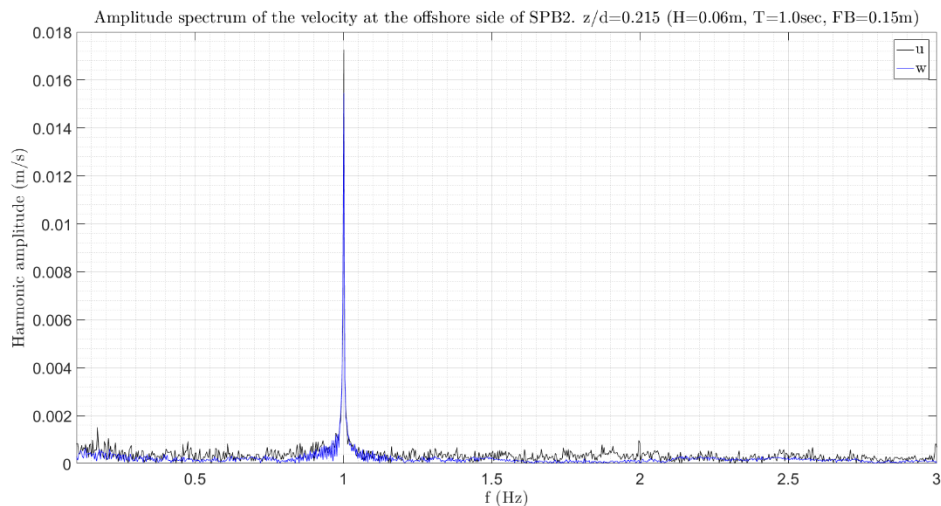
Σχήμα 5.3.1 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.2. Το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.017 m/s και της κατακόρυφης είναι 0.015m/s. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει παραγωγή αρμονικών συνιστωσών.

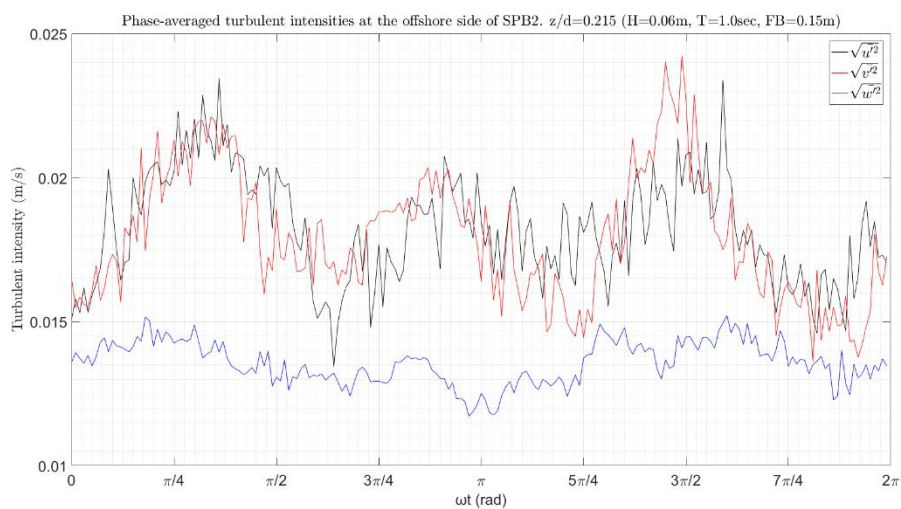
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.3. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.023 m/s και 0.024 m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.015 m/s.



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.2 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.



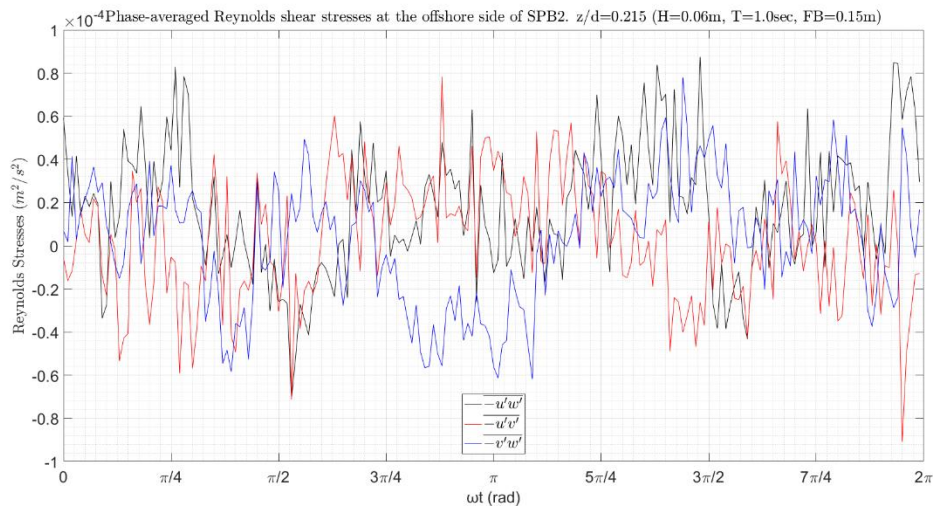
Σχήμα 5.3.3 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.4 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι διατμητικές τάσεις  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνονται στο επίπεδο  $x$ - $y$  όπου λαμβάνουν μέγιστη θετική τιμή  $0.78 * 10^{-4} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.91 * 10^{-4} m^2/s^2$ . Επίσης στο επίπεδο  $x$ - $z$  η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $0.88 * 10^{-4} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.71 * 10^{-4} m^2/s^2$ .

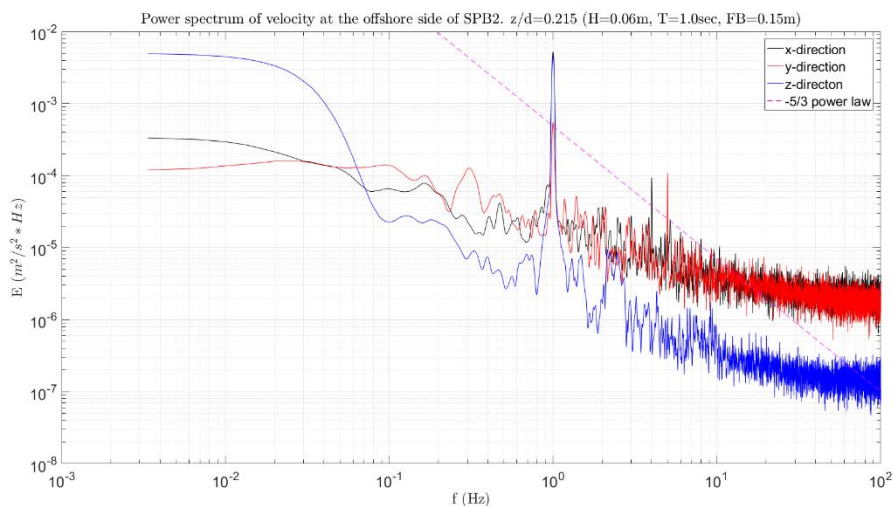
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.5. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 1Hz$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.005 m^2/s^2 * Hz$ , στη  $z$  είναι  $4.6 * 10^{-3} m^2/s^2 * Hz$  και στη  $y$  αντίστοιχα είναι  $0.55 * 10^{-3} m^2/s^2 * Hz$ .

Το αδρανειακό υπό-εύρος δεν φαίνεται να εκδηλώνεται σε καμία συνιστώσα της ταχύτητας καθώς καμία από τις γραφικές παραστάσεις δεν προσεγγίζει την κλίση  $-5/3$  σε κάποιο εύρος συχνοτήτων.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.4 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R1, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.5 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.

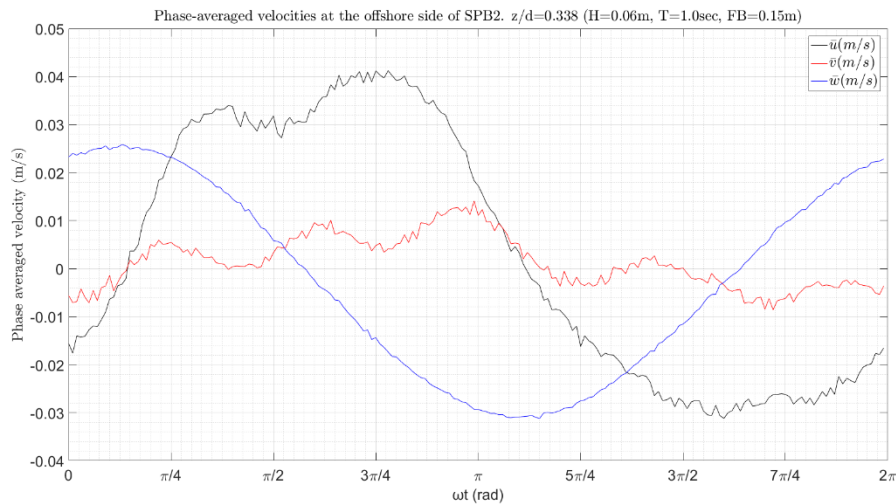
### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.3.6 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.03, 0.04] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.03, 0.026] (m/s), ενώ στη διεύθυνση γ το εύρος είναι [-0.009, 0.01] (m/s).

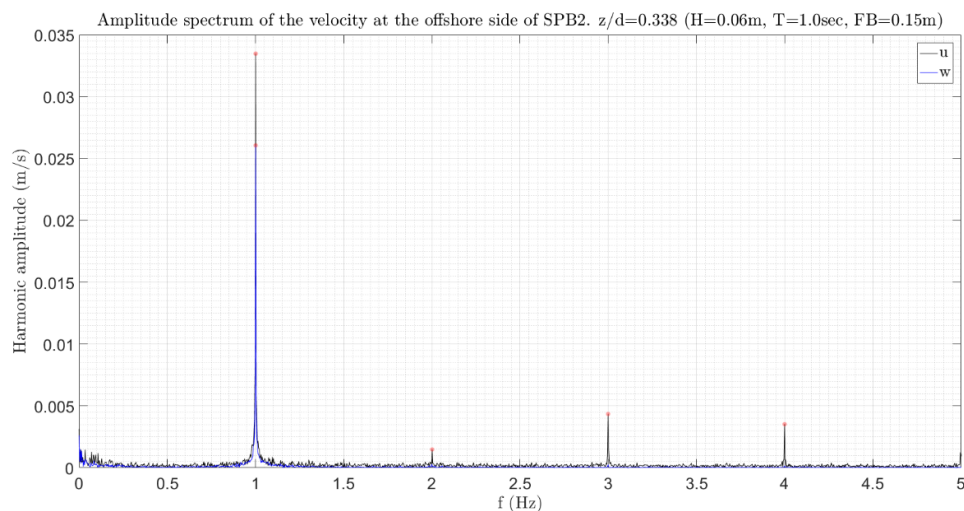
Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.7. Από το σχήμα φαίνεται η παραγωγή υψηλότερων αρμονικών της οριζόντιας ταχύτητας αλλά με πλάτος ταλάντωσης τάξης μεγέθους μικρότερο από τη κύρια αρμονική. Για την οριζόντια ταχύτητα εμφανίζονται πλάτη ταλάντωσης 0.033m/s, 0.0015m/s, 0.004m/s και 0.0035m/s για συχνότητες 1Hz, 2Hz, 3Hz και 4Hz αντίστοιχα. Η

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

κατακόρυφη ταχύτητα εκδηλώνεται μόνο στην κύρια συχνότητα,  $f = 1\text{Hz}$ , με πλάτος ταλάντωσης 0.026m/s.



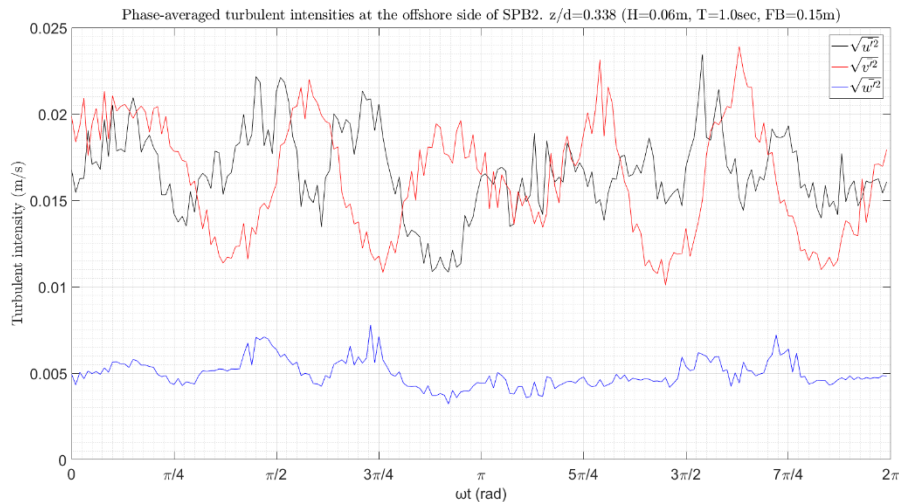
Σχήμα 5.3.6 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.7 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

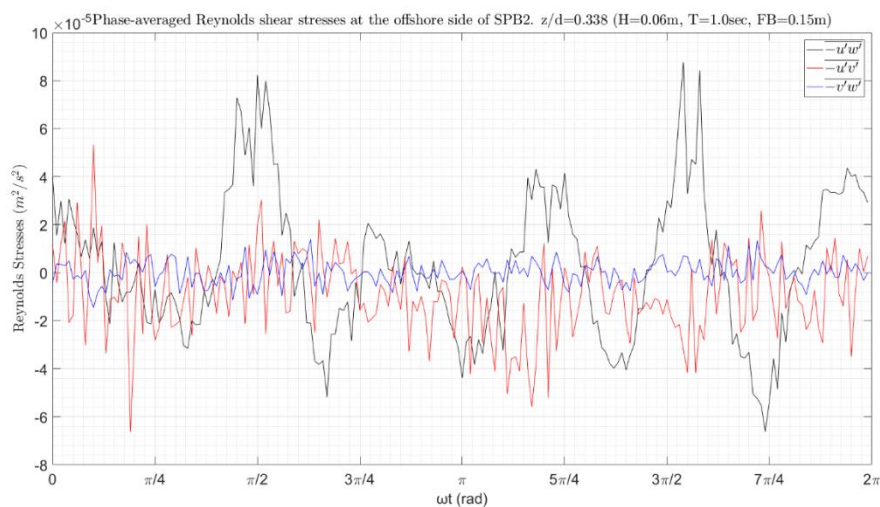
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.8. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις διευθύνσεις x και y η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι αρκετά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.023 m/s και 0.024 m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.008 m/s.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.8 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.4 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι διατμητικές τάσεις  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου λαμβάνουν μέγιστη θετική τιμή  $0.53 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Επίσης στο επίπεδο x-z, η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $0.88 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.66 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



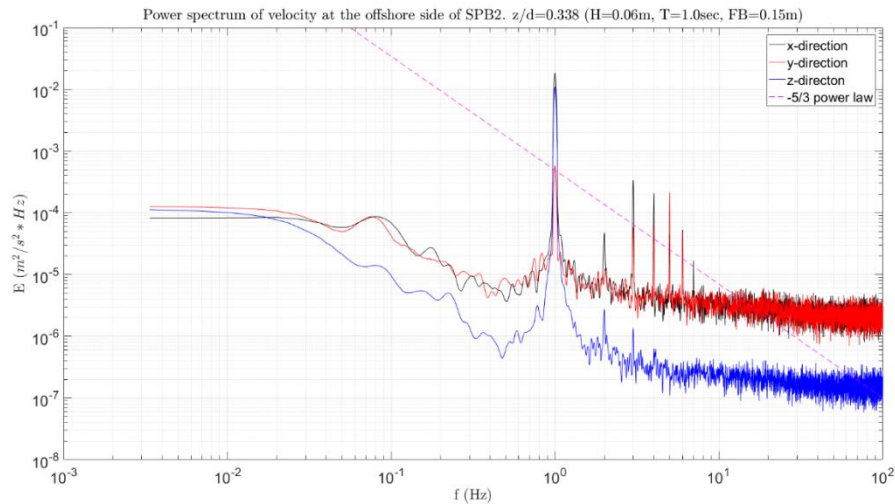
Σχήμα 5.3.9 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.10. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.018 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ , στη z είναι  $1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y αντίστοιχα είναι  $0.58 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

Το αδρανειακό υπό-εύρος δεν φαίνεται να εκδηλώνεται σε καμία συνιστώσα της ταχύτητας καθώς καμία από τις γραφικές παραστάσεις δεν προσεγγίζει την κλίση  $-5/3$  σε κάποιο εύρος συχνοτήτων.



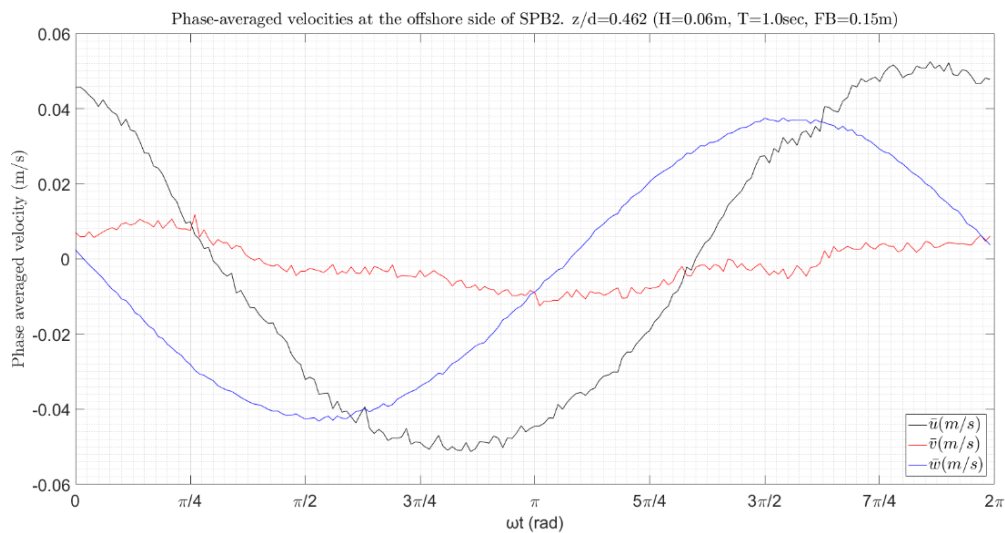
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.10 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

### 3. Σχετική θέση, $z/d = 0.462$ .

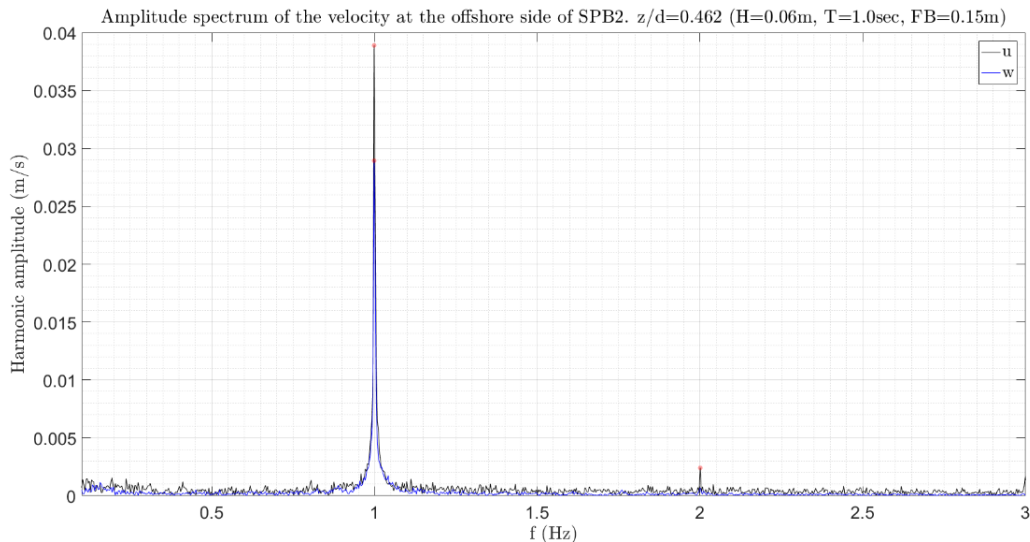
Στο Σχήμα 5.3.11 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.05, 0.05]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.01, 0.01]$  (m/s), ενώ στη διεύθυνση y το εύρος είναι  $[-0.01, 0.01]$  (m/s).



Σχήμα 5.3.11 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

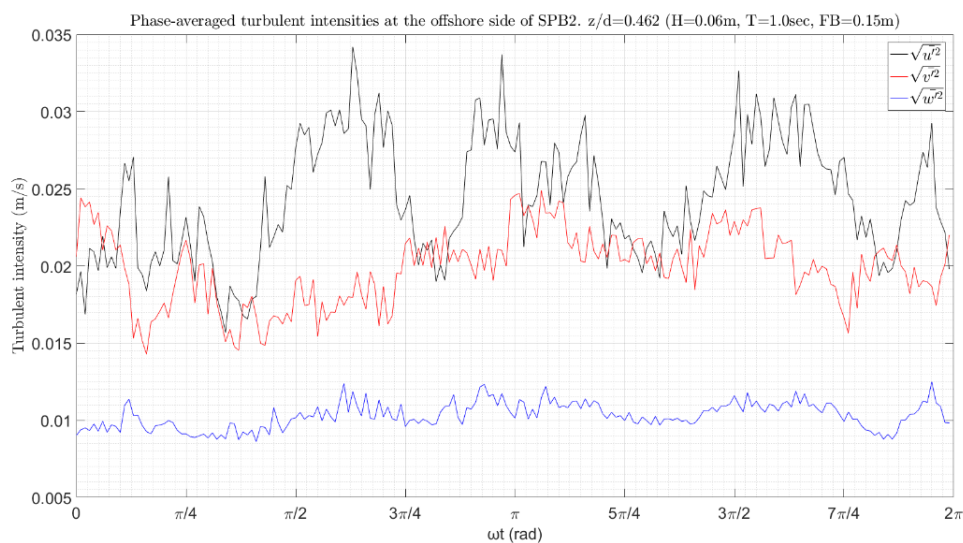
Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα δίνεται στο Σχήμα 5.3.12. Το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.04 m/s και της κατακόρυφης είναι 0.03m/s για συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$ . Στη συγκεκριμένη θέση εμφανίζεται και μία αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας με πλάτος 0.002m/s και συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.12 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.13. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση της τύρβης κατά την οριζόντια διεύθυνση λαμβάνει τιμές υψηλότερες σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις σχεδόν σε όλη τη περίοδο του κυματισμού. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  διεύθυνση η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι  $0.034\text{m/s}$ , κατά την  $y$  είναι  $0.025\text{m/s}$  και κατά την  $z$  είναι  $0.013\text{m/s}$ .

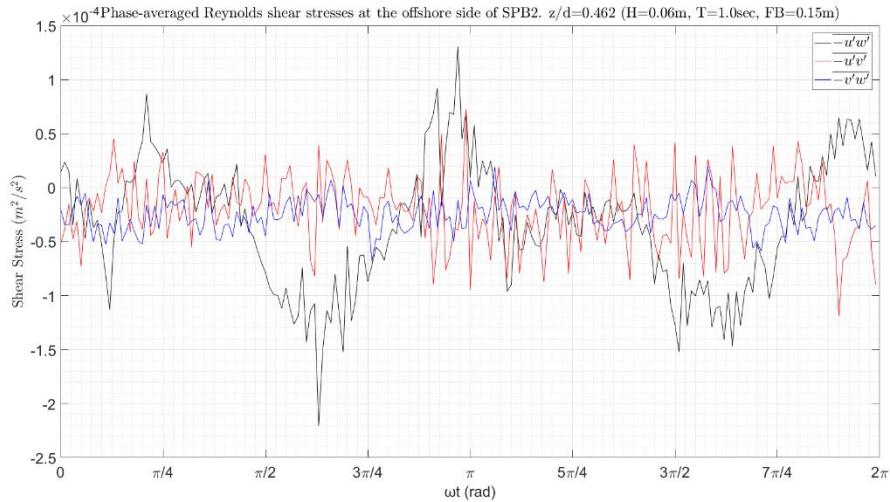


Σχήμα 5.3.13 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.14 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο  $x$ - $z$  όπου παρουσιάζεται μέγιστη θετική τιμή  $1.3 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-2.2 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}^2$ . Σημαντικές διατμητικές τάσεις παρουσιάζονται και στο επίπεδο  $x$ - $y$  η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη τιμή  $0.72 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}^2$  και ελάχιστη  $-1.2 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}^2$ .



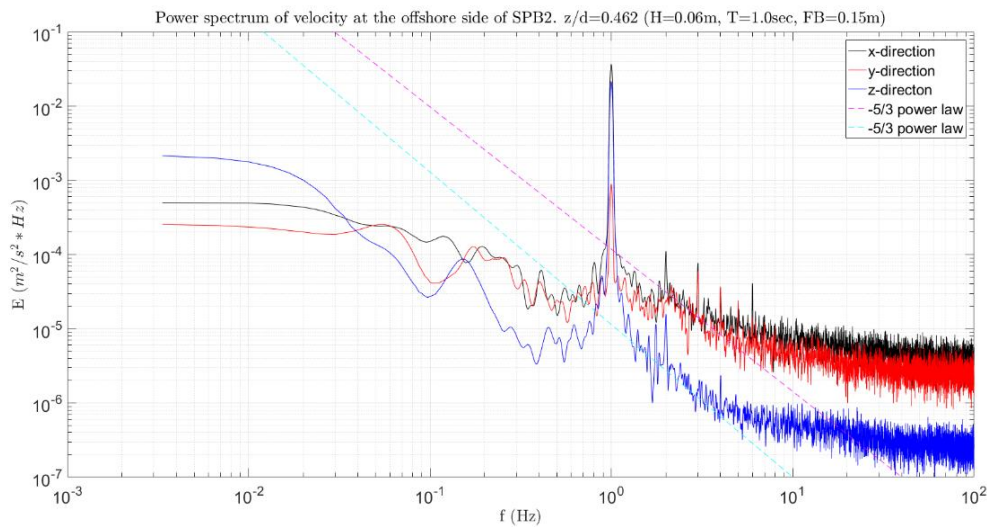
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.14 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R1, z/d=0.462, προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.15. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.037\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.02\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y αντίστοιχα είναι  $8.9 * 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Το αδρανειακό υπό-εύρος φαίνεται να εκδηλώνεται σε ένα πολύ μικρό εύρος συχνοτήτων. Και για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας το εύρος αυτό ξεκινάει από τη συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$  και τελειώνει σε στη συχνότητα  $f = 4\text{Hz}$ .

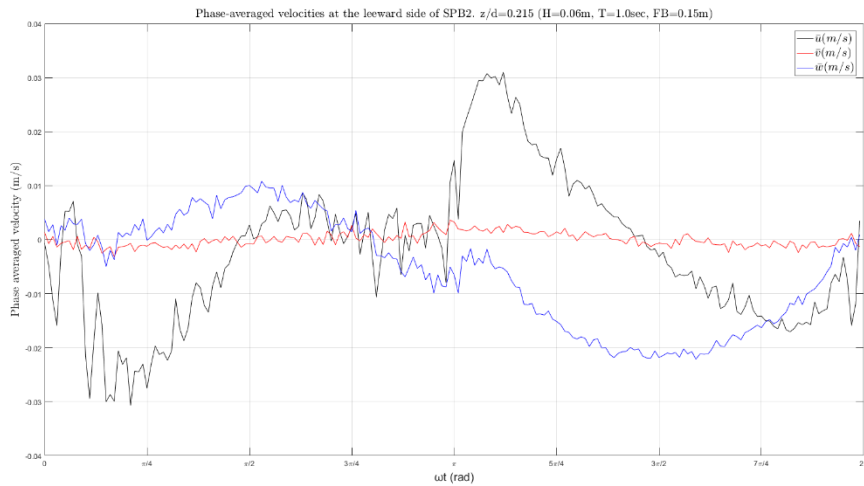


Σχήμα 5.3.15 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1, z/d=0.462, προσήνεμη πλευρά.

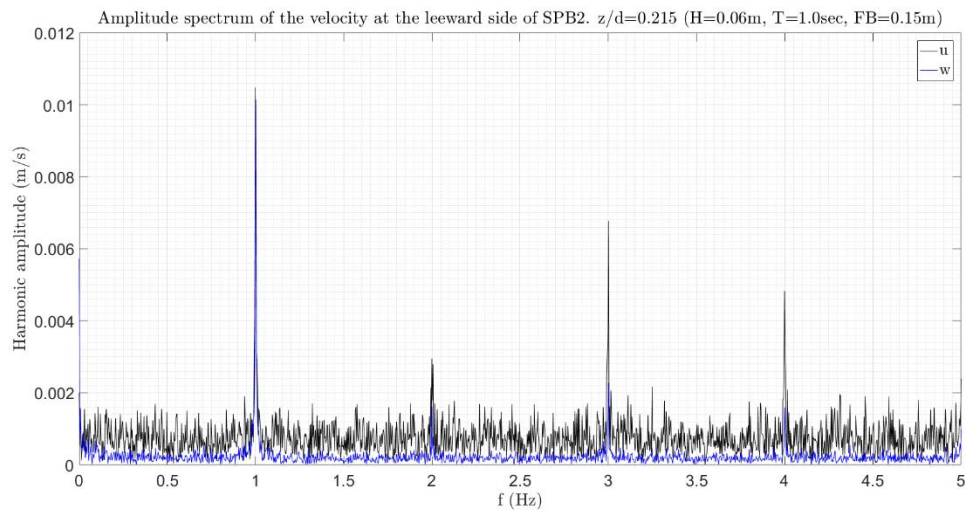
### 5.3.1.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

1. Σχετική θέση,  $z/d = 0.215$ .

Λόγω χαμηλής ποιότητας των δεδομένων που ελήφθησαν στη θέση αυτή (βλ. Πίνακας 4.3.3) θα παρουσιαστούν συνοπτικά κάποια αποτελέσματα που εξήχθησαν αλλά χωρίς ιδιαίτερο σχολιασμό.

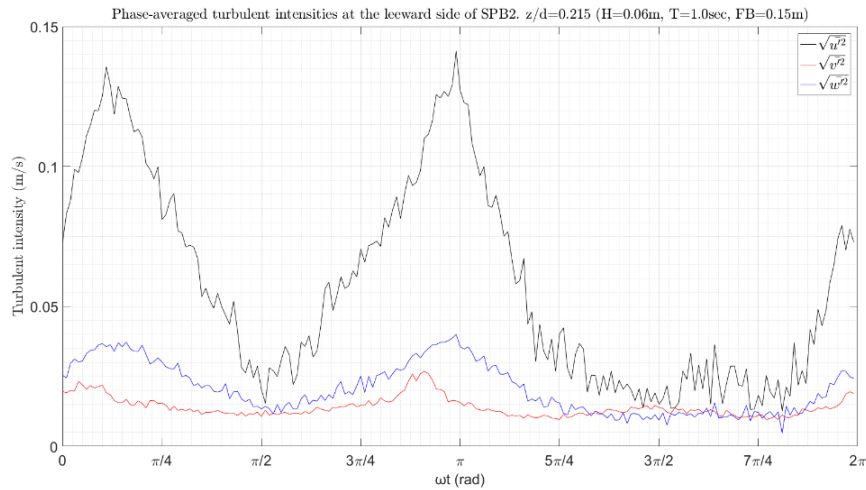


Σχήμα 5.3.16 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

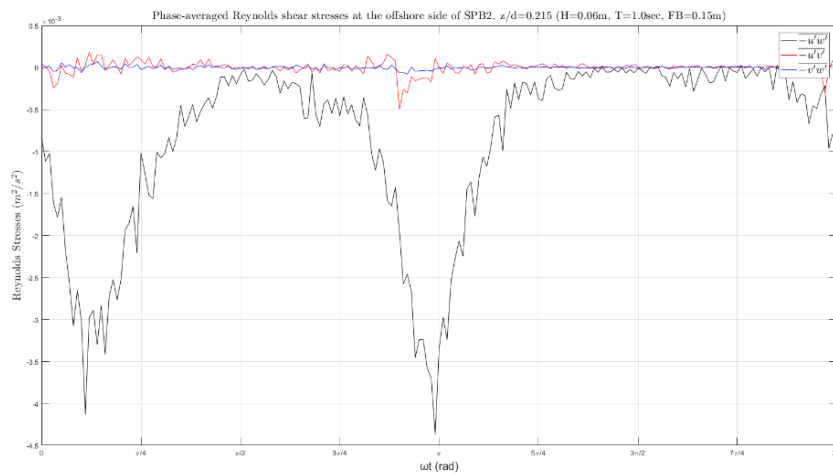


Σχήμα 5.3.17 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

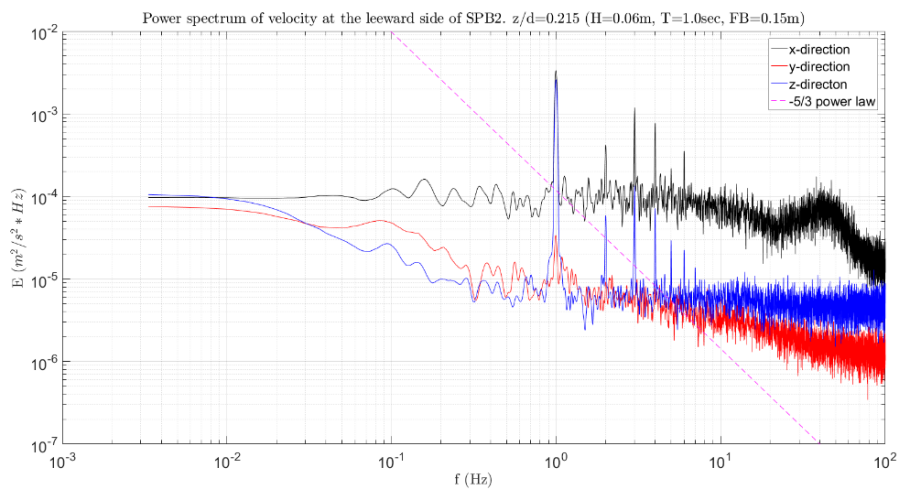
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.18 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



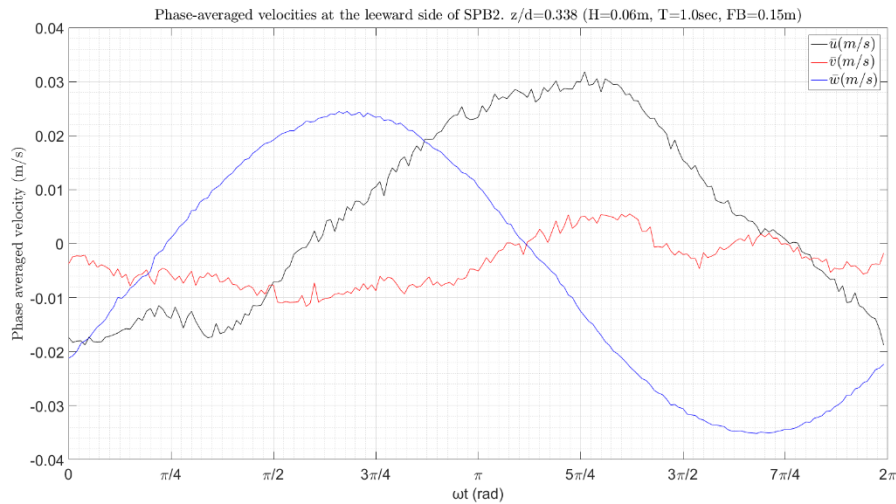
Σχήμα 5.3.19 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.20 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

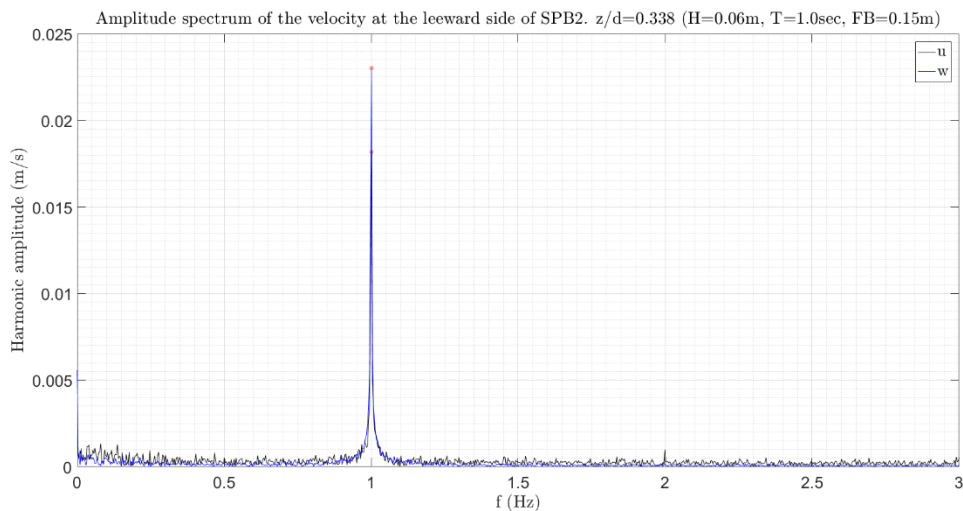
2. Σχετική θέση,  $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.3.21 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.02, 0.03]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.04, 0.02]$  (m/s), ενώ στη διεύθυνση  $y$  το εύρος είναι  $[-0.01, 0.005]$  (m/s).



Σχήμα 5.3.21 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.22. Οι δύο αυτές συνιστώσες παρουσιάζουν περιοδικότητα με συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$ . Το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας ταχύτητας είναι  $0.018\text{m/s}$  και της κατακόρυφης είναι  $0.023\text{m/s}$ . Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει παραγωγή αρμονικών συνιστωσών, οπότε όλη η ενέργεια μεταφέρεται από την κύρια συχνότητα του κυματισμού.

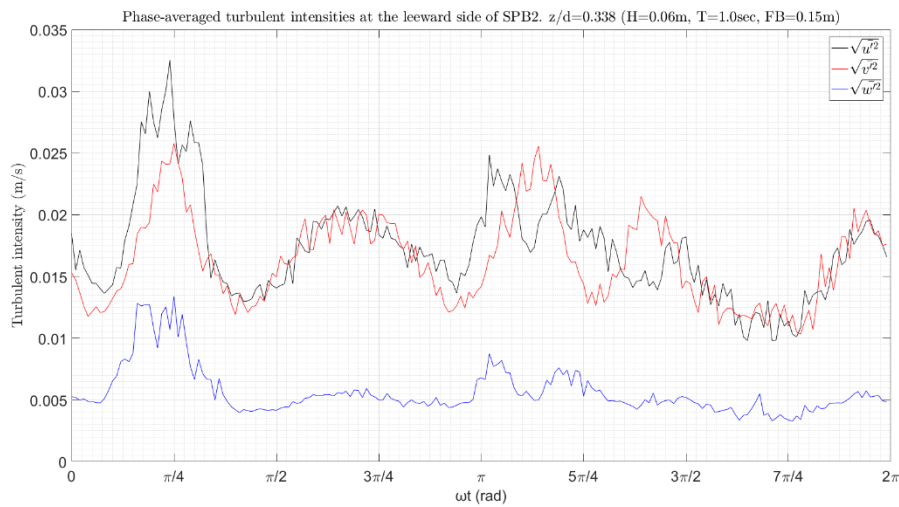


Σχήμα 5.3.22 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.23. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών

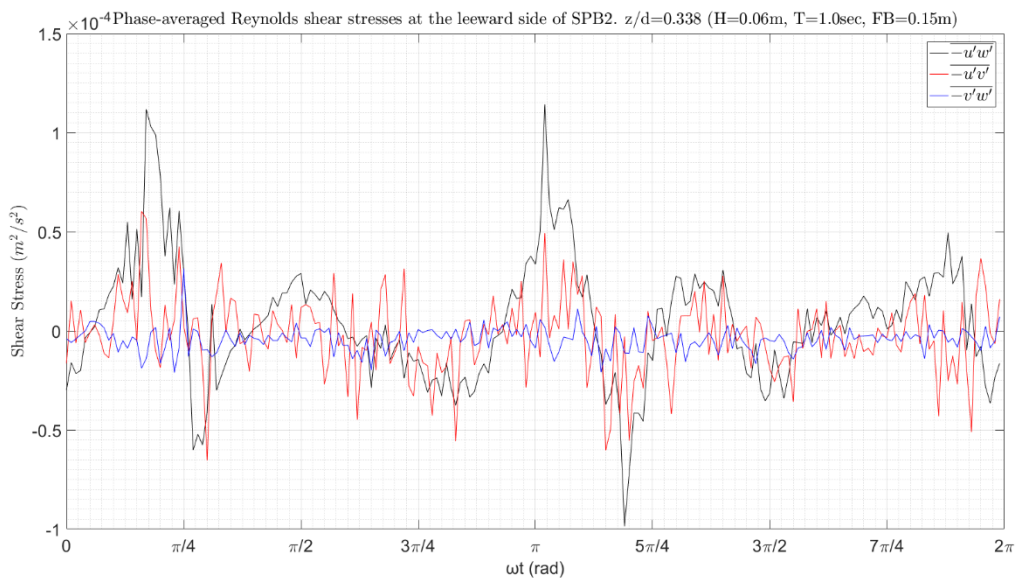
Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

διακυμάνσεων λαμβάνει τις μέγιστες τιμές της σχεδόν ταυτόχρονα σε όλες τις διευθύνσεις. Κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση των τυρβωδών εντάσεων είναι περίπου η ίδια, με μέγιστες τιμές 0.03m/s και 0.026m/s αντίστοιχα, ενώ κατά τη διεύθυνση  $z$  είναι αρκετά μικρότερη με μέγιστη τιμή 0.013m/s.



Σχήμα 5.3.23 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.24 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Σημαντικές διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στα επίπεδα  $x-z$  και  $x-y$ . Στο επίπεδο  $x-z$  η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει μέγιστη τιμή  $1.1 * 10^{-4} m^2/s^2$  και ελάχιστη  $-1 * 10^{-4} m^2/s^2$ . Αντίστοιχα στο επίπεδο  $x-y$  η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη τιμή  $0.6 * 10^{-4} m^2/s^2$  και ελάχιστη  $-0.65 * 10^{-4} m^2/s^2$ .



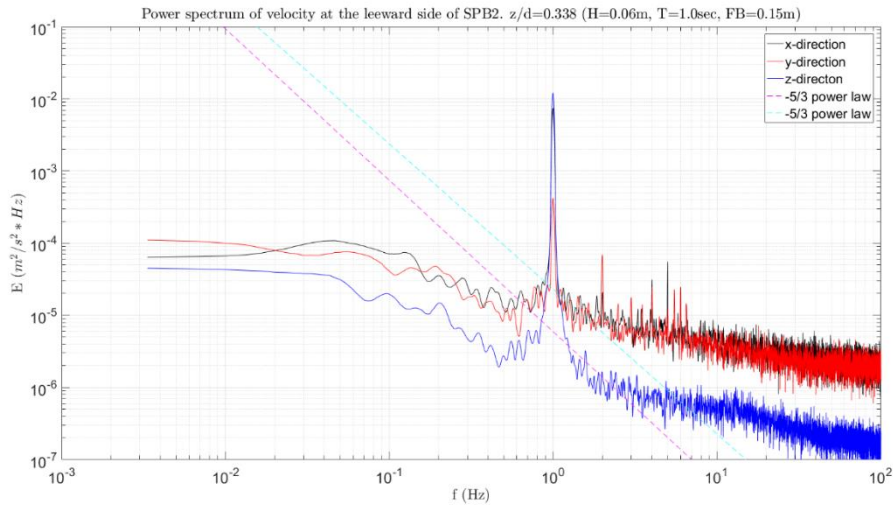
Σχήμα 5.3.24 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x-z$  (μαύρο),  $x-y$  (κόκκινο) και  $y-z$  (μπλε) επίπεδο. 2-R1,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.25. Και στα τρία φάσματα εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 1Hz$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.74 * 10^{-2} m^2/s^2 * Hz$ , στη  $z$  είναι  $1.2 * 10^{-2} m^2/s^2 * Hz$



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

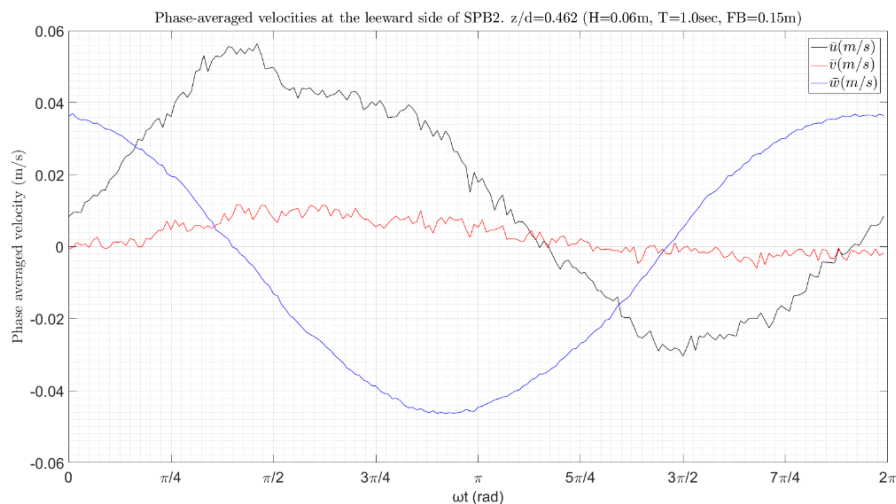
και στη  $y$  αντίστοιχα είναι  $4.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  δεν εκδηλώνεται σε κανένα από τα τρία φάσματα ενέργειας.



Σχήμα 5.3.25 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.3.26 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.03, 0.06]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.05, 0.04]$  (m/s) και της ( $\bar{v}$ ) είναι  $[-0.006, 0.01]$  (m/s).



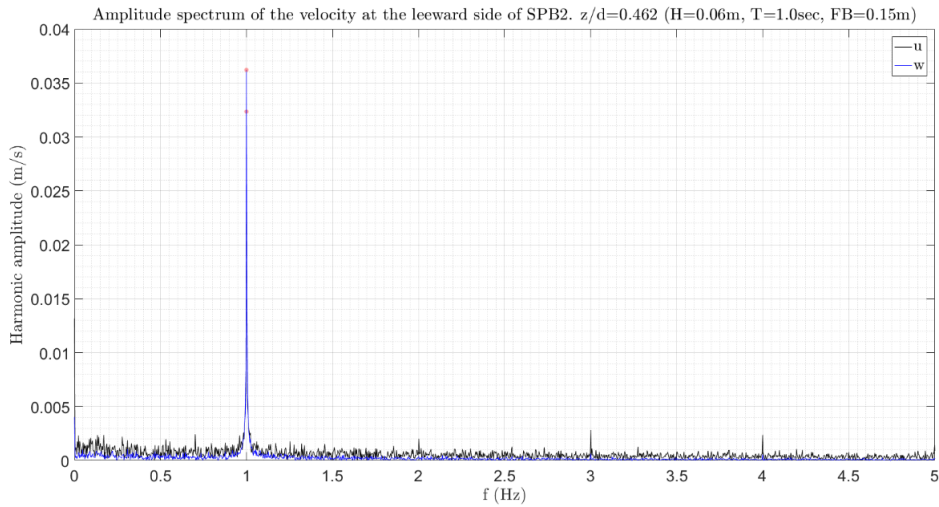
Σχήμα 5.3.26 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.27 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Το κύριο πλάτος ταλάντωσης και για τις δύο συνιστώσες εκδηλώνεται για συχνότητα  $1\text{Hz}$ , όπου η οριζόντια συνιστώσα έχει πλάτος  $0.032\text{m/s}$  και η κατακόρυφη  $0.036\text{m/s}$ . Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει



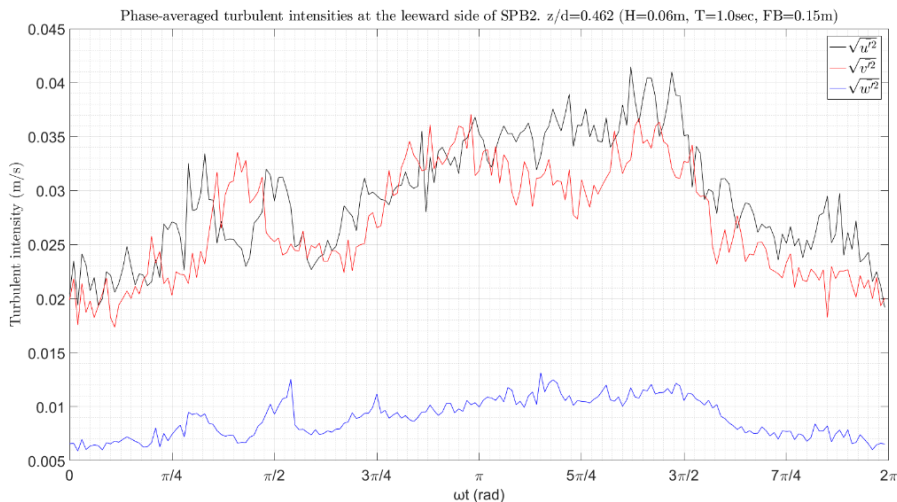
Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

πλάτη ταλάντωσης και στις αρμονικές συχνότητες των 2Hz, 3Hz και 4Hz, τα οποία είναι τάξης μεγέθους μικρότερα και δεν ξεπερνούν τα 0.003m/s.



Σχήμα 5.3.27 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R1, z/d=0.462, υπήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.28. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις διευθύνσεις x και y η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι αρκετά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.04 m/s και 0.037m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.013 m/s.

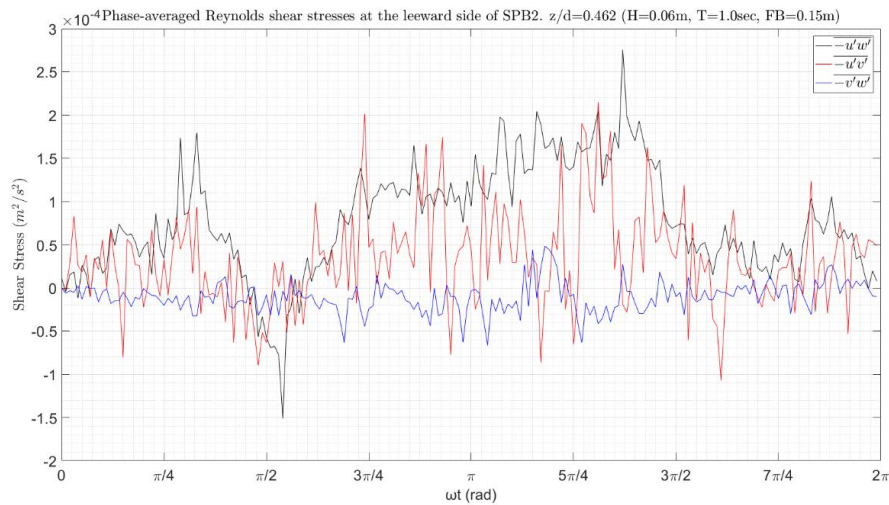


Σχήμα 5.3.28 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1, z/d=0.462, υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.29 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι οι διατμητικές τάσεις στα επίπεδα x-z και x-y είναι οι πιο σημαντικές μέσα στη κυματική περίοδο. Η διατμητική τάση  $-\overline{u'w'}$ , η οποία εκδηλώνεται στο επίπεδο x-z, λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.76 * 10^{-4} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.5 *$

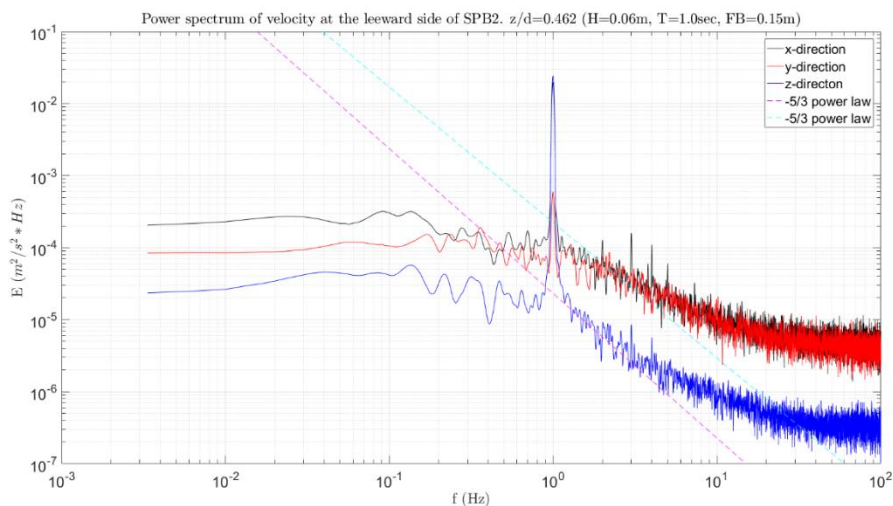
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

$10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Αντίστοιχα, η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη τιμή  $2.15 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και ελάχιστη  $-1.07 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



Σχήμα 5.3.29 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R1, z/d=0.462, υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.30. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 1\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.024 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $6 * 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται σε ένα μικρό εύρος συχνοτήτων από  $f = 1\text{Hz}$  μέχρι  $f = 4\text{Hz}$  για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας.

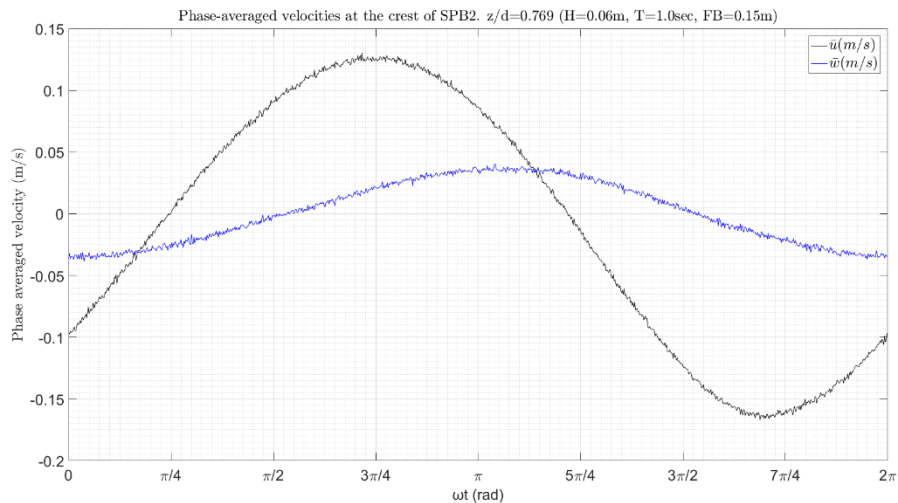


Σχήμα 5.3.30 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1, z/d=0.462, υπήνεμη πλευρά.

### 5.3.1.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

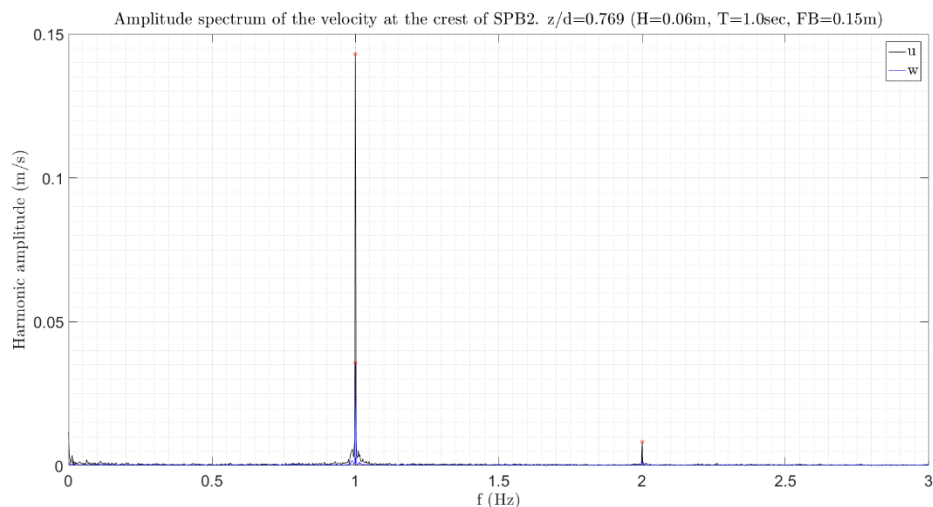
1. Στέψη, σχετική θέση,  $z/d = 0.769$ .

Στο Σχήμα 5.3.31 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.17, 0.13]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.04, 0.04]$  (m/s).



Σχήμα 5.3.31 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

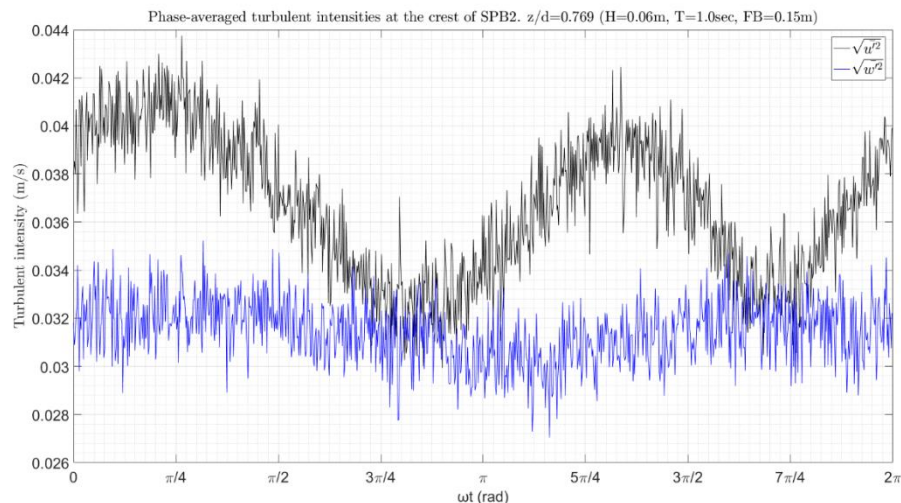
Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.32. Οι δύο αυτές συνιστώσες παρουσιάζουν περιοδικότητα με συχνότητα  $f = 1\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή, το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας ταχύτητας είναι 0.143m/s και της κατακόρυφης είναι 0.036m/s. Στη συγκεκριμένη θέση παρατηρούμε ότι παράγεται η πρώτη αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας με συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$  και πλάτος 0.008 m/s.



Σχήμα 5.3.32 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

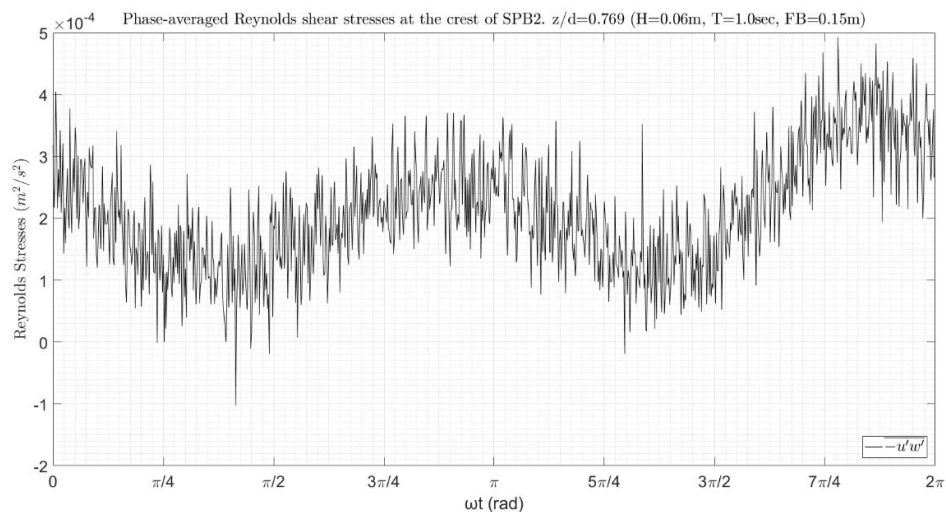
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.33. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων κατά την οριζόντια διεύθυνση παρουσιάζει περιοδικότητα, ενώ κατά την κατακόρυφη διατηρεί περίπου σταθερή ένταση μέσα στη κυματική περίοδο. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων κατά τη  $x$  και  $z$  διεύθυνση είναι περίπου  $0.044\text{m/s}$  και  $0.035\text{m/s}$  αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.33 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Στο Σχήμα 5.3.34 δίνεται η μεταβολή των διαμητρικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $4.9 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-1.0 \cdot 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}^2$ .



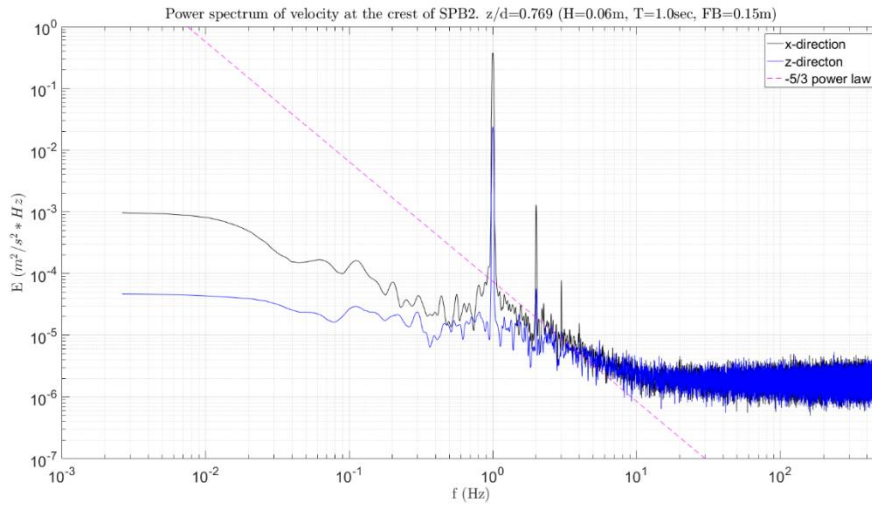
Σχήμα 5.3.34 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 2-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.35. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται μια ισχυρή αιχμή για  $f = 1\text{Hz}$  και παρατηρείται μικρή μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη συχνότητα  $1\text{Hz}$ , η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.38 \text{m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.024 \text{m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Η κλίση  $-5/3$  η οποία



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

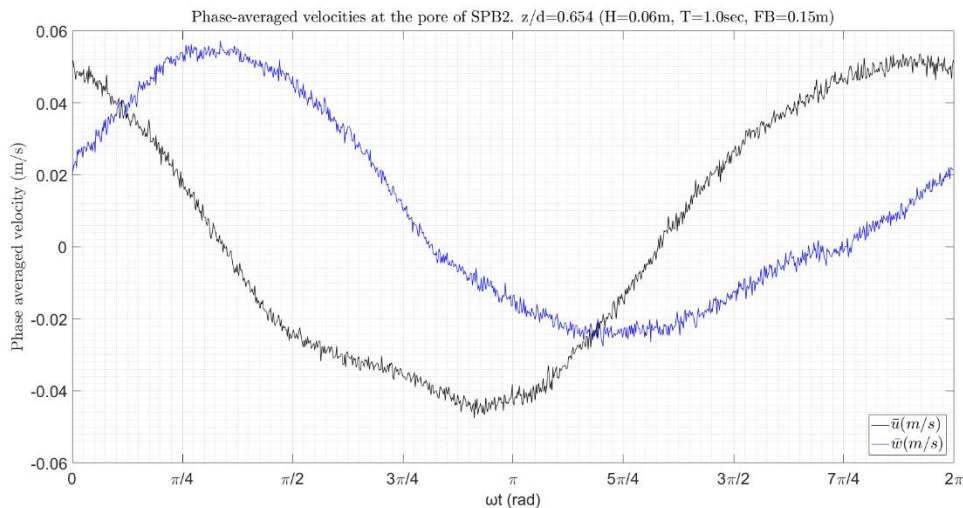
αντιπροσωπεύει το αδρανειακό υπό-εύρος, φαίνεται να λαμβάνει χώρα στο εύρος συχνοτήτων από 1Hz έως 6Hz για την οριζόντια ταχύτητα και από 2 έως 6Hz για την κατακόρυφη.



Σχήμα 5.3.35 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.769$ , στέψη.

### 2. Πόρος, σχετική θέση, $z/d = 0.654$ .

Στο Σχήμα 5.3.36 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.05, 0.05] (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.03, 0.06] (m/s).

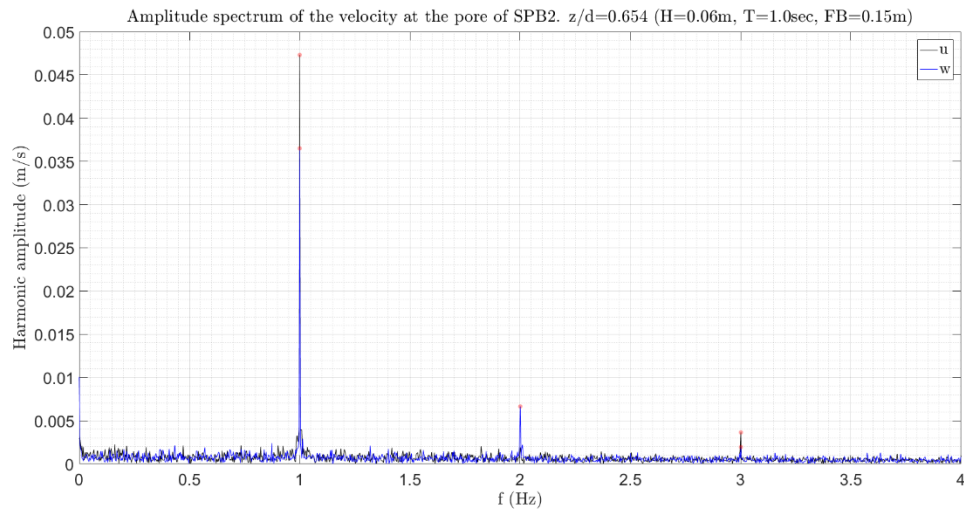


Σχήμα 5.3.36 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.37. Για την οριζόντια και την κατακόρυφη ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζει η πρώτη αρμονική συνιστώσα με την δεύτερη και την τρίτη αρμονική να είναι ορατές στο σχήμα αλλά με αρκετά μικρότερο αρμονικό πλάτος. Πιο συγκεκριμένα, για την οριζόντια ταχύτητα, το πλάτος ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής είναι

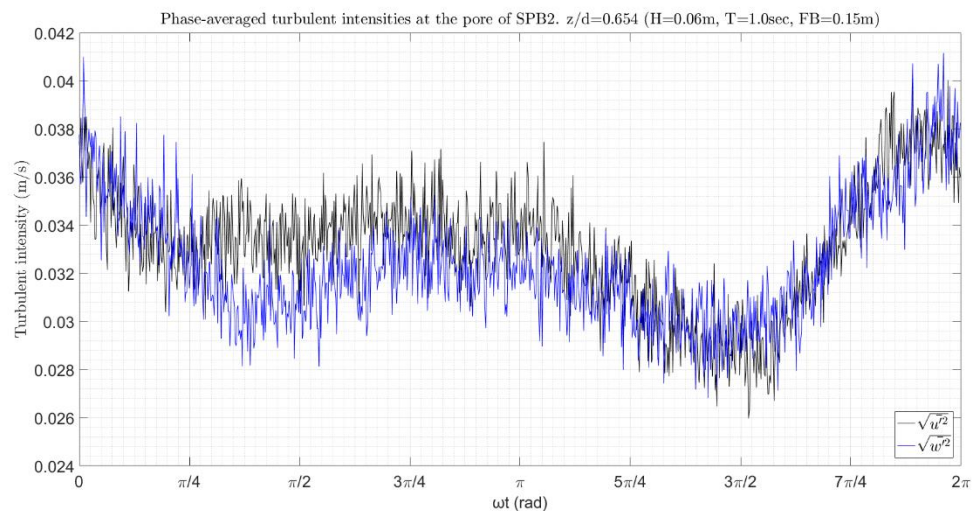
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

0.047m/s και της 3<sup>ης</sup> είναι 0.004m/s. Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα, το πλάτος ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής είναι 0.037m/s, της 2<sup>ης</sup> είναι 0.007m/s και της 3<sup>ης</sup> είναι 0.002m/s.



Σχήμα 5.3.37 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R1, z/d=0.654, πόρος.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.38. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων παρουσιάζει ίδια μεταβολή και περίπου ίδιες τιμές μέσα στη κυματική περίοδο. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι περίπου 0.04 m/s στη x και στη z διεύθυνση.



Σχήμα 5.3.38 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R1, z/d=0.654, πόρος.

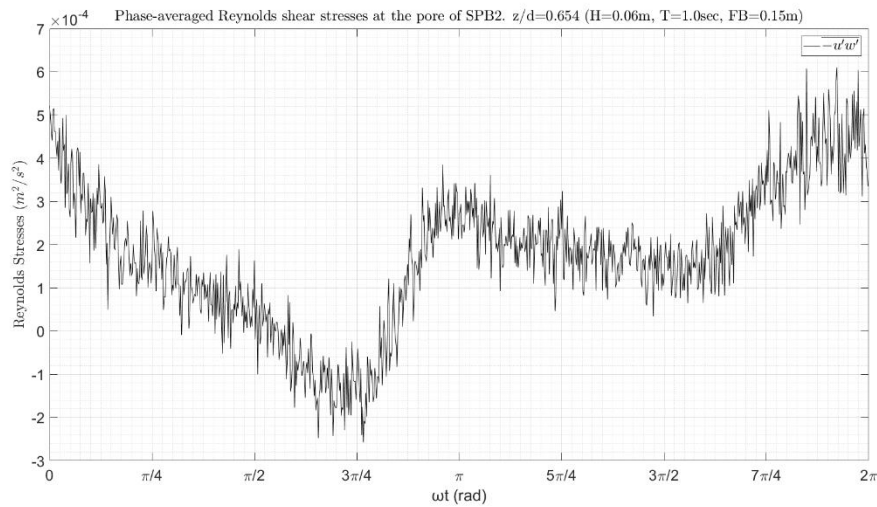
Στο Σχήμα 5.3.39 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds  $-\overline{u'w'}$  ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο x-z. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $6.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-2.6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.40. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 1\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.035 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη z είναι  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

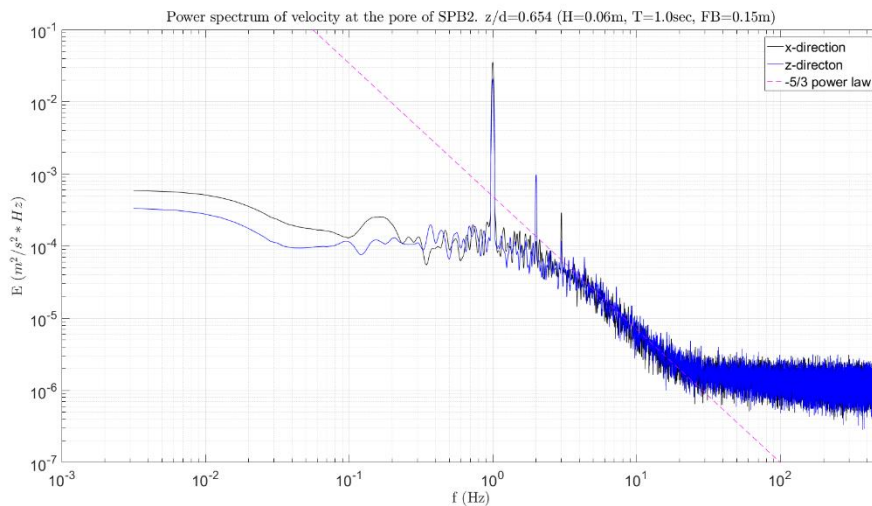


## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 20\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.3.39 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 2-R1,  $z/d=0.654$ , πόρος.



Σχήμα 5.3.40 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R1,  $z/d=0.654$ , πόρος.

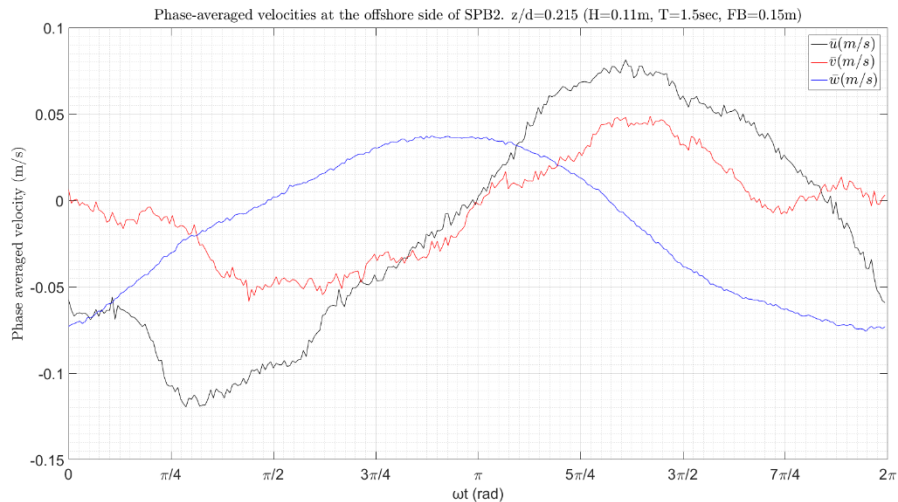
### 5.3.2 Κυματικό σενάριο 2-R2

#### 5.3.2.1 Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά

##### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

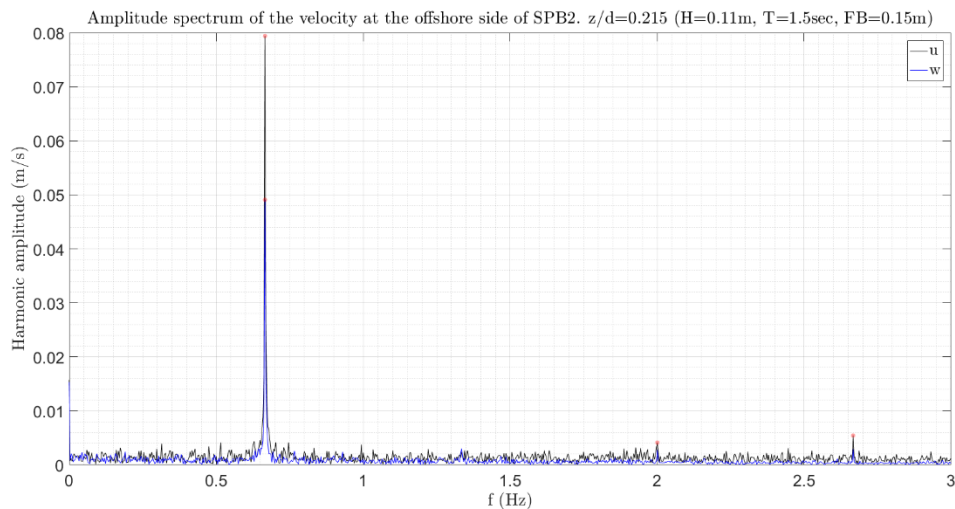
Στο Σχήμα 5.3.41 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.12, 0.08]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.08, 0.04]$  (m/s) και της ( $\bar{v}$ ) είναι  $[-0.06, 0.05]$  (m/s).

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.41 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

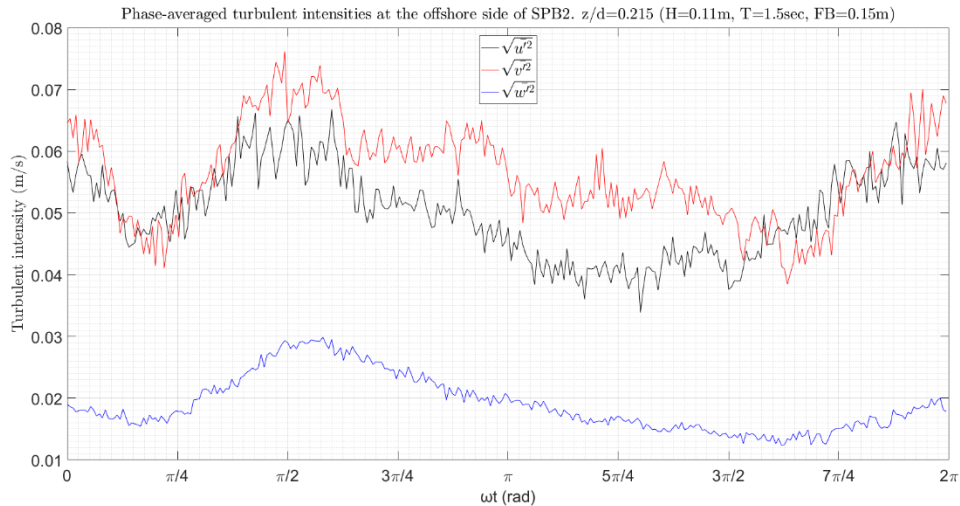
Στο Σχήμα 5.3.42 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το κύριο πλάτος ταλάντωσης για την οριζόντια και τη κατακόρυφη ταχύτητα εκδηλώνεται για συχνότητα  $f = 0.67\text{Hz}$ , με πλάτη  $0.08\text{m/s}$  και  $0.05\text{m/s}$  αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.42 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

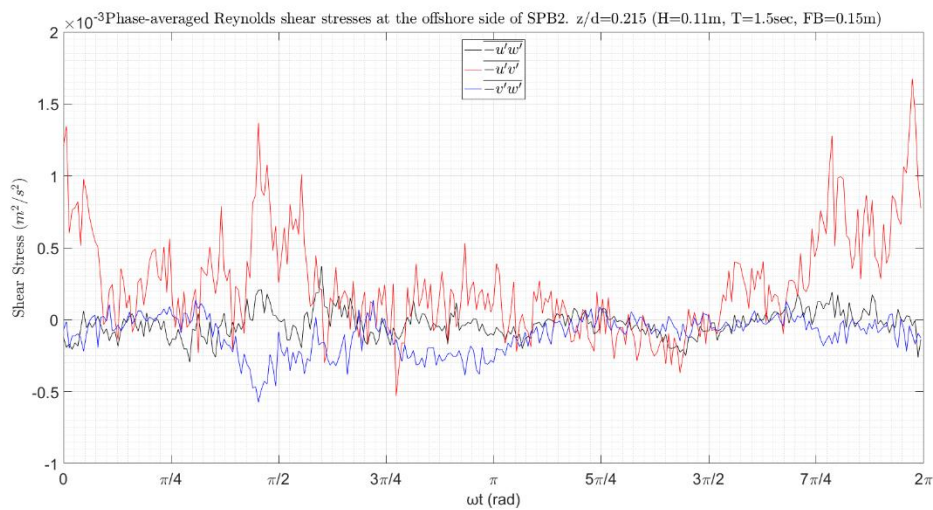
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.43. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων λαμβάνει περίπου ίδιες τιμές και παρουσιάζει παρόμοια μεταβολή στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ . Κατά τη διεύθυνση  $z$  η τυρβώδης ένταση ακολουθεί περίπου την ίδια μεταβολή αλλά με συγκριτικά πολύ μικρότερες τιμές. Η μέγιστη τυρβώδης ένταση στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.07\text{m/s}$ , στη  $y$  είναι  $0.08\text{m/s}$  και στη  $z$  είναι  $0.03\text{m/s}$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.43 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.44 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

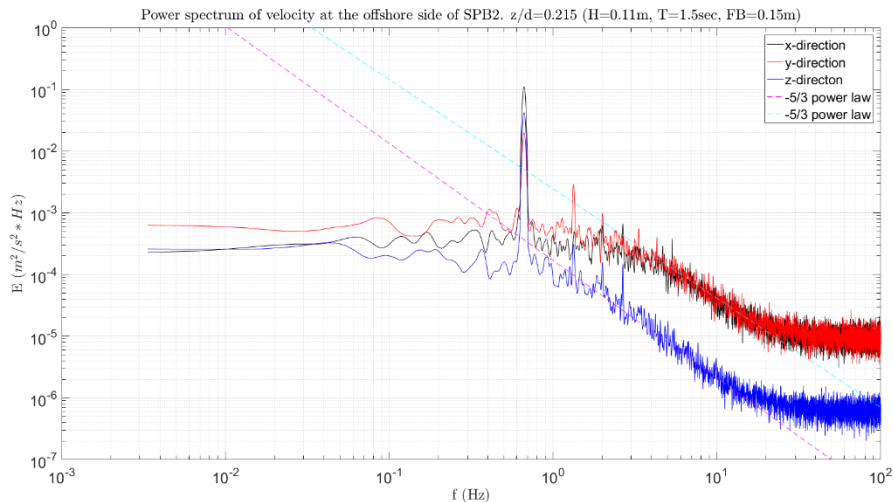


Σχήμα 5.3.44 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.45. Στα τρία φάσματα ενέργειας των ταχυτήτων εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67 \text{ Hz}$ . Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.11 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδραειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στο εύρος των συχνοτήτων από  $f = 3 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 20 \text{ Hz}$  για την οριζόντια και την εγκάρσια ταχύτητα και από  $f = 1 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 20 \text{ Hz}$  για την κατακόρυφη.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

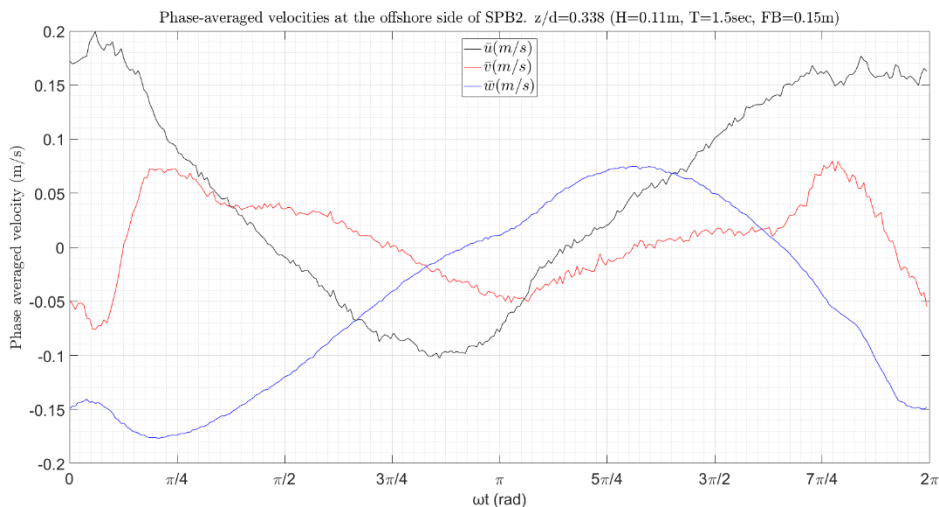


Σχήμα 5.3.45 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

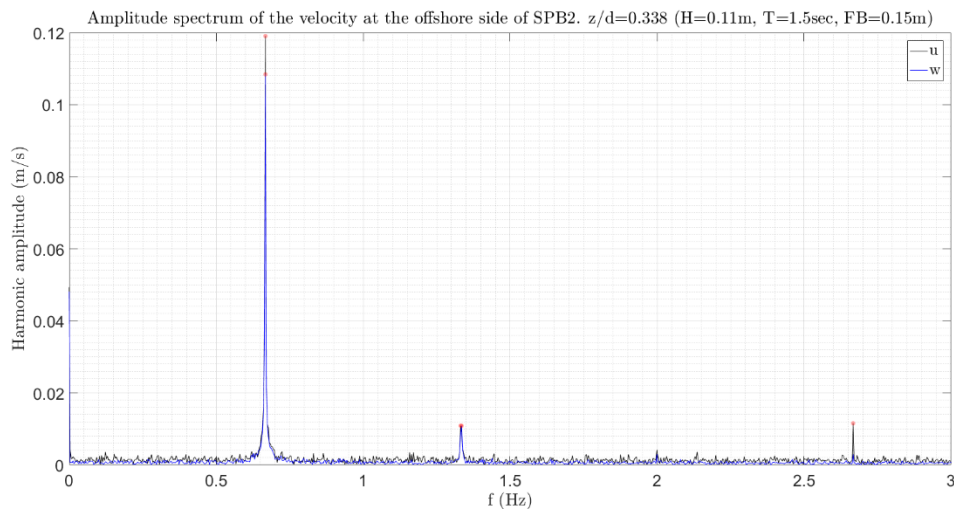
Στο Σχήμα 5.3.46 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.10, 0.20]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.18, 0.07]$  (m/s) και της ( $\bar{v}$ ) είναι  $[-0.08, 0.08]$  (m/s).

Στο Σχήμα 5.3.47 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα, στο πεδίο των συχνοτήτων. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει εύρος 0.12m/s, παρουσιάζονται τρεις ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες 1.34Hz, 2Hz και 2.67Hz με αντίστοιχα πλάτη 0.01m/s, 0.004m/s και 0.01m/s αντίστοιχα. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται στη κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) με πλάτος 0.11m/s και στη δεύτερη αρμονική με συχνότητα  $f = 1.33\text{Hz}$  και πλάτος 0.01 m/s.



Σχήμα 5.3.46 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

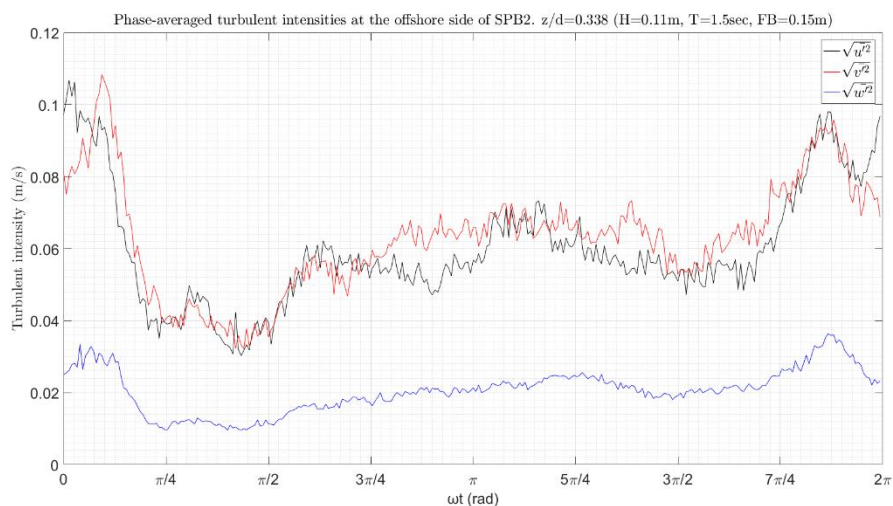
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.47 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R2, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.48. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση της τύρβης στην σε όλες τις διευθύνσεις της ροής ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Κατά τις διευθύνσεις x και y η τυρβώδης ένταση λαμβάνει επιπλέον σχεδόν ίδιες τιμές μέσα στη κυματική περίοδο, ενώ κατά την z διεύθυνση η ένταση είναι αρκετά μικρότερη.

Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.11m/s περίπου ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.04m/s.

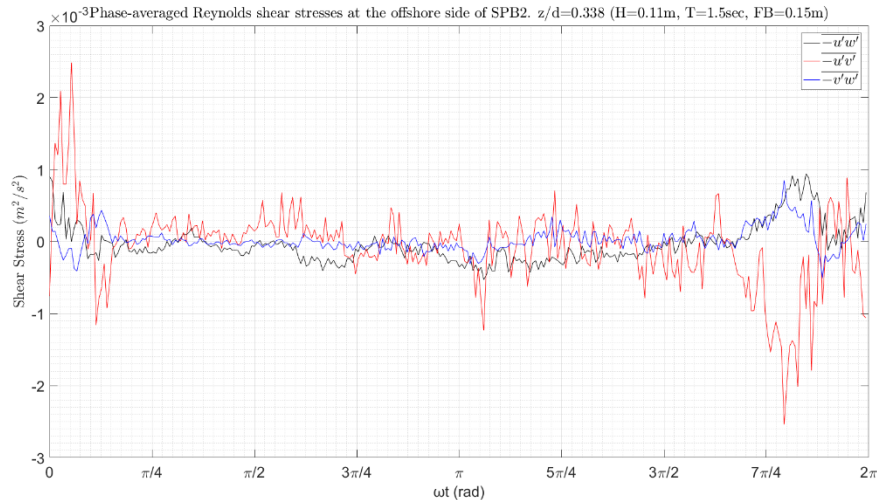


Σχήμα 5.3.48 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.49 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



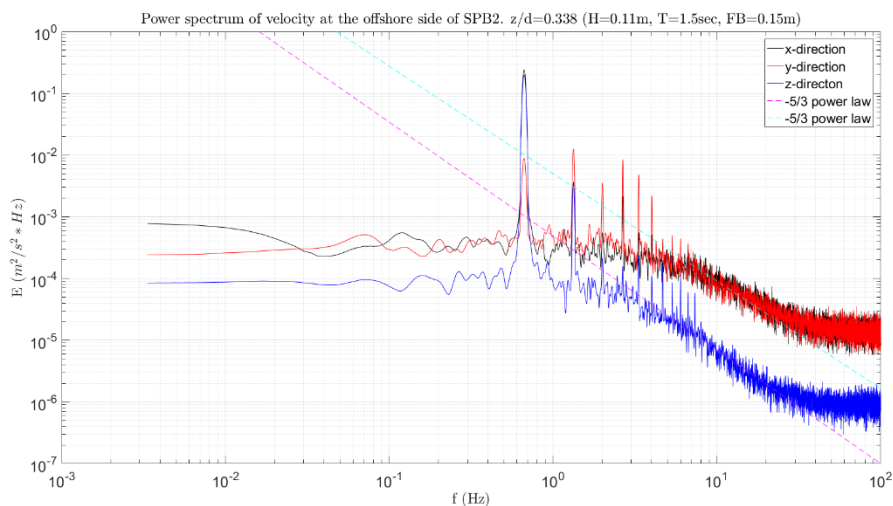
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.49 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R2, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.50. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Στο φάσμα της εγκάρσιας ταχύτητας παρουσιάζεται έντονη μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές ενώ υπόλοιπες δύο διευθύνσεις είναι αρκετά πιο περιορισμένη. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.23\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη z είναι  $0.20\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.009\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης -5/3 του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στο εύρος των συχνοτήτων από  $f = 7\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$  για την οριζόντια και την εγκάρσια διεύθυνση και από  $f = 3\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$  για την κατακόρυφη διεύθυνση.

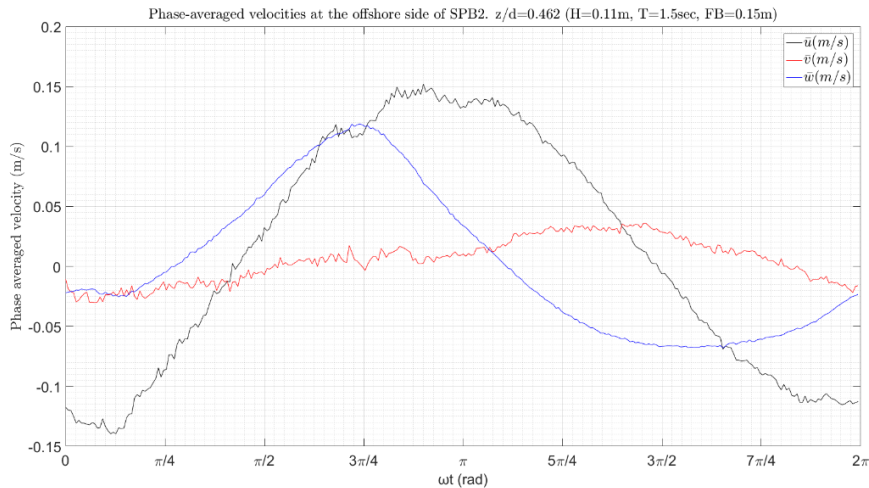


Σχήμα 5.3.50 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.



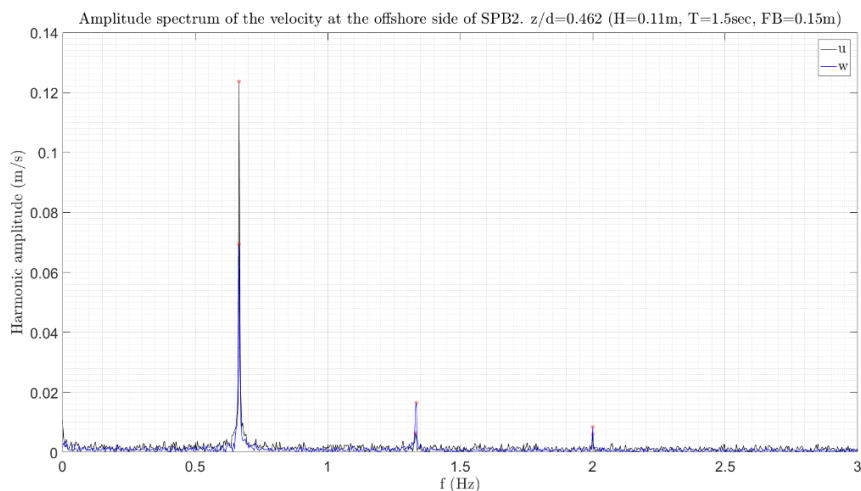
3. Σχετική θέση,  $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.3.51 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.14, 0.15] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.07, 0.12] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.03, 0.04] (m/s).



Σχήμα 5.3.51 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

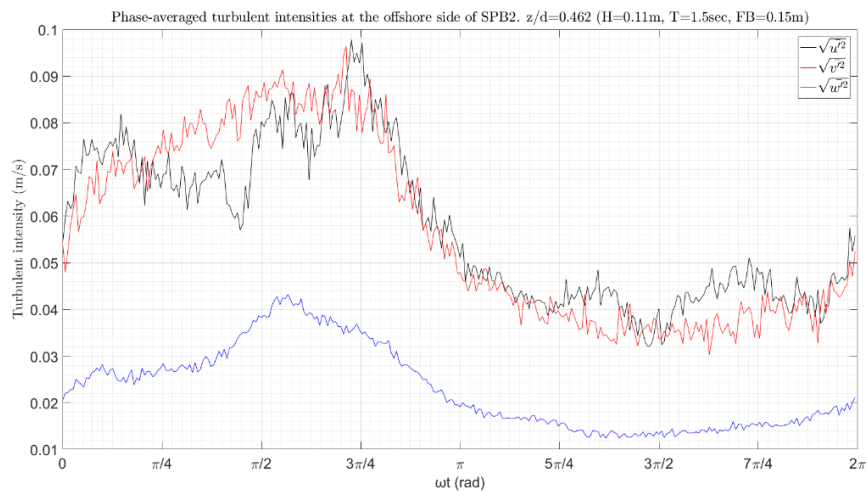
Στο Σχήμα 5.3.52 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67Hz$ ) η οποία έχει εύρος 0.12m/s, παρουσιάζονται δύο ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της κύριας, μία για  $f = 1.334Hz$  και εύρος 0.006m/s και μία για  $f = 2Hz$  με πλάτος ταλάντωσης 0.006m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνει και αυτή αντίστοιχα τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, 0.07m/s, να εμφανίζεται στη κύρια συχνότητα,  $f = 0.67Hz$ , και δύο μικρότερα πλάτη ταλάντωσης, 0.017m/s και 0.008m/s, στις συχνότητες  $f = 1.334Hz$  και  $f = 2Hz$  αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.52 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

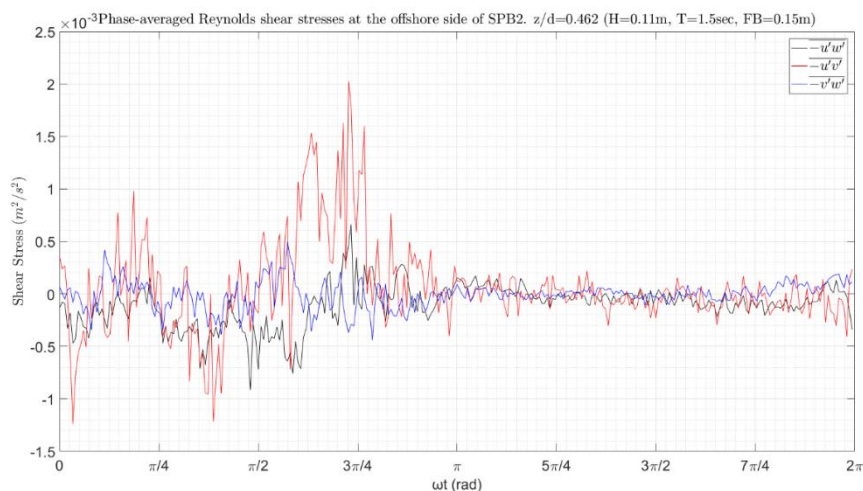
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.53. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση της τύρβης στην σε όλες τις διευθύνσεις της ροής ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Κατά τις διευθύνσεις  $x$  και  $y$  η τυρβώδης ένταση λαμβάνει επιπλέον σχεδόν ίδιες τιμές μέσα στη κυματική περίοδο, ενώ κατά την  $z$  διεύθυνση η ένταση είναι αρκετά μικρότερη. Κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.1m/s περίπου ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.04m/s.



Σχήμα 5.3.53 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.54 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο  $x$ - $y$  όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



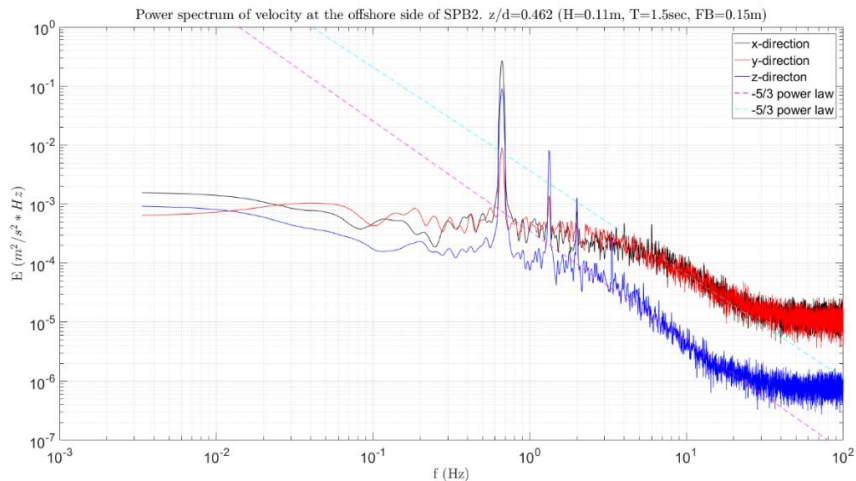
Σχήμα 5.3.54 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο),  $x$ - $y$  (κόκκινο) και  $y$ - $z$  (μπλε) επίπεδο. 2-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.55. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή

Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.27 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη  $z$  είναι  $0.09 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.009 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη ταχύτητα λαμβάνει χώρα από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$ , ενώ το φάσμα για την οριζόντια και την εγκάρσια ταχύτητα από  $f = 5\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.3.55 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

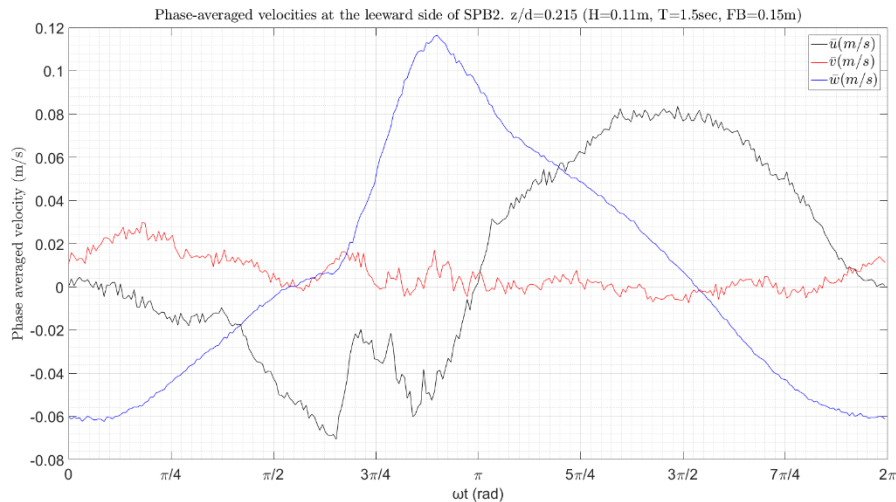
### 5.3.2.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

#### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

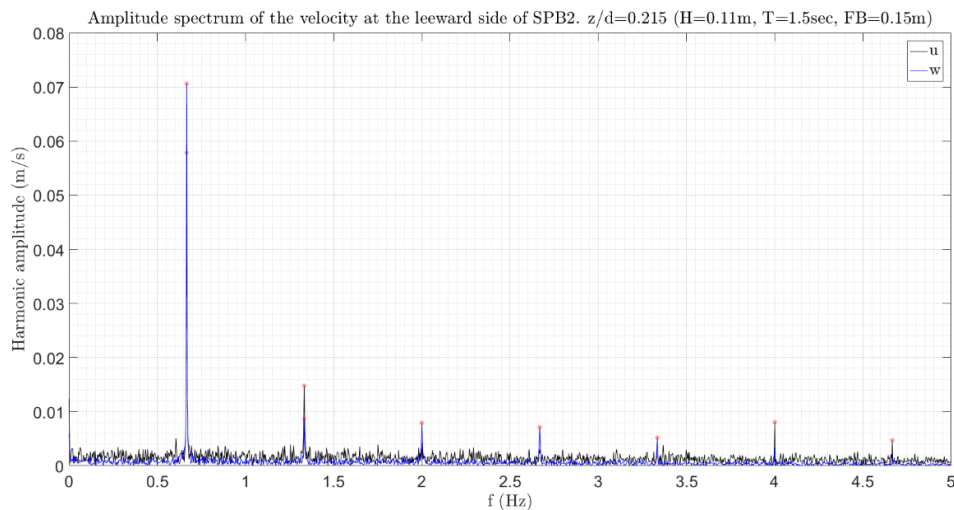
Στο Σχήμα 5.3.56 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.07, 0.08]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.06, 0.12]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.007, 0.0]$  (m/s).

Στο Σχήμα 5.3.57 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει πλάτος ταλάντωσης  $0.06\text{m/s}$ , παρουσιάζονται αρκετές ακόμα αρμονικές συνιστώσες με κυριότερη τη δεύτερη ( $f = 1.334\text{Hz}$ ) η οποία έχει πλάτος  $0.01\text{m/s}$ . Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνει το κύριο πλάτος ταλάντωσης,  $0.07\text{m/s}$ , στη κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) και τρία μικρότερα πλάτη ταλάντωσης,  $0.008\text{m/s}$ , στη  $2^{\text{η}}$ ,  $3^{\text{η}}$  και  $4^{\text{η}}$  αρμονική συνιστώσα.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.56 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

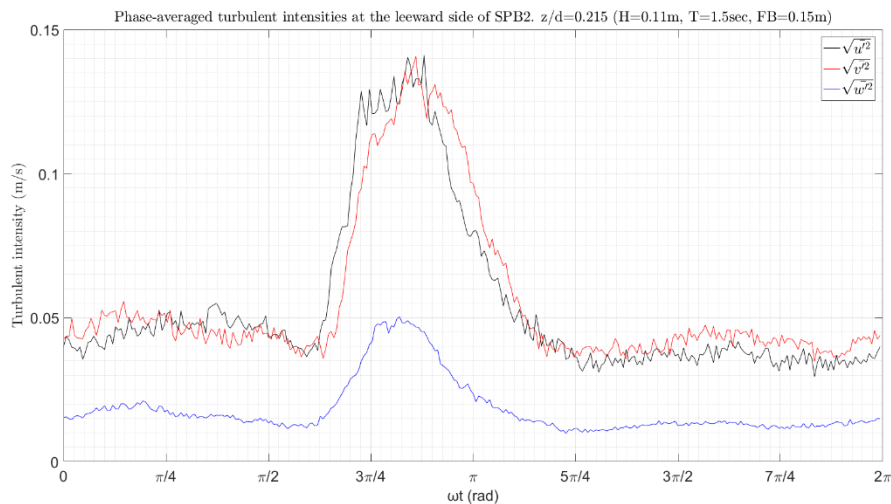


Σχήμα 5.3.57 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

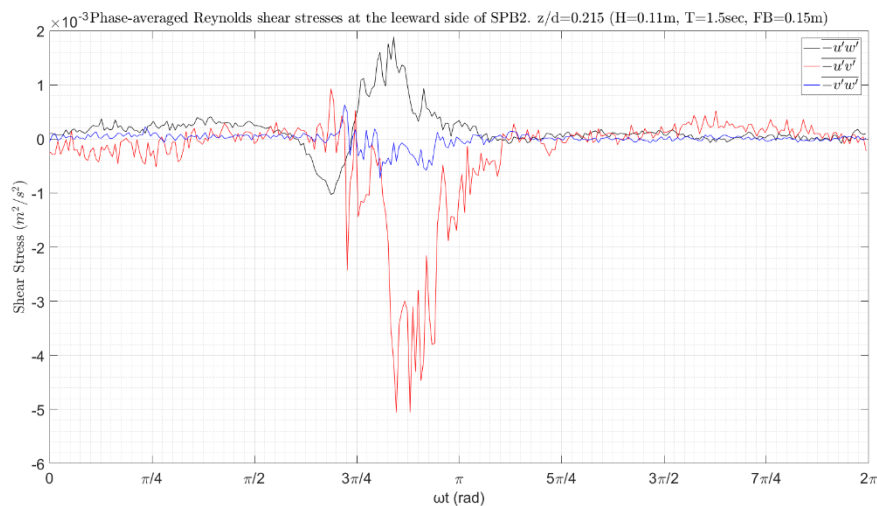
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.58. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι κατά την οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι περίπου ίδια σε μέγεθος και σχεδόν συμπίπτουν σε όλη τη διάρκεια της κυματικής περιόδου. Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις η τυρβώδης ένταση στη κατακόρυφη διεύθυνση είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή  $0.14 \text{ m/s}$  περίπου ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα  $0.05 \text{ m/s}$ .

Στο Σχήμα 5.3.59 δίνεται η μεταβολή των διαμηθικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Μεγάλες διαμηθικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $0.93 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-5.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Στο επίπεδο x-z η  $-\overline{u'w'}$  λαμβάνει μέγιστη τιμή  $1.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και ελάχιστη  $-1.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.58 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



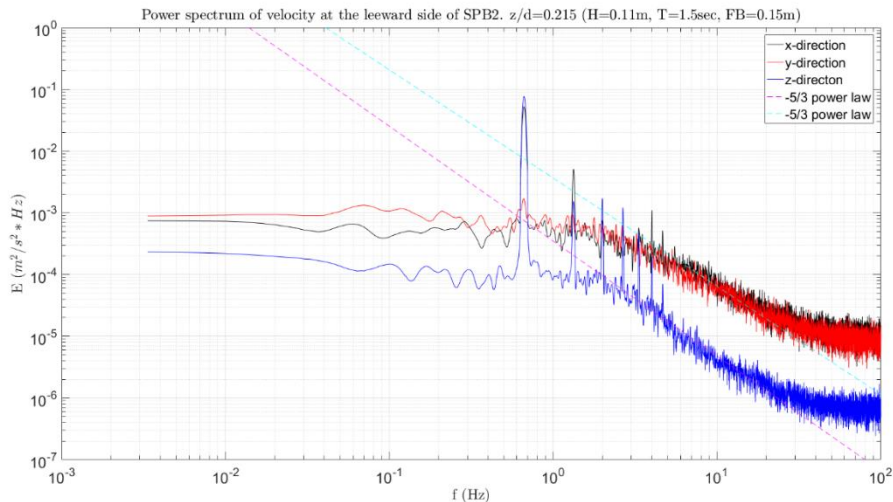
Σχήμα 5.3.59 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.60. Στα φάσματα της οριζόντιας και κατακόρυφης ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.05\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη z είναι  $0.08\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.002\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 4\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$  περίπου.



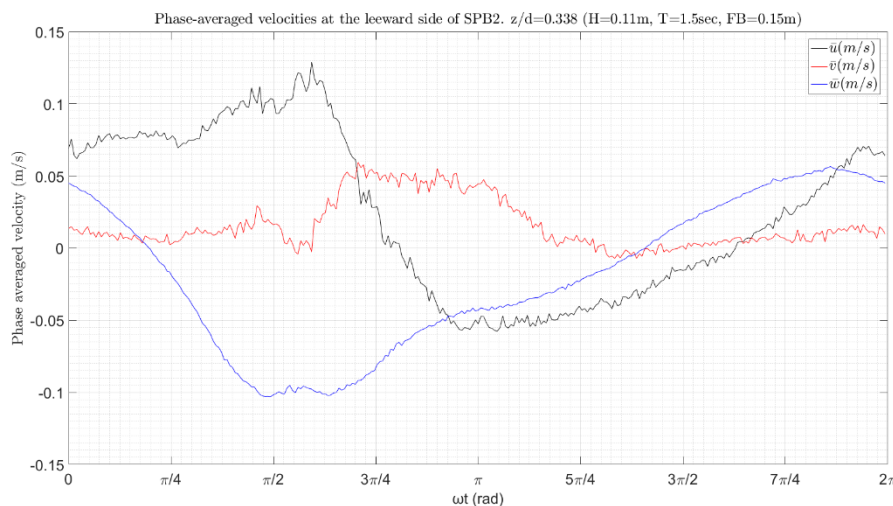
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.60 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.3.61 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.06, 0.13]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.1, 0.06]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.01, 0.06]$  (m/s).



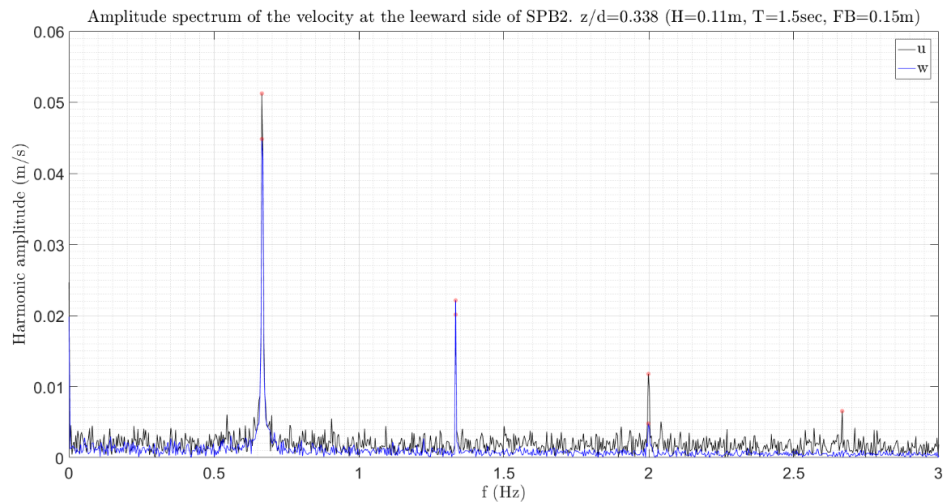
Σχήμα 5.3.61 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.62 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει πλάτος ταλάντωσης 0.05m/s, παρουσιάζονται τρεις ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της κύριας, μία για  $f = 1.334\text{Hz}$  και πλάτος 0.02 m/s, μία για  $f = 2\text{Hz}$  με πλάτος ταλάντωσης 0.01m/s και μία για  $f = 2.67\text{Hz}$  με πλάτος 0.007m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται



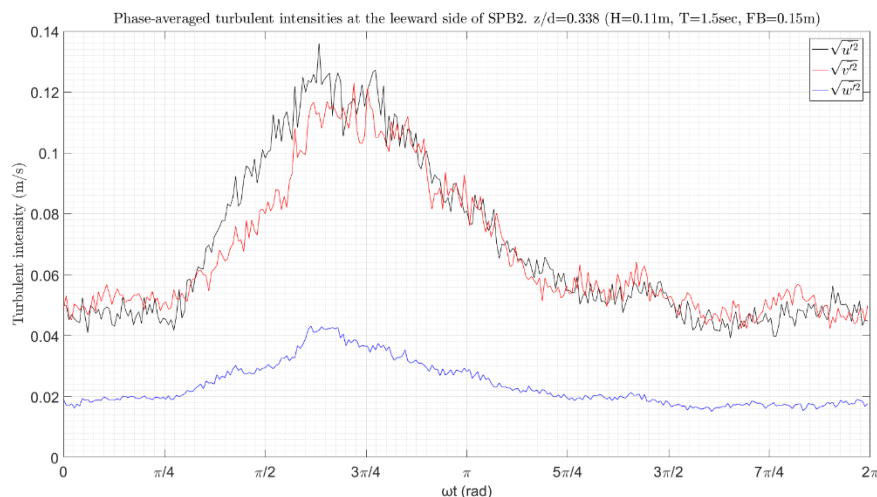
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

σε τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, 0.04m/s, να εμφανίζεται στη κύρια συχνότητα,  $f = 0.67\text{Hz}$ , και δύο μικρότερα πλάτη ταλάντωσης, 0.02m/s και 0.005m/s, στις συχνότητες  $f = 1.334\text{Hz}$  και  $f = 2\text{Hz}$  αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.62 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

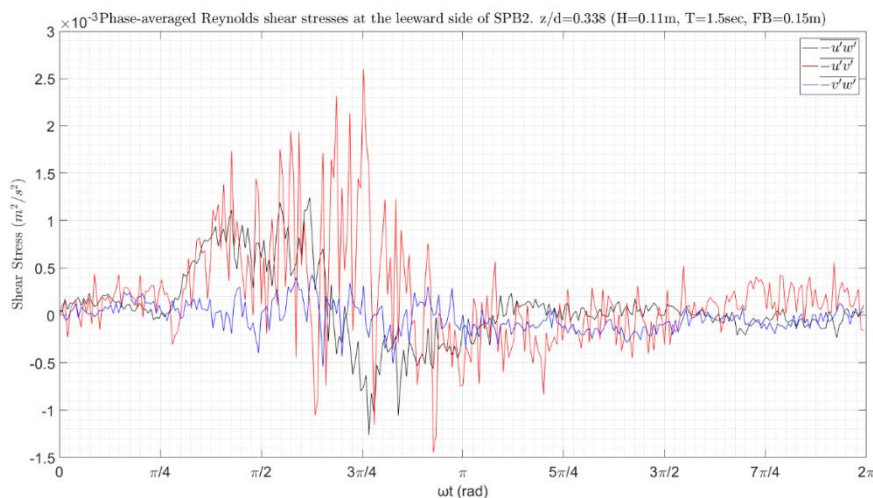
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.63. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις η τυρβώδης ένταση στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση σχεδόν ταυτίζονται μέσα στη κυματική περίοδο, ενώ στη κατακόρυφη διεύθυνση είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.14m/s και 0.12m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.04m/s.



Σχήμα 5.3.63 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

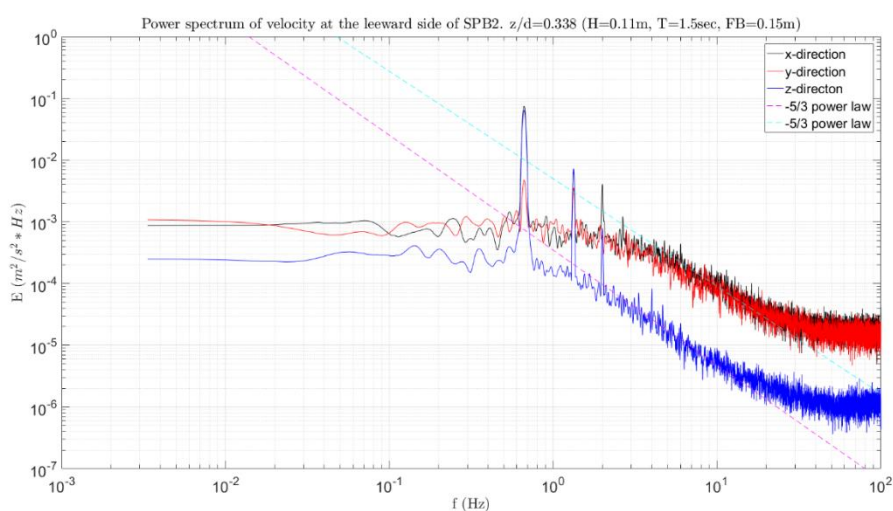
Στο Σχήμα 5.3.64 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $2.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



Σχήμα 5.3.64 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R2, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.65. Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα ( $f = 0.67 \text{ Hz}$ ) της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.08 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.06 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.005 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

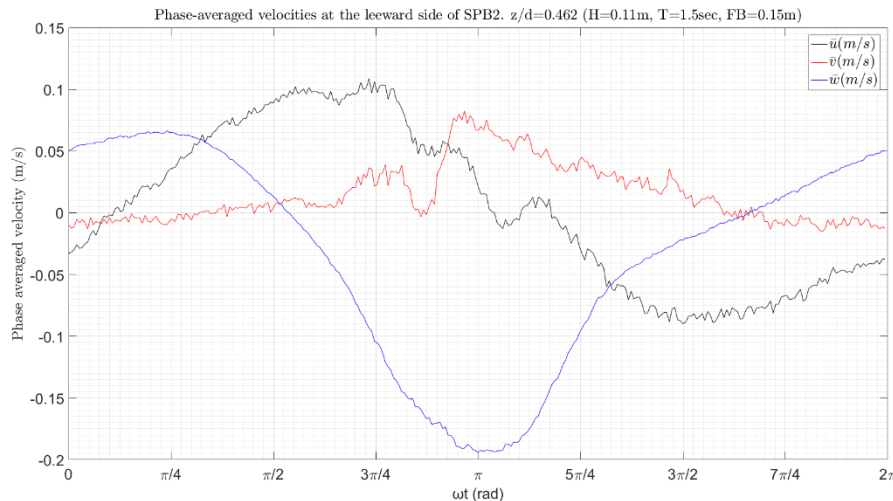
Ο νόμος δύναμης -5/3 του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 30 \text{ Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 4 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 20 \text{ Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.3.65 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

3. Σχετική θέση,  $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.3.66 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.09, 0.11] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.19, 0.07] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.02, 0.08] (m/s).



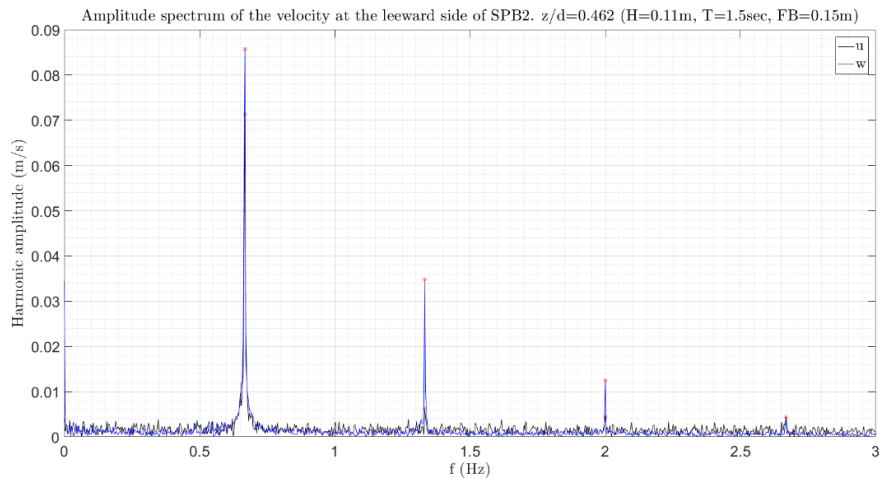
Σχήμα 5.3.66 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.67 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα εκτός από την κύρια συχνότητα ( $f = 0.67\text{Hz}$ ) η οποία έχει πλάτος ταλάντωσης 0.07m/s, παρουσιάζονται τρεις ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της κύριας οι οποίες έχουν πολύ μικρότερο πλάτος ταλάντωσης που κυμαίνεται στα 0.005m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται και αυτή αντίστοιχα σε τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες με το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης, 0.09m/s, να εμφανίζεται στη κύρια συχνότητα,  $f = 0.67\text{Hz}$ , και δύο μικρότερα πλάτη ταλάντωσης, 0.03m/s και 0.01m/s, στις συχνότητες  $f = 1.334\text{Hz}$  και  $f = 2\text{Hz}$  αντίστοιχα.

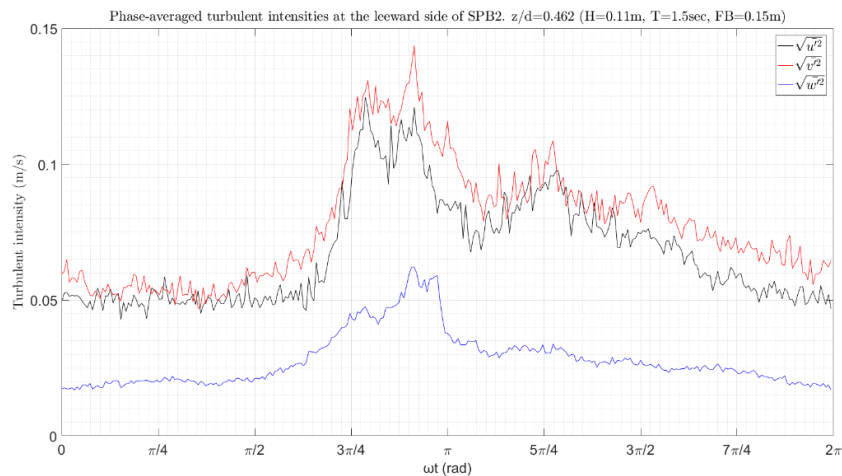
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.68. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Όμοια με τις προηγούμενες περιπτώσεις η τυρβώδης ένταση στη κατακόρυφη διεύθυνση είναι σημαντικά μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο διευθύνσεις όπου σχεδόν ταυτίζεται μέσα στη κυματική περίοδο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.12m/s και 0.14m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.06m/s.

Στο Σχήμα 5.3.69 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.3 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.9 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

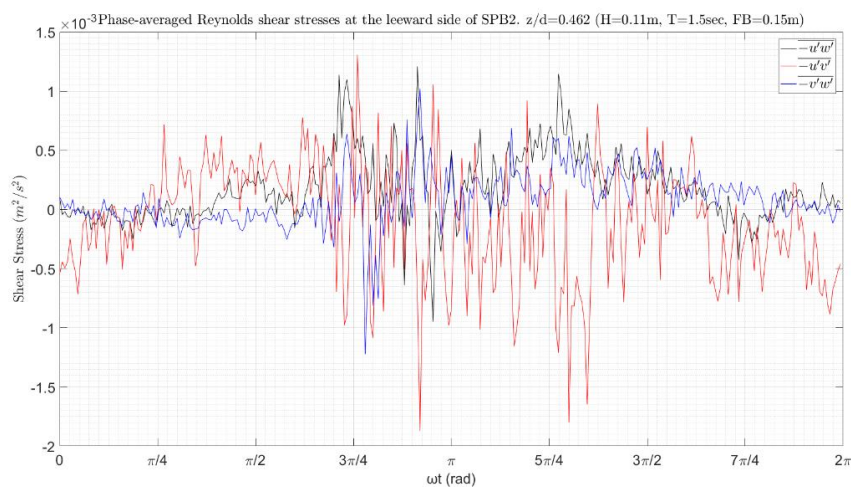
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.67 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.68 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

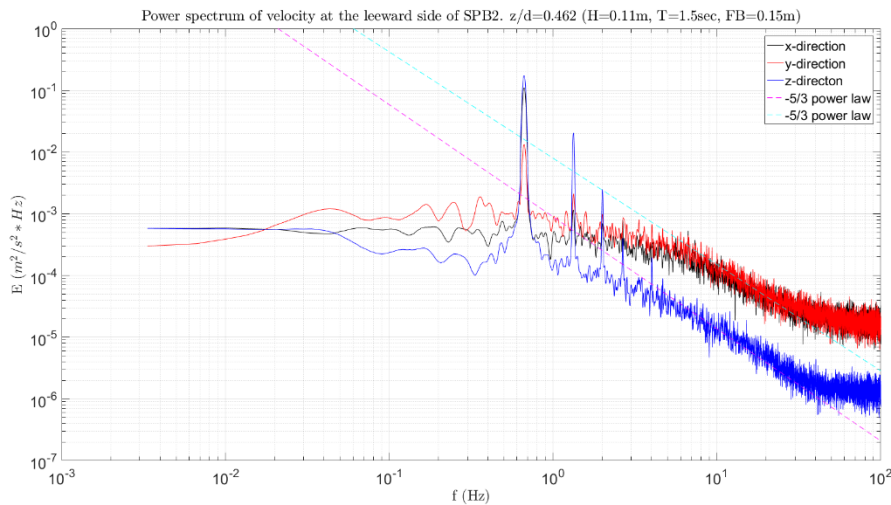


Σχήμα 5.3.69 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο),  $x$ - $y$  (κόκκινο) και  $y$ - $z$  (μπλε) επίπεδο. 2-R2,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.70. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.11\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη  $z$  είναι  $0.17\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.01\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 4\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 30\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.3.70 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

### 5.3.2.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

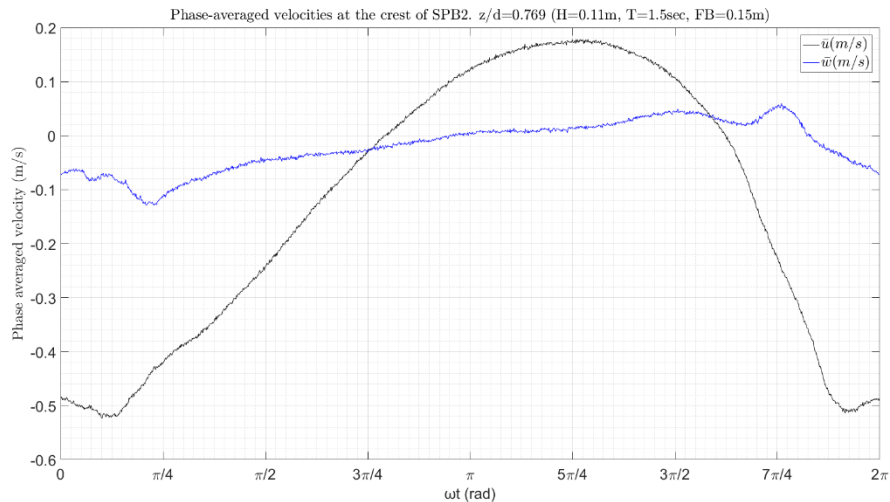
#### 1. Στέψη, σχετική θέση, $z/d = 0.769$ .

Στο Σχήμα 5.3.71 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.52, 0.18]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.13, 0.06]$  (m/s).

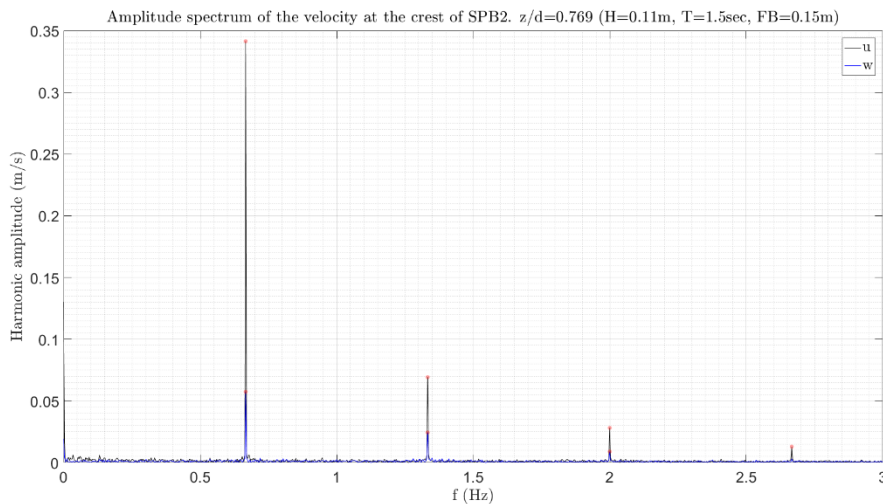
Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.72. Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει συνολικά τέσσερις αρμονικές συνιστώσες. Η 1<sup>η</sup> αρμονική, με συχνότητα  $f = 0.67\text{Hz}$ , έχει πλάτος  $0.34\text{m/s}$ , η 2<sup>η</sup> αρμονική, με συχνότητα  $f = 1.34\text{Hz}$ , έχει πλάτος  $0.07\text{m/s}$ , η 3<sup>η</sup> αρμονική, με συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$ , έχει πλάτος  $0.03\text{m/s}$  και η 4<sup>η</sup> αρμονική, με συχνότητα  $f = 2.67\text{Hz}$ , έχει πλάτος  $0.01\text{m/s}$ . Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται τρεις αρμονικές συνιστώσες με πλάτη ταλάντωσης  $0.06\text{m/s}$ ,  $0.02\text{ m/s}$  και  $0.01\text{m/s}$  για συχνότητες  $f = 0.67\text{Hz}$ ,  $f = 1.34\text{Hz}$  και  $f = 2\text{Hz}$ .



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.71 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.



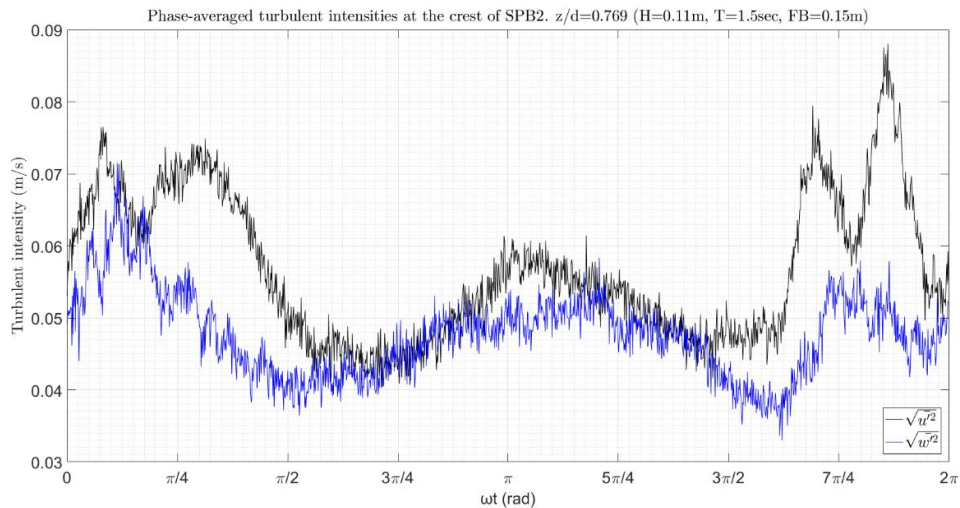
Σχήμα 5.3.72 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.73. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι γενικά μεγαλύτερη στην οριζόντια (μαύρο) απ' ό τι στη κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση κατά τη διάρκεια της κυματικής περιόδου. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου  $0.09\text{m/s}$  και της κατακόρυφης  $0.07\text{m/s}$ .

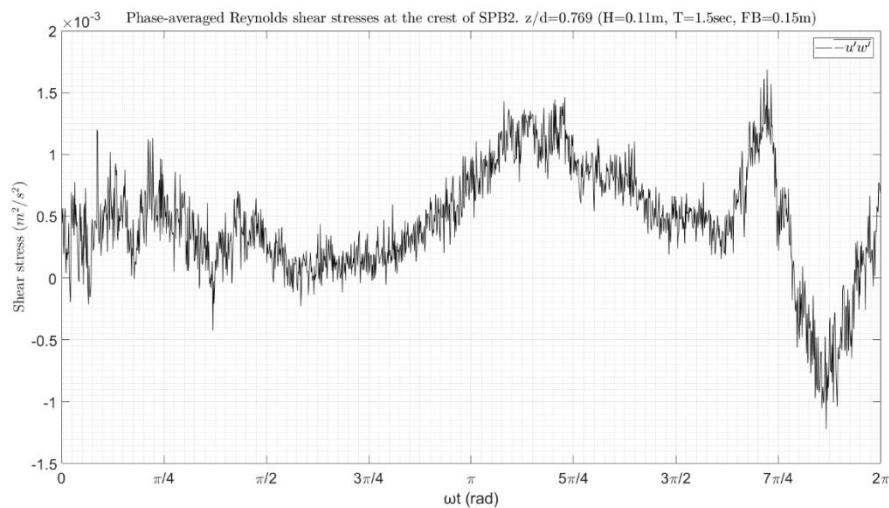
Στο Σχήμα 5.3.74 δίνεται η μεταβολή των διαμηθικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-1.22 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



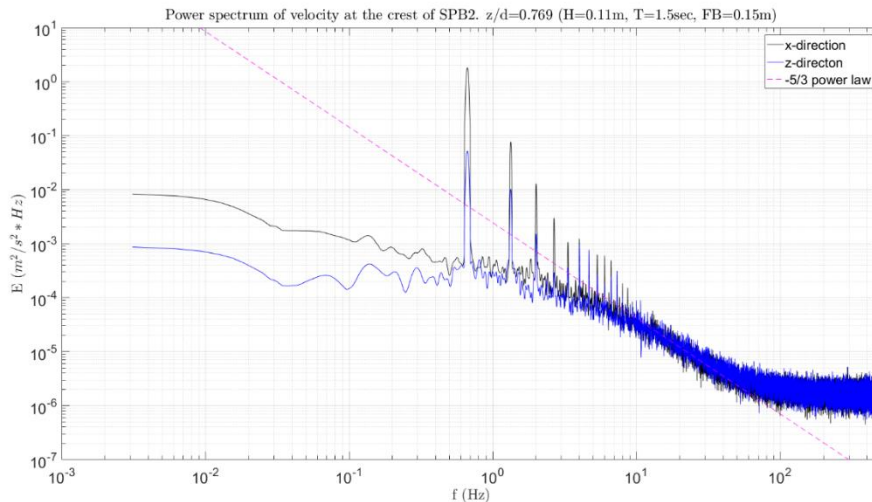
Σχήμα 5.3.73 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.



Σχήμα 5.3.74 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 2-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.75. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται αιχμή για  $f = 0.67\text{Hz}$ . Για τη συχνότητα αυτή η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $1.7\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.05\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα (πρώτη αρμονική) σε υψηλότερες αρμονικές τόσο για την οριζόντια όσο και για την κατακόρυφη ταχύτητα. Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 7\text{Hz}$  και  $f = 70\text{Hz}$ .

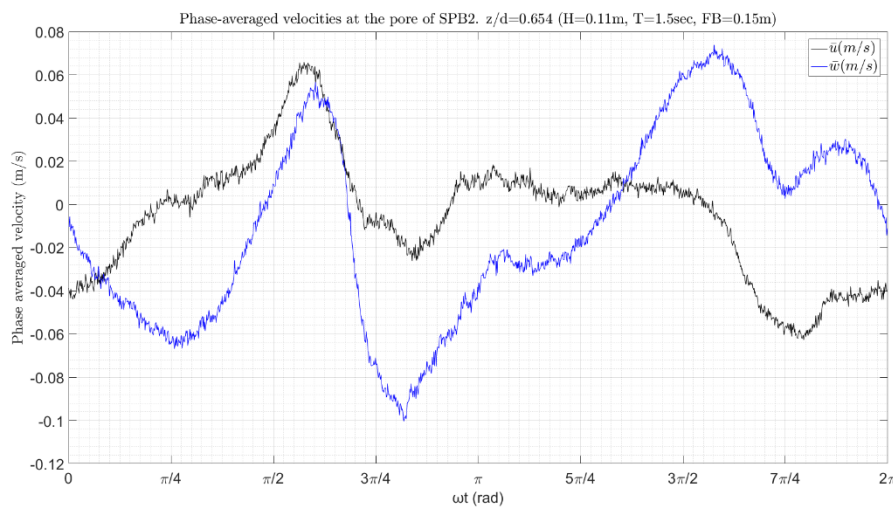
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.75 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.769$ , στέψη.

### 2. Πόρος, σχετική θέση $z/d = 0.654$ .

Στο Σχήμα 5.3.76 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.06, 0.07]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.1, 0.07]$  (m/s).

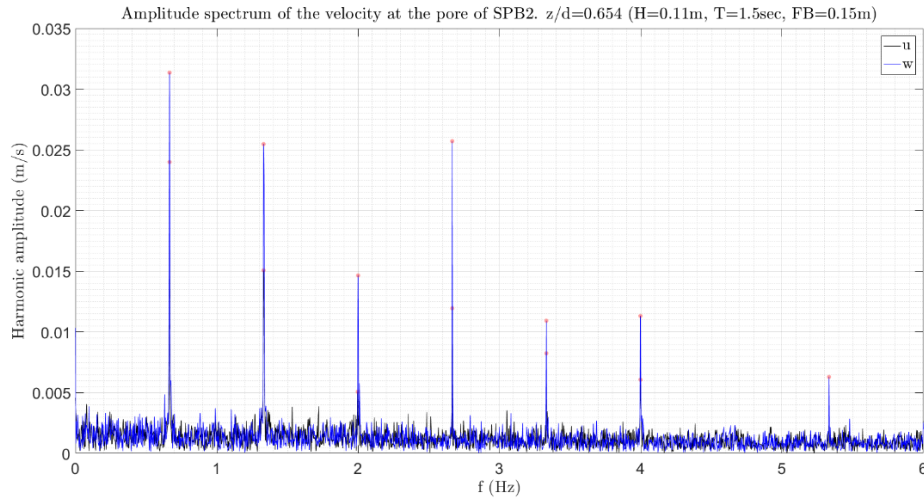


Σχήμα 5.3.76 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.77. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται σημαντική παραγωγή αρμονικών συνιστωσών και στις δύο διευθύνσεις της ταχύτητας. Για την οριζόντια ταχύτητα τα δύο μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης παρουσιάζουν η 1<sup>η</sup> και η 2<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα αλλά εξίσου παρατηρούνται σημαντικά πλάτη ταλάντωσης και στις ανώτερες αρμονικές. Η 1<sup>η</sup> αρμονική έχει πλάτος 0.025m/s και η 2<sup>η</sup> 0.015m/s. Η ταχύτητα στη κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει σημαντικό πλάτος ταλάντωσης στις τέσσερις πρώτες αρμονικές συνιστώσες. Πιο

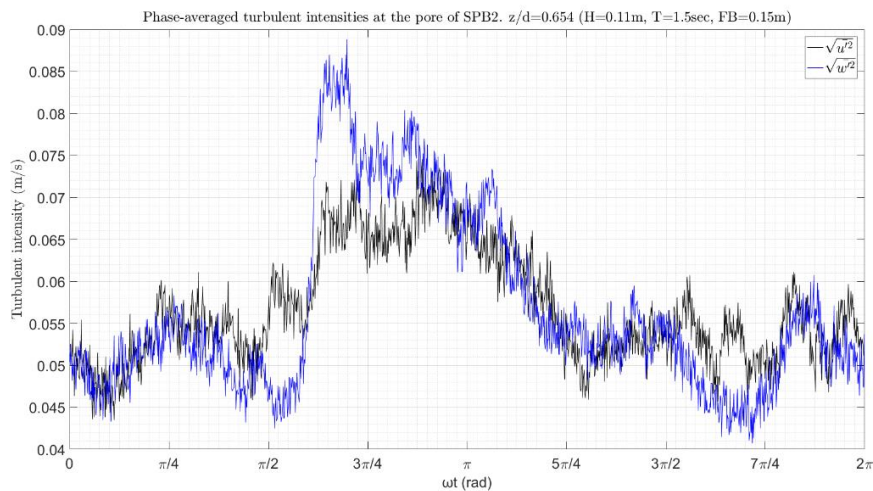
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

συγκεκριμένα, για την κατακόρυφη ταχύτητα, το πλάτος ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής είναι 0.031m/s, της 2<sup>ης</sup> είναι 0.025m/s, της 3<sup>ης</sup> είναι 0.015m/s και της 4<sup>ης</sup> 0.026m/s.



Σχήμα 5.3.77 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.654$ , πόρος.

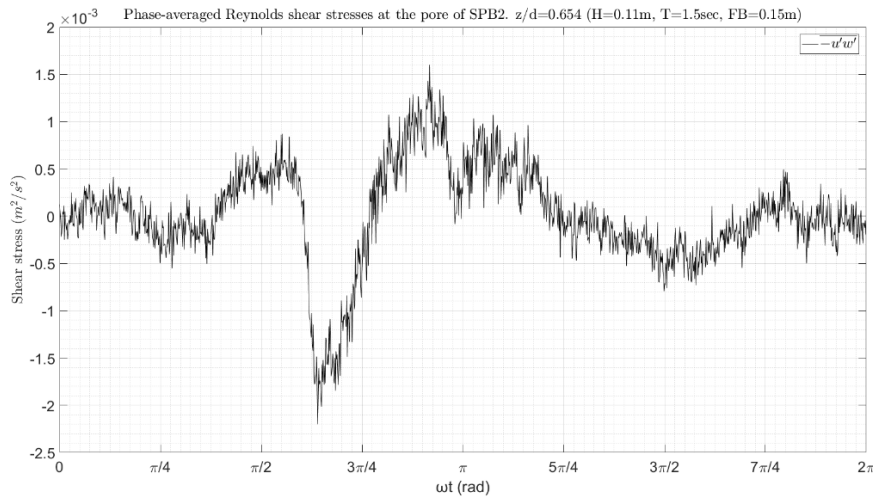
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.78. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων σχεδόν συμπίπτει σε όλη τη διάρκεια της κυματικής περιόδου με απόκλιση μόνο κάποιες μέγιστες τιμές κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.07m/s και της κατακόρυφης 0.09m/s.



Σχήμα 5.3.78 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.654$ , πόρος.

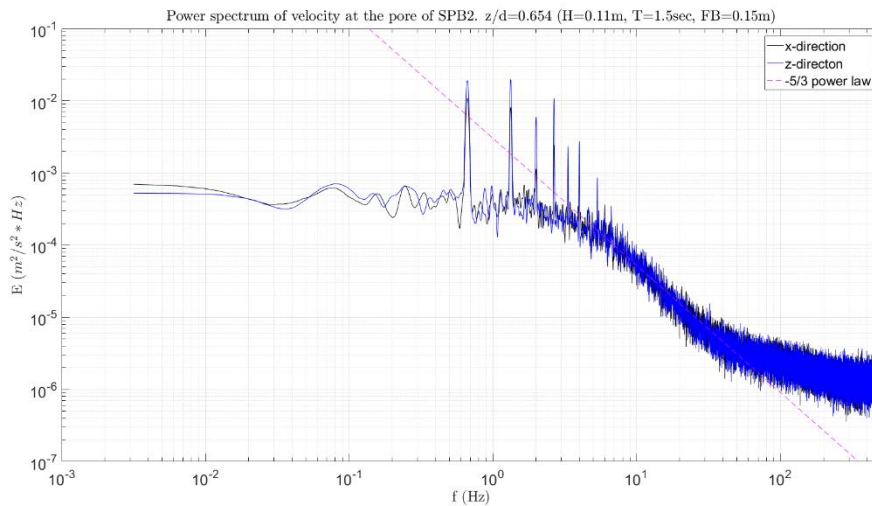
Στο Σχήμα 5.3.79 δίνεται η μεταβολή των διαμηθικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $1.6 * 10^{-3} m^2/s^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-2.2 * 10^{-3} m^2/s^2$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.79 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 2-R2,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.80. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης της ροής,  $f = 0.67\text{Hz}$ , η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.01\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.02\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα (πρώτη αρμονική) σε υψηλότερες αρμονικές και στις δύο διευθύνσεις. Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 5\text{Hz}$  και  $f = 50\text{Hz}$ .



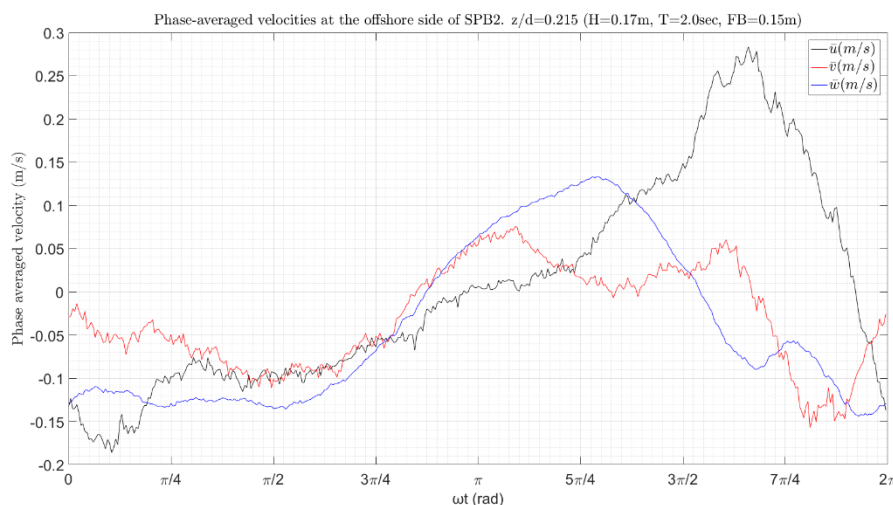
Σχήμα 5.3.80 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R2,  $z/d=0.654$ , πόρος.

### 5.3.3 Κυματικό σενάριο 2-R3

#### 5.3.3.1 Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά

##### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.3.81 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.19, 0.28] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.14, 0.13] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.16, 0.08] (m/s).



Σχήμα 5.3.81 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

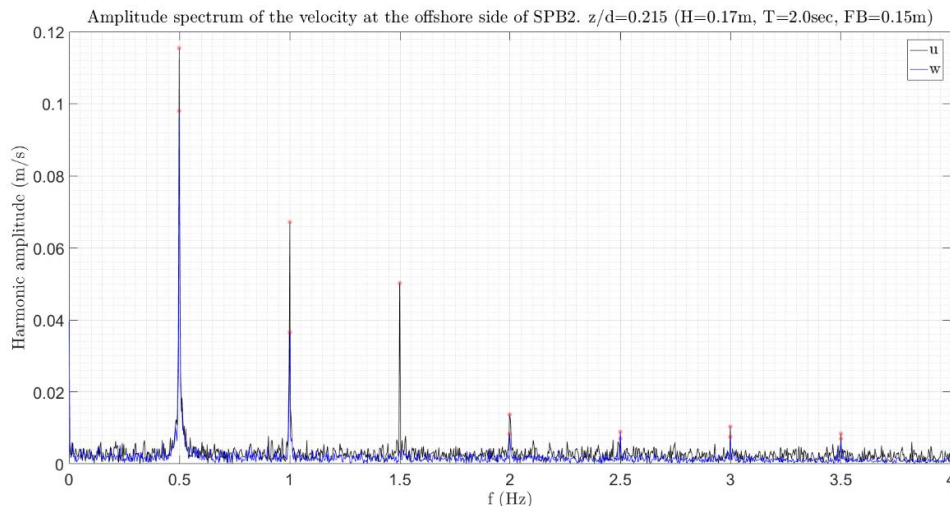
Στο Σχήμα 5.3.82 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα, σημαντικό πλάτος ταλάντωσης εκδηλώνεται στις τρεις πρώτες αρμονικές συνιστώσες ενώ οι ανώτερες αρμονικές έχουν συγκριτικά αμελητέο πλάτος ταλάντωσης. Η 1<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.12m/s, η 2<sup>η</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.067m/s και η 3<sup>η</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.05m/s.

Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται κυρίως στις δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι 0.1m/s και της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι 0.04m/s.

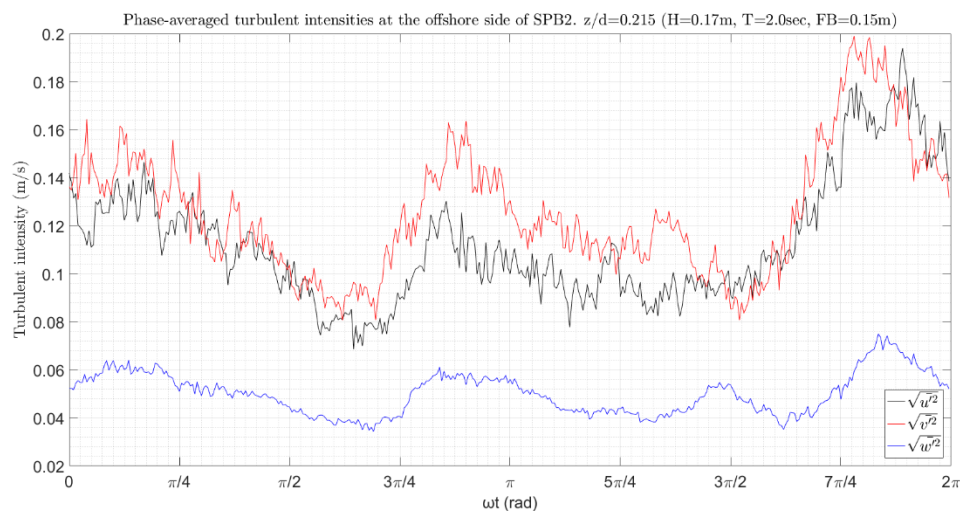
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.83. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.19m/s και 0.2m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.075m/s.



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.82 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R3, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.83 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3, z/d=0.215, προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.84 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-4.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

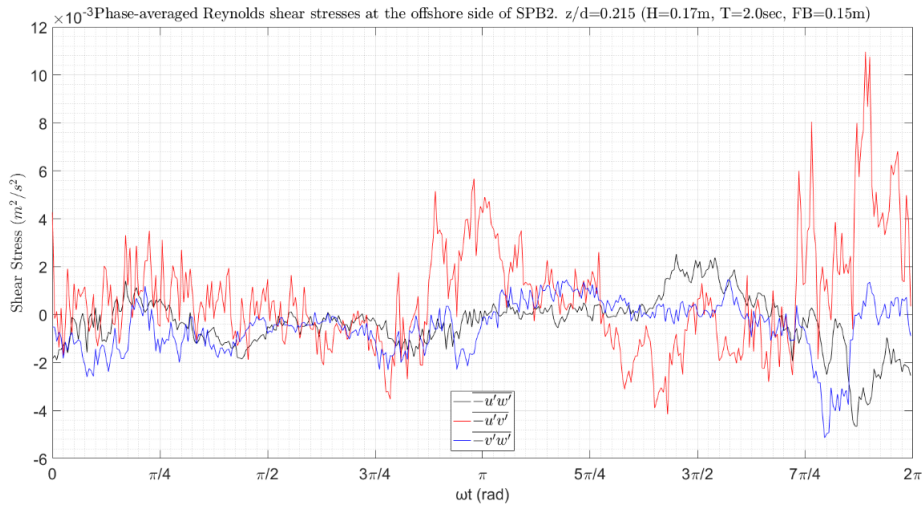
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.85. Στα φάσματα ενέργειας των τριών συνιστωσών της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.5 \text{ Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα ( $f = 0.5 \text{ Hz}$ ) της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.29 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.21 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.06 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει

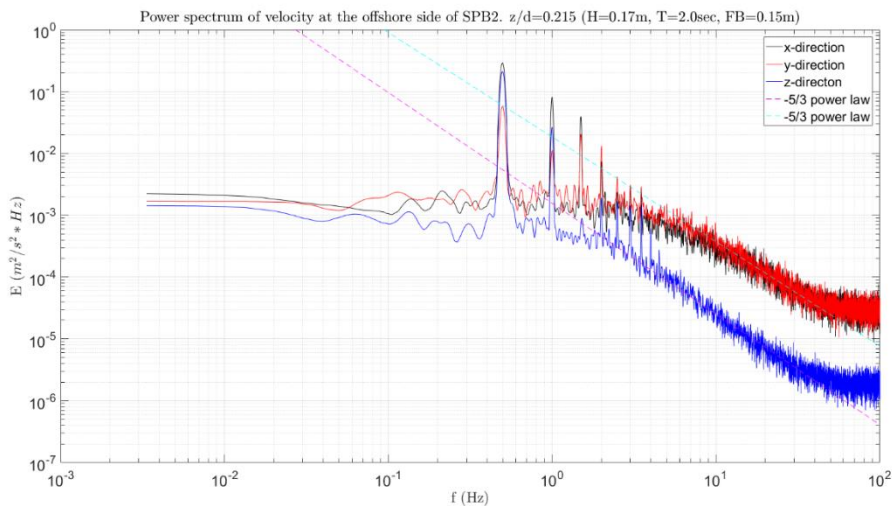


Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.3.84 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R3,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.85 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

## 2. Σχετική θέση $z/d = 0.338$ .

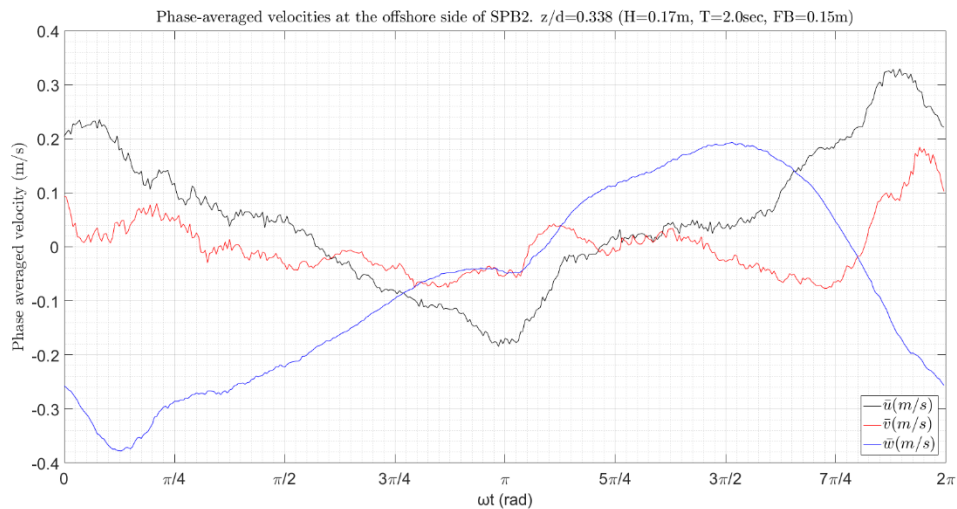
Στο Σχήμα 5.3.86 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.18, 0.33]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.38, 0.19]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.08, 0.18]$  (m/s).

Στο Σχήμα 5.3.87 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται κυρίως στη 1<sup>η</sup> και τη 3<sup>η</sup> αρμονική, με τη 2<sup>η</sup> και τη 4<sup>η</sup> να είναι

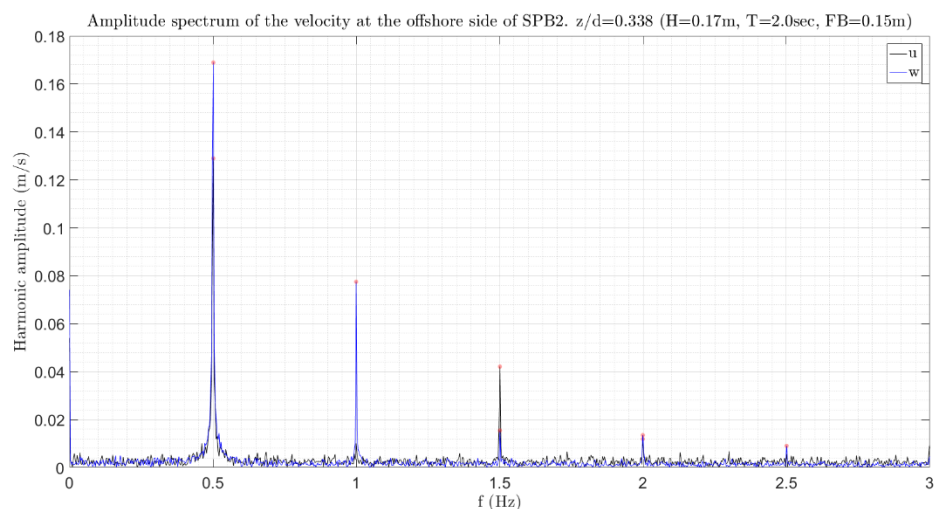
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

παρατηρήσιμες αλλά με πολύ μικρότερο πλάτος ταλάντωσης. Η 1<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης,  $0.13\text{m/s}$  και η 3<sup>η</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.04\text{m/s}$ .

Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται κυρίως στις δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες με τη 3<sup>η</sup>, τη 4<sup>η</sup> και τη 5<sup>η</sup> να παράγονται μέσα στη ροή αλλά με αρκετά μικρότερο πλάτος. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.17\text{m/s}$  και της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι  $0.08\text{m/s}$ .



Σχήμα 5.3.86 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

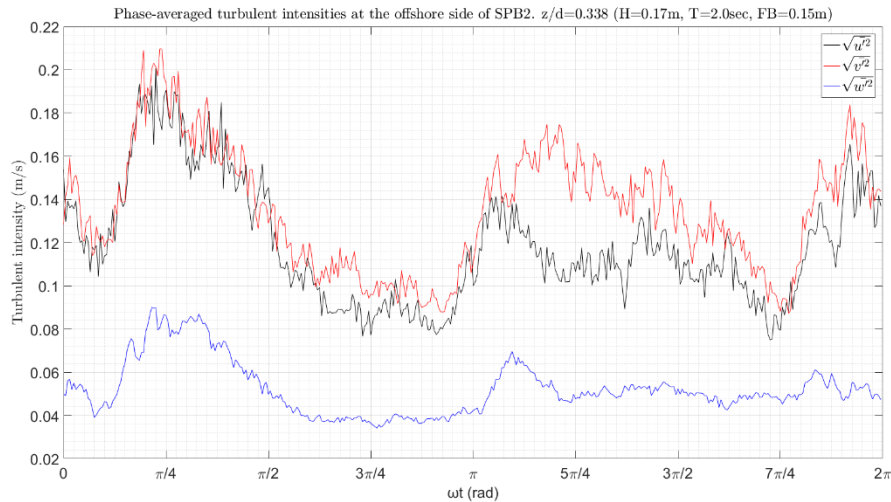


Σχήμα 5.3.87 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.88. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$

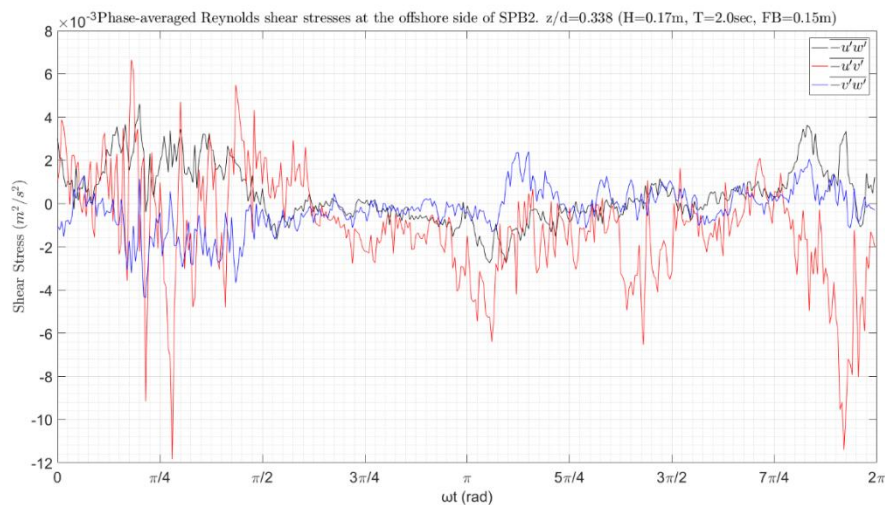
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.2m/s και 0.21m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.1m/s.



Σχήμα 5.3.88 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.89 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $6.65.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-11.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



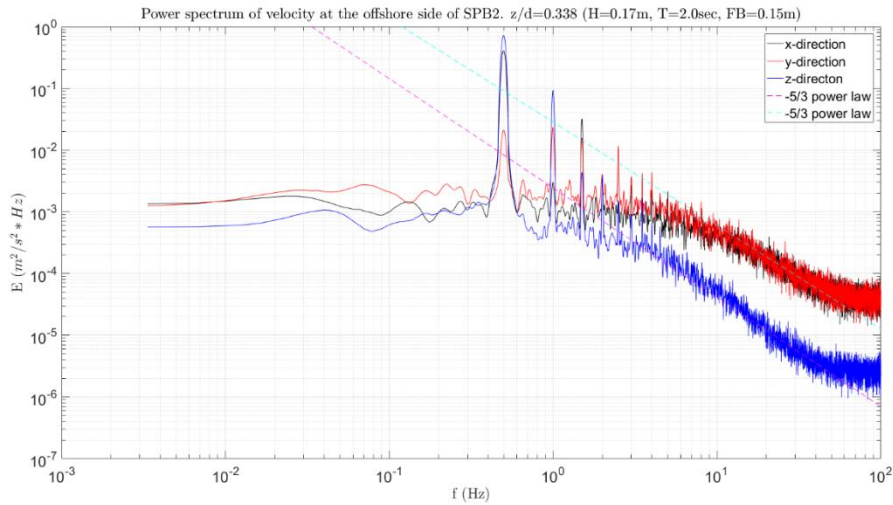
Σχήμα 5.3.89 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R3, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.90. Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.4 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.71 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα για όλες τις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

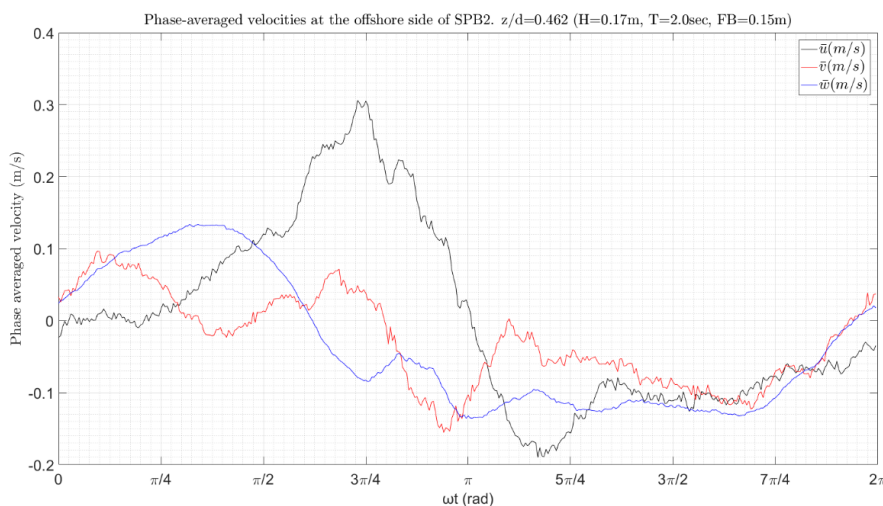
χώρα για συχνότητες από  $f = 3\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 10\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.3.90 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

### 3. Σχετική θέση $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.3.91 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.19, 0.31]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.14, 0.13]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.16, 0.1]$  (m/s).

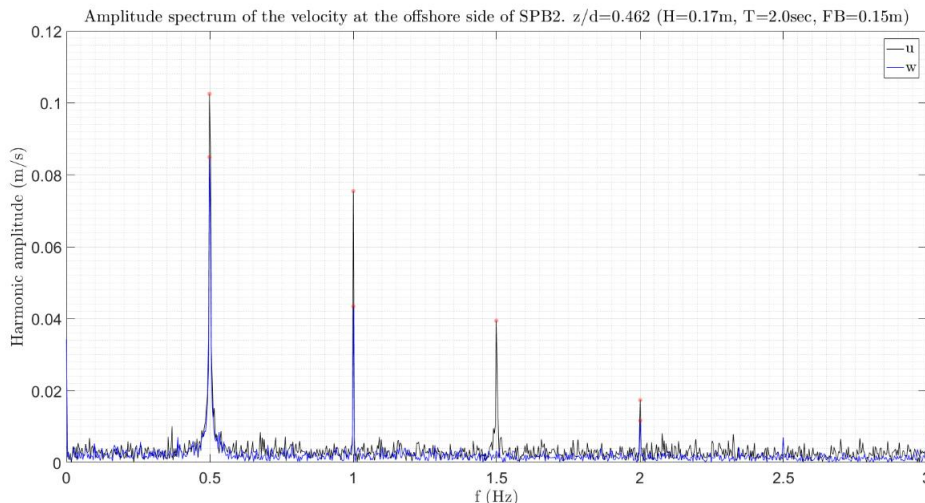


Σχήμα 5.3.91 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Στο Σχήμα 5.3.93 φαίνεται το φάσμα του εύρους των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται σε τέσσερις συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Η 1<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης,  $0.1\text{m/s}$ . Η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1\text{Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος  $0.08\text{m/s}$ , η 3<sup>η</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.04\text{m/s}$  και η 4<sup>η</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ )  $0.02\text{m/s}$ .

Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε τρεις συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.085\text{m/s}$ , της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι  $0.04\text{m/s}$  και της 4<sup>ης</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) είναι  $0.01\text{m/s}$ .



Σχήμα 5.3.92 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.93. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή  $0.19\text{m/s}$  και  $0.21\text{m/s}$  αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα  $0.07\text{m/s}$ .

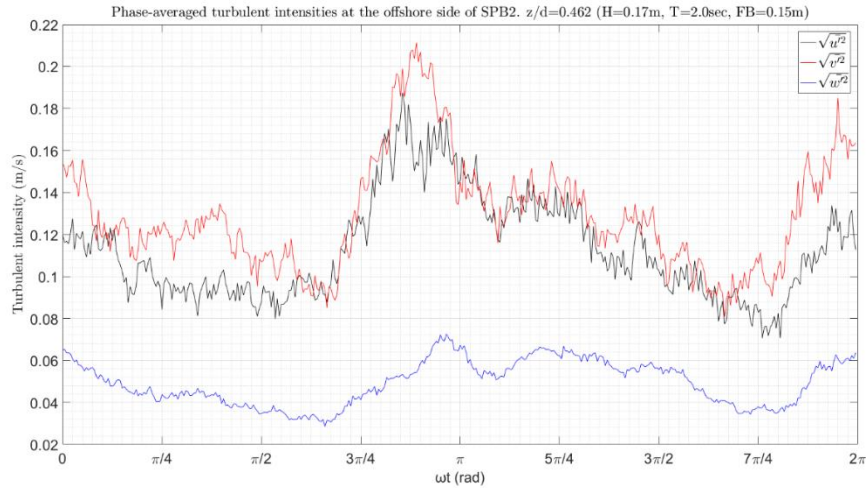
Στο Σχήμα 5.3.94 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες θετικές διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη τιμή  $10.9 * 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$  και ελάχιστη τιμή  $-4.1 * 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$ .

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.95. Στα τρία φάσματα ενέργειας της ταχύτητας εκδηλώνεται μια αναμενόμενη ισχυρή αιχμή για  $f = 0.5\text{Hz}$ . Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.31 \text{m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  στη z είναι  $0.2 \text{m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.06 \text{m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

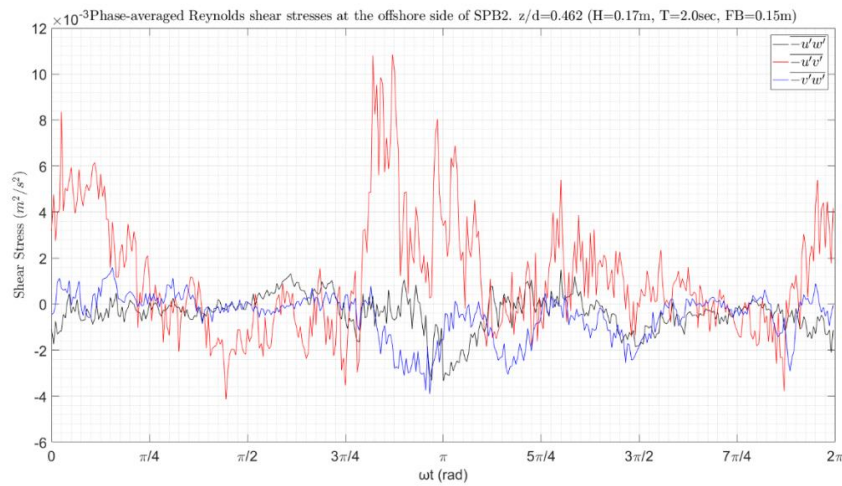
Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται και για τις τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$ , ενώ στην οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$  περίπου.



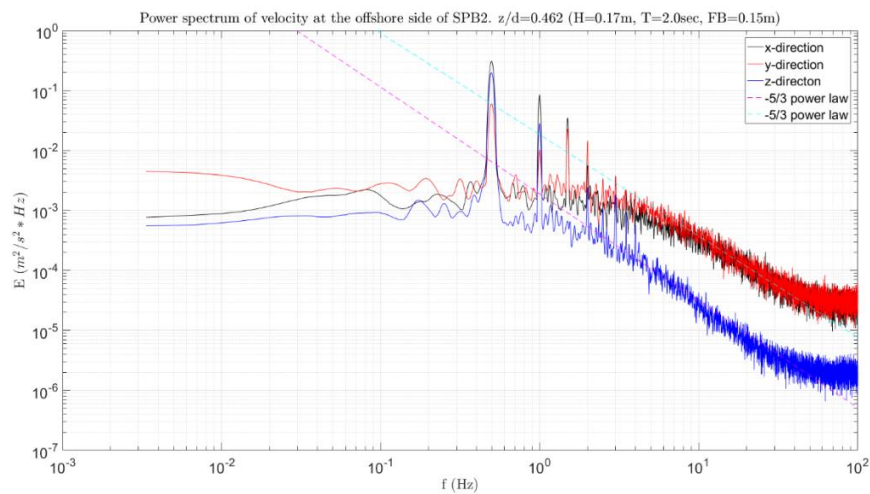
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.93 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.94 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.



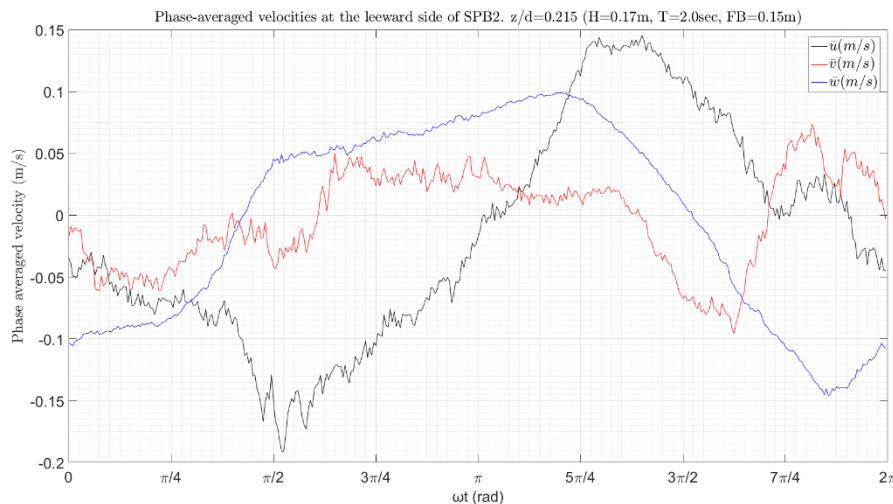
Σχήμα 5.3.95 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.



### 5.3.3.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

#### 1. Σχετική θέση $z/d = 0.215$ .

Στο Σχήμα 5.3.96 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.19, 0.15] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.16, 0.1] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.1, 0.07] (m/s).



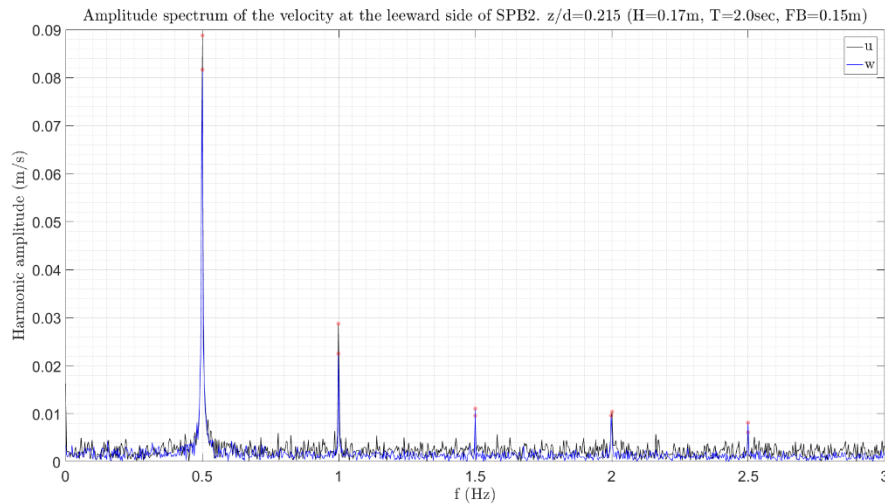
Σχήμα 5.3.96 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.97 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται στη συχνότητα  $f = 0.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.09m/s, στην  $f = 1\text{Hz}$  με πλάτος 0.03m/s, στη συχνότητα  $f = 1.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.01m/s, στη συχνότητα  $f = 2\text{Hz}$  με πλάτος 0.01m/s και στη συχνότητα  $f = 2.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.006m/s.

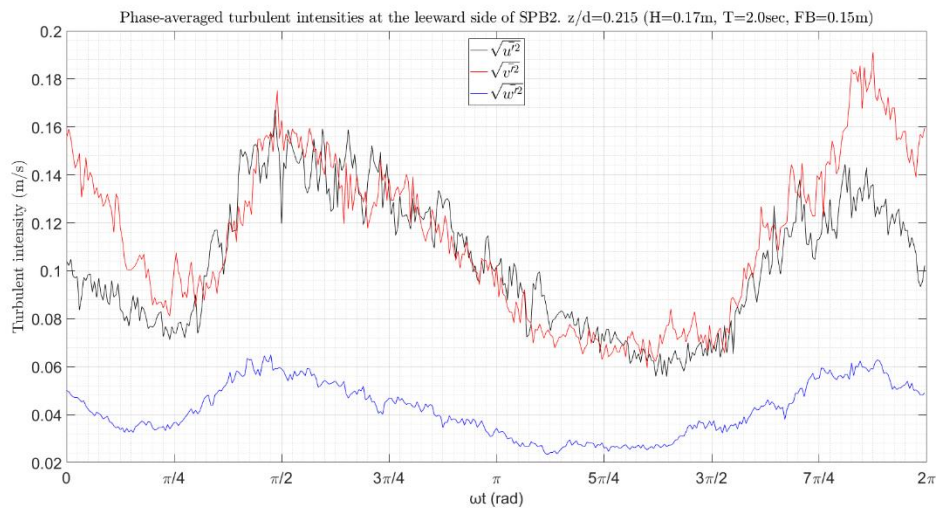
Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε πέντε συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι 0.08m/s, της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι 0.02m/s, της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι 0.01m/s, της 4<sup>ης</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) είναι 0.01m/s και της 5<sup>ης</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ ) είναι 0.008m/s.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.98. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.17 m/s και 0.19m/s, ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.07 m/s.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.97 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R3, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.



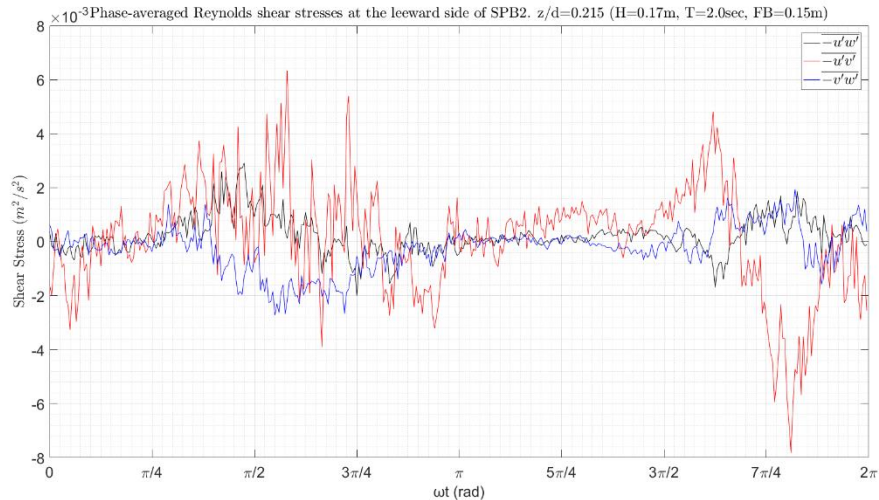
Σχήμα 5.3.98 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.99 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $6.3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-7.8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

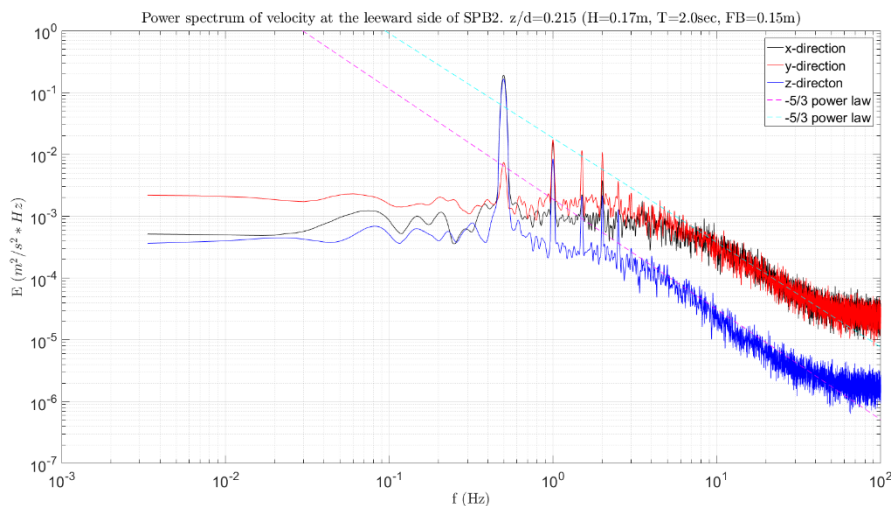
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.100. Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.19 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  στη z είναι  $0.17 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.007 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 4\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$  περίπου.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.99 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R3, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.



Σχήμα 5.3.100 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3, z/d=0.215, υπήνεμη πλευρά.

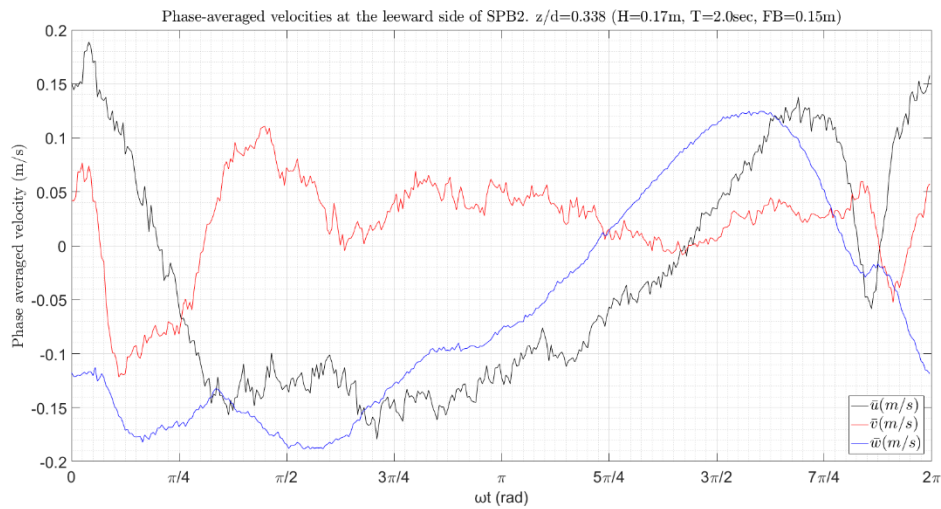
### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.3.101 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.18, 0.19] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.19, 0.12] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.12, 0.11] (m/s).

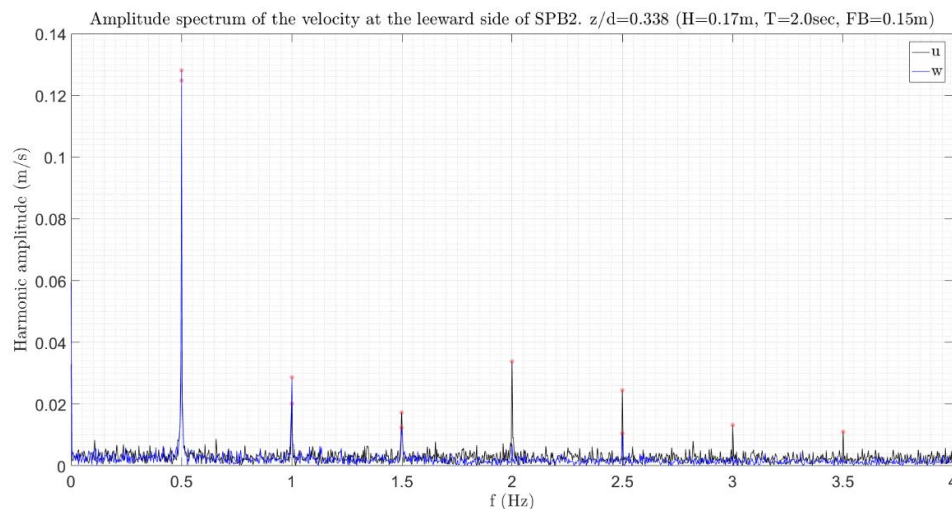
Στο Σχήμα 5.3.102 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι κατά την οριζόντια διεύθυνση παράγονται αρκετές αρμονικές που φτάνουν μέχρι και τα 3.5Hz. Το κύριο πλάτος ταλάντωσης, 0.125m/s, εμφανίζεται στη συχνότητα  $f = 0.5Hz$ . Η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1Hz$ ) έχει πλάτος 0.02m/s, η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.5Hz$ ) έχει πλάτος 0.017m/s, η 4<sup>η</sup> ( $f = 2Hz$ ) έχει πλάτος 0.034m/s, η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.5Hz$ ) έχει πλάτος 0.025m/s και η 6<sup>η</sup> και 7<sup>η</sup> έχουν παρόμοιο πλάτος, 0.01m/s.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται κυρίως στις τρεις πρώτες αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.13\text{m/s}$ , της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι  $0.03\text{m/s}$  και της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.01\text{m/s}$ .



Σχήμα 5.3.101 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.



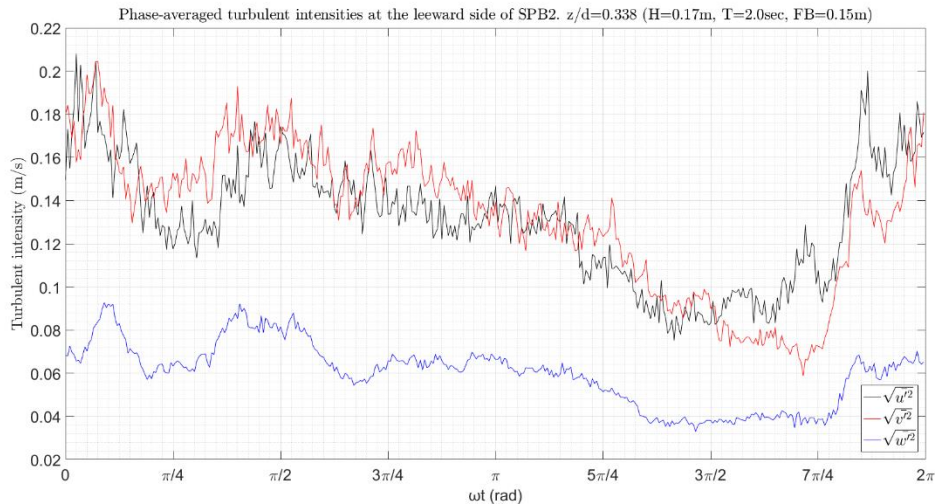
Σχήμα 5.3.102 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.103. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη  $x$  και  $y$  διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη  $z$  διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την  $x$  και  $y$  διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή  $0.21\text{m/s}$  και  $0.20\text{m/s}$  αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση  $z$  η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα  $0.09\text{m/s}$ .

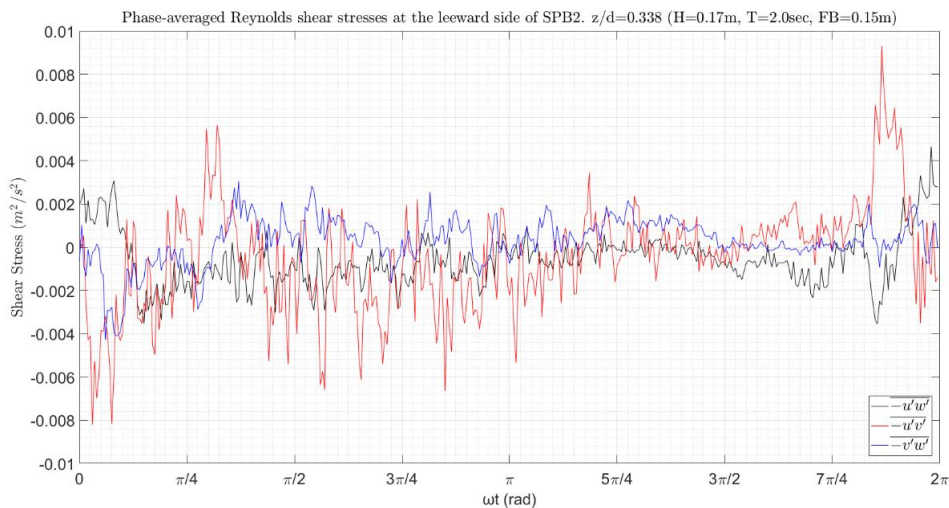
Στο Σχήμα 5.3.104 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο  $x$ - $y$  όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $9.3 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-8.2 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}^2$ .



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.103 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

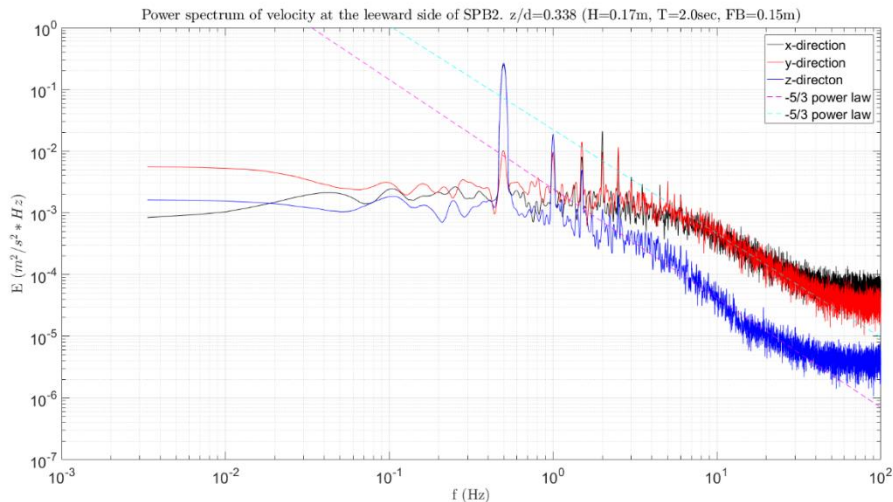


Σχήμα 5.3.104 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο),  $x$ - $y$  (κόκκινο) και  $y$ - $z$  (μπλε) επίπεδο. 2-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.105. Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη  $z$  είναι  $0.26 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 7\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$  περίπου.

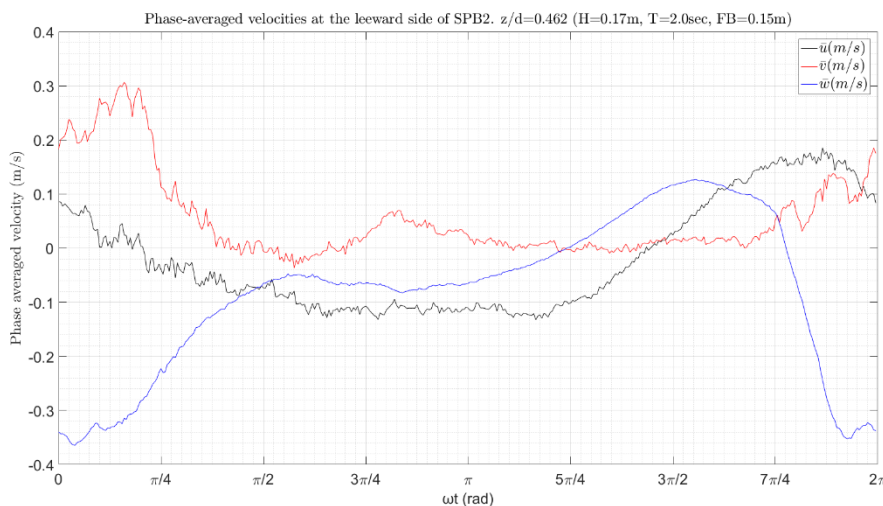
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.105 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

### 3. Σχετική θέση $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.3.106 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.13, 0.19]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.36, 0.13]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.04, 0.31]$  (m/s).



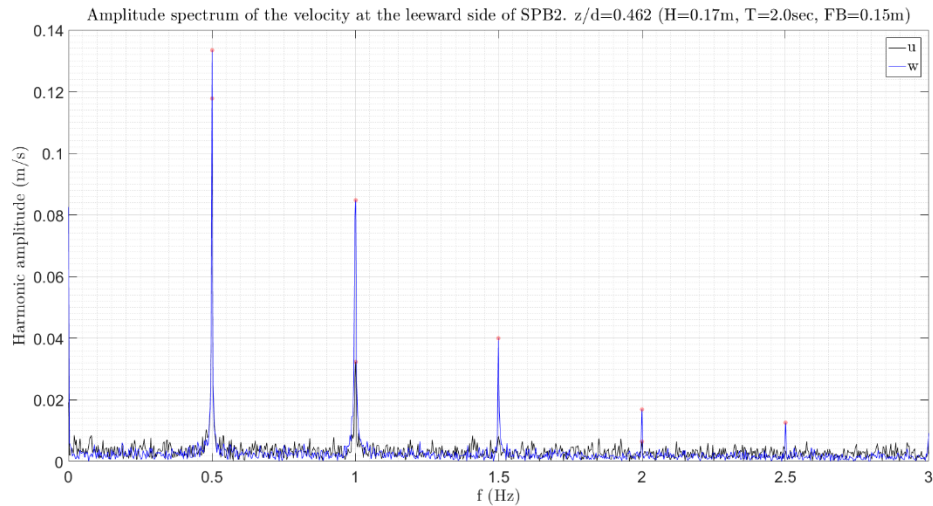
Σχήμα 5.3.106 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.107 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται στη συχνότητα  $f = 0.5\text{Hz}$  με πλάτος 0.12m/s και στην  $f = 1\text{Hz}$  με πλάτος 0.03m/s.



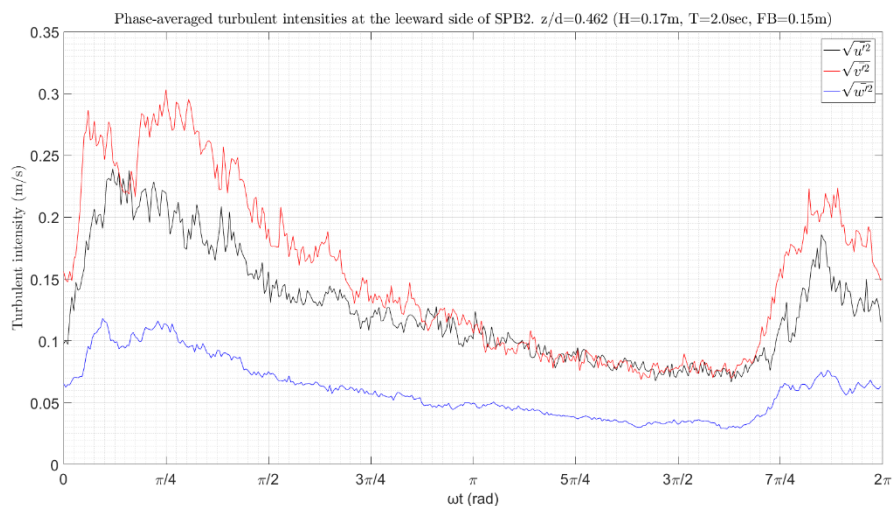
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται σε πέντε συνολικά αρμονικές συνιστώσες. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.13\text{m/s}$ , της 2<sup>ης</sup> ( $f = 1\text{Hz}$ ) είναι  $0.085\text{m/s}$ , της 3<sup>ης</sup> ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.04\text{m/s}$ , της 4<sup>ης</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) είναι  $0.017\text{m/s}$  και της 5<sup>ης</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ ) είναι  $0.013\text{m/s}$ .



Σχήμα 5.3.107 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.108. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο στο μεγαλύτερο μέρος της κυματικής περιόδου ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι σημαντικά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή  $0.24\text{m/s}$  και  $0.3\text{m/s}$  αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα  $0.12\text{m/s}$ .

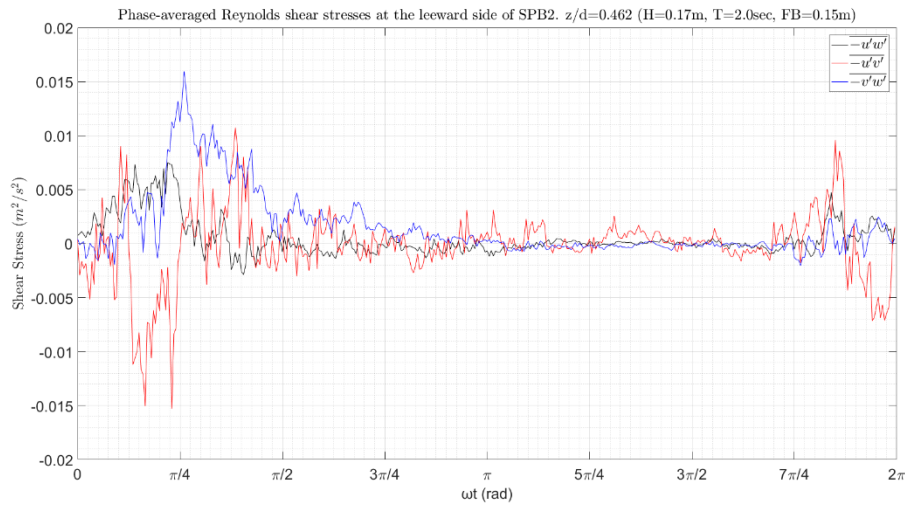


Σχήμα 5.3.108 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.109 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Σημαντικές διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

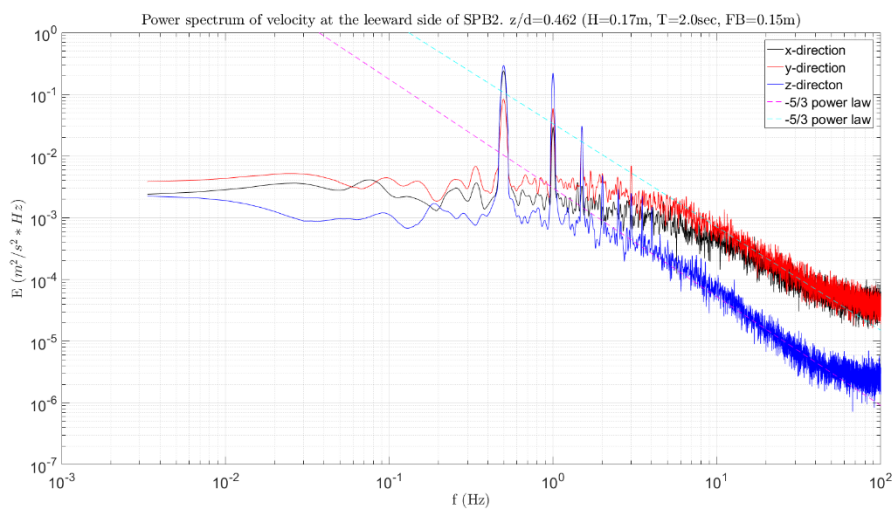
μέγιστη θετική τιμή  $0.01 \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.015 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , καθώς επίσης και στο επίπεδο  $y-z$  όπου παρατηρείται μέγιστη τιμή  $0.016 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



Σχήμα 5.3.109 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x-z$  (μαύρο),  $x-y$  (κόκκινο) και  $y-z$  (μπλε) επίπεδο. 2-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.110. Και στα τρία φάσματα των συνιστωσών της ταχύτητας παρουσιάζεται μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.24 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη  $z$  είναι  $0.29 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.08 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Η υψηλότερη ενέργεια για την κατακόρυφη ταχύτητα εμφανίζεται για συχνότητα  $f = 1 \text{ Hz}$  με τιμή  $0.2 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 50 \text{ Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 50 \text{ Hz}$  περίπου.

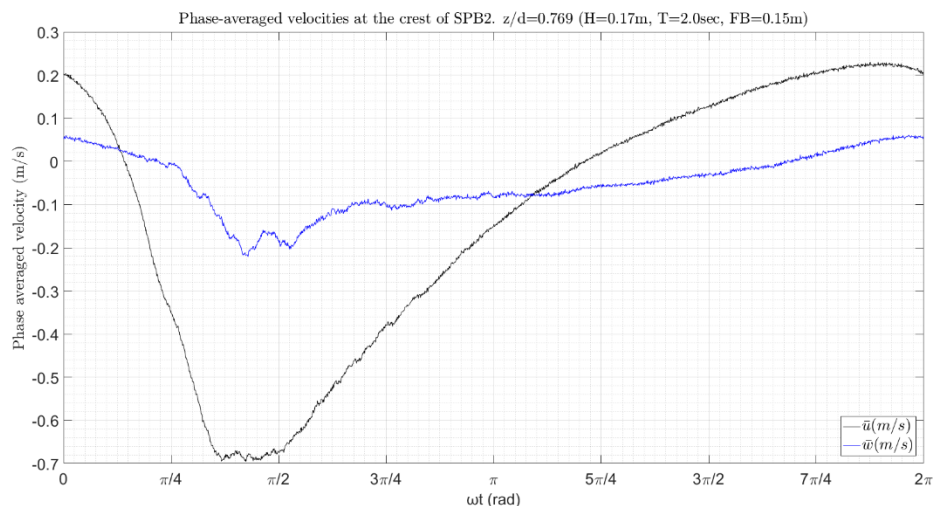


Σχήμα 5.3.110 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

### 5.3.3.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

#### 1. Στέψη, σχετική θέση, $z/d = 0.769$ .

Στο Σχήμα 5.3.111 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.7, 0.23]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.22, 0.06]$  (m/s).



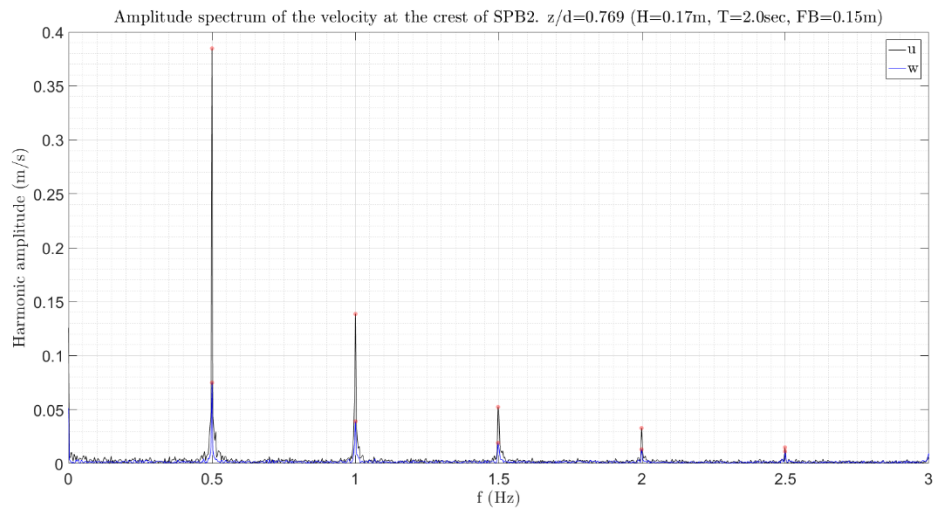
Σχήμα 5.3.111 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα δίνεται στο Σχήμα 5.3.112. Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν η πρώτη και η δεύτερη αρμονική συνιστώσα με την Τρίτη, την τέταρτη και τη πέμπτη αρμονική να είναι παρατηρήσιμες στο σχήμα αλλά με αρκετά μικρότερο αρμονικό πλάτος. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.38m/s, η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1\text{Hz}$ ) 0.14m/s, η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.05m/s και η 4<sup>η</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος 0.03m/s και η 5<sup>η</sup> έχει πλάτος 0.015m/s. Για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται αρκετά μικρότερα πλάτη ταλάντωσης σε σύγκριση με την οριζόντια. Η 1<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.075m/s, η 2<sup>η</sup> έχει πλάτος 0.04m/s, η 3<sup>η</sup> έχει πλάτος 0.02m/s και η 4<sup>η</sup> και η 5<sup>η</sup> έχουν πλάτος περίπου 0.01m/s.

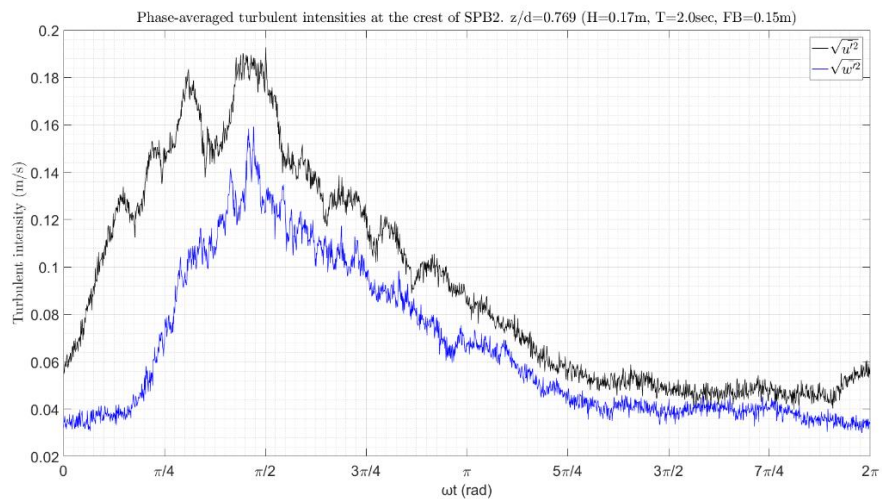
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.113. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερη στην οριζόντια (μαύρο) απ' ό,τι στη κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση σε όλη τη διάρκεια της κυματικής περιόδου. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.19m/s και της κατακόρυφης 0.16 m/s.

Στο Σχήμα 5.3.114 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι οι διατμητικές τάσεις παρουσιάζουν μια ισχυρή αρνητική αιχμή μέσα σε ένα διάστημα της κυματικής περιόδου και στο υπόλοιπο λαμβάνουν μηδενική τιμή. Η ελάχιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $-15.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

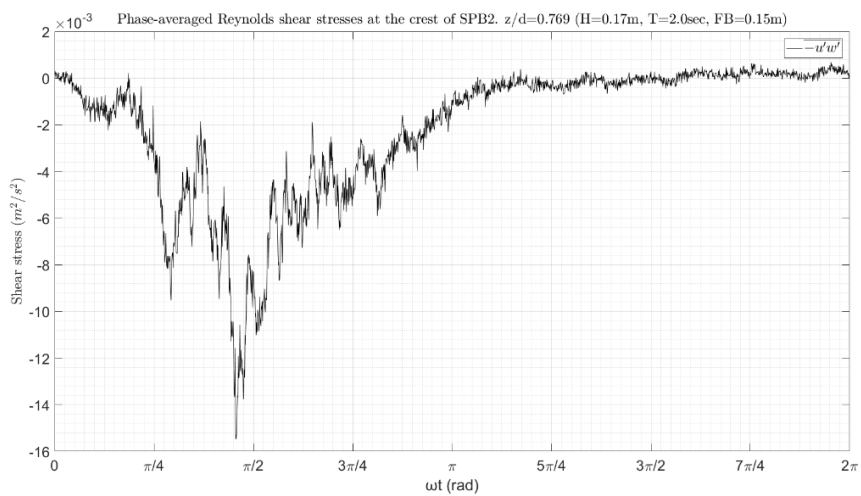
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.112 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.



Σχήμα 5.3.113 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.

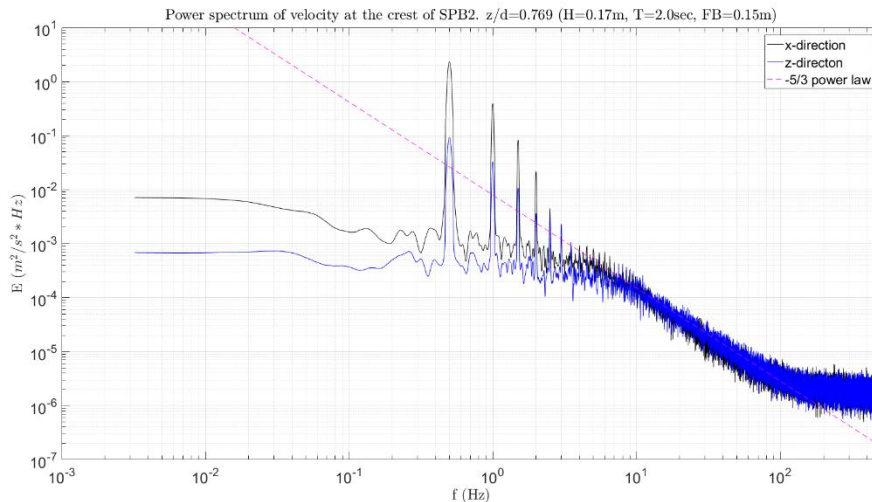


Σχήμα 5.3.114 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 2-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.115. Και στα δύο φάσματα εκδηλώνεται αιχμή στη κύρια συχνότητα των κυματισμών,  $f = 0.5\text{Hz}$  καθώς επίσης και μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα σε υψηλότερες αρμονικές. Για τη συχνότητα  $f = 0.5\text{Hz}$  η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $2.3 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.09 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 6\text{Hz}$  και  $f = 100\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.3.115 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.769$ , στέψη.

### 2. Πόρος, σχετική θέση $z/d = 0.654$ .

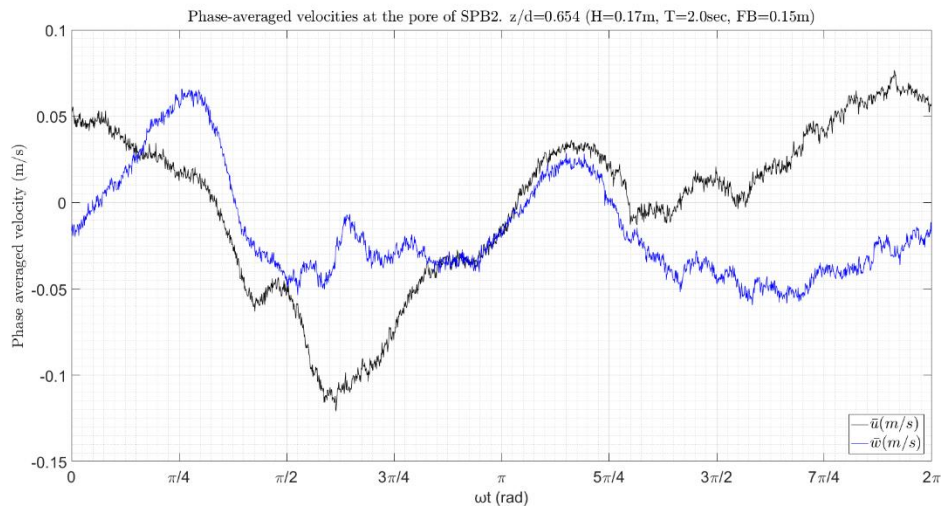
Στο Σχήμα 5.3.116 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.12, 0.08]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.06, 0.07]$  (m/s).

Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.117. Αυτό που παρατηρείται αρχικά, είναι η σημαντική παραγωγή αρμονικών συνιστωσών μέσα στο πόρο.

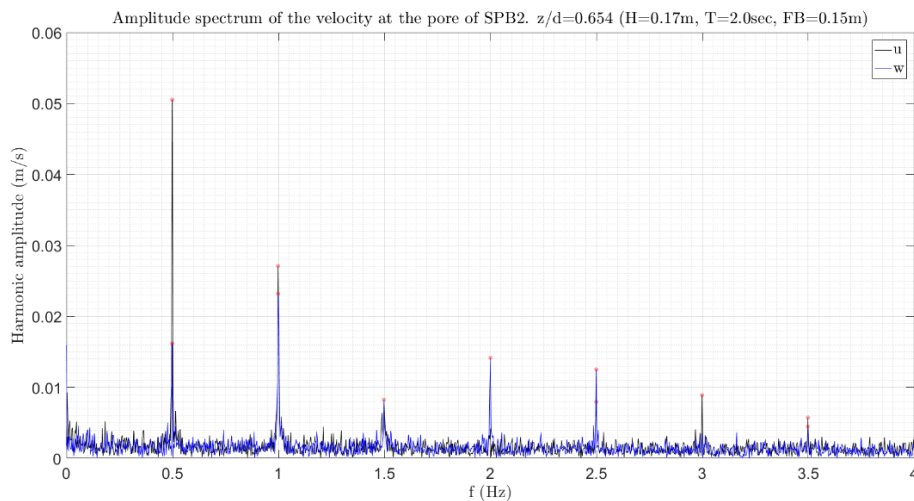
Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν οι δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες. Εμφανείς είναι ακόμα κάποιες υψηλότερες αρμονικές αλλά με μικρότερο πλάτος. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.05\text{m/s}$ , η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1\text{Hz}$ )  $0.027\text{m/s}$ , η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.5\text{Hz}$ ), η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ ) και η 6<sup>η</sup> ( $f = 3\text{Hz}$ ) έχουν πλάτος  $0.008\text{m/s}$ . Αντίστοιχα για τη κατακόρυφη ταχύτητα η 1<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα ( $f = 0.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.016\text{m/s}$ , η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1\text{Hz}$ )  $0.023\text{m/s}$ , η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.008\text{m/s}$ , η 4<sup>η</sup> ( $f = 2\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.014\text{m/s}$  και η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.5\text{Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.014\text{m/s}$ .



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.116 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.



Σχήμα 5.3.117 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.118. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων στη κατακόρυφη (μπλε) και στην οριζόντια (μαύρο) διεύθυνση ακολουθούν παρόμοια μεταβολή με σχεδόν ίδιο μέγεθος μέσα στη κυματική περίοδο. Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου  $0.097 \text{ m/s}$  και της κατακόρυφης  $0.085 \text{ m/s}$ .

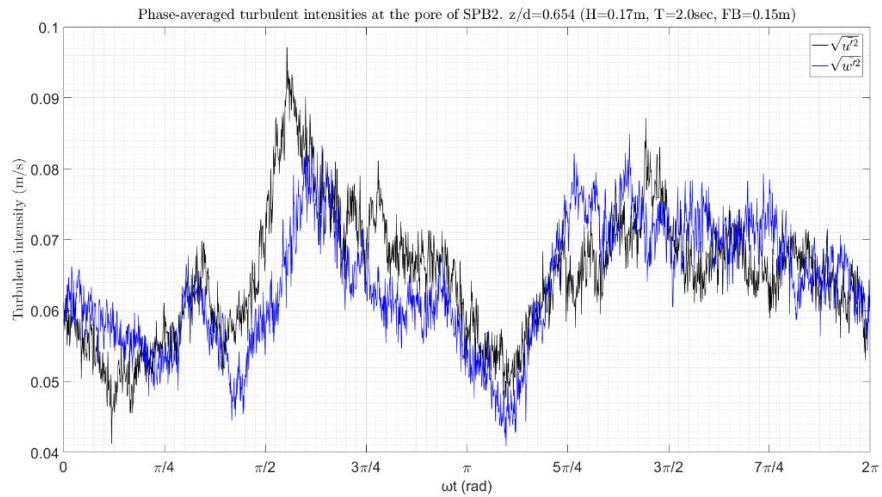
Στο Σχήμα 5.3.119 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $3.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-2.05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.120.  $f = 0.5 \text{ Hz}$ . Για τη 1<sup>η</sup> αρμονική συχνότητα ( $f = 0.5 \text{ Hz}$ ), η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.047 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.005 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Μεγαλύτερη ενέργεια για την κατακόρυφη ταχύτητα παρουσιάζει η 2<sup>η</sup> αρμονική συχνότητα με τιμή  $0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα σε υψηλότερες αρμονικές.

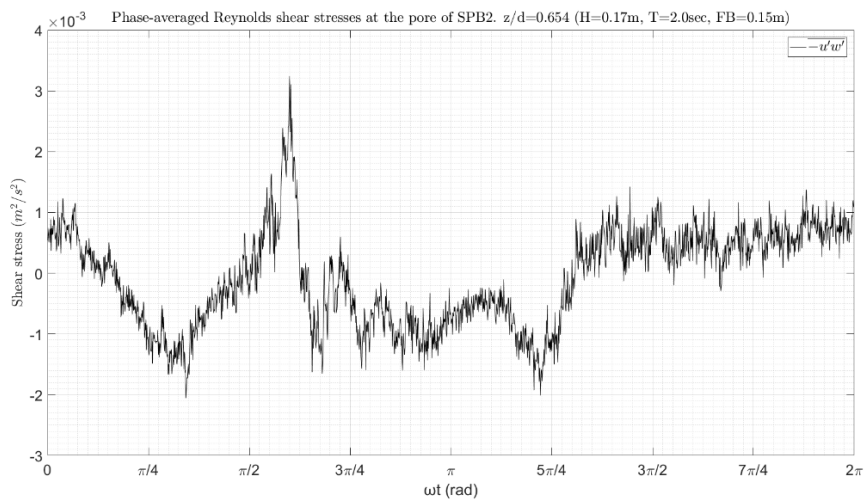


## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 5\text{Hz}$  και  $f = 60\text{Hz}$ .

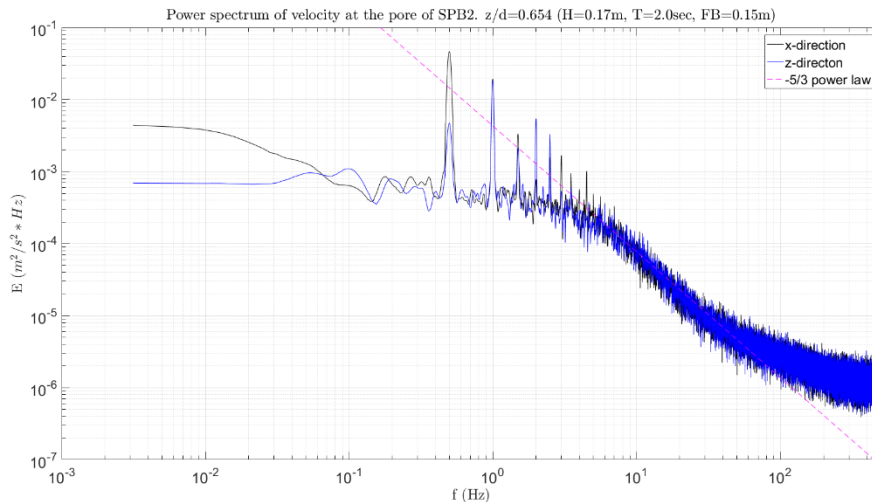


Σχήμα 5.3.118 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.



Σχήμα 5.3.119 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 2-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.120 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R3,  $z/d=0.654$ , πόρος.

### 5.3.4 Κυματικό σενάριο 2-R4

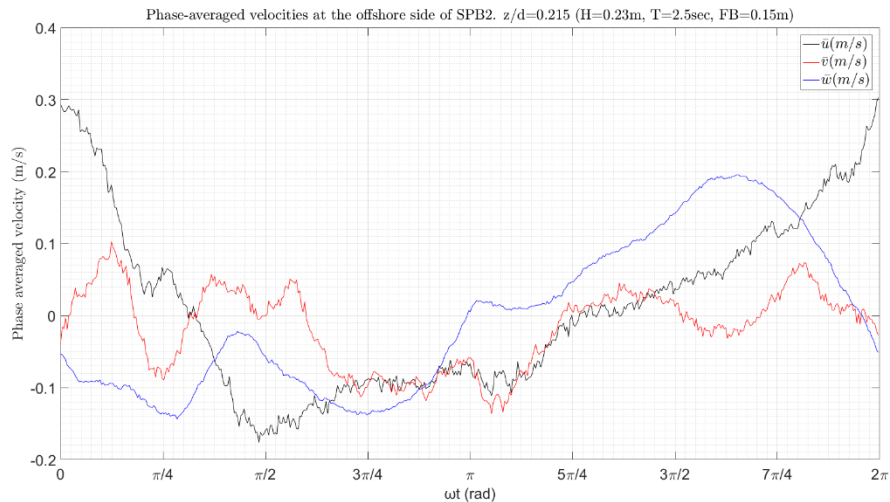
#### 5.3.4.1 Αποτελέσματα στη προσήνεμη πλευρά

##### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

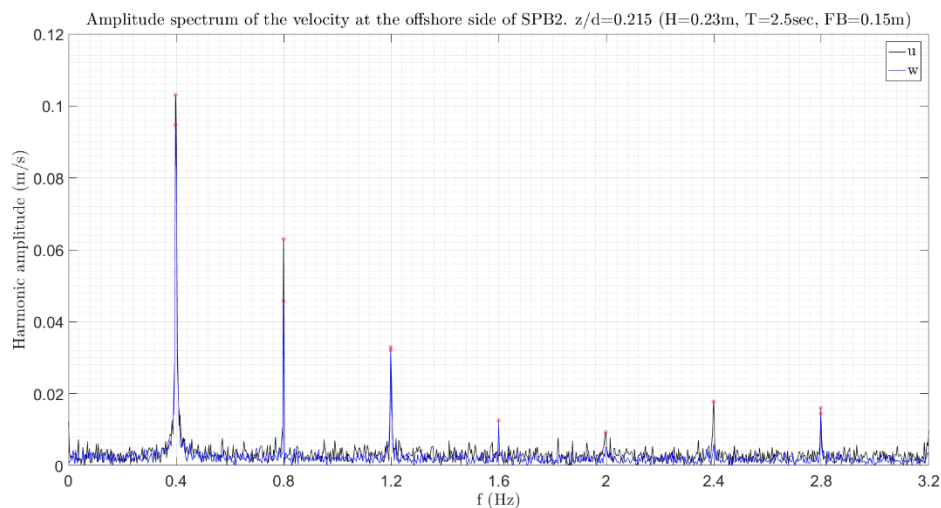
Στο Σχήμα 5.3.121 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.18, 0.3]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.14, 0.20]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.14, 0.10]$  (m/s).

Στο Σχήμα 5.3.122 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται κυρίως στις τρεις πρώτες αρμονικές συχνότητες. Για τη συχνότητα  $f = 0.4\text{Hz}$  το πλάτος είναι 0.1m/s για την  $f = 0.8\text{Hz}$  το πλάτος είναι 0.06m/s και για την  $f = 1.2\text{Hz}$  το πλάτος είναι 0.033m/s. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση εκδηλώνεται και αυτή κυρίως στις τρεις πρώτες αρμονικές συχνότητες. Για τη συχνότητα  $f = 0.4\text{Hz}$  το πλάτος είναι 0.095m/s για την  $f = 0.8\text{Hz}$  το πλάτος είναι 0.046m/s και για την  $f = 1.2\text{Hz}$  το πλάτος είναι 0.032m/s.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.121 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

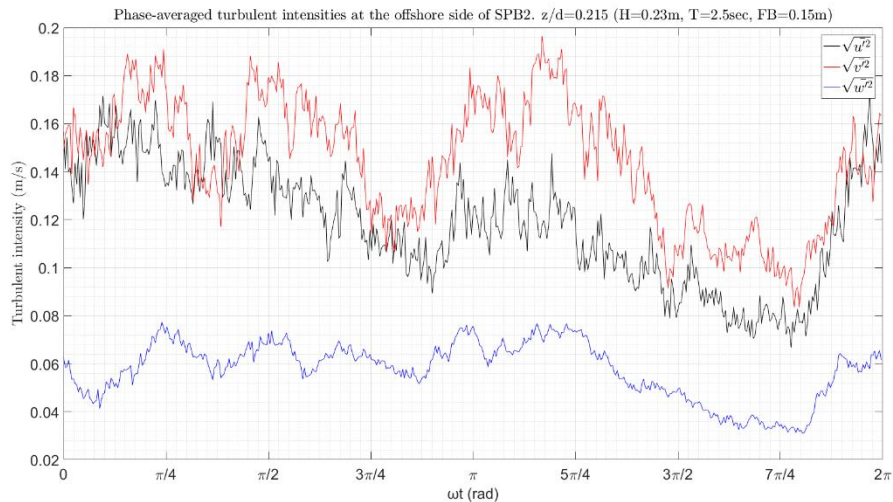


Σχήμα 5.3.122 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

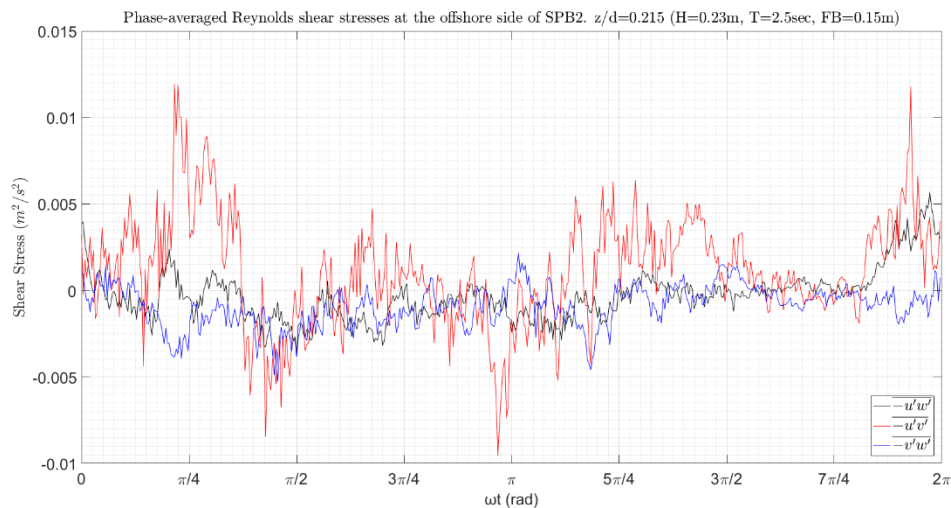
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.123. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι αρκετά κοντά μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι αρκετά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.17m/s και 0.20m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.08m/s.

Στο Σχήμα 5.3.124 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $5.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.123 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

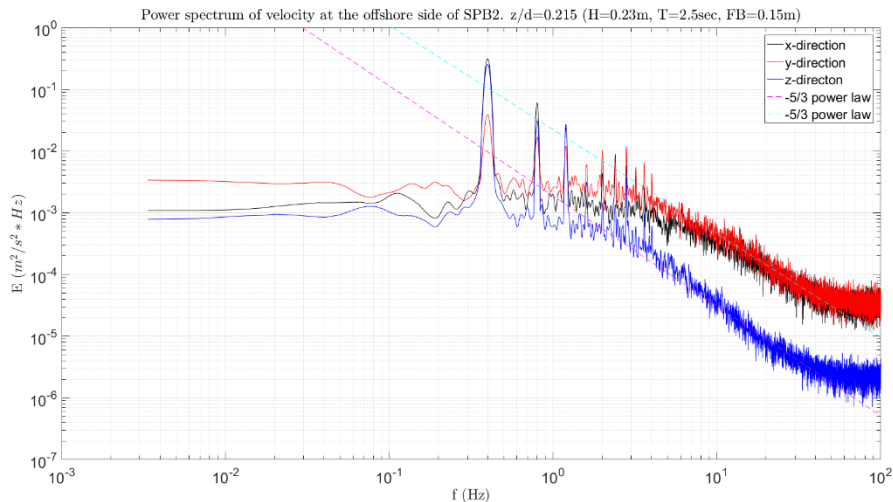


Σχήμα 5.3.124 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.125. Μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές παρουσιάζουν όλες οι συνιστώσες της ταχύτητας. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.31 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.26 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 50\text{Hz}$  περίπου.

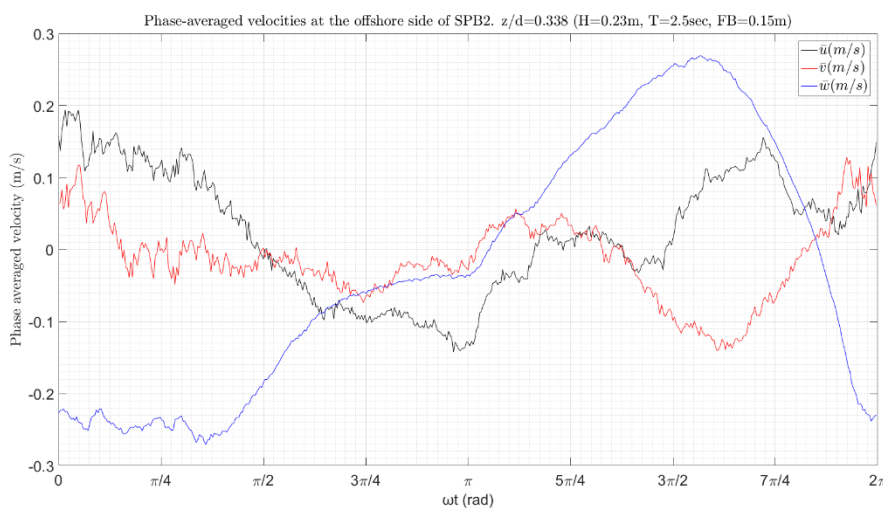
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.125 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , προσήνεμη πλευρά.

### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

Στο Σχήμα 5.3.126 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.14, 0.19]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.27, 0.27]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.14, 0.13]$  (m/s).



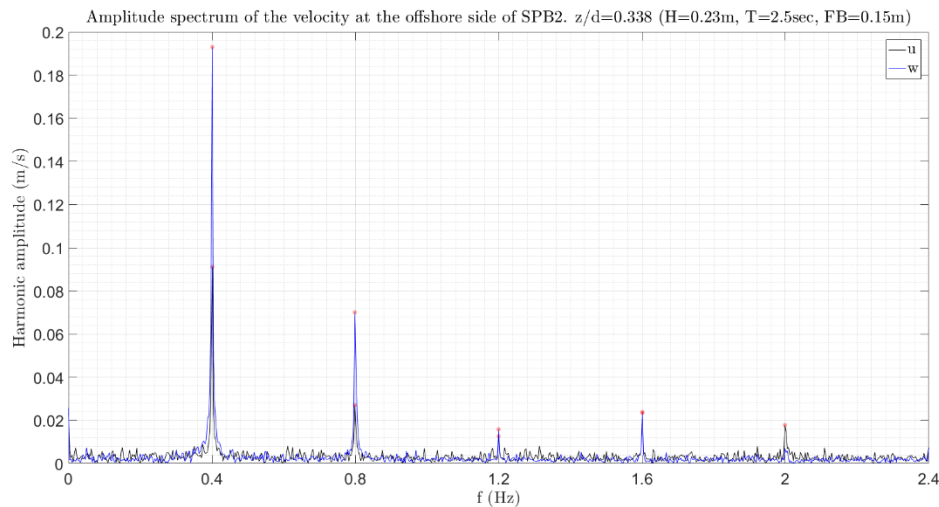
Σχήμα 5.3.126 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.127 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια και τη κατακόρυφη ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται κυρίως στις δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες. Πιο συγκεκριμένα η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.09m/s, και



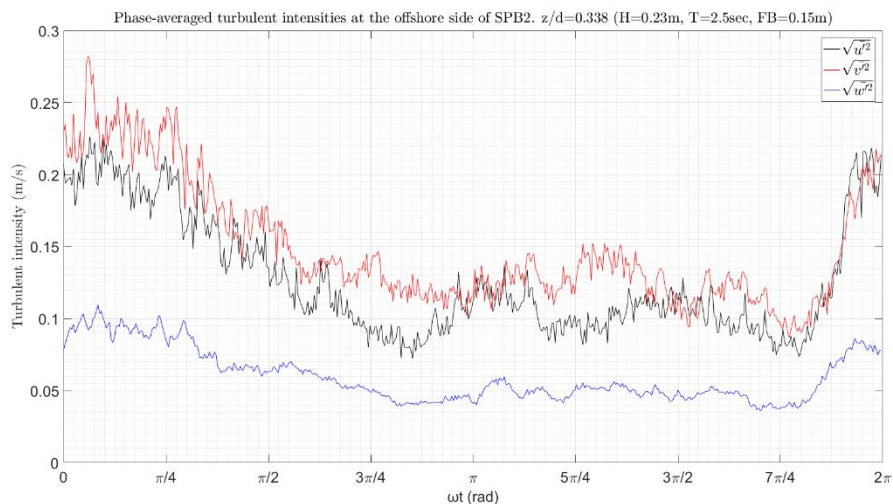
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

0.027m/s για 0.4Hz και 0.8Hz αντίστοιχα. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz και 0.8Hz πλάτη ταλάντωσης 0.19m/s και 0.07m/s αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.127 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R4, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.128. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι αρκετά μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.23m/s και 0.28m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης δεν ξεπερνά τα 0.11m/s.

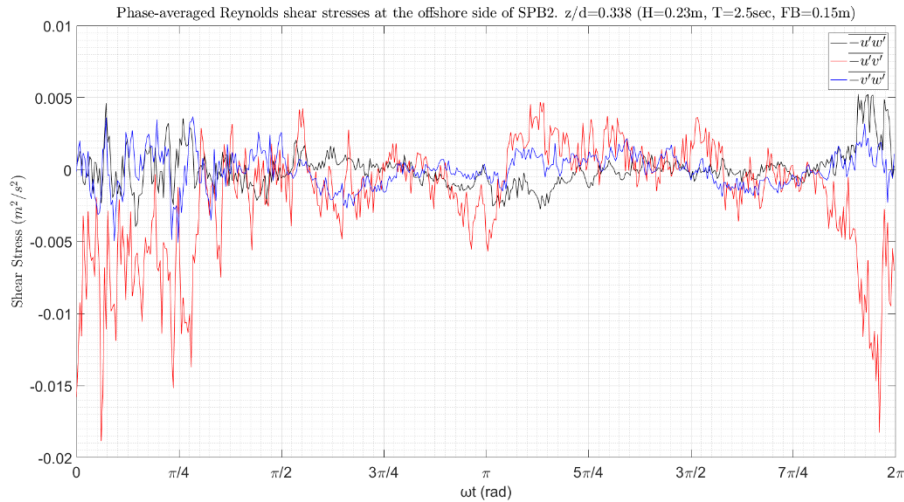


Σχήμα 5.3.128 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4, z/d=0.338, προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.129 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι μέγιστες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $0.0047 \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.019 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



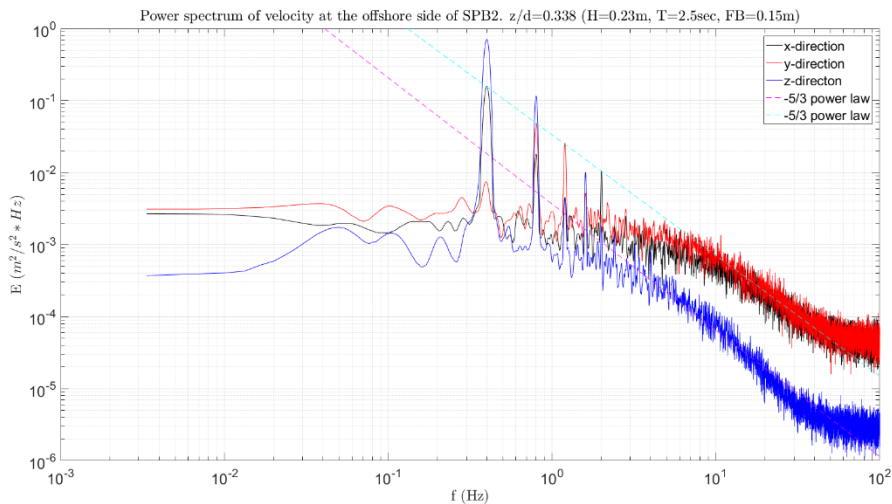
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.129 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R4,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.130. Σημαντική μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές παρουσιάζουν και οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.16\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.71\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.008\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

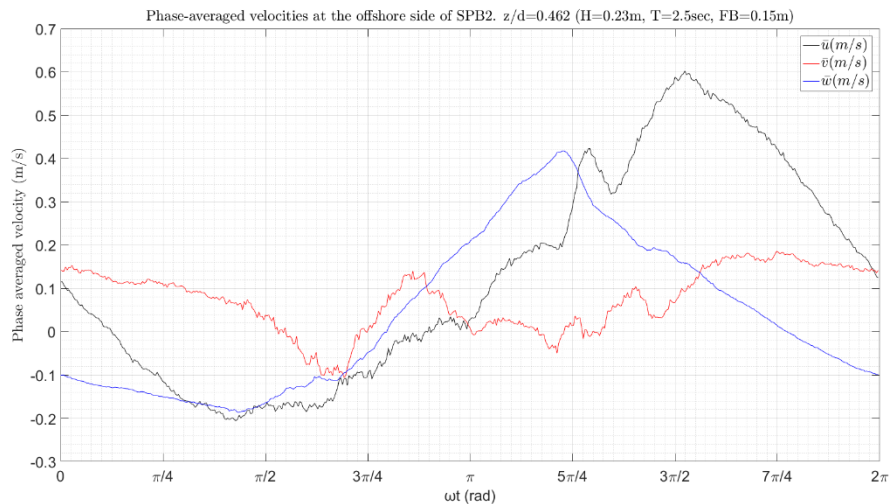
Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδραειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδραειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 3\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 8\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.3.130 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.338$ , προσήνεμη πλευρά.

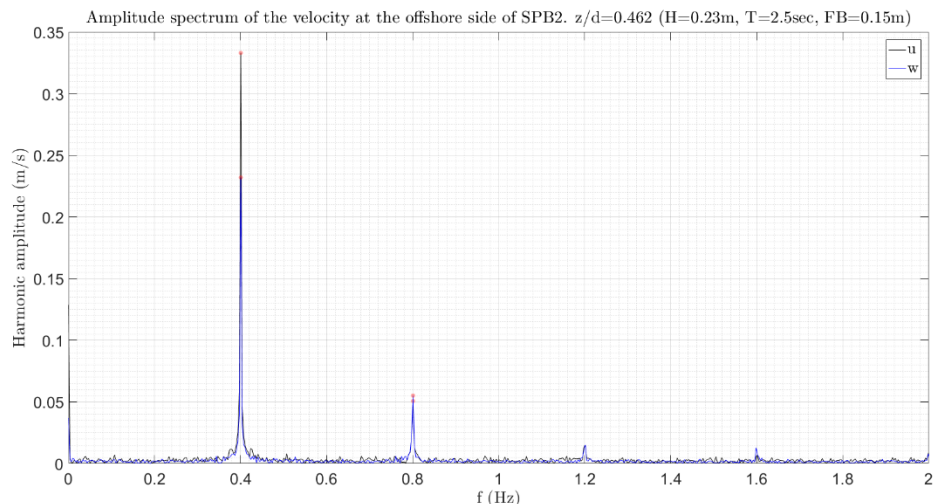
3. Σχετική θέση,  $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.3.131 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι [-0.21, 0.6] (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.19, 0.42] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.1, 0.19] (m/s).



Σχήμα 5.3.131 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

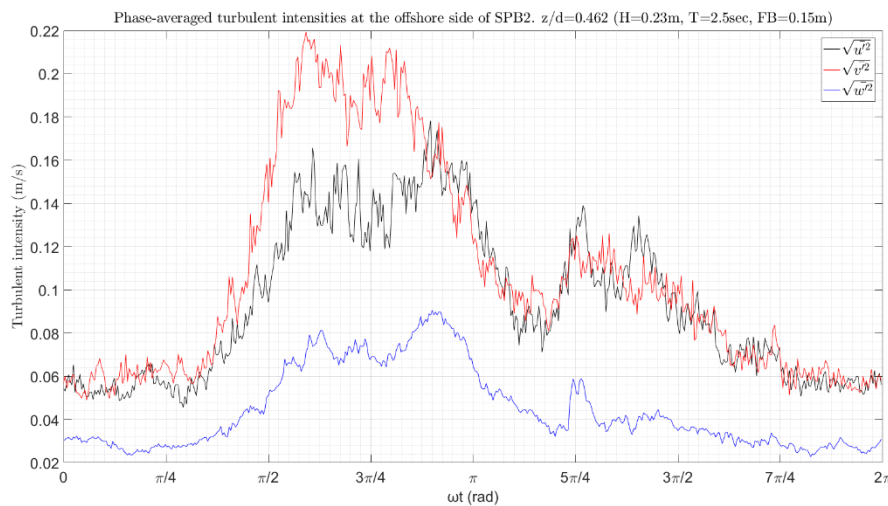
Στο Σχήμα 5.3.132 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για την οριζόντια και τη κατακόρυφη ταχύτητα η περιοδική κίνηση εκδηλώνεται κυρίως στη πρώτη αρμονική συνιστώσα, ωστόσο είναι εμφανής η παραγωγή ανωτέρων αρμονικών. Πιο συγκεκριμένα η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.33m/s και 0.05m/s για 0.4Hz και 0.8Hz αντίστοιχα. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz και 0.8Hz πλάτη ταλάντωσης 0.23m/s και 0.05m/s αντίστοιχα.



Σχήμα 5.3.132 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

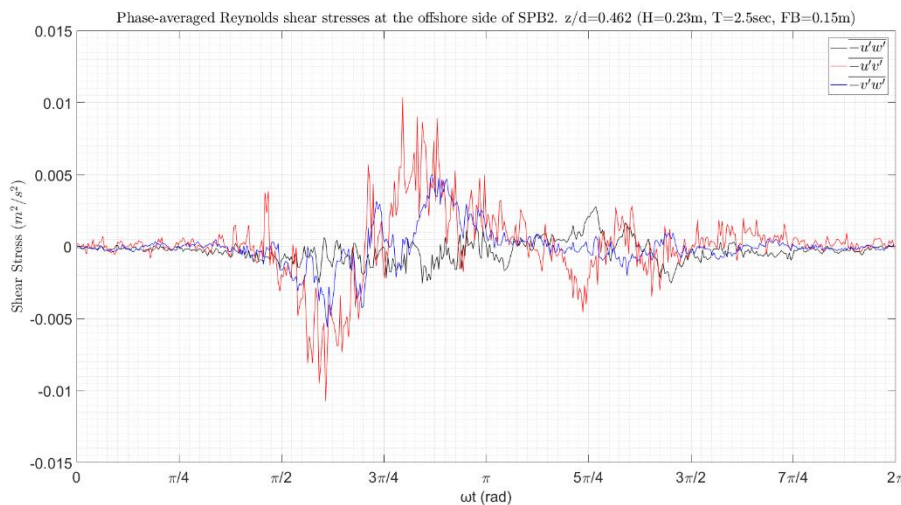
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.133. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο, με εξαίρεση κάποιες μέγιστες τιμές, ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.18m/s 0.22m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.09m/s.



Σχήμα 5.3.133 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.134 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Η διατμητική τάση  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο x-y λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $10.3 * 10^{-3} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-10.7 * 10^{-3} m^2/s^2$ . Η διατμητική τάση  $-\overline{v'w'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο y-z λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $5 * 10^{-3} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-5.6 * 10^{-3} m^2/s^2$ .

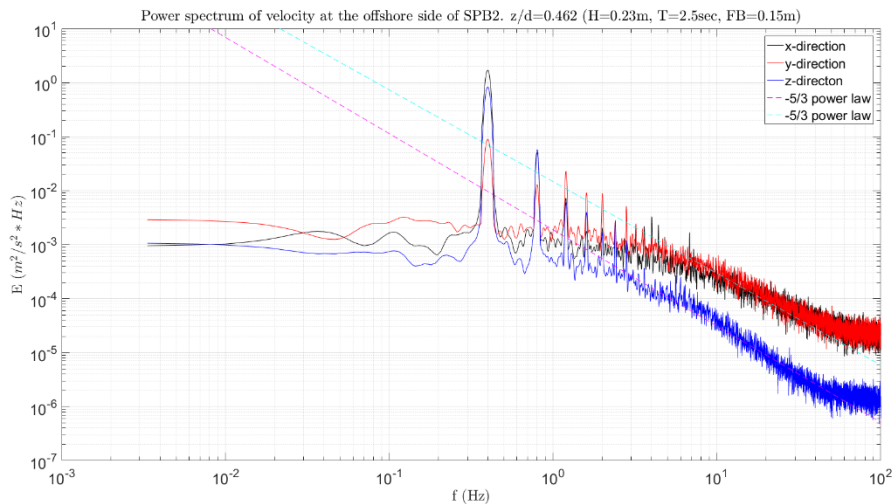


Σχήμα 5.3.134 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.135. Σημαντική μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές παρουσιάζουν και οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $1.7\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη  $z$  είναι  $0.83\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $y$  είναι  $0.09\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 3\text{Hz}$  μέχρι  $f = 60\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 6\text{Hz}$  μέχρι  $f = 100\text{Hz}$  περίπου.



Σχήμα 5.3.135 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.462$ , προσήνεμη πλευρά.

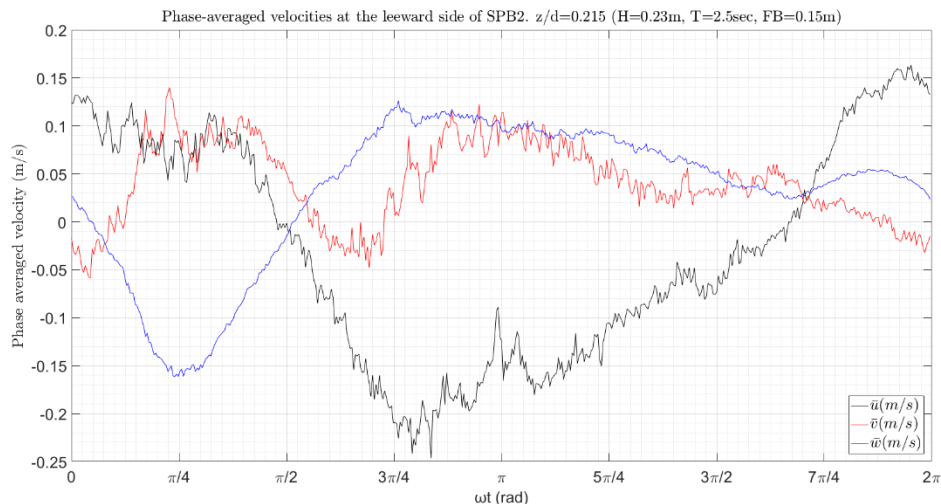
### 5.3.4.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

#### 1. Σχετική θέση, $z/d = 0.215$ .

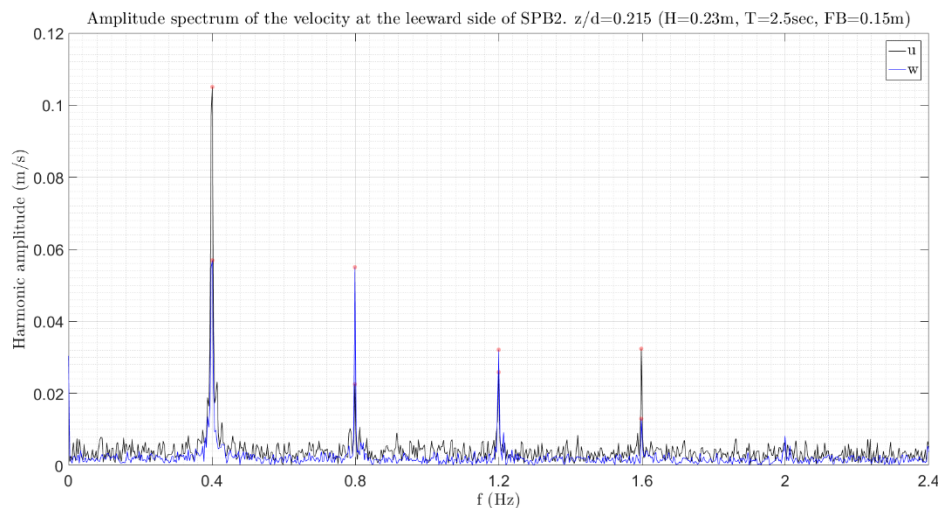
Στο Σχήμα 5.3.136 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.25, 0.16]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.16, 0.13]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.06, 0.14]$  (m/s).

Στο Σχήμα 5.3.137 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης  $0.105\text{m/s}$ ,  $0.022\text{m/s}$ ,  $0.026\text{m/s}$ ,  $0.018\text{m/s}$  και  $0.032\text{m/s}$  για  $0.4\text{Hz}$ ,  $0.8\text{Hz}$ ,  $1.2\text{Hz}$  και  $1.6\text{Hz}$  αντίστοιχα. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες  $0.4\text{Hz}$ ,  $0.8\text{Hz}$ ,  $1.2\text{Hz}$  και  $1.6\text{Hz}$  πλάτη ταλάντωσης  $0.06\text{m/s}$ ,  $0.055\text{m/s}$ ,  $0.032\text{m/s}$  και  $0.013\text{m/s}$  αντίστοιχα.

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.136 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



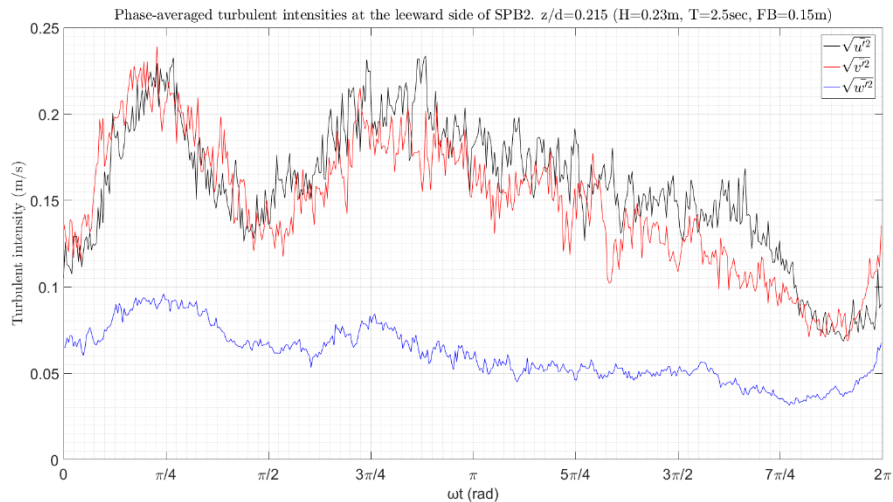
Σχήμα 5.3.137 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.138. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.23m/s και 0.24m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.1m/s.

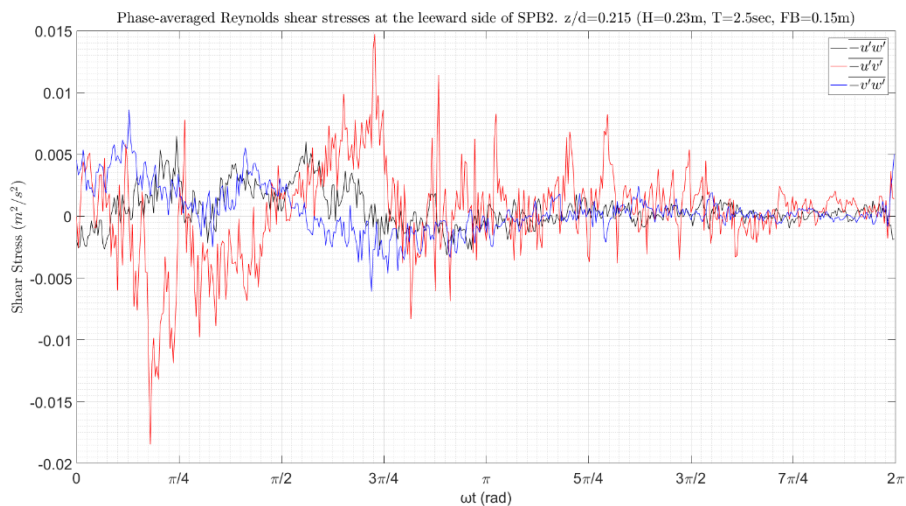
Στο Σχήμα 5.3.139 δίνεται η μεταβολή των διαμηθικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Οι πιο ισχυρές διαμηθικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y όπου η  $-\overline{u'v'}$  λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $1.47 * 10^{-2} m^2/s^2$  και μέγιστη αρνητική  $-1.85 * 10^{-2} m^2/s^2$ .



## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.138 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.



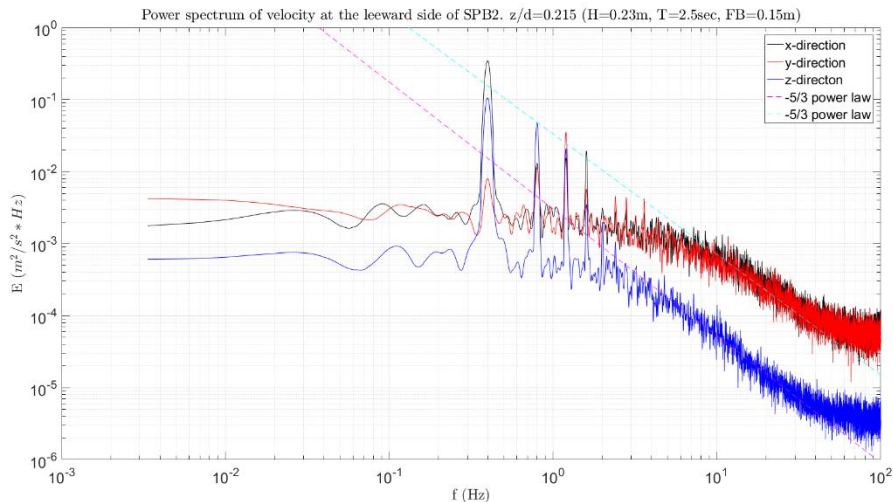
Σχήμα 5.3.139 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.140. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.35 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.11 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.008 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδραειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδραειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 7\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$  περίπου.



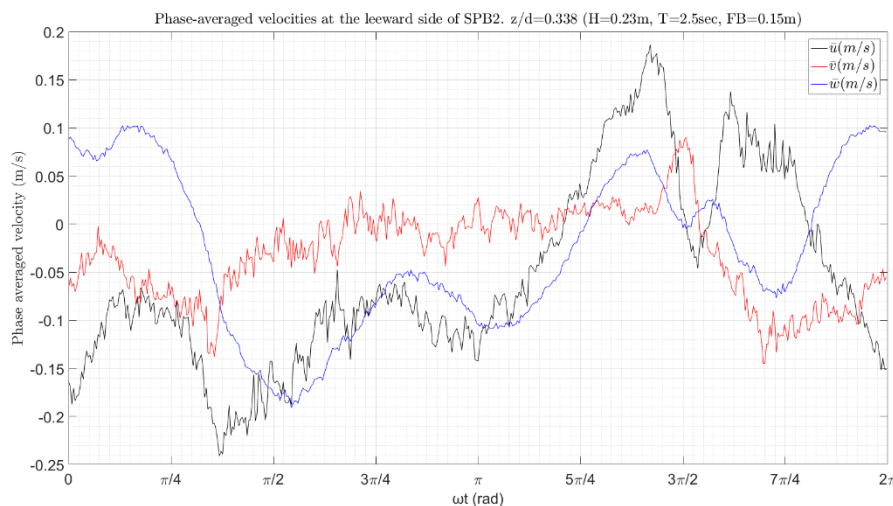
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.140 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.215$ , υπήνεμη πλευρά.

### 2. Σχετική θέση, $z/d = 0.338$ .

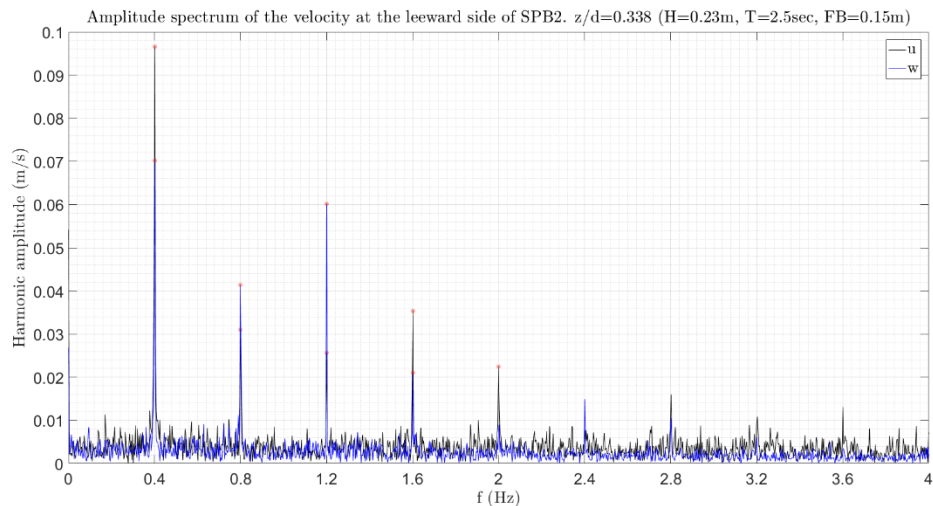
Στο Σχήμα 5.3.141 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.24, 0.19]$  (m/s), της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.19, 0.10]$  (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ  $[-0.15, 0.09]$  (m/s).



Σχήμα 5.3.141 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

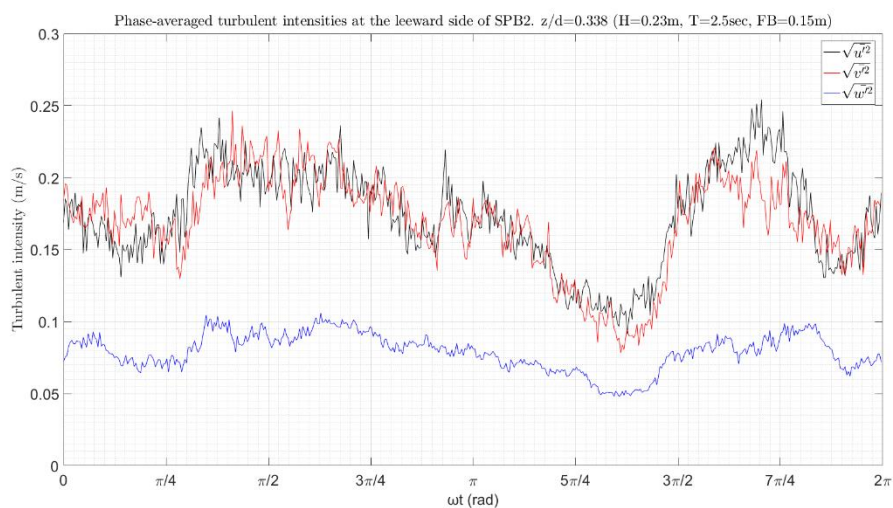
Στο Σχήμα 5.3.142 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.1m/s για συχνότητα 0.4Hz, 0.03m/s για συχνότητα 0.4Hz, 0.025m/s για συχνότητα 1.2Hz, 0.035m/s για συχνότητα 1.6Hz και 0.022m/s για συχνότητα 2Hz. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz, 0.8Hz, 1.2Hz και 1.6Hz πλάτη ταλάντωσης 0.07m/s, 0.04m/s, 0.06m/s και 0.02m/s αντίστοιχα.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.3.142 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη x (μαύρο), και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

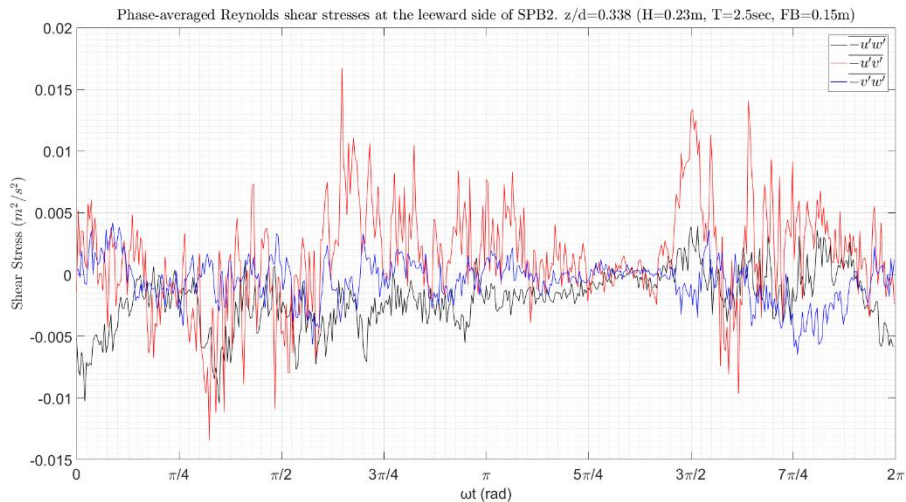
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.143. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Το μέγεθος των τυρβωδών εντάσεων κατά τη x και y διεύθυνση είναι σχεδόν ίδιο μέσα στη κυματική περίοδο ενώ στη z διεύθυνση το αντίστοιχο μέγεθος είναι μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.25m/s ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.11m/s.



Σχήμα 5.3.143 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.338$ , υπήνεμη πλευρά.

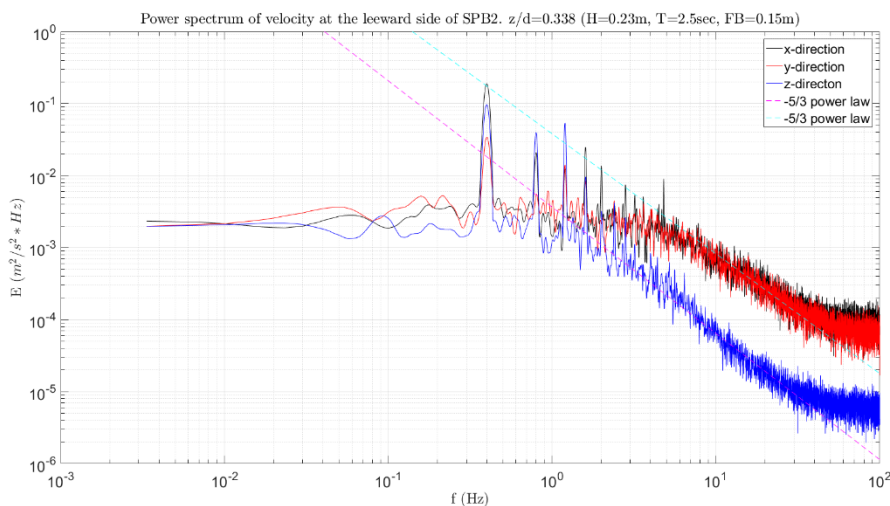
Στο Σχήμα 5.3.144 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι οι μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις εκδηλώνονται στο επίπεδο x-y. Η διατμητική τάση  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο x-y λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $0.017 \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.013 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.144 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R4, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.145. Από το σχήμα αυτό είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές, κυρίως για την κατακόρυφη ταχύτητα. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.19\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ , στη z είναι  $0.095\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη y είναι  $0.03\text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Ο νόμος δύναμης -5/3 του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$ , ενώ στη οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 5\text{Hz}$  μέχρι  $f = 40\text{Hz}$  περίπου.



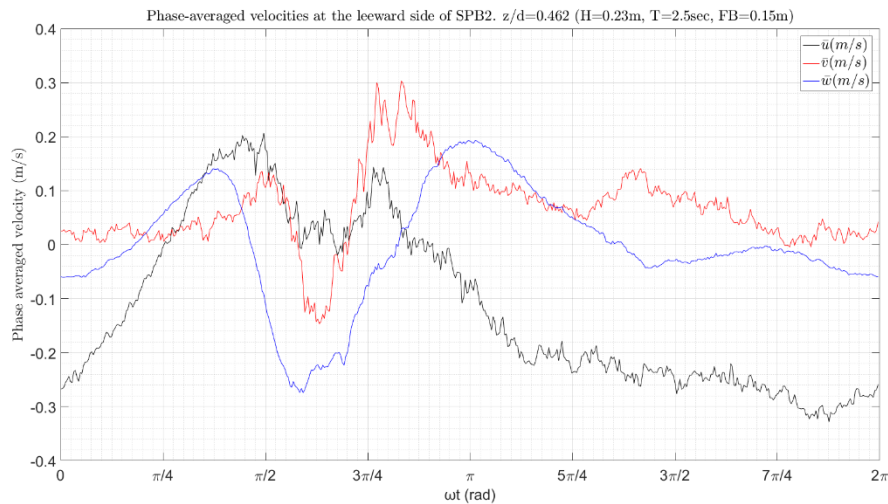
Σχήμα 5.3.145 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4, z/d=0.338, υπήνεμη πλευρά.

### 3. Σχετική θέση, $z/d = 0.462$ .

Στο Σχήμα 5.3.146 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.33, 0.21]$  (m/s), της

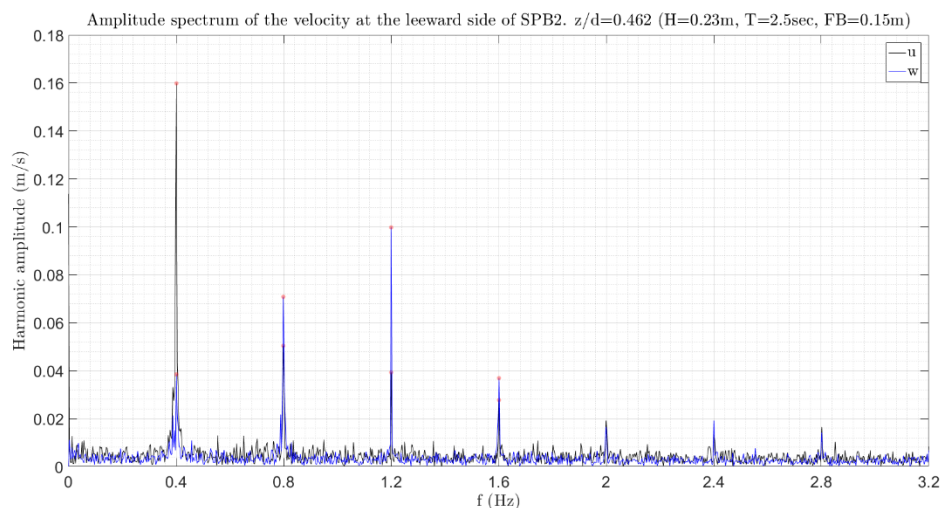
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

κατακόρυφης ( $\bar{w}$ ) [-0.27, 0.19] (m/s) ενώ της εγκάρσιας ταχύτητας ( $\bar{v}$ ) κυμαίνεται μεταξύ [-0.15, 0.3] (m/s).



Σχήμα 5.3.146 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, ταχύτητες στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.147 φαίνεται το φάσμα του πλάτους ταλάντωσης των ταχυτήτων στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια (μαύρο) και την κατακόρυφη (μπλε) ταχύτητα. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει σημαντικό πλάτος ταλάντωσης στη 1<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα ενώ για την κατακόρυφη ταχύτητα το μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης εκδηλώνεται στην 3<sup>η</sup> αρμονική. Η οριζόντια ταχύτητα παρουσιάζει πλάτη ταλάντωσης 0.16m/s για συχνότητα 0.4Hz, 0.05m/s για συχνότητα 0.8Hz, 0.04m/s για 1.2Hz και 0.028m/s για συχνότητα 1.6Hz. Η περιοδική κίνηση στην κατακόρυφη διεύθυνση παρουσιάζει στις συχνότητες 0.4Hz, 0.8Hz, 1.2Hz και 1.6Hz πλάτη ταλάντωσης 0.04m/s και 0.07m/s, 0.1m/s και 0.04m/s αντίστοιχα.



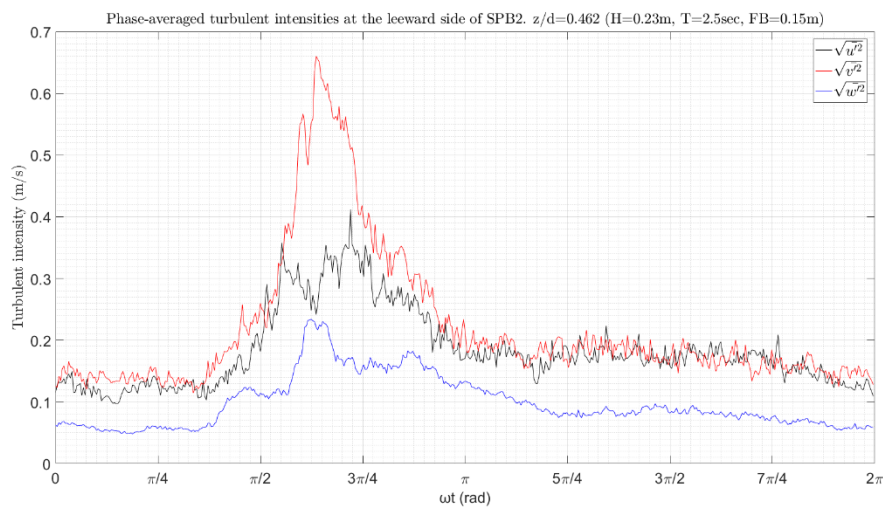
Σχήμα 5.3.147 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.148. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι και κατά τις τρεις διευθύνσεις η τυρβώδης ένταση ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή αλλά με σημαντικές διαφορές



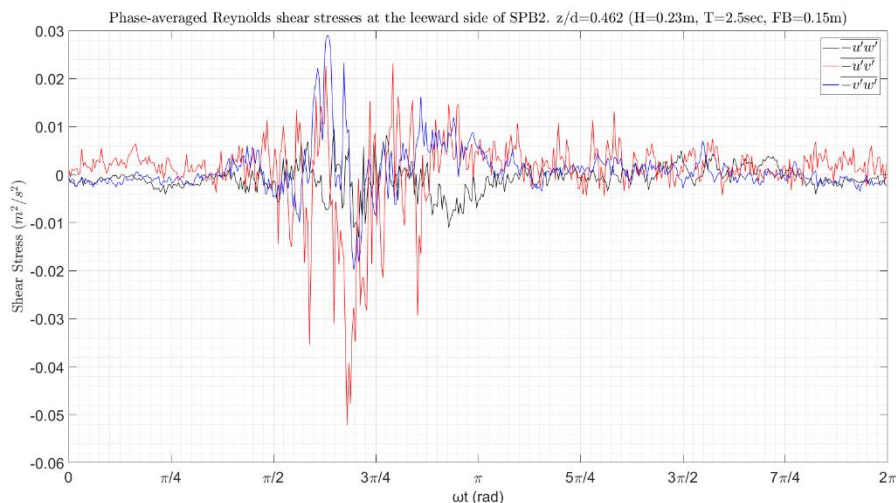
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

στις μέγιστες τιμές. Πιο συγκεκριμένα κατά την x και y διεύθυνση η ένταση της τύρβης λαμβάνει μέγιστη τιμή 0.4m/s και 0.66m/s αντίστοιχα ενώ κατά την διεύθυνση z η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι 0.23m/s.



Σχήμα 5.3.148 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο), y (κόκκινο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4, z/d=0.462, υπήνεμη πλευρά.

Στο Σχήμα 5.3.149 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η έξαρση των διατμητικών τάσεων είναι εντονότερη στα επίπεδα y-z και x-y. Η διατμητική τάση  $-\overline{u'v'}$  που εκδηλώνεται στο επίπεδο x-y λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $0.023 \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.052 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Αντίστοιχα η διατμητική τάση  $-\overline{u'w'}$  στο επίπεδο x-z, λαμβάνει μέγιστη θετική τιμή  $0.029 \text{ m}^2/\text{s}^2$  και μέγιστη αρνητική  $-0.02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .



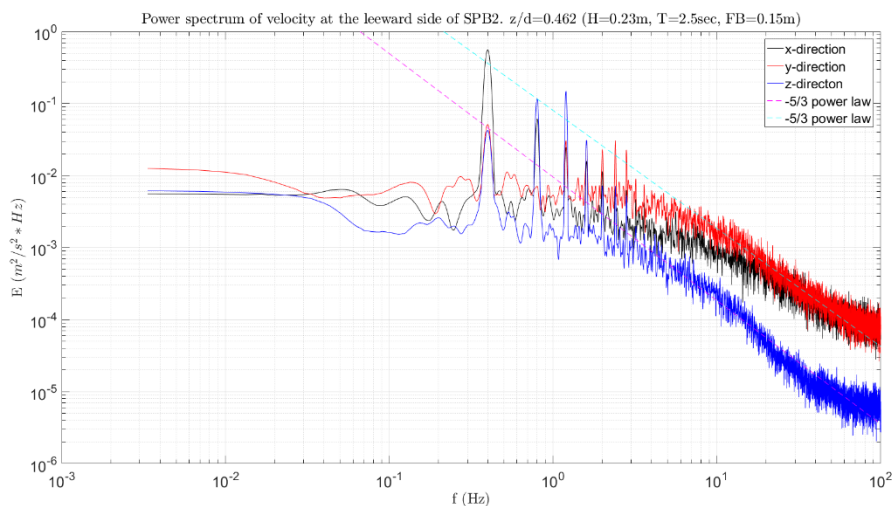
Σχήμα 5.3.149 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διατμητικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο), x-y (κόκκινο) και y-z (μπλε) επίπεδο. 2-R4, z/d=0.462, υπήνεμη πλευρά.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.150. Από το σχήμα αυτό είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας προς υψηλότερες αρμονικές κυρίως για την κατακόρυφη ταχύτητα. Για τη κύρια συχνότητα της περιοδικής κίνησης ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) η τιμή της

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $0.56 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη  $z$  είναι  $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Η μεγαλύτερη ενέργεια για την κατακόρυφη ταχύτητα εκδηλώνεται για  $f = 1.2 \text{ Hz}$  με τιμή  $0.15 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ .

Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Κολμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται έντονα και στις τρεις συνιστώσες. Για την κατακόρυφη συνιστώσα το αδρανειακό υπό-εύρος λαμβάνει χώρα για συχνότητες από  $f = 2 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 60 \text{ Hz}$ , στην οριζόντια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 8 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 100 \text{ Hz}$  και για την εγκάρσια διεύθυνση το αντίστοιχο εύρος είναι από  $f = 10 \text{ Hz}$  μέχρι  $f = 100 \text{ Hz}$ .



Σχήμα 5.3.150 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο),  $y$  (κόκκινο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.462$ , υπήνεμη πλευρά.

### 5.3.4.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

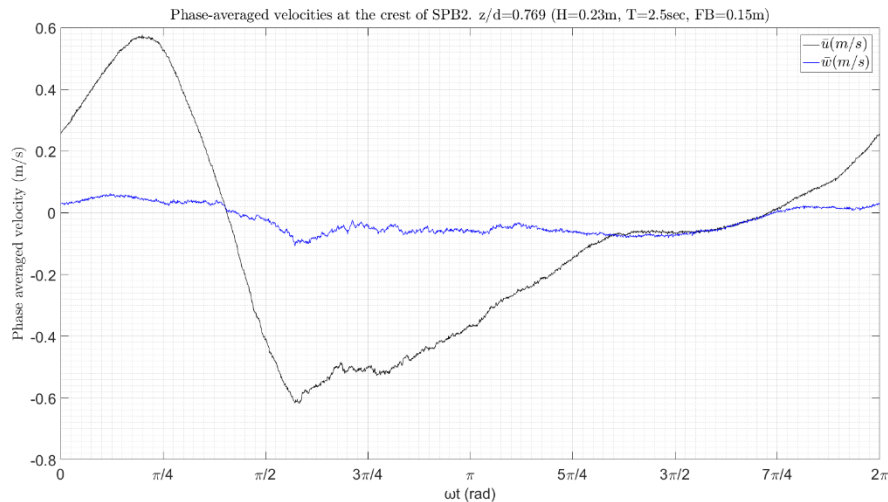
#### 1. Στέψη, σχετική θέση, $z/d = 0.769$ .

Στο Σχήμα 5.3.151 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.62, 0.58]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.11, 0.06]$  (m/s).

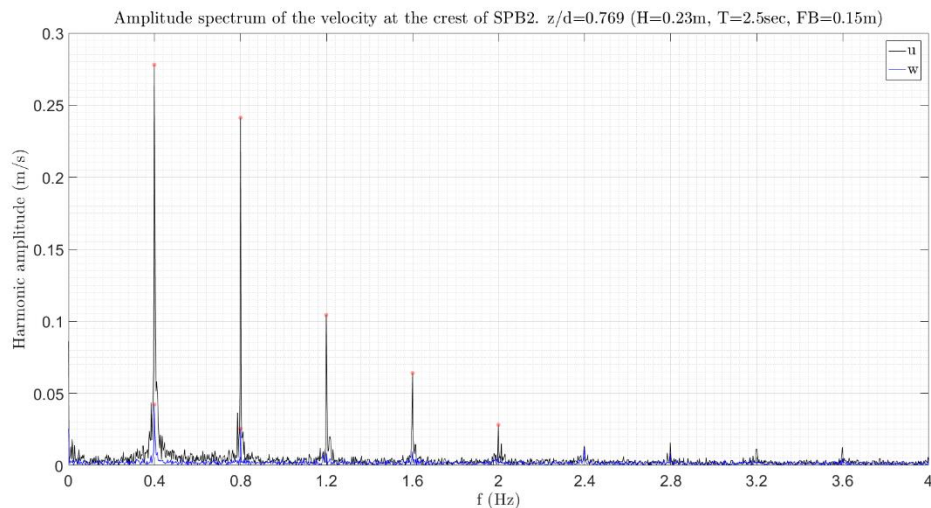
Το πλάτος ταλάντωσης της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα δίνεται στο Σχήμα 5.3.152. Για την οριζόντια ταχύτητα σημαντικό πλάτος ταλάντωσης παρουσιάζουν η πρώτη και η δεύτερη αρμονική συνιστώσα με την τρίτη και την τέταρτη αρμονική να εκδηλώνουν αρκετά μικρότερο αρμονικό πλάτος. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.4 \text{ Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.28 \text{ m/s}$ , η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.8 \text{ Hz}$ )  $0.24 \text{ m/s}$ , η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.2 \text{ Hz}$ ) έχει πλάτος  $0.1 \text{ m/s}$  και η 4<sup>η</sup> ( $f = 1.6 \text{ Hz}$ ) παρουσιάζει πλάτος  $0.06 \text{ m/s}$ . Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται οι δύο πρώτες αρμονικές συνιστώσες, με συχνότητες  $f = 0.4 \text{ Hz}$  και  $f = 0.8 \text{ Hz}$ , και με πλάτη ταλάντωσης  $0.04 \text{ m/s}$  και  $0.03 \text{ /s}$  αντίστοιχα.



## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.151 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.



Σχήμα 5.3.152 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.

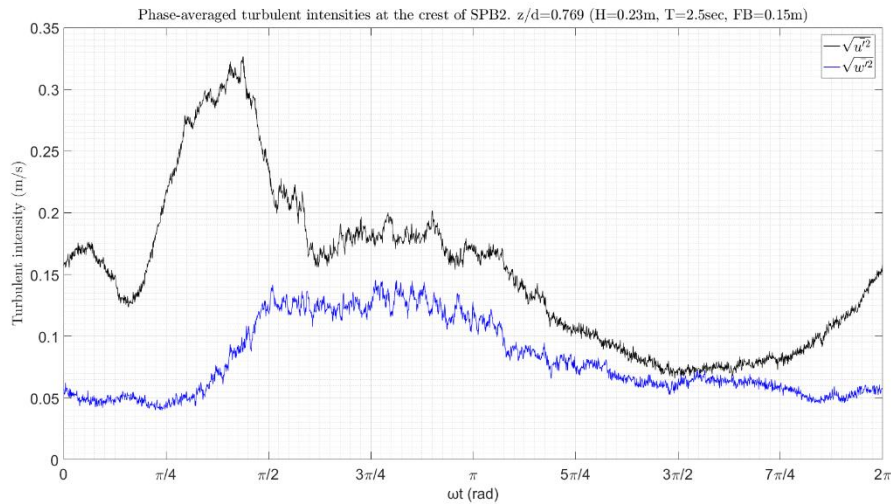
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.153. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι μεγαλύτερη στην οριζόντια (μαύρο) απ' ό τι στη κατακόρυφη (μπλε) διεύθυνση σε όλη τη διάρκεια της κυματικής περιόδου. Η μέγιστη τυρβώδης ένταση της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου  $0.33 \text{ m/s}$  και της κατακόρυφης  $0.15 \text{ m/s}$ .

Στο Σχήμα 5.3.154 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-17.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

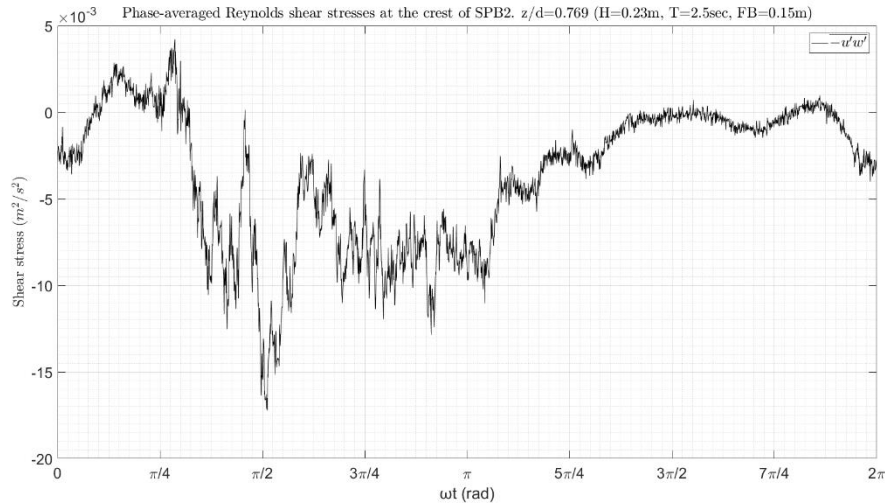
Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.155. Από το σχήμα παρατηρείται ότι η ενέργεια σε κάθε αρμονική συχνότητα είναι μεγαλύτερη στην οριζόντια απ' ό τι στην κατακόρυφη διεύθυνση. Για τη κύρια συχνότητα των κυματισμών η τιμή της ενέργειας στη  $x$  διεύθυνση είναι  $2.33 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$  και στη  $z$  αντίστοιχα είναι  $0.05 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{Hz}$ . Στο ίδιο σχήμα είναι εμφανής η μεταφορά ενέργειας από την κύρια συχνότητα σε υψηλότερες αρμονικές. Ο νόμος

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

δύναμης  $-5/3$  του Κοιμογορον για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 4\text{Hz}$  και  $f = 200\text{Hz}$ .

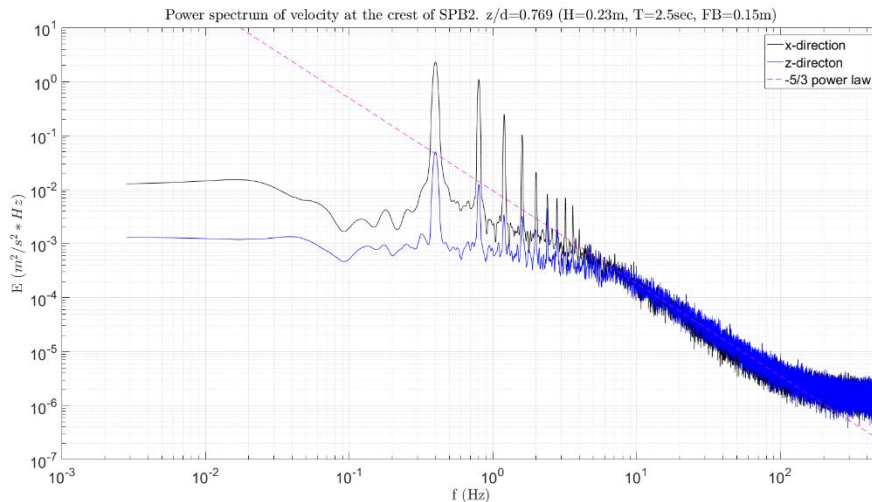


Σχήμα 5.3.153 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.



Σχήμα 5.3.154 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο  $x$ - $z$  (μαύρο) επίπεδο. 2-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.

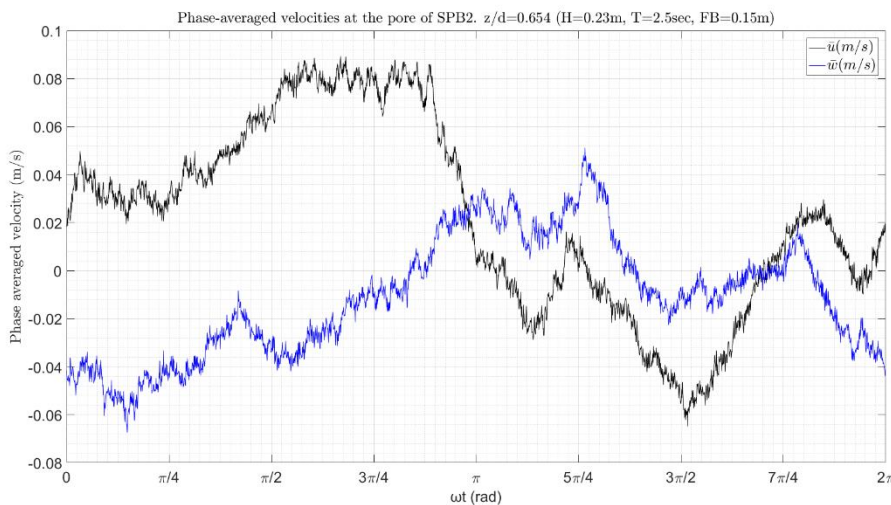
## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.155 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.769$ , στέψη.

### 2. Πόρος, σχετική θέση, $z/d = 0.654$ .

Στο Σχήμα 5.3.156 φαίνονται οι μέσες τιμές της ταχύτητας ως προς την φάση του κυματισμού. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το εύρος της οριζόντιας ταχύτητας ( $\bar{u}$ ) είναι  $[-0.065, 0.09]$  (m/s) και της κατακόρυφης ( $\bar{w}$ )  $[-0.067, 0.05]$  (m/s).

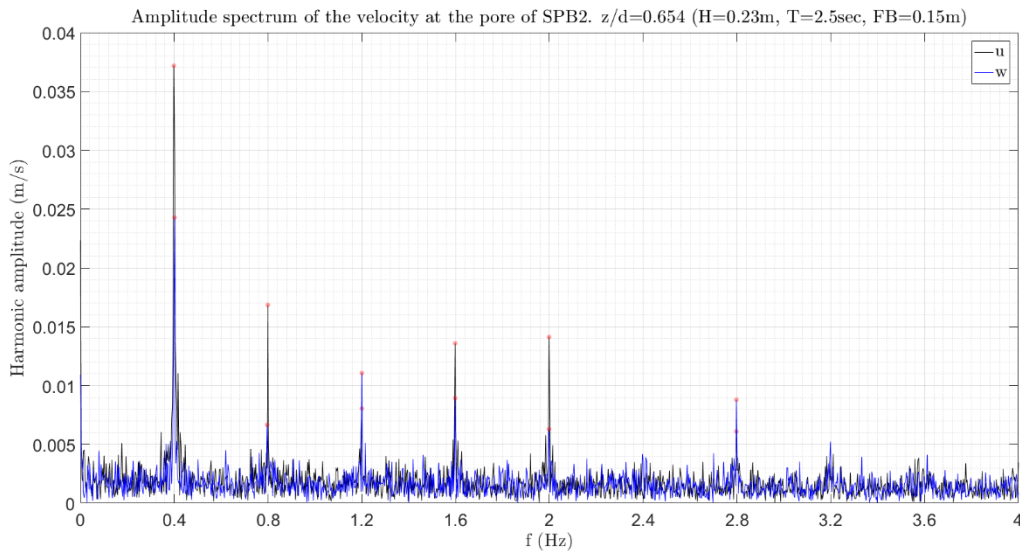


Σχήμα 5.3.156 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.654$ , πόρος.

Το εύρος της ταχύτητας στο πεδίο των συχνοτήτων για την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας δίνεται στο Σχήμα 5.3.157. Από το σχήμα παρατηρείται ότι τα δύο διανύσματα της ταχύτητας εκδηλώνουν σημαντικές αρμονικές μέχρι και τη συχνότητα των 2.8Hz. Η κύρια αρμονική συνιστώσα της οριζόντιας ταχύτητας ( $f = 0.4\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.037m/s, η 2<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 0.8\text{Hz}$ ) 0.017m/s, η 3<sup>η</sup> αρμονική ( $f = 1.2\text{Hz}$ ) έχει πλάτος 0.008m/s, η 4<sup>η</sup> ( $f = 1.6\text{Hz}$ ) και η 5<sup>η</sup> ( $f = 2.0\text{Hz}$ ) έχουν πλάτος 0.014m/s. Αντίστοιχα για την κατακόρυφη ταχύτητα παρατηρούνται

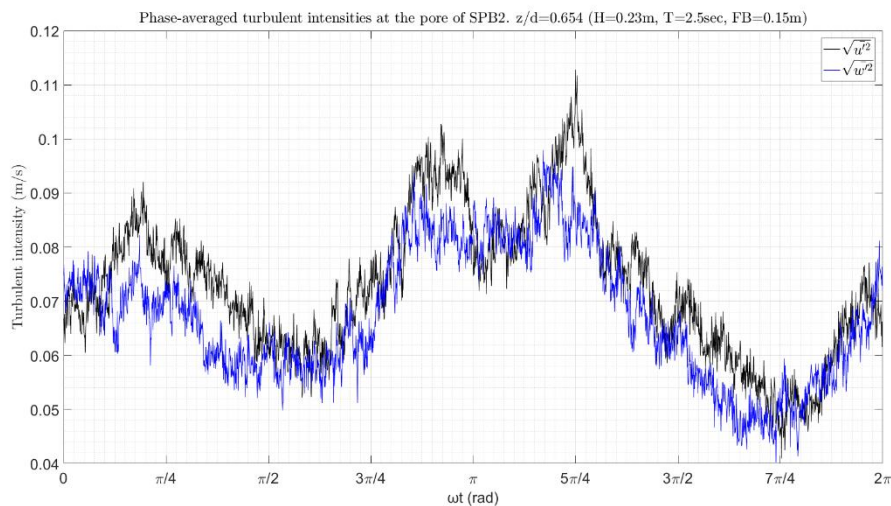
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

πλάτη ταλάντωσης 0.024m/s, 0.007m/s, 0.01m/s και 0.009m/s για συχνότητες 0.4Hz, 0.8Hz, 1.2Hz και 1.6Hz αντίστοιχα, καθώς επίσης και πλάτος 0.009m/s για συχνότητα  $f = 2.8\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.3.157 Φάσμα εύρους των ταχυτήτων στη  $x$  (μαύρο), και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.654$ , πόρος.

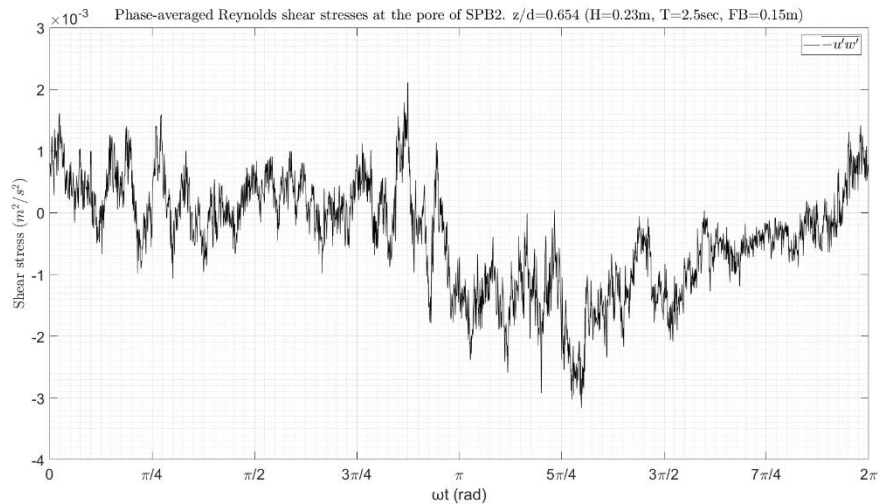
Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας ως προς τη φάση του κυματισμού  $\omega t$  φαίνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.3.158. Οι τυρβώδεις εντάσεις ακολουθούν σχεδόν ίδια μεταβολή μέσα στη κυματική περίοδο. Η μέγιστη τυρβώδης ένταση της οριζόντιας ταχύτητας είναι περίπου 0.11m/s και της κατακόρυφης 0.1m/s.



Σχήμα 5.3.158 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας στη  $x$  (μαύρο) και  $z$  (μπλε) διάσταση. 2-R4,  $z/d=0.654$ , πόρος.

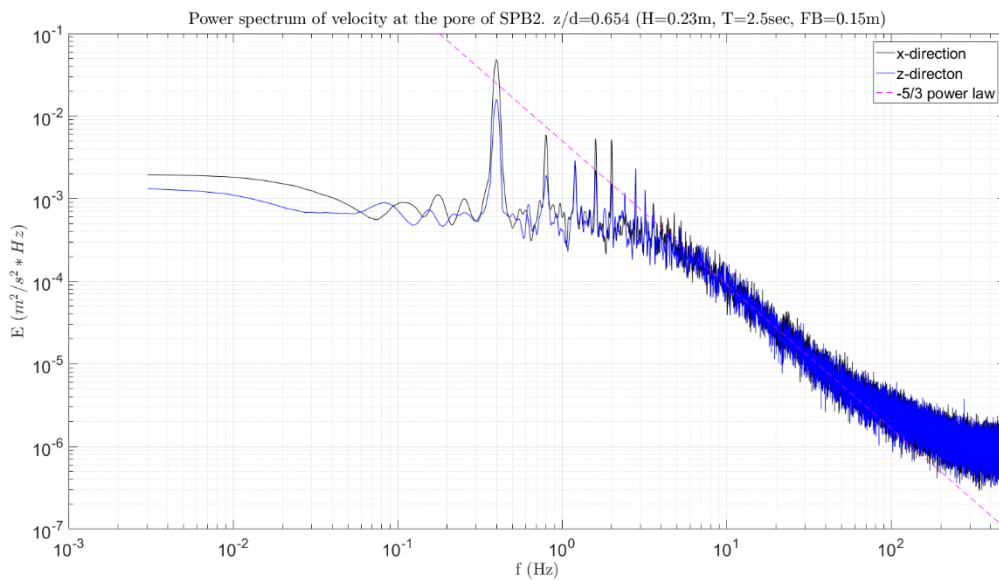
Στο Σχήμα 5.3.159 δίνεται η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds ως προς τη φάση του κυματισμού στο επίπεδο  $x$ - $z$ . Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι  $21 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$  ενώ η ελάχιστη είναι  $-3.1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

## Αποτελέσματα για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m



Σχήμα 5.3.159 Μέσες, ως προς την φάση του κυματισμού, διαμητρικές τάσεις Reynolds στο x-z (μαύρο) επίπεδο. 2-R4, z/d=0.654, πόρος.

Τα φάσματα ενέργειας για κάθε μία συνιστώσα της ταχύτητας φαίνονται στο Σχήμα 5.3.160. Για τη κύρια συχνότητα των κυματισμών η τιμή της ενέργειας στη x διεύθυνση είναι  $0.048 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$  και στη z αντίστοιχα είναι  $0.016 \text{ m}^2/\text{s}^2 * \text{Hz}$ . Ο νόμος δύναμης  $-5/3$  του Kolmogorov για το αδρανειακό υπό-εύρος εκδηλώνεται στη περίπτωση αυτή έντονα και για τις δύο συνιστώσες της ταχύτητας και λαμβάνει χώρα μεταξύ των συχνοτήτων  $f = 5\text{Hz}$  και  $f = 100\text{Hz}$ .



Σχήμα 5.3.160 Φάσμα ενέργειας της ταχύτητας στη x (μαύρο) και z (μπλε) διάσταση. 2-R4, z/d=0.654, πόρος.



## 5.4 Προφίλ χαρακτηριστικών οριζόντιων ταχυτήτων $u_{rms}$

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα προφίλ των χαρακτηριστικών οριζόντιων ταχυτήτων στις τρεις διατομές μέτρησης, την προσήνεμη, την υπήνεμη και τη κεντρική διατομή. Ως χαρακτηριστική ταχύτητα επιλέχθηκε η μέση τετραγωνική τιμή από κάθε χρονοσειρά της ταχύτητας ( $u_{rms}$ ), η οποία υπολογίζεται από τη σχέση 4.13. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για τα δύο φυσικά ομοιώματα, SPB1 και SPB2, που εξετάστηκαν.

### 5.4.1 Φυσικό ομοίωμα SPB1

Όπως έχει ειπωθεί και στην ενότητα 4.3, η αξιοπιστία των μετρήσεων από το όργανο ADV δεν είναι ίδια για όλες. Στους παρακάτω πίνακες που παρουσιάζονται, με πράσινο χρώμα οι μετρήσεις θεωρούνται αξιόπιστες, με κίτρινο ουδέτερες και με κόκκινο κακές.

Στους πίνακες που ακολουθούν (Πίνακας 5.4.1 και Πίνακας 5.4.2) έχουν υπολογιστεί οι οριζόντιες μέσες τετραγωνικές ταχύτητες ( $u_{rms}$ ) από τις χρονοσειρές των ταχυτήτων.

Πίνακας 5.4.1 Οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m.

Ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στο φυσικό ομοίωμα SPB1. Βάθος νερού 0.65m.												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
1-R1	0.65	0.06	1	0.027	0.030	0.071	0.029	0.095	0.091	0.073	0.054	
1-R2		0.11	1.5	0.089	0.110	0.144	0.114	0.115	0.372	0.180	0.063	
1-R3		0.17	2	0.127	0.198	0.250	0.186	0.184	0.494	0.459	0.070	
1-R4		0.23	2.5	0.160	0.250	0.327	0.222	0.230	0.467	0.662	0.070	

Πίνακας 5.4.2 Οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.7m.

Ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στο φυσικό ομοίωμα SPB1. Βάθος νερού 0.7m.												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
1-R5	0.7	0.06	1	0.081	0.091	0.062	0.066	0.059	0.078	0.060	0.032	
1-R6		0.11	1.5	0.074	0.089	0.131	0.112	0.109	0.210	0.165	0.057	
1-R7		0.17	2	0.141	0.199	0.257	0.155	0.151	0.339	0.388	0.069	
1-R8		0.23	2.5	0.163	0.232	0.304	0.204	0.216	0.408	0.586	0.070	

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.4.3) έχει υπολογιστεί η επί τοις εκατό μεταβολή των ταχυτήτων για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από το βάθος νερού 0.65m στο βάθος νερού 0.7m.



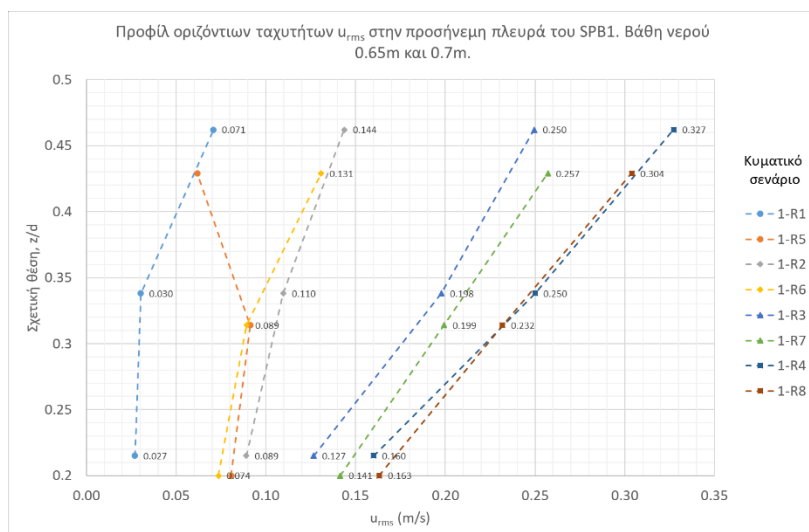
## Προφίλ χαρακτηριστικών οριζόντιων ταχυτήτων $u_{rms}$

Πίνακας 5.4.3 Μεταβολή (%) των  $u_{rms}$  για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από βάθος 0.65m σε 0.7m.

Μεταβολή (%) των $u_{rms}$ για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από βάθος 0.65m σε 0.7m.												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.769/0.714	0.654/0.607
	1-R1/R5	0.65→0.7	0.06	1	199.1	201.5	-12.7	131.0	-38.1	-14.4	-18.1	-40.7
	1-R2/R6		0.11	1.5	-17.5	-18.6	-8.9	-2.0	-5.4	-43.4	-8.7	-9.7
	1-R3/R7		0.17	2	11.6	0.7	3.0	-16.8	-17.9	-31.4	-15.4	-0.7
	1-R4/R8		0.23	2.5	2.0	-7.3	-7.1	-8.1	-5.9	-12.5	-11.4	0.3

Από τα στοιχεία των παραπάνω δύο πινάκων παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά τα προφίλ των ταχυτήτων στη προσήνεμη, την υπήνεμη και τη κεντρική διατομή (στέψη, πόρος) του φυσικού ομοιώματος SPB1 για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν, 0.65m και 0.7m.

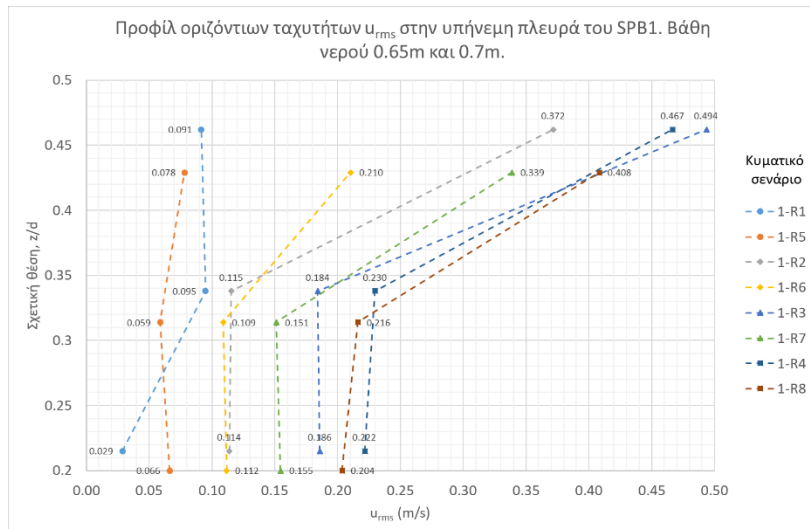
Στο Σχήμα 5.4.1 φαίνονται οι  $u_{rms}$  ταχύτητες στην προσήνεμη διατομή του SPB1. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται για τα ομόλογα κυματικά σενάρια, 1-R2 και 1-R6, 1-R3 και 1-R7, 1-R4 και 1-R8, ότι οι τιμές τους στις αντίστοιχες θέσεις μέτρησης δεν διαφέρουν σημαντικά (μέγιστη διαφορά μεταξύ δεδομένων 18.6%), με την γενική εικόνα να δείχνει ότι οι τιμές της ταχύτητας είναι κατά κύριο λόγο μεγαλύτερες στην περίπτωση του μικρότερου βάθους των 0.65m, όπως αναμένετο.



Σχήμα 5.4.1 Καθ' ύψος μεταβολή των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στην προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

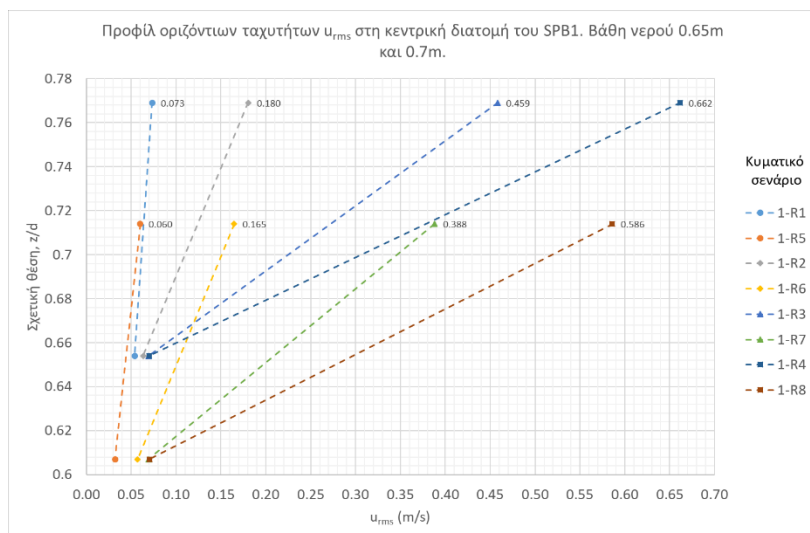
Στο Σχήμα 5.4.2 δίνονται γραφικά οι τιμές της  $u_{rms}$  ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB1 για τα βάθη νερού 0.65m και 0.7m. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι οι ταχύτητες στις σχετικές θέσεις που αντιστοιχούν στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη λαμβάνουν σχεδόν την ίδια τιμή για κάθε ένα ξεχωριστό κυματικό σενάριο. Επίσης, στην υπήνεμη πλευρά και κυρίως στις ανώτερες θέσεις μέτρησης  $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$ , διακρίνεται μια απότομη αύξηση της των ταχυτήτων για την πλειοψηφία των κυματικών σεναρίων σε σύγκριση με τις τιμές που παρατηρούνται στην προσήνεμη πλευρά. Η διαφορά αυτή ενδεχομένως είναι υπεύθυνη για μια ιδιόμορφη ανακυκλοφορία της μέσης ροής αμέσως κατάντη του έργου που πιθανότατα σχετίζεται με αστοχίες που έχουν εντοπισθεί στο κατάντη πρηνές του κυματοθραύστη. Και στην υπήνεμη διατομή τα κυματικά σενάρια που αντιστοιχούν στο μικρότερο βάθος νερού των 0.65m δίνουν μεγαλύτερες ταχύτητες σε σύγκριση με αυτές που προκύπτουν για βάθος νερού 0.7m.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.4.2 Καθ' ύψος μεταβολή των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

Στο Σχήμα 5.4.3 δίνονται τα προφίλ των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στη κεντρική διατομή του SPB1. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η χαρακτηριστική ταχύτητα στον πόρο φαίνεται να κρατάει σχεδόν αμετάβλητη τιμή καθώς το ύψος και η περίοδος του κύματος αυξάνει. Η μέγιστη ταχύτητα που παρατηρείται στον πόρο είναι 0.07m/s και για τα δύο βάθη νερού. Στην στέψη οι διαφορές στις χαρακτηριστικές ταχύτητες των ομόλογων κυματικών σεναρίων κυμαίνονται από 8.7% , για τα κυματικά σενάρια 1-R2 και 1-R6, μέχρι 18.1% για τα κυματικά σενάρια 1-R1 και 1-R5. Αντίστοιχα με τις περιπτώσεις στην προσήνεμη και την υπήνεμη πλευρά, και στην κεντρική διατομή οι χαρακτηριστικές ταχύτητες είναι μεγαλύτερες για την περίπτωση του μικρότερου βάθους νερού των 0.65m.



Σχήμα 5.4.3 Καθ' ύψος μεταβολή των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

Συγκρίνοντας τις χαρακτηριστικές ταχύτητες στις αντίστοιχες σχετικές θέσεις της προσήνεμης και της υπήνεμης πλευράς, μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για το πώς μεταβάλλεται η

## Προφίλ χαρακτηριστικών οριζόντιων ταχυτήτων $u_{rms}$

ταχύτητα της ροής από τα ανάντη στα κατόντη της ύφαλής κατασκευής. Για τις σχετικές θέσεις  $z/d=0.2$  και  $z/d=0.215$  παρατηρούνται αυξημένες ταχύτητες στην υπήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος. Για μεσαίες σχετικές θέσεις,  $z/d=0.314$  και  $z/d=0.338$ , παρατηρείται αύξηση των ταχυτήτων για τα κυματικά σενάρια 1-R2 και 1-R6 και μείωση για τα κυματικά σενάρια 1-R3, 1-R7, 1-R4 και 1-R8. Τέλος, για τις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις  $z/d=0.429$  και  $z/d=0.462$  είναι εμφανής η απότομη αύξηση των χαρακτηριστικών τιμών της ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά.

### 5.4.2 Φυσικό ομοίωμα SPB2

Στον παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.4.4 και Πίνακας 5.4.5) δίνονται οι χαρακτηριστικές οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  για το μοντέλο SPB2, για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν.

Πίνακας 5.4.4 Οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m.

Ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στο φυσικό ομοίωμα SPB2. Βάθος νερού 0.65m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Υψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	2-R1	0.65	0.06	1	0.023	0.031	0.044	0.070	0.025	0.042	0.108	0.048
	2-R2		0.11	1.5	0.082	0.123	0.115	0.077	0.096	0.095	0.285	0.064
	2-R3		0.17	2	0.168	0.185	0.171	0.140	0.173	0.168	0.345	0.081
	2-R4		0.23	2.5	0.171	0.161	0.298	0.201	0.209	0.273	0.374	0.087

Πίνακας 5.4.5 Οριζόντιες ταχύτητες για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.7m.

Ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στο φυσικό ομοίωμα SPB2. Βάθος νερού 0.7m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Υψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
	2-R5	0.7	0.06	1	0.022	0.026	0.035	0.132	0.020	0.033	0.080	0.040
	2-R6		0.11	1.5	0.073	0.113	0.098	0.091	0.103	0.092	0.222	0.065
	2-R7		0.17	2	0.156	0.166	0.189	0.141	0.168	0.169	0.348	0.074
	2-R8		0.23	2.5	0.159	0.167	0.259	0.210	0.226	0.239	0.474	0.107

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.4.6) έχει υπολογιστεί η επί τοις εκατό μεταβολή των ταχυτήτων για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από το βάθος νερού 0.65m στο βάθος νερού 0.7m.

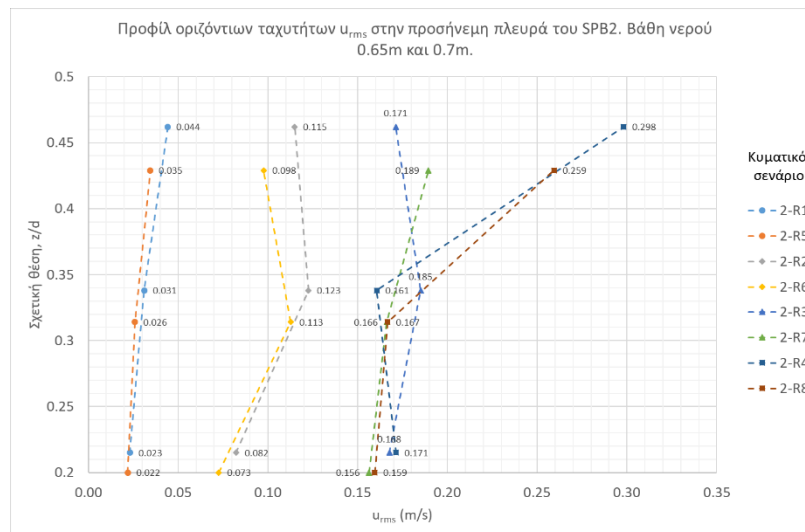
Πίνακας 5.4.6 Μεταβολή (%) των  $u_{rms}$  για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από βάθος 0.65m σε 0.7m.

Μεταβολή (%) των $u_{rms}$ για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από βάθος 0.65m σε 0.7m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Υψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.769/0.714	0.654/0.607
	2-R1/R5	0.65 → 0.7	0.06	1	-5.2	-16.9	-22.0	89.3	-19.9	-21.8	-25.6	-15.4
	2-R2/R6		0.11	1.5	-11.7	-8.0	-15.1	17.8	7.2	-3.6	-22.3	2.6
	2-R3/R7		0.17	2	-6.8	-10.2	10.7	0.7	-2.5	0.6	0.8	-8.7
	2-R4/R8		0.23	2.5	-6.9	3.8	-13.1	4.3	8.1	-12.2	26.7	22.5

Στο Σχήμα 5.4.4 φαίνονται οι  $u_{rms}$  ταχύτητες στην προσήνεμη διατομή του SPB2. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι τα σενάρια με τα ίδια κυματικά χαρακτηριστικά ακολουθούν πανομοιότυπη

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

μεταβολή για τα δύο βάθη νερού. Υψηλότερες ταχύτητες στην διατομή αυτή παρατηρούνται για την περίπτωση του μικρότερου βάθους νερού των 0.65m.

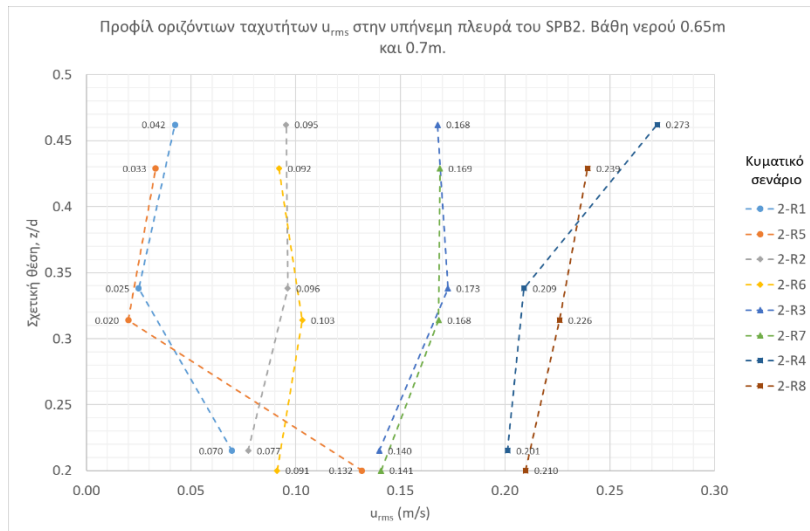


Σχήμα 5.4.4 Καθ' ύψος μεταβολή των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στην προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

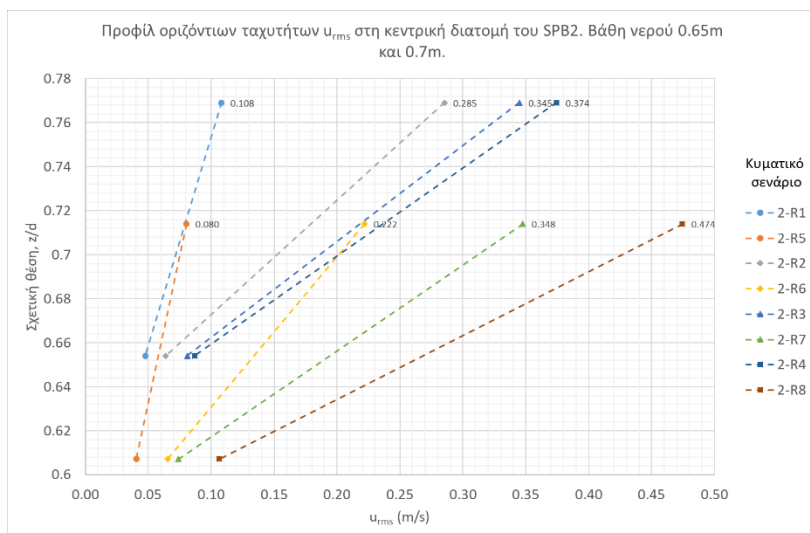
Στο Σχήμα 5.4.5 δίνονται γραφικά οι τιμές της  $u_{rms}$  ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB2 για τα βάθη νερού 0.65m και 0.7m. Και στην θέση αυτή, αντίστοιχα με την προσήνεμη, παρατηρείται πανομοιότυπη μεταβολή για τα σενάρια με τα ίδια κυματικά χαρακτηριστικά. Το συνολικό βάθος νερού δεν φαίνεται να επιδρά στις χαρακτηριστικές τιμές των ταχυτήτων καθώς δεν φαίνεται να διαφέρουν σημαντικά στην πλειοψηφία των θέσεων μέτρησης. Ενώ στο φυσικό ομοίωμα SPB1 οι ταχύτητες στην κατάντη πλευρά του έργου δείχνουν να αυξάνονται, στο φυσικό ομοίωμα SPB2 παρατηρείται μείωση. Η σημαντικότερη διαφορά εντοπίζεται στις σχετικές θέσεις  $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$  όπου η απότομη αύξηση των ταχυτήτων στο μοντέλο SPB1 δεν παρατηρείται πλέον στο SPB2. Η ομαλοποίηση αυτή των απότομων αλλαγών εκτιμάται ότι οφείλεται στην αυξημένη διατομή του δεύτερου μοντέλου.

Στο Σχήμα 5.4.6 δίνονται τα προφίλ των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στη κεντρική διατομή του SPB2. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι η χαρακτηριστική ταχύτητα στον πόρο φαίνεται να μεταβάλλεται ελάχιστα καθώς το ύψος και η περίοδος του κύματος αυξάνει. Η μέγιστη ταχύτητα που παρατηρείται στον πόρο είναι 0.087m/s και 0.107m/s για τα βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στην στέψη παρατηρούνται μεγαλύτερες ταχύτητες για τα κυματικά σενάρια 2-R1 και 2-R2 σε σχέση με τα ομόλογά τους 2-R5 και 2-R6, ίδιες περίπου ταχύτητες για τα ομόλογα κυματικά σενάρια 2-R3 και 2-R7 και μικρότερες ταχύτητες για το κυματικό σενάριο 2-R4 σε σχέση με το σενάριο 2-R8.

## Προφίλ χαρακτηριστικών οριζόντιων ταχυτήτων $u_{rms}$



Σχήμα 5.4.5 Καθ' ύψος μεταβολή των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στην υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.



Σχήμα 5.4.6 Καθ' ύψος μεταβολή των οριζόντιων ταχυτήτων  $u_{rms}$  στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

### 5.4.3 Σύγκριση χαρακτηριστικών ταχυτήτων $u_{rms}$ μεταξύ των φυσικών ομοιωμάτων SPB1 και SPB2

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.4.7 και Πίνακας 5.4.8) της παραγράφου αυτής έχουν υπολογιστεί η μεταβολή (%) των χαρακτηριστικών ταχυτήτων  $u_{rms}$  από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2 για τις διάφορες θέσεις μέτρησης και για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Πίνακας 5.4.7 Μεταβολή (%) των  $u_{rms}$  από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος 0.65m

Μεταβολή (%) των $u_{rms}$ από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος 0.65m												
SPB1→SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	1/2-R1	0.65	0.06	1	-14.4	2.7	-37.5	142.2	-73.7	-53.7	47.2	-11.3
	1/2-R2		0.11	1.5	-7.9	11.7	-20.0	-32.2	-16.6	-74.3	58.3	0.7
	1/2-R3		0.17	2	32.3	-6.4	-31.4	-24.7	-6.3	-66.0	-24.8	16.3
	1/2-R4		0.23	2.5	7.0	-35.8	-8.9	-9.2	-9.0	-41.6	-43.4	24.1

Πίνακας 5.4.8 Μεταβολή (%) των  $u_{rms}$  από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος 0.7m

Μεταβολή (%) των $u_{rms}$ από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος 0.7m												
SPB1→SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.200	0.314	0.429	0.200	0.314	0.429	0.714	0.607
	1/2-R5	0.7	0.06	1	-72.9	-71.7	-44.2	98.5	-65.9	-57.7	33.7	26.5
	1/2-R6		0.11	1.5	-1.3	26.3	-25.4	-18.5	-5.5	-56.3	34.7	14.4
	1/2-R7		0.17	2	10.5	-16.5	-26.3	-8.9	11.3	-50.2	-10.3	7.0
	1/2-R8		0.23	2.5	-2.3	-28.1	-14.7	3.0	4.6	-41.4	-19.1	51.5

Στην προσήνεμη πλευρά παρατηρείται γενικά μείωση των ταχυτήτων στη πλειοψηφία των θέσεων μέτρησης, καθώς η διατομή του ύφαλου κυματοθραύστη αυξάνει από το μοντέλο SPB1 στο SPB2. Η πιο έντονη, -37.5% και -44.2% εμφανίζεται στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις  $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$ , για βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στην υπήνεμη πλευρά παρατηρούνται και εδώ σημαντικές μειώσεις των ταχυτήτων. Πιο σημαντική μείωση παρουσιάζεται και εδώ στις ανώτερες θέσεις μέτρησης ( $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$ ) όπου φτάνει κατά μέσω όρο το 59% και 51.4% για τα βάθη 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Οι σημαντικές αυτές μειώσεις που παρατηρούνται στις χαρακτηριστικές οριζόντιες ταχύτητες οφείλονται στη μεγαλύτερη καταστροφή ενέργειας στο μοντέλο SPB2, λόγω του αυξημένου μήκους της στέψης του.

## 5.5 Προφίλ μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας ( $u'_{max}$ )

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα προφίλ των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων της οριζόντιας ταχύτητας στις τρεις διατομές μέτρησης, την προσήνεμη, την υπήνεμη και τη κεντρική διατομή. Η μεταβολή της τυρβώδους έντασης ως προς τη φάση του κυματισμού έχει παρουσιαστεί ήδη, για βάθος νερού 0.65m, στις ενότητες 5.2 και 5.3, π.χ. Σχήμα 5.2.3. Στη παράγραφο αυτή συγκαταλέγονται και οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις για τη περίπτωση βάθους νερού 0.7m που δεν έχει παρουσιαστεί εκτενώς προηγουμένως. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξεχωριστά για τα δύο φυσικά ομοιώματα, SPB1 και SPB2 που εξετάστηκαν.



## Προφίλ μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας ( $u'_{max}$ )

### 5.5.1 Φυσικό ομοίωμα SPB1

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.5.1 και Πίνακας 5.5.2) δίνονται οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις ( $u'_{max}$ ) για το μοντέλο SPB1 και βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Οι αναξιόπιστες μετρήσεις (κόκκινο χρώμα) από το όργανο ADV δεν έχουν συμπεριληφθεί σε κανένα από τους πίνακες της ενότητας 5.5 λόγω της υψηλής απόκλισής τους από τις πιο αξιόπιστες μετρήσεις (πράσινο και κίτρινο χρώμα).

Πίνακας 5.5.1 Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης ένταση  $u'_{max}$  για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m.

Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης διακύμανση $u'_{max}$ (m/s). SPB1. Βάθος νερού 0.65m.												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Υψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
1-R1	0.65	0.06	1	0.07	0.05	0.08	0.05			0.03	0.05	
1-R2		0.11	1.5	0.10	0.09	0.06	0.14	0.11		0.06	0.07	
1-R3		0.17	2	0.16	0.15	0.14	0.22	0.24	0.90	0.14	0.09	
1-R4		0.23	2.5	0.22	0.18	0.13	0.26	0.33	1.00	0.43	0.11	

Πίνακας 5.5.2 Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης ένταση  $u'_{max}$  για το μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.7m.

Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης διακύμανση $u'_{max}$ (m/s). SPB1. Βάθος νερού 0.7m.												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Υψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
1-R5	0.7	0.06	1					0.07	0.11	0.03	0.04	
1-R6		0.11	1.5	0.08	0.07	0.05	0.13	0.10		0.05	0.05	
1-R7		0.17	2	0.17	0.16	0.16	0.19	0.20	0.31	0.12	0.09	
1-R8		0.23	2.5	0.23	0.16	0.15	0.26	0.30	0.53	0.20	0.11	

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.5.3) έχει υπολογιστεί η επί τοις εκατό μεταβολή των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από το βάθος νερού 0.65m στο βάθος νερού 0.7m.

Πίνακας 5.5.3 Μεταβολή (%) των  $u'_{max}$  για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από βάθος 0.65m σε 0.7m.

Μεταβολή (%) των $u'_{max}$ για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από βάθος 0.65m σε 0.7m.												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Υψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.769/0.714	0.654/0.607
1-R1/R5	0.65→0.7	0.06	1	-	-	-	-	-	-	1.7	-21.3	
1-R2/R6		0.11	1.5	-17.0	-23.8	-18.7	-2.3	-8.6	-	-19.5	-20.5	
1-R3/R7		0.17	2	4.0	3.5	16.1	-14.4	-16.3	-65.1	-7.5	6.1	
1-R4/R8		0.23	2.5	3.6	-9.4	15.2	-1.0	-9.1	-47.0	-52.9	3.7	

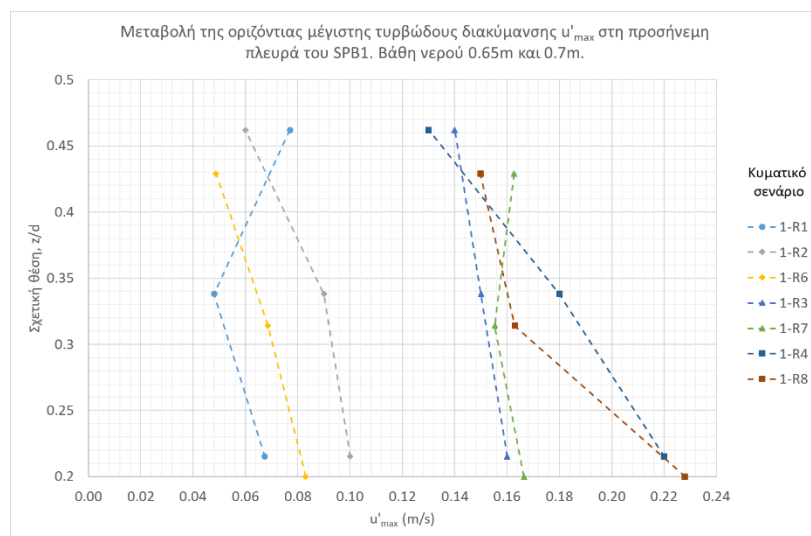
Στα παρακάτω τρία σχήματα (Σχήμα 5.5.1, Σχήμα 5.5.2 και Σχήμα 5.5.3) δίνονται τα προφίλ των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων της οριζόντιας ταχύτητας στις τρεις διατομές μέτρησης, την προσήνεμη, την υπήνεμη και την κεντρική για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Στη προσήνεμη πλευρά παρατηρείται από το Σχήμα 5.5.1 ότι σε μικρότερες σχετικές θέσεις  $z/d$  ( $z=0 \rightarrow$  πυθμένας) η μέγιστη τυρβώδης ένταση αυξάνει, ενώ όσο αυξάνει το σχετική θέση και προσεγγίζεται η θέση στο περίγραμμα του κυματοθραύστη ( $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$ ) η μέγιστη τυρβώδης ένταση μειώνεται. Επίσης οι μέγιστες τυρβώδεις διακυμάνσεις στο εσωτερικό του SPB1 δεν παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή καθώς το βάθος του νερού αυξάνει για την περίπτωση των δύο μεγαλύτερων κυματικών σεναρίων.

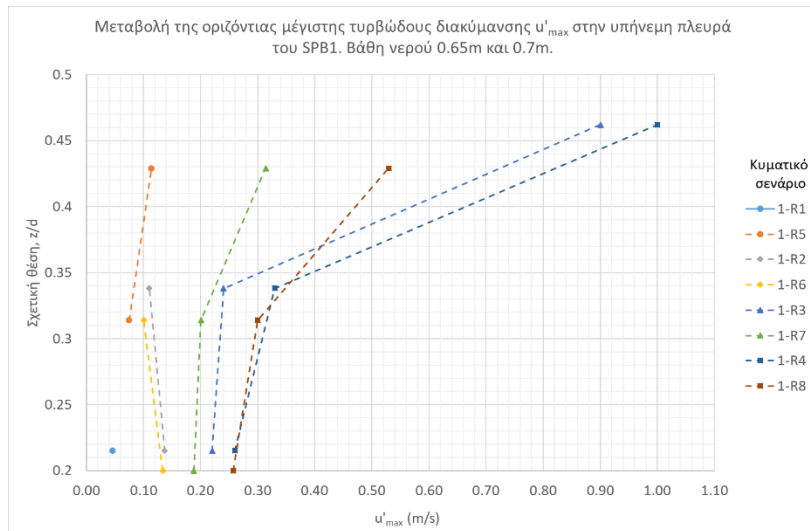
Στην υπήνεμη πλευρά, Σχήμα 5.5.2, από τις υπάρχουσες αξιόπιστες μετρήσεις φαίνεται ότι στις δύο θέσεις στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη ( $z/d=0.215, 0.2$  και  $z/d=0.338, 0.314$ ) οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις έχουν περίπου την ίδια τιμή σε κάθε ένα από τα κυματικά σενάρια, ενώ στη θέση που βρίσκεται στο περίγραμμα του κυματοθραύστη ( $z/d=0.462, 0.429$ ) παρατηρείται μια απότομη αύξηση τις μέγιστης τυρβώδους έντασης γεγονός που εκτιμάται ότι οφείλεται στην θραύση των κυματισμών για τις περιπτώσεις 1-R3, 1-R7, 1-R4 και 1-R8. Η αύξηση αυτή είναι πολύ πιο έντονη για την περίπτωση του μικρότερου συνολικού βάθους νερού ενώ είναι αρκετά πιο ήπια για το βάθος των 0.7m.

Στη κεντρική διατομή (Σχήμα 5.5.3) η τυρβώδης ένταση παρουσιάζει σταδιακή αύξηση στη στέψη του κυματοθραύστη ενώ μέσα στον πόρο η μέγιστη τυρβώδης ένταση φαίνεται να διατηρείται σε σημαντικά μικρότερα επίπεδα. Η μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις δεν φαίνεται να επηρεάζονται από το συνολικό βάθος του νερού καθώς δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις, παρά μόνο στα δύο μεγαλύτερα κυματικά σενάρια 1-R4 και 1-R8 στο σημείο μέτρησης που βρίσκεται στην στέψη.

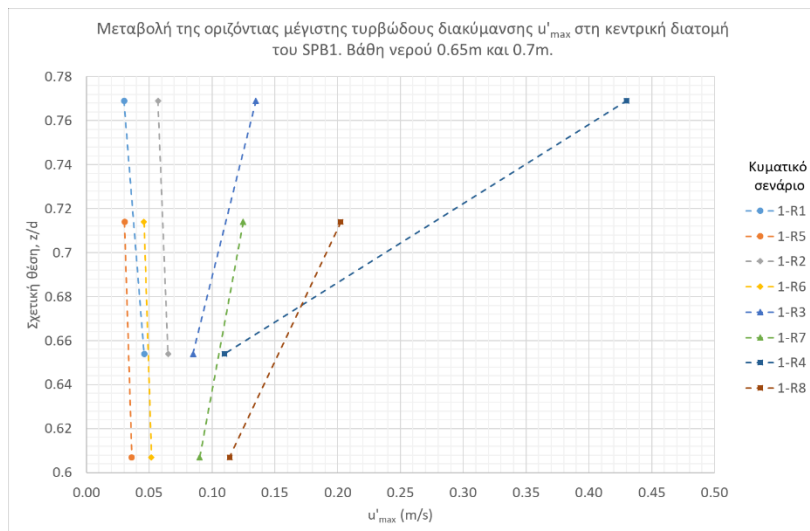


Σχήμα 5.5.1 Καθ' ύψος μεταβολή της οριζόντιας μέγιστης τυρβώδους διακύμανσης  $u'_{max}$  στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

## Προφίλ μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας ( $u'_{max}$ )



Σχήμα 5.5.2 Καθ' ύψος μεταβολή της οριζόντιας μέγιστης τυρβώδους διακύμανσης  $u'_{max}$  στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.



Σχήμα 5.5.3 Καθ' ύψος μεταβολή της οριζόντιας μέγιστης τυρβώδους διακύμανσης  $u'_{max}$  στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

### 5.5.2 Φυσικό ομοίωμα SPB2

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.5.4 και Πίνακας 5.5.5) δίνονται οι μέγιστες τυρβώδης εντάσεις ( $u'_{max}$ ) για το μοντέλο SPB2 και βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Πίνακας 5.5.4 Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης ένταση  $u'_{max}$  για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m.

Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης διακύμανση $u'_{max}$ (m/s). SPB2. Βάθος νερού 0.65m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	2-R1	0.65	0.06	1	0.02	0.02	0.03		0.03	0.04	0.04	0.04
	2-R2		0.11	1.5	0.07	0.11	0.10	0.14	0.14	0.12	0.09	0.07
	2-R3		0.17	2	0.19	0.20	0.19	0.17	0.21	0.24	0.19	0.10
	2-R4		0.23	2.5	0.17	0.23	0.18	0.23	0.25	0.40	0.33	0.11

Πίνακας 5.5.5 Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης ένταση  $u'_{max}$  για το μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.7m.

Μέγιστη οριζόντια τυρβώδης διακύμανση $u'_{max}$ (m/s). SPB2. Βάθος νερού 0.70m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
	2-R5	0.7	0.06	1	0.03	0.02	0.04		0.02	0.03	0.03	0.04
	2-R6		0.11	1.5	0.06	0.09	0.07	0.16	0.13	0.11	0.07	0.08
	2-R7		0.17	2	0.17	0.15	0.15	0.16	0.20	0.27	0.17	0.09
	2-R8		0.23	2.5	0.17	0.23	0.18	0.30	0.26	0.38	0.22	0.11

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.5.6) έχει υπολογιστεί η επί τοις εκατό μεταβολή των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από το βάθος νερού 0.65m στο βάθος νερού 0.7m.

Πίνακας 5.5.6 Μεταβολή (%) των  $u'_{max}$  για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από βάθος 0.65m σε 0.7m.

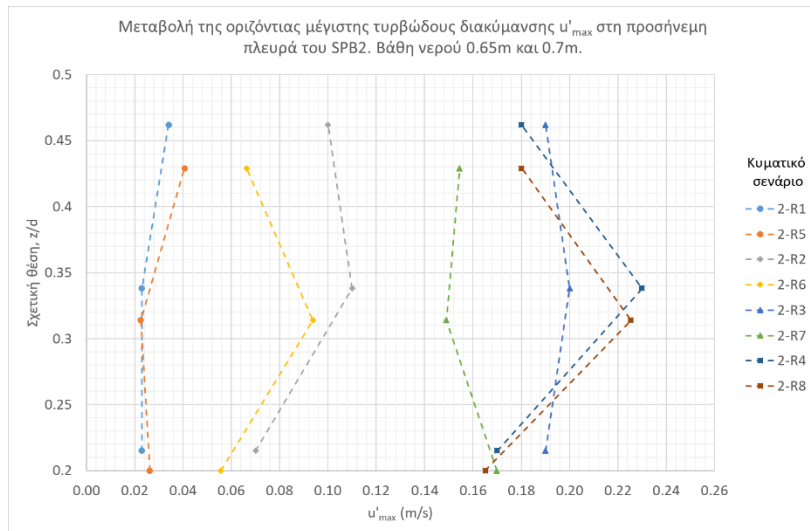
Μεταβολή (%) των $u'_{max}$ για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από βάθος 0.65m σε 0.7m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.769/0.714	0.654/0.607
	2-R1/R5	0.65→0.7	0.06	1	13.9	-2.2	19.4	-	-22.7	-24.8	-36.6	7.5
	2-R2/R6		0.11	1.5	-20.4	-14.7	-33.7	15.5	-5.1	-5.3	-18.2	7.6
	2-R3/R7		0.17	2	-10.6	-25.5	-18.7	-4.7	-4.2	13.2	-10.9	-6.7
	2-R4/R8		0.23	2.5	-2.9	-2.0	0.1	31.8	4.2	-6.0	-33.8	-2.7

Στα παρακάτω τρία σχήματα (Σχήμα 5.5.4, Σχήμα 5.5.5 και Σχήμα 5.5.6) δίνονται τα προφίλ των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων της οριζόντιας ταχύτητας στις τρεις διατομές μέτρησης, την προσήνεμη, την υπήνεμη και την κεντρική για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

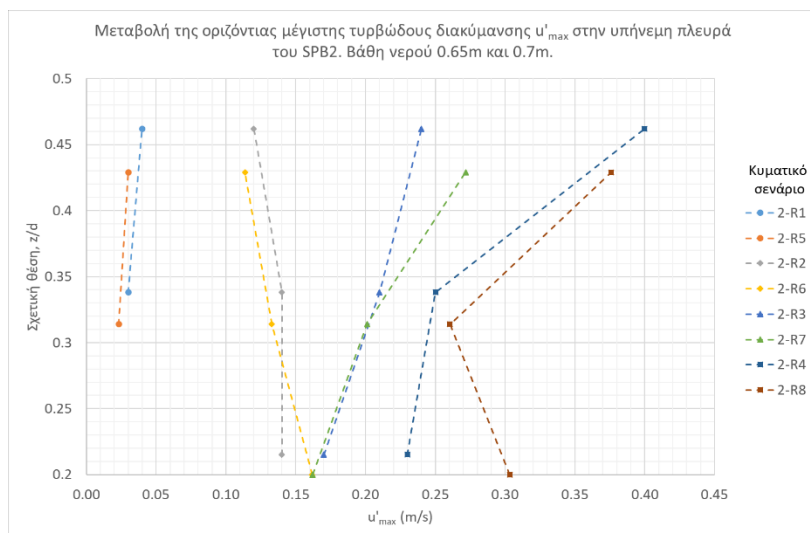
Στην προσήνεμη διατομή, η αύξηση της μέγιστης τυρβώδους έντασης σε μικρότερα σχετικά βάθη (z/d) που παρατηρήθηκε στο φυσικό ομοίωμα SPB1, δεν φαίνεται να ισχύει στην περίπτωση του φυσικού ομοιώματος SPB2 (Σχήμα 5.5.4). Καθώς το βάθος του νερού αυξάνει από 0.65m 0.7m, παρατηρούμε από τον Πίνακα 5.5.6 ότι οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις, στην προσήνεμη διατομή, παρουσιάζουν σημαντική μείωση κυρίως για τα κυματικά σενάρια 2-R2/R6 και 2-R3/R7.

Στην υπήνεμη πλευρά, Σχήμα 5.5.5, φαίνεται ότι στις δύο θέσεις στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη (z/d=0.2/0.215 και z/d=0.314/0.338) οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις έχουν σχεδόν ίδια τιμή σε κάθε ένα από τα κυματικά σενάρια, γεγονός που διαπιστώθηκε και στο φυσικό ομοίωμα SPB1. Αντίθετα, δεν παρατηρείται στη θέση που βρίσκεται στο περίγραμμα του κυματοθραύστη (z/d = 0.462/0.429) απότομη αύξηση τις μέγιστης τυρβώδους έντασης παρά μόνο στη περίπτωση των κυματικών σεναρίων 2-R4 και 2-R8. Όσον αφορά την επιρροή του συνολικού βάθους του νερού δεν μπορεί να μπορεί να εξαχθεί ένα γενικό συμπέρασμα από τα δεδομένα του Πίνακα 5.5.6, καθώς δεν παρουσιάζουν κάποια σαφή τάση.

## Προφίλ μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων της οριζόντιας ταχύτητας ( $u'_{max}$ )



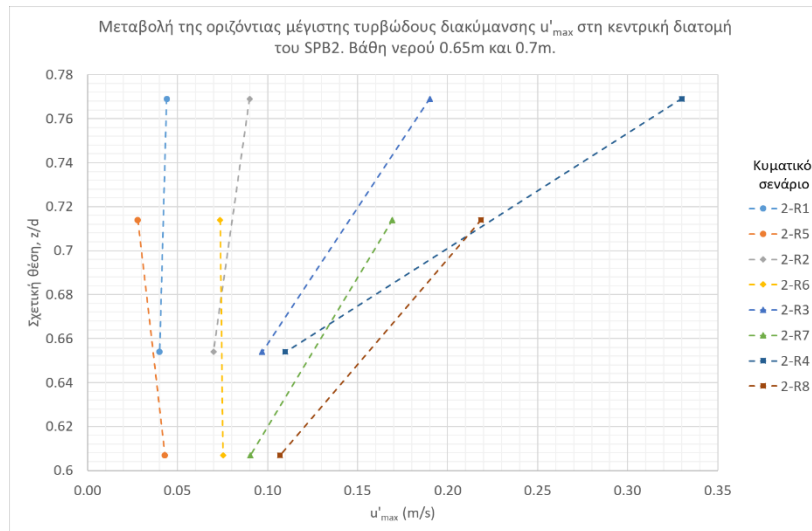
Σχήμα 5.5.4 Καθ' ύψος μεταβολή της οριζόντιας μέγιστης τυρβώδους διακύμανσης  $u'_{max}$  στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.



Σχήμα 5.5.5 Καθ' ύψος μεταβολή της οριζόντιας μέγιστης τυρβώδους έντασης  $u'_{max}$  στην υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

Στη κεντρική διατομή (Σχήμα 5.5.6) η τυρβώδης ένταση παρουσιάζει σταδιακή αύξηση στη στέψη του κυματοθραύστη ενώ μέσα στον πόρο η μέγιστη τυρβώδης ένταση φαίνεται να διατηρείται σε σημαντικά μικρότερα επίπεδα, καθώς τα κυματικά χαρακτηριστικά αυξάνουν. Στη στέψη, καθώς το βάθος του νερού μεταβάλλεται από 0.65m σε 0.7m, παρατηρείται από το Πίνακα 5.5.6 μια σαφής μείωση των μέγιστων οριζόντιων τυρβωδών εντάσεων που κυμαίνεται από -10.9% μέχρι και -36.6%. Αντίθετα μέσα στο πόρο οι μέγιστες τυρβώδης εντάσεις δεν φαίνεται να επηρεάζονται από το βάθος του νερού καθώς η μέγιστη μεταβολή δεν ξεπερνά το 7.6%.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.5.6 Καθ' ύψος μεταβολή της οριζόντιας μέγιστης τυρβώδους διακύμανσης  $u'_{max}$  στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

### 5.5.3 Σύγκριση μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων $u'_{max}$ μεταξύ του φυσικού ομοιώματος SPB1 και SPB2

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.5.7 και Πίνακας 5.5.8) της παραγράφου αυτής έχουν υπολογιστεί η μεταβολή (%) των μέγιστων οριζόντιων τυρβωδών εντάσεων  $u'_{max}$  από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2 για τις διάφορες θέσεις μέτρησης και για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν.

Πίνακας 5.5.7 Μεταβολή (%) των  $u'_{max}$  από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος νερού 0.65m.

Μεταβολή (%) των $u'_{max}$ από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος 0.65m.												
SPB1→SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	1/2-R1	0.65	0.06	1	-65.9	-52.1	-55.8	-	-	-	46.7	-13.0
	1/2-R2		0.11	1.5	-30.0	22.2	66.7	2.2	27.3	-	57.9	7.7
	1/2-R3		0.17	2	18.8	33.3	35.7	-22.7	-12.5	-73.3	40.7	14.1
	1/2-R4		0.23	2.5	-22.7	27.8	38.5	-11.5	-24.2	-60.0	-23.3	0.0

Στην προσήνεμη πλευρά, στις χαμηλότερες σχετικές θέσεις  $z/d=0.215$  και  $z/d=0.2$  για 0.65m και 0.7m βάθος νερού αντίστοιχα, φαίνεται να παρατηρείται μείωση των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Αντίθετα στις υπόλοιπες θέσεις  $z/d=0.338/0.314$  και  $z/d=0.426/0.429$  παρατηρείται σημαντική αύξηση η οποία κυμαίνεται από 20.2% έως και 66.7%.

Στην υπήνεμη διατομή, η γενικότερη τάση δείχνει ότι οι μέγιστες τυρβώδεις εντάσεις μειώνονται σε όλες τις θέσεις μέτρησης με ποσοστά που κυμαίνονται από -11.5% έως και -73.5%.



## Μεταβολή της τυρβώδους έντασης $u'/U$

Πίνακας 5.5.8 Μεταβολή (%) των  $u'_{max}$  από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος νερού 0.7m.

Μεταβολή (%) των $u'_{max}$ από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος 0.7m.												
SPB1→SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
	1/2-R5	0.7	0.06	1	-	-	-	-	-68.9	-73.5	-8.5	18.8
	1/2-R6		0.11	1.5	-32.9	36.7	35.9	20.9	32.2	-	60.3	45.6
	1/2-R7		0.17	2	2.0	-4.0	-5.0	-14.0	0.1	-13.4	35.5	0.3
	1/2-R8		0.23	2.5	-27.6	38.3	20.2	17.8	-13.1	-29.0	8.0	-6.2

Στη στέψη, και για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν παρατηρείται σαφής αύξηση των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων στο μοντέλο SPB2 που κυμαίνεται από 8% έως και 60.3%.

Τέλος, στον πόρο για την περίπτωση του βάθους των 0.65m οι μεταβολές δεν είναι σημαντικές με την μέγιστη να είναι 14.1%. Για το βάθος νερού των 0.7m και για τα κυματικά σενάρια R5 και R6 παρατηρείται αύξηση των τυρβωδών εντάσεων σε ποσοστά 18.8% και 45.6% αντίστοιχα, ενώ για τα κυματικά σενάρια R7 και R8 η μεταβολή δείχνει να είναι αμελητέα.

## 5.6 Μεταβολή της τυρβώδους έντασης $u'/U$

Ο υπολογισμός της σχετικής τυρβώδους έντασης (TI) γίνεται εφαρμόζοντας τις εξισώσεις (4.18) – (4.20). Λόγω του ότι το πεδίο ροής διαμορφώνεται από την ύπαρξη κυματισμών, των οποίων η μέση τιμή της ταχύτητας και οι τυρβώδεις διακυμάνσεις μεταβάλλονται συνέχεια μέσα σε μια κυματική περίοδο, θα πρέπει να επιλεχθούν αντιπροσωπευτικές τιμές για τις παραμέτρους αυτές. Εδώ, για την εκτίμηση της σχετικής τυρβώδους έντασης χρησιμοποιήθηκαν ως παράμετροι οι rms τιμές των μεγεθών της ταχύτητας.

Λόγω των παραδοχών που αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2, η τυρβώδης ένταση στην προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη θα υπολογιστεί εισάγοντας τον συντελεστή  $c_{LDV} = 0.9575$  (Εξίσωση 4.22) για την καλύτερη εκτίμηση των κατακόρυφων τυρβωδών διακυμάνσεων,  $w'_{rms}$ . Αντίστοιχα για τον "πόρο" θα χρησιμοποιηθεί ο συντελεστής  $c_{ADV} = 1.16$  (Εξίσωση 4.21) ο οποίος θα δώσει μια εκτίμηση των εγκάρσιων τυρβωδών διακυμάνσεων  $v'_{rms}$ .

Παρακάτω δίνονται οι σχέσεις από τις οποίες υπολογίστηκαν οι σχετικές τυρβώδεις εντάσεις στις διάφορες θέσεις του ύφαλου κυματοθραύστη.

- Προσήνεμη και υπήνεμη διατομή.

$$TI_h = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(u'^2_{rms} + v'^2_{rms} + 0.9575u'^2_{rms})}}{\sqrt{u'^2_{rms} + v'^2_{rms} + w'^2_{rms}}} \quad (5.1)$$

- Πόρος.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

$$TI_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(u'_{rms}{}^2 + 1.16u'_{rms}{}^2 + w'_{rms}{}^2)}}{\sqrt{u_{rms}^2 + w_{rms}^2}}, v_{rms} \ll u_{rms}, w_{rms} \quad (5.2)$$

➤ Στέψη.

$$TI_c = \frac{\sqrt{\frac{1}{2}(u'_{rms}{}^2 + w'_{rms}{}^2)}}{\sqrt{u_{rms}^2 + w_{rms}^2}}, v_{rms} \ll u_{rms}, w_{rms} \quad (5.3)$$

### 5.6.1 Φυσικό ομοίωμα SPB1

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.6.1 και Πίνακας 5.6.2) δίνονται οι σχετικές τυρβώδης εντάσεις (TI) για το μοντέλο SPB1 για βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα.

Πίνακας 5.6.1 Σχετική τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB1. Βάθος νερού 0.65m.

Τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB1. Βάθος νερού 0.65m.														
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη									
					Προσήνεμη				Υπήνεμη				Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)									
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654		
	1-R1	0.65	0.06	1	0.52	0.47	0.62	0.56	0.72	0.68	0.32	0.47		
	1-R2		0.11	1.5	0.43	0.38	0.23	0.57	0.47	0.66	0.22	0.64		
	1-R3		0.17	2	0.36	0.34	0.20	0.55	0.49	0.51	0.11	0.63		
	1-R4		0.23	2.5	0.43	0.31	0.18	0.56	0.51	0.65	0.21	0.66		

Πίνακας 5.6.2 Σχετική τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB1. Βάθος νερού 0.7m.

Τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB1. Βάθος νερού 0.7m.														
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη									
					Προσήνεμη				Υπήνεμη				Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)									
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607		
	1-R5	0.7	0.06	1	0.72	0.59	0.59	0.67	0.64	0.67	0.36	0.71		
	1-R6		0.11	1.5	0.41	0.37	0.24	0.58	0.45	0.65	0.21	0.60		
	1-R7		0.17	2	0.41	0.35	0.28	0.52	0.46	0.37	0.13	0.62		
	1-R8		0.23	2.5	0.42	0.33	0.18	0.55	0.47	0.45	0.14	0.63		

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.6.3) έχει υπολογιστεί η επί τοις εκατό μεταβολή της σχετικής τυρβώδους έντασης για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από το βάθος νερού 0.65m στο βάθος νερού 0.7m.

## Μεταβολή της τυρβώδους έντασης $u'/U$

Πίνακας 5.6.3 Μεταβολή (%) της σχετικής τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από βάθος νερού 0.65m σε 0.7m.

Μεταβολή (%) της τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) για το φυσικό ομοίωμα SPB1 από βάθος νερού 0.65m σε 0.7m.												
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Υψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.769/0.714	0.654/0.607
	1-R1/R5	0.65→0.7	0.06	1	37.1	25.8	-6.2	20.6	-11.8	-1.1	14.4	48.7
	1-R2/R6		0.11	1.5	-5.4	-2.4	1.5	1.7	-3.6	-1.0	-4.7	-6.7
	1-R3/R7		0.17	2	13.1	3.7	45.0	-6.5	-5.5	-27.6	21.3	-1.9
	1-R4/R8		0.23	2.5	-2.7	5.1	0.0	-2.1	-7.2	-30.6	-32.8	-4.8

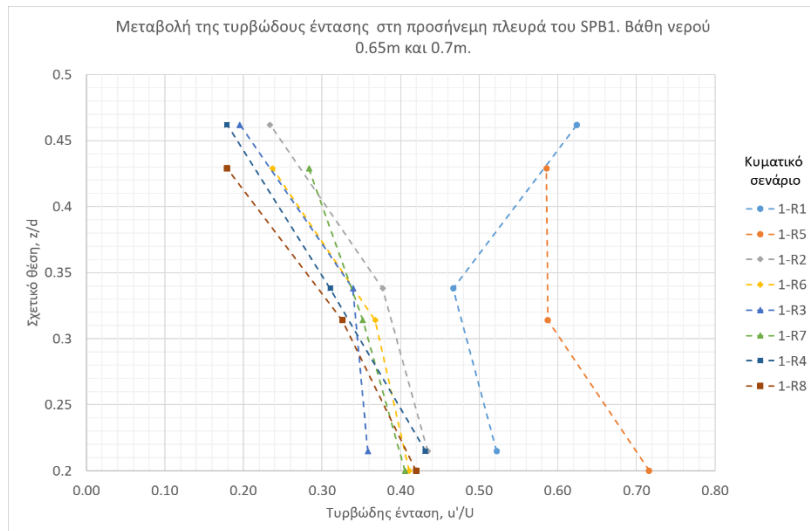
Στα παρακάτω τρία σχήματα (Σχήμα 5.6.1, Σχήμα 5.6.2 και Σχήμα 5.6.3) δίνονται τα προφίλ των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων της οριζόντιας ταχύτητας στις τρεις διατομές μέτρησης, την προσήνεμη, την υπήνεμη και την κεντρική για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

Στην προσήνεμη πλευρά (Σχήμα 5.6.1), η τυρβώδης ένταση φαίνεται να ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή και για τα δύο βάθη νερού, με εξαίρεση τα κυματικά σενάρια 1-R1 και 1-R5. Στα μικρότερες σχετικές θέσεις,  $z/d=0.215$  και  $0.2$ , η τυρβώδης ένταση λαμβάνει τιμή περίπου 0.41. Καθώς η σχετική θέση αυξάνεται σε  $z/d=0.338$  και  $0.314$ , η τυρβώδης ένταση μειώνεται ελαφρώς στη τιμή 0.35, ενώ στη σχετική θέση  $z/d=0.462$  και  $0.429$  παρατηρείται ακόμα μεγαλύτερη μείωση της τυρβώδους έντασης η οποία λαμβάνει τιμές κοντά στο 0.2.

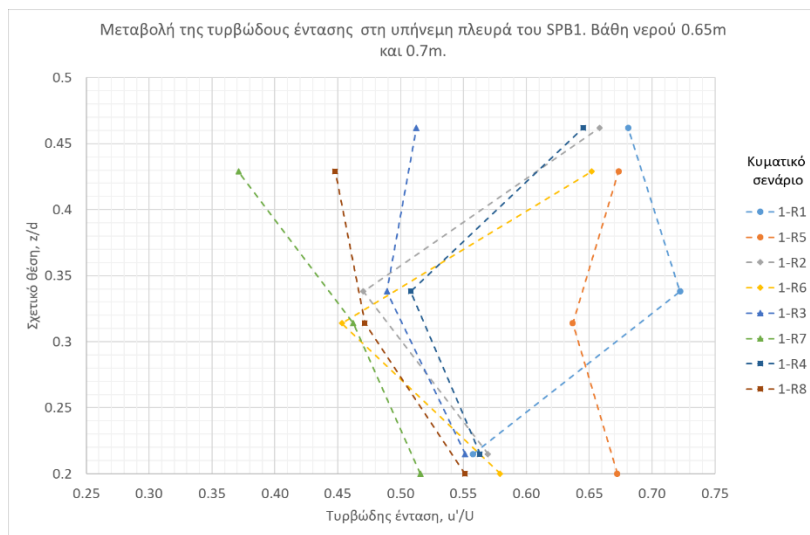
Στην υπήνεμη διατομή (Σχήμα 5.6.2) η τυρβώδης ένταση παρουσιάζει γενικά πιο αυξημένες τιμές σε σύγκριση με την προσήνεμη πλευρά. Τα κυματικά σενάρια, εκτός των 1-R1 και 1-R5, παρουσιάζουν πανομοιότυπη μεταβολή κυρίως για τις δύο θέσεις στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη. Στα μικρότερα σχετικά βάθη,  $z/d=0.215$  και  $0.2$ , η τυρβώδης ένταση λαμβάνει μέση τιμή κοντά στο 0.56. Στις σχετικές θέσεις  $z/d=0.338$  και  $0.314$ , η τυρβώδης ένταση λαμβάνει μέση τιμή περίπου 0.5. Στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις  $z/d=0.462$  και  $0.429$ , παρατηρούνται δύο διαφορετικές τάσεις στα αποτελέσματα. Για το βάθος των 0.65m παρατηρούνται αυξημένες τυρβώδεις εντάσεις με μέση τιμή κοντά στο 0.62, ενώ για το βάθος των 0.7m παρατηρείται μείωση της τυρβώδους έντασης (1-R7 και 1-R8) με μέση τιμή περίπου 0.54.

Η μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη κεντρική διατομή φαίνεται στο Σχήμα 5.6.3. Στον "πόρο" ( $z/d=0.654$  και  $0.607$ ) παρατηρούνται αρκετά αυξημένες τυρβώδεις εντάσεις με τιμές 0.65 και 0.62 για τα βάθη 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στην στέψη, αντίθετα, η τυρβώδης ένταση λαμβάνει τιμές αισθητά μικρότερες. Για το βάθος νερού των 0.65m η τιμή της κυμαίνεται περίπου στο 0.18 ενώ για το βάθος των 0.7m η τιμή της είναι περίπου 0.16. Από τις παραπάνω τιμές, στον πόρο και στην στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη, συμπεραίνεται ότι για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν η τυρβώδης ένταση δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.

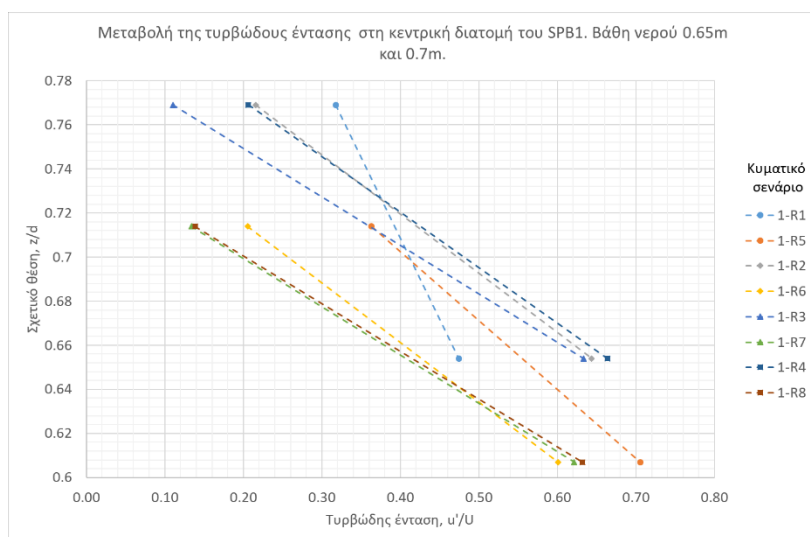
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.6.1 Καθ' ύψος μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.



Σχήμα 5.6.2 Καθ' ύψος μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.



Σχήμα 5.6.3 Καθ' ύψος μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.7m.

## Μεταβολή της τυρβώδους έντασης $u'/U$

### 5.6.2 Φυσικό ομοίωμα SPB2

Στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5.6.4 και Πίνακας 5.6.5) δίνονται οι σχετικές τυρβώδεις εντάσεις (TI) για το μοντέλο SPB2 για βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα.

Πίνακας 5.6.4 Σχετική τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB2. Βάθος νερού 0.65m.

Τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB2. Βάθος νερού 0.65m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, $z/d$ ( $z=0$ , πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	2-R1	0.65	0.06	1	0.50	0.40	0.40	0.74	0.46	0.49	0.30	0.53
	2-R2		0.11	1.5	0.46	0.36	0.41	0.53	0.53	0.46	0.18	0.61
	2-R3		0.17	2	0.48	0.41	0.48	0.53	0.51	0.47	0.24	0.61
	2-R4		0.23	2.5	0.49	0.47	0.27	0.57	0.58	0.52	0.34	0.65

Πίνακας 5.6.5 Σχετική τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB2. Βάθος νερού 0.7m.

Τυρβώδης ένταση ( $u'/U$ ) στο φυσικό ομοίωμα SPB2. Βάθος νερού 0.7m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, $z/d$ ( $z=0$ , πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
	2-R5	0.7	0.06	1	0.50	0.44	0.45	0.73	0.48	0.45	0.27	0.60
	2-R6		0.11	1.5	0.44	0.38	0.37	0.54	0.57	0.44	0.19	0.56
	2-R7		0.17	2	0.46	0.36	0.30	0.53	0.51	0.50	0.26	0.61
	2-R8		0.23	2.5	0.46	0.42	0.31	0.55	0.54	0.51	0.19	0.57

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.6.6) έχει υπολογιστεί η επί τοις εκατό μεταβολή της σχετικής τυρβώδους έντασης για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από το βάθος νερού 0.65m στο βάθος νερού 0.7m.

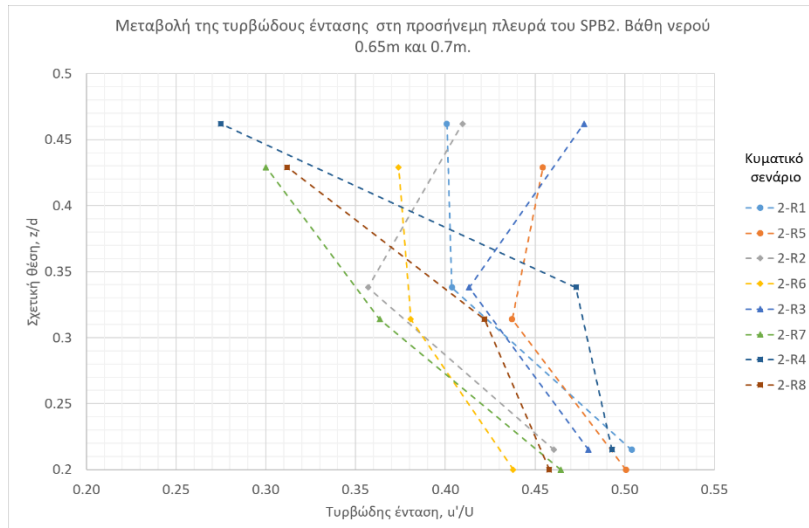
Πίνακας 5.6.6 Μεταβολή (%) της σχετικής τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από βάθος νερού 0.65m σε 0.7m.

Μεταβολή (%) της τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) για το φυσικό ομοίωμα SPB2 από βάθος νερού 0.65m σε 0.7m.												
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, $z/d$ ( $z=0$ , πυθμένας)							
					0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.215/0.2	0.338/0.314	0.462/0.429	0.769/0.714	0.654/0.607
	2-R1/R5	0.65→0.7	0.06	1	-0.6	8.3	13.3	-1.3	6.0	-6.6	-8.8	14.5
	2-R2/R6		0.11	1.5	-5.0	6.7	-8.7	1.7	6.3	-3.9	6.1	-7.3
	2-R3/R7		0.17	2	-3.2	-12.1	-37.1	-0.9	-0.2	7.2	8.1	-0.4
	2-R4/R8		0.23	2.5	-7.1	-10.8	13.5	-3.6	-6.0	-1.6	-44.0	-12.8

Στην προσήνεμη διατομή του φυσικού ομοιώματος SPB2 (Σχήμα 5.6.4), η τυρβώδης ένταση λαμβάνει αυξημένες τιμές στη μικρότερη σχετική θέση και στη συνέχεια μειώνεται στις μεσαίες σχετικές θέσεις. Στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις παρατηρούνται δύο διαφορετικές τάσεις στα δεδομένα. Τα κυματικά σενάρια 2-R7, 2-R4 και 2-R8 παρουσιάζουν απότομη μείωση, ενώ τα υπόλοιπα παρουσιάζουν σταθερή ή ελαφρώς αυξημένη τιμή σε σχέση με τη μεσαία σχετική θέση. Πιο συγκεκριμένα στις μικρότερες σχετικές θέσεις,  $z/d=0.215$  και 0.2, η τυρβώδης ένταση λαμβάνει μέση τιμή περίπου 0.47. Στις μεσαίες σχετικές θέσεις,  $z/d=0.338$  και 0.314 η εν λόγω τιμή είναι περίπου

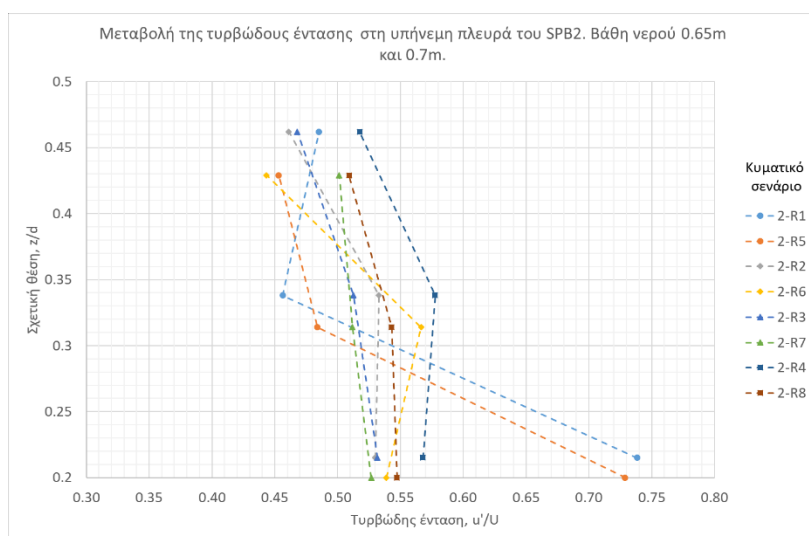
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

0.41, ενώ στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις,  $z/d=0.462$  και  $0.429$ , λαμβάνει μια μέση τιμή κοντά στο  $0.38$ . Η επιρροή των δύο συνολικών βαθών που μελετήθηκαν δεν φαίνεται να είναι σημαντική, καθώς από τον Πίνακα 5.6.6 παρατηρούνται γενικά μικρές μεταβολές με την γενικότερη τάση να δείχνει μειωμένες τιμές για το βάθος των  $0.7m$ .



Σχήμα 5.6.4 Καθ' ύψος μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη νερού  $0.65m$  και  $0.7m$ .

Στην υπήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB2 (Σχήμα 5.6.5) η τυρβώδης ένταση παρουσιάζει γενικά πιο αυξημένες τιμές σε σύγκριση με την προσήνεμη πλευρά. Όλα τα κυματικά σενάρια, εκτός των 2-R1 και 2-R5, παρουσιάζουν πανομοιότυπη καθ' ύψος μεταβολή. Στα μικρότερα σχετικά βάθη,  $z/d=0.215$  και  $0.2$ , η τυρβώδης ένταση λαμβάνει μέση τιμή κοντά στο  $0.54$ . Ίδια περίπου τιμή,  $0.52$ , παρατηρείται και στις μεσαίες θέσεις,  $z/d=0.338$  και  $0.314$ . Στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις  $z/d=0.462$  και  $0.429$ , οι οποίες αντιστοιχούν στο περίγραμμα του κυματοθραύστη, η τυρβώδης ένταση έχει μέση τιμή κοντά στο  $0.48$ . Η επιρροή των δύο συνολικών βαθών που μελετήθηκαν δεν φαίνεται να είναι σημαντική, καθώς από τον Πίνακα 5.6.6 παρατηρούνται γενικά μικρές μεταβολές που δεν ξεπερνούν το  $7.2\%$ .

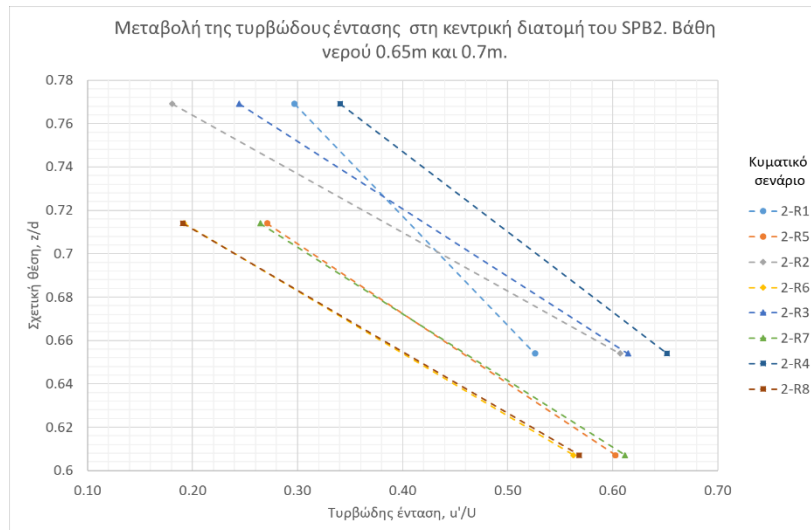


Σχήμα 5.6.5 Καθ' ύψος μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη νερού  $0.65m$  και  $0.7m$ .



## Μεταβολή της τυρβώδους έντασης $u'/U$

Η μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη κεντρική διατομή φαίνεται στο Σχήμα 5.6.6. Στον “πόρο” ( $z/d=0.654$  και  $0.607$ ) παρατηρούνται αρκετά αυξημένες τυρβώδεις εντάσεις με μέσες τιμές  $0.6$  και  $0.59$  για τα βάθη  $0.65\text{m}$  και  $0.7\text{m}$  αντίστοιχα. Στην στέψη, αντίθετα, η τυρβώδης ένταση παρουσιάζει αρκετά μικρότερες τιμές. Για το βάθος νερού των  $0.65\text{m}$  η τιμή της κυμαίνεται περίπου στο  $0.27$  ενώ για το βάθος των  $0.7\text{m}$  η τιμή της είναι περίπου  $0.23$ . Από τις παραπάνω τιμές, στον πόρο και στην στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη, συμπεραίνεται ότι για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν η τυρβώδης ένταση δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφορές.



Σχήμα 5.6.6 Καθ' ύψος μεταβολή της τυρβώδους έντασης στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθη νερού  $0.65\text{m}$  και  $0.7\text{m}$ .

### 5.6.3 Σύγκριση των σχετικών τυρβωδών εντάσεων μεταξύ του SPB1 και SPB2

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.6.7 και Πίνακας 5.6.8) έχουν υπολογιστεί η μεταβολή (%) της σχετικής τυρβώδους έντασης από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2 για τις διάφορες θέσεις μέτρησης, για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν.

Πίνακας 5.6.7 Μεταβολή (%) της σχετικής τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος νερού  $0.65\text{m}$ .

Μεταβολή (%) της τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος νερού $0.65\text{m}$ .												
SPB1→SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθράυστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, $z/d$ ( $z=0$ , πυθμένας)							
					0.215	0.338	0.462	0.215	0.338	0.462	0.769	0.654
	1/2-R1	0.65	0.06	1	-3.5	-13.5	-35.8	32.4	-36.8	-28.8	-6.4	10.9
	1/2-R2		0.11	1.5	6.0	-5.3	75.2	-6.9	13.3	-29.9	-16.1	-5.7
	1/2-R3		0.17	2	33.9	21.7	144.1	-3.6	4.8	-8.7	121.7	-3.0
	1/2-R4		0.23	2.5	14.3	52.4	53.5	0.9	13.7	-19.8	65.1	-1.8

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Πίνακας 5.6.8 Μεταβολή (%) της σχετικής τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος νερού 0.7m.

Μεταβολή (%) της τυρβώδους έντασης ( $u'/U$ ) από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2. Βάθος νερού 0.7m.												
SPB1→SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης στο κυματοθραύστη							
					Προσήνεμη			Υπήνεμη			Στέψη	Πόρος
					Σχετική θέση, z/d (z=0, πυθμένας)							
					0.2	0.314	0.429	0.2	0.314	0.429	0.714	0.607
	1/2-R5	0.7	0.06	1	-30.1	-25.5	-22.4	8.4	-24.0	-32.7	-25.4	-14.6
	1/2-R6		0.11	1.5	6.6	3.5	57.6	-6.9	24.9	-32.0	-6.7	-6.3
	1/2-R7		0.17	2	14.5	3.3	5.9	2.1	10.7	35.1	97.6	-1.5
	1/2-R8		0.23	2.5	9.1	29.4	74.2	-0.7	15.1	13.6	37.6	-10.1

Στην προσήνεμη πλευρά, στις χαμηλότερες σχετικές θέσεις  $z/d=0.215$  και  $z/d=0.2$  για 0.65m και 0.7m βάθος νερού αντίστοιχα, παρατηρείται γενικά αύξηση της τυρβώδους έντασης από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2, η οποία φτάνει στο 33.9% και στο 14.5% για τα κυματικά σενάρια R3 και R7 αντίστοιχα. Στις σχετικές θέσεις  $z/d=0.338$  και 0.314 παρατηρείται μείωση για τα μικρότερα κυματικά σενάρια R1 και R5 σε ποσοστό -13.5% και -25.5% αντίστοιχα, ενώ αντίθετα παρατηρείται σημαντική αύξηση για τα μεγαλύτερα κυματικά σενάρια R4 και R8 σε ποσοστό 52.4% και 29.4% αντίστοιχα. Τέλος στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις,  $z/d=0.462$  και 0.429, παρατηρείται και εδώ μείωση της τυρβώδους έντασης στα μικρότερα κυματικά σενάρια R1 και R5 ενώ για τα υπόλοιπα κυματικά σενάρια διαπιστώνονται σημαντικές αυξήσεις που φτάνουν έως 144%. Γενικά, και για τα δύο βάθη νερού, παρατηρείται στην προσήνεμη πλευρά αύξηση των τυρβωδών εντάσεων από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2, με τις μεγαλύτερες να παρατηρούνται για το συνολικό βάθος των 0.65m.

Στην υπήνεμη πλευρά για τα μικρότερα σχετικά βάθη  $z/d=0.2$  και 0.215 δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές της τυρβώδους έντασης. Στις μεσαίες σχετικές θέσεις παρατηρείται παρόμοια μεταβολή των τυρβωδών εντάσεων για τα δύο βάθη νερού, με τις μεγαλύτερες ωστόσο να εμφανίζονται για το βάθος των 0.7m. Για το βάθος νερού των 0.65m και για την σχετική θέση  $z/d=0.462$ , παρατηρείται για το σύνολο των κυματικών σεναρίων μείωση της τυρβώδους έντασης από το μοντέλο SPB1 στο SPB2. Αντίθετα, για το βάθος των 0.7m δεν εκδηλώνεται η ίδια σαφής τάση αφού για τα δύο μικρότερα κυματικά σενάρια παρατηρείται μείωση ενώ για τα δύο μεγαλύτερα παρατηρείται αύξηση της τυρβώδους έντασης.

Στη στέψη, και για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν παρατηρείται σαφής αύξηση των σχετικών τυρβωδών εντάσεων στο μοντέλο SPB2 που κυμαίνεται από 37.6% έως και 121.7% για την περίπτωση των θραυόμενων κυματισμών (κυματικά σενάρια R3, R4, R7 και R8). Για την περίπτωση των μη θραυόμενων κυματισμών (R1, R2, R5 και R6) παρατηρείται μείωση που κυμαίνεται από -6.4% έως και -25.4%.

Τέλος, στον πόρο οι μεταβολές είναι μικρές και δεν ξεπερνάνε το -14.6%, με την γενικότερη τάση να δείχνει μείωση της σχετικής έντασης από το μοντέλο SPB1 στο SPB2.

## 5.7 Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας

### 5.7.1 Φυσικό ομοίωμα SPB1

#### 5.7.1.1 Αποτελέσματα στην προσήνεμη διατομή

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.7.1 και Πίνακας 5.7.2) δίνονται τα πλάτη ταλάντωσης των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην προσήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB1 για τα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν, 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνονται γραφικά τα προφίλ της 1<sup>ης</sup>, της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας που προκύπτουν από τις τιμές των δύο παρακάτω πινάκων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο σύνολο των σχημάτων της παραγράφου 5.7 θα αποτυπωθούν μόνο τα αποτελέσματα των μετρήσεων που θεωρούνται αξιόπιστα (πράσινα και κίτρινα κελιά).

Πίνακας 5.7.1 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος νερού 0.65m.

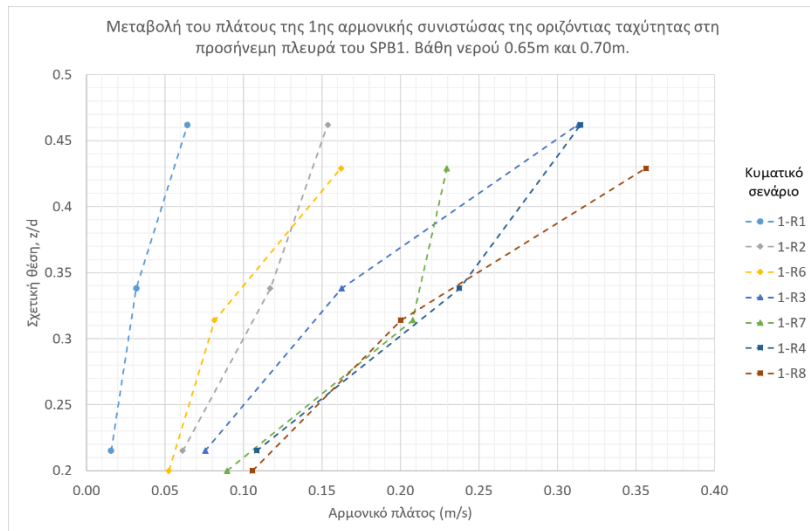
Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.65m.													
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.215			0.338			0.462		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	1-R1	0.65	0.06	1	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00
	1-R2		0.11	1.5	0.06	0.01	0.01	0.12	0.00	0.01	0.15	0.01	0.00
	1-R3		0.17	2	0.08	0.01	0.01	0.16	0.04	0.04	0.31	0.05	0.02
	1-R4		0.23	2.5	0.11	0.01	0.01	0.24	0.08	0.05	0.31	0.03	0.02

Πίνακας 5.7.2 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος νερού 0.7m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.7m.													
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.2			0.314			0.429		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	1-R5	0.7	0.06	1	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00
	1-R6		0.11	1.5	0.05	0.01	0.01	0.08	0.00	0.00	0.16	0.01	0.00
	1-R7		0.17	2	0.09	0.01	0.01	0.21	0.01	0.03	0.23	0.06	0.02
	1-R8		0.23	2.5	0.11	0.01	0.01	0.20	0.07	0.04	0.36	0.02	0.03

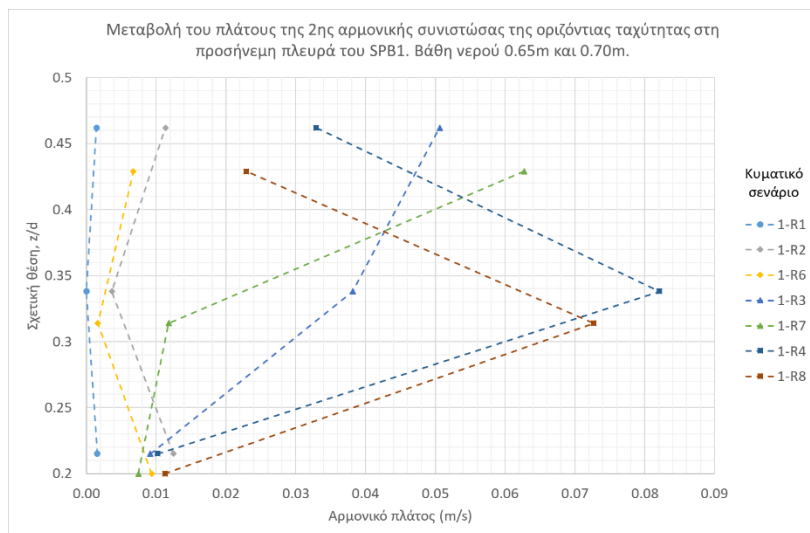
Στο Σχήμα 5.7.1 φαίνονται τα προφίλ της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.7m. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι στα μικρότερα σχετικά βάθη ( $z/d=0.2$  και  $z/d=0.215$ ) η αύξηση της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας, καθώς αυξάνεται το ύψος και η περίοδος του κύματος, είναι λιγότερο έντονη σε σχέση με τις άλλες δύο θέσεις μέτρησης που βρίσκονται σε μεγαλύτερα σχετικά βάθη. Το εύρος της ταχύτητας για τα μικρότερα σχετικά βάθη κυμαίνεται από 0.016m/s, για το κυματικό σενάριο 1-R1, μέχρι 0.108m/s, για το κυματικό σενάριο 1-R8. Στη μεσαία θέση μέτρησης ( $z/d=0.314$  και  $z/d=0.338$ ) το πλάτος ταλάντωσης κυμαίνεται από 0.032m/s μέχρι και 0.238m/s, ενώ στην ανώτερη θέση ( $z/d=0.429$  και  $z/d=0.462$ ), η οποία βρίσκεται στο περίγραμμα του ύφαλου κυματοθραύστη, το πλάτος ταλάντωσης αυξάνει ακόμα περισσότερο με εύρος από 0.064m/s μέχρι και 0.356m/s. Από το σχήμα αυτό δεν είναι σαφές για πιο από τα δύο βάθη νερού έχουμε μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας στην προσήνεμη πλευρά.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



Σχήμα 5.7.1 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 1ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

Στο Σχήμα 5.7.2 φαίνονται τα προφίλ της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.7m. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για τα μικρότερα σχετικά βάθη ( $z/d=0.2$  και  $z/d=0.215$ ) το πλάτος ταλάντωσης παραμένει σχεδόν σταθερό, περίπου 0.01m/s, ανεξαρτήτως κυματικού σεναρίου και βάθους νερού. Καθώς προχωράμε στη μεσαία θέση μέτρησης ( $z/d=0.314$  και  $z/d=0.338$ ), παρατηρείται ότι ενώ για τα μικρότερα κυματικά σενάρια 1-R1, 1-R2 και 1-R6 η παραγωγή της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας είναι σχεδόν μηδενική, για τα μεγαλύτερα κυματικά σενάρια 1-R3, 1-R4, και 1-R8 παρατηρείται σημαντική αύξηση. Γενικά από το σχήμα αυτό διαφαίνεται ότι μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης της 2<sup>ης</sup> αρμονικής παρατηρούνται για το μικρότερο βάθος νερού των 0.65m.

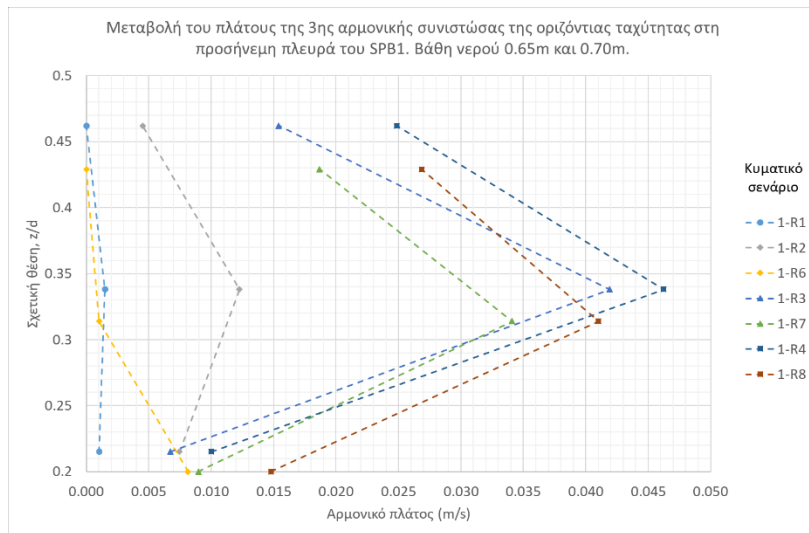


Σχήμα 5.7.2 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 2ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

Στο Σχήμα 5.7.3 φαίνονται τα προφίλ της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.7m. Το πλάτος ταλάντωσης της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα σχετικά βάθη  $z/d=0.2$  και  $z/d=0.215$  φαίνεται και εδώ, όμοια με τη 2<sup>η</sup> αρμονική, να μην μεταβάλλεται σημαντικά καθώς το ύψος

## Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας

και η περίοδος των κυματισμών μεγαλώνει. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό που μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα αυτό είναι η ομοιότητα των προφίλ των κυματικών σεναρίων 1-R3, 1-R7, 1-R4 και 1-R8 όπου παρατηρείται σημαντική αύξηση του ταλάντωσης στις μεσαίες θέσεις μέτρησης ( $z/d=0.314$  και  $z/d=0.338$ ) και στη συνέχεια απότομη πτώση στις ανώτερες θέσεις μέτρησης ( $z/d=0.429$  και  $z/d=0.462$ ) οι οποίες βρίσκονται στο περίγραμμα του ύφαλου κυματοθραύστη. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για τις μεσαίες θέσεις μέτρησης το πλάτος ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο για το μικρότερο βάθος νερού των 0.65m, ενώ για το σύνολο των μετρήσεων στα μικρότερα σχετικά βάθη το πλάτος ταλάντωσης φαίνεται να είναι μεγαλύτερο για βάθος νερού 0.7m.



Σχήμα 5.7.3 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 3ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

### 5.7.1.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη διατομή

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.7.3 και Πίνακας 5.7.4) δίνονται τα πλάτη ταλάντωσης των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB1 για τα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν, 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνονται γραφικά τα προφίλ της 1<sup>ης</sup>, της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας που προκύπτουν από τις τιμές των δύο παρακάτω πινάκων.

Λόγω της γενικότερης χαμηλής αξιοπιστίας των δεδομένων που ελήφθησαν στις θέσεις  $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$ , δεν θα δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στο σχολιασμό τους. Τα μέτρια αξιοπιστίας δεδομένα (κίτρινα κελιά) έχουν αποτυπωθεί στα παρακάτω σχήματα αλλά ο αναγνώστης θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικός ως προς την αντιπροσωπευτικότητά τους καθώς οι τιμές του αρμονικού πλάτους της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας δείχνουν να είναι αρκετά μεγαλύτερες από το αναμενόμενο.

Στο Σχήμα 5.7.4 φαίνονται τα προφίλ της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.7m στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Εξετάζοντας μόνο τα πιο αξιόπιστα δεδομένα των σχετικών θέσεων  $z/d=0.2$ ,  $z/d=0.215$ ,  $z/d=0.314$  και  $z/d=0.338$ , παρατηρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης παραμένει σχεδόν σταθερό καθ' ύψος για κάθε κυματικό σενάριο για τα δύο βάθη νερού.

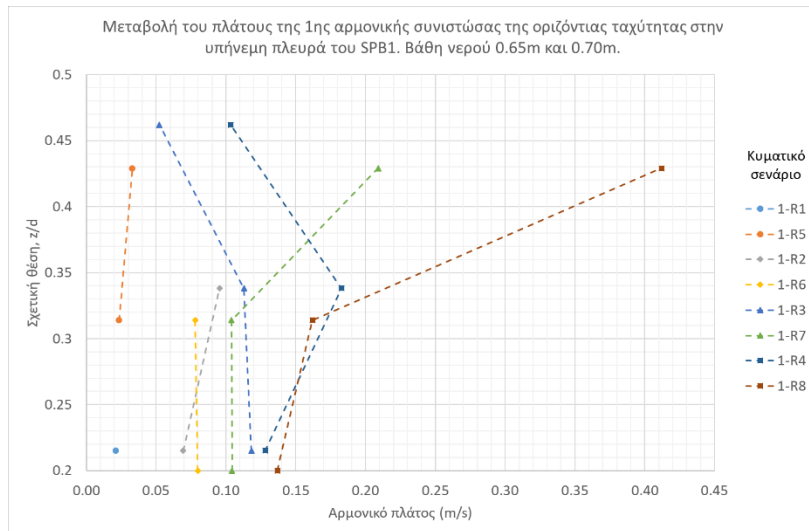
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Πίνακας 5.7.3 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος νερού 0.65m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.65m.													
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.215			0.338			0.462		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	1-R1	0.65	0.06	1	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
	1-R2		0.11	1.5	0.07	0.01	0.01	0.10	0.01	0.01	0.15	0.15	0.07
	1-R3		0.17	2	0.12	0.00	0.02	0.11	0.06	0.02	0.05	0.27	0.28
	1-R4		0.23	2.5	0.13	0.03	0.01	0.18	0.03	0.03	0.10	0.16	0.17

Πίνακας 5.7.4 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος νερού 0.70m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.7m.													
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.2			0.314			0.429		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	1-R5	0.7	0.06	1	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01
	1-R6		0.11	1.5	0.08	0.01	0.00	0.08	0.01	0.00	0.11	0.04	0.02
	1-R7		0.17	2	0.10	0.01	0.02	0.10	0.05	0.01	0.21	0.04	0.03
	1-R8		0.23	2.5	0.14	0.02	0.03	0.16	0.03	0.03	0.41	0.11	0.02

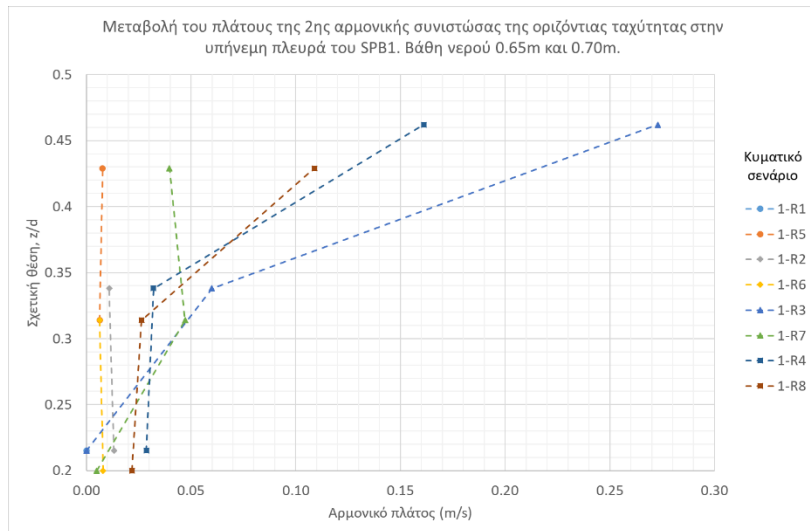


Σχήμα 5.7.4 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 1ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

Τα προφίλ της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 5.7.5. Και εδώ όπως και για την 1<sup>η</sup> αρμονική παρατηρείται η τάση του σταθερού καθ' ύψους πλάτους ταλάντωσης για τα ζευγάρια των δύο θέσεων που αντιστοιχούν στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη ( $z/d=0.2$ ,  $z/d=0.215$ ,  $z/d=0.314$  και  $z/d=0.338$ ). Γενικά παρατηρούνται ελαφρώς αυξημένα πλάτη ταλάντωσης της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για το μικρότερο βάθος νερού των 0.65m. Επίσης για τις ίδιες θέσεις δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική αύξηση του πλάτους ταλάντωσης της δεύτερης αρμονικής καθώς αυξάνεται το ύψος και η περίοδος του κύματος.

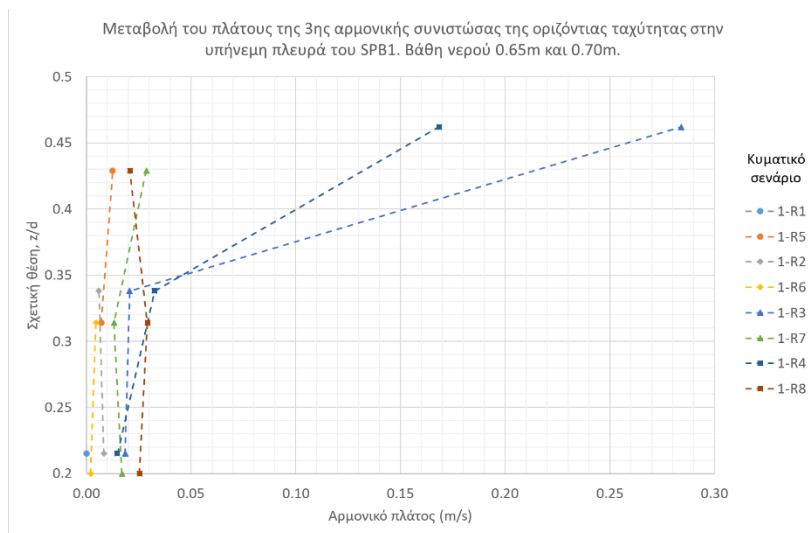


## Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας



Σχήμα 5.7.5 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 2ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

Τα προφίλ της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 5.7.6. Παρατηρείται και εδώ για τις θέσεις μέτρησης που βρίσκονται στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη ότι το πλάτος της 3<sup>ης</sup> αρμονικής παραμένει σχεδόν το ίδιο καθ' ύψος και ότι επίσης δεν μεταβάλλεται σημαντικά καθώς το ύψος και περίοδος του κύματος αυξάνουν.



Σχήμα 5.7.6 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 3ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

### 5.7.1.3 Αποτελέσματα στη κεντρική διατομή

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.7.5 και Πίνακας 5.7.6) δίνονται τα πλάτη ταλάντωσης των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του φυσικού ομοιώματος SPB1 για τα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν, 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνονται γραφικά τα προφίλ της 1<sup>ης</sup>, της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας που προκύπτουν από τις τιμές των δύο παρακάτω πινάκων.

Πίνακας 5.7.5 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθος νερού 0.65m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθος 0.65m.										
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)					
					Στέψη			Πόρος		
					0.769			0.654		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)					
					1η	2η	3η	1η	2η	3η
1-R1	0.65	0.06	1	0.07	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	
1-R2		0.11	1.5	0.15	0.03	0.00	0.04	0.01	0.02	
1-R3		0.17	2	0.54	0.16	0.05	0.02	0.01	0.01	
1-R4		0.23	2.5	0.55	0.28	0.10	0.03	0.01	0.01	

Πίνακας 5.7.6 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθος νερού 0.70m.

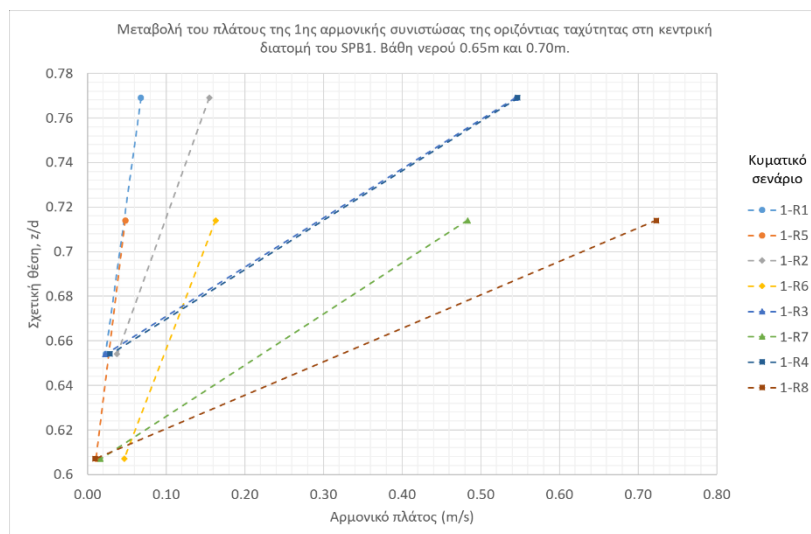
Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθος 0.7m.										
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)					
					Στέψη			Πόρος		
					0.714			0.607		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)					
					1η	2η	3η	1η	2η	3η
1-R5	0.7	0.06	1	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	
1-R6		0.11	1.5	0.16	0.02	0.00	0.05	0.00	0.01	
1-R7		0.17	2	0.48	0.12	0.02	0.02	0.03	0.02	
1-R8		0.23	2.5	0.72	0.17	0.06	0.01	0.01	0.03	

Στο Σχήμα 5.7.7 φαίνονται τα προφίλ της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν, 0.65m και 0.7m, στη κεντρική διατομή του SPB1. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τις μετρήσεις που έγιναν μέσα στον "πόρο" (z/d=0.654 και z/d=0.607), παραμένει σταθερό καθώς αυξάνεται το ύψος και η περίοδος του κύματος. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο για την περίπτωση του μικρότερου συνολικού βάθους νερού των 0.65m.

Όσον αφορά το πλάτος ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής στη στέψη, παρατηρείται ότι για τα μικρότερα κυματικά σενάρια, 1- R1, 1-R5, 1-R2 και 1-R6, το πλάτος ταλάντωσης παραμένει ίδιο ανεξάρτητα από το βάθος του νερού. Για τα ομόλογα κυματικά σενάρια 1-R3 και 1-R7, παρατηρείται αυξημένο πλάτος ταλάντωσης για το μικρότερο από τα δύο βάθη νερού, 0.55m/s έναντι 0.48m/s. Αντίθετα για τα ομόλογα κυματικά σενάρια 1-R4 και 1-R8 παρατηρούνται πλάτη ταλάντωση 0.55m/s και 0.72m/s

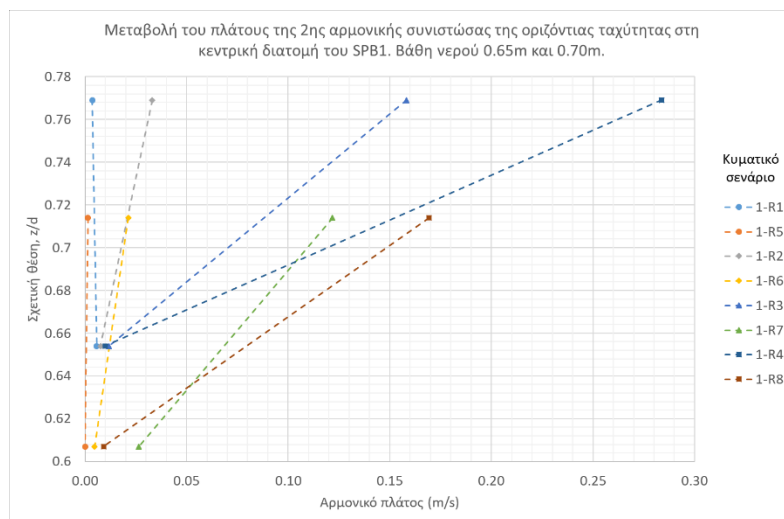
## Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας

αντίστοιχα, γεγονός που δείχνει ότι το βάθος του νερού φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο στο πλάτος ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας.



Σχήμα 5.7.7 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 1ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

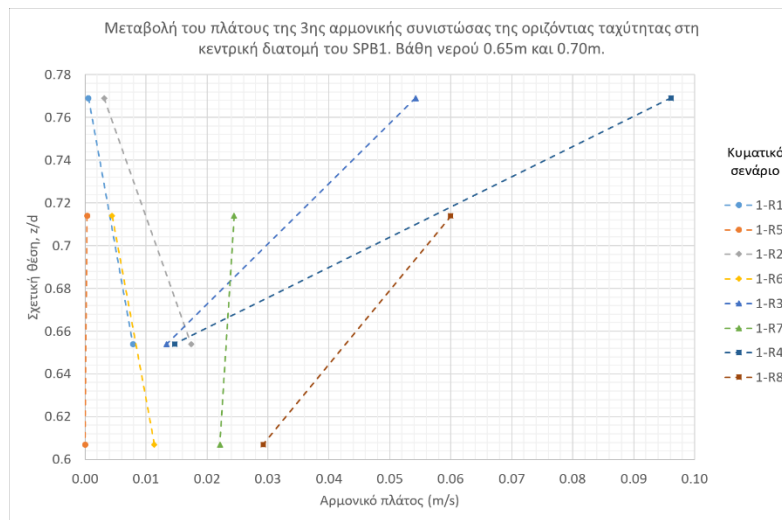
Στο παρακάτω Σχήμα 5.7.8 δίνονται γραφικά τα προφίλ ταλάντωσης της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας, για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m, στη κεντρική διατομή του SPB1. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης μέσα στον "πόρο", όμοια με την 1<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα, παραμένει σχεδόν αμετάβλητο καθώς το ύψος και η περίοδος του κύματος αυξάνει. Όσον αφορά τις μετρήσεις στη στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη, η γενική εικόνα είναι ότι το πλάτος ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο για την περίπτωση του μικρότερου βάθους νερού, των 0.65m.



Σχήμα 5.7.8 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 2ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

Στο Σχήμα 5.7.9 φαίνονται τα πλάτη ταλάντωσης της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας, για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m, στη κεντρική διατομή του SPB1. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μικρή μεταβολή του πλάτους μέσα στον πόρο καθώς αυξάνουν τα κυματικά χαρακτηριστικά. Όσον αφορά το πλάτος ταλάντωσης της 3<sup>ης</sup> αρμονικής στη στέψη, παρατηρείται ότι για τα μικρότερα κυματικά σενάρια, 1- R1, 1-R5, 1-R2 και 1-R6, παραμένει σχεδόν μηδενικό, ενώ για τα μεγαλύτερα, 1-

R3, 1-R7, 1-R4 και 1-R8, το πλάτος αυξάνεται. Γενικά και στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι για το μικρότερο βάθος νερού τα πλάτη ταλάντωσης στη στέψη είναι μεγαλύτερα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα για το μεγαλύτερο βάθος των 0.7m.



Σχήμα 5.7.9 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 3ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB1. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

## 5.7.2 Φυσικό ομοίωμα SPB2

### 5.7.2.1 Αποτελέσματα στην προσήνεμη πλευρά

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.7.7 και Πίνακας 5.7.8) δίνονται τα πλάτη ταλάντωσης των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην προσήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB2 για τα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν, 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνονται γραφικά τα προφίλ της 1<sup>ης</sup>, της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας που προκύπτουν από τις τιμές των δύο παρακάτω πινάκων.

Στο Σχήμα 5.7.10 φαίνονται τα προφίλ της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.7m. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι για το μικρότερο κυματικό σενάριο με ύψος κύματος  $H = 0.06m$  και περίοδο  $T = 1sec$  (2-R1 και 2-R5) το βάθος νερού φαίνεται να μην επιδρά σημαντικά στο πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας καθώς οι τιμές που έχουν προκύψει δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές καθ' ύψος. Για τα υπόλοιπα μεγαλύτερα κυματικά σενάρια οι τιμές του πλάτους ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής φαίνεται να μην παρουσιάζουν ιδιαίτερη μεταβλητότητα καθώς αυξάνουν τα κυματικά χαρακτηριστικά με το εύρος του αρμονικού πλάτους να λαμβάνει χώρα από 0.065 m/s μέχρι 0.144m/s. Μόνη εξαίρεση στην εικόνα αυτή αποτελούν τα αρμονικά πλάτη στις σχετικές θέσεις  $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$  των κυματικών σεναρίων 2-R4 και 2-R8 όπου παρατηρείται απότομη αύξηση που φτάνει τα 0.333m/s και 0.272m/s αντίστοιχα.

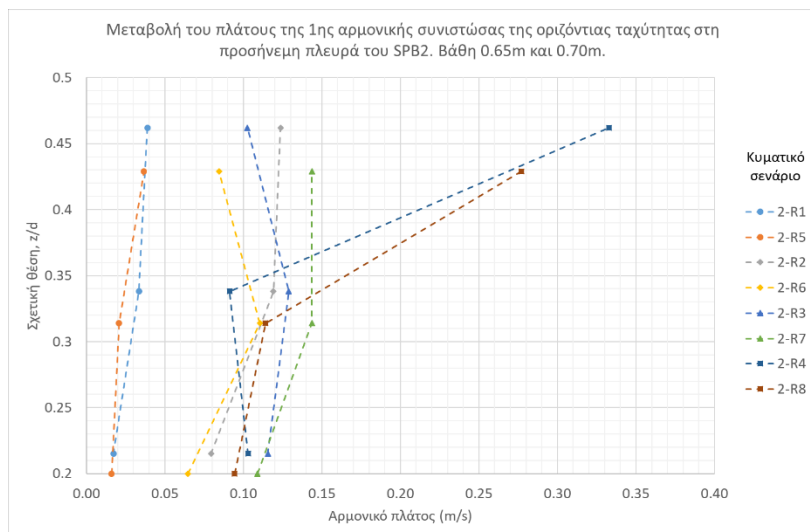
## Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας

Πίνακας 5.7.7 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος νερού 0.65m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.65m.													
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.215			0.338			0.462		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	2-R1	0.65	0.06	1	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
	2-R2		0.11	1.5	0.08	0.00	0.00	0.12	0.01	0.00	0.12	0.01	0.01
	2-R3		0.17	2	0.12	0.07	0.05	0.13	0.01	0.04	0.10	0.08	0.04
	2-R4		0.23	2.5	0.10	0.06	0.03	0.09	0.03	0.01	0.33	0.05	0.02

Πίνακας 5.7.8 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος νερού 0.7m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.7m.													
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.2			0.314			0.429		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	2-R5	0.7	0.06	1	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
	2-R6		0.11	1.5	0.06	0.00	0.00	0.11	0.01	0.01	0.08	0.00	0.00
	2-R7		0.17	2	0.11	0.06	0.04	0.14	0.01	0.03	0.14	0.01	0.00
	2-R8		0.23	2.5	0.09	0.07	0.05	0.11	0.03	0.02	0.28	0.04	0.01

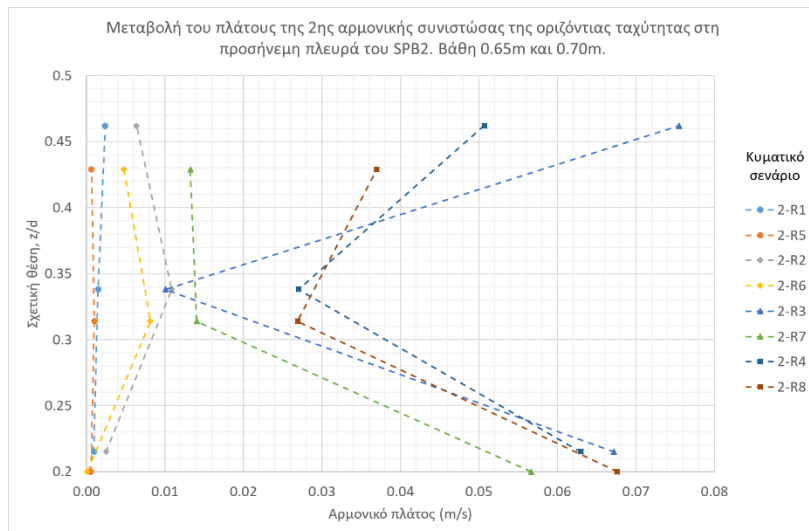


Σχήμα 5.7.10 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 1ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη 0.65m και 0.70m.

Στο Σχήμα 5.7.11 φαίνονται τα προφίλ της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.7m. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται, για τα τέσσερα πρώτα κυματικά σενάρια 2-R1, 2-R5, 2-R2, και 2-R6 ότι δεν παράγονται σημαντικά πλάτη ταλάντωσης της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας. Για τα υπόλοιπα τέσσερα κυματικά σενάρια, 2-R3, 2-R7, 2-R4 και 2-R8, τα προφίλ φαίνεται να παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες ως προς την μορφή τους. Πιο συγκεκριμένα παρατηρούνται αυξημένα πλάτη ταλάντωσης στις χαμηλότερες ( $z/d=0.215$  και  $z/d=0.2$ ) και στις υψηλότερες ( $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$ ) θέσεις μέτρησης ενώ στις μεσαίες ( $z/d=0.338$  και  $z/d=0.314$ ) παρατηρείται σχετική μείωσή τους. Η

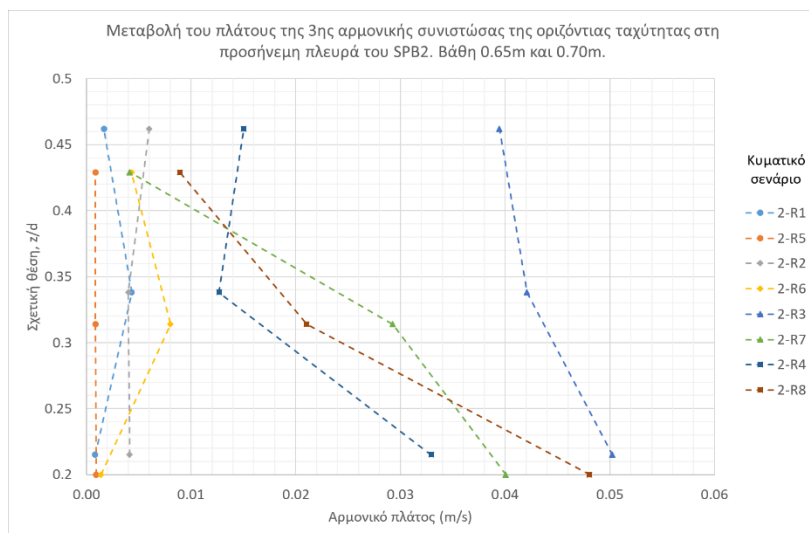
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

γενική εικόνα δείχνει ότι τα πλάτη ταλάντωσης είναι, στην πλειονότητά τους, μεγαλύτερα για το μικρότερο βάθος νερού των 0.65m.



Σχήμα 5.7.11 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 2ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη 0.65m και 0.70m.

Στο Σχήμα 5.7.12 φαίνονται τα προφίλ της 3ης αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού, 0.65m και 0.7m. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται, για τα τέσσερα πρώτα κυματικά σενάρια 2-R1, 2-R5, 2-R2, και 2-R6 ότι δεν παράγονται σημαντικά πλάτη ταλάντωσης της 3ης αρμονικής συνιστώσας. Για τα υπόλοιπα τέσσερα κυματικά σενάρια, 2-R3, 2-R7, 2-R4 και 2-R8, η γενικότερη τάση των δεδομένων δείχνει αυξημένες τιμές του αρμονικού πλάτους στις χαμηλότερες ( $z/d=0.215$  και  $z/d=0.2$ ) θέσεις μέτρησης και σταδιακή μείωσή του καθώς το σχετική θέση αυξάνει.



Σχήμα 5.7.12 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 3ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη προσήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη 0.65m και 0.70m.

### 5.7.2.2 Αποτελέσματα στην υπήνεμη πλευρά

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.7.9 και Πίνακας 5.7.10) δίνονται τα πλάτη ταλάντωσης των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του φυσικού



## Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας

ομοιώματος SPB2 για τα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν, 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνονται γραφικά τα προφίλ της 1<sup>ης</sup>, της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας που προκύπτουν από τις τιμές των δύο παρακάτω πινάκων.

Πίνακας 5.7.9 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος νερού 0.65m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.65m.													
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.215			0.338			0.462		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	2-R1	0.65	0.06	1	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
	2-R2		0.11	1.5	0.06	0.01	0.00	0.05	0.02	0.01	0.07	0.01	0.00
	2-R3		0.17	2	0.09	0.03	0.01	0.12	0.02	0.02	0.12	0.03	0.01
	2-R4		0.23	2.5	0.11	0.02	0.03	0.10	0.03	0.03	0.16	0.05	0.04

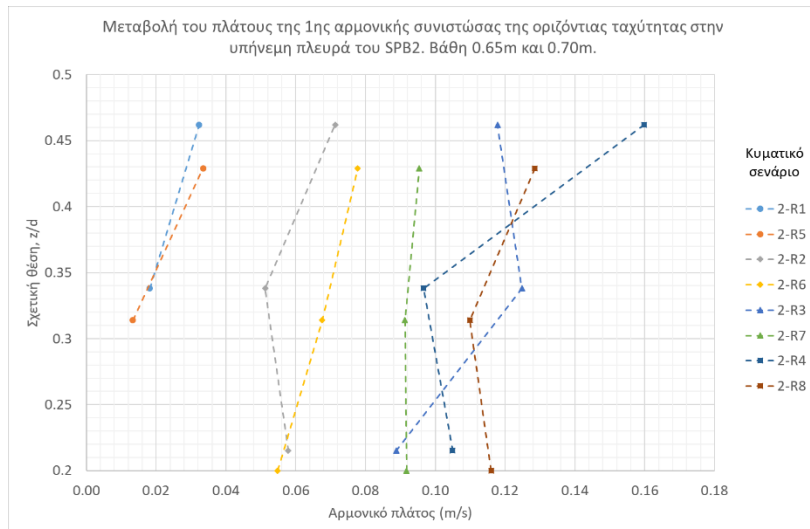
Πίνακας 5.7.10 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος νερού 0.7m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.7m.													
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)								
					0.2			0.314			0.429		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)								
					1η	2η	3η	1η	2η	3η	1η	2η	3η
	2-R5	0.7	0.06	1	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00
	2-R6		0.11	1.5	0.05	0.02	0.01	0.07	0.01	0.02	0.08	0.00	0.01
	2-R7		0.17	2	0.09	0.03	0.01	0.09	0.01	0.02	0.10	0.04	0.01
	2-R8		0.23	2.5	0.12	0.01	0.02	0.11	0.07	0.02	0.13	0.03	0.02

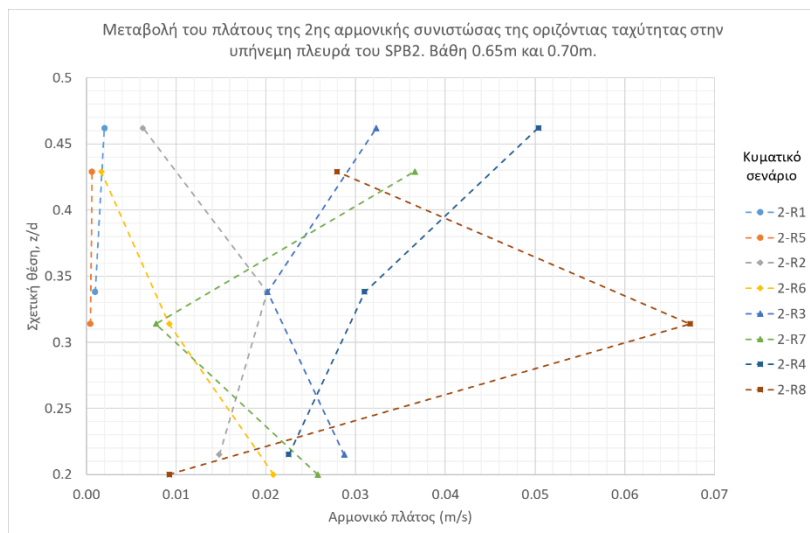
Στο Σχήμα 5.7.13 φαίνεται η μεταβολή του πλάτους της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB2, για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m. Από το σχήμα αυτό δεν μπορεί να προκύψει κάποιο γενικό συμπέρασμα για την συμπεριφορά της 1<sup>ης</sup> αρμονικής καθώς δεν φαίνεται να ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο. Η μόνη παρατήρηση που μπορεί να γίνει αφορά τις θέσεις που βρίσκονται στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη ( $z/d=0.215$ ,  $z/d=0.2$ ,  $z/d=0.338$  και  $z/d=0.314$ ) όπου το πλάτος ταλάντωσης παραμένει σχεδόν σταθερό για κάθε διαφορετικό κυματικό σενάριο.

Αντίστοιχα με την 1<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα, ούτε και στη περίπτωση της 2<sup>ης</sup> αρμονικής (Σχήμα 5.7.14) μπορεί να προκύψει κάποιο γενικό συμπέρασμα για την συμπεριφορά της. Ωστόσο είναι δυνατό να παρατηρηθεί η πολύ μικρή μεταβλητότητα που παρουσιάζουν τα πλάτη ταλάντωσης στις δύο μικρότερες σχετικές θέσεις ( $z/d=0.2$  και  $z/d=0.215$ ) όπου κυμαίνονται από 0.01m/s μέχρι και 0.029m/s και επίσης ότι τα αρμονικά πλάτη, στην πλειοψηφία των θέσεων μέτρησης, είναι μεγαλύτερα για το μικρότερο βάθος νερού των 0.65m.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη



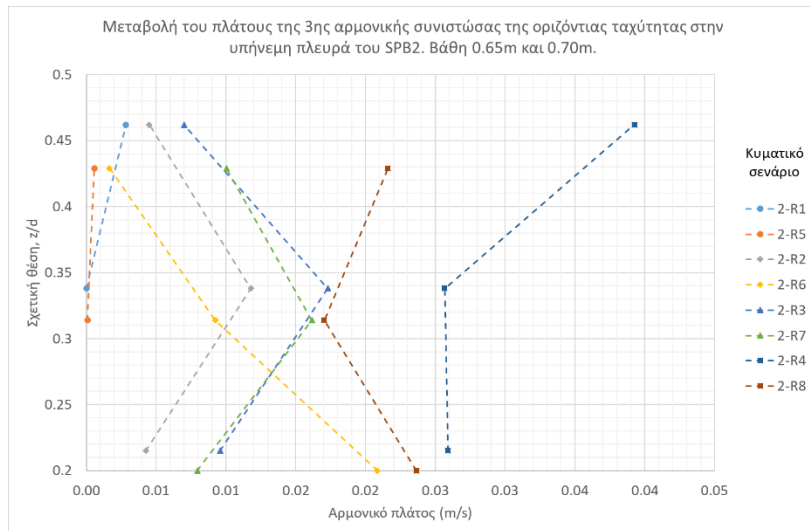
Σχήμα 5.7.13 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 1ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη 0.65m και 0.70m.



Σχήμα 5.7.14 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 2ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη 0.65m και 0.70m.

Από το Σχήμα 5.7.15 παρατηρείται ένα πανομοιότυπο μοτίβο για τα αρμονικά πλάτη της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα κυματικά σενάρια 2-R2, 2-R6, 2-R3 και 2-R7, με μόνη εξαίρεση την μέτρηση στη θέση  $z/d=0.2$  για το κυματικό σενάριο 2-R6. Για τα σενάρια αυτά διαπιστώνονται αυξημένα πλάτη ταλάντωσης για τις μεσαίες θέσεις μέτρησης ( $z/d=0.314$  και  $z/d=0.338$ ) και μειωμένα για τις χαμηλότερες ( $z/d=0.2$  και  $z/d=0.215$ ) και τις υψηλότερες θέσεις ( $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$ ). Γενικά παρατηρούνται και εδώ αυξημένα αρμονικά πλάτη για την περίπτωση του μικρότερου συνολικού βάθους των 0.65m.

## Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας



Σχήμα 5.7.15 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 3ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στην υπήνεμη πλευρά του SPB2. Βάθη 0.65m και 0.70m.

### 5.7.2.3 Αποτελέσματα στην κεντρική διατομή

Στους παρακάτω δύο πίνακες (Πίνακας 5.7.11 και Πίνακας 5.7.12) δίνονται τα πλάτη ταλάντωσης των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του φυσικού ομοιώματος SPB2 για τα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν, 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνονται γραφικά τα προφίλ της 1<sup>ης</sup>, της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας που προκύπτουν από τις τιμές των δύο παρακάτω πινάκων.

Πίνακας 5.7.11 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθος νερού 0.65m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθος 0.65m.										
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)					
					Στέψη			Πόρος		
					0.769			0.654		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)					
					1η	2η	3η	1η	2η	3η
2-R1	0.65	0.06	1	0.14	0.01	0.00	0.05	0.00	0.00	
2-R2		0.11	1.5	0.34	0.07	0.03	0.02	0.02	0.01	
2-R3		0.17	2	0.38	0.14	0.05	0.05	0.03	0.01	
2-R4		0.23	2.5	0.28	0.24	0.10	0.04	0.02	0.01	

Στο Σχήμα 5.7.16 φαίνονται τα προφίλ της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν, 0.65m και 0.7m, στη κεντρική διατομή του SPB2.

Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας για τις μετρήσεις που έγιναν μέσα στον "πόρο" (z/d=0.654 και z/d=0.607), παραμένει σταθερό καθώς αυξάνεται το ύψος και η περίοδος του κύματος. Το πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής φαίνεται να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο για την περίπτωση του μικρότερου βάθους (0.65m) καθώς παίρνει μια μέση τιμή 0.04m/s περίπου, ενώ

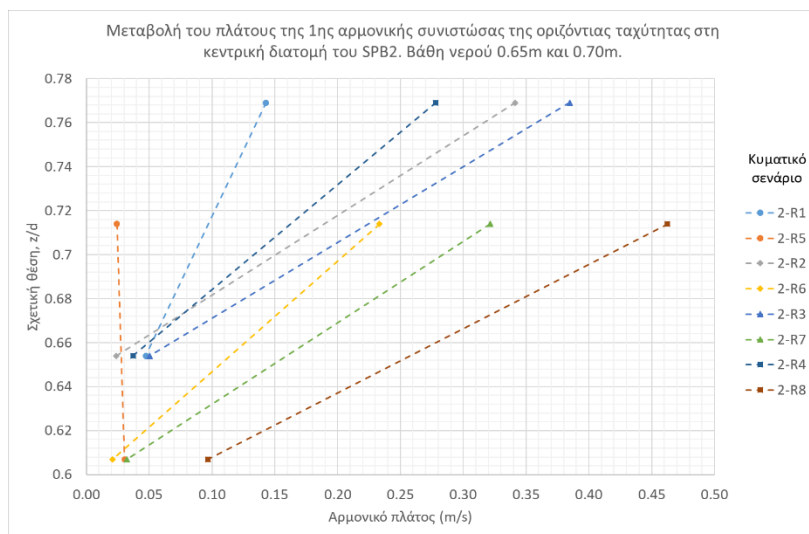
## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

για την περίπτωση του βάθους των 0.7m το πλάτος ταλάντωσης ελαττώνεται στα 0.03m/s κατά μέσο όρο.

Πίνακας 5.7.12 Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθος νερού 0.7m.

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθος 0.7m.										
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Σχετική θέση (z/d) (z=0, πυθμένας)					
					Στέψη			Πόρος		
					0.714			0.607		
					Πλάτος αρμονικής συνιστώσας (m/s)					
					1η	2η	3η	1η	2η	3η
2-R5	0.7	0.06	1	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01	0.00	
2-R6		0.11	1.5	0.23	0.04	0.01	0.02	0.03	0.01	
2-R7		0.17	2	0.32	0.12	0.03	0.03	0.03	0.01	
2-R8		0.23	2.5	0.46	0.21	0.06	0.10	0.02	0.01	

Όσον αφορά τη στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη παρατηρούνται και εδώ αυξημένα πλάτη ταλάντωσης για το μικρότερο από τα δύο βάθη νερού των 0.65m. Εξαιρεση αποτελεί το κυματικό σενάριο 2-R4 όπου η 1<sup>η</sup> αρμονική λαμβάνει μικρότερο αρμονικό πλάτος ταλάντωσης από το αντίστοιχο του κυματικού σεναρίου 2-R8, ακολουθώντας έτσι περίπου ίδια συμπεριφορά με τα αντίστοιχα κυματικά σενάρια στο μοντέλο SPB1. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται ότι το βάθος του νερού παίζει καθοριστικό ρόλο στο πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας.

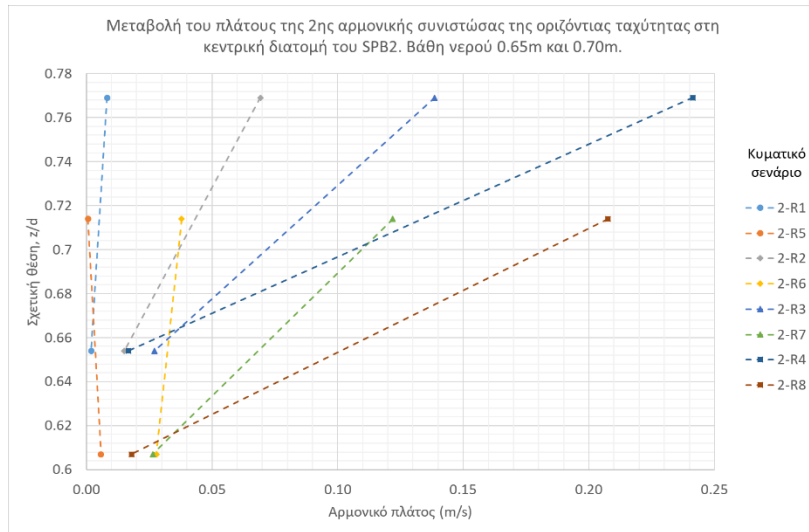


Σχήμα 5.7.16 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 1ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.7.17 δίνονται γραφικά τα προφίλ ταλάντωσης της 2<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας, για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m, στη κεντρική διατομή του SPB2. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης μέσα στον “πόρο”, όμοια με την 1<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα, παραμένει σχεδόν αμετάβλητο καθώς το ύψος και η περίοδος του κύματος αυξάνει με μέγιστη τιμή που δεν ξεπερνά τα 0.027m/s. Όσον αφορά τις μετρήσεις στη στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη, η

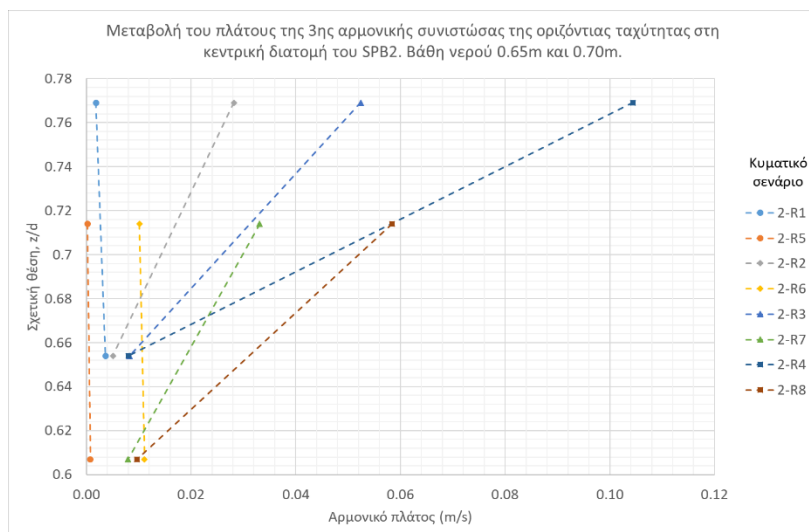
## Προφίλ των αρμονικών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας

γενική εικόνα είναι ότι το πλάτος ταλάντωσης είναι μεγαλύτερο για την περίπτωση του μικρότερου βάθους νερού, των 0.65m.



Σχήμα 5.7.17 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 2ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

Στο Σχήμα 5.7.18 φαίνονται τα πλάτη ταλάντωσης της 3ης αρμονικής συνιστώσας, για τα δύο βάθη νερού 0.65m και 0.7m, στη κεντρική διατομή του SPB2. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μικρή μεταβολή του πλάτους μέσα στον πόρο καθώς αυξάνουν τα κυματικά χαρακτηριστικά. Όσον αφορά το πλάτος ταλάντωσης της 3ης αρμονικής στη στέψη, παρατηρείται γενικά και στην περίπτωση αυτή ότι για το μικρότερο βάθος νερού τα πλάτη ταλάντωσης είναι μεγαλύτερα για το μικρότερο βάθος νερού των 0.65m σε σύγκριση με τα αντίστοιχα για το μεγαλύτερο βάθος των 0.7m.



Σχήμα 5.7.18 Καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 3ης αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας στη κεντρική διατομή του SPB2. Βάθη νερού 0.65m και 0.70m.

## 5.8 Οριζόντιες ταχύτητες στην ανάντη και κατάντη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη.

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των χρονοσειρών των οριζόντιων ταχυτήτων, που συλλέχθηκαν με τα όργανα EMS. Τα δύο όργανα EMS ήταν τοποθετημένα μέσα στο κανάλι, ένα στην ανάντη και ένα στην κατάντη πλευρά των ύφαλων κυματοθραυστών (SPB1 και SPB2) που εξετάστηκαν, στο μέσο περίπου βάθος ( $z/d=0.5$ ) (Σχήμα 3.3.1, Σχήμα 3.3.2). Στους παρακάτω πίνακες που ακολουθούν έχουν υπολογιστεί οι χαρακτηριστικές οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  και δίνεται η επί τοις εκατό μεταβολή τους από τα ανάντη στα κατάντη, η οποία θα επιτρέψει την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των δύο φυσικών ομοιωμάτων στην απομείωση της κυματικής ενέργειας.

### 5.8.1 Φυσικό ομοίωμα SPB1

Στον Πίνακα 5.8.1 και στον Πίνακα 5.8.2 δίνονται οι οριζόντιες ταχύτητες ( $u_{rms}$ ) που υπολογίστηκαν στην ανάντη και κατάντη μεριά του φυσικού ομοιώματος SPB1, για τα τέσσερα κυματικά σενάρια που εξετάστηκαν, για τα βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα.

Πίνακας 5.8.1 Οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  (m/s) στην προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.65m.

Οριζόντιες ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στην ανάντη και κατάντη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.65m.							Μεταβολή (%) από την ανάντη στην κατάντη πλευρά
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης		
					Ανάντη	Κατάντη	
					Σχετικό θέση, $z/d$ ( $z=0 \rightarrow$ πυθμένας)		
					0.5		
1-R1	0.65	0.06	1	0.034	0.031	-8.8	
1-R2		0.11	1.5	0.102	0.103	1.0	
1-R3		0.17	2	0.211	0.157	-25.9	
1-R4		0.23	2.5	0.336	0.250	-25.6	

Πίνακας 5.8.2 Οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  (m/s) στην προσήνεμη και υπήνεμη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.7m.

Οριζόντιες ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στην ανάντη και κατάντη πλευρά του SPB1. Βάθος 0.7m.							Μεταβολή (%) από την ανάντη στην κατάντη πλευρά
SPB1	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης		
					Ανάντη	Κατάντη	
					Σχετικό θέση, $z/d$ ( $z=0 \rightarrow$ πυθμένας)		
					0.46		
1-R5	0.7	0.06	1	0.026	0.025	-7.2	
1-R6		0.11	1.5	0.082	0.082	0.2	
1-R7		0.17	2	0.180	0.156	-13.8	
1-R8		0.23	2.5	0.319	0.214	-33.0	

Από τους δύο παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι για τα δύο μικρότερα κυματικά σενάρια με 1-R1, 1-R2, 1-R5 και 1-R6 η επίδραση του διαπερατού ύφαλου κυματοθραύστη στην μείωση των ταχυτήτων



Οριζόντιες ταχύτητες στην ανάντη και κατάντη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη.

δείχνει να είναι πολύ μικρή έως και αμελητέα, καθώς η μέγιστη μεταβολή δεν ξεπερνάει το -8.8% (1-R1).

Αντίθετα για το σύνολο των θραυόμενων κυματισμών (1-R3, 1-R4, 1-R7 και 1-R8) η μείωση της ταχύτητας από τα ανάντη στα κατάντη φαίνεται να είναι σημαντική. Για την περίπτωση του βάθους των 0.65m, το ποσοστό της μείωσης για τα δύο κυματικά σενάρια 1-R3 και 1-R4 είναι περίπου -26%, ενώ για το βάθος των 0.7m η μείωση για τα κυματικά σενάρια 1-R7 και 1-R8 είναι περίπου -13.8% και -33% αντίστοιχα.

Παρατηρούμε από τα παραπάνω ότι ο κύριος μηχανισμός καταστροφής της κυματικής ενέργειας είναι η θραύση των κυματισμών πάνω από την στέψη του ύφαλου κυματοθραύστη. Αντίθετα οι δυνάμεις τριβής που εξασκούνται στην ροή από το πορώδες του κυματοθραύστη, για το σύνολο των μη θραυόμενων κυματισμών, φαίνεται να μην είναι σημαντικές. Όσον αφορά την επιρροή του βάθους του νερού, δεν φαίνεται να υπάρχει μια σαφής τάση στα αποτελέσματα που να επιτρέπει την εξαγωγή ενός ασφαλούς συμπεράσματος.

## 5.8.2 Φυσικό ομοίωμα SPB2

Στον Πίνακα 5.8.3 και στον Πίνακα 5.8.4 δίνονται οι οριζόντιες ταχύτητες ( $u_{rms}$ ) που υπολογίστηκαν στην ανάντη και κατάντη μεριά του φυσικού ομοιώματος SPB2, για τα τέσσερα κυματικά σενάρια που εξετάστηκαν, για τα βάθη νερού 0.65m και 0.7m αντίστοιχα.

Πίνακας 5.8.3 Οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  (m/s) στην ανάντη και κατάντη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.65m.

Οριζόντιες ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στην ανάντη και κατάντη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.65m.							Μεταβολή (%) από την ανάντη στην κατάντη πλευρά
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης		
					Ανάντη	Κατάντη	
					Σχετικό θέση, z/d (z=0→πυθμένας)		
					0.5		
	2-R1	0.65	0.06	1	0.042	0.044	3.3
	2-R2		0.11	1.5	0.123	0.087	-29.3
	2-R3		0.17	2	0.197	0.136	-30.8
	2-R4		0.23	2.5	0.339	0.192	-43.4

Πίνακας 5.8.4 Οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$  (m/s) στην ανάντη και κατάντη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.7m.

Οριζόντιες ταχύτητες $u_{rms}$ (m/s) στην ανάντη και κατάντη πλευρά του SPB2. Βάθος 0.7m.							Μεταβολή (%) από την ανάντη στην κατάντη πλευρά
SPB2	Κυματικό σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H (m)	Περίοδος T (s)	Θέση μέτρησης		
					Ανάντη	Κατάντη	
					Σχετικό θέση, z/d (z=0→πυθμένας)		
					0.46		
	2-R5	0.7	0.06	1	0.036	0.032	-9.7
	2-R6		0.11	1.5	0.112	0.080	-28.9
	2-R7		0.17	2	0.191	0.146	-23.5
	2-R8		0.23	2.5	0.334	0.163	-51.1

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

Από τα αποτελέσματα των δύο παραπάνω πινάκων παρατηρούμε σημαντικές μειώσεις των χαρακτηριστικών ταχυτήτων από την ανάντη στην κατάντη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB2 που κυμαίνονται από -23.5% (2-R7) έως και -51.1% (2-R8).

Ένα ακόμα σημαντικό αποτέλεσμα αποτελεί η μείωση των ταχυτήτων για τα κυματικά σενάρια 2-R2 και 2-R6, σε αντίθεση με τα αντίστοιχα του φυσικού ομοιώματος SPB1, όπου η μεταβολή ήταν σχεδόν μηδενική.

Αντίστοιχα με την περίπτωση του φυσικού ομοιώματος SPB1, ούτε και στην περίπτωση αυτή μπορεί να εκτιμηθεί η επιρροή του βάθους του νερού στην μεταβολή των ταχυτήτων. Η αύξηση του μήκους της στέψης κατά 62.5%, από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2, έχει ως συνέπεια την μείωση των ταχυτήτων στην κατάντη πλευρά από 13% έως 23.3% για το βάθος των 0.65m και από 2.8% έως 23.7% για το βάθος των 0.7m.

Οριζόντιες ταχύτητες στην ανάντη και κατάντη πλευρά του ύψαλου κυματοθραύστη.

## 6. Συμπεράσματα

### 6.1 Γενικά συμπεράσματα

Ο κύριος στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η εκτίμηση του υδροδυναμικού πεδίου που διαμορφώνεται στο εσωτερικό και στο εξωτερικό μέρος ενός ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη υπό την επίδραση κυματισμών. Συνολικά εξετάστηκαν δύο φυσικά ομοιώματα ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών, SPB1 και SPB2, με πλάτη στέψης 0.4m και 0.65m αντίστοιχα, τέσσερα κυματικά σενάρια μονοχρωματικών κυματισμών και δύο συνολικά βάθη νερού, 0.65m και 0.7m. Οι κυριότεροι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν οι χαρακτηριστικές οριζόντιες ταχύτητες  $u_{rms}$ , η παραγωγή αρμονικών συνιστωσών, οι μέγιστες τυρβώδεις διακυμάνσεις αλλά και η μεταβολή τους μέσα στην κυματική περίοδο, η μεταβολή των διατμητικών τάσεων Reynolds μέσα στη κυματική περίοδο, τα φάσματα της κινητικής ενέργειας και οι τυρβώδεις εντάσεις στις διάφορες θέσεις μέτρησης.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν για κάθε μοντέλο αλλά και έπειτα από μεταξύ τους συγκρίσεις είναι τα εξής:

#### 1. Χαρακτηριστικές οριζόντιες ταχύτητες $u_{rms}$

##### Φυσικό ομοίωμα SPB1

- Στο φυσικό ομοίωμα SPB1 παρατηρείται αύξηση των ταχυτήτων από το προσήνεμο στο υπήνεμο πρανές, γεγονός που πιθανόν να οφείλεται σε μια ιδιόμορφη ανακυκλοφορία της μέσης ροής αμέσως κατάντη του έργου που πιθανότατα σχετίζεται με αστοχίες που έχουν εντοπισθεί στο κατάντη πρανές του κυματοθραύστη.
- Η αύξηση του συνολικού βάθους από 0.65m σε 0.7m επιφέρει γενικά μείωση των οριζόντιων ταχυτήτων, με την πιο σημαντική να παρατηρείται στην υπήνεμη πλευρά και στη στέψη του κυματοθραύστη.
- Στην υπήνεμη πλευρά, στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις παρατηρείται απότομη αύξηση των οριζόντιων ταχυτήτων και για τα δύο βάθη νερού.
- Οι ταχύτητες στο πόρο δείχνουν να μην μεταβάλλονται σημαντικά καθώς το ύψος και η περίοδος του κύματος αυξάνεται και για τα δύο βάθη νερού.

## Γενικά συμπεράσματα

- Οι οριζόντιες ταχύτητες που μετρήθηκαν, σε κοντινή απόσταση στα ανάντη και κατόντη του SPB1, έδειξαν σημαντική μείωση των ταχυτήτων στην υπήνεμη πλευρά στην περίπτωση των θραυόμενων κυματισμών και για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν.

### Φυσικό ομοίωμα SPB2.

- Στο φυσικό ομοίωμα SPB2, αντίθετα με το SPB1, παρατηρείται μείωση των ταχυτήτων από το ανάντη στο κατόντη πρανές, γεγονός που πιθανότατα οφείλεται στην περίπτωση αυτή στην μεγαλύτερη καταστροφή ενέργειας λόγω αύξησης του πλάτους της στέψης και στην μεγαλύτερη τριβή που συναντάει η ροή διαμέσου του πορώδους.
- Η αύξηση του συνολικού βάθους επιφέρει μείωση των ταχυτήτων στο προσήνεμο πρανές, αλλά για τις υπόλοιπες θέσεις μέτρησης δεν υπάρχει σαφής τάση των αποτελεσμάτων.
- Η απότομη αύξηση των ταχυτήτων στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις που παρατηρήθηκε στο φυσικό ομοίωμα SPB1 στο κατόντη πρανές, δείχνει να έχει ομαλοποιηθεί στο SPB2, γεγονός που εκτιμάται ότι οφείλεται στην αύξηση της διατομής.
- Αντίστοιχα με το μοντέλο SPB1, και στο SPB2 οι ταχύτητες στον πόρο παρουσιάζουν μικρή μεταβολή καθώς τα κυματικά χαρακτηριστικά αυξάνουν.
- Οι οριζόντιες ταχύτητες που μετρήθηκαν, σε κοντινή απόσταση στα ανάντη και κατόντη του SPB2, έδειξαν σημαντική μείωση των ταχυτήτων στην υπήνεμη πλευρά στην περίπτωση των θραυόμενων κυματισμών και για τα δύο βάθη νερού που εξετάστηκαν. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με το μοντέλο SPB1, σημαντική μείωση εντοπίστηκε και στην περίπτωση των μη θραυόμενων κυματισμών με  $H = 0.11m$  και  $T = 1.5sec$ .

## 2. Τυρβώδεις διακυμάνσεις $u'_{max}$

### Φυσικό ομοίωμα SPB1

- Στο φυσικό ομοίωμα SPB1 παρατηρείται αύξηση των μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων από το προσήνεμο στο υπήνεμο πρανές, και στα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν, ιδίως για την περίπτωση των δύο θραυόμενων κυματικών σεναρίων.
- Οι μέγιστες τυρβώδεις διακυμάνσεις μειώνονται καθώς αυξάνεται η σχετική θέση ( $z/d$ ) στην προσήνεμη πλευρά του SPB1.
- Η αύξηση του συνολικού βάθους νερού από 0.65m σε 0.7m επιφέρει σημαντική μείωση των μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων στην στέψη και στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη.

## Τυρβώδη Μεγέθη σε Διαπερατό Ύφαλο Κυματοθραύστη

- Στην υπήνεμη πλευρά, στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις  $z/d=0.429$  και  $z/d=0.462$ , οι μέγιστες τυρβώδεις διακυμάνσεις παρουσιάζουν σημαντική αύξηση σε σχέση με τις υπόλοιπες καθ' ύψος θέσεις μέτρησης, κυρίως για την περίπτωση του μικρότερου βάθους νερού.
- Οι μέγιστες τυρβώδεις διακυμάνσεις στον πόρο του SPB1 παρουσιάζουν μικρή μεταβλητότητα καθώς τα κυματικά χαρακτηριστικά αυξάνουν ή καθώς μεταβάλλεται το συνολικό βάθος του νερού.
- Στο εσωτερικό του SPB1 στην υπήνεμη πλευρά, οι μέγιστες τυρβώδεις διακυμάνσεις λαμβάνουν την ίδια σχεδόν τιμή για κάθε ένα κυματικό σενάριο. Οι εν λόγω τιμές μειώνονται ελαφρώς (μέγιστη μείωση -16.3%) καθώς το βάθος του νερού μεταβάλλεται από 0.65m σε 0.7m.

### Φυσικό ομοίωμα SPB2

- Στο φυσικό ομοίωμα SPB2, όμοια με το SPB1, παρατηρείται αύξηση των μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων από την προσήνεμη στην υπήνεμη πλευρά, και στα δύο βάθη νερού που μελετήθηκαν.
- Η αύξηση του συνολικού βάθους νερού επιφέρει σημαντική μείωση των μέγιστων τυρβωδών διακυμάνσεων στη στέψη και στην προσήνεμη πλευρά και κάπως μικρότερη στην υπήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB2.
- Η αύξηση του πλάτους της στέψης από το φυσικό ομοίωμα SPB1 στο SPB2, επιφέρει σημαντική μείωση των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη, ενώ αντίθετα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τους στην στέψη του.
- Στο εσωτερικό του SPB2 στην υπήνεμη πλευρά, οι μέγιστες τυρβώδεις διακυμάνσεις λαμβάνουν την ίδια σχεδόν τιμή για κάθε ένα κυματικό σενάριο, συμπεριφορά παρόμοια με αυτή που παρατηρήθηκε στο μοντέλο SPB1.

### 3. Τυρβώδης ένταση $u'/U$

#### Φυσικό ομοίωμα SPB1

- Στην προσήνεμη πλευρά η τυρβώδης ένταση, στην πλειοψηφία των κυματικών σεναρίων, ακολουθεί πανομοιότυπη μεταβολή. Μεγαλύτερες τιμές, περίπου 0.4, εντοπίζονται στη μικρότερη σχετική θέση, οι οποίες μειώνονται σταδιακά καθώς η σχετική θέση αυξάνεται λαμβάνοντας τιμή κοντά στο 0.2.



## Γενικά συμπεράσματα

- Στην υπήνεμη πλευρά, στις δύο σχετικές θέσεις στο εσωτερικό του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη, η τυρβώδης ένταση είναι ελαφρώς πιο αυξημένη για την μικρότερη από τις δύο θέσεις. Η τυρβώδης ένταση στη μεγαλύτερη σχετική θέση (περίγραμμα του κυματοθραύστη) δεν παρουσιάζει σαφή τάση αφού κάποια από τα κυματικά σενάρια δείχνουν σημαντική αύξηση, ενώ τα υπόλοιπα διατηρούν πιο χαμηλές τιμές.
- Σημαντικές τυρβώδεις εντάσεις παρατηρούνται στον πόρο, με τιμές που ξεπερνούν τα 0.6 και για τα δύο βάθη νερού. Στην στέψη, όπου κυριαρχούν υψηλές ταχύτητες της μέσης ροής, οι τυρβώδεις εντάσεις είναι αισθητά μικρότερες σε σύγκριση με τις υπόλοιπες θέσεις μέτρησης, με τη μέση τιμή να κυμαίνεται περίπου στο 0.17.
- Η αύξηση του βάθους από 0.65m σε 0.7m επέφερε μείωση της τυρβώδους έντασης στην υπήνεμη πλευρά. Οι μεγαλύτερες μειώσεις εντοπίζονται στη μεγαλύτερη σχετική θέση για τα δύο κυματικά σενάρια θραυόμενων κυματισμών, όπου η μείωση φτάνει έως και στο -30.6%.
- Γενικά, παρατηρείται αύξηση της τυρβώδους έντασης από την προσήνεμη στην υπήνεμη πλευρά.

## Φυσικό ομοίωμα SPB2

- Στην προσήνεμη πλευρά, αντίστοιχα με το φυσικό ομοίωμα SPB1, οι μεγαλύτερες τυρβώδεις εντάσεις παρατηρούνται στη μικρότερη σχετική θέση με μέση τιμή περίπου στο 0.47. Η μεταβολή του βάθους από 0.65m σε 0.7m, επιφέρει μείωση των τυρβωδών εντάσεων, αλλά οι μεταβολές δεν είναι σημαντικές.
- Στην υπήνεμη πλευρά η καθ' ύψος μεταβολή της τυρβώδους έντασης είναι πανομοιότυπη για την πλειοψηφία των κυματικών σεναρίων. Οι μεγαλύτερες τιμές εντοπίζονται στη μικρότερη σχετική θέση όπου η τυρβώδης ένταση λαμβάνει μέση τιμή περίπου 0.54. Καθώς η σχετική θέση αυξάνεται, παρατηρείται μείωση της τυρβώδους έντασης, με την μέση τιμή στην ανώτερη σχετική θέση μέτρησης να είναι περίπου 0.48. Η επιρροή του βάθους δεν φαίνεται να είναι σημαντική καθώς οι μεταβολές δεν ξεπερνούν το 7.2%.
- Στον πόρο, αντίστοιχα με το φυσικό ομοίωμα SPB1, παρατηρούνται και εδώ αυξημένες τυρβώδεις εντάσεις που προσεγγίζουν την τιμή 0.6 και για τα δύο βάθη νερού. Η τυρβώδης ένταση στην στέψη εμφανίζει τιμές αρκετά μικρότερες, 0.27 και 0.23 για τα βάθη 0.65m και 0.7m αντίστοιχα. Το βάθος του νερού δεν επηρεάζει σημαντικά την τυρβώδη ένταση στις δύο παραπάνω θέσεις μέτρησης.
- Η αύξηση της στέψης από 0.4m σε 0.65m, φαίνεται να επιφέρει σημαντική αύξηση της τυρβώδους έντασης στην προσήνεμη πλευρά. Στην στέψη, για την περίπτωση των

θραυόμενων κυματισμών, οι τυρβώδεις εντάσεις αυξάνονται ενώ για τα κυματικά σενάρια των μη θραυόμενων κυματισμών παρατηρείται μείωση. Τέλος, στον πόρο παρατηρείται μείωση της τυρβώδους έντασης έπειτα από την αύξηση του πλάτους της στέψης.

#### 4. Αρμονικές συνιστώσες

- Μεγαλύτερα κυματικά χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος του κύματος) συνδέονται με την εμφάνιση περισσότερων και μεγαλύτερων σε πλάτος αρμονικών συνιστωσών. Οι αρμονικές συνιστώσες εμφανίζονται πάντα σε συχνότητες οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια της κύριας συχνότητας των κυματισμών και η δημιουργία τους οφείλεται στις μεταξύ τους μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις.
- Το πλάτος των υψηλότερων αρμονικών συνιστωσών, ως ποσοστό του πλάτους της κύριας αρμονικής συνιστώσας, δείχνει να ενισχύεται στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη σε σύγκριση με την προσήνεμη πλευρά γεγονός που εκτιμάται ότι οφείλεται στην αυξημένη μη γραμμικότητα των κυματισμών στην περιοχή αυτή.
- Μέσα στον πόρο (κεντρική διατομή) αναπτύσσονται σημαντικά αρμονικά πλάτη στις υψηλότερες αρμονικές συνιστώσες, σε όλα τα κυματικά σενάρια που εξετάστηκαν που φτάνουν ακόμα και στο 91.3% του πλάτους της κύριας συχνότητας ταλάντωσης.
- Στην στέψη το πλάτος ταλάντωσης και ο αριθμός των αρμονιών συνιστωσών της οριζόντιας ταχύτητας αυξάνεται καθώς αυξάνονται τα κυματικά χαρακτηριστικά. Το πλάτος της 2<sup>ης</sup> αρμονικής παρατηρήθηκε να προσεγγίζει μέχρι και το 85.7% του πλάτους ταλάντωσης της κύριας αρμονικής (π.χ. 2-R4).
- Στην στέψη, καθώς τα κυματικά χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος των κυματισμών) αυξάνονται το πλάτος ταλάντωσης των αρμονικών συνιστωσών της κατακόρυφης ταχύτητας γίνεται αμελητέο σε σχέση με τις οριζόντιες αρμονικές συνιστώσες.
- Το βάθος του νερού, και στα δύο φυσικά ομοιώματα που μελετήθηκαν, δείχνει να παίζει καθοριστικό ρόλο στο πλάτος της 1<sup>ης</sup> αρμονικής και κατ' επέκταση στη μεταφορά ενέργειας σε υψηλότερες αρμονικές, για την περίπτωση των κυματισμών με το μεγαλύτερο ύψος και περίοδο (θραυόμενοι κυματισμοί).
- Το αρμονικό πλάτος ταλάντωσης της 2<sup>ης</sup> και της 3<sup>ης</sup> αρμονικής της οριζόντιας ταχύτητας στη στέψη, είναι μεγαλύτερο για την περίπτωση του μικρότερου βάθους των 0.65m, και στα δύο φυσικά ομοιώματα που μελετήθηκαν.

## Γενικά συμπεράσματα

- Η καθ' ύψος μεταβολή της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας στην προσήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB1, δείχνει αύξηση του πλάτους ταλάντωσης στις μεγαλύτερες σχετικές θέσεις, η οποία γίνεται εντονότερη με την αύξηση των κυματικών χαρακτηριστικών.
- Η καθ' ύψος μεταβολή της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας στην προσήνεμη πλευρά του φυσικού ομοιώματος SPB2, δείχνει ότι το πλάτος ταλάντωσης παραμένει σχεδόν σταθερό. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν τα μεγαλύτερα κυματικά σενάρια 2-R4 και 2-R8, όπου στις σχετικές θέσεις  $z/d=0.462$  και  $z/d=0.429$  παρουσιάζουν απότομη αύξηση.
- Η 1<sup>η</sup> αρμονική συνιστώσα στη προσήνεμη πλευρά, λαμβάνει γενικά μεγαλύτερες τιμές στο φυσικό ομοίωμα SPB1 απ' ό τι στο SPB2.
- Η καθ' ύψος μεταβολή του πλάτους της 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> αρμονικής στην προσήνεμη πλευρά των φυσικών ομοιωμάτων SPB1 και SPB2 παρουσιάζει αμελητέα πλάτη ταλάντωσης για τα δύο μικρότερα κυματικά σενάρια και αυξημένα πλάτη ταλάντωσης για τα δύο μεγαλύτερα κυματικά σενάρια.
- Στην υπήνεμη πλευρά των φυσικών ομοιωμάτων SPB1 και SPB2, στις δύο μικρότερες σχετικές θέσεις (εσωτερικό του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη) το πλάτος ταλάντωσης της 1<sup>ης</sup> αρμονικής συνιστώσας της οριζόντιας ταχύτητας παραμένει σχεδόν ίδιο. Μεγαλύτερα πλάτη ταλάντωσης εμφανίζονται στο μοντέλο SPB1 σε σύγκριση με το μοντέλο SPB2.

## 5. Φάσμα κινητικής ενέργειας

- Οι μεγάλες δίνες που σχηματίζονται στο πεδίο ροής, οι οποίες συνδέονται με τις μικρότερες συχνότητες στο φάσμα ενέργειας, περιέχουν το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας.
- Ισχυρές αιχμές της ενέργειας εντοπίζονται στην κύρια συχνότητα των κυματισμών αλλά και σε αρμονικές συχνότητες λόγω μεταφοράς ενέργειας μέσω της διαδικασίας των μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων.
- Στις μετρήσεις που ελήφθησαν στην προσήνεμη και την υπήνεμη πλευρά, όπου το πορώδες υπήρχε μόνο κατά μόνο κατά την οριζόντια και εγκάρσια διεύθυνση, τα φάσματα ενέργειας έδειξαν ισότροπες συνθήκες τύρβης κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις. Αντίθετα η έλλειψη ογκολίθων κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είχε ως αποτέλεσμα μικρότερη ενέργεια των τυρβωδών διακυμάνσεων.
- Στον πόρο, όπου υπήρχε πορώδες και στην οριζόντια και στην κατακόρυφη διεύθυνση τα φάσματα ενέργειας έδειξαν παρόμοια ενέργεια στην περιοχή από την αρχή του αδραειακού υπό εύρους έως τις πολύ υψηλές συχνότητες.

- Συνδυαστικά από τα δύο προηγούμενα συμπεραίνεται ότι μέσα στο πορώδες είναι δυνατό να δημιουργηθεί τοπικά ομογενής και ισότροπη τύρβη ( $u' \approx v' \approx w'$ ).
- Το εύρος των συχνοτήτων που καλύπτει το αδρανειακό υπό εύρος παρουσιάζει σημαντική εξάρτηση από τον αριθμό Reynolds της ροής. Μικρά κυματικά χαρακτηριστικά (ύψος και περίοδος κύματος) συνδέονται με μικρό έως και ανύπαρκτο αδρανειακό υπό εύρος ενώ μεγαλύτερα κυματικά χαρακτηριστικά παρουσιάζουν ευρύ αδρανειακό υπό εύρος.
- Η κλίση του αδρανειακού υπό εύρους, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, παρουσιάζει καλή προσαρμογή με την θεωρητικά προβλεφθείσα των  $-5/3$ .

## 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Προτείνεται, για τα πειραματικά δεδομένα που συλλέχθηκαν, να συγκριθούν με διάφορα αριθμητικά μοντέλα όπως π.χ. το COBRAS (Cornell Breaking Waves and Structures) ή το αριθμητικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί από τους Metallinos και Memos (Metallinos & Memos, 2012) τα οποία είναι ικανά να προβλέψουν τις τροχιακές ταχύτητες στο εσωτερικό ύφαλων διαπερατών κυματοθραυστών για την περίπτωση μη θραυόμενων κυματισμών.

Μελλοντικά πειράματα θα μπορούσαν να διερευνήσουν την επιρροή άλλων παραμέτρων στο υδροδυναμικό πεδίο που αναπτύσσεται στο εσωτερικό και γύρω από τους ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες, όπως είναι το πλάτος της στέψης, η κλίση του προσήνεμου και του υπήνεμου πρηνούς, το πορώδες της κατασκευής αλλά και περισσότερα κυματικά χαρακτηριστικά (μονοχρωματικούς και φασματικούς κυματισμούς). Ιδιαίτερη διερεύνηση θα πρέπει να γίνει και στα φαινόμενα κλίμακας που εισάγονται σε πειραματικές μετρήσεις που αφορούν φυσικά ομοιώματα μικρής κλίμακας, όπως είναι και αυτές που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία.



- Ahrens, J., 1987. *Characteristics of reef breakwaters*, s.l.: CERC.
- Ahrens, J., 1988. *Reef breakwater response to wave attack. Berm Breakwaters*, s.l.: ASCE.
- Beji, S. & Battjes, J., 1993. Experimental investigation of wave propagation over a bar. *Coastal Engineering*, pp. 151-162.
- Beji, S. & Battjes, J., 1994. Numerical simulation of nonlinear wave propagation over a bar. *Coastal Engineering*, pp. 1-16.
- Calabrese, M., Buccino, M. & Pasanisi, F., 2008. Wave breaking macrofeatures on a submerged rubble mound breakwater. *Journal of Hydro-environment Research*.
- Cornett, A., Mansard, E. & Funke, E., 1994. *Wave transformation and load reduction using a small tandem reef breakwater-physical model tests*. New York, American Society of Civil Engineers.
- Dattari, J., Raman, H. & Shankar, N., 1979. *Performance characteristics of submerged breakwaters*. New York, American Society of Civil Engineers.
- Driscoll, A., Dalrymple, R. & Grilli, S., 1993. *Harmonic generation and transmission past a submerged rectangular obstacle*. New York, American Society of Civil Engineers.
- Heller, V., 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, pp. 293-306.
- Hudson, R. Y., 1979. *Coastal Hydraulic Models*, Vicksburg Mississippi: US Army Engineer Waterways Experiment Station.
- Hughes, S. A., 1993. *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. s.l.:World Scientific.
- Kobus, H., 1980. *Hydraulic modelling*. Hamburg: German association for water resources and land improvement..
- Kobus, H. e., 1980. *Hydraulic modelling*. Parey, Hamburg: German association for water resources and land improvement, Bulletin 7.
- Liberatore, G. & Petti, M., 1993. *Wave transformation over a submerged bar: experiments and theoretical interpretations*. New York, ASCE.
- Losada, I., Patterson, M. & Losada, M., 1997. Harmonic generation past a submerged porous step. *Coastal Engineering*, pp. 281-304.
- McCowan, J., 1891. On the solitary wave.. *Philosophical Magazine and Journal of Science*.
- Mei, C. & Unluata, U., 1972. Harmonic generation in shallow water waves. Στο: *Waves on Beaches and Resulting Sediment Transport*. s.l.:Academic Press, pp. 181-202.



- Metallinos, A. S. & Memos, C., 2012. Wave-induced kinematics inside submerged structures. *Journal of Hydraulic Research*, pp. 388-394.
- Miche, R., 1944. Breaking wave motion in water of constant water depth. *Ann. Ponts et Chaussées*, pp. 285-318.
- Munk, W., 1949. The solitary wave theory and its applications to surf problems. *New York Academy of Sciences*.
- Nikora, V. I., 1998. ADV measurements of turbulence: can we improve their interpretation?. *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 630-634.
- Novak, P. & Cabelka, J., 1981. *Models in hydraulic engineering*. Boston: Pitman.
- Petti, M. & Ruol, P., 1992. *Laboratory tests on the interaction between nonlinear long waves and submerged breakwaters*. s.l., ASCE.
- Pilarczyk, W. & Zeidler, R., 1996. *Offshore Breakwaters and Shore Evolution Control*. Rotterdam: s.n.
- Pinto, E. & Neves, A., 2003. Environmental aspects of using detached breakwaters for coastal protection purposes. *Management of Environmental Quality: An International journal*, pp. 62-71.
- Siddon, C. & Witman, 2003. Influence of chronic, low-level hydrodynamic forces on subtidal community structure. *Marine Ecology Progress Series*, pp. 99-110.
- Smith, E. & Kraus, N., 1990. *Laboratory Study on Macro-Features of Wave Breaking Over Bars and Artificial Reefs*, s.l.: CERC.
- Smith, E. & Kraus, N., 1991. Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, pp. 307-325.
- Svendsen, A., 2005. *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*. s.l.:World Scientific.
- van der Meer, J., 1991. *Stability and transmission at low-crested structures*, s.l.: Delft Hydraulic.
- Voulgaris, G. a. T. J. H., 1998. Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, pp. 272-289.
- Warnock, J., 1950. Hydraulic Similitude. *Engineering Hydraulics*, pp. 136-176.
- Yalin, M., 1971. *Theory of hydraulic models*. London: Macmillan.
- Zanuttigh, B. & Lamberti, A., 2006. Experimental analysis and numerical simulations of waves and current flows around low-crested rubble-mound structures. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, pp. 10-27.

## Κώδικες MATLAB

```

%Main programme

close all; clear all;
filename = 'bottom_30cm_front.dat';

%Import DasyLab ascii-file:
data = textread(filename, '', 'delimiter', ' ', 'headerlines', 0);
nrows = size(data,1);
ncolumns = size(data,2);
data = data(:,1:ncolumns-1);
length1 = length(data);

start = 1;

t = data(start:length1,1);
Vx = data(start:length1, 4);
Vy = data(start:length1, 5);
Vz1 = data(start:length1, 6);
Vz2 = data(start:length1, 7);

dt=t(2)-t(1); % Time step [sec]

%Wave period
T=2.5;

%%
% 3-D Phase-Space Despiking of Velocity measurements

i_plot=9;
i_opt=2;
k1=1;
k2=3;
k3=5;
[Vxf,nel1]=func_despike_phasespace3d(Vx,i_plot,i_opt,k1);
[Vyf,nel2]=func_despike_phasespace3d(Vy,i_plot,i_opt,k2);
[Vzf,nel3]=func_despike_phasespace3d(Vz1,i_plot,i_opt,k3);

%%
figure(8)
subplot(3,1,1);
plot(t,Vxf,'k');
xlabel('t (sec)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
ylabel('u (m/s)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xlim([100 110])
grid on
grid minor

```

```

title('Velocity at the leeward side of SPB2. z/d=0.462 (H=0.23m, T=2.5sec,
FB=0.15m)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'FontSize', 20)
hold on;

subplot(3,1,2)
plot(t,Vyf,'r');
xlabel('t (sec)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
ylabel('v (m/s)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xlim([100 110])
grid on
grid minor
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'FontSize', 20)
hold on;

subplot(3,1,3)
plot(t,Vzf,'b');
xlabel('t (sec)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
ylabel('w (m/s)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xlim([100 110])
grid on
grid minor
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'FontSize', 20)
hold off

%%
% FFT of Velocity measurements
[P1,P2]=amplitude_spectrum(Vxf,Vyf,Vzf,length1);
%%
% Phase average of velocity record (one period)
[phase_avg_x]=phase_average(Vxf,length1);
[phase_avg_y]=phase_average(Vyf,length1);
[phase_avg_z]=phase_average(Vzf,length1);
%plot(t(1:T/dt),phase_avg_x,'k');
%plot(t(1:T/dt),phase_avg_x,'k');

%Phase average of velocity record (whole length of the record)
[phase_avg_x_whole,j,n]=phase_avg_hole(phase_avg_x,length1,T,dt);
[phase_avg_y_whole,j,n]=phase_avg_hole(phase_avg_y,length1,T,dt);
[phase_avg_z_whole,j,n]=phase_avg_hole(phase_avg_z,length1,T,dt);
%plot(t,phase_avg_x_whole,'k');
%plot(t,phase_avg_z_whole,'k');

%%
%fluctuations of the velocity record
[ufluct]=velocity_fluctuations(phase_avg_x_whole,Vxf,length1);
[vfluct]=velocity_fluctuations(phase_avg_y_whole,Vyf,length1);
[wfluct]=velocity_fluctuations(phase_avg_z_whole,Vzf,length1);

figure(9)
subplot(3,1,1);
plot(t,ufluct,'k');
xlabel('t (sec)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
ylabel('u' (m/s)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xlim([100 110])
grid on
grid minor

```

```

title('Turbulent fluctuations at the leeward side of SPB2. z/d=0.462
(H=0.23m, T=2.5sec, FB=0.15m)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'FontSize', 20)
hold on;

subplot(3,1,2);
plot(t,vfluct, 'r');
xlabel('t (sec)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
ylabel('v' (m/s)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xlim([100 110])
grid on
grid minor
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'FontSize', 20)
hold on

subplot(3,1,3)
plot(t,wfluct, 'b');
xlabel('t (sec)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
ylabel('w' (m/s)', 'interpreter', 'latex', 'FontSize', 20);
xlim([100 110])
grid on
grid minor
xt = get(gca, 'XTick');
set(gca, 'FontSize', 20)
hold off
%%
%Phase-averaged turbulent fluctuations
[turb_int_x]=turbulence_intensity(ufluct,length1,T);
[turb_int_y]=turbulence_intensity(vfluct,length1,T);
[turb_int_z]=turbulence_intensity(wfluct,length1,T);

tix_mean=mean(turb_int_x);
tix_max=max(turb_int_x);
tiy_mean=mean(turb_int_y);
tiy_max=max(turb_int_y);
tiz_mean=mean(turb_int_z);
tiz_max=max(turb_int_z);

%3-D Turbulence intensity
TIpore=sqrt((1/3)*(rms(ufluct)^2+rms(vfluct)^2+0.9575*rms(ufluct)^2))/sqrt(
rms(Vxf)^2+rms(Vyf)^2+rms(Vzf)^2)
TIout=sqrt((1/3)*(rms(ufluct)^2+rms(vfluct)^2+rms(wfluct)^2))/sqrt(rms(Vxf)
^2+rms(Vyf)^2+rms(Vzf)^2)

%%
%Phase-averaged Reynolds stresses
[reynolds_stress_uw]=reynolds_stresses(ufluct,wfluct,length1,T);
[reynolds_stress_uv]=reynolds_stresses(ufluct,vfluct,length1,T);
[reynolds_stress_vw]=reynolds_stresses(vfluct,wfluct,length1,T);

%%
%Rms velocities
urms=sqrt((1/length1)*sum(Vxf.^2));
vrms=sqrt((1/length1)*sum(Vyf.^2));
wrms=sqrt((1/length1)*sum(Vzf.^2));

```

---

```

function [fo, ip] = func_despike_phasespace3d( fi, i_plot, i_opt, kk, t1);
=====
%
% Version 1.2
%
% This subroutine excludes spike noise from Acoustic Doppler
% Velocimetry (ADV) data using phase-space method, using
% modified Goring and Nikora (2002) method by Nobuhito Mori (2005).
% Further modified by Joseph Ulanowski to remove offset in output (2014).
%
=====
%
% Input
%   fi      : input data with dimension (n,1)
%   i_plot  : =9 plot results (optional)
%   i_opt   : = 0 or not specified ; return spike noise as NaN
%             = 1                   ; remove spike noise and variable becomes
shorter than input length
%             = 2                   ; interpolate NaN using cubic polynomial
%
% Output
%   fo      : output (filtered) data
%   ip      : excluded array element number in fi
%
% Example:
%   [fo, ip] = func_despike_phasespace3d( fi, 9 );
%   or
%   [fo, ip] = func_despike_phasespace3d( fi, 9, 2 );
%
%
=====
% Terms:
%
%   Distributed under the terms of the terms of the BSD License
%
% Copyright:
%
%   Nobuhito Mori
%   Disaster Prevention Research Institute
%   Kyoto University
%   mori@oceanwave.jp
%
=====
%
% Update:
%   1.2      2014/03/18 Offset removed for non-zero mean data [J.U.]
%   1.11     2009/06/09 Interpolation has been added.
%   1.01     2009/06/09 Minor bug fixed
%   1.00     2005/01/12 Nobuhito Mori
%
=====

nvar = nargin;
if nvar==1
    i_opt = 0;
    i_plot = 0;
elseif nvar==2
    i_opt = 0;
end

%

```

```

% --- initial setup
%

% number of maximum iteration
n_iter = 20;
n_out  = 999;

n      = size(fi,1);
f_mean = 0;      % do not calculate f_mean here, as it will be affected by
spikes (was: f_mean = nanmean(fi);)
f      = fi;     % this offset subtraction is unnecessary now (was: f = fi -
f_mean;)
lambda = sqrt(2*log(n));

if nargin==1
    i_plot = 0;
end

%
% --- loop
%

n_loop = 1;

while (n_out~=0) & (n_loop <= n_iter)

%
% --- main
%

% step 0
f_mean=f_mean+nanmean(f); % accumulate offset value at each step [J.U.]
f = f - nanmean(f);
%nanstd(f)

% step 1: first and second derivatives
f_t = gradient(f);
f_tt = gradient(f_t);

% step 2: estimate angle between f and f_tt axis
if n_loop==1
    theta = atan2( sum(f.*f_tt), sum(f.^2) );
end

% step 3: checking outlier in the 3D phase space
[xp,yp,zp,ip,coef] = func_excludeoutlier_ellipsoid3d(f,f_t,f_tt,theta);

%
% --- excluding data
%

n_nan_1 = size(find(isnan(f)==1),1);
f(ip)   = NaN;
n_nan_2 = size(find(isnan(f)==1),1);
n_out   = n_nan_2 - n_nan_1;

%
% --- end of loop
%

```



```

n_loop = n_loop + 1;

end

%
% --- post process
%

go = f + f_mean; % add offset back
ip = find(isnan(go));

if n_loop < n_iter
    disp(...
        ['>> Number of outlier = ', num2str(size(find(isnan(f)==1),1)), ...
        ' : Number of iteration = ', num2str(n_loop-1)] ...
    )
else
    disp(...
        ['>> Number of outlier = ', num2str(size(find(isnan(f)==1),1)), ...
        ' : Number of iteration = ', num2str(n_loop-1), ' !!! exceed maximum
value !!!'] ...
    )
end

%
% --- interpolation or shorten NaN data
%

if abs(i_opt) >= 1
    % remove NaN from data
    inan = find(~isnan(go));
    fo = go(inan);
    % interpolate NaN data
    if abs(i_opt) == 2
        x = find(~isnan(go));
        y = go(x);
        xi = 1:max(length(fi));
        fo = interp1(x, y, xi, 'cubic');
    end
else
    % output despiked value as NaN
    fo = go;
end

%
% --- for check and plot
%

if i_plot == 9

%theta/pi*180
F = fi - f_mean;
F_t = gradient(F);
F_tt = gradient(F_t);
RF = [ cos(theta) 0 sin(theta); 0 1 0 ; -sin(theta) 0 cos(theta)];
RB = [ cos(theta) 0 -sin(theta); 0 1 0 ; sin(theta) 0 cos(theta)];

% making ellipsoid data
a = coef(1);

```

```

b = coef(2);
c = coef(3);
ne = 32;
dt = 2*pi/ne;
dp = pi/ne;
t = 0:dt:2*pi;
p = 0:dp:pi;
n_t = max(size(t));
n_p = max(size(p));

% making ellipsoid
for it = 1:n_t
    for is = 1:n_p
        xe(n_p*(it-1)+is) = a*sin(p(is))*cos(t(it));
        ye(n_p*(it-1)+is) = b*sin(p(is))*sin(t(it));
        ze(n_p*(it-1)+is) = c*cos(p(is));
    end
end
xer = xe*RB(1,1) + ye*RB(1,2) + ze*RB(1,3);
yer = xe*RB(2,1) + ye*RB(2,2) + ze*RB(2,3);
zer = xe*RB(3,1) + ye*RB(3,2) + ze*RB(3,3);

% plot figures
figure(kk+1);clf
plot3(f,f_t,f_tt,'b*','MarkerSize',3)
hold on
    plot3(F(ip),F_t(ip),F_tt(ip),'ro','MarkerFaceColor','r','MarkerSize',5)
    plot3(xer,yer,zer,'k-');
hold off
axis equal
grid on
xlabel('u');
ylabel('\Delta u');
zlabel('\Delta^2 u');

figure(kk+2);clf
plot(fi,'k-');
hold on
plot(ip,fi(ip),'ro');
if i_opt==2
    plot(fo,'r-');
end
hold off
%pause

end



---



function[xp,yp,zp,ip,coef]=func_excludeoutlier_ellipsoid3d(xi,yi,zi,theta);
=====
%
%
% Version 1.01
%
% This program excludes the points outside of ellipsoid in two-
% dimensional domain
%
% Input

```

```

% xi : input x data
% yi : input y data
% zi : input z data
% theta : angle between xi and zi
%
% Output
% xp : excluded x data
% yp : excluded y data
% zp : excluded y data
% ip : excluded array element number in xi and yi
% coef : coefficients for ellipsoid
%
% Example:
% [xp,yp,zp,ip,coef] = func_excludeoutlier_ellipsoid3d(f,f_t,f_tt,theta);
%
%=====
% Terms:
%
%     Distributed under the terms of the terms of the BSD License
%
% Copyright:
%
%     Nobuhito Mori, Kyoto University
%
%=====
%
% Update:
%     1.01     2009/06/09 Nobuhito Mori
%     1.00     2005/01/12 Nobuhito Mori
%
%=====

%
% --- initial setup
%
n = max(size(xi));
lambda = sqrt(2*log(n));

xp = [];
yp = [];
zp = [];
ip = [];

%
% --- rotate data
%
%theta = atan2( sum(xi.*zi), sum(xi.^2) );

if theta == 0
    X = xi;
    Y = yi;
    Z = zi;
else
    R = [ cos(theta) 0 sin(theta); 0 1 0 ; -sin(theta) 0 cos(theta)];
    X = xi*R(1,1) + yi*R(1,2) + zi*R(1,3);
    Y = xi*R(2,1) + yi*R(2,2) + zi*R(2,3);
    Z = xi*R(3,1) + yi*R(3,2) + zi*R(3,3);

```

```

end

%test
%plot3(xi,yi,zi,'b*')
%hold on
% plot3(X,Y,Z,'r*')
%hold off
%pause

%
% --- preprocess
%

a = lambda*nanstd(X);
b = lambda*nanstd(Y);
c = lambda*nanstd(Z);

%
% --- main
%

m = 0;
for i=1:n
    x1 = X(i);
    y1 = Y(i);
    z1 = Z(i);
    % point on the ellipsoid
    x2 = a*b*c*x1/sqrt((a*c*y1)^2+b^2*(c^2*x1^2+a^2*z1^2));
    y2 = a*b*c*y1/sqrt((a*c*y1)^2+b^2*(c^2*x1^2+a^2*z1^2));
    zt = c^2*( 1 - (x2/a)^2 - (y2/b)^2 );
    if z1 < 0
        z2 = -sqrt(zt);
    elseif z1 > 0
        z2 = sqrt(zt);
    else
        z2 = 0;
    end

    % check outlier from ellipsoid
    dis = (x2^2+y2^2+z2^2) - (x1^2+y1^2+z1^2);
    if dis < 0
        m = m + 1;
        ip(m) = i;
        xp(m) = xi(i);
        yp(m) = yi(i);
        zp(m) = zi(i);
    end
end

coef(1) = a;
coef(2) = b;
coef(3) = c;

```

---

```

function [ phase_avg ] = phase_average( V,length1)

```

```

%Phase averaging of velocity records

```

```

T=2.5;
dt=0.005; %sampling rate
phase_avg=zeros(T/dt,1);
for j=0:1:T/dt-1
    sum=0;
    it=0;
    for i=1:T/dt:length1
        k=i+j;
        if k>=length1
            break
        else
            sum=sum+V(k);
            it=it+1;
        end
    end
    phase_avg(j+1,1)=sum/it;
end
end

```

---

```

function [ Vph,j,n] = phase_avg_hole(V,length1,T,dt)

%Phase-averaged velocity extended to the whole velocity record

j=0;
n=0;
while j<=length1
    j=j+1
    if n==0
        for k=1:1:T/dt
            Vph(k,1)=V(k,1);
            if k<T/dt
                j=j+1;
            end
        end
        n=n+1;
    elseif n*(T/dt)<j && j<=(n+1)*(T/dt) && j<=length1
        for k=1:1:T/dt
            if j<=length1
                Vph(n*(T/dt)+k,1)=V(k,1);
                if k<T/dt
                    j=j+1;
                end
            end
        end
        n=n+1;
    else
        break
    end
end

end

```

---

```

function [ Vfluct ] = velocity_fluctuations( Vpa,V,length1 )
%Computation of the velocity fluctuations of the wave record

Vfluct=zeros(length1,1);
for i=1:1:length1

```

```

    Vfluct(i,1)=V(i,1)-Vpa(i,1);
end
end

```

---

```

function [ turb_int ] = turbulence_intensity( ufluct,length1,T)
% Phase-averaged turbulent fluctuations, sqrt(u'^2/N)

dt=0.005; %sampling rate
turb_int=zeros(T/dt,1);
for j=0:1:T/dt-1
    sum=0;
    it=0;
    for i=1:T/dt:length1
        k=i+j;
        if k>=length1
            break
        else
            sum=sum+(ufluct(k)^2);
            it=it+1;
        end
    end
    turb_int(j+1,1)=sqrt(sum/it);
end
end

```

---

```

function [ reynolds_stress ] = reynolds_stresses( ufluct,wfluct,length1,T )
%Phase-averaged Reynolds shear stresses

dt=0.005; %sampling rate
reynolds_stress=zeros(T/dt,1);
for j=0:1:T/dt-1
    sum=0;
    it=0;
    for i=1:T/dt:length1
        k=i+j;
        if k>=length1
            break
        else
            sum=sum+(ufluct(k)*wfluct(k));
            it=it+1;
        end
    end
    reynolds_stress(j+1,1)=-sum/it;
end
end

```

---

```

function [ P1x,P2 ] = amplitude_spectrum( Vxf,Vyf,Vzf,length1)
% Computation of the amplitude spectrum
%Vxf (horizontal velocity)

```



```

Fs=200;
T=1/Fs;
Y1=fft(Vxf);
P2=abs(Y1/length1);
P1x=P2(1:length1/2+1);
P1x(2:end-1)=2*P1x(2:end-1);
f=Fs*(0:(length1/2))/length1;

```

```

%Vyf (transverse velocity)
Fs=200;
T=1/Fs;
Y1=fft(Vyf);
P2=abs(Y1/length1);
P1y=P2(1:length1/2+1);
P1y(2:end-1)=2*P1y(2:end-1);
f=Fs*(0:(length1/2))/length1;

```

```

%Vzf (vertical velocity)
Fs=200;
T=1/Fs;
Y2=fft(Vzf);
P2=abs(Y2/length1);
P1z=P2(1:length1/2+1);
P1z(2:end-1)=2*P1z(2:end-1);
f=Fs*(0:(length1/2))/length1;

```

---

```

% Script to calculate velocity power spectrum
%
clear wlv
fignr=1;
nloc=1;
dt=0.005; %sampling rate
%-----
time =t;
wlvu = Vxf;
wlvu(wlvu==--99)=NaN;
smooth=20;
%-----
clear data P F dof out
data=wlvu(:,1);
nlenu=length(data);
if mod(nlenu,2) == 1
    nlenu=nlenu-1;
end
[Pu,Fu,dofu]=croschk(data(1:nlenu),data(1:nlenu),nlenu,smooth,dt,2,1);
Eu(:,1) = real(Pu(:,1));
fu= Fu;
dofu = dof;
x53=[10^-3,100]; % -5/3 slope
y53=[166.665,10^-7]; % -5/3 slope
figure(50)
P1=loglog(fu,Eu,'k');
hold on
loglog(x53,y53);
hold off
title('_____')
xlabel('f (Hz)')
ylabel('E (m^2/s^2*Hz)')
grid on

```

---

```

function [P,F,dof]=croschk(X,Y,N,M,DT,DW,stats);

% CROSKG   Power cross-spectrum computation, with smoothing in the
%          frequency domain
%
% Usage: [P,F]=CROSKG(X,Y,N,M,DT,DW,stats)
%
% Input:
% X   contains the data of series 1
% Y   contains the data of series 2
% N   is the number of samples per data segment (power of 2)
% M   is the number of frequency bins over which is smoothed (optional),
%     no smoothing for M=1 (default)
% DT  is the time step (optional), default DT=1
% DW  is the data window type (optional): DW = 1 for Hann window (default)
%     DW = 2 for rectangular window
% stats : display resolution, degrees of freedom (optimal, YES=1, NO=0)
%
% Output:
% P contains the (cross-)spectral estimates: column 1 = Pxx, 2 = Pyy, 3 =
Pxy
% F contains the frequencies at which P is given
% Gert Klopman, Delft Hydraulics, 1995

if nargin < 4,
    M = 1;
end;

if nargin < 5,
    DT = 1;
end;

if nargin < 6,
    DW = 1;
end;

if nargin < 7,
    stats = 1;
end;

df = 1 / (N * DT) ;

% data window

w = [];
if DW == 1,
    % Hann
    w = hanning(N);
    dj = N/2;
else,
    % rectangle
    w = ones(N,1);
    dj = N;
end;
varw = sum (w.^2) / N ;

```

```

% summation over segments

nx    = max(size(X));
ny    = max(size(Y));
avgx  = sum(X) / nx;
avgy  = sum(Y) / ny;
px    = zeros(size(w));
py    = zeros(size(w));
Pxx   = zeros(size(w));
Pxy   = zeros(size(w));
Pyy   = zeros(size(w));
ns    = 0;

for j=[1:dj:nx-N+1],

    ns = ns + 1;

    % compute FFT of signals

    px = X([j:j+N-1]') - avgx;
    px = w .* px ;
    px = fft(px) ;

    py = Y([j:j+N-1]') - avgy;
    py = w .* py ;
    py = fft(py) ;

    % compute periodogram

    Pxx = Pxx + px .* conj(px) ;
    Pyy = Pyy + py .* conj(py) ;
    Pxy = Pxy + py .* conj(px) ;

end;

Pxx = (2 / (ns * (N^2) * varw * df)) * Pxx ;
Pyy = (2 / (ns * (N^2) * varw * df)) * Pyy ;
Pxy = (2 / (ns * (N^2) * varw * df)) * Pxy ;

% smoothing

if M>1,
    w = [];
    w = hamming(M);
    w = w / sum(w);
    w = [w(ceil((M+1)/2):M); zeros(N-M,1); w(1:ceil((M+1)/2)-1)];
    w = fft(w);
    Pxx = fft(Pxx);
    Pyy = fft(Pyy);
    Pxy = fft(Pxy);
    Pxx = ifft(w .* Pxx);
    Pyy = ifft(w .* Pyy);
    Pxy = ifft(w .* Pxy);
end;

Pxx = Pxx(1:N/2);
Pyy = Pyy(1:N/2);
Pxy = Pxy(1:N/2);

```

```

% frequencies

F = [];
F = ([1:1:N/2]' - 1) * df;

% signal variance

if DW == 1,
    nn = (ns + 1) * N / 2;
else,
    nn = ns * N;
end;
avgx = sum (X(1:nn)) / nn;
varx = sum ((X(1:nn) - avgx).^2) / (nn - 1);
avgy = sum (Y(1:nn)) / nn;
vary = sum ((Y(1:nn) - avgy).^2) / (nn - 1);
covxy = sum ((X(1:nn) - avgx) .* (Y(1:nn) - avgy)) / (nn - 1);

m0xx = (0.5 * Pxx(1) + sum(Pxx(2:N/2-1)) + 0.5 * Pxx(N/2)) * df;
m0yy = (0.5 * Pyy(1) + sum(Pyy(2:N/2-1)) + 0.5 * Pyy(N/2)) * df;
m0xy = (0.5 * Pxy(1) + sum(Pxy(2:N/2-1)) + 0.5 * Pxy(N/2)) * df;

%disp(['m0x / varx = ' num2str(m0xx./varx) ' ; m0y / vary = '
num2str(m0yy./vary) ' ; m0xy / varxy = ' num2str(real(m0xy)./covxy) ' '])

Pxx = Pxx * (varx / m0xx);
Pyy = Pyy * (vary / m0yy);
Pxy = Pxy * (covxy / real(m0xy));

P = [Pxx, Pyy, Pxy];

% output spectrum characteristics
dof = floor(2*ns*(M+1)/2/(3-DW));
if stats == 1
    fprintf('number of samples used : %8.0f\n', nn);
    fprintf('degrees of freedom      : %8.0f\n', floor(2*ns*(M+1)/2/(3-DW)));
    fprintf('resolution                    : %13.5f\n', (3-DW)*df*(M+1)/2);
end
%
```