



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

Διερεύνηση τυρβωδών πιέσεων και συντελεστή κυματικής
μετάδοσης σε ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη

Ιωάννης Ρούπας



«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Αθήνα, Οκτώβριος 2018

Επιβλέπων: Κων. Μέμος, Ομότιμος Καθ. Ε.Μ.Π



Φοιτητής: Ιωάννης Ρούπας

**Διερεύνηση τυρβωδών πιέσεων και
συντελεστή κυματικής μετάδοσης σε
ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη**

Μεταπτυχιακή Εργασία, Οκτώβριος 2018



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Φοιτητής: Ιωάννης Ρούπας

**Διερεύνηση τυρβωδών πιέσεων και
συντελεστή κυματικής μετάδοσης σε
ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη**

Μεταπτυχιακή Εργασία, Οκτώβριος 2018

Διερεύνηση τυρβωδών πιέσεων και συντελεστή κυματικής μετάδοσης σε ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη, Διερεύνηση τυρβωδών πιέσεων και συντελεστή κυματικής μετάδοσης σε ύφαλο διαπερατό κυματοθραύστη

Φοιτητής:

Φοιτητής: Ιωάννης Ρούπας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Μέμος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Διεπιστημονικό -Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

15780, Αθήνα

devel.postgra.hydro.ntua.gr

Τηλ: (+30) 210 772 2325

Φάξ: (+30) 210 772 2847

E-mail: postgrad@hydro.ntua.gr

Ημερομηνία Παράδοσης: 26/10/2018

Σχόλια:

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία είναι προαπαιτούμενο για τη συμπλήρωση των 90 ECTS και επομένως για την ολοκλήρωση του Δια-τμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", στο οποίο συμμετείχα ως φοιτητής της Γ' Ροής με τίτλο "Διαχείριση Παράκτιας Ζώνης".

Συγγραφέας:

Ιωάννης Ρούπας, 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον Ομότιμο Καθηγητή του Ε.Μ.Π. κ. Κωνσταντίνο Μέμο, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να συμμετέχω στα πειράματα που σχεδίασε ο Μεταπτυχιακός φοιτητής Νικόλαος Διπλαράκος και ο υποψήφιος Διδάκτορας Ελπιδοφόρος Ρεπούσης, και πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδραυλικής Μηχανικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου του Ντελφτ της Ολλανδίας. Επίσης, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τη συνολική καθοδήγηση και υποστήριξη σε διάφορες φάσεις της ακαδημαϊκής μου ζωής στο Ε.Μ.Π., αλλά και για τις καθοριστικές γνώσεις και συμβουλές που μοιράστηκε μαζί μου τόσο για την εκπόνηση της παρούσας εργασία όσο και γενικότερα επιστημονικά και όχι μόνο θέματα.

Επίσης, θα ήθελαν αν ευχαριστήσω τον Νικόλαο Διπλαράκο για την βοήθειά του και τις ιδέες του στο αρχικό στάδιο της εργασίας μου, τον υποψήφιο Διδάκτορα Αθανάσιο Ζήρο για τη βοήθεια και τις συμβουλές του στο σχεδιασμό και την πραγματοποίηση των πειραμάτων στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του Ε.Μ.Π., καθώς και την υποψήφια Διδάκτορα Δήμητρα Μαλλιούρη για την πολύτιμη βοήθειά της σε τεχνικά θέματα τους Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων και την καθοδήγησή της στον τρόπο χρήσης των μηχανημάτων του εργαστηρίου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Μονάδα	Ορισμός
ρ	ML^{-3}	Πυκνότητα του νερού
T	T	Περίοδος κύματος
f	T^{-1}	Συχνότητα κύματος
H_i	L	Ύψος κύματος στην προσήνεμη θέση
H_t	L	Ύψος κύματος μεταδιδόμενο στην υπήνεμη θέση
Kt	-	Συντελεστής μετάδοσης
n	-	Πορώδες καρασκευής
L_i	L	Μήκος κύματος
$\eta(x, t)$	L	Ανύψωση Μέσης Στάθμης
$u(x, z, t)$	LT^{-1}	Οριζόντια τροχιακή ταχύτητα
$w(x, z, t)$	LT^{-1}	Κατακόρυφη τροχιακή ταχύτητα
$p(x, z, t)$	$ML^{-1}T^{-2}$	Συνολική πίεση
$p_0(z)$	$ML^{-1}T^{-2}$	Υδροστατική πίεση
$p^+(x, z, t)$	$ML^{-1}T^{-2}$	Υδροδυναμική πίεση
\bar{p}	$ML^{-1}T^{-2}$	Μέση Υδροδυναμική πίεση
p'	$ML^{-1}T^{-2}$	Τυρβώδεις/Τυχαίες Διακυμάνσεις Υδροστατικής πίεσης
\bar{u}	LT^{-1}	Μέση τροχιακή ταχύτητα
u'	LT^{-1}	Τυρβώδεις/Τυχαίες Διακυμάνσεις τροχιακής ταχύτητας

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	iii
Περιεχόμενα	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vi
EXTENDED ABSTRACT	viii
Introduction	viii
Experimental Setup	viii
Experimental setup at LoFM of TU Delft	ix
Experimental setup at LoHW of NTUA	x
Analysis of the experimental data	xi
Savitzky-Golay FIR smoothing filter	xi
Analysis of dynamic pressure	xii
Analysis of water elevation data	xiii
Results of dynamic pressure data analysis	xiii
Results of water elevation data analysis	xv
Acknowledgements	xvii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Συνοπτική παρουσίαση της υπάρχουσας σχετικής γνώσης	4
1.2 Μεθοδολογία	5
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο	6
2.1 Ύφαλοι κυματοθραύστες	6
2.2 Τροποποίηση κυματισμών λόγω αλληλεπίδρασης με φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο	8
2.3 Κινηματικά χαρακτηριστικά και πεδίο πίεσης υπό οδεύον κύμα	10
2.4 Γενικές ιδιότητες της Τύρβης	11
2.5 Νόμος Kolmogorov - Energy cascade	12
3 Πειραματικές Διατάξεις	15
3.1 Πειραματική διάταξη <i>Laboratory of Fluid Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geoscience</i>	16
3.2 Πειραματική διάταξη <i>Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο</i>	21
3.3 Κλίμακες Ομοιότητας φυσικών ομοιωμάτων	26
4 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων	29
4.1 Φίλτρο Savitzky-Golay	29
4.2 Στατιστική επεξεργασία πιέσεων	33

4.3	Επεξεργασία Δεδομένων ανύψωσης ($\eta(t)$) -Zero up-crossing	35
5	Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων	37
5.1	Μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m	37
5.1.1	Κυματικό σενάριο 1-R1 (H=0.06m, T=1.0sec)	37
5.1.2	Κυματικό σενάριο 1-R2 (H=0.11m, T=1.5sec)	41
5.1.3	Κυματικό σενάριο 1-R3 (H=0.17m, T=2.0 sec)	44
5.1.4	Κυματικό σενάριο 1-R4 (H=0.23m, T=2.5sec)	47
5.2	Μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.70m	51
5.2.1	Κυματικό σενάριο 1-R5 (H=0.06m, T=1.0sec)	51
5.2.2	Κυματικό σενάριο 1-R6 (H=0.11m, T=1.5sec)	54
5.2.3	Κυματικό σενάριο 1-R7 (H=0.17m, T=2.0sec)	58
5.2.4	Κυματικό σενάριο 1-R8 (H=0.23m, T=2.5sec)	62
5.3	Μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m	65
5.3.1	Κυματικό σενάριο 2-R1 (H=0.06m, T=1.0sec)	65
5.3.2	Κυματικό σενάριο 2-R2 (H=0.11m, T=1.5sec)	68
5.3.3	Κυματικό σενάριο 2-R3 (H=0.17m, T=2.0sec)	72
5.3.4	Κυματικό σενάριο 2-R4 (H=0.23m, T=2.5sec)	75
5.4	Μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.70m	79
5.4.1	Κυματικό σενάριο 2-R5 (H=0.06m, T=1.0sec)	79
5.4.2	Κυματικό σενάριο 2-R6 (H=0.11m, T=1.5sec)	82
5.4.3	Κυματικό σενάριο 2-R7 (H=0.17m, T=2.0sec)	86
5.4.4	Κυματικό σενάριο 2-R8 (H=0.23m, T=2.5sec)	89
5.5	Συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα	93
5.5.1	Μέση και Μέγιστη Δυναμική Πίεση	93
5.5.2	Μέση και Μέγιστη Τυρβώδης Ένταση Πιέσεων	95
5.5.3	Προφίλ αρμονικών συνιστωσών πίεσης	98
6	Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης	101
6.1	Μοντέλο SPB1, (d=0.65-0.70m)	101
6.2	Μοντέλο SPB2, (d=0.65-0.70m)	102
6.3	Σύγκριση φυσικών ομοιωμάτων SPB1 και SPB2	103
6.4	Μοντέλο SPB3, (d=0.55-0.60m)	104
6.5	Μοντέλο SPB4, (d=0.50-0.60m)	106
6.5.1	Ελεύθερο ύψος (Free Board) ίσο με 10 cm	106
6.5.2	Ελεύθερο ύψος (Free Board) ίσο με 20 cm	108
6.5.3	Αποδοτικότητα μοντέλου SPB4 χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη του	109
6.5.4	Αποδοτικότητα μοντέλου SPB4 με ποσειδωνίες στην στέψη του	111
6.6	Σύγκριση φυσικών ομοιωμάτων SPB3 και SPB4	113
6.7	Σύγκριση αποτελεσμάτων με εμπειρικό τύπο (Σαλμίδης, 2015)	116
7	Συμπεράσματα - Προτάσεις	122
7.1	Συμπεράσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων	122
7.2	Συμπεράσματα από ανάλυση χρονοσειρών ανυψώσεων	123
7.3	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	124
	Βιβλιογραφία	125

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, λόγω της κλιματικής αλλαγής, σε συνδυασμό με την έντονη οικιστική και τουριστική ανάπτυξη των παράκτιων περιοχών της Μεσογείου, έχουν ως αποτέλεσμα την άσκηση σημαντικών πιέσεων στις παράκτιες ζώνες, με αποτέλεσμα τη διάβρωση των ακτών τους, αλλά και τη γενικότερη περιβαλλοντική υποβάθμισή τους. Η σημαντική, όμως, περιβαλλοντική και οικονομική τους σημασία επιβάλλει την ανάληψη μέτρων που θα εξυπηρετούν και τους δύο αυτούς σκοπούς, δηλαδή θα προστατεύουν τις ακτές από το έντονο κυματικό πεδίο, αλλά και θα προστατεύουν ή θα αναβαθμίζουν αν είναι δυνατόν το θαλάσσιο οικοσύστημα.

Σε αυτή την εργασία ερευνάται, ως λύση στο πρόβλημα που περιγράφηκε παραπάνω, η κατασκευή βυθισμένων διαπερατών κυματοθραυστών μεγάλου πορώδους, από μηχανικής απόψεως, αν δηλαδή επιτελούν αποτελεσματικά τον σκοπό τους να απομειώνουν την κυματική ενέργεια, ενώ, επίσης, στοχεύει να προσφέρει χρήσιμες πληροφορίες στους θαλάσσιους βιολόγους για τη διακύμανση της δυναμικής πίεσης και της τύρβης της πίεσης στο εσωτερικό των πόρων της κατασκευής, που αποτελεί σημαντική παράμετρο για την προσέλευση, ή μη, θαλάσσιων οργανισμών εντός της κατασκευής. Επίσης, επιλέχθηκε να μελετηθεί και η περίπτωση διαπερατών κυματοθραυστών με τοποθετημένη Μεσογειακή Ποσειδωνία στη στέψη τους, το όποιο μπορεί να εξυπηρετεί ταυτόχρονα και τους δύο σκοπούς, αυξάνοντας την αποτελεσματικότητά της και ταυτόχρονα μετατρέποντας τον κυματοθραύστη σε ένα τεχνητό οικότοπο.

Γι' αυτό το σκοπό, σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν εκτενείς μετρήσεις σε φυσικά ομοιώματα βυθισμένων κυματοθραυστών. Τα εργαστηριακά πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δύο φάσεις, αρχικά στο *Laboratory of Fluid Mechanics of Civil Engineering and Geoscience* στο *Delft University of Technology* και στη συνέχεια στο *Εργαστήριο Λιμενικών Έργων* του *Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*. Κατασκευάστηκαν συνολικά τέσσερις διαπερατοί ύφαλοι κυματοθραύστες (Submerged Permeable Breakwater, SPB) τραπεζοειδούς διατομής (SPB1 - SPB2 - SPB3 - SPB4), με πορώδες $n = 0.40 \sim 0.45$, κλίση πρανών 1/1.5 και ύψος μοντέλου 0.40 ~ 0.50 m, και ερευνήθηκαν για διάφορα ύψη της υδάτινης στήλης, και επομένως για διαφορετικές περιπτώσεις ελεύθερου ύψους (Free Board), με σκοπό να συλλεχθεί πολύτιμη πληροφορία για ποικιλία υδροδυναμικών συνθηκών. Τα κύματα που εφαρμόστηκαν ήταν τόσο μονοχρωματικά (regular waves) όσο και φασματικά (irregular waves), και γενικά εφαρμόστηκαν για ύψη κύματος $Hi \approx 0.03 \sim 0.23m$ και περιόδους $T \approx 1.0 \sim 2.5sec$, αλλά στα πλαίσια αυτής της εργασίας μελετήθηκαν μόνο οι μονοχρωματικοί κυματισμοί.

Όσον αφορά την επεξεργασία των χρονοσειρών των πιέσεων, στόχος ήταν αφενός να αποτυπωθεί η διακύμανσή της και αφετέρου να εντοπιστούν και να αναλυθούν στατιστικά οι τυχαίες/τυρβώδεις διακυμάνσεις της ($p' = p - \bar{p}$, Reynolds decomposition). Για να αφαιρεθεί ο θόρυβος του οργάνου από τις μετρήσεις εφαρμόστηκε ένα low-pass φίλτρο, γνωστό ως Savitzky & Golay filter, και ακολούθησε η στατιστική επεξεργασία των χρονοσειρών κατά Reynolds. Συνολικά, για κάθε κυματικό σενάριο υπολογίστηκε η μέση και η μέγιστη

Δυναμική Πίεση (p_{mean}, p_{max}), η μέση τετραγωνική ρίζα της Δυναμικής Πίεσης (p_{rms}), και η μέση, η μέγιστη και μέση τετραγωνική ρίζα (τυρβώδης ένταση) της διακύμανσης της πίεσης ($p'_{mean}, p'_{max}, p'_{rms}$), και διαμορφώθηκαν τα εξής διαγράμματα : α) της μέσης ως προς τη φάση ωt κυματικής ενέργειας, του φάσματος εύρους (amplitude spectrum), β) της μέσης ως προς τη φάση ωt τυρβώδους διακύμανσης της Δυναμικής Πίεσης και γ) του φάσματος ενέργειας (power spectrum) των Δυναμικών Πίεσεων.

Όσον αφορά την επεξεργασία των χρονοσειρών των ανυψώσεων $\eta(t)$ από τη Μέση Στάθμη Ηρεμίας, δε θεωρήθηκε απαραίτητο να γίνει φιλτράρισμα των δεδομένων. Από αυτές τις χρονοσειρές, και με χρήση της μεθόδου στατιστικής επεξεργασίας Zero up-crossing, υπολογίστηκαν, το ύψος κύματος του εισερχόμενου κύματος H_i και του μεταδιδόμενου κύματος H_t (θεωρήθηκαν ίσα με το μέσο όρο του ενός τρίτου των μεγαλύτερων κυμάτων $H_{1/3}$), καθώς και η μέση περίοδος κύματος T_m . Στη συνέχεια κατασκευάστηκε μια σειρά διαγραμμάτων, που αφορούν τη μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς το εισερχόμενο ύψος κύματος H_i , την περίοδο του εισερχόμενου κύματος T , το αδιάστατο μέγεθος $H_i/(T^2g)$, το οποίο στην ουσία δηλώνει την καμπυλότητα του εισερχόμενου κύματος H_i . Τέλος, παρατίθενται μερικά ακόμα διαγράμματα που συνδέουν το συντελεστή μετάδοσης K_t με το λόγο του ελεύθερου ύψους (Free Board) προς το ύψος κύματος (FB/H_i), για να φανεί η επιρροή του ελεύθερου ύψους στην απομείωση της ενέργειας του κύματος.

Από όλα τα παραπάνω, βγήκαν χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για τις διακυμάνσεις της πίεσης στον πόρο μια βυθισμένης κατασκευής, όσο και για την αποδοτικότητα της κάθε γεωμετρίας στην απομείωση του κύματος. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η Δυναμική Πίεση είναι σημαντικά μειωμένη στην υπήνεμη πλευρά σε σύγκριση με την προσήνεμη, ενώ οι τυρβώδεις εντάσεις είναι μεγαλύτερες στην υπήνεμη πλευρά και φτάνουν να είναι ίσες με 3 ~ 8% της μέσης δυναμικής πίεσης. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η πιο κρίσιμη παράμετρος που σχετίζεται με τη μηχανική απόδοση της κατασκευής είναι η περίοδος του κύματος T , και παρατηρήθηκε ότι οι ελάχιστοι συντελεστές μετάδοσης εντοπίζονται για $T \approx 1.4sec$. Τέλος, διαπιστώθηκε ότι οι κυματοθραύστες με ποσειδωνίες στην στέψη τους μπορούν να βελτιώσουν την απόδοσή τους κατά περίπου 10 – 15%.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Over the past decades the problem of coastal erosion has expanded and it is expected to be more intense as a result of the climate change and the sea level rise. The methods used so far to confront this problem have been basically constituted of ‘hard’ and ‘soft’ conventional methods such as emerged and submerged breakwaters, groins etc, combined with the method of beach nourishment. However, those structures can cause environmental change in the marine and coastal environment downgrading the sub-sea ecosystem.

It is a subject under discussion lately though, whether some permeable sub-sea constructions, such as porous submerged rubble-mound breakwaters could be designed in a way that they could mimic the characteristics of a natural reef attracting fishes and other marine organisms. However, in order for a breakwater to be regarded as an artificial habitat, hydrodynamic conditions capable of accommodating and attracting marine life should be formed within the gaps created by the shield boulders. These conditions are determined for each species by various parameters, the most representative being the prevailing value of the maximum orbital velocity and the maximum pressure and the turbulent variations in velocity and dynamic pressure [2].

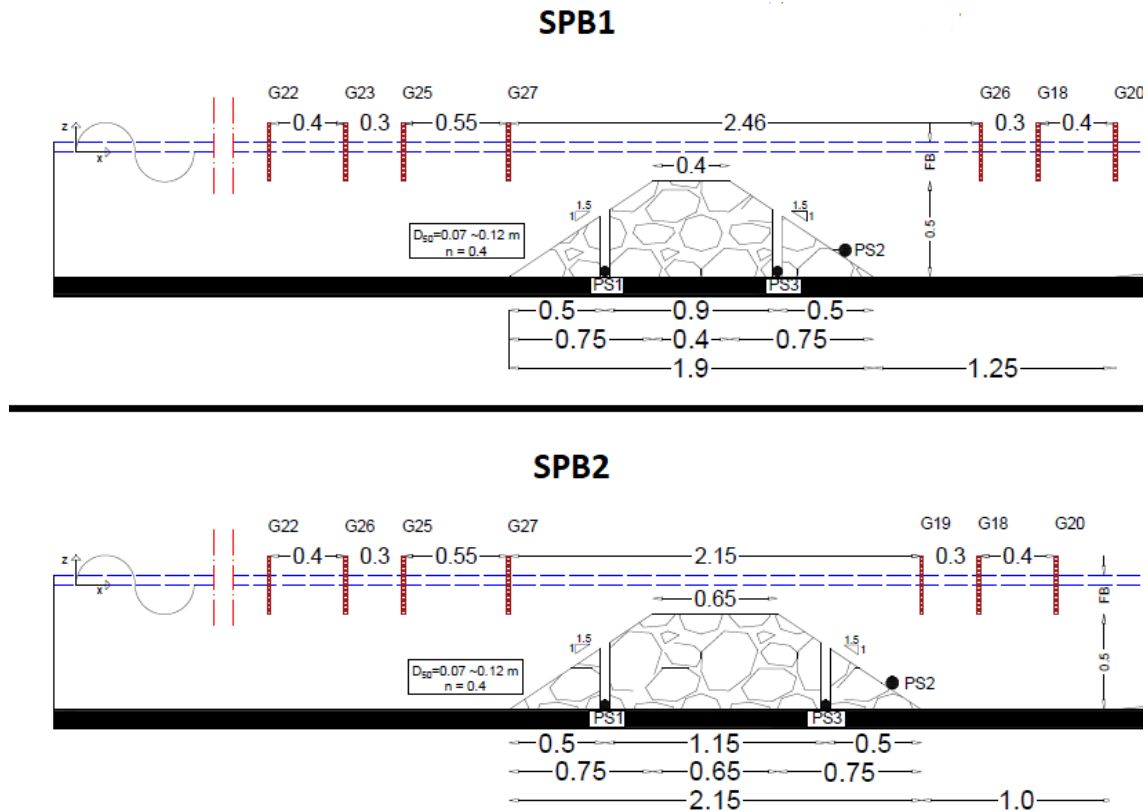
The scope of this postgraduate thesis is to investigate in detail whether and to what extent various physical models of submerged rubble-mound permeable breakwaters (SPBs) with relatively steep slopes can effectively reduce the wave energy transmitted to the lee-side (measured using a transmission coefficient, K_t), and also to provide useful information to marine biologists concerning the fluctuations of dynamic pressure and turbulence of dynamic pressure developing inside the voids of a submerged structure, which is an important parameter to be examined to estimate the potentiality that those coastal structures could support the habitation of some marine organisms. Finally, the case of a submerged breakwater on the crest of which *Posidonia* sea-grass has been positioned was studied, since it is considered as a method that could address both goals, by increasing the efficiency and in the same time transforming the structure into an artificial reef, which could not only protect but also upgrade the coastal ecosystem.

Experimental Setup

In order to answer the questions presented above, a large number of experimental measurements have been conducted for various geometries of submerged breakwaters. This study refers to the analysis of the data obtained by two different experimental sessions, one taken place at Laboratory of Fluid Mechanics of Civil Engineering and Geoscience department (LoFM) of TU Delft (TUD), and the second one at Laboratory of Harbour Works (LoHW) of National Technical University of Athens (NTUA).

Experimental setup at LoFM of TU Delft

The hydraulic experiments taken place at TU Delft's Laboratory, conducted at a wave flume of 42 m length, 0.8 m width and 1 m height. This wave flume is equipped with a piston type wave generator, able to produce both regular and irregular waves, and also has adjusted on it an 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.



- SPB1 and SPB2 physical models and location of pressure and wave gauges.

Model	Porosity	Crest Width (m)	Structure height (m)	Mean Rock Size ($d_{50}(cm)$)	Slope Steepness	Overall Volume (m^3)
SPB1	0.40	0.40	0.50	8-12.5	1/1.5	0.58
SPB2	0.40	0.65	0.50	8-12.5	1/1.5	0.70

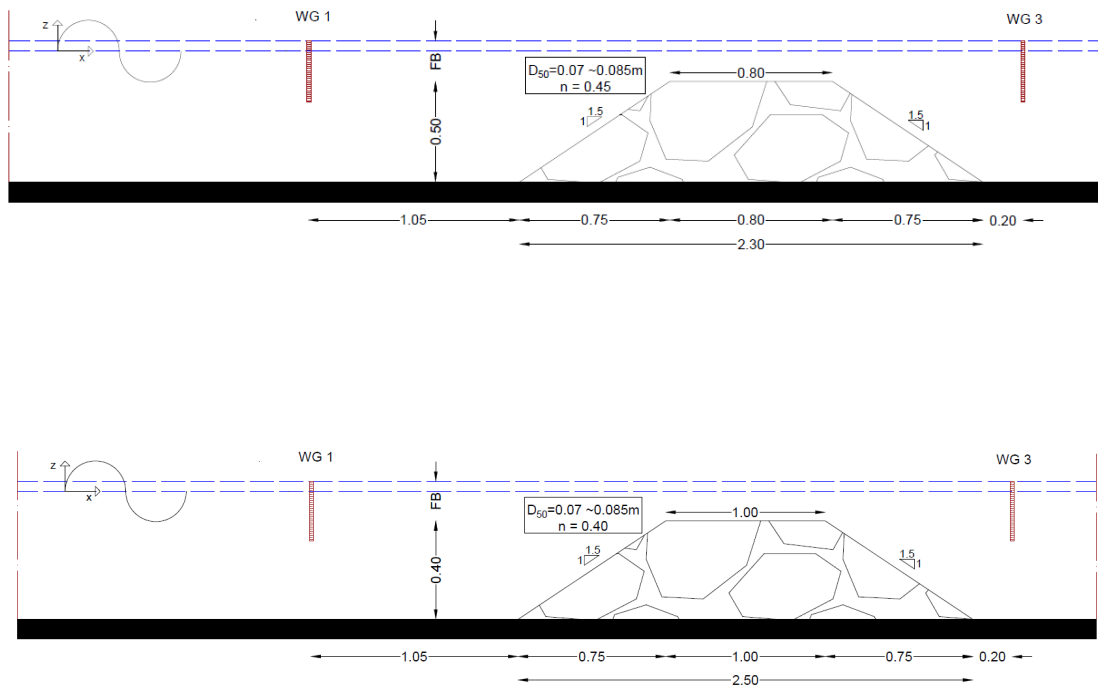
For this experimental session, two physical model of submerged breakwaters, of porosity for both equal to 0.4, were made, namely SPB1 and SPB2. Both structures were made of natural stones with $d_{50} = 0.07 \sim 0.12$ m, sloping 1:1.5 both sides, with structure height equal to 0.5 m. Those two models differ one each other only in the width of their crest, being equal to 0.4 for SPB1 model and 0.65 for SPB2 model, meaning that it was extended around 0.25 m. The wave scenarios applied concern waves with height (H_i) ranging from 0.06 m to 0.23 m and with wave period (T) also ranging from 1.0 to 2.5 sec.

The above figures represent the characteristics and the geometry of models SPB1 and SPB2, while on the table addressed the physical characteristics of those two models.

Experimental setup at LoHW of NTUA

A second experimental set-up for investigating efficiency issues of SPBs associated with the various propagating waves conducted in the 3-dimensional basin of Laboratory of Harbour Works (LoHW) at National Technical University of Athens. Two different physical models were constructed in a canal of 4.0 m length, 0.80 m width, placed in the wave basin of 7.0 m width and 22.0 m length. The wave generator has been constructed by the HR Wallinford company, and it is capable to generate both regular and irregular waves, but the period of the waves generated cannot be greater than 2.0 sec ($f \geq 0.5(Hz)$).

The below figures represent the characteristics and the geometry of models SPB3 and SPB4, while on the table addressed the physical characteristics of those two models. At this point, it should be noted that for those two models measurements obtained for two different cases, meaning for the case that Posidonia sea-grass has been placed on the crest of the breakwater and for the conventional case of SBPs with no Posidonia sea-grass on the crest.



- Models set-up of SPB3 (top figure) and SPB4 (bottom figure).

Model	Porosity	Crest Width (m)	Structure height (m)	Mean Rock Size ($d_{50}(cm)$)	Slope Steepness	Overall Volume (m^3)
SPB3	0.45	0.80	0.50	7-8.5	1/1.5	0.78
SPB4	0.40	1.00	0.40	7-8.5	1/1.5	0.44

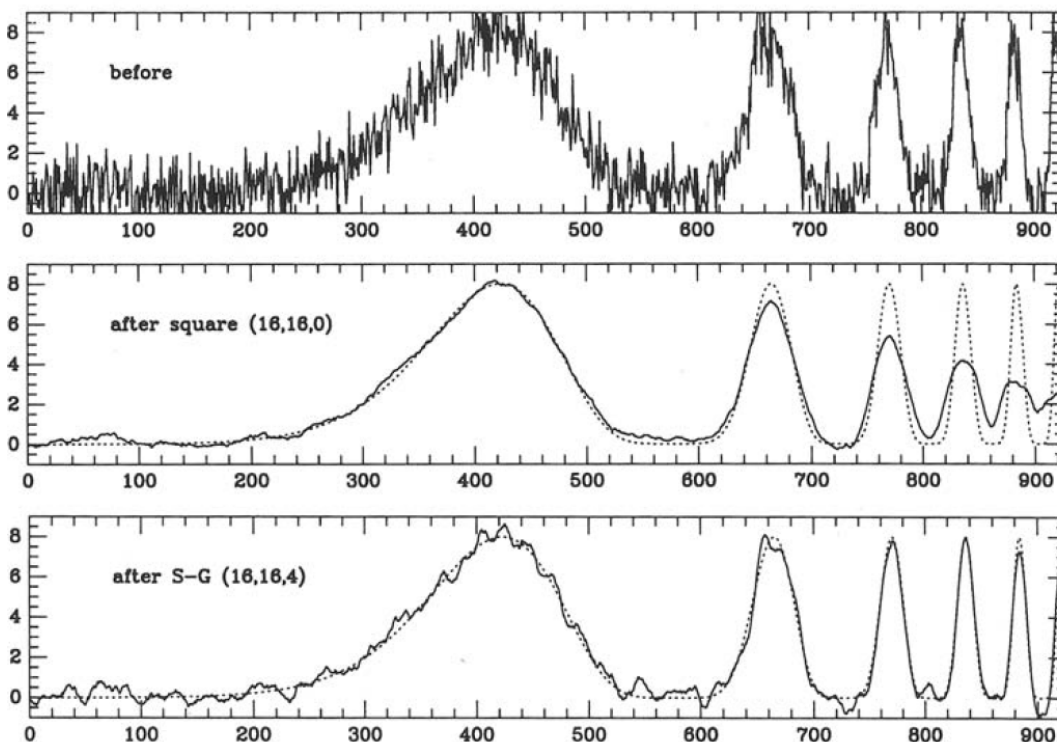
Analysis of the experimental data

In this section, the analysis of the data, obtained both from the pressure and the wave gauges, will be presented. It is important to be noted that, before performing the analysis, the time-series of the dynamic pressure were filtered in order to remove the 'noise' of the pressure transducer. It wasn't considered necessary to do the same for the time-series of water elevation, since the order of the noise is far smaller than the measured values, and for this reason noise is not able to manipulate the results of the analysis presented in a following sub-section.

Savitzky-Golay FIR smoothing filter

The Savitzky-Golay Finite Impulse Response (FIR) smoothing filters were applied for the aim mentioned above. Those filters, also known as poly-nominal smoothing, or least-squares smoothing filters, are generalizations of the FIR averager filter that can preserve better the high-frequency content of the desired signal, at the expense of not removing as much noise as the averager[33].

The upper panel of the figure below shows a test function, to which Gaussian white noise of unit variance has been added. The middle panel shows the result of smoothing by a moving window averager, from which is obvious that the underlying signal (dotted) is very badly represented. Finally, the lower panel shows the result of smoothing with a Savitzky-Golay filter, from which one sees that the heights and widths of the bumps are quite extraordinary presented[34].



- a) Synthetic noisy data, b) Result of smoothing the data by a simple moving window average, c) Result of smoothing the data by a Savitzky-Golay filter [34].

Analysis of dynamic pressure

The scope of this analysis is to evaluate the main and the maximum values of dynamic pore pressure and also the main turbulent statistics of the pressure field, such as the turbulent fluctuations, the turbulent intensities, the spectrum of kinetic energy, and also the transformation of the pressure amplitude due to the presence of the structures as the waves propagate over their crests.

Within the following lines, the main equations used to evaluate the turbulent statistics of the pressure fields will be presented. For this framework, it was assumed that the pressure gradient consists of the mean component of the pressure \bar{p} and the fluctuating part p' . To this point, a definition of dynamic pressure should be given. In this work, the dynamic pressure considered as a result of two contributions; the first and most obvious contributor is the surcharge of pressure due to the presence of the free surface displacement. If the pressure response factor were unity, the pressure contribution from the surface displacement would be purely hydrostatic. However, associated with the wave motion is the vertical acceleration, which is 180° out of the phase with the surface displacement. This contribution modifies the pressure from purely hydrostatic [18]. The above definition concluded to the below equation:

$$p(x, z, t) = -\rho gz + \rho g \eta(x, t) \left(\frac{\cosh kh(1 + \xi)}{\cosh kh} \right) = -\rho gz + \rho g \eta(x, t) K_p(z) \quad (1)$$

From the above mentioned, it follows that the instantaneous pressure will be given by the below equation[35]:

$$p_i = \bar{p}_i + p'_i \quad (2)$$

This is called the *Reynolds decomposition* and can applied to any hydrodynamic quantity[23]. For the case of periodic water flow, this equation must be transformed by applying phase averaging over the pressure record, as below:

$$p'_i(x, y, z, \omega(t + kT)) = p_i(x, y, z, \omega t') - \bar{p}_i(x, y, z, \omega t) \quad (3)$$

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

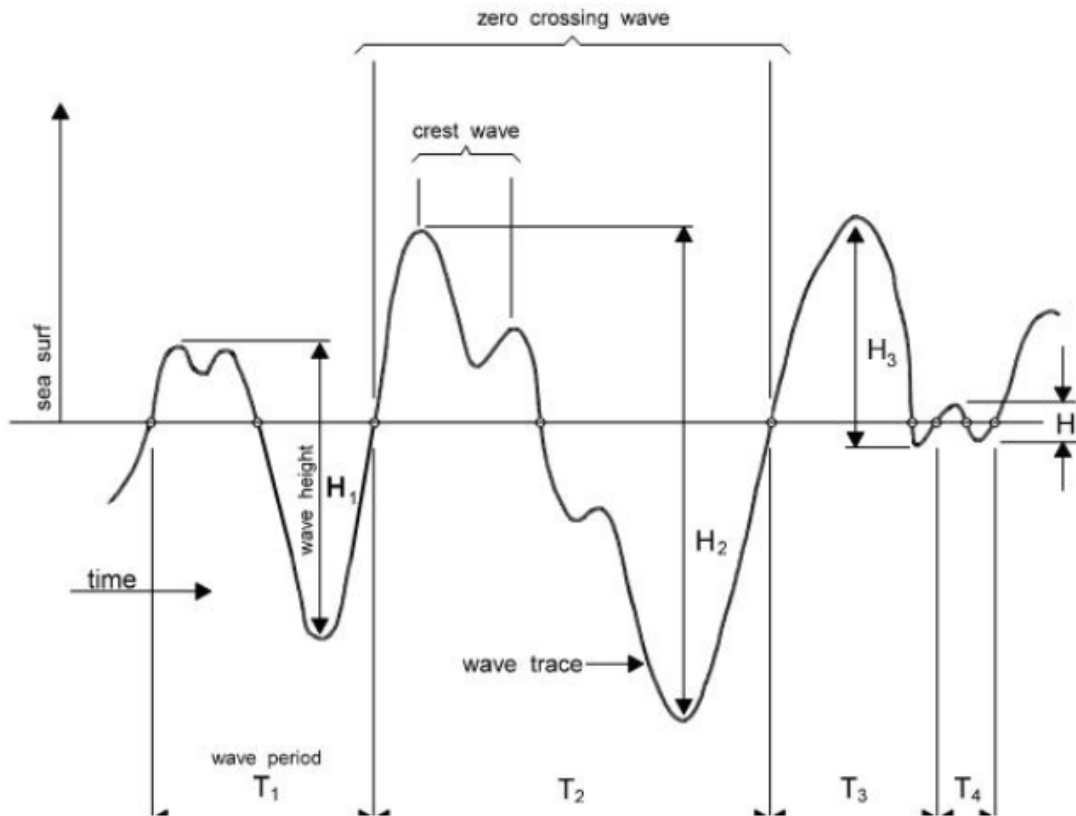
$$\omega t' = \omega(t + kT), (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

Finally, the phase averaged (ωt) intensity of the turbulent pressure fluctuations is defined by the following equation:

$$p'_{rms}(x, y, z, \omega t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^N p'^2(x, y, z, \omega(t + kT))} \quad (5)$$

Analysis of water elevation data

The method used for the analysis of the water elevation time-series was the Zero Up-crossing. For this method, a wave is defined as the portion of a record between two successive zero up crossings. From the recorded bursts of wave data the waves are ranked in order of their height (with their corresponding periods), and the significant wave height (H_s) or the average height of the waves which comprise the top 33% ($H_{1/3}$) was computed coupled with the zero up-crossing period, the so called mean period T_m .



- Zero Up-crossing method.

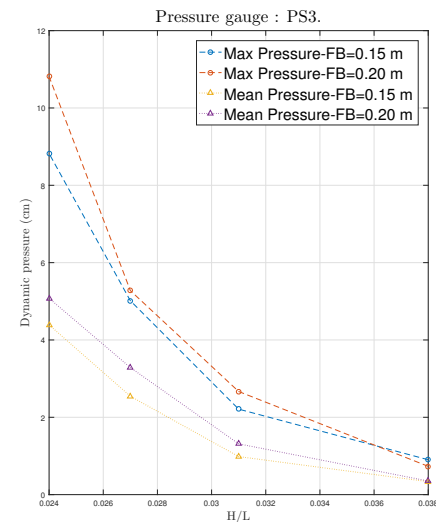
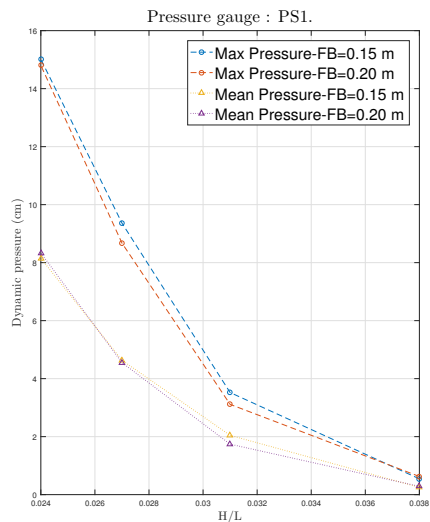
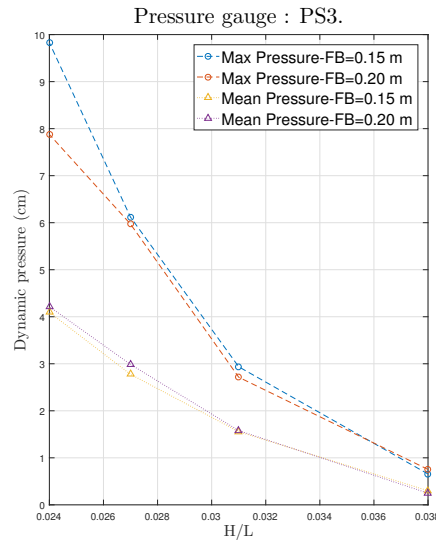
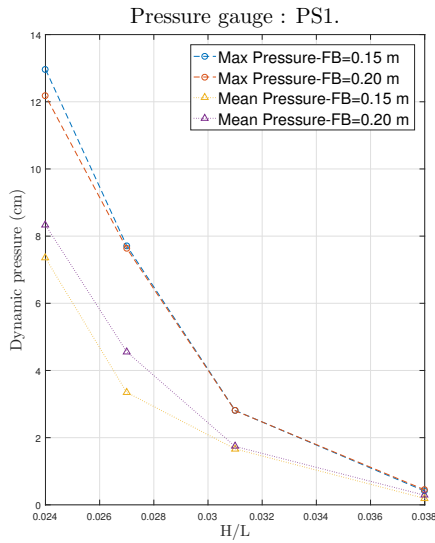
Results of dynamic pressure data analysis

In this section, some of the most representative results of the analysis are presented. Specifically, the mean (p_{mean}) and the maximum (p_{max}) dynamic pressure and the mean and the maximum turbulent intensity of dynamic pressure were calculated for both physical models, SPB1 and SPB2, for all the wave scenarios and water depths. Subsequently, plots of the above values corresponding to the dimensionless wave steepness (H/L) were drawn.

From the plots related to the mean and the maximum dynamic pressure can be concluded that:

1. The mean and maximum dynamic pressure measured upstream is higher than the one downstream of the water flow.
2. The dynamic pressure measured upstream is higher for the physical model SPB2 comparing to the model SPB1, due to the more intense wave set-up that noticed.

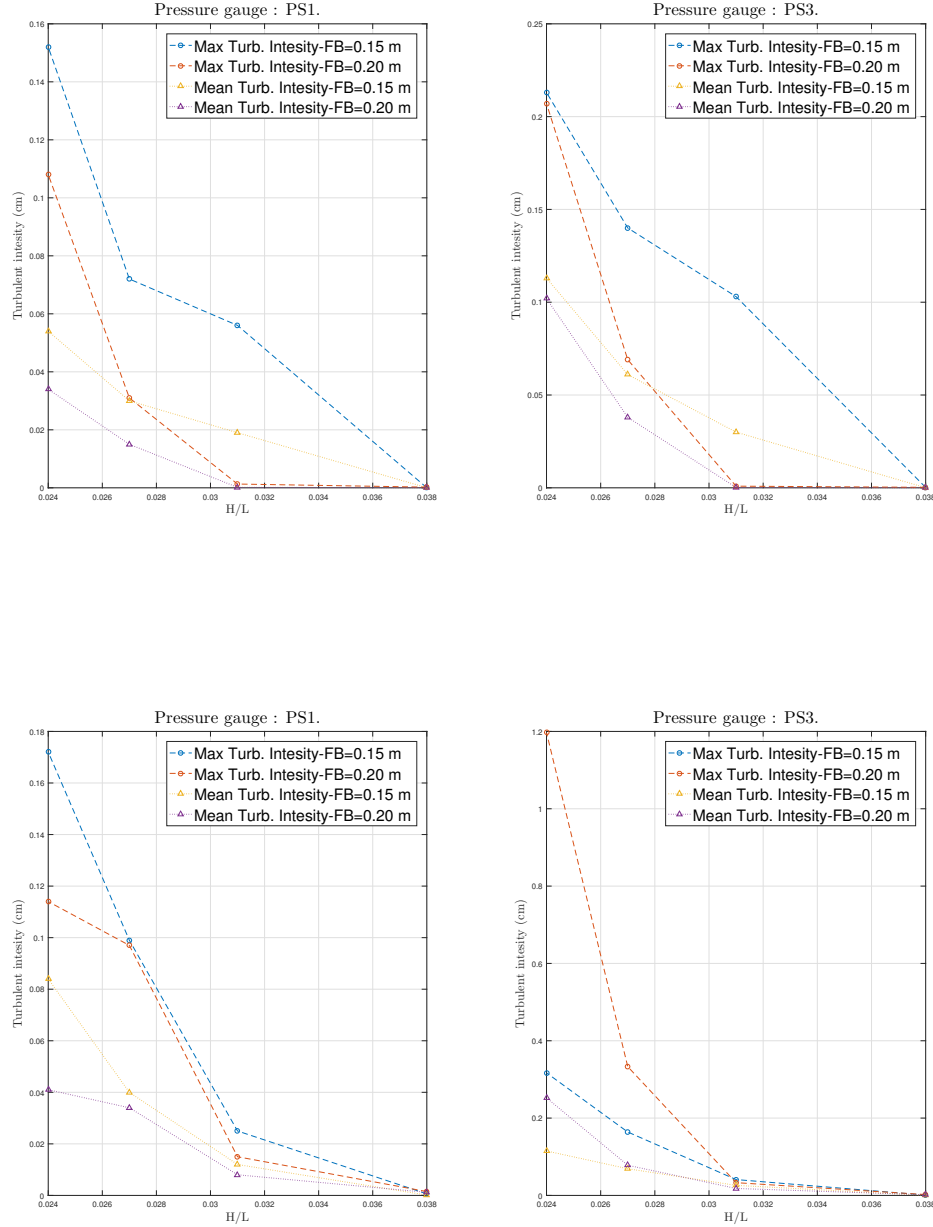
- The dynamic pressure measured downstream is lower for the small value of Free Board ($FB = 0.15m$), due to significantly higher wave energy reduction.



- Mean and maximum pressure measured upstream and downstream of SPB1 (top) and SPB2 (bottom).

From the plots related to the mean and the maximum intensity of turbulent pressure can be concluded that:

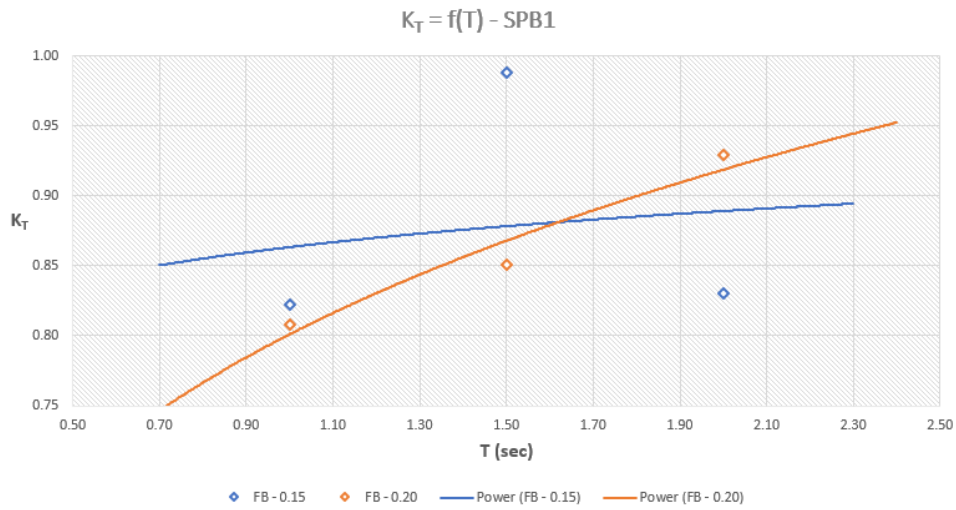
- On the contrary to the values of dynamic pressure, the intensity of the turbulent pressure tends to be higher downstream instead of upstream.
- The intensity of the pressure fluctuations measured for the case of SPB2 are higher than those of SPB1, mainly in the lee-side, due to the wider crest of structure.
- The mean and the maximum intensity of pressure fluctuations are higher when the Free Board is equal to 0.15m, in both sides of structure.



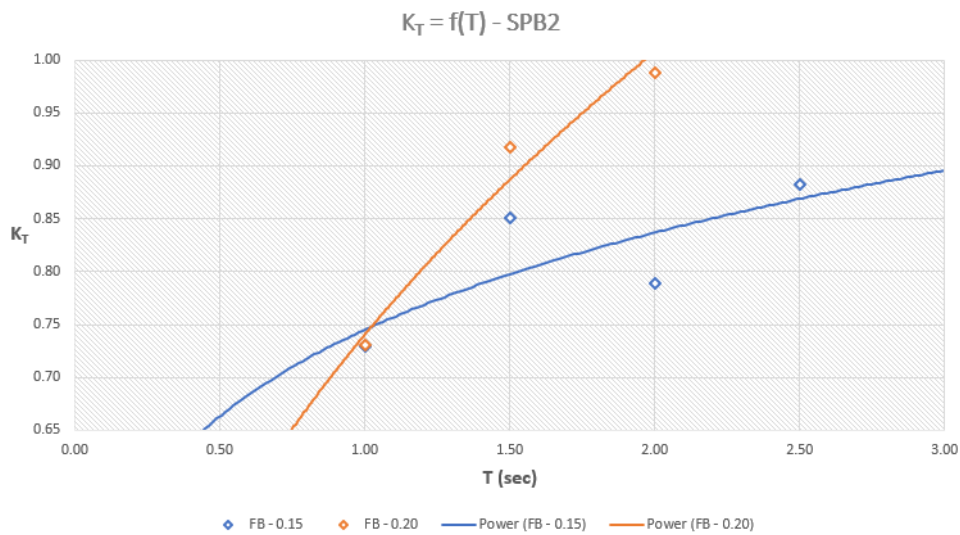
- Mean and maximum intensity of turbulent pressure measured upstream and downstream of SPB1 (top) and SPB2 (bottom).

Results of water elevation data analysis

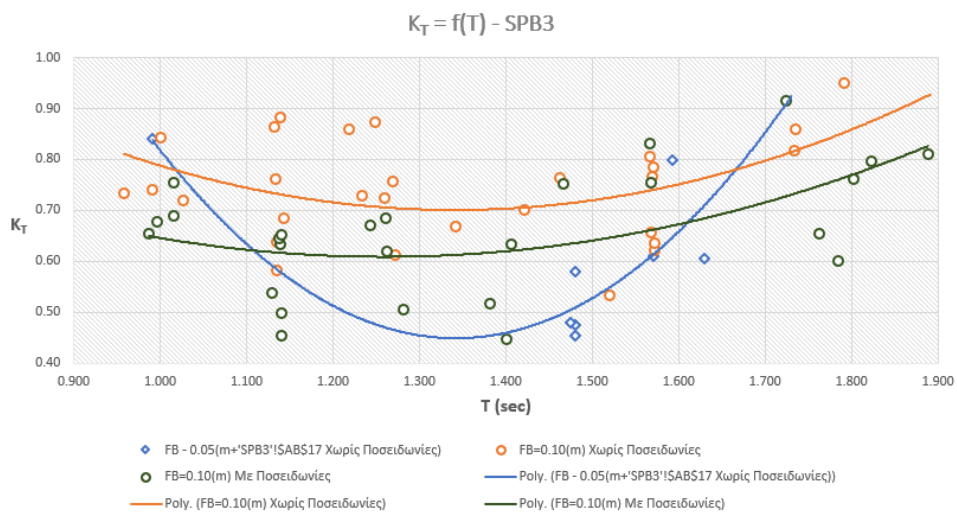
This section presents the results and charts from the analysis of time-series of measured water elevations (η_t) concerning all physical models constructed both at Laboratory of Fluid Mechanics of Civil Engineering and Geoscience department (LoFM) of TU Delft (TUD), and at Laboratory of Harbour Works (LoHW) of National Technical University of Athens (NTUA). The plots are presented in the order for each model constructed starting with the SPB1, following SPB2, SPB3 and SPB4. The figures presented below relate the change of the transmission coefficient K_t with the period of the propagating wave T .



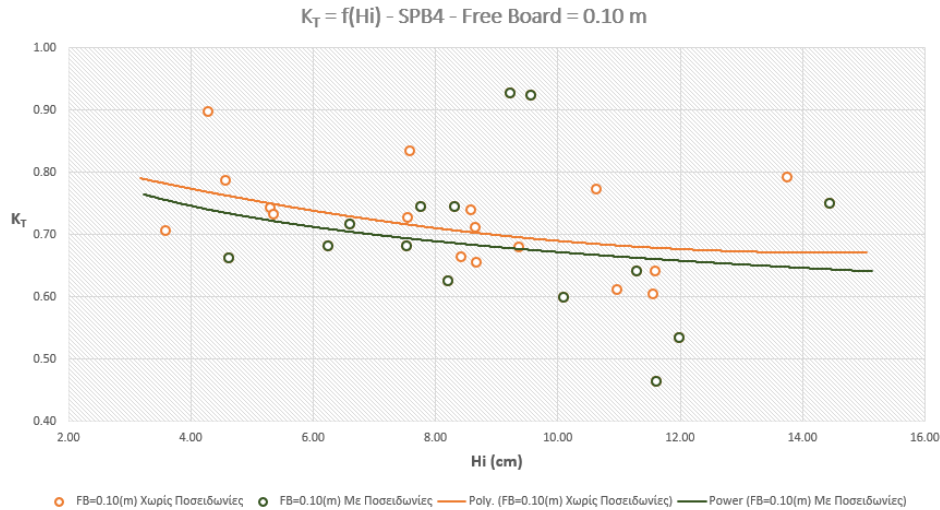
- Transmission coefficient K_t related with the wave period T (SPB1).



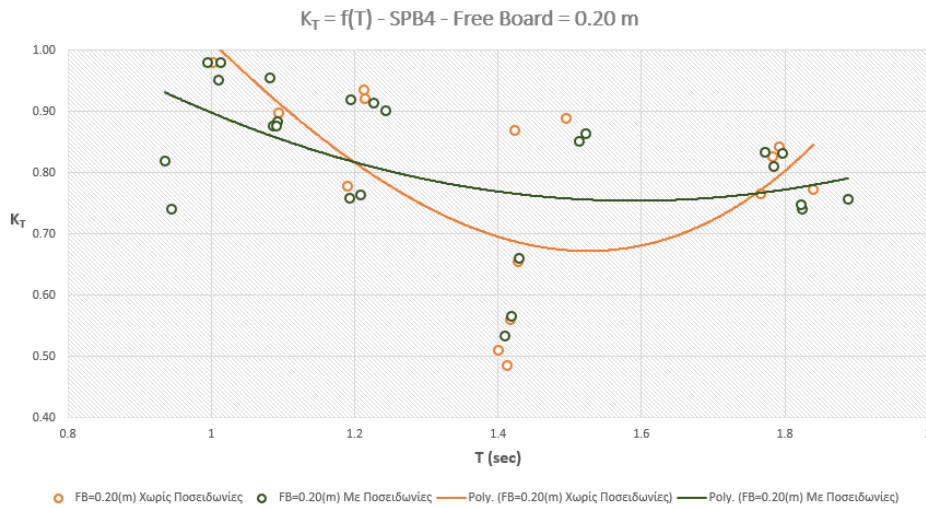
- Transmission coefficient K_t related with the wave period T (SPB2).



- Transmission coefficient K_t related with the wave period T (SPB3).



- Transmission coefficient K_t related with the wave period T (SPB4-FB=0.10m).



- Transmission coefficient K_t related with the wave period T (SPB4-FB=0.20m).

From the above figures, one can see that wave frequency is an important parameter and that for medium values of wave period T , meaning for period equal to $T \approx 1.4\text{sec}$, the SPBs absorb more efficiently the wave energy, leading to smaller transmission coefficient K_t . Also, it is obvious that especially for small free board the structure's efficiency is improved, when *Posidonia* sea-grass placed on their crest at about 10 ~ 15%. Furthermore, one can see that the smaller the free board the better mechanical efficiency for the submerged breakwaters. Last but not least, the width of the crest is another important parameter must be taken into account for the design such structures, since it is noticed that wider crest leads to smaller values of transmission coefficient K_t .

Acknowledgements

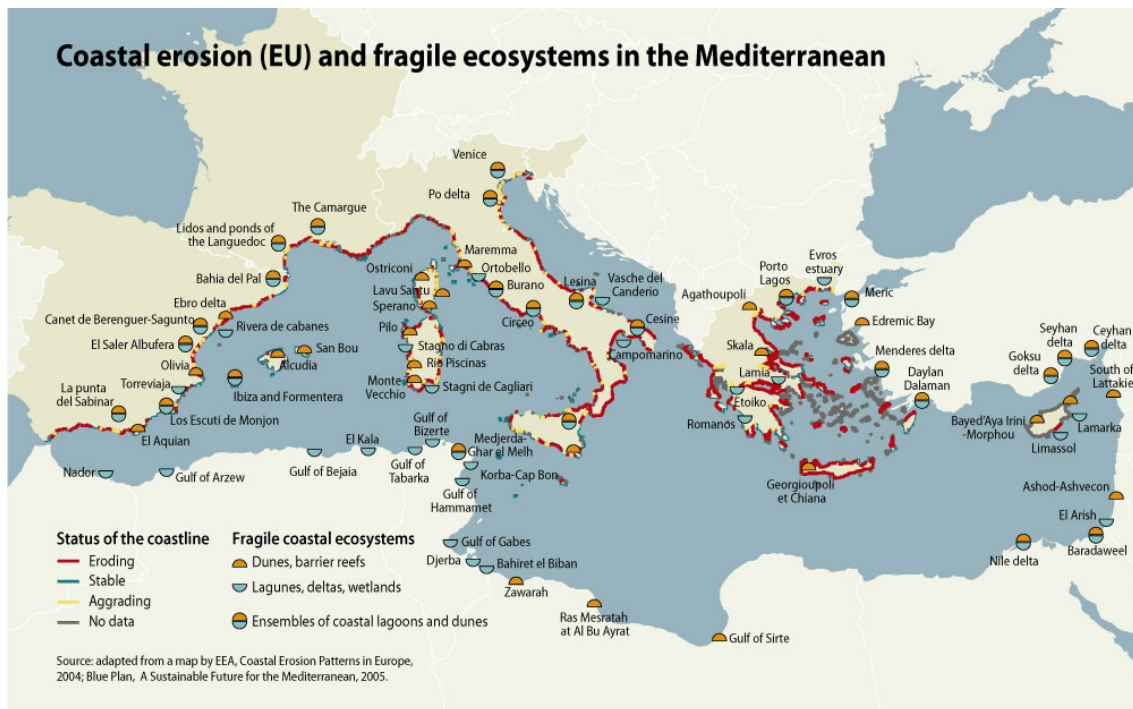
The author acknowledges the support of the professor Constantine Memos, and also Nicolaos Diplarakos, Athanasios Ziros, Dimitra Malliouri and Elpidoforos Repousis (PhD candidates) for their overall support and help.

1 Εισαγωγή

Η εργασία αυτή έχει ένα διττό σκοπό, καθώς αφενός στοχεύει να δώσει μια ποιοτική αποτύπωση του πεδίου των υδροδυναμικών πιέσεων στο εσωτερικό πορώδους-διαπερατού κυματοθραύστη, και αφετέρου να ερευνηθούν διάφορες γεωμετρίες βυθισμένων πορωδών κυματοθραυστών, ως προς την αποτελεσματικότητά τους να απομειώνουν την κυματική ενέργεια. Κατ' επέκταση, η εργασία αυτή μπορεί να χωριστεί σε δύο διαφορετικές και αυτόνομες ενότητες, που η μία αφορά την ανάλυση παραμέτρων με στόχο την αξιοποίησή τους από βιολόγους, ώστε να διερευνηθούν αν και υπό ποιες κυματικές συνθήκες μπορεί να αναπτυχθεί θαλάσσια ζωή εντός ενός κυματοθραύστη, ενώ η δεύτερη ενότητα στοχεύει να δώσει στον αναγνώστη χρήσιμα αποτελέσματα που αφορούν την αποτελεσματικότητα αυτών των κατασκευών ως τεχνικά έργα προστασίας ακτής. Αποτελεί, επομένως, μια έρευνα που συνδέεται άμεσα με τις ανάγκες της εποχής, καθώς η κλιματική αλλαγή και η μεταβολή του κυματικού πεδίου στη Μεσόγειο και την Ελλάδα σε συνδυασμό με την έντονη οικιστική ανάπτυξη και σημαντική οικονομική αξία των παράκτιων-τουριστικών περιοχών, δημιουργεί την ανάγκη της ανάπτυξης τεχνικών έργων επαρκώς αποτελεσματικών και ταυτόχρονα περιβαλλοντικά αποδεκτών, ώστε να αποτραπεί η τάση παράκτιας διάβρωσης όπου παρατηρείται, αλλά με ταυτόχρονη διαφύλαξη του παράκτιου οικοσυστήματος και της θαλάσσιας βιοποικιλότητας.

Οι παράκτιες περιοχές έχουν για την Ελλάδα εξέχουσα σημασία από οικονομικής, πολιτισμικής και κοινωνικής απόψεως, καθώς το 33% του πληθυσμού ζει και εργάζεται σε περιοχές μέχρι 2 km από την ακτή. Ταυτόχρονα, όμως, παρατηρείται σταδιακή υποχώρηση της ακτογραμμής σε πολλές περιοχές της χώρας, κάτι το οποίο οφείλεται τόσο σε μεταβολές του κλίματος και των κυματικών συνθηκών, όσο και σε βίαιες ανθρώπινες επεμβάσεις εντός της ενεργού ζώνης των παράκτιων περιοχών, που μεταβάλλουν τη φυσική ισορροπία. Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 1.1), παρουσιάζονται οι περιοχές της Μεσογείου που διαβρώνονται, από όπου φαίνεται ότι μεγάλο μέρος του ελληνικού παράκτιου χώρου αντιμετωπίζει το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Αυτό το πρόβλημα δημιουργεί την ανάγκη ανεύρεσης και εφαρμογής ήπιων μεθόδων προστασίας των ακτών, που θα μπορούν να απομειώνουν επαρκώς την ενέργεια του κύματος ώστε να διαφυλάσσεται η ισορροπία στο ισοζύγιο φερτών της εκάστοτε ακτής, αλλά και να προστατεύουν ή και να ενισχύουν τη θαλάσσια βιοποικιλότητα. Έως τώρα ήπιες μέθοδοι προστασίας θεωρούνταν κατασκευές κυρίως βυθισμένες, όπως οι κυματοθραύστες χαμηλής στέφης ή οι πλωτοί κυματοθραύστες, καθώς δεν εμποδίζουν με την παρουσία τους τις μετακινήσεις των υδάτων και των θαλάσσιων πληθυσμών, με τους βυθισμένους κυματοθραύστες να έχουν και το επιπρόσθετο πλεονέκτημα ότι δεν προκαλούν οπτική όχληση, κάτι πολύ σημαντικό σε τουριστικές παράκτιες περιοχές.



Σχήμα 1.1. Παράκτια διάβρωση και εύθραυστα παράκτια οικοσυστήματα στην περιοχή της Μεσογείου. © GRID-Arendal

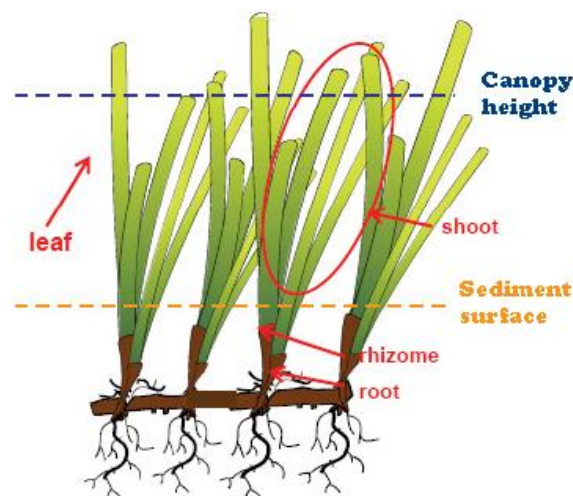
Γι αυτό το σκοπό προτείνεται σε αυτή την εργασία, ένας διαπερατός κυματοθραύστης χαμηλής στέψης και μεγάλου πορώδους, κατασκευασμένος από υλικό μεγάλης διαμέτρου χωρίς την κατασκευή πυρήνα με λεπτόκοκκο υλικό, που συνδυάζει όλα τα χαρακτηριστικά των κλασικών ήπιων μεθόδων προστασίας ακτών. Ταυτόχρονα, όμως, θεωρείται ότι πιθανότατα μειώνεται η περιβαλλοντική όχληση κατά την κατασκευή λόγω της μη ύπαρξης λεπτόκοκκου υλικού που θα βρίσκειται σε αιώρηση κατά την κατασκευή του, ενώ θεωρείται ότι πιθανόν είναι ένα φιλόξενο μέρος για την ανάπτυξη και φιλοξενία θαλάσσιας χλωρίδας και πανίδας. Είναι, επομένως, πιθανόν αυτές οι κατασκευές να μπορούν υπό κάποιες συνθήκες να λειτουργούν ως τεχνητοί οικότοποι. Ως τεχνητοί οικότοποι αναφέρονται κατασκευές που μπορούν να προσομειώσουν τα χαρακτηριστικά ενός τεχνητού υφάλου, αλλά εξυπηρετούν διαφορετικό σκοπό, όπως είναι η προστασία μιας ακτής από διάβρωση κλπ[1].

Για να μπορέσει όμως ένας κυματοθραύστης να θεωρηθεί ως τεχνητός οικότοπος θα πρέπει να διαμορφώνονται, εντός των κενών που δημιουργούνται από τους ογκολίθους θωράκισης, υδροδυναμικές συνθήκες ικανές, ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει και να προσελκύσει θαλάσσια ζωή. Οι συνθήκες αυτές προσδιορίζονται για κάθε είδος από διάφορες παραμέτρους, με τις πιο αντιπροσωπευτικές να είναι η επικρατούσα τιμή της μέγιστης ταχύτητας των υγρών μορίων και της πίεσης και οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της ταχύτητας και της πίεσης[2]. Αν και έχουν γίνει πλήθος μελετών τόσο όσο αφορά το σχεδιασμό τέτοιων κατασκευών από μηχανικής απόψεως, αλλά και όσο αφορά τους τεχνητούς υφάλους, η βιβλιογραφία που αφορά το συνδυασμό των δύο παραπάνω πεδίων δεν είναι καθόλου πλούσια[3]. Αυτή η εργασία έχει σκοπό να δώσει σε βιολόγους την απαραίτητη αυτή πληροφορία, όπως έχουν κάνει και οι Ρεπούσης (2016)[4] και Διπλαράκος (2017)[5] και επιπρόσθετα να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα των διαπερατών κατασκευών από καθαρά τεχνική άποψη, ώστε να εξασφαλιστεί η επίτευξη του σκοπού τους.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δυνατότητα μιας υποθαλάσσιας κατασκευής να φιλοξενήσει θαλάσσια ζωή εξαρτάται κυρίως από τις υδροδυναμικές συνθήκες που επικρατούν, και αυτό αφορά τόσο τους ενεργητικά όσο και τους παθητικά αιωρηματοφάγους οργανισμούς, και συγκεκριμένα ο ρυθμός σύλληψης της τροφής είναι χαμηλός τόσο για μικρές όσο και για μεγάλες ταχύτητες ροής, αλλά μεγιστοποιείται για τις ενδιάμεσες τιμές της ταχύτητας[6].

Η αρχική ιδέα αυτής της εργασίας στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στις παρατηρήσεις και διαπιστώσεις των Κονταξή & Μέμος(2005)[2]. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας, τόσο για οργανισμούς, που καθοριστικός παράγοντας είναι η πίεση όσο και για εκείνους που καθοριστικής σημασίας είναι η ταχύτητα της ροής, είναι δυνατόν να διαμορφωθούν ικανοποιητικές συνθήκες διαβίωσης θαλάσσιων οργανισμών σε βυθισμένους κυματοθραύστες δύο στρώσεων. Ένα ακόμα συμπέρασμα είναι ότι όσο μικρότερη είναι η απόσταση της στέψης του βυθισμένου έργου από την ελεύθερη επιφάνεια, οι συνθήκες διαβίωσης των θαλάσσιων οργανισμών και στις δύο πλευρές του κυματοθραύστη είναι περισσότερο κατάλληλες[2]. Τέλος, γενικά οι θαλάσσιοι οργανισμοί, με ή χωρίς δυνατότητα μετακίνησης επιλέγουν περιοχές όπου οι κυματικές συνθήκες δεν είναι ιδιαίτερα έντονες, αλλά τα νερά δεν θεωρούνται και στάσιμα, και αυτό θεωρείται αποδεκτό για την πλειονότητα των οργανισμών που διαβιούν στο παράκτιο περιβάλλον[2].

Τέλος, αυτή η εργασία έχει σκοπό να εισάγει άλλη μια καινοτόμα ιδέα, αυτή της τοποθέτησης ή δημιουργίας κατάλληλων συνθηκών για την ανάπτυξη 'δάσους' Ποσειδωνίας στη στέψη ή/και στα πρανή των κατασκευών. Οι Ποσειδωνίες αποτελούν ένα μοναδικό θαλάσσιο οικοσύστημα, που έχει τη δυνατότητα να δεσμεύει μεγάλες ποσότητες CO_2 , να εμπλουτίζει τα νερά και την ατμόσφαιρα με οξυγόνο, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί πολύτιμο παραγωγικό πεδίο για περισσότερα από 80 είδη ψαριών και καταφύγιο για για πολυάριθμους θαλάσσιους οργανισμούς, μεταξύ των οποίων και πολλά εμπορικά ψάρια. Επιπλέον, λειτουργούν ως φυσικά φίλτρα καθαρισμού και συμβάλλουν στην ανακύκλωση των θρεπτικών στοιχείων του ιζήματος και της στήλης του νερού. Τα αναχώματα που δημιουργούν οι ρίζες τους σε συνδυασμό με το ανθεκτικό και πυκνό τους φύλλωμα, λειτουργούν ως ισχυροί κυματοθραύστες που απορροφούν σημαντικό ποσοστό της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας στις παράκτιες ζώνες.



Σχήμα 1.2. Περιγραφή των τμημάτων και των χαρακτηριστικών της Μεσογειακής Ποσειδωνίας.

Εφόσον, επομένως μπορεί να βρεθεί μια αποτελεσματική τεχνικά λύση τοποθέτησης και καλλιέργειας Ποσειδωνίας στην στέψη των κυματοθραυστών, θα μπορούσε να είναι πραγματικά καινοτόμα λύση πορώδους κυματοθραύστη που θα λειτουργεί σε πολύ μεγάλο βαθμό ως τεχνικός οικότοπος, που θα προσελκύει μεγάλο αριθμό θαλάσσιων οργανισμών, ενώ ταυτόχρονα θα αυξάνει την αποτελεσματικότητά του στην απομείωση της ενέργειας του κύματος. Σε αυτή την εργασία η συμβολή της Ποσειδωνίας στην απομείωση της ενέργειας του κύματος ελέγχθηκε, κάνοντας μετρήσεις της ανύψωσης της ελεύθερης στάθμης για διάφορα φυσικά μοντέλα με ή χωρίς ποσειδωνία στην στέψη τους.

Στις επόμενες δύο φωτογραφίες παρουσιάζεται μια επιτυχημένη προσπάθεια αποκατάστασης και καλλιέργειας των ποικιλιών της *Amphibolis* και *Posidonia*, που αποδεικνύει ότι η καλλιέργεια Ποσειδωνίας στη στέψη βυθισμένων κυματοθραυστών μπορεί να θεωρηθεί μια ρεαλιστική πρόταση εφαρμογής.



Σχήμα 1.3. Καλλιέργεια των ποικιλιών της *Amphibolis* και *Posidonia*. [7]

1.1 Συνοπτική παρουσίαση της υπάρχουσας σχετικής γνώσης

Η βιβλιογραφία που αναφέρεται στην ανάλυση του υδροδυναμικού πεδίου στο εσωτερικό διαπερατού ύψαλου κυματοθραύστη είναι αρκετά φτωχή, καθώς αποτελεί ένα αρκετά πρόσφατο πεδίο έρευνας που παρουσιάζει και ιδιαίτερες προκλήσεις. Σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες έχουν γίνει από τον Van Gent (1995) [8], ο οποίος προσπάθησε να ενσωματώσει σε ημιεμπειρικούς συντελεστές που αναφέρονται σε 'μέσες' υδροδυναμικές συνθήκες και την επίδραση της διακύμανσης λόγω τυρβωδών φαινομένων για περιοδική ροή σε πορώδες μέσο. Άλλες προσπάθειες έχουν γίνει από τους Losada et al (1995) [9] και Chan et al (2007) [10] και ο Jensen (2015) [11]. Όσο αφορά το πεδίο των πιέσεων μία κυρίως ερευνητική εργασία χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, και είναι του Clemente Cantelmo (2010) [12], ο οποίος ερεύνησε πειραματικά το πεδίο πιέσεων στο εσωτερικό και εξωτερικά ενός πορώδους κυματοθραύστη.

Στην ανάγκη διεπιστημονικής συνεργασίας των θαλάσσιων επιστημόνων για τη βέλτιστη περιβαλλοντική διαχείριση έργων που στόχο έχουν την προστασία ακτών από διάβρωση, όπως οι βυθισμένοι κυματοθραύστες, έχουν αναφερθεί οι Κονταξή & Μέμος (2005) [2] και ο Jensen (1998) [3], ενώ έχει περιγραφεί από διάφορους επιστήμονες η ευαισθησία και/ή η

ανοχή των θαλάσσιων μικροοργανισμών στις υδροδυναμικές διακυμάνσεις υπό την επίδραση των θαλάσσιων κυμάτων (Κονταξή & Μέμος, 2005)[2],(Eckman and Duggins, 1993) [6].

Τέλος, πλούσια είναι η βιβλιογραφία και η έρευνα μου έχει γίνει από επιστήμονες διεθνώς και αφορά την κυματική μετάδοση πάνω από αδιαπέραστες και διαπερατές υποθαλάσσιες κατασκευές, και γενικά το φαινόμενο αυτό έχει εκφραστεί επαρκώς και για διάφορες γεωμετρικές κατασκευών αλλά και κυματικές συνθήκες (Goda, 1967)[13], (Liberatore and Petti, 1992)[14], (Van der Meer and Daemen,1994)[15], (Seabrook and Hall, 1998)[17].

1.2 Μεθοδολογία

Για να διερευνηθεί το υδροδυναμικό και κυματικό πεδίο το πρόβλημα προσεγγίστηκε πειραματικά. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο *Laboratory of Fluid Mechanics of Civil Engineering and Geoscience* στο *Delft University of Technology* και στο *Εργαστήριο Λιμενικών Έργων* του *Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*. Αρχικά έγινε ανασκόπηση της βιβλιογραφίας έτσι ώστε να γίνει σωστός σχεδιασμός των φυσικών ομοιωμάτων αλλά και των πειραμάτων γενικότερα, με στόχο να κατασκευαστούν μοντέλα τα οποία θα μπορούν να προσεγγίσουν όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά το πρόβλημα, ώστε να διασφαλισθούν ποιοτικά αποτελέσματα. Αφού κατασκευάστηκαν τα μοντέλα μετρήθηκαν όλες οι παράμετροι που αφορούν το πρόβλημα, με προσεκτική παρακολούθηση όλων των οργάνων και δίνοντας πάντα ιδιαίτερη προσοχή στο καλιμπράρισμά τους και στην επί τόπου παρακολούθηση των μετρήσεων, ώστε να διασφαλίζεται πάντα ότι τα όργανα λειτουργούν σωστά και η πειραματική διαδικασία εξελίσσεται ομαλά. Στη συνέχεια έγινε επεξεργασία των χρονοσειρών μετρήσεων των πιέσεων και των ανυψώσεων της ελεύθερης στάθμης, με τις μεθόδους που θα περιγραφούν αναλυτικά σε επόμενες ενότητες. Τέλος, γίνεται μια προσπάθεια να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα που αφορούν τόσο τις διακυμάνσεις των πιέσεων με στόχο την επεξεργασία τους από βιολόγους, αλλά και για την αποτελεσματικότητα κάθε διατομής που κατασκευάστηκε στην απομείωση της ενέργειας του κύματος με ή χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη τους.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η παρούσα εργασία έχει τη διπλή στόχευση να εξετάσει τόσο τις διακυμάνσεις των μεγεθών του υδροδυναμικού πεδίου, και συγκεκριμένα να εξετάσει τις τυρβώδεις διακυμάνσεις των πιέσεων, αλλά και να γίνει μια μελέτη της αποδοτικότητας των πορωδών ύφαλων κυματοθραυστών να απομειώνουν την ενέργεια που μεταδίδεται στην προσήνεμη πλευρά της κατασκευής, συνδέοντας αυτή την απομείωση και με τους παρατηρούμενους μη-γραμμικούς μετασχηματισμούς του μεταδιδόμενου κύματος. Γι αυτό το λόγο, θα δοθούν στη συνέχεια μερικοί ορισμοί και αναλυτική περιγραφή των φυσικών και τεχνικών χαρακτηριστικών που συνδέονται με έναν ύφαλο κυματοθραύστη, ξεκινώντας από την αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών μιας τέτοιας κατασκευής, αλλά κατόπιν θα επεξηγηθούν και κάποια βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν τους κυματισμούς με ή χωρίς την αλληλεπίδραση τους με μια ύφαλη κατασκευή, ώστε να είναι επαρκώς ορισμένες όλες οι έννοιες που θα συναντήσει ο εκάστοτε αναγνώστης, σε πολλά σημεία της εργασίας.

2.1 Ύφαλοι κυματοθραύστες

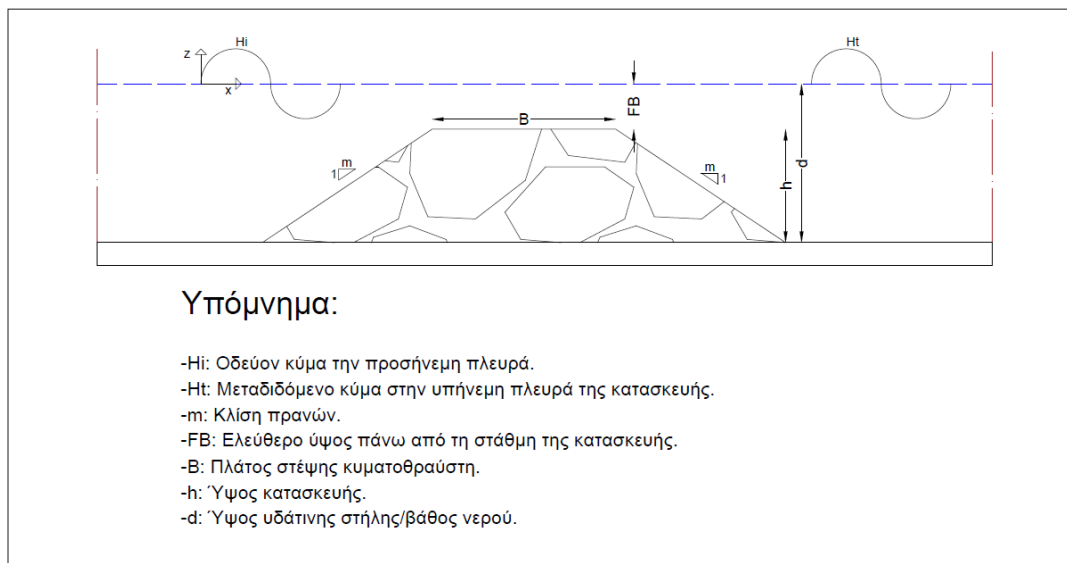
Ως ύφαλος/βυθισμένος κυματοθραύστης μπορεί να περιγραφεί μια κατασκευή με πρηνή τραπεζοειδούς σχήματος κατασκευασμένη από λιθορριπές (roumble mound breakwaters), με κύριο χαρακτηριστικό της ότι η στέψης της βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτές οι κατασκευές θεωρούνται ήπιες περιβαλλοντικά κατασκευές, καθώς αφενός δεν προκαλούν οπτική όχληση, αφού δεν είναι ορατές από την ακτή, και επομένως δεν διακόπτουν την οπτική πρόσβαση προς τη θάλασσα, αλλά ταυτόχρονα μπορούν και επιτρέπουν καλύτερη ανακύκλωση των υδάτων σε σχέση με τις συμβατικές κατασκευές. Στον αντίποδα, αυτές οι κατασκευές έχουν προφανώς μειωμένη απόδοση σε σύγκριση με τις συμβατικές και το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι η απόδοσή τους εξαρτάται σημαντικά από το ύψος της στάθμης, και συγκεκριμένα μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται το βάθος του νερού [17].

Στην παρούσα εργασία, θα αναφερόμαστε σε κυματοθραύστες για την περίπτωση δισδιάστατης διάδοσης κυματισμών, και σε αυτήν την περίπτωση οι σημαντικότερες παράμετροι είναι: α) το ύψος του κυματοθραύστη (h) (m), το οποίο ορίζεται ως η κατακόρυφη απόσταση από τον πυθμένα μέχρι τη στέψη της κατασκευής, β) το πλάτος στέψης (B) (m), που ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα στην προσήνεμη και την υπήνεμη ακμή της κατασκευής, γ) η κλίση του προσήνεμου και του υπήνεμου πρηνούς (1:m), δ) το πορώδες της κατασκευής (n), που ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς το συνολικό όγκο της κατασκευής, ε) η μέση διάμετρος των ογκολίθων (D_{50}) (cm) και στ) το ελεύθερο ύψος της κατασκευής (Free Board-FB) (m), που ορίζεται ως η απόσταση από τη στέψη μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια του νερού, και όπως είναι κατανοητό εξαρτάται από το βάθος του νερού.

Όσο αφορά τη δισδιάστατη μετάδοση κυματισμών είναι χρήσιμο να δοθούν οι παρακάτω έννοιες: α) προσπίπτον κύμα (H_i) είναι το οδεύον κύμα, που κατευθύνεται προς τον

κυματοθραύστη, β) μεταδιδόμενο κύμα (H_t) είναι το κύμα, αφού απομειωθεί η ενέργεια του και μετασχηματιστεί λόγω της διάδοσης του κύματος πάνω από την κατασκευή, γ) ανακλώμενος κύμα (H_r) είναι το κύμα που ανακλάται από την κατασκευή ή γενικά από φυσικά ή τεχνητά εμπόδια, με τα οποία έρχεται σε επαφή το οδεύον κύμα, δ) περίοδος κύματος (T) είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εμφάνιση δύο διαδοχικών κορυφών ή κοιλιών αντίστοιχα, ενώ τέλος ε) μήκος κύματος (L) είναι η απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κορυφές ή κοιλίες αντίστοιχα.

Οι σημαντικότερες παράμετροι από αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω φαίνονται σχηματικά στο παρακάτω Σχήμα 2.1 :



Σχήμα 2.1. Φυσικές παράμετροι που αφορούν τη δισδιάστατη διάδοση κυματισμών πάνω από βυθισμένο πορώδη κυματοθραύστη.

Στην εργασία όλες οι γεωμετρίες που εφαρμόστηκαν αφορούν κατασκευές με μεγάλο σχετικά πορώδες και γι αυτό είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι το πορώδες και η τραχύτητα είναι δύο σημαντικοί παράγοντες, από τους οποίους εξαρτάται η αποτελεσματικότητα ενός κυματοθραύστη να απομειώνει την κυματική ενέργεια. Τόσο η τραχύτητα όσο και η διαπερατότητα συνδέονται άμεσα με την ονομαστική διάμετρο των κόκκων (D_{50}), και συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη η τραχύτητα τόσο μεγαλύτερη η απομείωση της ενέργειας του κύματος [17]. Αντίστοιχα, είναι κατανοητό ότι το πορώδες μιας κατασκευής επιτρέπει τη ροή εντός της μειώνοντας την ανάκλαση κυματισμών, αλλά και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει απομείωση της ενέργειας του κύματος, καθώς εντός του κυματοθραύστη δεν είναι στρωτή. Η αλληλεπίδραση του έργου με το επερχόμενο κύμα οδηγεί στην απομείωση του κύματος και ένας τρόπος να αποτυπωθεί αυτή η απομείωση είναι ο συντελεστής μετάδοσης K_t , ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ύψους του μεταδιδόμενου προς το ύψος του προσπίπτοντος κύματος ($K_t = H_t/H_i$). Ο βαθμός απομείωσης του κύματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από πολλά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής και ως εκ τούτου κάποιοι παράμετροι που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της κατασκευής είναι: ο βαθμός βύθισης d/h , το σχετικό ύψος της κατασκευής h/d , το σχετικό ελεύθερο ύψος της κατασκευής F/H_i , το σχετικό πλάτος στέψης B/H_i , το σχετικό ύψος κύματος H_i/d κλπ.

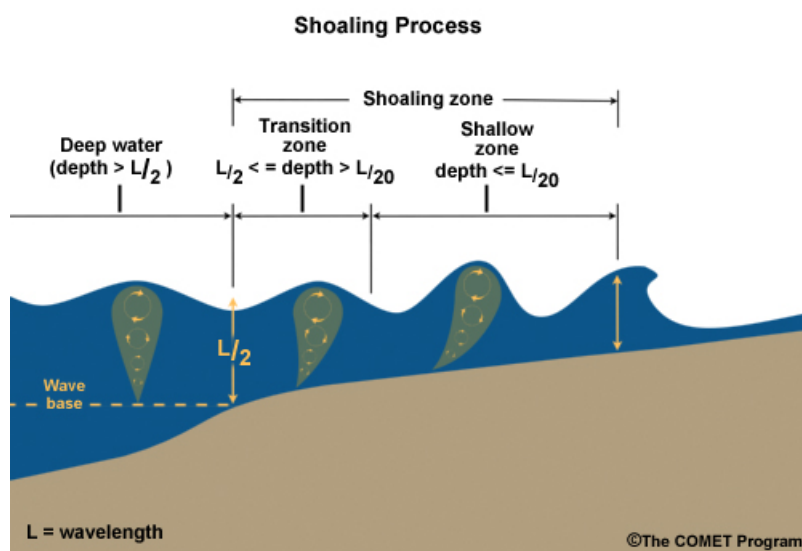
2.2 Τροποποίηση κυματισμών λόγω αλληλεπίδρασης με φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο

Σε αυτή την υπό-ενότητα θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των φυσικών διεργασιών και μετασχηματισμών που υπόκεινται το κύμα λόγω της αλληλεπίδρασής του με ένα φυσικό ή τεχνητό εμπόδιο.

Οι κυριότερες φυσικές διεργασίες που έχουν παρατηρηθεί και περιγραφεί είναι η ρήχωση, η διάθλαση, η περίθλαση, η θραύση, ανάκλαση και είναι προφανές ότι γενικά η αλληλεπίδραση ενός κύματος με μια κατασκευή οδηγεί στην εμφάνιση μη-γραμμικοτήτων. Συγκεκριμένα, καθώς ένα κύμα οδεύει προς την ακτή, λόγω της μείωσης του βάθους αρχίζει να αλληλεπιδρά με τον πυθμένα και κατ' επέκταση να μειώνεται το μήκος κύματος, το οποίο είναι συνέπεια της εξίσωσης διασποράς, η οποία εξίσωση φαίνεται παρακάτω:

$$L = \frac{g}{2\pi} T^2 \tanh kh \quad (2.1)$$

Ως άμεσο αποτέλεσμα είναι ότι, επειδή η περίοδος τους κύματος είναι αμετάβλητη, το μήκος κύματος και η ταχύτητα διάδοσης τους κύματος μειώνεται καθώς συναντά πιο ρηχά νερά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε κύματα με μεγάλο μήκος κορυφογραμμής να μεταβάλλεται η ταχύτητα διάδοσης τους τοπικά, και αυτό αποκαλείται *διάθλαση* (refraction). Ως αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου, το κύμα αλλάζει διεύθυνση καθώς τα τμήματα του κύματος που βρίσκονται σε πιο βαθιά νερά διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα από εκείνα που βρίσκονται σε πιο ρηχά [18]. Επίσης, ως αποτέλεσμα της μείωσης του μήκους κύματος στα ρηχά νερά, το ύψος κύματος αυξάνεται και συγκεντρώνεται μεγαλύτερη ενέργεια αν μονάδα μήκους, μέχρι που τελικά θα επέλθει η θραύση του κύματος. Αυτή η αύξηση του ύψους κύματος ονομάζεται *ρήχωση* (shoaling) [18].



Σχήμα 2.2. Σχηματική απεικόνιση φαινομένου ρήχωσης (shoaling).

Το φαινόμενο της *περίθλασης* (diffraction) παρατηρείται όταν συμβαίνουν απότομες αλλαγές στο ύψος κύματος, κάτι το οποίο μπορεί να συμβεί όταν το κύμα έρχεται σε επαφή με ένα

εμπόδιο που εκτείνεται μέχρι την επιφάνεια του κύματος. Πίσω από την κατασκευή δεν υπάρχουν κύματα και, όπως ακριβώς συμβαίνει και με το φως από της διαμορφώνεται μια 'σκιά' του κυματικού πεδίου.

Στις επόμενες δύο φωτογραφίες μπορεί να παρατηρήσει κανείς και τα τρία αυτά φαινόμενα, όπως παρατηρούνται στη φύση.



Σχήμα 2.3. Τα φαινόμενα της ρήχωσης, διάθλασης, περίθλασης και θραύσης, όπως παρατηρούνται στη φύση.

Θραύση κυματισμών μπορούμε να είτε στα βαθιά νερά είτε στα ρηχά, αλλά είναι δύο διαφορετικοί μηχανισμοί θραύσης. Η θραύση στα βαθιά συμβαίνει κυρίως λόγω υπερβολικής προσφερόμενης ενέργειας από τον άνεμο, κάτι το οποίο οδηγεί στη δημιουργία κυμάτων μεγάλης καμπυλότητας. Ως όριο θραύσης στα βαθιά έχει οριστεί το $H_0/L_0 \approx 0.17$ [18].

Στα ρηχά τα κύματα θραύονται, καθώς λόγω ρήχωσης το ύψος κύματος μεγαλώνει διαρκώς μέχρι που κάποια στιγμή το κύμα γίνεται ασταθές με αποτέλεσμα την εκτόνωση της ενέργειας. Το είδος της θραύσης, σύμφωνα με τον εμπειρικό τύπο του Battjes [19], μεταβάλλεται και μάλιστα το είδος της θραύσης εξαρτάται από μια παράμετρο, που αναφέρεται ως surf zone parameter ζ . Στο παρακάτω Σχήμα 2.4 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της θραύσης για διάφορες τιμές της παραμέτρου ζ .

$\zeta \rightarrow$	≈ 0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
Breaker Type	Spilling		Plunging		Collapsing/ Surging		None (Reflection)
κ	0.8	1.0	1.1	1.2			
N	6–7	2–3	1–2	<1	<1		
r	10^{-3}	10^{-2}	0.1	0.4	0.8		

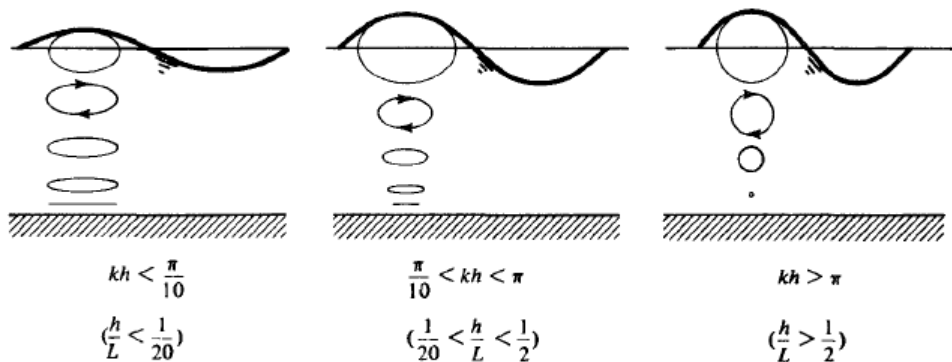
κ = breaking index; N = number of waves in surf zone; r = reflection from beach.
Source: Battjes (1974).

Σχήμα 2.4. Χαρακτηριστικά θραύσης κυματισμών και surf zone parameter ζ [18].

2.3 Κινηματικά χαρακτηριστικά και πεδίο πίεσης υπό οδεύον κύμα

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν οι διάφορες μεταβολές που υπόκεινται το κύμα καθώς διαδίδεται και ειδικά πως διαμορφώνεται υπό την αλληλεπίδραση του με τον πυθμένα ή άλλες κατασκευές που συναντά κατά τη διάδοσή του. Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί επιγραμματικά τι συμβαίνει στα υγρά σωματίδια κάτω από την επιφάνεια και πως επηρεάζονται από ένα οδεύον κύμα. Αυτό που πρέπει αρχικά να οριστεί είναι η ταχύτητα των υγρών μορίων, η οποία είναι κάτι τελείως διαφορετικό από την ταχύτητα διάδοσης του κύματος καθώς μπορεί να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μικρότερη (αναφερόμαστε κυρίως στην οριζόντια ταχύτητα u).

Το βασικό χαρακτηριστικό της κίνησης των υγρών μορίων είναι η κίνηση τους σε κυκλικές ή περίπου κυκλικές τροχιές στα βαθιά νερά ($1/2 < d/L$), που γίνονται ελλειπτικές στα ενδιάμεσα και ρηχά νερά, όταν δηλαδή το κύμα πια αλληλεπιδρά με τον πυθμένα ($1/20 < d/L < 1/2$ για ενδιάμεσα νερά και $d/L < 1/20$) [20].



Σχήμα 2.5. Τροχιές υγρών σωματιδίων υπό οδεύον κύμα, για βαθιά, ενδιάμεσα και ρηχά νερά [20].

Ένα ακόμα σημαντικό χαρακτηριστικό της κίνησης των υγρών σωματιδίων υπό την επίδραση του κύματος είναι ότι η επίδραση του κύματος εξασθενεί με το βάθος με αποτέλεσμα τόσο η ταχύτητα όσο και η δυναμική πίεση να μειώνονται. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, αλλά και των ταχυτήτων και της πίεσης σε σχέση με το βάθος είναι οι παρακάτω:

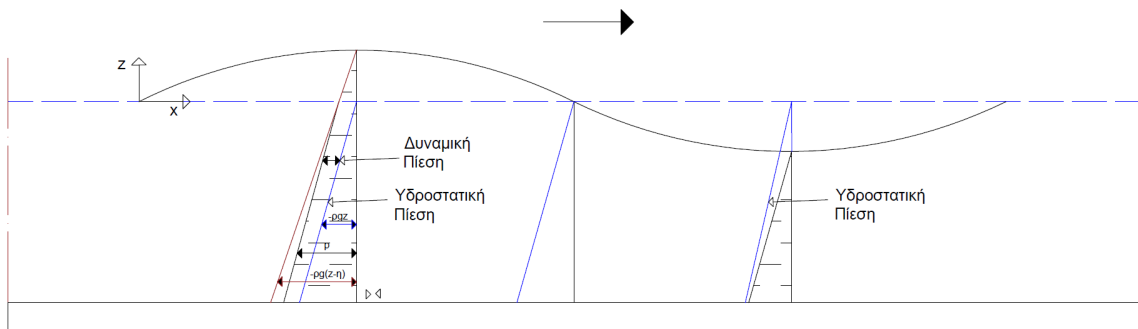
$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi t}{T} - \frac{2\pi x}{L}\right) \quad (2.2)$$

$$u(x, z, t) = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.3)$$

$$w(x, z, t) = \frac{H}{2} \sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.4)$$

$$p(x, z, t) = -\rho g z + \rho g \eta(x, t) \left(\frac{\cosh kh(1+\xi)}{\cosh kh}\right) = -\rho g z + \rho g \eta(x, t) K_p(z) \quad (2.5)$$

Η Εξίσωση 2.5 δίνει τη συνολική πίεση σε κάθε σημείο κατά μήκος όλου του βάθους της υδάτινης στήλης. Το πρώτο μέλος της εξίσωσης αφορά την υδροστατική πίεση ($p_0(z)$ - hydrostatic pressure), η οποία θα υπήρχε και χωρίς την ύπαρξη κυματικής διαταραχής, ενώ το δεύτερο μέλος αφορά τη δυναμική πίεση ($p^+(x, z, t)$ - dynamic or excess pressure), και ο όρος $K_p(z)$ είναι ο συντελεστής απόκρισης της δυναμικής πίεσης κάτω από την επιφάνεια της ελεύθερης επιφάνειας του ύδατος. Είναι προφανές ότι χωρίς την ταλάντωση της ελεύθερης επιφάνειας η πίεση θα ήταν καθαρά υδροστατική. Αλλά, η κατακόρυφη επιτάχυνση των υγρών μορίων του ύδατος είναι απόλυτα συσχετισμένη με την κυματική διαταραχή, και συγκεκριμένα είναι 180° εκτός της φάσης της μετατόπισης της ελεύθερης επιφάνειας. Αυτό συμβάλλει στην τροποποίηση της πίεσης από καθαρά υδροστατική σε αυτό που ορίστηκε με την Εξίσωση 2.5. Ως αποτέλεσμα, όταν έχουμε θετική μετατόπιση της ελεύθερης επιφάνειας η πίεση είναι μικρότερη από την υδροστατική πίεση ανταποκρινόμενη στην αντίστοιχη μετατόπιση, αλλά μεγαλύτερη από την υδροστατική πίεση ανταποκρινόμενη στην ελεύθερη στάση σε κατάσταση ηρεμίας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν έχουμε αρνητική μετατόπιση. Τα παραπάνω περιγράφονται αναλυτικά στο παρακάτω Σχήμα 2.6:

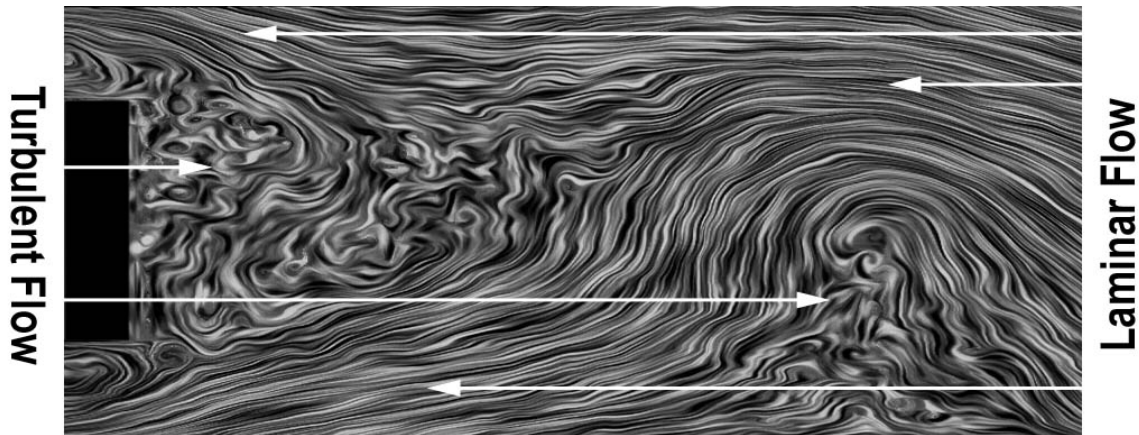


Σχήμα 2.6. Υδροστατική και υδροδυναμική συνιστώσα πίεσης υπό οδεύον κύμα.

2.4 Γενικές ιδιότητες της Τύρβης

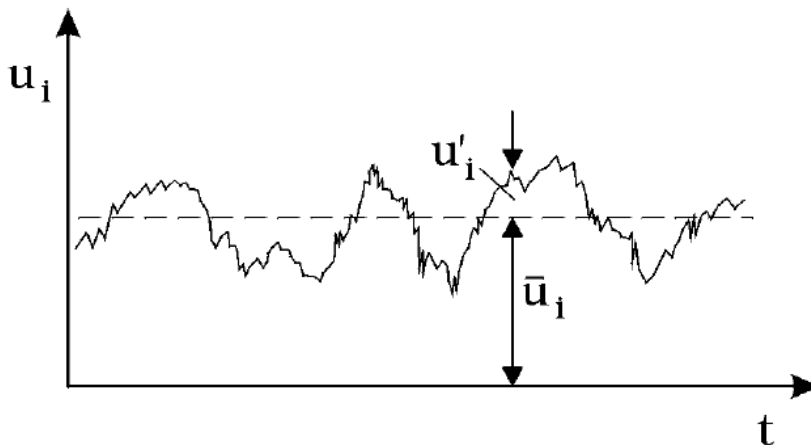
Η **Τύρβη** ή τυρβώδης κίνηση των υγρών μορίων, όπως μελετήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, μπορεί να προσδιορισθεί σύμφωνα με τον **ορισμό** κατά Hinze (1975) [21] [22], ως μια τυχαία κατάσταση (irregular condition) ροής, στην οποία διάφορες παράμετροι της ροής παρουσιάζουν τυχαία μεταβολή στο χρόνο και στο χώρο, που όμως μπορούν να διακριθούν και να υπολογιστούν οι μέσες στατιστικά τιμές τους. Πολλοί ερευνητές για την περιγραφή της τύρβης αναφέρονται στη στροβιλιζόμενη κίνηση, η οποία αναφέρεται στις μικρές και μεγάλες δίνες που διαμορφώνονται τοπικά, ειδικά όπου οι στροβιλισμοί είναι πολύ έντονοι.

Από την ανάλυση των λύσεων των εξισώσεων Navier-Stokes, ή πιο συγκεκριμένα των οριακών στρωμάτων κατά την κίνηση, φαίνεται ότι η τύρβη οφείλεται σε αποσταθεροποίηση της ροής, η οποία προηγουμένως μπορούσε να θεωρηθεί στρωτή. Από αυτή την ανάλυση προκύπτει ότι οι μεγάλες δίνες φέρουν τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας και άρα είναι σε μεγάλο βαθμό υπεύθυνες για την πρόκληση διάχυσης τύρβης εντός της κύριας ροής.



Σχήμα 2.7. Στρωτή και τυρβώδης ροή.

Τέλος, σε αυτή την εργασία θα θεωρήσουμε ως τύρβη κάποιες τυχαίες διακυμάνσεις x' μιας παραμέτρου, που μπορεί να είναι είτε η ταχύτητα των υγρών σωματιδίων προς κάποια διεύθυνση ή η πίεση κλπ, σε σχέση με τη μέση τιμή \bar{x} της αντίστοιχης παραμέτρου ως προς τη φάση του κυματισμού ωt .



Σχήμα 2.8. Διακύμανση τιμής παραμέτρου από τη μέση τιμή της[23].

2.5 Νόμος Kolmogorov - Energy cascade

Ως Energy Cascade αναφέρεται στη βιβλιογραφία η μεταφορά ενέργειας από τις μεγάλες κλίμακες-δίνες της κίνησης του ρευστού στις μικρές κλίμακες, η οποία και καλείται direct energy cascade, ενώ όταν συμβαίνει το αντίστροφο, δηλαδή έχουμε μεταφορά ενέργειας από τις μικρές στις μεγάλες κλίμακες- δίνες, καλείται inverse energy cascade.

Για την τυρβώδη κινητική ενέργεια $E(\kappa)d\kappa$ ισχύει ότι:

$$k = \int_0^{\infty} E(\kappa)d\kappa \quad (2.6)$$

όπου k είναι η κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας της κυμαινόμενης τυρβώδους ταχύτητας u' , και επομένως η $E(k)$ συνδέεται με το μετασχηματισμό κατά Fourier της k [21].

Επίσης, η τύρβη θεωρείται ότι πάντα διασπείρεται εντός της ροής και γι αυτό θεωρείται ότι η $E(k)$ εξαρτάται, εξ ορισμού, από την παράμετρο ϵ , που αποτελεί το ρυθμό με τον οποίο οι μεγάλες δίνες προσφέρουν ενέργεια στο σύστημα ($\epsilon = -dk/dt$). Από διαστατική ανάλυση, και επειδή αυτό επιβεβαιώνεται και από τις μετρήσεις και τα πειράματα που έχουν γίνει, η κινητική ενέργεια ανά μονάδα μάζας k , μπορεί να εκφραστεί με τις παραμέτρους ϵ και l , όπου l είναι το χαρακτηριστικό μήκος των μεγάλων δινών, και επομένως έχουμε [21] [24]:

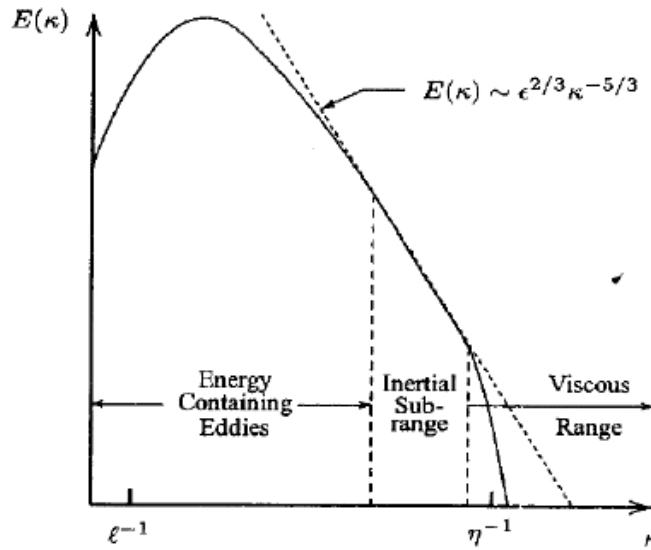
$$\epsilon \sim \frac{k^{3/2}}{l} \implies k \sim (\epsilon l)^{2/3} \quad (2.7)$$

Ο Kolmogorov υπέθεσε ότι για πολύ μεγάλους αριθμούς Reynolds, υπάρχει ένα μεγάλο εύρος δινών με μέγεθος ανάμεσα στις μεγαλύτερες και τις μικρότερες, για τις οποίες η διαδικασία μεταφοράς ενέργειας (cascade process) δεν ακολουθεί στατιστικά τη συμπεριφορά των δινών που έχουν και φέρουν ενέργεια (energy-containing eddies), και επομένως καλεί αυτή την περιοχή ως αδρανειακό υπο-εύρος δινών, όπου η ενέργεια $E(k)$ εξαρτάται μόνο από το ϵ και το κ (κυματαριθμός). Άρα, τελικά, έχουμε ότι [21]:

$$E(\kappa) = C_\kappa \epsilon^{2/3} \kappa^{-5/3}, \quad \frac{1}{l} \ll \kappa \ll \frac{1}{\eta} \quad (2.8)$$

όπου C_κ είναι η λεγόμενη σταθερά Kolmogorov, η οποία από πειράματα έχει βρεθεί ότι είναι περίπου ≈ 1.5 .

Ένα τυπικό φάσμα ενέργειας φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.9, όπου παρουσιάζεται και η ευθεία που προκύπτει από την υπόθεση Kolmogorov για το αδρανειακό υπο-εύρος.



Σχήμα 2.9. Μορφή φάσματος ενέργειας για τυρβώδη ροή (λογαριθμικό διάγραμμα - log-log scales).[21]

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Επομένως, κατά τη μεταφορά ενέργειας από τις μεγάλες στις μικρές δίνες, η οποία οδηγεί τελικά στη διάχυση της ενέργειας λόγω τριβής, υπάρχει ένα αδρανειακό υπό-εύρος με ενδιάμεσου μεγέθους δίνες, όπου το φάσμα ενέργειας εκφράζεται από την Εξίσωση 4.13 και επομένως έχει κλίση $-5/3$. Αντίστοιχα, το φάσμα που αφορά τις διακυμάνσεις της πίεσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο, και φαίνεται ότι σε αυτή την περίπτωση η κλίση του φάσματος ενέργειας, στην περιοχή του αδρανειακού υπό-εύρους, είναι $-7/3$ [25]:

$$\pi(k) = \alpha \rho^2 \epsilon^{4/3} k^{-7/3} \quad (2.9)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού και α σταθερά, και ισχύει $\alpha = 1.32C^2 = 2.97$.

3 Πειραματικές Διατάξεις

Σε πλαίσιο αυτής της εργασίας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακά πειράματα στο *Laboratory of Fluid Mechanics of Civil Engineering and Geoscience* στο *Delft University of Technology* και στο *Εργαστήριο Λιμενικών Έργων* του *Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*.

Τα πειράματα αυτά είχαν ως στόχο να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα ενός πορώδους βυθισμένου κυματοθραύστη αφενός στη δημιουργία ενός τεχνητού οικοτόπου, ο οποίος θα έχει τη δυνατότητα όχι μόνο να φιλοξενήσει αλλά και να προσελκύσει θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα, και αφετέρου στην προστασία μιας ακτής από τη διείσδυση ανεμογενών κυματισμών, που προκαλούν παράκτια διάβρωση ή άλλα ανεπιθύμητα φαινόμενα, όπως αναρρίχηση κυματισμού μεγαλύτερη από την επιθυμητή και ούτω καθ' εξής.

Γι αυτό το λόγο διαμορφώθηκαν οι πειραματικές διατάξεις που περιγράφονται παρακάτω, με βασικό στόχο τη μέτρηση των κύριων υδροδυναμικών παραμέτρων τόσο στο εσωτερικό του πορώδους του κυματοθραύστη όσο στο εξωτερικό μέρος του. Οι παράμετροι που μετρήθηκαν είναι η ταχύτητα και η πίεση σε διάφορες θέσεις και βάθη εντός και στο περίγραμμα των διατομών που κατασκευάστηκαν και η μεταβολή της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού σε διάφορες θέσεις της προσήνεμης και της υπήνεμης πλευράς του κυματοθραύστη.

Τα πειράματα έγιναν για τέσσερις διαφορετικές διατομές κυματοθραυστών (SPB1, SPB2, SPB3 & SPB4) και για διάφορες στάθμες νερού. Τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν στο *Laboratory of Fluid Mechanics of Civil Engineering and Geoscience* είναι τα εξής:

- **Laser Doppler Velocimeter (LDV)**: για την ταυτόχρονη μέτρηση της οριζόντιας και της κατακόρυφης συνιστώσας της ταχύτητας, στο εσωτερικό και στο εξωτερικό μέρος της ύφαλης κατασκευής.
- **Acoustic Doppler Velocimeter (ADV)**: για την ταυτόχρονη μέτρηση και των τριών συνιστωσών της ταχύτητας, στο εσωτερικό και στο εξωτερικό μέρος της ύφαλης κατασκευής.
- **Pressure gauges** (Μετρητές πίεσης): για την καταγραφή της μεταβολής της υδροδυναμικής πίεσης, αφού πρώτα είχε αφαιρεθεί η υδροστατική πίεση σε κατάσταση ηρεμίας.
- **Wave gauges** (Μετρητές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας): για την καταγραφή της μεταβολής της στάθμης του ύδατος λόγω του κυματισμού. Χρησιμοποιήθηκαν επτά μετρητές συνολικά, ώστε να είναι εφικτός ο εντοπισμός και η αφαίρεση των ανακλάσεων του κυματισμού από τα δύο άκρα της διώρυγας.
- **EMS**: για την καταγραφή της οριζόντιας συνιστώσας της ταχύτητας σε δύο θέσεις της κατασκευής (προσήνεμη και υπήνεμη θέση στο μέσο βάθος περίπου).

Ενώ στο *Εργαστήριο Λιμενικών Έργων* χρησιμοποιήθηκαν:

- **Wave gauges** (Μετρητές ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας): για την καταγραφή

3. Πειραματικές Διατάξεις

της μεταβολής της στάθμης του ύδατος λόγω του κυματισμού στην προσήνεμη και την υπήνεμη θέση για τον προσδιορισμό της απομείωσης της ενέργειας του κύματος λόγω της ύπαρξης της ύψαλης κατασκευής (SPB).

Στις επόμενες υπό-ενότητες περιγράφονται αναλυτικά οι πειραματικές διατάξεις, οι γεωμετρίες των διατομών αλλά και οι θέσεις μέτρησης των διάφορων παραμέτρων για κάθε όργανο που χρησιμοποιήθηκε. Τέλος, θα γίνει μια συνοπτική αναφορά στις κλίμακες ομοιότητες σύμφωνα με τις οποίες, μπορεί να γίνει αντιστοίχιση των διάφορων παραμέτρων ανάμεσα σε ένα πρωτότυπο μοντέλο και στο φυσικό ομοίωμά του υπό κλίμακα. Στη δική μας περίπτωση, δεν γίνεται προσομοίωση κάποιου πρωτοτύπου μοντέλου, αλλά σε κάθε περίπτωση είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε τον τρόπο μετατροπής των παραμέτρων που μετρήθηκαν σε 'φυσικές' διαστάσεις.

3.1 Πειραματική διάταξη *Laboratory of Fluid Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geoscience*

Τα πειράματα στο Laboratory of Fluid Mechanics στο Delft πραγματοποιήθηκαν σε διώρυγα κυματισμών (wave flume), η οποία έχει μήκος 42 m, πλάτος 0.8 m και ύψος 1.0 m. Καθ' ύψος το υλικό είναι διαφανές γυαλί, που επιτρέπει την παρατήρηση των κυματισμών από τα πλευρικά τοιχώματα.



Σχήμα 3.1. Γενική εικόνα της διώρυγας κυματισμών.

Η κυματογεννήτρια του εργαστηρίου είναι τύπου εμβόλου, το οποίο έμβολο κινείται οριζόντια και πάντα διατηρώντας κατακόρυφο το μέτωπό της, ενώ μπορεί να διανύσει μέγιστη απόσταση 1 m και προς τις δύο κατευθύνσεις ως προς τη θέση ισορροπίας της. Έχει τη δυνατότητα να παράγει τόσο μονοχρωματικούς όσο και φασματικούς κυματισμούς και ένα βασικό χαρακτηριστικό της είναι ότι μπορεί και απορροφά ανακλώμενους κυματισμούς,

διότι διαθέτει ειδικό σύστημα ελέγχου ενεργητικής απόσβεσης ανακλώμενων κυματισμών, το οποίο μετράει τα ανακλώμενα κύματα και διορθώνει αναλόγως την κίνηση του εμβόλου της κυματογεννήτριας. Στη συγκεκριμένη διώρυγα έχει κατασκευαστεί επίσης και μια απορροφητική ακτή πολύ ήπιας κλίσης, η οποία και βρισκόταν στην υπήνεμη πλευρά των μοντέλων SPB1 και SPB2, που θα περιγραφούν αναλυτικά παρακάτω.



Σχήμα 3.2. Κυματογεννήτρια τύπου εμβόλου με διάταξη απορρόφησης ανακλώμενων κυματισμών.

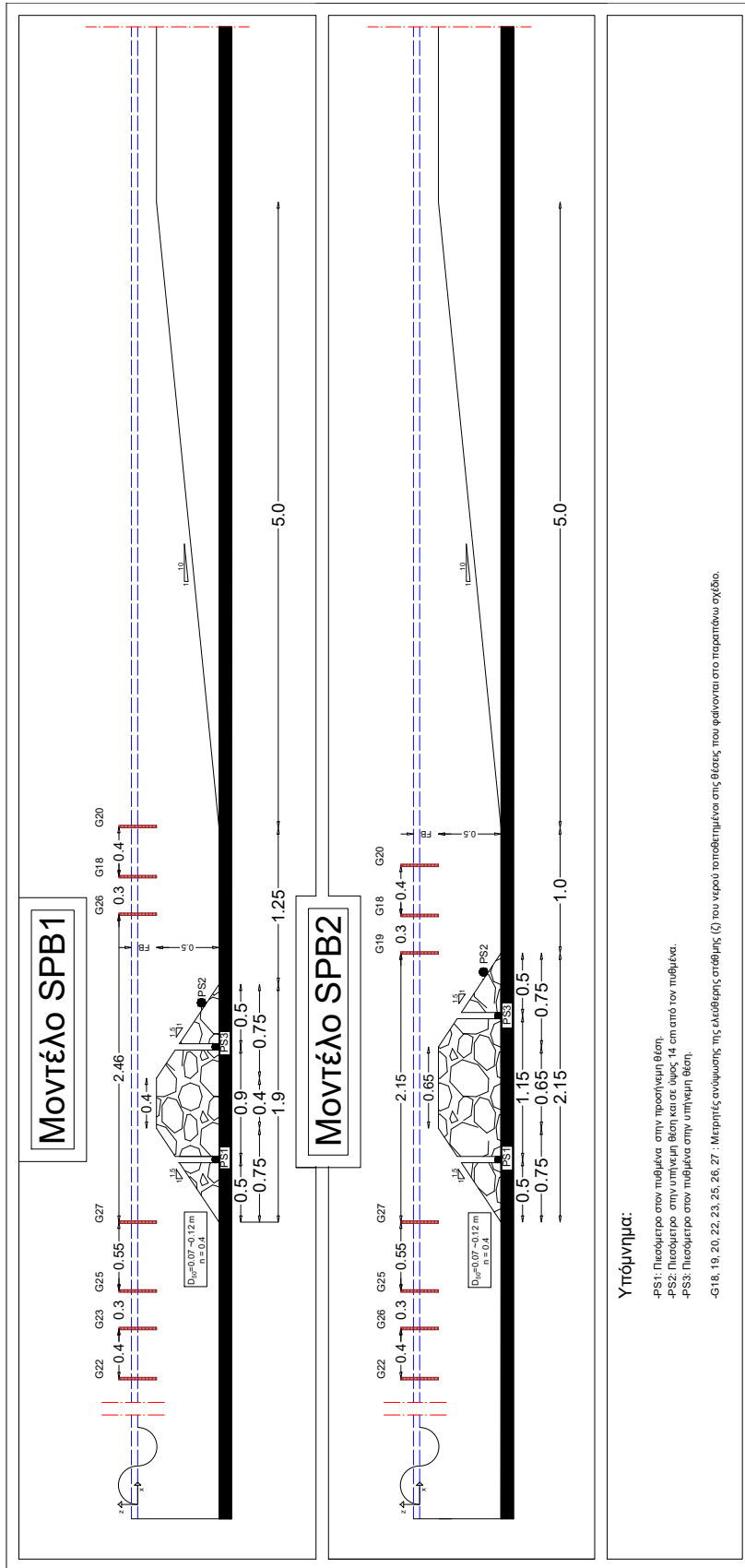
Για τη διενέργεια των πειραμάτων αυτών κατασκευάστηκαν δύο διαπερατοί ύφαλοι κυματοθραύστες (Submerged Permeable Breakwater, SPB) τραπεζοειδούς διατομής, με διάμετρο ογκολίθων $d_{50} = 7 \sim 12$ cm, πορώδες $n = 0.40$, κλίση πρανών 1/1.5 και ύψος μοντέλου 0.50 m. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι το πλάτος της στέψης, που για το 1^ο μοντέλο (SPB1) είναι 0.40 m, ενώ για το 2^ο (SPB2) είναι 0.65 m. Όλα τα κυματικά σενάρια και για τα δύο μοντέλα εφαρμόστηκαν για δύο διαφορετικά ελεύθερα ύψη πάνω από τις κατασκευές (Free Board), για 0.15 m (ύψος υδάτινης στήλης 0.65 m) και για 0.20 m (ύψος υδάτινης στήλης 0.70 m).

Στο επόμενο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη εντός της διώρυγας των μοντέλων SPB1 και SPB2. Σε αυτό φαίνεται η θέση των μοντέλων σε σχέση με τους μετρητές ανύψωσης, οι θέσεις των μετρητών πίεσης αλλά και η θέση της κατασκευής σε σχέση με την απορροφητική ακτή στα κατόντη των μοντέλων.

Στον παρακάτω Πίνακα 3.1 δίνονται συγκεντρωτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δυο μοντέλων SPB1 και SPB2:

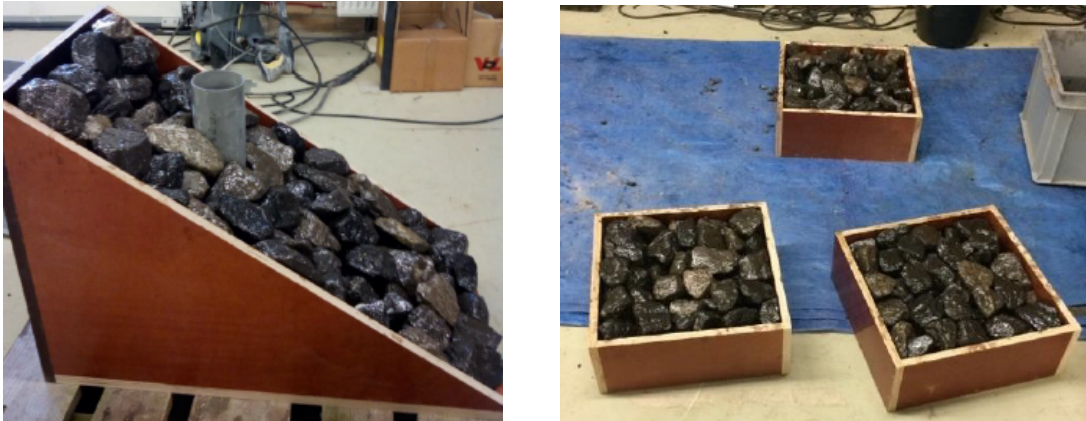
Πίνακας 3.1. Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών των μοντέλων SPB1 και SPB2.

Μοντέλο	Πορώδες	Πλάτος Στέψης (m)	Ύψος Μοντέλου (m)	Κλίση πρανών	Όγκος (m^3)
SPB1	0.40	0.40	0.50	1/1.5	0.58
SPB2	0.40	0.65	0.50	1/1.5	0.70



Σχήμα 3.3. Πειραματική διάταξη και σημεία μέτρησης της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (ζ) και των πιέσεων για τα μοντέλα SPB1 και SPB2.

Το μοντέλο SPB1 διαμορφώθηκε με τη ' συναρμολόγησή' πέντε ανεξάρτητων τμημάτων, τα οποία κατασκευάστηκαν με πέτρες διαμέτρου $d_{50} = 7 \sim 12$ cm, οι οποίες συγκολλήθηκαν με εποξειδική κόλλα. Ο λόγος για τον οποίο συγκολλήθηκαν οι πέτρες είναι ότι ήταν απαραίτητο να διαμορφωθούν δύο κατακόρυφες τρύπες διαμέτρου 8 cm στα πρηνή της κατασκευής, για την εισχώρηση του οργάνου ADV αλλά και για την τοποθέτηση των δύο πιεσόμετρων (PS1 & PS3), στον πυθμένα της κατασκευής, και για τη δημιουργία εγχάρσιων οπών διαμέτρου 3 cm στα κατασκευασμένα τμήματα με τα οποία έγινε η διαμόρφωση του κύριου σώματος της κατασκευής, ώστε να γίνουν οι μετρήσεις με τη χρήση του οργάνου LDV. Το μοντέλο SPB2 διαμορφώθηκε με τη προσθήκη ογκολίθων στο εσωτερικό τμήμα της κατασκευής προς την υπήνεμη πλευρά, έτσι ώστε να διαπλατυνθεί η στέψη κατά 0.25 m. Παρακάτω, παρουσιάζονται φωτογραφίες των τμημάτων αυτών:



Σχήμα 3.4. Αριστερά: Πλάγια όψη πρηνούς κλίσης 1/1.5, Δεξιά: Τρεις πλάκες ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 0.4 * 0.4m.

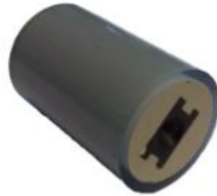


Σχήμα 3.5. Τελική άποψη κατασκευής: (α) Όψη πρηνούς προσήνεμης πλευράς (αριστερά), (β) Όψη πρηνούς υπήνεμης πλευράς (δεξιά).

Όπως φαίνεται από τις εικόνες του παραπάνω Σχήματος 3.5, κατασκευάστηκε και τοποθετήθηκε ξύλινο διαχωριστικό για την διαμόρφωση της δώρυγας στο επιθυμητό, ώστε να διαμορφωθεί μια στενή λωρίδα ίσου πλάτους με αυτό της κατασκευής, μέσα στην οποία είναι δυνατό να θεωρηθεί ότι έχουμε ομοιόμορφη ροή.

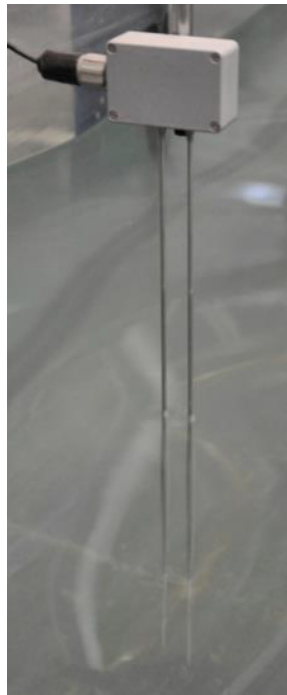
3. Πειραματικές Διατάξεις

Για τις μετρήσεις των πιέσεων χρησιμοποιήθηκαν τρία πιεσόμετρα, τα οποία τοποθετήθηκαν τα δύο (PS1 & PS3) στον πυθμένα των δύο οπών που διανοίχθηκαν στα δύο πρανή της κατασκευής και το τρίτο πάνω στο υπήνεμο πρανές και σε ύψος 14 cm από τον πυθμένα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα μόνο από τα δύο πιεσόμετρα που τοποθετήθηκαν στον πυθμένα των οπών, και η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 1000 Hz. Τα πιεσόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τροποποιημένοι αισθητήρες πίεσης της εταιρείας Honeywell. Οι αισθητήρες αυτοί τροποποιήθηκαν έτσι ώστε να χωράνε μέσα σε κυλινδρικό κέλυφος 20 cm και η μία τους πλευρά είναι ανοιχτή προς το νερό, ενώ η άλλη είναι συνδεδεμένη μέσω ενός εύκαμπτου πλαστικού σωλήνα με τον ατμοσφαιρικό αέρα.



Σχήμα 3.6. Τροποποιημένος αισθητήρας πίεσης της εταιρείας Honeywell.

Για τη μέτρηση της μεταβολής της ελεύθερης στάθμης χρησιμοποιήθηκαν επτά συνολικά μετρητές τύπου αντίστασης, τέσσερις στην προσήνεμη πλευρά και τρεις στην υπήνεμη, και η συχνότητα δειγματοληψίας ήταν 50 Hz.



Σχήμα 3.7. Μετρητής ανύψωσης της ελεύθερης στάθμης (ζ).

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν αφορούν τόσο *μονοχρωματικούς* όσο και *φασματικούς* κυματισμούς, και συγκεκριμένα έγιναν μετρήσεις για τέσσερα μονοχρωματικά και τρία

φασματικά κύματα, και στάθμη ύδατος 0.65 m, και αυτό επαναλήφθηκε και για στάθμη ύδατος 0.70 m. Οι καταγραφές για τους μονοχρωματικούς κυματισμούς ήταν τουλάχιστον 5 min, ενώ για τους φασματικούς κυματισμούς τουλάχιστον 20 min. Στην παρούσα εργασία μελετώνται μόνο μονοχρωματικοί κυματισμοί. Στον παρακάτω Πίνακα 3.2 δίνονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των σεναρίων που εφαρμόστηκαν.

Πίνακας 3.2. Κυματικά Σενάκια που εφαρμόστηκαν και για τα δύο μοντέλα (SPB1 και SPB2).

Βάθος νερού (m)	Κυματικό Σενάριο	Υψος Κύματος H (m)	Περίοδος Κύματος T (sec)	Σημαντικό Ύψος Κύματος H_s (m)	Περίοδος Κορυφής T_p (sec)	Θραύση	
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	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	

3.2 Πειραματική διάταξη Εργαστήριο Λιμενικών Έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τα πειράματα στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων (Ε.Λ.Ε.) πραγματοποιήθηκαν εντός της **Δεξαμενής Δ1**, η οποία έχει διαστάσεις 26.80 * 24.30 m και βάθος που μπορεί να είναι μέχρι και 1.10 m. Η **Δεξαμενή Δ1** είχε χωριστεί στη μέση περίπου και εντός αυτής της περιοχής διαμορφώθηκαν τέσσερις συνολικά διώρυγες, τα διαχωριστικά των οποίων είναι από φύλλα λαμαρίνας κατάλληλα σταθεροποιημένα. Περιμετρικά η **Δεξαμενής Δ1** έχει απορροφητικό πρανές από λιθορριπή κλίσης 1/1.5 και κατάλληλης διαμέτρου, ώστε να εξασφαλίζεται ο μικρότερος δυνατός συντελεστής ανάκλασης.

Για την παραγωγή των κυμάτων χρησιμοποιήθηκε η κυματογεννήτρια του Ε.Λ.Ε., η οποία είναι κατασκευασμένη από την αγγλική εταιρεία *HR Wallinford*, και αποτελείται από ένα ενιαίο μέτωπο μεγάλης επιφάνειας (6.0 * 1.20m), το οποίο κινείται μέσω ενός υδραυλικού συστήματος και διατηρείται πάντα σε κατακόρυφη θέση. Η συγκεκριμένη κυματογεννήτρια έχει τη δυνατότητα να παράγει τόσο μονοχρωματικούς όσο και φασματικούς κυματισμούς, και ελέγχεται μέσω του λογισμικού *WAVEDATA*, επίσης της εταιρείας *HR Wallinford*, με το οποίο έχει προμηθευτεί το Ε.Λ.Ε. .

3. Πειραματικές Διατάξεις

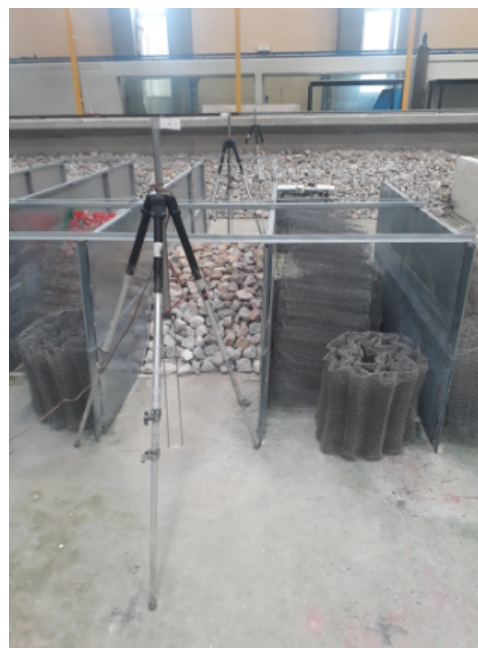


Σχήμα 3.8. (α) Όψη κυματογεννήτριας εταιρείας HR Wallinford (αριστερά), (β) Όψη μετρητή ανύψωσης (Wave Gauge) (δεξιά).

Για τα πειράματα αυτά κατασκευάστηκαν τα μοντέλα SPB3 και SPB4, η γεωμετρία των οποίων παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 3.3:

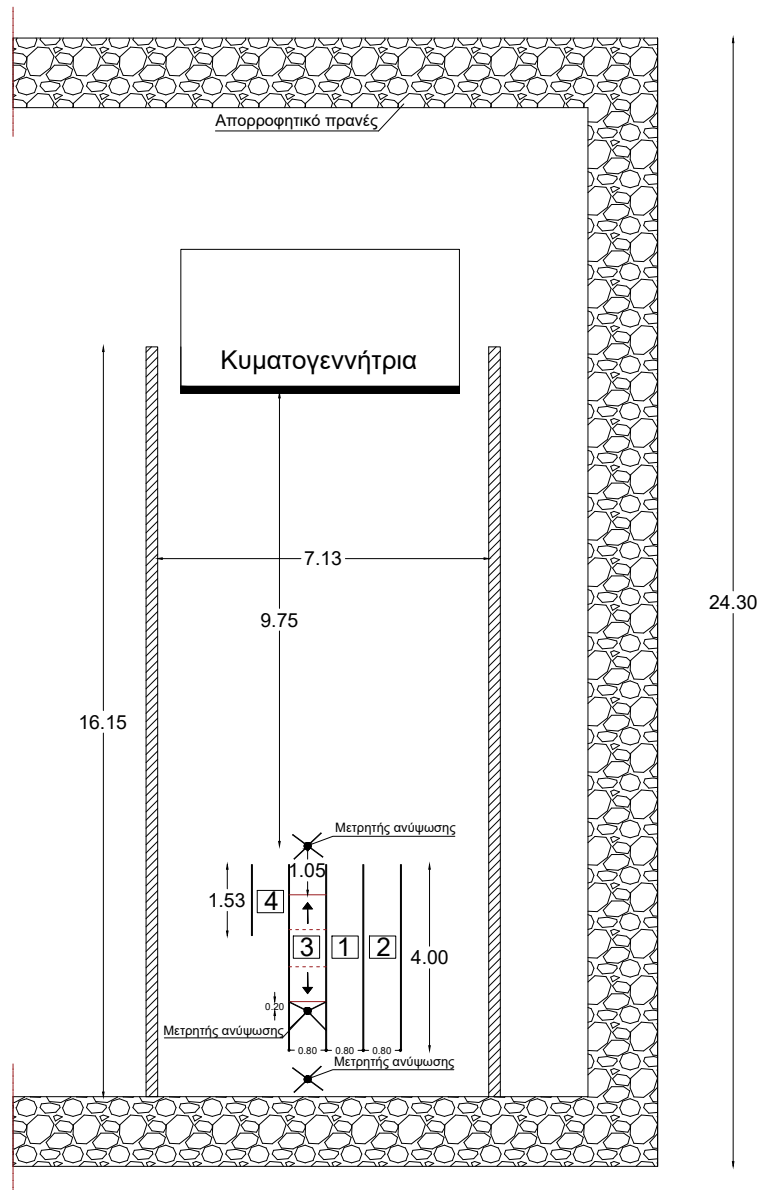
Πίνακας 3.3. Συγκεντρωτικός πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών των μοντέλων SPB3 και SPB4.

Μοντέλο	Πορώδες	Πλάτος Στέψης (m)	Ύψος Μοντέλου (m)	Διάμετρος Ογκολίθων (cm)	Κλίση Πρανών	Όγκος (m ³)
SPB3	0.45	0.80	0.50	7-8.5	1/1.5	0.78
SPB4	0.40	1.00	0.40	7-8.5	1/1.5	0.44



Σχήμα 3.9. Άποψη από τη τελική διάταξη εντός της διώρυγας '3' που κατασκευάστηκε το μοντέλο SPB3 και SPB4.

Στο παρακάτω Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται η κάτοψη της δεξαμενής Δ1 και η διάταξη των κατασκευασμένων διωρύγων.

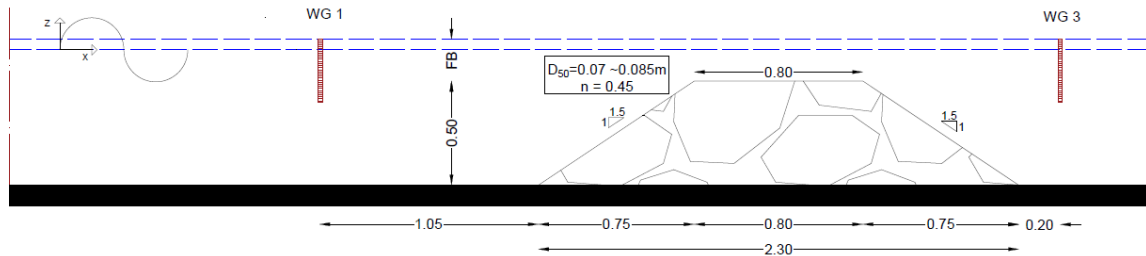


Σχήμα 3.10. Πειραματική διάταξη και σημεία μέτρησης της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (ζ) για το μοντέλο SPB3.

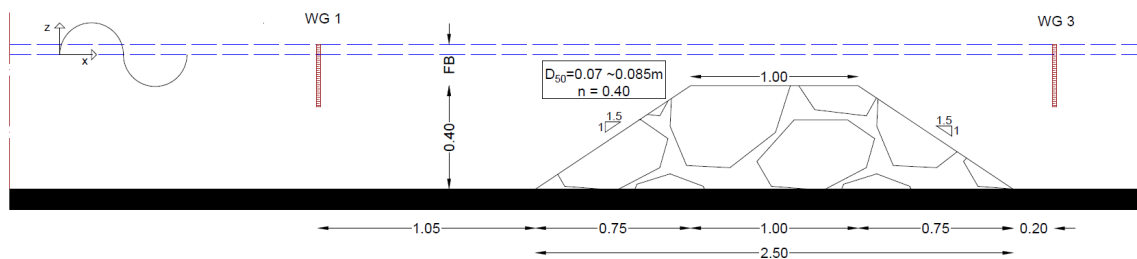
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω Σχήματα και Εικόνες, τα μοντέλα SPB3 και SPB4 κατασκευάστηκαν εντός της διώρυγας '3', η οποία έχει πλάτος 0.80 m και μήκος 4.0 m. Για τις μετρήσεις και τον καθορισμό του συντελεστή μετάδοσης τοποθετήθηκαν τρεις μετρητές ανύψωσης: (α) ένας στην είσοδο της διώρυγας και σε απόσταση 1.05 m από τον προσήνεμο πόδα της κατασκευής, για τη μέτρηση του εισερχόμενου κύματος, (β) ένας εντός της διώρυγας και σε απόσταση 0.20 m από τον υπήνεμο πόδα και (γ) ένας τρίτος εφεδρικός ακριβώς μπροστά από το απορροφητικό πρανές για την παρακολούθηση των ανακλάσεων από αυτό.

3. Πειραματικές Διατάξεις

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.11-12 η τομή των μοντέλων SPB3 και SPB4 με κάθε λεπτομέρεια των γεωμετρικών τους στοιχείων αλλά και των θέσεων των μετρητών ανύψωσης.



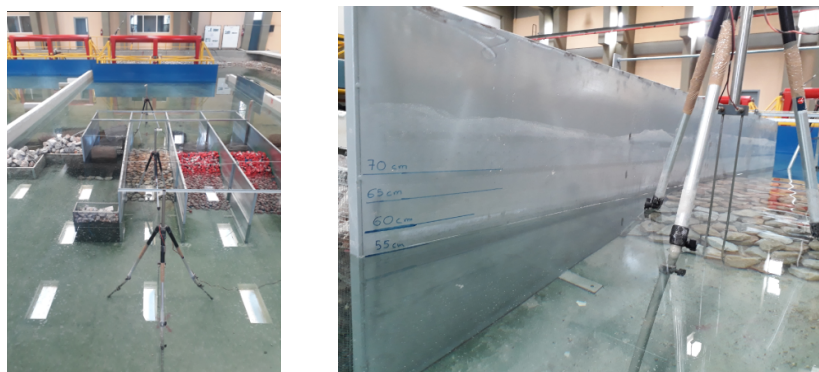
Σχήμα 3.11. Πειραματική διάταξη και σημεία μέτρησης της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (ζ) για το μοντέλο SPB3.



Σχήμα 3.12. Πειραματική διάταξη και σημεία μέτρησης της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας (ζ) για το μοντέλο SPB4.

Τα πειράματα που έγιναν αφορούν *μονοχρωματικούς* κυματισμούς και όσο αφορά το μοντέλο SPB3, έγιναν μετρήσεις για ελεύθερο ύψος ίσο με 0.05 m, δηλαδή στάθμη ύδατος 0.55 m, και για ελεύθερο ύψος 0.10 m, δηλαδή στάθμη ύδατος 0.60 m, ενώ για το μοντέλο SPB4 έγιναν μετρήσεις για ελεύθερο ύψος 0.10 m, δηλαδή στάθμη ύδατος 0.50m, και για ελεύθερο ύψος 0.20 m, δηλαδή στάθμη ύδατος 0.60 m. Για αυτά τα δύο μοντέλα έγιναν μετρήσεις έχοντας τοποθετηθεί φυσικές ποσειδωνίες μικρού μήκους, περίπου 5 cm ύψους, στην στέψη της κατασκευής, ώστε να ελεγχθεί η συμβολή τους στην απομείωση της ενέργειας του κύματος που μεταδίδεται στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής.

Στους παρακάτω δύο Πίνακες 3.4 και 3.5 παρουσιάζονται τα κυματικά σενάρια που εφαρμόστηκαν και στις δύο περιπτώσεις τόσο για το μοντέλο SPB3 και για το μοντέλο SPB4. Όπως γίνεται φανερό έγινε προσπάθεια να καλυφθεί ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων αλλά και υψών κύματος ώστε να γίνει εφικτή η διαμόρφωση αξιόπιστων διαγραμμάτων που θα μας δίνουν τις τάσεις για το συντελεστή μετάδοσης K_t .



Σχήμα 3.13. Τελική διάταξη διατομής SPB3 και SPB4 εντός της διώρυγας '3' και θέσεις μετρητών ανύψωσης.



Σχήμα 3.14. Α) Ποσειδωνίες πριν την τοποθέτησή τους επάνω στο μοντέλο (αριστερά) και β) το μοντέλο SPB3 με τοποθετημένες ποσειδωνίες στην στέψη του (δεξιά).

Πίνακας 3.4. Κυματικά Σενάρια που εφαρμόστηκαν και για το μοντέλο SPB3.

A/A	Ποσειδωνίες	Ελεύθερο Ύψος (m)	Περίοδος (sec)	Ύψος Κύματος (cm)
1	OXI	0.05	1.024	4.5
2-5	OXI	0.05	1.463	6.2-8.4
6-8	OXI	0.05	1.707	11.1-13.5
9	OXI	0.10	1.024	9.2
10-16	OXI	0.10	1.137	1.9-9.1
17-23	OXI	0.10	1.280	2.8-8.7
24-27	OXI	0.10	1.463	3.9-10.4
28-35	OXI	0.10	1.707	2.6-10.4
36-39	NAI	0.10	1.024	5.1-8.9
40-45	NAI	0.10	1.137	2.1-10.2
46-49	NAI	0.10	1.280	2.6-11.3
50-52	NAI	0.10	1.462	3.8-11.3
53-57	NAI	0.10	1.706	5.1-10.8
58-62	NAI	0.10	2.048	6.2-14.0

Πίνακας 3.5. Κυματικά Σενάρια που εφαρμόστηκαν και για το μοντέλο SPB4 με και χωρίς τοποθέτηση ποσειδωνιάς στη στέψη της κατασκευής.

A/A	Ποσειδωνίες	Ελεύθερο Ύψος (m)	Περίοδος (sec)	Ύψος Κύματος (cm)
1-5	OXI	0.10	1.024	4.6-10.6
6-11	OXI	0.10	1.138	5.3-10.1
12-17	OXI	0.10	1.280	3.6-12.0
18-23	OXI	0.10	1.463	4.3-11.6
24-30	OXI	0.10	1.707	8.6-14.4
31	OXI	0.10	2.048	9.2
32-33	OXI	0.10	1.137	8.0-11.8
34-35	OXI	0.10	1.280	5.7-7.1
36-40	OXI	0.10	1.462	5.7-13.9
41-43	OXI	0.10	1.706	6.2-9.9
44-46	OXI	0.10	2.048	7.8-12.8
47-48	NAI	0.10	1.024	4.6-7.5
49-51	NAI	0.10	1.138	6.2-10.1
52-53	NAI	0.10	1.280	6.6-12.0
54-55	NAI	0.10	1.463	8.3-11.6
56-59	NAI	0.10	1.707	8.2-14.4
60	NAI	0.10	2.048	9.2
61-64	NAI	0.20	1.024	4.4-15.0
65-68	NAI	0.20	1.138	3.3-12.2
69-71	NAI	0.20	1.280	5.3-9.9
72-76	NAI	0.20	1.463	6.9-12.5
77-79	NAI	0.20	1.707	6.1-9.8
80-84	NAI	0.20	2.048	7.3-12.5

3.3 Κλίμακες Ομοιότητας φυσικών ομοιωμάτων

Στόχος της παρούσας εργασίας δεν είναι η αντιστοίχιση των κατασκευασμένων μοντέλων με κάποιο πρωτότυπο (real-world prototype), αλλά παρ' όλα αυτά είναι χρήσιμο να γίνει μια αναφορά στην αντιστοίχιση των διάφορων φυσικών και γεωμετρικών παραμέτρων μέσω ενός συντελεστή κλίμακας ανάμεσα στα φυσικά μοντέλα και κάποιων υποθετικών πρωτοτύπων.

Συχνά παρατηρούνται σημαντικές αποκλίσεις ανάμεσα στις μετρημένες τιμές σε ένα φυσικό ομοίωμα και το αντίστοιχο πρωτότυπο μοντέλο και αυτό προκύπτει από τις επιδράσεις κλίμακας. Για την ορθή προσομοίωση των διαφόρων μηχανισμών που συντελούνται είναι απαραίτητο το φυσικό ομοίωμα να έχει την ίδια κλίμακα ομοιότητας και προς τις τρεις διευθύνσεις της ροής. Γενικά τα φαινόμενα κλίμακας αυξάνουν όσο αυξάνει η λεγόμενη γεωμετρική κλίμακα προσομοίωσης λ (scale ratio or scale factor), η οποία ορίζεται ως ο λόγος του γραμμικού μήκους μιας παραμέτρου στο πρωτότυπο μοντέλο προς το αντίστοιχο μήκος στο φυσικό ομοίωμα υπό κλίμακα [26][27][28]:

$$\lambda = \frac{L_P}{L_M} = \frac{\text{Characteristic length of real-world prototype}}{\text{Corresponding length in the model}} \quad (3.1)$$

Ο αντίστροφος λόγος της Εξίσωσης (3.1) λέγεται γεωμετρική κλίμακα του ομοιώματος.

Ένα φυσικό μοντέλο υπό κλίμακα είναι απολύτως όμοιο με το πρωτότυπο του και αποκλείονται επιδράσεις κλίμακας αν πετυχαίνεται **μηχανική ομοιότητα**, δηλαδή ικανοποιούνται τα παρακάτω τρία κριτήρια [27][28][29][30][31]:

- Γεωμετρική ομοιότητα
- Κινηματική ομοιότητα
- Δυναμική ομοιότητα

Η *Γεωμετρική* ομοιότητα απαιτεί ομοιότητα στο σχήμα, δηλαδή όλα τα μήκη του μοντέλου να είναι ακριβώς λ φορές μικρότερα από τα αντίστοιχα του πρωτότυπου. Επομένως, η σχέση ομοιότητας των μηκών, εμβαδών και όγκων σε σχέση με το πρωτότυπο είναι για λ , λ^2 και λ^3 αντίστοιχα.

Η *Κινηματική* ομοιότητα απαιτεί εκτός από γεωμετρική ομοιότητα ταυτόχρονα και ομοιότητα στην κίνηση των υγρών μορίων μεταξύ του μοντέλου και του πρωτοτύπου, δηλαδή απαιτούνται σταθεροί λόγοι χρόνου, ταχύτητας, επιτάχυνσης και παροχής.

Τέλος, η *Δυναμική* ομοιότητα απαιτεί εκτός από γεωμετρική και κινηματική ομοιότητα, ταυτόχρονα και οι λόγοι των δυνάμεων στο φυσικό μοντέλο και στο πρωτότυπο να είναι πανομοιότυποι[27][28].

Η *Δυναμική* ομοιότητα απαιτεί σταθερούς λόγους σε όλες τις δυνάμεις, δηλαδή (αδρανειακές δυνάμεις) $_P$ /(αδρανειακές δυνάμεις) $_M$ = (βαρυτικές δυνάμεις) $_P$ /(βαρυτικές δυνάμεις) $_M$ = ... = σταθερά. Στις ροές με ελεύθερη επιφάνεια συνήθως εφαρμόζεται το κριτήριο ομοιότητας κατά **Froude**, δηλαδή πρέπει ο αριθμός Froude να είναι ίσος ανάμεσα στο μοντέλο και το πρωτότυπο, δηλαδή $F_P = F_M$. Αυτό συμβαίνει διότι οι κυματισμοί διέπονται από τη δύναμη της βαρύτητας και επομένως κατά την αδιαστατοποίηση των βασικών εξισώσεων της ρευστομηχανικής, προκύπτει ένα αδιάστατο μονώνυμο σαν μέτρο του λόγου των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας, που είναι γνωστό ως αριθμός **Froude**[32]. Υπενθυμίζεται ότι ο αριθμός Froude δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$(\text{Froude number})F = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.2)$$

Στον παρακάτω Πίνακα 3.5 δίνονται οι λόγοι ομοιότητας κατά Froude των σημαντικότερων φυσικών παραμέτρων:

Πίνακας 3.6. Λόγοι ομοιότητας διάφορων σημαντικών παραμέτρων.

Παράμετρος	Διαστάσεις	Πολλαπλασιαστικός Συντελεστής
<i>Μήκος</i>	m	λ
<i>Επιφάνεια</i>	m^2	λ^2
<i>Όγκος</i>	m^3	λ^3
<i>Μάζα</i>	kg	$\lambda^3 * \rho_P / \rho_M$
<i>Ταχύτητα</i>	m/s	$\sqrt{\lambda}$
<i>Επιτάχυνση</i>	m/s^2	$a_P = a_M$
<i>Χρόνος</i>	s	$\sqrt{\lambda}$
<i>Δύναμη</i>	N	$\lambda^3 * \rho_P / \rho_M$
<i>Πίεση</i>	$Pa = N/m^2$	$\lambda * \rho_P / \rho_M$

4 Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα και οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν, για την ανάλυση των δεδομένων που αφορούν τόσο τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο *Laboratory of Fluid Mechanics of Civil Engineering and Geoscience* στο *Delft University of Technology* όσο και στο *Εργαστήριο Λιμενικών Έργων (Ε.Λ.Ε.)* του *Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου*. Αξίζει να αναφερθεί ξανά, ότι στο εργαστήριο του *Delft University of Technology*, σε ότι αφορά την παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν και μετρήσεις πιέσεων και ανυψώσεων της στάθμης, ενώ στο *Ε.Λ.Ε.* πραγματοποιήθηκαν μόνο μετρήσεις ανυψώσεων.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η μέθοδος φιλτραρίσματος των μετρήσεων της πίεσης, η οποία έγινε με τη χρήση του low pass/smoothing φίλτρου *'Savitzky-Golay'*. Αυτό το φίλτρο επιλέχθηκε ως καταλληλότερο ανάμεσα σε διάφορα κυρίως low pass φίλτρα που δοκιμάστηκαν, καθώς αποδείχτηκε ιδανικό για την εξομάλυνση (smoothing) των μετρήσεων της πίεσης, καθώς βελτιώνει το λόγο σήματος - θορύβου, το γνωστό ως signal-to-noise ratio, χωρίς να στρεβλώνει το δείγμα αφαιρώντας σημαντική πληροφορία. Στη συνέχεια θα περιγραφεί η στατιστική ανάλυση των φιλτραρισμένων δεδομένων της πίεσης, και τέλος θα περιγραφεί η μέθοδος Zero Up-Crossing, που εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό μιας σειράς μετρημένων υψών κύματος H (m) και περιόδων T (sec), από τα οποία υπολογίστηκε η μέση τιμή του $1/3$ των μεγαλύτερων κυμάτων $H_{1/3}$ και τη μέση περίοδο του κύματος T_m .

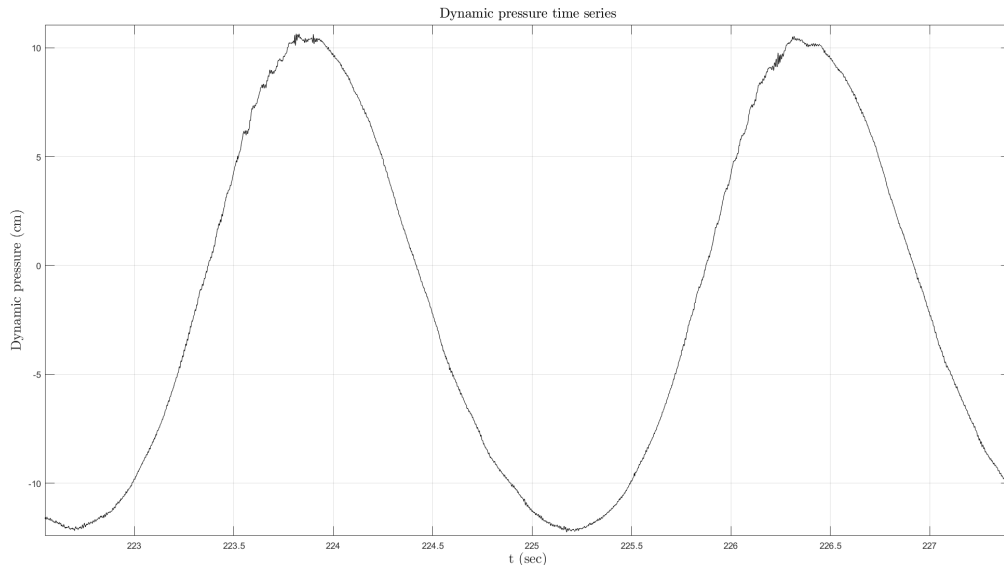
4.1 Φίλτρο Savitzky-Golay

Το φίλτρο *Savitzky-Golay* χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την εξομάλυνση των μετρήσεων της πίεσης, καθώς οι μετρητές αυτοί είναι πολύ ευαίσθητα όργανα και είναι σύνηθες να παρατηρείται θόρυβος. Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο είναι ότι ο σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση η τύρβη της πίεσης, η οποία όπως έχει οριστεί ήδη αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα, θεωρείται μια στιγμιαία και τυχαία (random) διακύμανση, και για αυτό το λόγο είναι σημαντικό να μην αφαιρεθούν μεγάλης συχνότητας (high frequency) διακυμάνσεις της, καθώς αυτό συνεπάγεται σημαντική χαμένη πληροφορία. Αντίθετα, για την ανάλυση των μετρήσεων της ανύψωσης της Μέσης Στάθμης δεν θεωρήθηκε αναγκαίο να γίνει κάποιο φιλτράρισμα, καθώς η επεξεργασία του δείγματος έγινε για την εξαγωγή γενικών στοιχείων για τα κύματα, όπως το ύψος και η περίοδος, η τιμή των οποίων δεν μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από το θόρυβο του οργάνου που είναι πολύ μικρότερης τάξης μεγέθους ($\approx O10^{-3}$). Στο παρακάτω Σχήμα 4.1 φαίνεται η μορφή των πρωτογενών δεδομένων.

Οι Savitzky & Golay πρότειναν μια μέθοδο εξομάλυνσης δεδομένων, γνωστή και ως πολυωνυμική εξομάλυνση (polynomial smoothing), που επιτυγχάνεται με μια διαδικασία που είναι γνωστή ως συνέλιξη (convolution), με την εύρεση δηλαδή μιας πολυωνυμικής εξίσωσης, που ταιριάζει διαδοχικά υποσύνολα που απαρτίζονται από γειτονικά μεταξύ τους στοιχεία των

4. Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

δεδομένων, κάνοντας χρήση της μεθόδου των γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων. Αυτό το φίλτρο μπορεί και διατηρεί καλύτερα σε σχέση με άλλα φίλτρα τις μεγάλες συχνότητες, διατηρώντας έτσι πληροφορία που σε άλλη περίπτωση θα χανόταν μαζί με την αφαίρεση του θορύβου, κάτι το οποίο είναι εξαιρετικής σημασίας στη συγκεκριμένη εργασία, που στόχο έχει την ανάλυση της τύρβης στην πίεση [33].



Σχήμα 4.1. Μορφή πρωτογενών στοιχείων μετρήσεων πίεσης.

Για καταγεγραμμένα στοιχεία δεδομένων, όπως είναι οι μετρήσεις πιέσεων, γίνεται η υπόθεση ότι κατά τη μέτρηση μιας μεταβλητής καταγράφονται τιμές που μεταβάλλονται αργά ανάμεσα στα διαδοχικά σημεία, αλλά ταυτόχρονα υπάρχει ο θόρυβος του οργάνου που παρεμβάλλεται και πιθανόν έπικαλύπτει αυτή τη μεταβολή. Έτσι είναι επιθυμητό να μειωθεί αυτός ο θόρυβος και να υπολογιστεί ένας "τοπικός μέσος όρος", ώστε να προσδιοριστεί η πραγματική μεταβολή της μεταβλητής.

Για μια χρονοσειρά με ισαπέχουσες χρονικά τιμές $f_i \equiv f(t_i)$, όπου $t_i \equiv t_o + i\Delta$, όπου Δ είναι μια σταθερά που αφορά την απόστασή μεταξύ των τιμών του δείγματος (constant sample spacing) και $i = \dots - 1, 0, 1, 2, \dots$, ο πιο απλός τρόπος φιλτραρίσματος των πρωτογενών δεδομένων είναι αντικαθιστώντας κάθε αρχική τιμή f_i με ένα γραμμικό συνδυασμό g_i αξιοποιώντας ταυτόχρονα κάποιες γειτονικές τιμές του δείγματος, δηλαδή:

$$g_i = \sum_{n=-n_L}^{n_R} C_n f_{i+n} \quad (4.1)$$

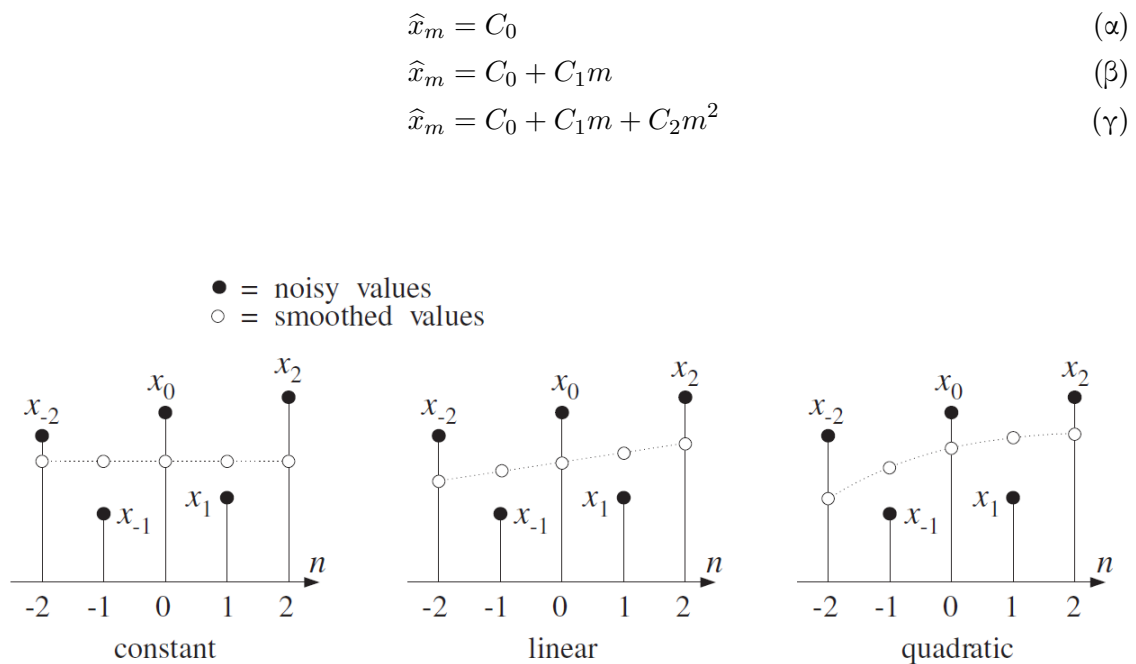
όπου n_L είναι τα χρονικά βήματα 'προς τα αριστερά' του σημείου εκκίνησης i ή αλλιώς τα προηγούμενα επιλεγμένα χρονικά βήματα, και n_R τα χρονικά βήματα 'προς τα δεξιά'.

Η απλούστερη μέθοδος φιλτραρίσματος είναι να θέσουμε $n_L = n_R$ και να υπολογίσουμε την τιμή g_i ως το μέσο όρο των f_{i-n_L} και f_{i+n_R} . Αυτό το φίλτρο καλείται moving window average και αντιστοιχεί και αντιστοιχεί στην Εξίσωση 4.1, για $C_n = 1/(n_L + n_R + 1)$. Αν η

υποκείμενη εξίσωση είναι σταθερή ή μεταβάλλεται γραμμικά με το χρόνο το αποτέλεσμα είναι αμερόληπτο από τις προηγούμενες και τις επόμενες τιμές. Παρόλα αυτά, όταν η υποκείμενη εξίσωση έχει μη μηδενική δεύτερη παράγωγο, η παραγόμενη συνάρτηση δεν θα είναι πια αμερόληπτη από τις γειτονικές τιμές, κάτι το οποίο και είναι ανεπιθύμητο. Για παράδειγμα, σε ένα τοπικό μέγιστο το moving window average φίλτρο πάντα θα μειώνει την τιμή της συνάρτησης σε αυτό το σημείο [34].

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα οι Savitzky & Golay πρότειναν την προσέγγιση της υποκείμενης εξίσωσης εντός του 'κινούμενου παραθύρου' (moving window) όχι με χρήση μιας σταθεράς, αλλά αντίθετα κάνοντας χρήση μιας πολυωνυμικής μεγαλύτερης τάξης: δηλαδή για κάθε σημείο f_i προσαρμόζουμε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων ένα πολυώνυμο σε όλα τα $n_L + n_R + 1$ σημεία του κινούμενου παραθύρου και μετά ορίζεται η τιμή g_i ως η μη τιμή του πολυωνύμου αυτού στο σημείο i . Αυτό το πολυώνυμο δεν θα ξαναχρησιμοποιηθεί, καθώς για το επόμενο σημείο f_{i+1} γίνεται η ίδια διαδικασία εξ' ολοκλήρου από την αρχή [34].

Στο επόμενο Σχήμα 4.2 φαίνονται 5 σημεία ενός δείγματος που παρουσιάζει 'θόρυβο', και γίνεται εξομάλυνση του δείγματος προσαρμόζοντας κατά σειρά ένα α) σταθερό σήμα (constant), β) ένα γραμμικό (linear) και τέλος γ) ένα πολυώνυμο δεύτερου βαθμού (quadratic) [33].

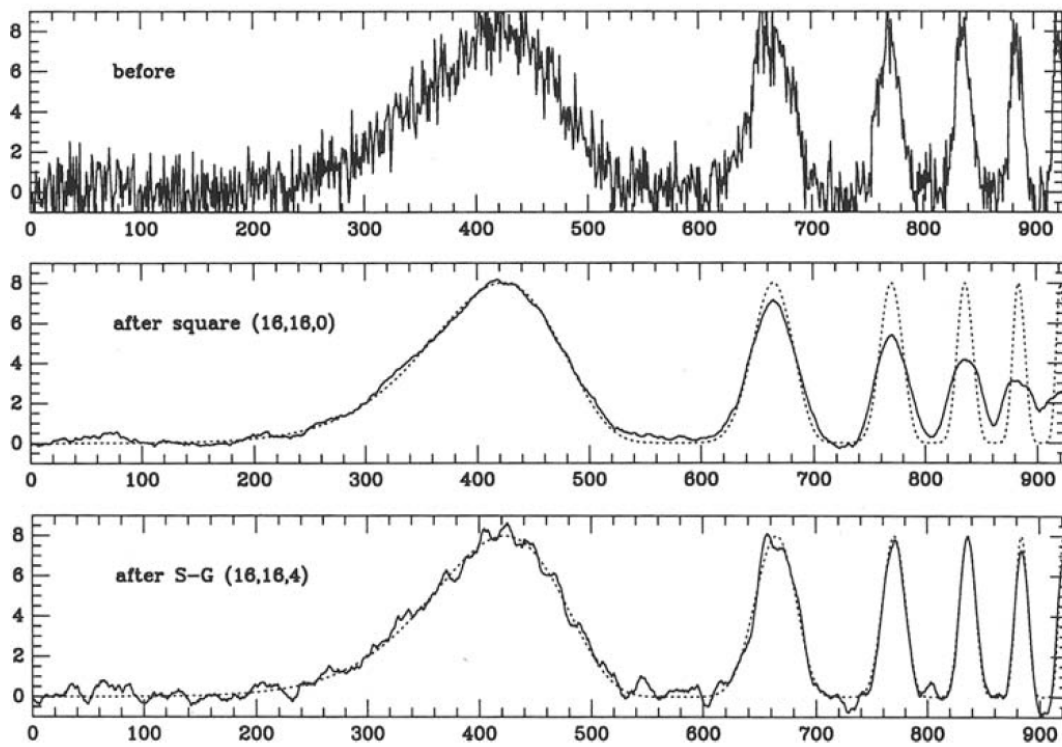


Σχήμα 4.2. Φιλτράρισμα δεδομένων (data smoothing) με πολυώνυμο $0, 1^{ου}, 2^{ου}$ βαθμού [33].

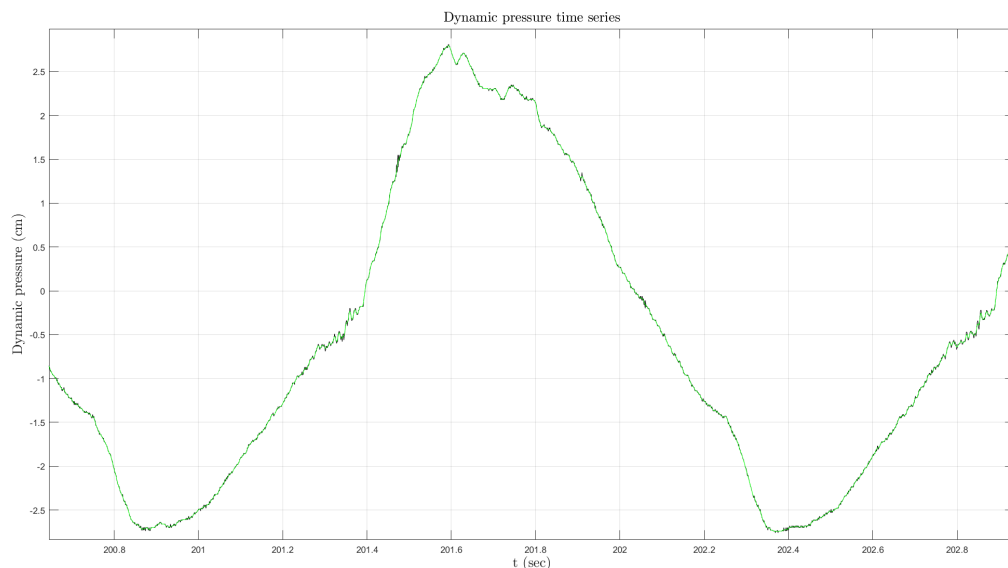
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα χρήσης φιλτραρίσματος ενός απλού moving window average φίλτρου και του Savitzky-Golay. Γίνεται φανερό αυτό που ειπώθηκε και παραπάνω ότι το moving window average φίλτρο μικραίνει πάντα τα τοπικά μέγιστα και αφαιρεί πολύ μεγάλες συχνότητες, που στην περίπτωση τυρβώδους ροής μπορεί να μην είναι θόρυβος, αλλά τυχασίες διακυμάνσεις της πίεσης, ενώ το Savitzky-Golay φίλτρο διατηρεί

4. Ανάλυση πειραματικών δεδομένων

και μεγαλύτερες συχνότητες και δεν υποβαθμίζει τα τοπικά μέγιστα. Τέλος, στο παρακάτω Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα δείγμα φιλτραρισμένο και αφιλτράριστο.



Σχήμα 4.3. Φιλτράρισμα δεδομένων με έντονο θόρυβο με χρήση moving window average φίλτρου και Savitzky-Golay φίλτρου [34].



Σχήμα 4.4. Παράδειγμα φιλτραρισμένου και αφιλτράριστου δείγματος μετρήσεων πιέσεων (χηματικό σενάριο 1-R2).

4.2 Στατιστική επεξεργασία πιέσεων

Η μέση τιμή μιας υδροδυναμικής μεταβλητής/ποσότητας, όπως είναι η δυναμική πίεση, p_i , μπορεί να οριστεί ως:

$$\bar{p}_i = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p_i dt \quad (4.2)$$

όπου t_0 είναι μια αυθαίρετη χρονική στιγμή.

Αυτή η προσέγγιση είναι γνωστή ως time averaging και απαιτεί η χρονική καταγραφή, που εδώ συμβολίζεται T , να είναι αρκετή ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί μια αξιόπιστη μέση τιμή. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι μια στιγμιαία τιμή θα δίνεται από τον τύπο [35]:

$$p_i = \bar{p}_i + p'_i \quad (4.3)$$

όπου p'_i είναι το κυμαινόμενο τμήμα (fluctuating part or fluctuation) της πίεσης p_i και \bar{p}_i είναι η μέση πίεση. Αυτή η υπόθεση καλείται Reynolds decomposition, και μπορεί να εφαρμοστεί για όλες τις υδροδυναμικές παραμέτρους.

Για να υπολογιστεί όμως η διακύμανση για μια παράμετρο, η τιμή της οποίας εμφανίζει περιοδικότητα, όπως είναι η πίεση υπό οδύον κύμα, είναι προφανές ότι δεν αρκεί να υπολογιστεί μια μέση τιμή, αλλά πρέπει για μεταβλητή η οποία έχει περίπου ημιτονοειδή διακύμανση, να υπολογιστεί η μέση τιμή ως προς τη φάση του κύματος, ο μέσος όρος των ομολόγων σημείων εντός της χρονοσειράς της πίεσης. Η Εξίσωση 4.4 δίνει τη μέση τιμή της πίεσης ως προς τη φάση του κύματος:

$$\bar{p}_i(x, y, z, \omega t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} p_i(x, y, z, \omega(t + kT)) \quad (4.4)$$

όπου N είναι ο αριθμός των στοιχείων απ' τα οποία προκύπτει ο μέσος όρος, T είναι η περίοδος του κύματος και p_i είναι η τιμή της στιγμιαίας πίεσης. Στο παρακάτω Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η μορφή της καταγραφής μετά το φιλτράρισμα και η υπολογισμένη μέση ως προς τη φάση του κύματος πίεση \bar{p}_i , καθώς και οι τυρβώδεις διακυμάνσεις της πίεσης p'_i .

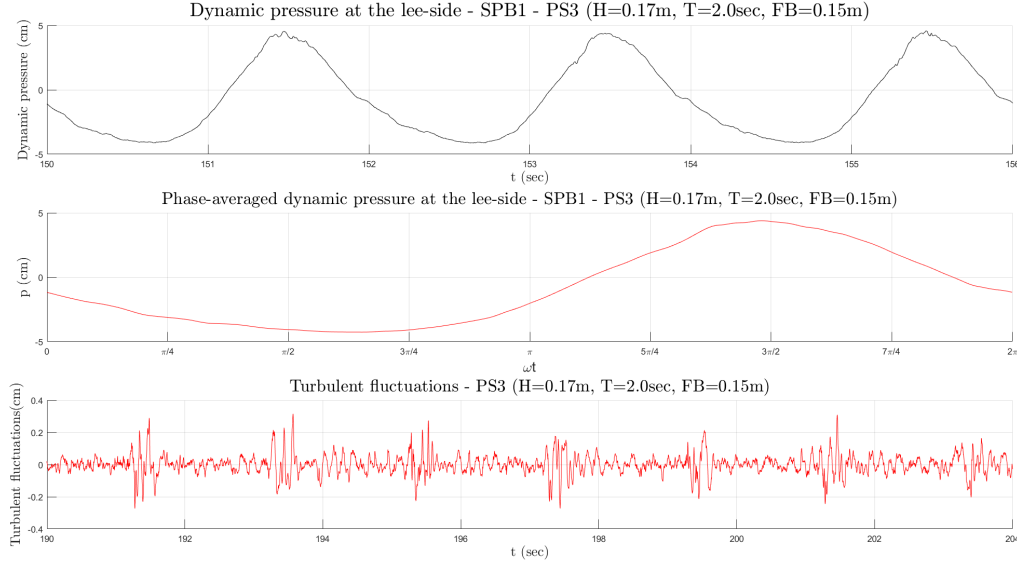
Τελικά, έχοντας υπολογίσει τη μέση ως προς τη φάση τιμή της πίεσης γίνεται εφικτό να υπολογιστεί και η στιγμιαία διακύμανση, για την περαιτέρω επεξεργασία του δείγματος των τυρβωδών διακυμάνσεων πλέον. Αυτό γίνεται αφαιρώντας από τη στιγμιαία τιμή τη μέση, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$p'_i(x, y, z, \omega(t + kT)) = p_i(x, y, z, \omega t') - \bar{p}_i(x, y, z, \omega t) \quad (4.5)$$

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

$$\omega t' = \omega(t + kT), (k = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (4.6)$$

4. Ανάλυση πειραματικών δεδομένων



Σχήμα 4.5. α) Καταγεγραμμένη χρονοσειρά πιέσεων στον πυθμένα της υπήνεμης θέσης, β) μέση τιμή πίεσης ως προς τη φάση του κύματος για αυτή την χρονοσειρά και γ) τθρβώδεις διακυμάνσεις της πίεσης .(μοντέλο SPB1 - κυματικό σενάριο 1-R3).

Έχοντας υπολογιστεί τα παραπάνω μεγέθη, μπορούν να οριστούν και να υπολογιστούν μερικά ακόμη σημαντικά στατιστικά μεγέθη, όπως είναι η διακύμανση σ (variance), η οποία δίνει πόσο μακριά ένα σύνολο (τυχαίων) αριθμών απλώνεται από τη μέση τιμή του. Επίσης, μπορεί να υπολογιστεί η μέση τετραγωνική ρίζα (root-mean-square) της δυναμικής πίεσης αλλά και των διακυμάνσεων της δυναμικής πίεσης, η οποία ουσιαστικά είναι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εξισώσεις υπολογισμού των συγκεκριμένων μεγεθών:

$$\sigma = var(p_i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^N |p_i - \bar{p}_i|^2 \quad (4.7)$$

$$p_{rms} = \sqrt{p^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^N |p_i|^2} \quad (4.8)$$

$$p'_{rms} = \sqrt{p^2} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=0}^N |p_i - \bar{p}_i|^2} \quad (4.9)$$

Όπως, όμως, υπόθηκε και παραπάνω είναι σημαντικό όταν το φαινόμενο είναι περιοδικό να υπολογίζεται η τυρβώδης ένταση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , η οποία για την παράμετρο της δυναμικής πίεσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

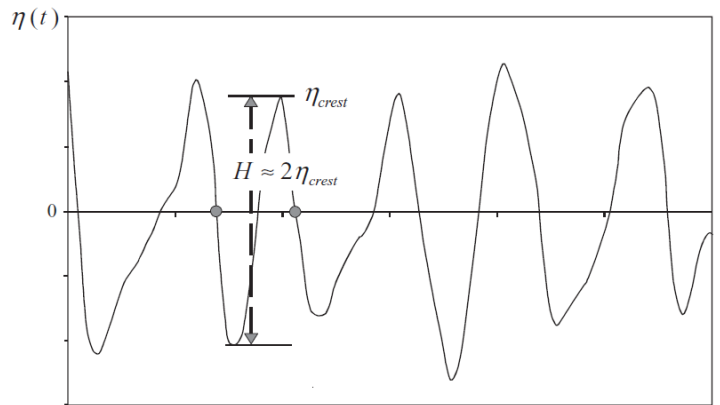
$$p'_{rms}(x, y, z, \omega t) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^N p^2(x, y, z, \omega(t + kT))} \quad (4.10)$$

4.3 Επεξεργασία Δεδομένων ανύψωσης ($\eta(t)$) -Zero up-crossing

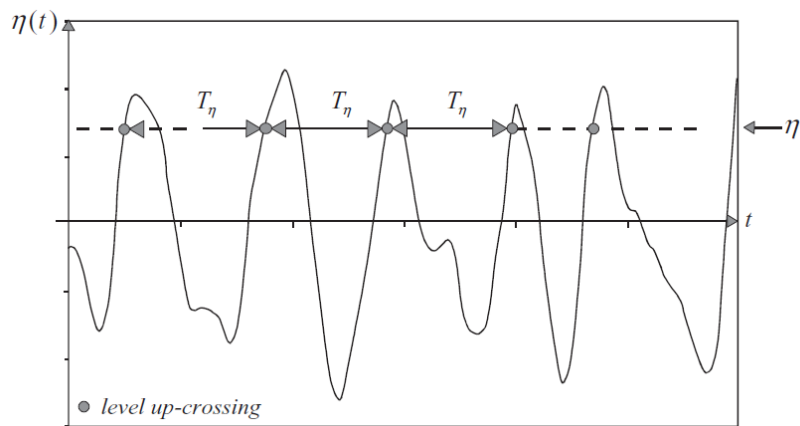
Οι μετρητές ανύψωσης δίνουν ως αποτέλεσμα μια χρονοσειρά ανυψώσεων γύρω από τη Στάθμη Ηρεμίας, σύμφωνα με το πως έχει οριστεί αυτή κατά το καλιμπράρισμα του οργάνου. Στόχο, επομένως, είναι αν επεξεργαστούμε στατιστικά αυτές τις χρονοσειρές ώστε να υπολογίσουμε τις βασικές παραμέτρους περιγραφής των πραγματικών κυματισμών. Από την ανάλυση των χρονοσειρών μπορούμε να ανακτήσουμε τις εξής στατιστικές και πραγματικές παραμέτρους των κυμάτων:

- H_{max} : μέγιστος μετρημένος ύψος κύματος
- H_{min} : ελάχιστος μετρημένος κύματος
- \bar{H} ή H_m ή H_{av} : το μέσο στατιστικό ύψος της καταγραφής
- $H_{1/n}$: το μέσο ύψος κύματος του υψηλότερου $\frac{100}{n}\%$ των υψών κύματος της καταγραφής. Συνήθως, χρησιμοποιείται το λεγόμενο σημαντικό ύψος κύματος H_s , το οποίο αντιστοιχεί στο μέσο ύψος του 33% των υψηλότερων υψών κύματος της καταγραφής, δηλαδή $H_s = H_{1/3}$.
- H_{m0} : το σημαντικό ύψος κύματος, όπως προσεγγίζεται από φασματική ανάλυση, και ισχύει $H_{m0} \approx 4\sqrt{m_0}$, όπου m_0 η ροπή μηδενικής τάξης του φάσματος κυμάτων. Στην περιοχή του χρόνου προσεγγίζεται από τη σχέση $H_s = 4\sigma$, όπου σ είναι η τυπική απόκλιση της καταγραφής της ελεύθερης επιφάνειας ($\eta(t)$).
- H_{rms} : το μέσο τετραγωνικό ύψος (root-mean-square height)
- \bar{T} ή T_m ή T_{av} : η μέση στατιστικά περίοδος της καταγραφής
- T_s : η χαρακτηριστική περίοδος, που αντιστοιχεί στη μέση περίοδο των κυμάτων, που αντιστοιχούν στο υψηλότερο 33% των υψών κύματος της καταγραφής.
- T_p : η περίοδος αιχμής, που αντιστοιχεί στη συχνότητα αιχμής f_p (peak frequency) της καταγραφής, η οποία ορίζεται ως η συχνότητα στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη τιμή του φάσματος.

Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε το χαρακτηριστικό ύψος κύματος $H_s = H_{1/3}$ και η μέση περίοδος του κύματος T_m . Αυτό έγινε με χρήση της μεθόδου Zero up-crossing, κατά την οποία υπολογίζεται μια σειρά από ύψη κύματος H_i , που αποτελούν στοχαστικά μεγέθη, θεωρώντας ότι κάθε ένα από αυτά ορίζεται ως η απόσταση ανάμεσα σε μια διαδοχική κορυφή και μια κοιλιά της καταγραφής, αναζητώντας δυο διαδοχικά τοπικά μέγιστα και ελάχιστα (η_{max} & η_{min}). Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και μια σειρά από κυματικές περιόδους, τα οποία επίσης αποτελούν στοχαστικά μεγέθη, ως η χρονική απόσταση ανάμεσα και μια κορυφή και μια κοιλιά της καταγραφής. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου γίνεται η υπόθεση ότι κάθε φορά ένα κύμα περνά και ακολουθεί ένα επόμενο με διαφορετικά χαρακτηριστικά [36]. Στα επόμενα δύο Σχήματα φαίνεται σε διαγράμματα ο τρόπος ορισμού των στοχαστικών μεγεθών του ύψους και της περιόδου του κύματος.



Σχήμα 4.6. Αποτίμηση στοχαστικών υψών H_i κυμάτων από την καταγραφή με τη μέθοδο Zero up-crossing [37].



Σχήμα 4.7. Αποτίμηση στοχαστικών περιόδων T_i κυμάτων από την καταγραφή με τη μέθοδο Zero up-crossing [37].

5 Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης των πιέσεων για όλα τα κυματικά σενάρια και διατάξεις πορωδών κυματοθραυστών (SPB1 και SPB2), που εφαρμόστηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Laboratory of Fluid Mechanics, Faculty of Civil Engineering and Geoscience στο Delft της Ολλανδίας. Αναλυτικότερα, στις παρακάτω υποενότητες θα παρουσιαστούν διαγράμματα που αφορούν: το Φάσμα Εύρους και Ενέργειας της *Δυναμικής Πίεσης* που μετρήθηκε, η Μέση ως προς τη Φάση του κύματος *Δυναμική Πίεση*, οι *Τυρβώδεις Διακυμάνσεις* των πιέσεων, οι Μέσες ως προς τη Φάση του κύματος *Τυρβώδεις Εντάσεις* της πίεσης και τέλος θα δοθούν σε πίνακα οι *Μέσες* και οι *Μέγιστες* τιμές της *Δυναμικής Πίεσης* που μετρήθηκε σε κάθε περίπτωση και συγκριτικά διαγράμματα για εξαγωγή συμπερασμάτων.

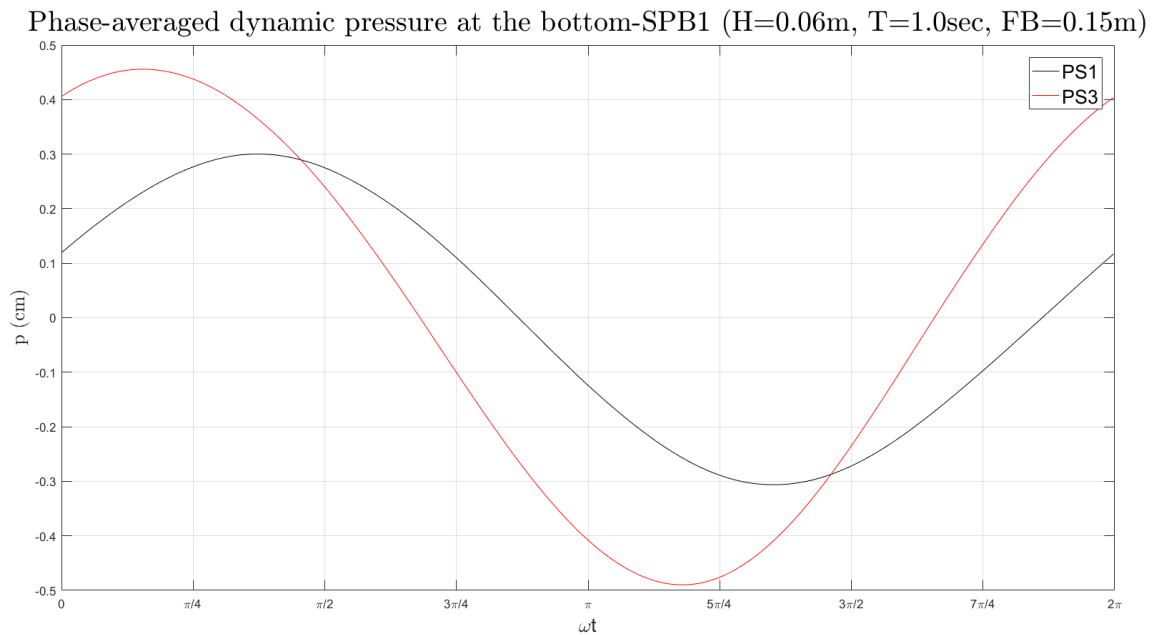
Πρέπει να διευκρινιστεί ότι κατά τη διενέργεια των πειραμάτων και πριν την εκκίνηση των μετρήσεων για κάθε κυματικό σενάριο, αφαιρέθηκε η υδροστατική πίεση που μετρήθηκε σε κάθε περίπτωση σε κατάσταση ηρεμίας. Αυτή η μέθοδος, εξασφάλισε σε κάθε περίπτωση ότι το πιεσόμετρο έδινε ως τελική μέτρηση τη *Δυναμική Πίεση*, που ήταν και το ζητούμενο. Αν και όπως εξηγήθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο δεν μπορεί να θεωρηθεί απολύτως ακριβής, καθώς ένα 'μέρος' της *Δυναμικής Πίεσης* συνδέεται με την ανύψωση ή ελάττωση της στάθμης του ύδατος λόγω της μετάδοσης του κυματισμού, το σφάλμα μπορεί να θεωρηθεί πολύ μικρό και άρα αμελητέο στην προκειμένη περίπτωση, καθώς η μέτρηση γίνεται στον πυθμένα, και αυτό το 'μέρος' της πίεσης είναι μικρότερο όσο η απόσταση από τη Μέση Στάθμη Ηρεμίας μεγαλώνει.

5.1 Μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.65m

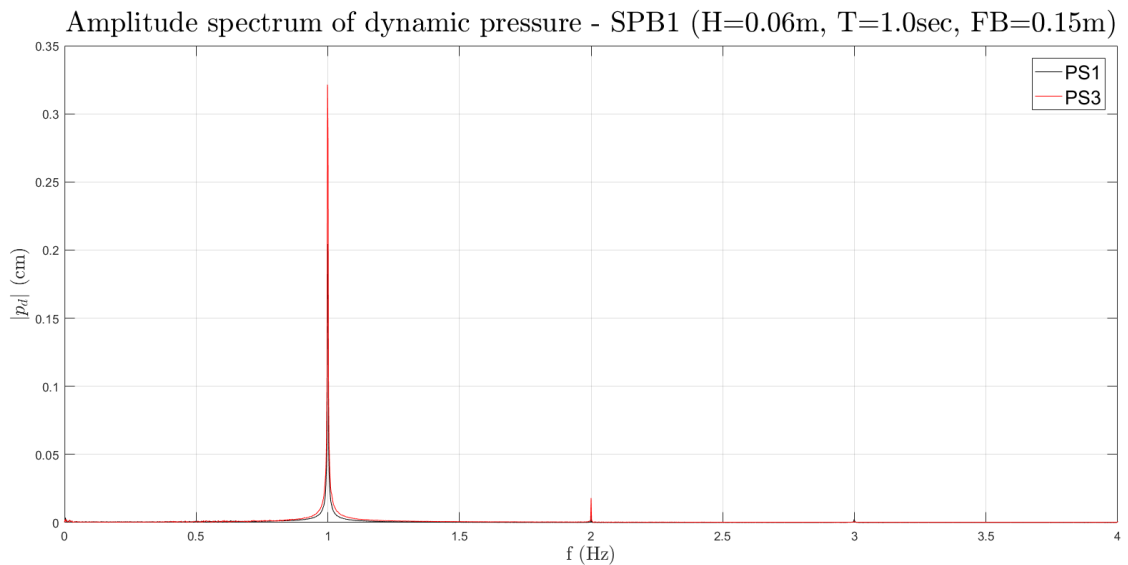
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που αφορούν τον κυματοθραύστη SPB1, με γεωμετρία όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και για ελεύθερο ύψος πάνω από τη στέψη του κυματοθραύστη ίσο με **0.15 cm** (σχετική θέση μέτρησης $z/d = 0.08$ ($z = 0$, πυθμένας)).

5.1.1 Κυματικό σενάριο 1-R1 (H=0.06m, T=1.0sec)

Από το σύνολο της καταγραφής και αφού αφαιρέθηκε επαρκής αριθμός δεδομένων, έτσι ώστε να γίνει ανάλυση των δεδομένων αφού το φαινόμενο κατέστη μόνιμο, ελήφθησαν οι μέσες τιμές της δυναμικής πίεσης ως προς τη φάση του κυματισμού ωt . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1, το εύρος της δυναμικής πίεσης που μετρήθηκε από το πιεσόμετρο στην προσήνεμη πλευρά της κατασκευής (PS1) είναι $[-0.306, +0.300](\text{cm})$, ενώ από αυτό στην υπήνεμη πλευρά (PS3) είναι $[-0.488, +0.456](\text{cm})$.



Σχήμα 5.1. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R1).

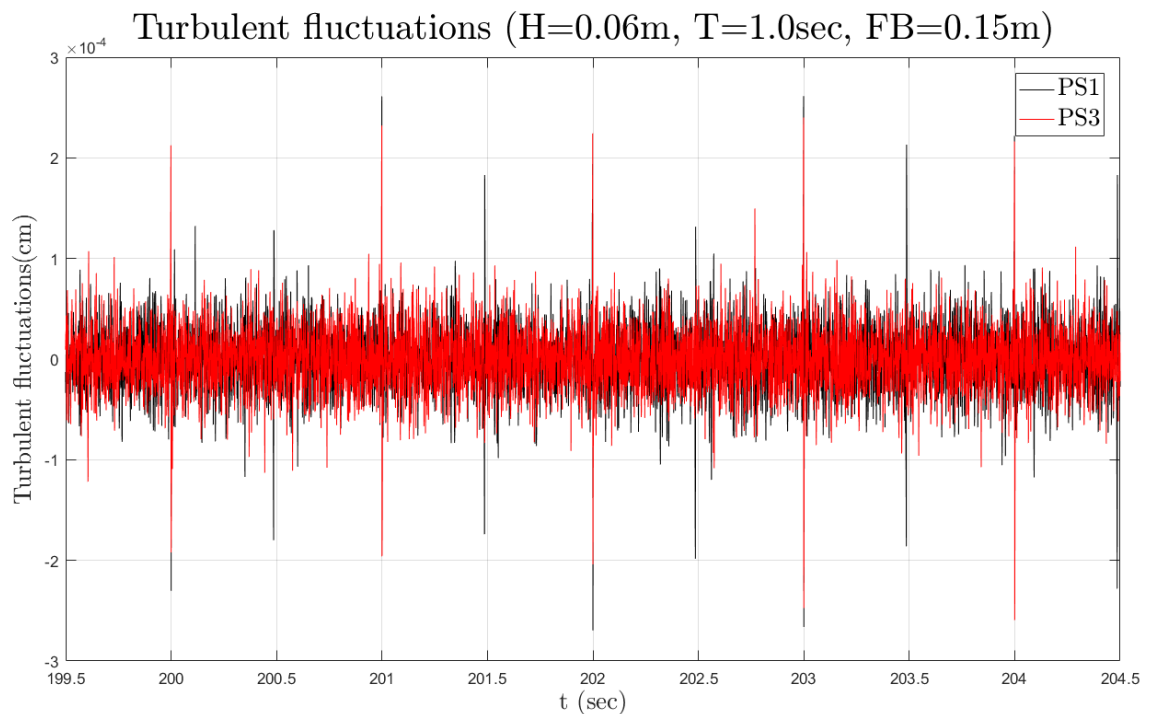


Σχήμα 5.2. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R1).

Επίσης, έγινε ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο συχνοτήτων, ώστε να βρεθούν οι αρμονικές συνιστώσες των πιέσεων και το αντίστοιχο εύρος τους. Από το Σχήμα 5., φαίνεται ότι τόσο από τα δεδομένα της πίεσης που καταγράφηκαν στην προσήνεμη πλευρά όσο και στην υπήνεμη, η πρώτη αρμονική είναι για συχνότητα $f = 1.0\text{Hz}$, κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, καθώς το συγκεκριμένο κυματικό σενάριο αφορά μονοχρωματικό κυματισμό με

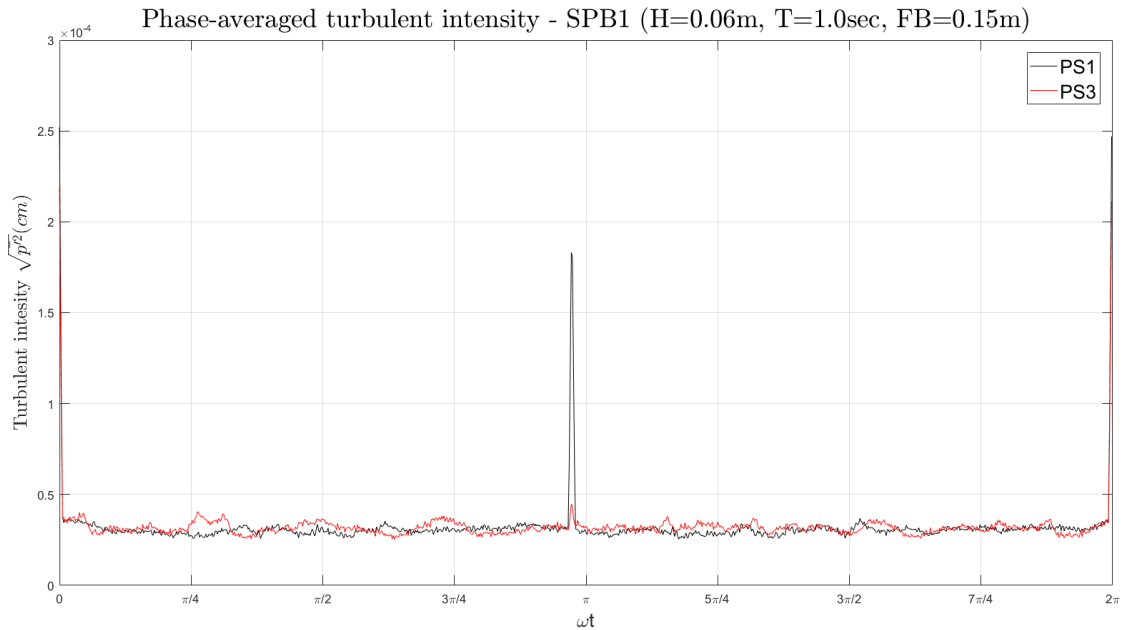
περίοδο $T = 1.0\text{sec}$. Τα εύρη που υπολογίστηκαν στις δύο θέσεις καταγραφής, και τα οποία αφορούν την πρώτη αρμονική είναι 0.204cm και 0.321cm αντίστοιχα. Διαπιστώνεται, δηλαδή, ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης έχει αυξηθεί στην υπήνεμη πλευρά κατά 57.4% , αλλά η τάξη μεγέθους της πίεσης και στις δύο περιπτώσεις είναι εξαιρετικά μικρή. Παρατηρούνται ταυτόχρονα και δύο ακόμα αρμονικές συνιστώσες με συχνότητα $f = 2.0\text{Hz}$ με εύρος $6.2 * 10^{-3}\text{cm}$ (PS1) και 0.018cm (PS3) αντίστοιχα.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατόπιν της εύρεσης των μέσων τιμών των πιέσεων ως προς τη φάση του κυματισμού έγινε εφικτό να βρεθούν οι τυρβώδεις διακυμάνσεις, οι οποίες, όπως ορίστηκαν και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποτελούν τις εκτροπές από τη μέση τιμή τους. Στο **Σχήμα 5.3** παρουσιάζεται η μορφή αυτών των διακυμάνσεων για μια τυχαία χρονική στιγμή, και στην συγκεκριμένη καταγραφή εμπεριέχονται τέσσερις κυματικές περίοδοι, απ' όπου φαίνεται πως η τάξη μεγέθους τους σε αυτή την περίπτωση είναι εξαιρετικά μικρή ($O(10^{-4}\text{cm})$).



Σχήμα 5.3. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R1).

Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , οι οποίες παρουσιάζονται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.4. Από το σχήμα αυτό φαίνεται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων παίρνει τη μέγιστη τιμή της και για τις δύο θέσεις καταγραφής ταυτόχρονα. Επιπλέον, στην προσήνεμη θέση εμφανίζεται και μια δεύτερη μεγάλη αναλογικά τιμή, η οποία είναι ίση με $1.83 * 10^{-4}\text{cm}$, ενώ για την υπήνεμη θέση η τιμή αυτή είναι μόλις $4.5 * 10^{-5}\text{cm}$. Συγκεκριμένα, για το πιεσόμετρο PS1 η μέγιστη τυρβώδης ένταση εμφανίζεται για $\omega t = 0$ ή 2π , ενώ για το πιεσόμετρο PS3 βρέθηκε ίση με $2.19 * 10^{-4}\text{cm}$.

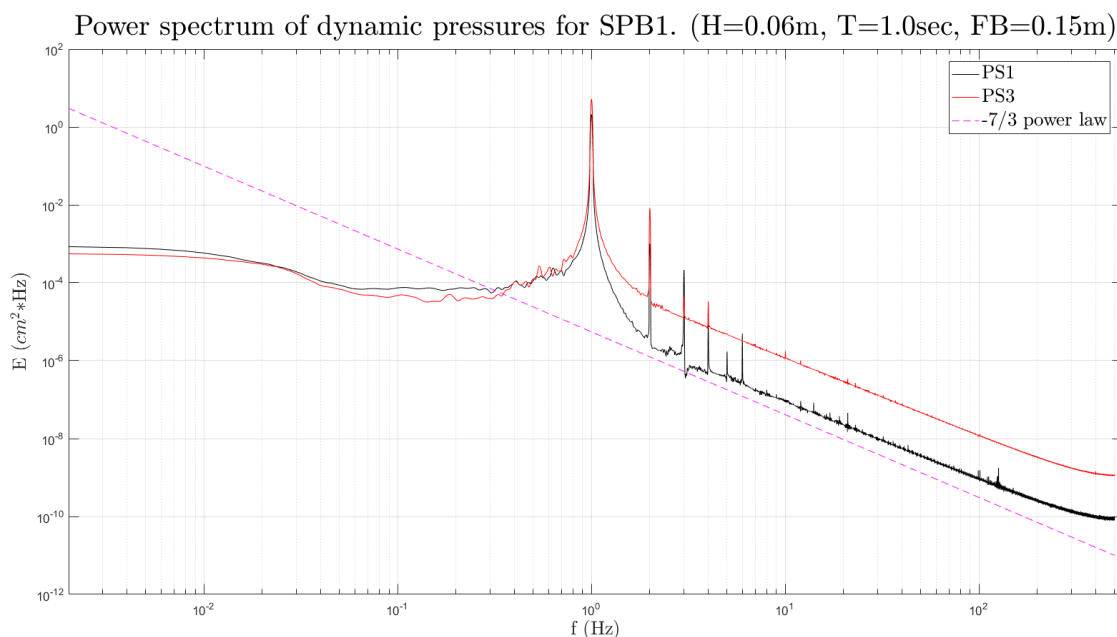


Σχήμα 5.4. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R1).

Είναι φανερό ότι οι εντάσεις είναι αρκετά μικρές, σχεδόν μηδενικές, γι αυτό το κυματικό σενάριο, και αυτό πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι το κύμα έχει μικρό ύψος σε σχέση ειδικά με το βάθος μέτρησης, το οποίο είναι στον πυθμένα της δεξαμενής ($z = -0.60m$), και επομένως τα δυναμικά μεγέθη είναι πολύ μικρά σε μέγεθος και δύσκολα ανιχνεύσιμα από τα μετρητικά όργανα. Άρα, η τύρβη σε αυτή την περίπτωση μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά μηδενική και η μέτρηση της λίγο αξιόπιστη, καθώς για τόσο μικρές τιμές και με δεδομένο ότι η τάξη μεγέθους τους είναι μικρότερη ακόμα και από το θόρυβο του οργάνου, τα φιλτραρισμένα αποτελέσματα δεν μπορούν θεωρηθούν ασφαλή για εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τέλος, υπολογίστηκαν τα φάσματα ενέργειας για τις δύο θέσεις μέτρησης της πίεσης και τα οποία φαίνονται στο παραπάνω Σχήμα 5.5. Και στα δύο φάσματα εμφανίζεται μια αιχμή όπως αναμενόταν για συχνότητα $f = 1.0Hz$, όπου για αυτή τη διεύθυνση η τιμή της ενέργειας είναι $2.094 (cm^2 * Hz)$ και $5.165 (cm^2 * Hz)$ αντίστοιχα για την προσήνεμη και την υπήνεμη θέση. Από τη θεωρία Kolmogorov έχουμε ότι το αδρανειακό υποεύρος των διακυμάνσεων της πίεσης, στο οποίο συμβαίνει η μεταφορά ενέργειας από τις μεγάλες δίνες (χαμηλές συχνότητες) στις μικρές δίνες (υψηλές συχνότητες) έχει μια κλίση $-7/3$. Από το παραπάνω σχήμα, το αδρανειακό υποεύρος εντοπίζεται ανάμεσα στις συχνότητες $f = 2.0Hz$ και $f = 200Hz$ και για τις δύο θέσεις δειγματοληψίας.

Πρέπει να επισημανθεί ότι σε αυτό το κυματικό σενάριο, λόγω τόσο της θέσης μέτρησης (στον πυθμένα της δεξαμενής ($z/d=0.95$), όσο και της ύπαρξης ασθενούς κύματος με μικρή περίοδο, οι μεταβολές των πιέσεων ήταν μικρές και πρακτικά δεν φαίνεται να υπάρχει τύρβη. Επειδή η τάξη μεγέθους των μετρήσεων σε σχέση με την τάξη μεγέθους του θορύβου του οργάνου ήταν συγκρίσιμη, ήταν αναγκαστική η εφαρμογή ισχυρών φίλτρων και τα αποτελέσματα τελικά δεν πρέπει να θεωρηθούν ιδιαίτερα αξιόπιστα.



Σχήμα 5.5. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R1).

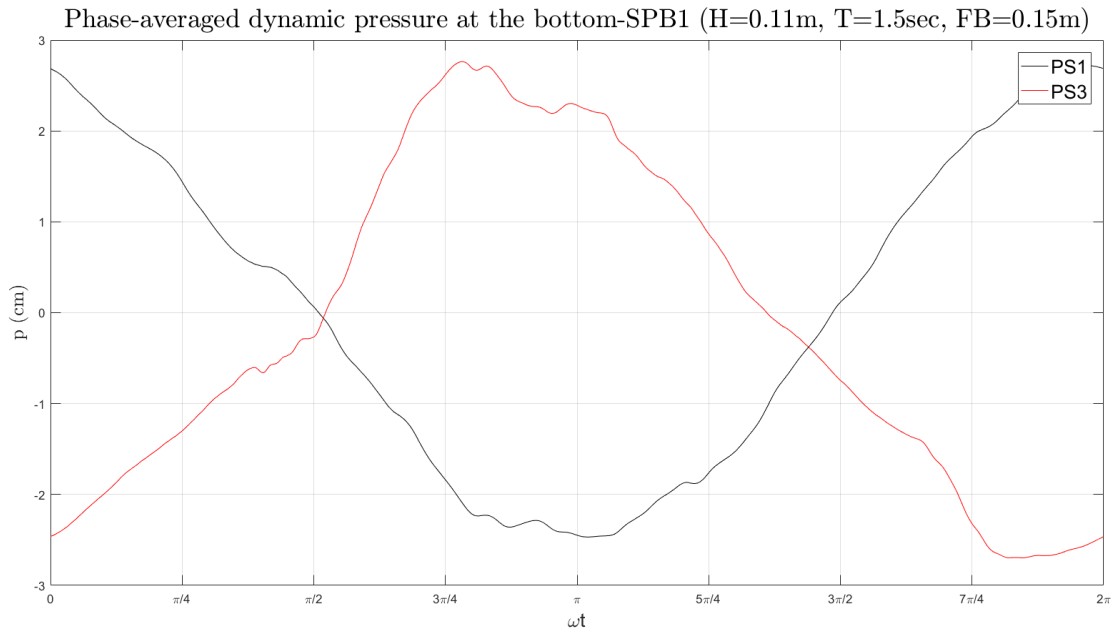
5.1.2 Κυματικό σενάριο 1-R2 (H=0.11m, T=1.5sec)

Παρομοίως με το προηγούμενο σενάριο αφαιρέθηκε επαρκής αριθμός δεδομένων μέχρι το φαινόμενο να θεωρηθεί μόνιμο, και κατόπιν από τις φιλτραρισμένες τιμές πιέσεων εξήχθη η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , για τις θέσεις μέτρησης τόσο στην προσήνεμη όσο και στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 5.6 το εύρος της δυναμικής πίεσης στην προσήνεμη θέση μέτρησης (PS1) είναι $[-2.46, +2.72]$ cm, ενώ στην υπήνεμη θέση μέτρησης της πίεσης (PS3) το εύρος της δυναμικής πίεσης είναι $[-2.70, +2.76]$ cm.

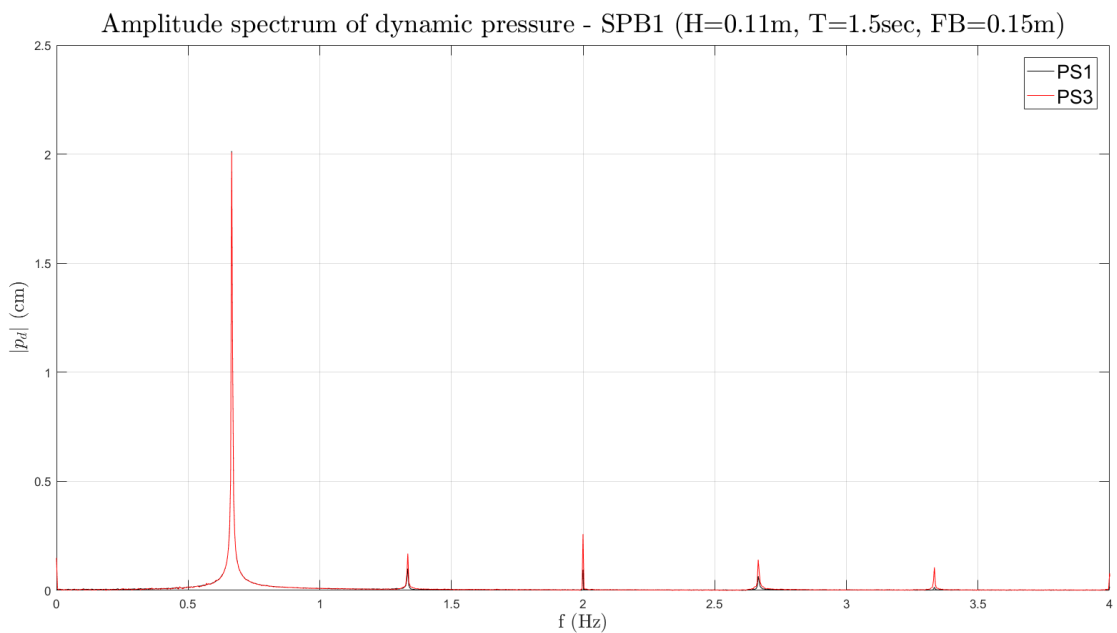
Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.7, παρατηρήθηκε ότι και στις δύο θέσεις καταγραφής έχουμε εμφάνιση δευτερευουσών αρμονικών συνιστωσών και συγκεκριμένα τεσσάρων, και το εύρος των αρμονικών πιέσεων που μετρήθηκαν στην υπήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερο, ενώ το εύρος της πρώτης αρμονικής η οποία εντοπίζεται για $f = 0.666 Hz$, είναι περίπου ίδιο και στις δύο θέσεις, δηλαδή 2.014 cm (PS1) και 2.01 cm (PS3).

Συγκεκριμένα, στην προσήνεμη θέση η 2^η αρμονική ($f = 1.335 Hz$) εμφανίζει πλάτος ίσο με 0.099 cm (4.9% της 1^{ης}), 3^η αρμονική συνιστώσα ($f = 2.0 Hz$) έχει εύρος 0.095 (4.7% της 1^{ης}) και η 4^η αρμονική συνιστώσα ($f = 2.665 Hz$) έχει εύρος 0.064 (3.7% της 1^{ης}). Αντίστοιχα, στην υπήνεμη θέση η 2^η αρμονική ($f = 1.335 Hz$) εμφανίζει πλάτος ίσο με 0.169 cm (8.4% της 1^{ης}), 3^η αρμονική συνιστώσα ($f = 2.0 Hz$) έχει εύρος 0.258 (12.8% της 1^{ης}) και η 4^η αρμονική συνιστώσα ($f = 2.665 Hz$) έχει εύρος 0.141 (7.0% της 1^{ης}).

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων



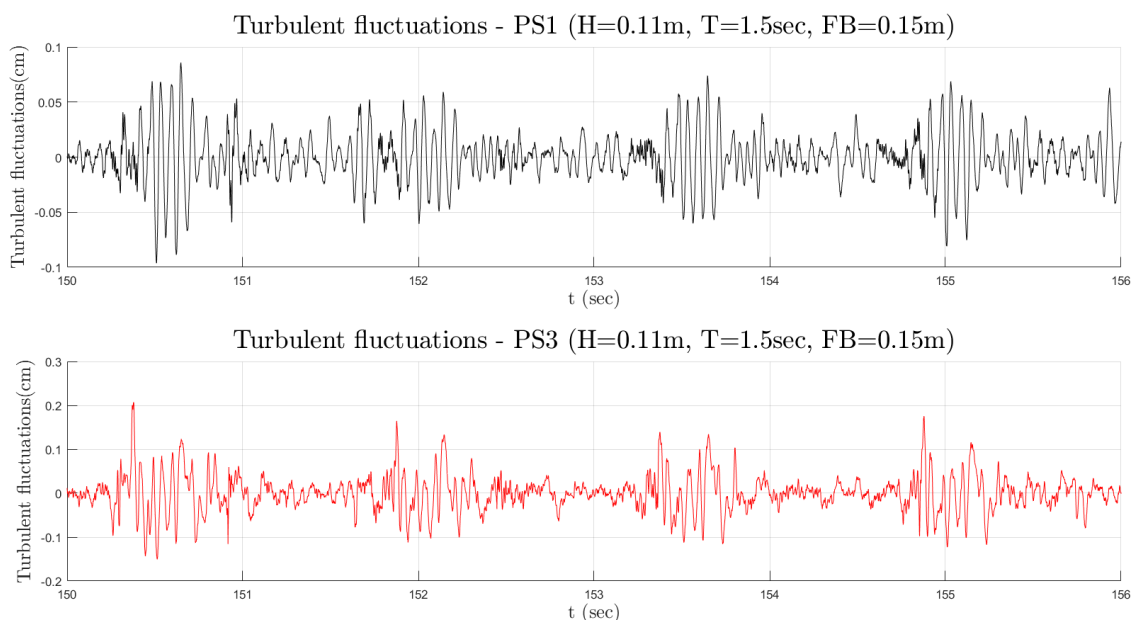
Σχήμα 5.6. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R2).



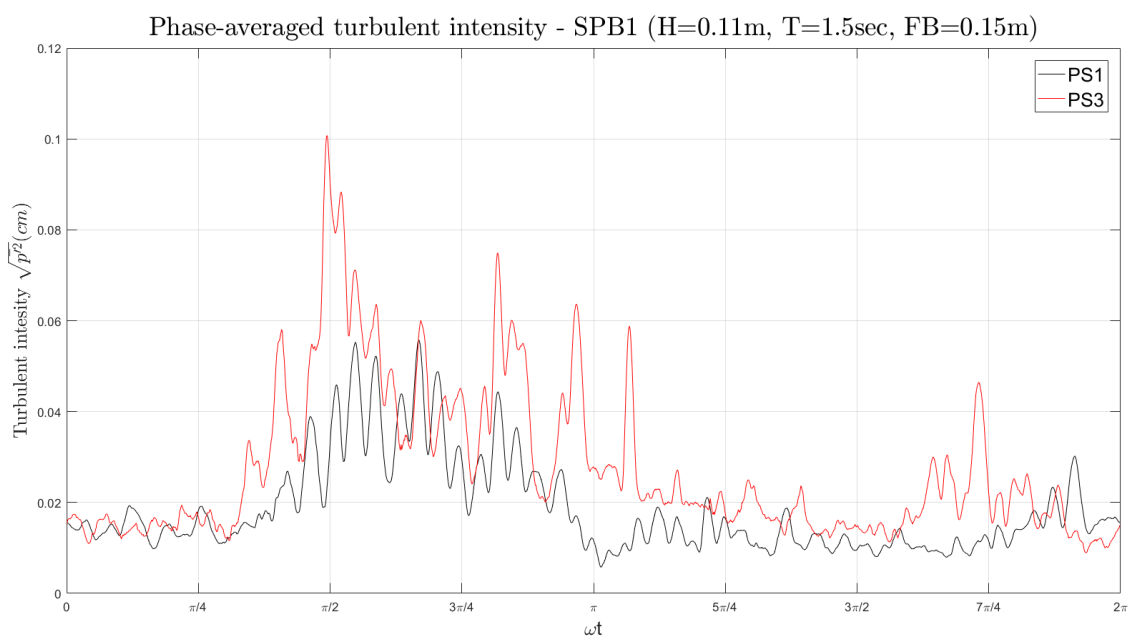
Σχήμα 5.7. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R2).

Υπολογίστηκαν στη συνέχεια οι τυρβώδεις διακυμάνσεις, η μορφή των οποίων φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 5.8. Από αυτό φαίνεται ότι οι τυρβώδεις διακυμάνσεις εμφανίζονται περιοδικά ανά $t = T = 1.5sec$. Εν συνεχεία, υπολογίστηκε η ένταση των τυρβωδών

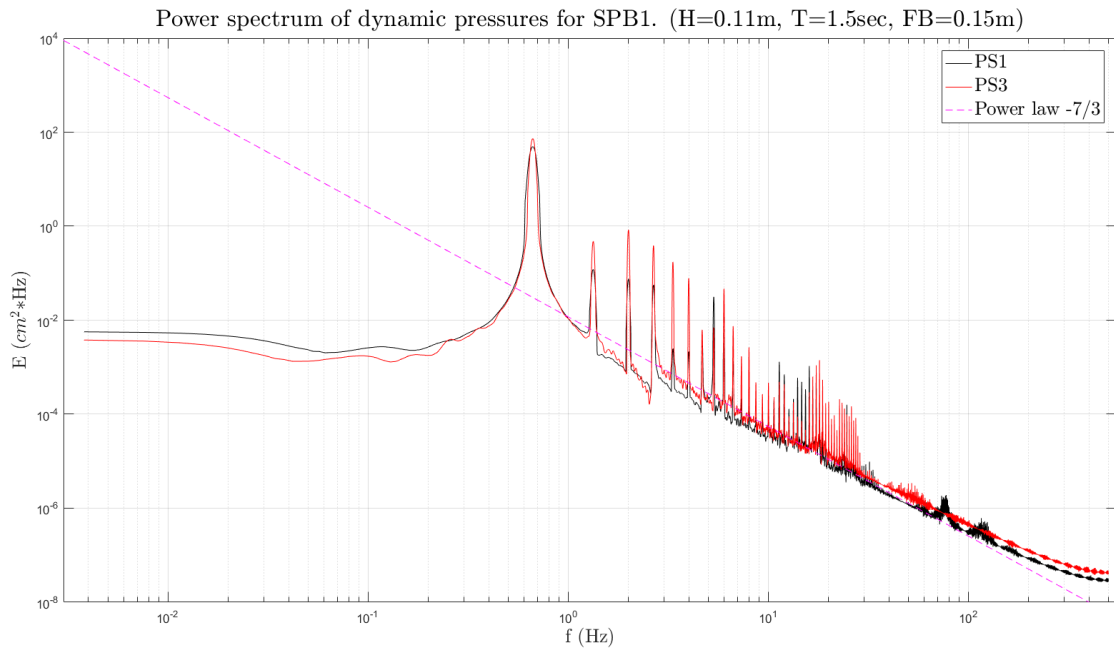
διακυμάνσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , η οποία παρουσιάζεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.9. Από το σχήμα παρατηρείται ότι η μέγιστη τυρβώδης ένταση στην προσήνεμη θέση είναι 0.057 cm και αντίστοιχα στην υπήνεμη η μέγιστη τυρβώδης ένταση είναι 0.101 cm.



Σχήμα 5.8. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R2).



Σχήμα 5.9. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R2).



Σχήμα 5.10. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R2).

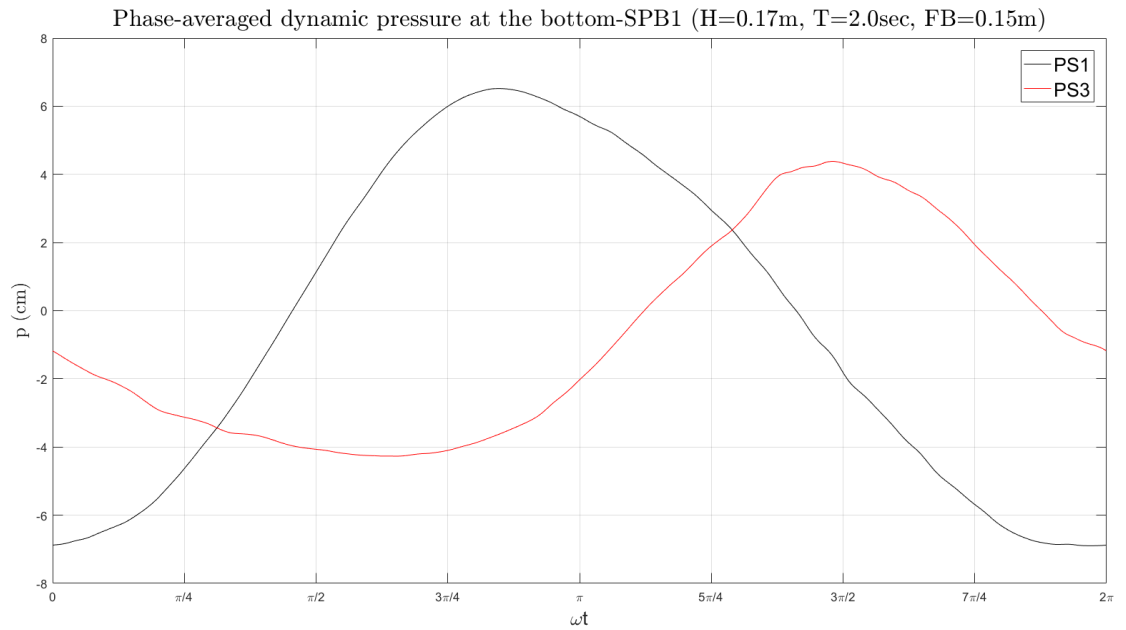
Στο παραπάνω Σχήμα 5.10 φαίνεται το φάσμα ενέργειας των πιέσεων, όπου φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.666 Hz$ ($T = 1.5 sec$) και είναι για την προσήνεμη θέση (PS1) ίση με $49.2 (cm^2 * Hz)$, ενώ για την υπήνεμη θέση (PS3) $73.05 (cm^2 * Hz)$. Ο νόμος του $-7/3$ του Kolmogorov εμφανίζεται ανάμεσα στις συχνότητες $f = 1.3 Hz$ και $f = 150 Hz$ και στις δύο θέσεις δειγματοληψίας, και αυτή είναι η 'περιοχή' όπου συμβαίνει μεταφορά ενέργειας από τις μεγάλες προς τις μικρές δίνες.

5.1.3 Κυματικό σενάριο 1-R3 (H=0.17m, T=2.0 sec)

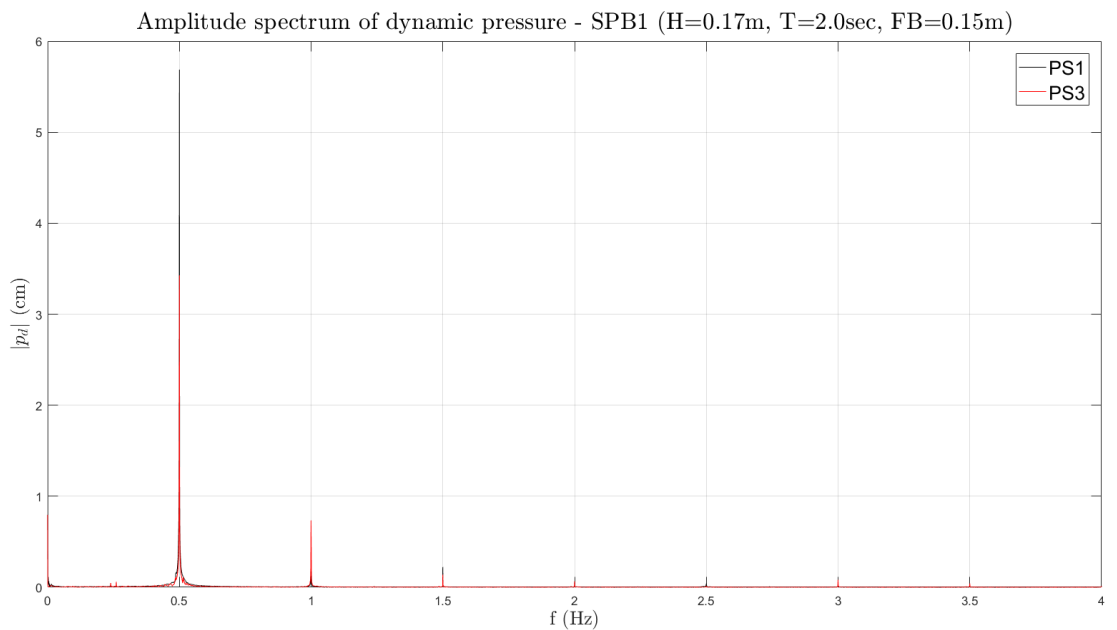
Η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση, όπως υπολογίστηκε μετά από το φιλτράρισμα των δεδομένων φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.11.

Όπως παρατηρείται, το εύρος των δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά είναι μεγαλύτερο από αυτό στην υπήνεμη και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιτελείται θραύση και άρα απόσβεση ενέργειας. Συγκεκριμένα, το εύρος των πιέσεων στη θέση του (PS1) είναι $[-6.88, +6.52]$ (cm), ενώ για το (PS3) είναι $[-4.27, +4.38]$ (cm).

Η ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων παριστάνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.12. Όπως φαίνεται, το εύρος της $1^{ης}$ αρμονικής, για $f = 0.5 Hz$, στην προσήνεμη θέση είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σύγκριση με την υπήνεμη και συγκεκριμένα είναι 3.427 (cm) (PS1) και 5.686 (cm) (PS3) (μειωμένο κατά 39,7% σε σχέση με την προσήνεμη θέση). Επίσης, εμφανίζονται και κάποιες δευτερεύουσες αρμονικές συνιστώσες, και συγκεκριμένα όσο αφορά την προσήνεμη θέση, μια $2^{η}$ για $f = 1 Hz$ και με εύρος $+0.406$ (cm) (11.8% της $1^{ης}$) και μια $3^{η}$ για $f = 1.5 Hz$ με εύρος 0.222 (cm) (6.5% της $1^{ης}$), και αντίστοιχα στην υπήνεμη η $2^{η}$ έχει εύρος 0.734 (cm) (12.9% της $1^{ης}$) και η $3^{η}$ 0.140 (cm) (2.5% της $1^{ης}$).



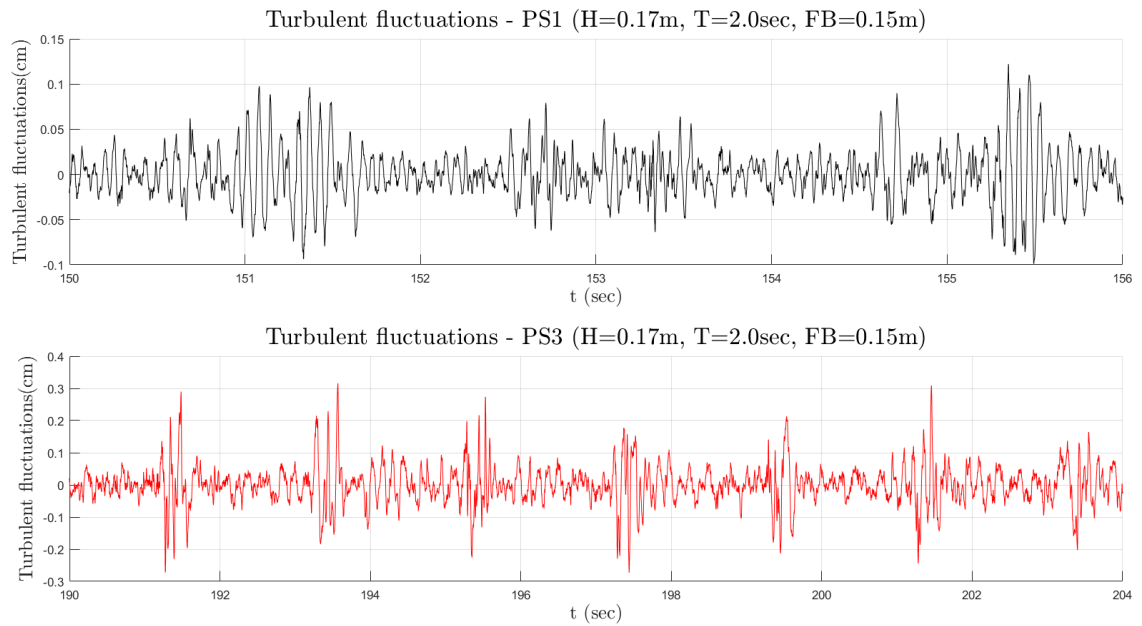
Σχήμα 5.11. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R3).



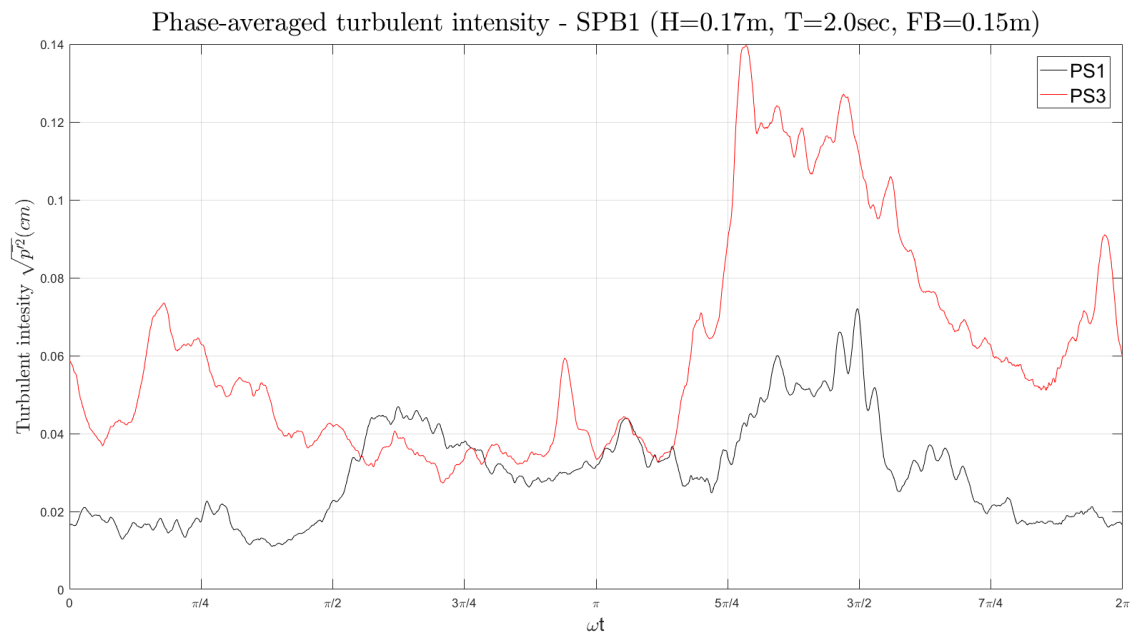
Σχήμα 5.12. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R3).

Από τη μέση ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμική πίεση ωt προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών διακυμάνσεων, η μορφή του οποίου φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.13.

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων



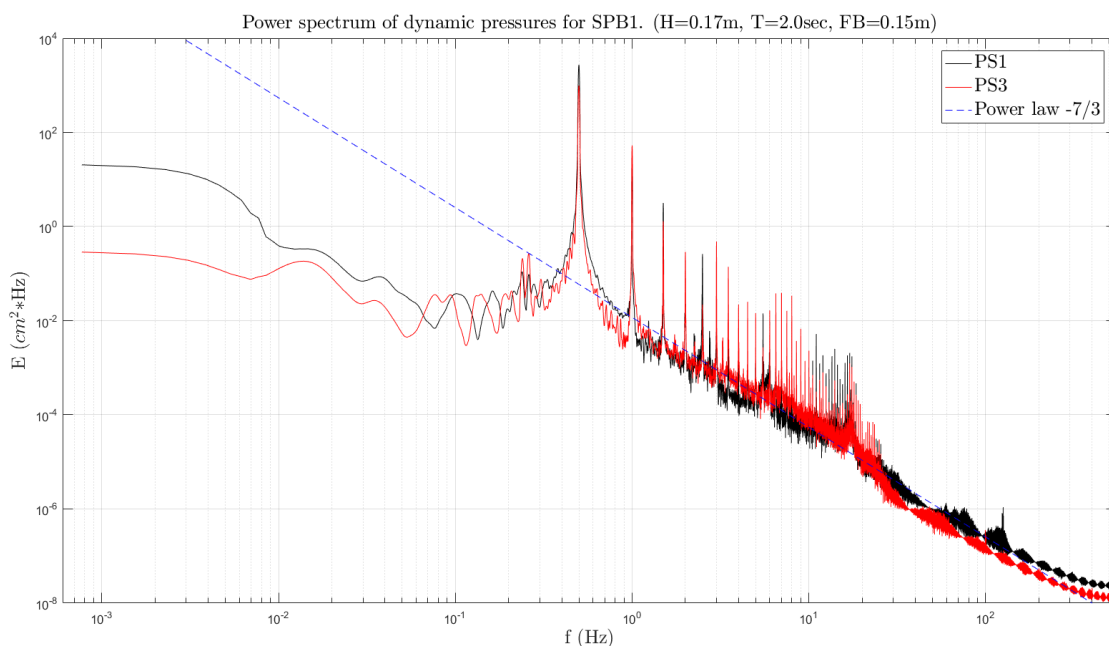
Σχήμα 5.13. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R3).



Σχήμα 5.14. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R3).

Η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt φαίνεται στο Σχήμα 5.14. Από αυτό παρατηρείται ότι η τιμή τους έχουν αυξηθεί σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο 1-R2, και ειδικά στην υπήνεμη θέση όπου συντελείται και θραύση του

κυματισμού και επομένως έκλυση τύρβης. Από το παραπάνω σχήμα έχουμε ότι η μέγιστη τυρβώδης ένταση για την προσήνεμη θέση καταγραφής είναι [4.712 rad, 0.072 cm], ενώ για την υπήνεμη πλευρά είναι [4.241 rad , 0.140 cm]. Λόγω, όμως, της θραύσης και της εμφάνισης σημαντικών μη-γραμμικοτήτων, εμφανίζονται και σε άλλα σημεία εντός της φάσης του κύματος με σημαντικές τυρβώδεις εντάσεις, και συγκεκριμένα για την προσήνεμη θέση εμφανίζεται άλλο ένα σημείο, όπου είναι [1.963 rad, 0.047 cm], και για την υπήνεμη άλλα τέσσερα σημεία με τιμές σημαντικού μεγέθους, και συγκεκριμένα [4.609 rad, 0.126 cm], [6.176 rad, 0.091 cm], [0.562 rad, 0.073 cm] και [2.953 rad, 0.059 cm].



Σχήμα 5.15. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R3).

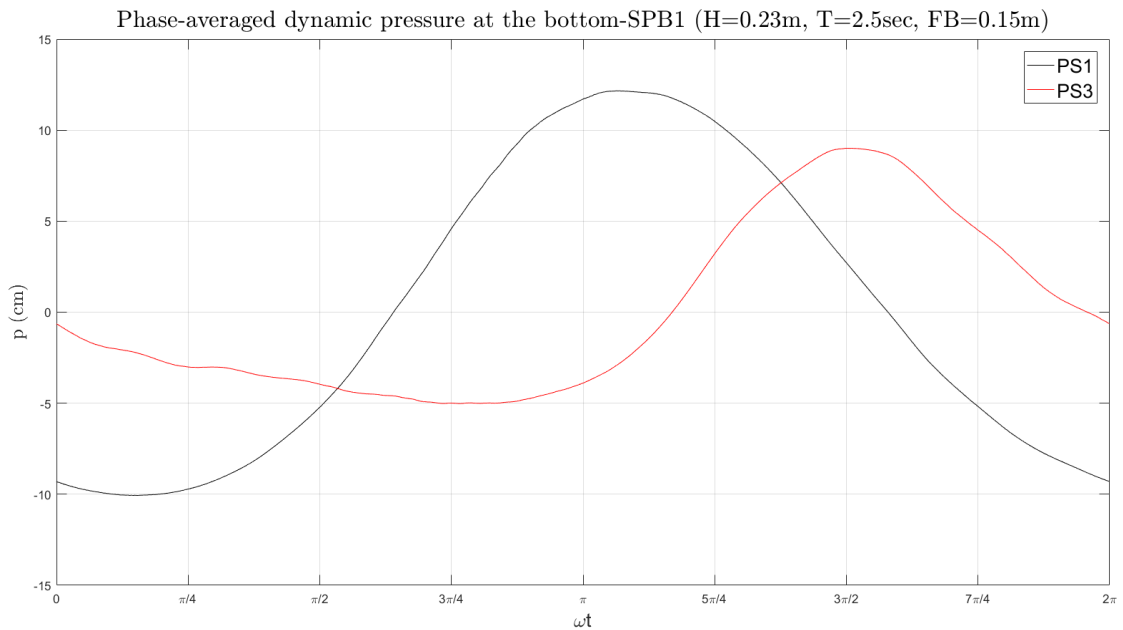
Από το Σχήμα 5.15 που αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.5 Hz$ ($T = 2 sec$), και είναι ίση με $2716.6 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $987.4 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζεται ένα ακόμα μέγιστο και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 1.0 Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $16.98 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $53.02 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Τέλος, το αδρανειακό υπό-εύρος κατά Kolmogorov, εμφανίζεται για την προσήνεμη θέση στις συχνότητες $f = 1 Hz$ μέχρι $f = 180 Hz$, ενώ στην υπήνεμη θέση για $f = 1 Hz$ μέχρι $f = 200 Hz$.

5.1.4 Κυματικό σενάριο 1-R4 (H=0.23m, T=2.5sec)

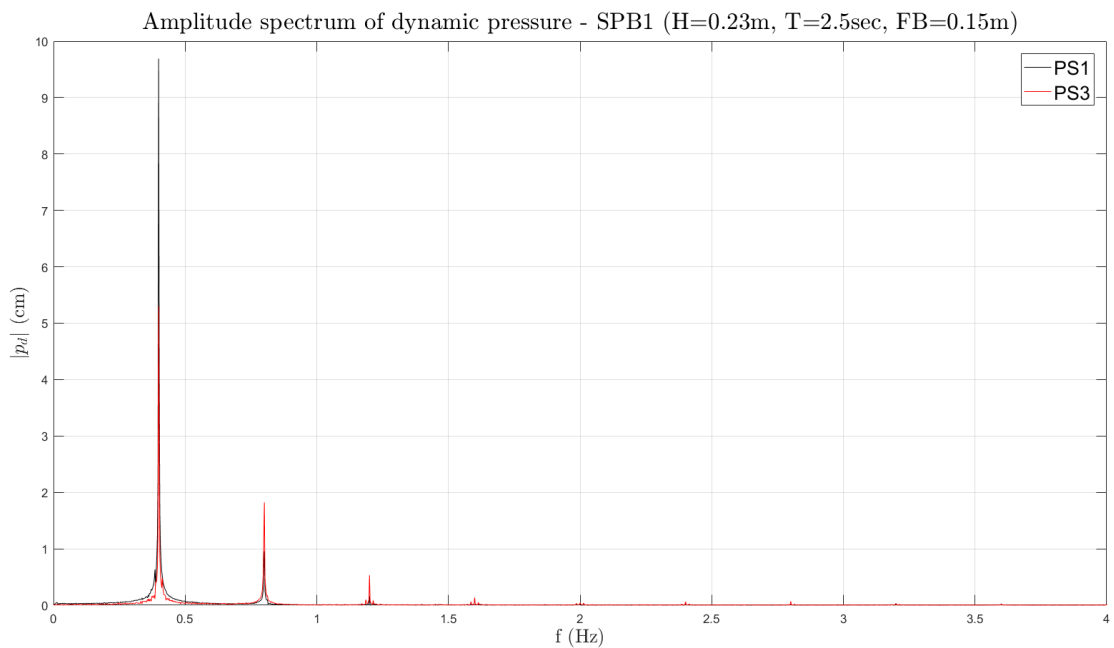
Σε αυτό το κυματικό σενάριο, το οποίο έχει και το μεγαλύτερο ύψος κύματος H και μεγαλύτερη περίοδο T μετρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές των πιέσεων, και αυτό φαίνεται και από το παρακάτω Σχήμα 5.16 στο οποίο παριστάνεται γραφικά η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση. Από το διάγραμμα το εύρος τιμών της πίεσης για την προσήνεμη θέση είναι [-10.07 , +12.17] (cm) (46.4% αύξηση της μέσης αρνητικής πίεσης

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

και 86.7% αύξηση της μέσης θετικής πίεσης σε σύγκριση με το σενάριο 1-R3), ενώ για την υπήνεμη θέση είναι [-5.02 , +9.01] (cm) (17.7% αύξηση της μέσης αρνητικής πίεσης και 105.7% αύξηση της μέσης θετικής πίεσης σε σύγκριση με το σενάριο 1-R3).



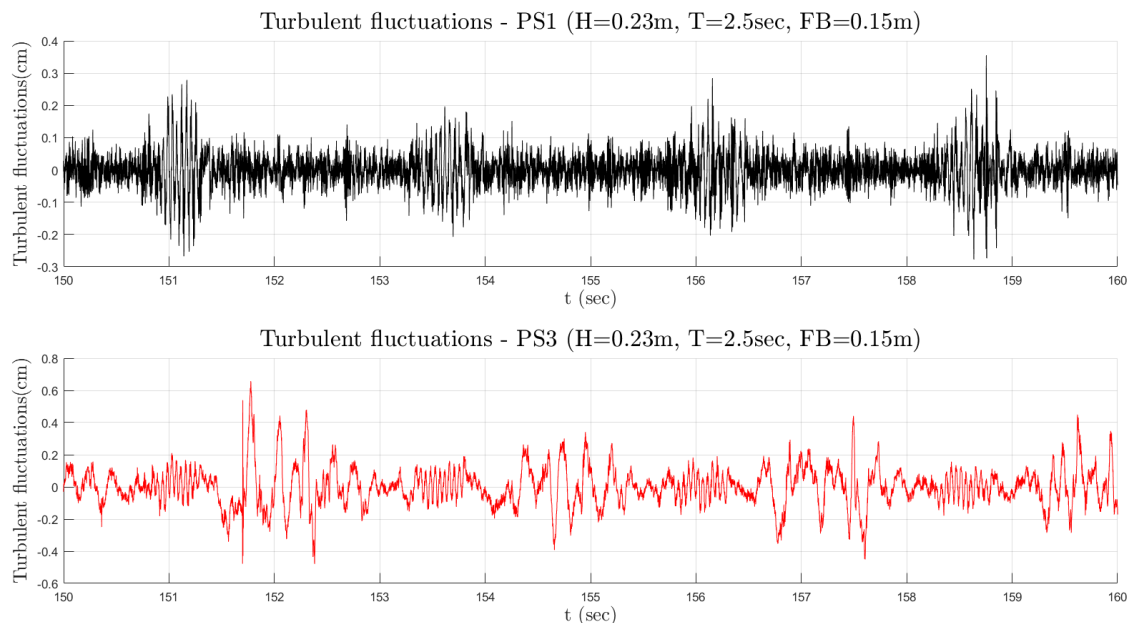
Σχήμα 5.16. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R4).



Σχήμα 5.17. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R4).

Παραπάνω, στο Σχήμα 5.17, δίνεται το διάγραμμα των αρμονικών συνιστωσών της δυναμικής πίεσης από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο συχνοτήτων. Η 1^η αρμονική και στις δυο θέσεις μέτρησης εντοπίζεται για $f = 0.4Hz$, και τα πλάτη είναι 9.69 (cm) (PS1) και 5.31 (cm) (PS3) αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, καταγράφεται και μια 2^η συνιστώσα για $f = 0.8Hz$, με εύρος 0.95 (cm) (9.8% της 1^{ης}) στην προσήνεμη θέση και 1.83 (cm) (34.4% της 1^{ης}) στην υπήνεμη θέση, και μια ακόμη 3^η συνιστώσα σημαντικού εύρους για $f = 1.2Hz$, με εύρος 0.165 (cm) (1.7% της 1^{ης}) για την προσήνεμη θέση και 0.53 (cm) (9.9% της 1^{ης}) για την υπήνεμη θέση. Από τα παραπάνω, φαίνεται ότι καθώς το κύμα διαπερνά την κατασκευή έχουμε την εμφάνιση μη γραμμικοτήτων και μετασχηματισμό του κύματος που διαδίδεται πίσω από την κατασκευή.

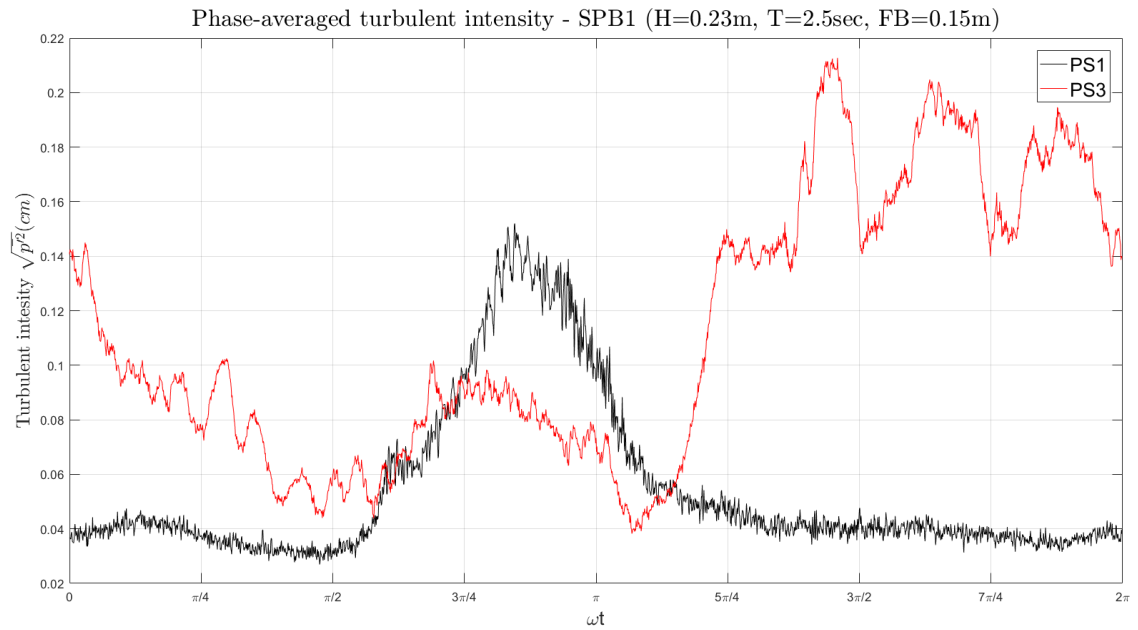
Παρακάτω παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.18 η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων για αυτό το κυματικό σενάριο, από το οποίο προκύπτει το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων των πιέσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.19.



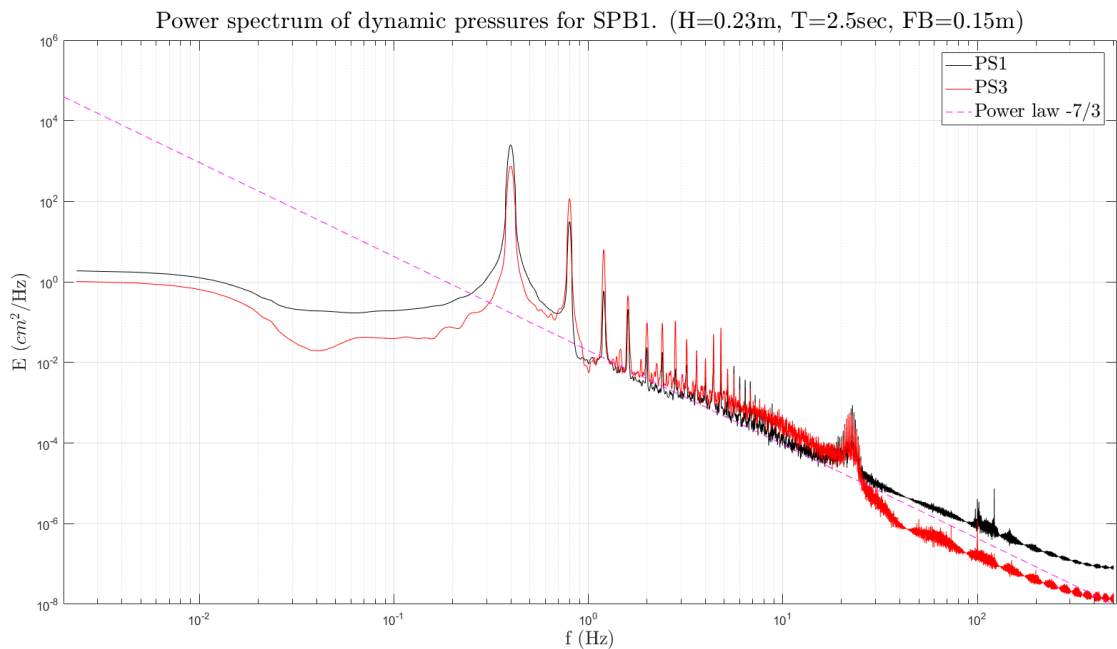
Σχήμα 5.18. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R4).

Από το Σχήμα 5.19 φαίνεται ότι οι τυρβώδεις εντάσεις στην προσήνεμη θέση (PS1) εμφανίζουν ένα μέγιστο, το οποίο είναι περίπου ίσο με 0.152 (cm) και, ενώ για την υπήνεμη θραύση (PS3) λόγω της θραύσης του κυματισμού, εμφανίζονται μεγάλες τιμές της τυρβώδους έντασης σε τρία σημεία εντός της φάσης του κυματισμού, με τη μεγίστη να είναι για [4.582 rad, 0.213 cm], ενώ τα άλλα δύο σημεία είναι τα εξής: [5.132 rad, 0.205 cm] και [5.896 rad, 0.194 cm].

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων



Σχήμα 5.19. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R4).



Σχήμα 5.20. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R4).

Τέλος, το Σχήμα 5.20 αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.4\text{Hz}$ ($T = 2.5\text{sec}$), και

είναι ίση με $2508.9 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $750.9 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται δύο ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 0.8Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $31.6 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $115.9 (cm^2 * Hz)$ (PS3), και για $f = 1.2Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $0.6 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $6.35 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Το αδρανειακό υποέυρος εντοπίζεται για τις μετρήσεις στην προσήνεμη θέση ανάμεσα στις συχνότητες $f = 1Hz$ μέχρι $f = 200Hz$, ενώ για την υπήνεμη θέση για $f = 1Hz$ μέχρι $f = 300Hz$.

5.2 Μοντέλο SPB1 και βάθος νερού 0.70m

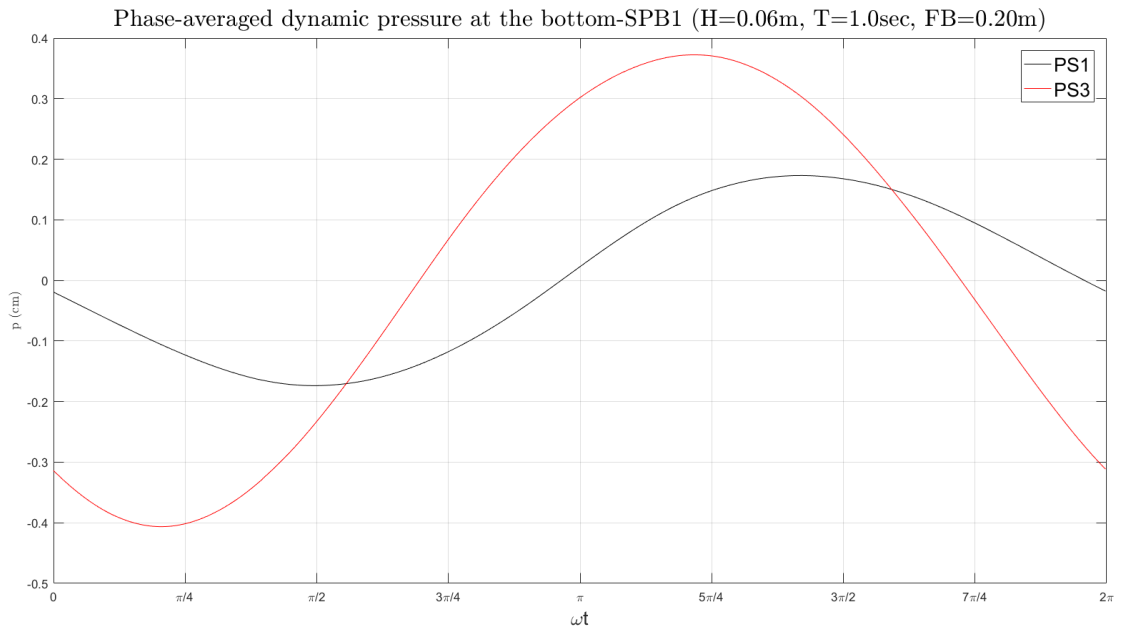
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που αφορούν τον κυματοθραύστη SPB1, με γεωμετρία όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και για ελεύθερο ύψος πάνω από τη στέψη του κυματοθραύστη ίσο με **0.20 cm** (σχετική θέση μέτρησης $z/d = 0.07(z = 0, \text{πυθμένας})$).

5.2.1 Κυματικό σενάριο 1-R5 (H=0.06m, T=1.0sec)

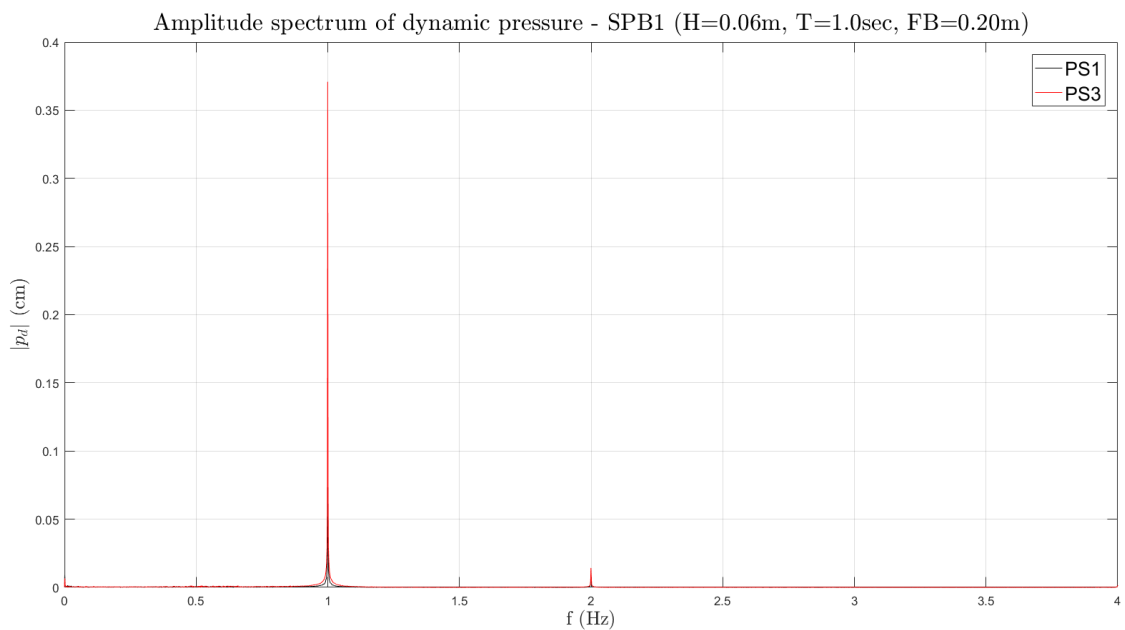
Όπως και παραπάνω, αφού αφαιρέθηκε επαρκής αριθμός δεδομένων ώστε να θεωρηθεί ότι το φαινόμενο έχει γίνει μόνιμο, ελήφθησαν οι μέσες τιμές της δυναμικής πίεσης ως προς τη φάση του κυματισμού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.21 το εύρος της δυναμικής πίεσης στην περίπτωση του πιεσόμετρου στην προσήνεμη πλευρά (PS1) είναι $[-0.174, +0.173]$ (cm), ενώ στην υπήνεμη πλευρά (PS3) είναι $[-0.406, +0.372]$ (cm). Από τα παραπάνω προκύπτει αφενός, όπως και στην περίπτωση του σεναρίου 1-R1 έτσι κι εδώ, ότι η δυναμική πίεση στην υπήνεμη θέση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την προσήνεμη θέση, αφετέρου ότι οι πιέσεις τόσο στην προσήνεμη όσο και στην υπήνεμη θέση είναι μειωμένη σε σύγκριση με εκείνες του σεναρίου 1-R1, κάτι το οποίο οφείλεται στην αύξηση της στάθμης.

Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.22, παρατηρήθηκε ότι τόσο από τα δεδομένα της πίεσης που καταγράφηκαν στο πιεσόμετρο στην προσήνεμη (PS1) όσο και στην υπήνεμη πλευρά (PS3), η κύρια συχνότητα είναι για $f = 1.0Hz$ κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο καθώς το συγκεκριμένο κυματικό σενάριο αφορά μονοχρωματικό κυματισμό με περίοδο $T = 1.0sec$. Τα εύρη για την 1^η αρμονική είναι 0.164 (cm) και 0.371 (cm) για την προσήνεμη και την υπήνεμη θέση αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι το εύρος στην προσήνεμη θέση είναι μειωμένο κατά 19.6% σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέτρηση του σεναρίου 1-R1, ενώ στην υπήνεμη είναι αυξημένο κατά 15.6%. Διαπιστώνεται, επίσης, ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης έχει αυξηθεί στην υπήνεμη πλευρά κατά 126.2%, αλλά η τάξη μεγέθους της πίεσης και στις δύο περιπτώσεις είναι εξαιρετικά μικρή και λόγω θορύβου δεν μπορεί να ενδείκνυνται για εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων



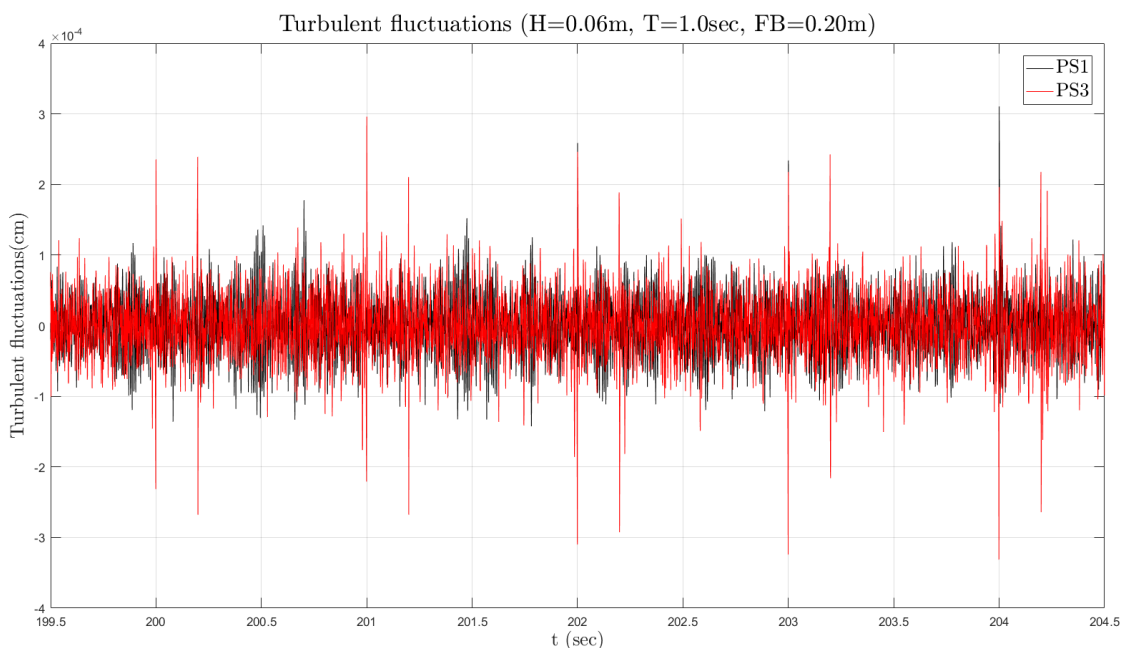
Σχήμα 5.21. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R5).



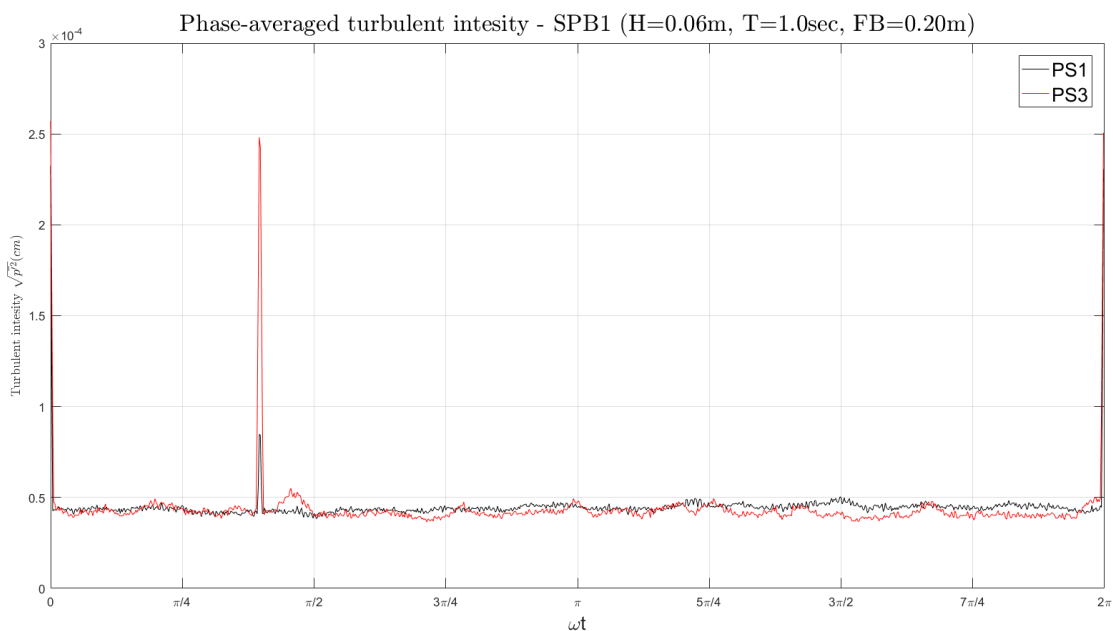
Σχήμα 5.22. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R5).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.23 η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβώδεις διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού Ωt , που φαίνεται στο

παρακάτω Σχήμα 5.24.



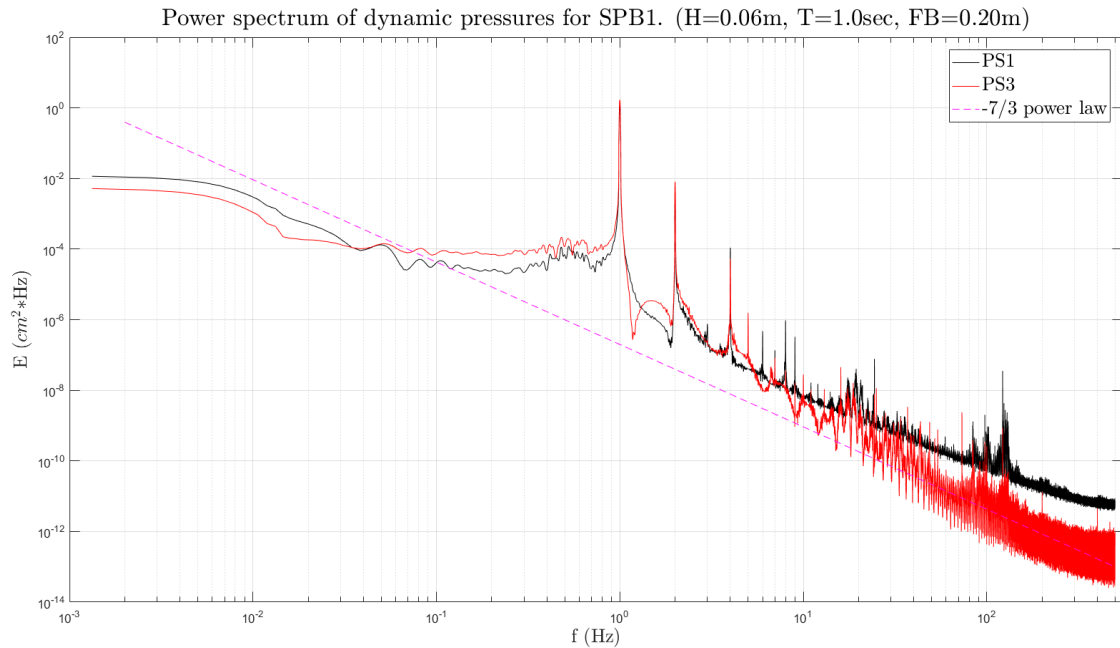
Σχήμα 5.23. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R5).



Σχήμα 5.24. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R5).

Από το Σχήμα 5.24, φαίνεται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων παίρνει τη μέγιστη

τιμή της και για τις δύο θέσεις μέτρησης ταυτόχρονα, ενώ και στην προσήνεμη και στην υπήνεμη θέση εμφανίζεται και μια δεύτερη μεγάλη αναλογικά τιμή (κυρίως στην **PS3** θέση μέτρησης όμως), με τιμές $8.48 \cdot 10^{-5}$ cm και $2.48 \cdot 10^{-4}$ cm. Συγκεκριμένα για το πιεσόμετρο PS1 η μέγιστη τυρβώδης ένταση εμφανίζεται για $\omega t = 0$ ή 2π και είναι ίση $2.32 \cdot 10^{-4}$ cm, ενώ για το **PS3** βρέθηκε ίση με $2.57 \cdot 10^{-4}$ cm. Είναι φανερό ότι η τύρβη είναι πρακτικά μηδενική και η μέτρησή τους δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη, καθώς για τόσο μικρές τιμές και με δεδομένο ότι η τάξη μεγέθους τους είναι μικρότερη ακόμα και από το θόρυβο του οργάνου, τα φιλτραρισμένα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή για εξαγωγή συμπερασμάτων.



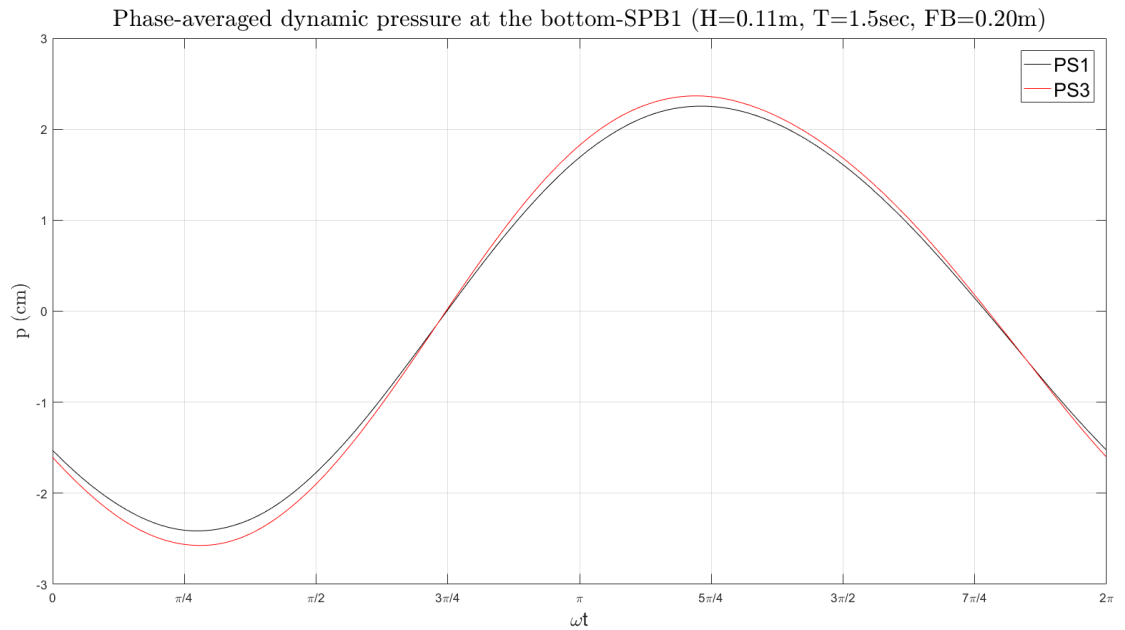
Σχήμα 5.25. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (**PS3**) (Σενάριο 1-R5).

Τέλος, το Σχήμα 5.25 αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 1.0\text{Hz}$ ($T = 1.0\text{sec}$), και είναι ίση με 1.185 ($\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}$) για την προσήνεμη θέση (PS1) και 1.685 ($\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}$) για την υπήνεμη θέση (**PS3**), ενώ εμφανίζονται δύο ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 2.0\text{Hz}$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $4.31 \cdot 10^{-3}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}$) (PS1) και $8.08 \cdot 10^{-3}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}$) (**PS3**), και για $f = 4.0\text{Hz}$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $1.1 \cdot 10^{-4}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}$) (PS1) και $5.26 \cdot 10^{-5}$ ($\text{cm}^2 \cdot \text{Hz}$) (**PS3**). Ο νόμος δύναμης του $-7/3$ του Kolmogorov εμφανίζεται στην υπήνεμη θέση ανάμεσα στις συχνότητες $f = 3.0\text{Hz}$ και $f = 150\text{Hz}$ και για την υπήνεμη θέση ανάμεσα στις συχνότητες $f = 21\text{Hz}$ και $f = 150\text{Hz}$.

5.2.2 Κυματικό σενάριο 1-R6 (H=0.11m, T=1.5sec)

Η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση, όπως υπολογίστηκε μετά από το φιλτράρισμα των δεδομένων φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.26. Το εύρος των δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά είναι σχεδόν ίσο με αυτό στην υπήνεμη και αυτό

οφείλεται στο γεγονός ότι δεν επιτελείται θραύση και άρα απόσβεση ενέργειας, αλλά λόγω της κατασκευής εμφανίζονται κάποιες μη γραμμικότητες που μεταβάλλουν την κυματική μορφή. Συγκεκριμένα, το εύρος των πιέσεων στη θέση του PS1 είναι $[-2.41, +2.25]$ (cm), ενώ για το PS3 είναι $[-2.57, +2.37]$ (cm).

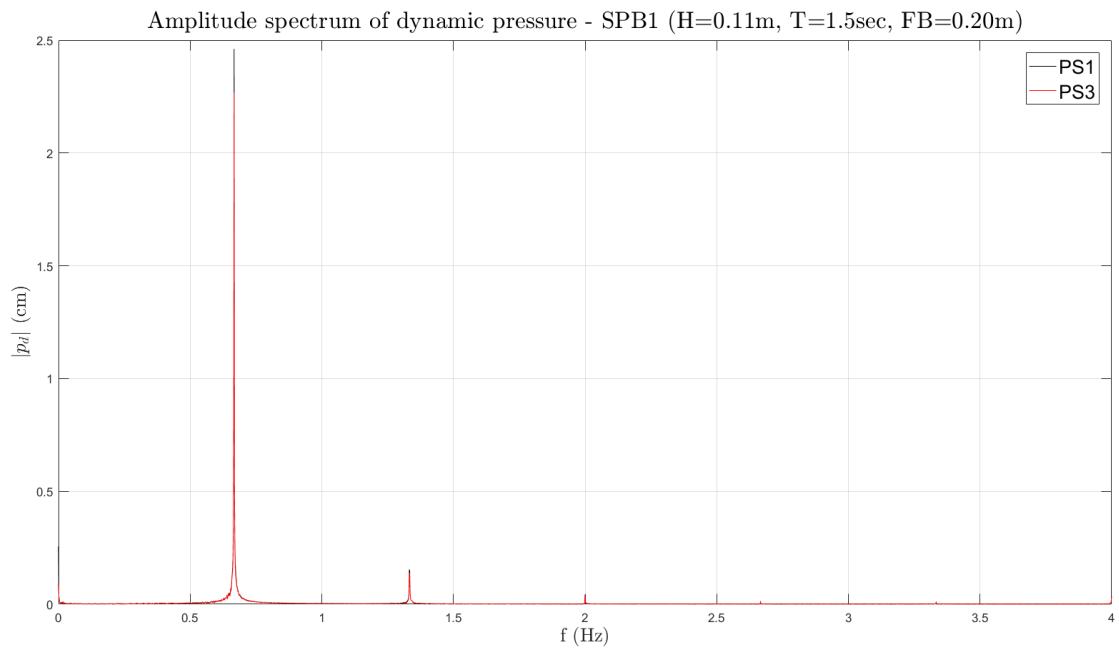


Σχήμα 5.26. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R6).

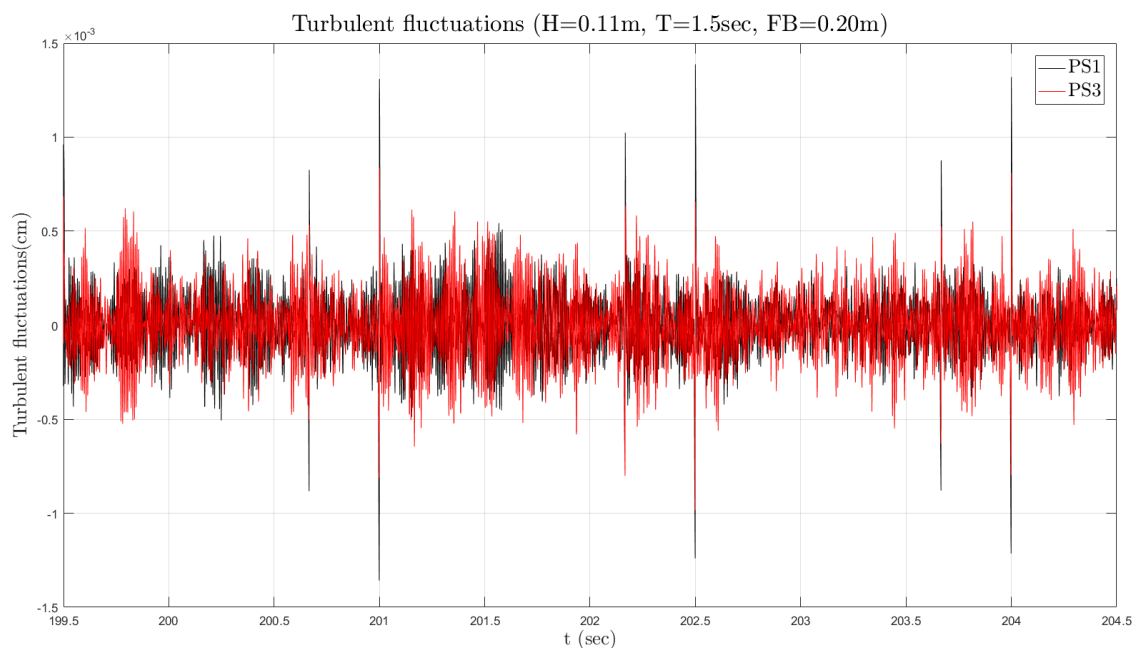
Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.27, παρατηρήθηκε ότι και στις δύο θέσεις καταγραφής έχουμε εμφάνιση δύο αρμονικών συνιστωσών με τη δεύτερη να μην έχει όμως σημαντικό εύρος, και το εύρος των πιέσεων που μετρήθηκαν στην υπήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερο, ενώ το εύρος της 1^{ης} αρμονικής της πίεσης, η οποία εντοπίζεται για $f = 0.666Hz$, είναι 2.461 (cm) για την προσήνεμη θέση (PS1) και 2.268 (cm) για την υπήνεμη (PS3) αντίστοιχα. Επίσης, η 2^η αρμονική εμφανίζεται για $f = 1.335Hz$ και έχει εύρος στην προσήνεμη θέση ίσο με 0.153 (cm) (6.2% της 1^{ης}) και στην υπήνεμη 0.135 (cm) (5.95% της 1^{ης}).

Στο Σχήμα 5.28, παρουσιάζεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων σε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο της χρονοσειράς. Σε αυτό φαίνεται ότι η μορφή τους είναι παρόμοια με εκείνες του σεναρίου 1-R5, αν και είναι κατά 10 φορές μεγαλύτερες, αλλά αντίστοιχα η τάξη μεγέθους του θορύβου του οργάνου είναι κοντά ή και μεγαλύτερη εκείνης των δυναμικών πιέσεων και της τύρβης, και άρα τα φιλτραρισμένα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα.

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων



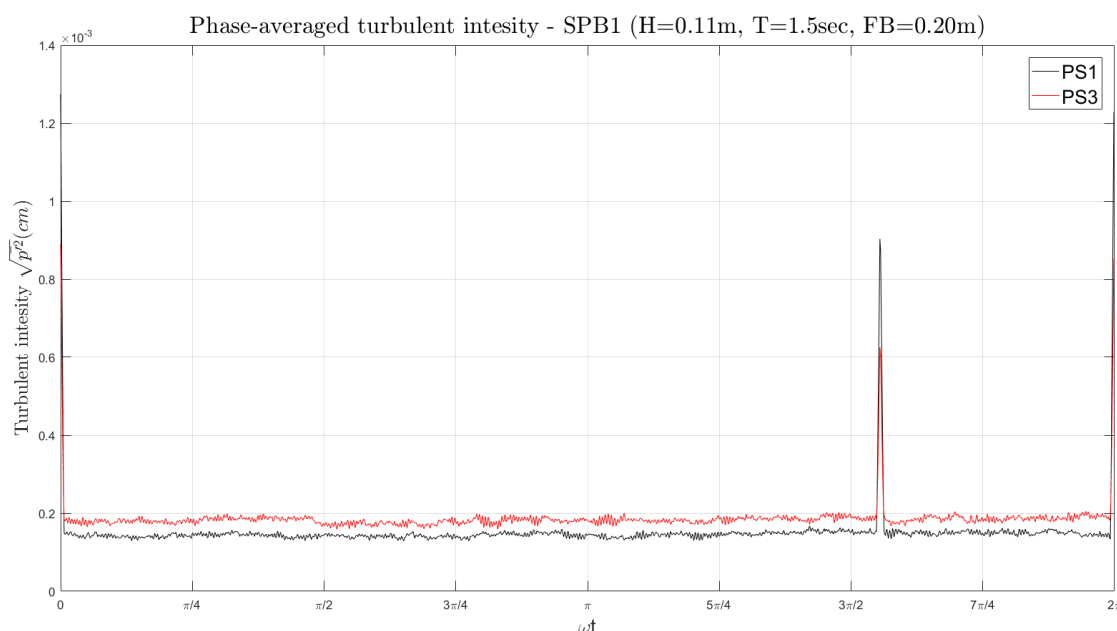
Σχήμα 5.27. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R6).



Σχήμα 5.28. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R6).

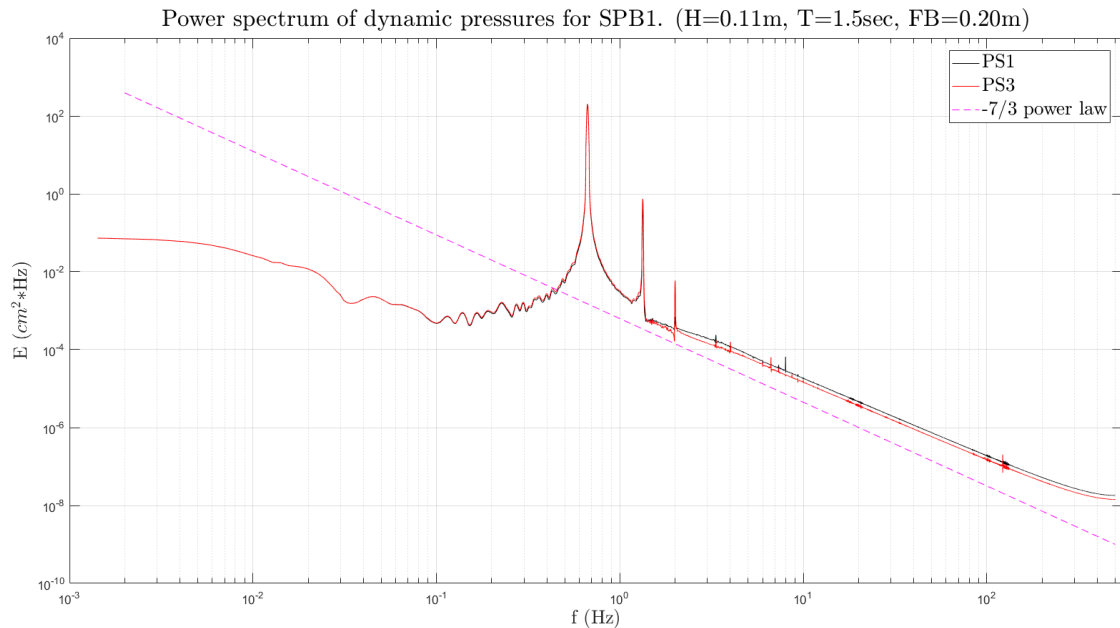
Στη συνέχεια, υπολογίστηκε η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt και παρουσιάζονται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.29. Από το

σχήμα φαίνεται, ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων παίρνει τη μέγιστη τιμή της και για τις δύο θέσεις μέτρησης ταυτόχρονα και είναι $[0.0(rad), 1.274 * 10^{-3}(cm)]$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $[0.0(rad), 8.901 * 10^{-4}(cm)]$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζεται επίσης ταυτόχρονα ένα ακόμα μέγιστο για $[2.55(rad), 9.33 * 10^{-4}(cm)]$ (PS1) και $[2.55(rad), 6.26 * 10^{-4}(cm)]$ (PS3) αντίστοιχα. Και σε αυτό το σενάριο, όπως προαναφέρθηκε, οι τυρβώδεις πιέσεις είναι πρακτικά μηδενικές και δεν γίνεται να βγουν ασφαλή συμπεράσματα καθώς αντίστοιχα με τα σενάρια 1-R1 και 1-R5, η τάξη μεγέθους του θορύβου του οργάνου ήταν μεγάλη σε σχέση με τις μετρημένες τιμές της πίεσης και επομένως η εφαρμογή των φίλτρων, ώστε να αναζητηθεί η τάση αυτών των μεγεθών έχει αναπόφευκτα οδηγήσει σε αφαίρεση πληροφορίας, η οποία ωστόσο θα είναι σίγουρα αρκετά μικρή ($010^{-3}(cm)$ και μικρότερη).



Σχήμα 5.29. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R6).

Τέλος, το Σχήμα 5.30 αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.66Hz$ ($T = 1.5sec$), και είναι ίση με $179.4 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $201.5 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται δύο ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 1.33Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.422 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.745 (cm^2 * Hz)$ (PS3), και για $f = 2.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $6.9 * 10^{-4} (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $5.9 * 10^{-3} (cm^2 * Hz)$ (PS3). Το αδρανειακό υποεύρος εντοπίζεται και στις δύο περιπτώσεις ανάμεσα στις συχνότητες $f = 2Hz$ μέχρι $f = 200Hz$.

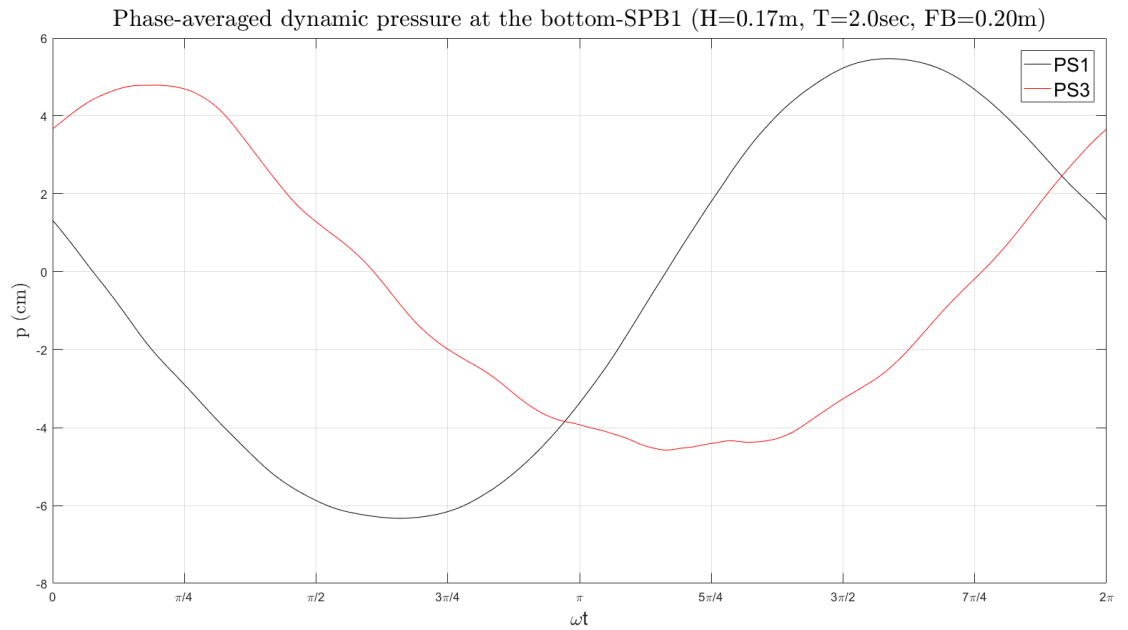


Σχήμα 5.30. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R6).

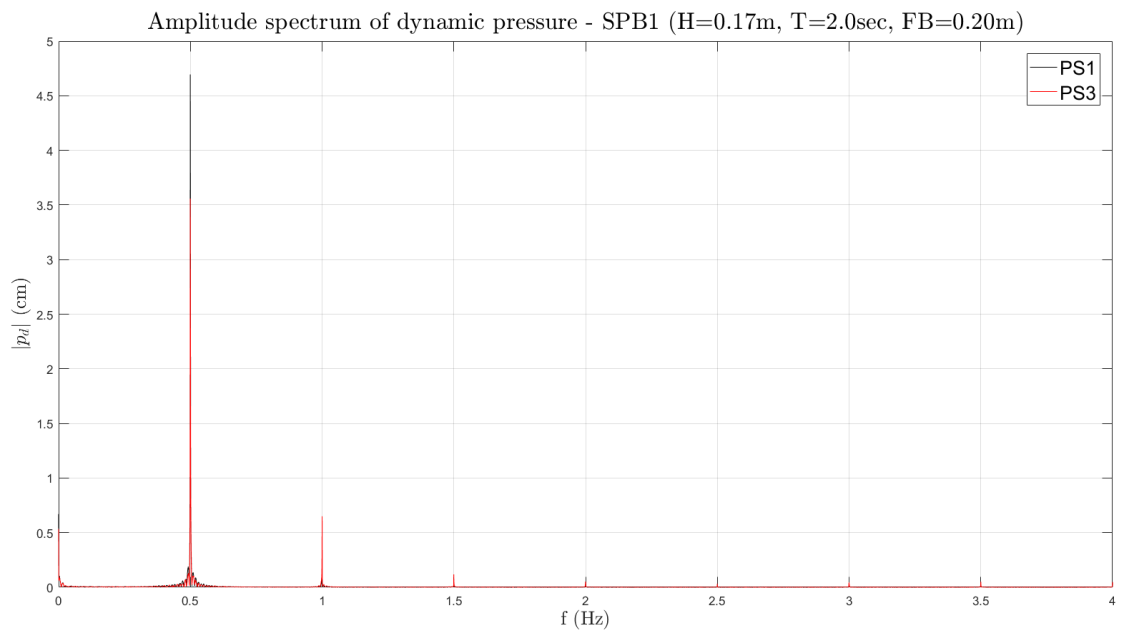
5.2.3 Κυματικό σενάριο 1-R7 (H=0.17m, T=2.0sec)

Η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση, όπως υπολογίστηκε μετά από το φιλτράρισμα των δεδομένων φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.31. Όπως παρατηρείται, το εύρος των δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά είναι μεγαλύτερο από αυτό στην υπήνεμη και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιτελείται θραύση και άρα απόσβεση ενέργειας. Συγκεκριμένα, το εύρος των πιέσεων στη θέση του PS1 είναι $[-6.33, +5.47]$ (cm), ενώ για το PS3 είναι $[-4.57, +4.79]$ (cm). Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή της μέσης πίεσης $|\bar{P}|$ είναι μειωμένη στην προσήνεμη θέση σε σύγκριση με το σενάριο 1-R3, που το κύμα έχει ίδιο ύψος H και περίοδο T, κάτι που οφείλεται στην ανύψωση της ΜΣΗΣ. Συγκεκριμένα, για το σημείο μέτρησης του πιεσόμετρου PS1 η μείωση είναι 30.4%, αλλά στη θέση του πιεσόμετρου PS3 είναι αυξημένη κατά 8.6% λόγω ασθενέστερης θραύσης.

Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.32, παρατηρήθηκε ότι και στις δύο θέσεις καταγραφής έχουμε εμφάνιση δύο αρμονικών συνιστωσών με τη δεύτερη να μην έχει όμως σημαντικό εύρος. Το εύρος των αρμονικών πιέσεων που μετρήθηκαν στην προσήνεμη θέση είναι μεγαλύτερο, και συγκεκριμένα το εύρος της 1^{ης} αρμονικής, η οποία εντοπίζεται για $f = 0.5\text{Hz}$ ($T = 2.0\text{sec}$), είναι 4.695 (cm) για την προσήνεμη θέση (PS1) και 3.559 (cm) για την υπήνεμη (PS3) αντίστοιχα. Επίσης, η 2^η αρμονική εμφανίζεται για $f = 1.0\text{Hz}$ και έχει εύρος στην προσήνεμη θέση ίσο με 0.374 (cm) (7.9% της 1^{ης}) και στην υπήνεμη 0.650 (cm) (18.3% της 1^{ης}). Παρατηρείται έτσι ο μετασχηματισμός του κύματος στην υπήνεμη θέση λόγω της θραύσης αλλά και γενικότερα της επιρροής της κατασκευής στην μετάδοση του κύματος και την εμφάνιση μη γραμμικοτήτων.

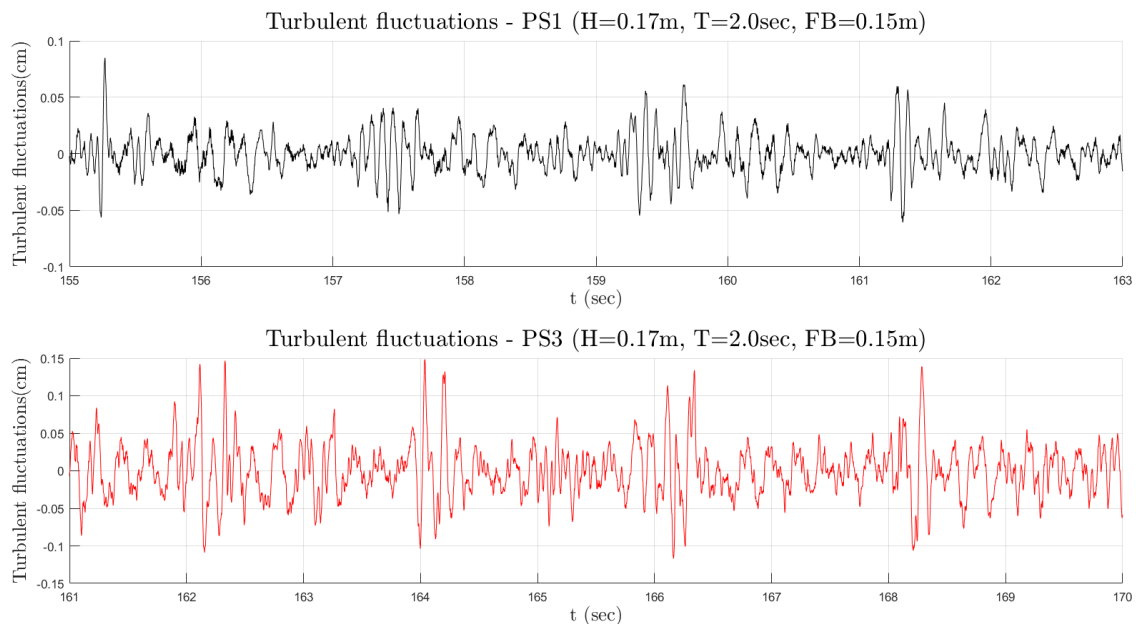


Σχήμα 5.31. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R7).



Σχήμα 5.32. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R7).

Στο Σχήμα 5.33 παρουσιάζεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων σε ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο της χρονοσειράς.

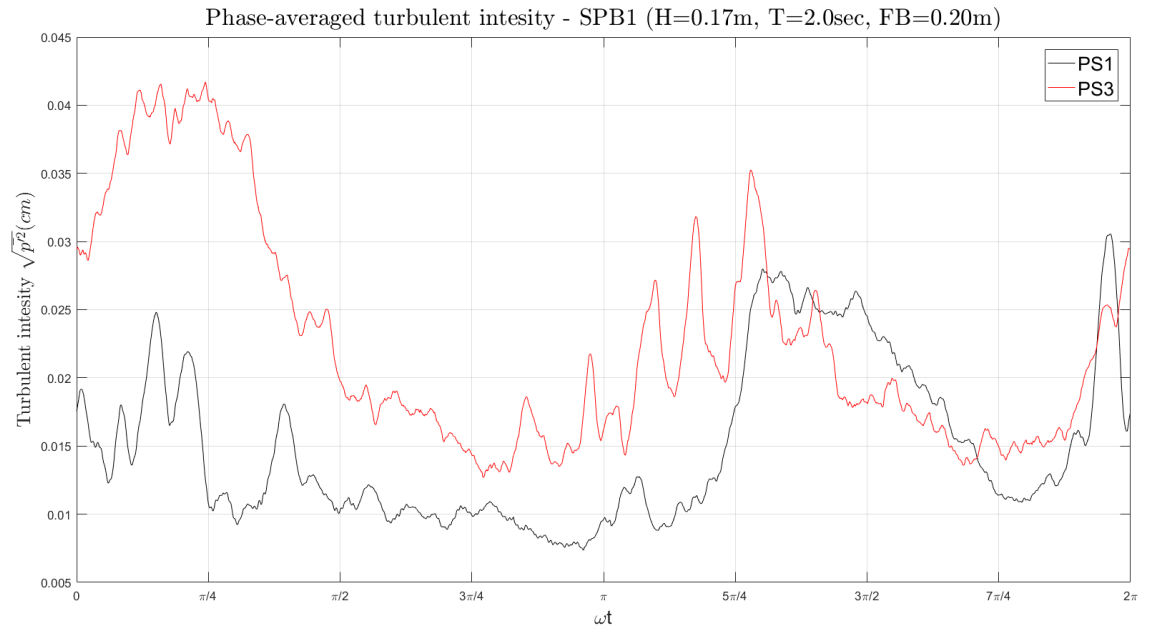


Σχήμα 5.33. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R7).

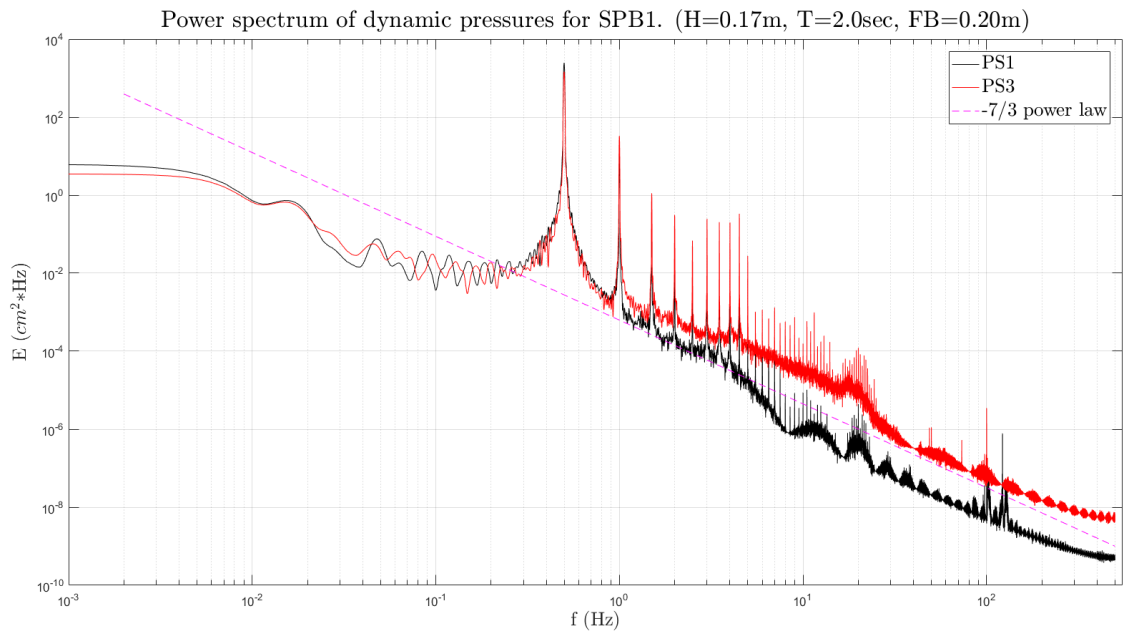
Από τη χρονοσειρά των τυρβώδεις διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.34. Από αυτό φαίνεται ότι η τυρβώδης εντάση των δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη θέση (PS1) γίνεται μέγιστη για $[6.161(rad), 0.031(cm)]$, ενώ άλλες δύο μεγάλες τιμές εμφανίζονται εντός της φάσης και είναι $[4.087(rad), 0.030(cm)]$ και $[0.471(rad), 0.028(cm)]$. Αντίστοιχα, στην υπήνεμη θέση μέτρησης PS3 λόγω της θραύσης του κυματισμού και επομένως του μετασχηματισμού του, στο διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων που παρουσιάζεται παρακάτω παρατηρούνται 'κόρυφες' σε διάφορες φάσεις του κυματισμού, με τη μέγιστη τιμή της έντασης να εντοπίζεται για $[0.763(rad), 0.042(cm)]$. Άλλες σημαντικές τιμές της τυρβώδους έντασης εντός της φάσης του κυματισμού είναι οι επόμενες : $[4.018(rad), 0.035(cm)]$, $[3.691(rad), 0.032(cm)]$, $[3.443(rad), 0.027(cm)]$ και $[3.057(rad), 0.022(cm)]$. Παρατηρείται, επομένως, ότι λόγω της αύξησης του βάρους του νερού και κατ επέκταση του ελεύθερου ύψους πάνω από τη στέψη της κατασκευής, η ένταση της τύρβης είναι αισθητά μικρότερη σε σύγκριση με το σενάριο 1-R3, όταν και εφαρμόστηκε κύμα με ίδια χαρακτηριστικά, αλλά με $FB = 0.15 cm$. Συγκεκριμένα, η τυρβώδεις εντάσεις είναι μειωμένες κατά 56.9% στην προσήνεμη θέση PS1 και κατά 70.0% στην υπήνεμη θέση PS3 σε σύγκριση με τις τιμές που υπολογίστηκαν για το σενάριο 1-R3.

Από το Σχήμα 5.35 που αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.5Hz$ ($T = 2sec$), και είναι ίση με $2468.5 (cm^2 * Hz)$ (μειωμένη κατά 9.1% σε σχέση με το σενάριο 1-R3) για την προσήνεμη θέση (PS1) και $1462.8 (cm^2 * Hz)$ (αυξημένη κατά 48.1% σε σχέση με το σενάριο 1-R3) για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζεται ένα ακόμα μέγιστο και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 1.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $10.62 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $33.01 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Τέλος, το αδρανειακό υπό-εύρος κατά Kolmogorov, εμφανίζεται

για την προσήνεμη και την υπήνεμη θέση στις συχνότητες $f = 1Hz$ μέχρι $f = 200Hz$.



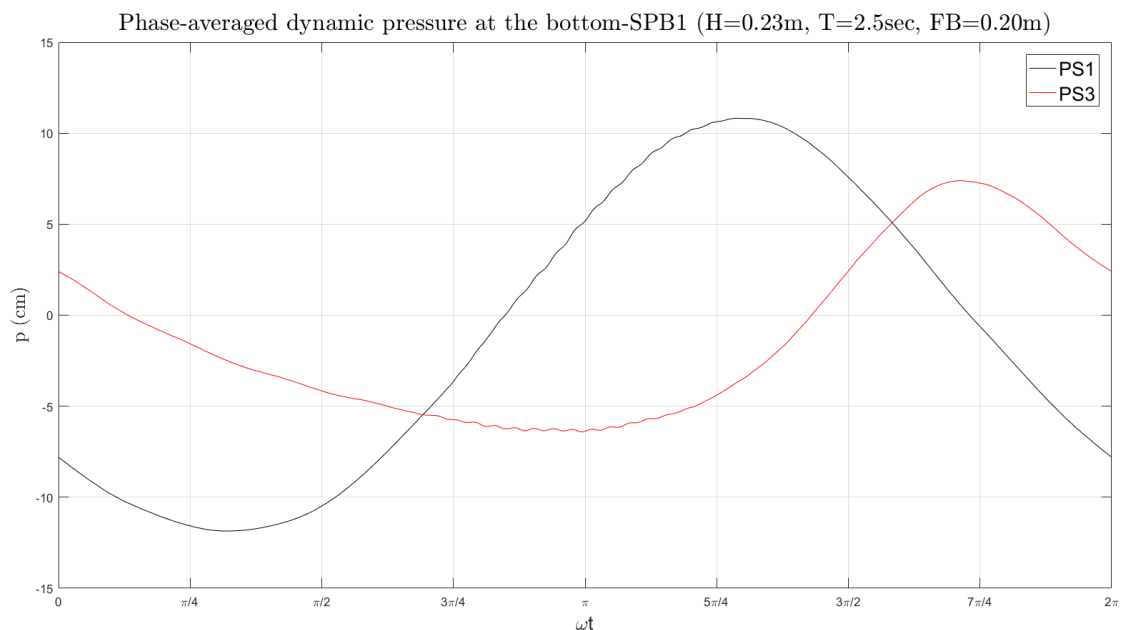
Σχήμα 5.34. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R7).



Σχήμα 5.35. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R7).

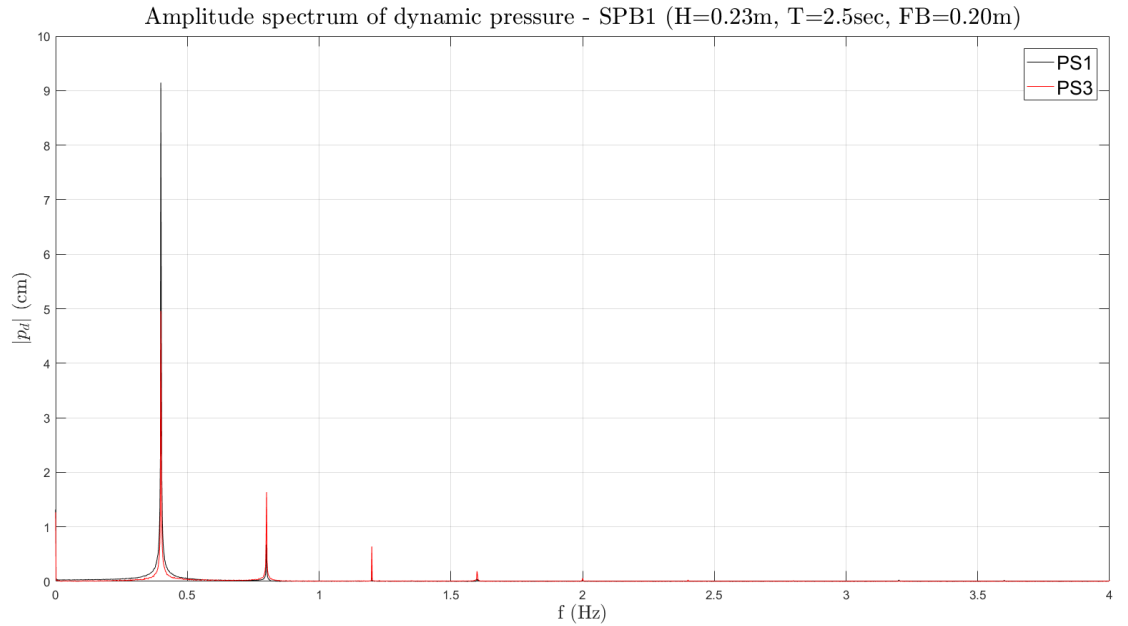
5.2.4 Κυματικό σενάριο 1-R8 (H=0.23m, T=2.5sec)

Σε αυτό το κυματικό σενάριο, το οποίο έχει και το μεγαλύτερο ύψος κύματος H και μεγαλύτερη περίοδο T μετρήθηκαν οι μεγαλύτερες τιμές των πιέσεων, για την περίπτωση του $FB=0.20$ m, αλλά είναι μικρότερες σε σύγκριση με το σενάριο 1-R4. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα Σχήμα 5.36, στο οποίο παριστάνεται γραφικά η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση, το εύρος τιμών της πίεσης για την προσήνεμη θέση είναι $[-11.86, +10.82]$ (cm) (11.5% αύξηση της μέσης αρνητικής πίεσης και 11.1% μείωση της μέσης θετικής πίεσης σε σύγκριση με το σενάριο 1-R4), ενώ για την υπήνεμη θέση είναι $[-6.41, +7.39]$ (cm) (27.7% αύξηση της μέσης αρνητικής πίεσης και 17.9% μείωση της μέσης θετικής πίεσης σε σύγκριση με το σενάριο 1-R4).

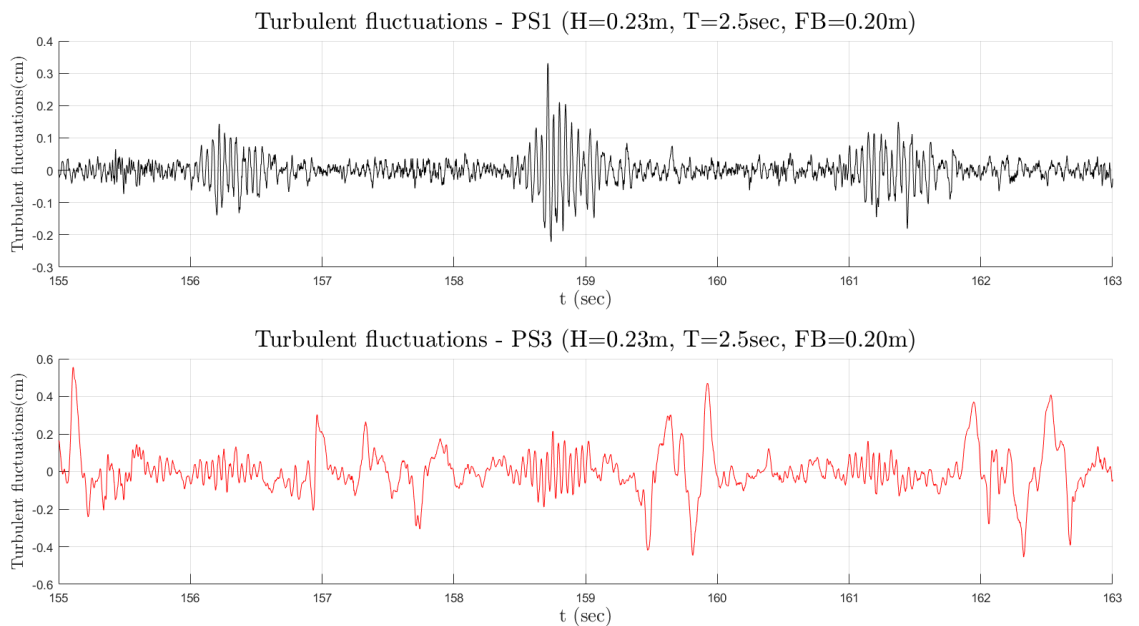


Σχήμα 5.36. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R8).

Η ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων παριστάνεται γραφικά στο παρακάτω Σχήμα 5.37. Όπως φαίνεται, το εύρος της 1^{ης} αρμονικής, για $f = 0.4Hz$, στην προσήνεμη θέση είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σύγκριση με την υπήνεμη και συγκεκριμένα είναι 9.150 (cm) (PS1) (μειωμένο κατά 5.6% σε σύγκριση με το σενάριο 1-R4) και 4.958 (cm) αντίστοιχα (PS3) (μειωμένο κατά 6.5% σε σύγκριση με το σενάριο 1-R4 και κατά 45.8% σε σύγκριση με την προσήνεμη θέση). Επίσης, εμφανίζονται και κάποιες δευτερεύουσες αρμονικές συνιστώσες, και συγκεκριμένα όσο αφορά την προσήνεμη θέση (PS1), μια 2^η για $f = 0.8Hz$ και με εύρος 0.677 (cm) (7.4% της 1^{ης}) και μια 3^η για $f = 1.2Hz$ με εύρος 0.179 (cm) (2.0% της 1^{ης}), και αντίστοιχα στην υπήνεμη θέση (PS3) η 2^η έχει εύρος 1.636 (cm) (33.0% της 1^{ης}) και η 3^η 0.640 (cm) (12.9% της 1^{ης}).



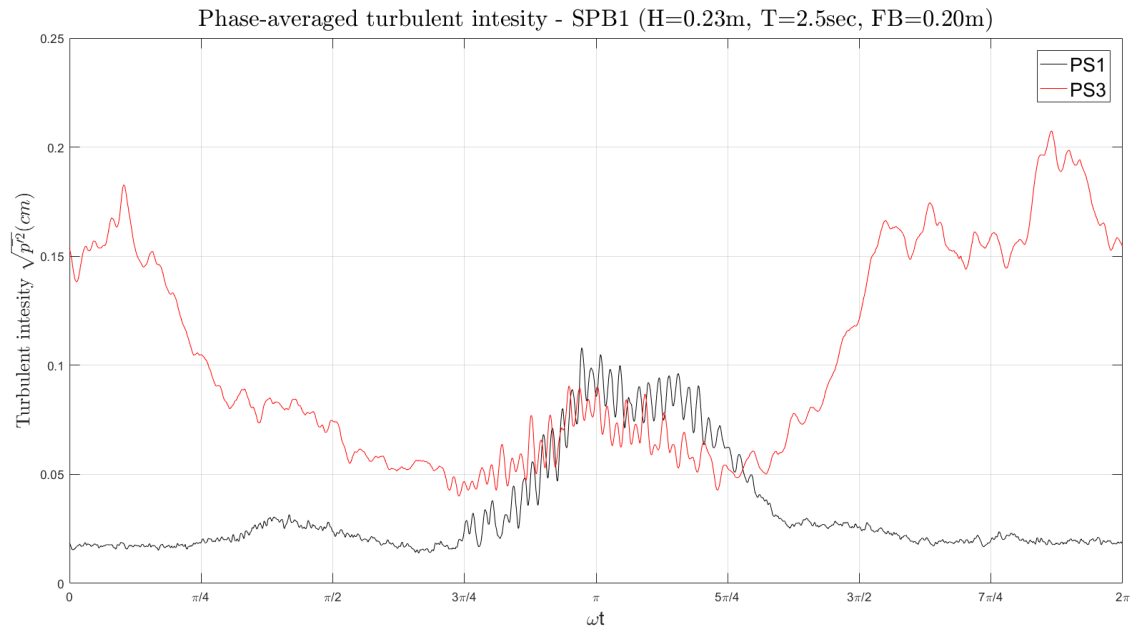
Σχήμα 5.37. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R8).



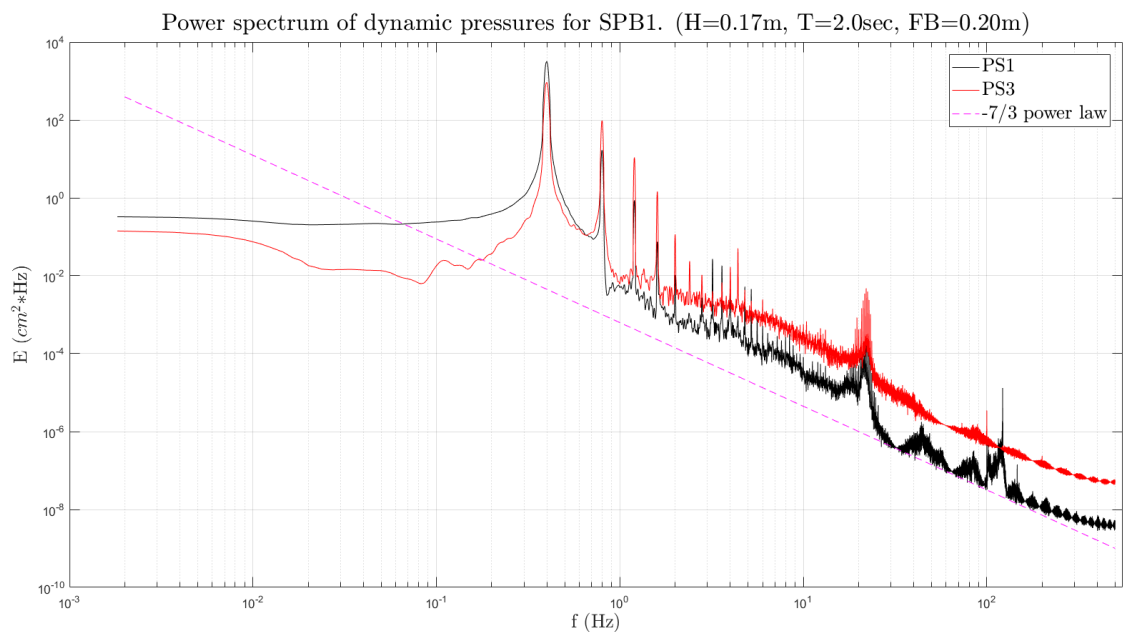
Σχήμα 5.38. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 1-R8).

Στο παραπάνω Σχήμα 5.38 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.39.

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων



Σχήμα 5.39. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R8).



Σχήμα 5.40. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 1-R8).

Από το Σχήμα 5.39 φαίνεται ότι οι τυρβώδεις εντάσεις στην προσήνεμη θέση PS1 εμφανίζουν ένα ουσιαστικά μέγιστο, το οποίο είναι ίσο με 0.108 (cm) (μειωμένη κατά 18.2% σε σύγκριση με το σενάριο 1-R4), ενώ στην υπήνεμη θέση PS3, όπου έχει συντελεστεί και

θραύση του κυματισμού, εμφανίζονται παραπάνω από μια 'κορυφές' με τη μέγιστη ένταση να εντοπίζεται για $[5.858(rad), 0.207(cm)]$ (μειωμένη κατά 2.8% σε σύγκριση με το σενάριο 1-R4), ενώ άλλες σημαντικές τιμές είναι $[0.332(rad), 0.182(cm)]$, $[5.132(rad), 0.175(cm)]$ και $[4.866(rad), 0.166(cm)]$.

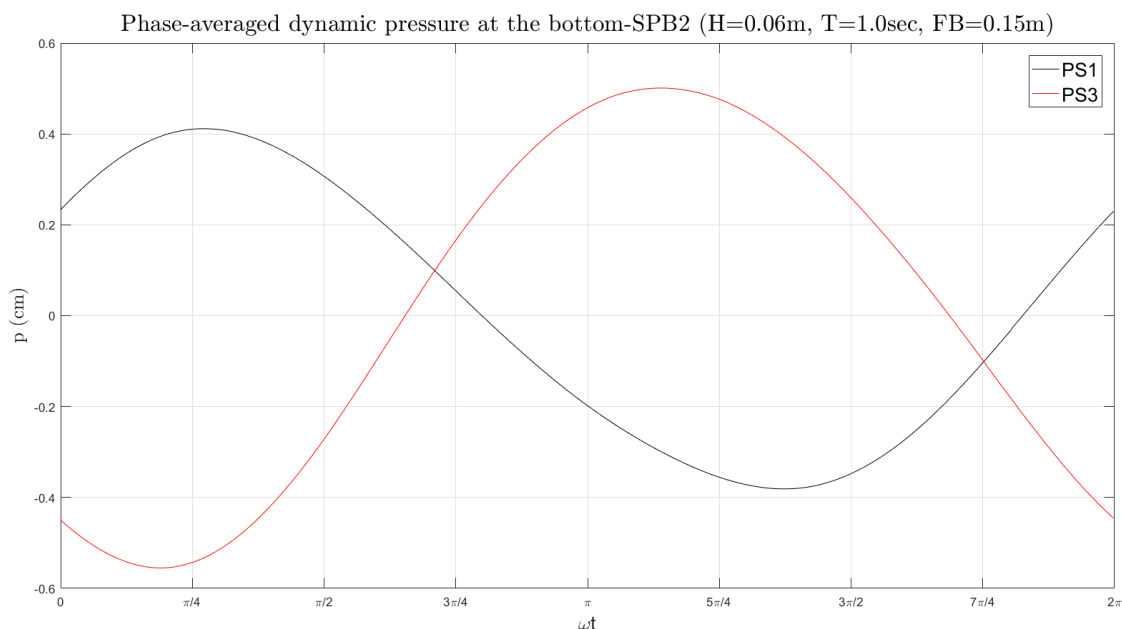
Στο παραπάνω Σχήμα 5.40, παρουσιάζονται τα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, και φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.4Hz$ ($T = 2.5sec$), και είναι ίση με $3157 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $921 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται δύο ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 0.8Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $16.8 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $95.7 cm^2 * Hz$ (PS3), και για $f = 1.2Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $0.86 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $10.81 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Το αδρανειακό υποέυρος εντοπίζεται για τις μετρήσεις στην προσήνεμη θέση ανάμεσα στις συχνότητες $f = 0.85Hz$ μέχρι $f = 260Hz$, ενώ για την υπήνεμη θέση για $f = 0.9Hz$ μέχρι $f = 310Hz$.

5.3 Μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.65m

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που αφορούν τον κυματοθραύστη SPB2, με γεωμετρία όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και για ελεύθερο ύψος πάνω από τη στέψη του κυματοθραύστη ίσο με 0.15 cm ($z/d = 0.08$).

5.3.1 Κυματικό σενάριο 2-R1 ($H=0.06m$, $T=1.0sec$)

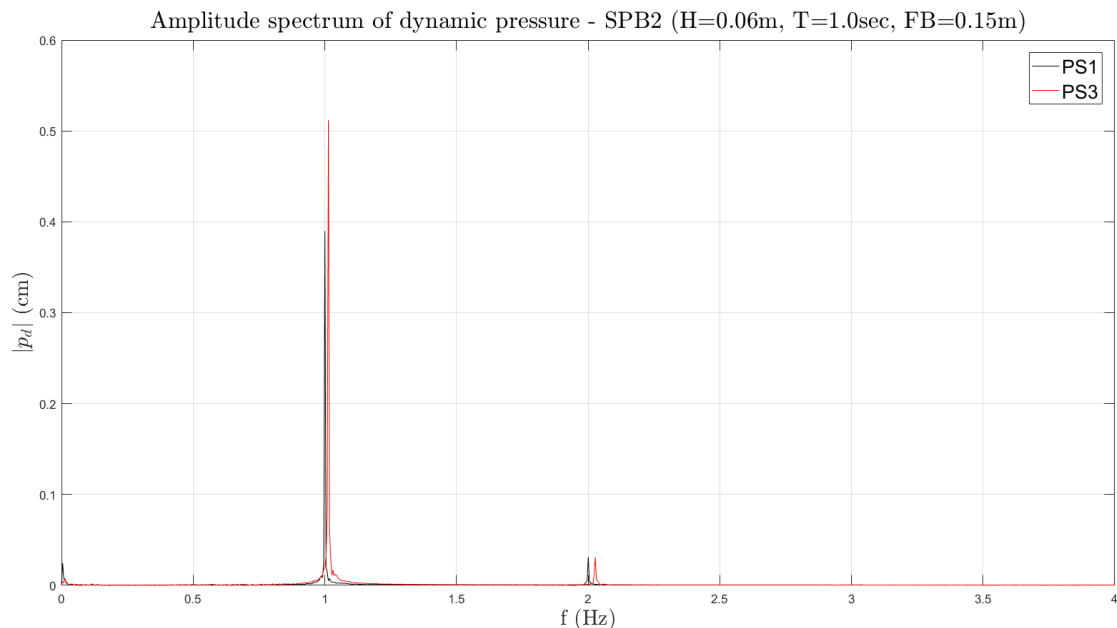
Όπως και για τα παραπάνω κυματικά σενάρια, η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.41.



Σχήμα 5.41. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R1).

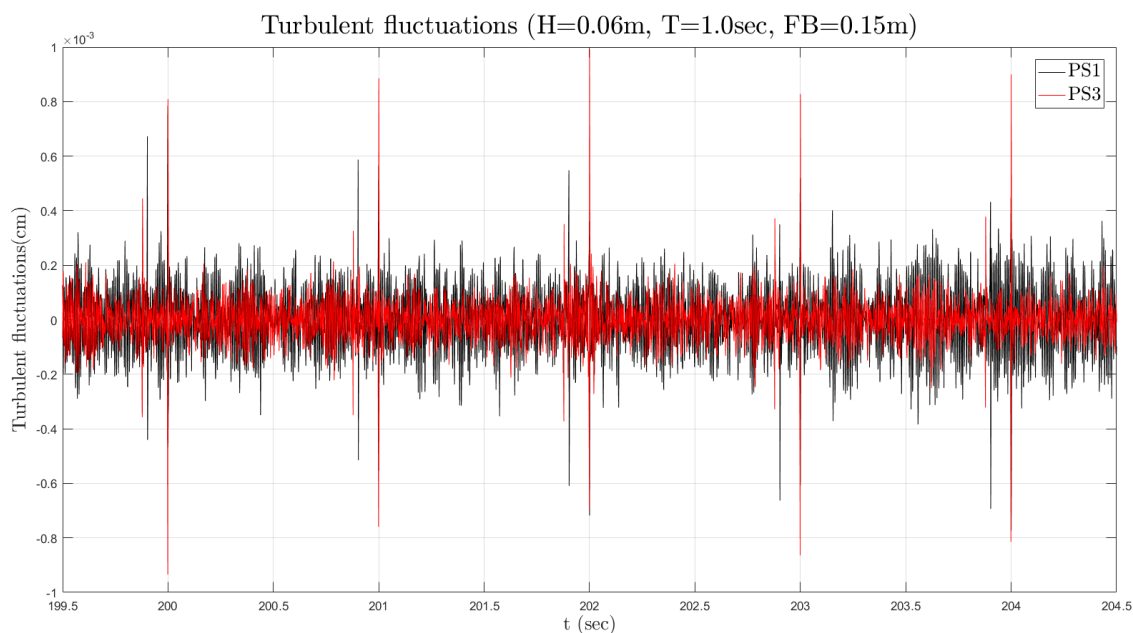
Από το Σχήμα 5.41 φαίνεται ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης για την προσήνεμη θέση (PS1) είναι $[-0.381,+0.411](\text{cm})$ και για την υπήνεμη θέση (PS3) $[-0.555,+0.501](\text{cm})$. Από τα παραπάνω προκύπτει, όπως και στην περίπτωση του σεναρίου 1-R1 και του 1-R5 έτσι κι εδώ, ότι η δυναμική πίεση στην υπήνεμη θέση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την προσήνεμη θέση, ταυτόχρονα όμως παρατηρείται και μια σημαντική αύξηση της δυναμικής πίεσης σε σύγκριση με το σενάριο 1-R1, κάτι το οποίο οφείλεται στη γεωμετρία της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μεγαλύτερο πλάτος της στέψης.

Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.42, έχουμε ότι η 1^η αρμονική και για τις δύο θέσεις μέτρησης εμφανίζεται περίπου για $f = 1.0\text{Hz}$, και τα αντίστοιχα εύρη είναι 0.390 (cm) (PS1) και 0.512 (cm) (PS3), με τη δυναμική πίεση στην υπήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερη κατά 23.8%. Εμφανίζεται και μια ακόμη αρμονική για $f = 2.0\text{Hz}$ για την οποία τα αντίστοιχα εύρη είναι 0.032 (cm) (PS1) (8.2% της 1^{ης} αρμονικής) και 0.031 (cm) (PS3) (6.1% της 1^{ης} αρμονικής). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης της 1^{ης} αρμονικής στην προσήνεμη θέση είναι μεγαλύτερο κατά 47.7% σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέτρηση του σεναρίου 2-R1, ενώ στην υπήνεμη θέση είναι αυξημένη κατά 37.3% αντίστοιχα.

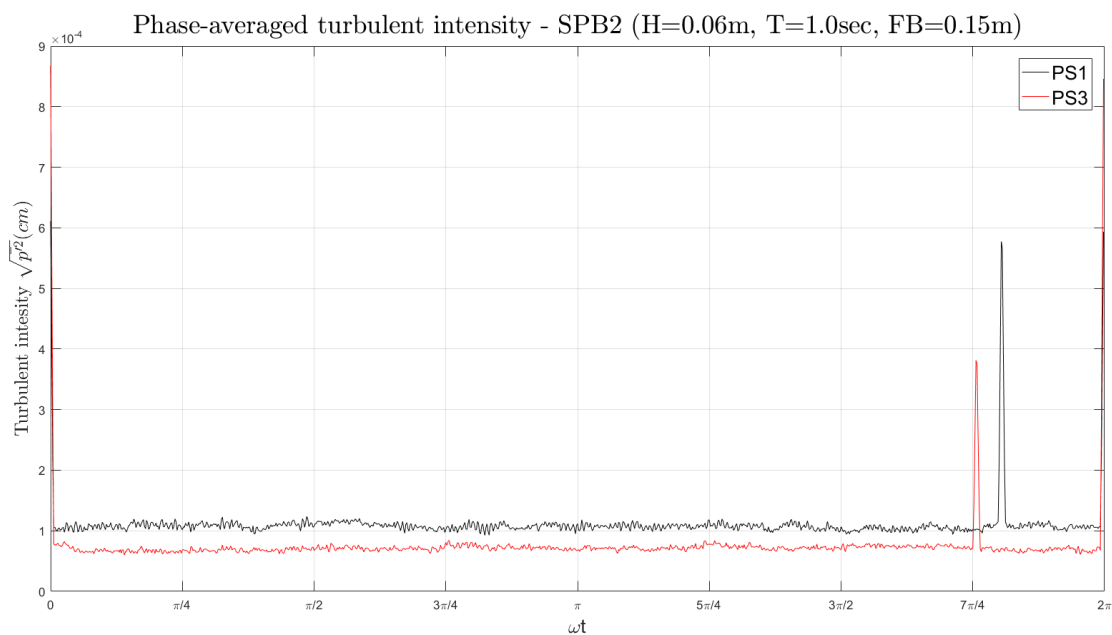


Σχήμα 5.42. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R1).

Στο παρακάτω Σχήμα 5.43 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.44. Από αυτό έχουμε ότι η μέγιστη τυρβώδης ένταση για την προσήνεμη θέση (PS1) είναι $[5.667(\text{rad}), 5.7 \cdot 10^{-4}(\text{cm})]$ και αντίστοιχα για την υπήνεμη θέση (PS3) είναι $[5.517(\text{rad}), 3.8 \cdot 10^{-4}(\text{cm})]$. Επίσης, η ένταση της τύρβης στη θέση του PS1 είναι αυξημένη κατά 55.8% σε σύγκριση με αυτή του σεναρίου 1-R1 και αντίστοιχα στην υπήνεμη θέση (PS3) είναι αυξημένη κατά 42.4%.



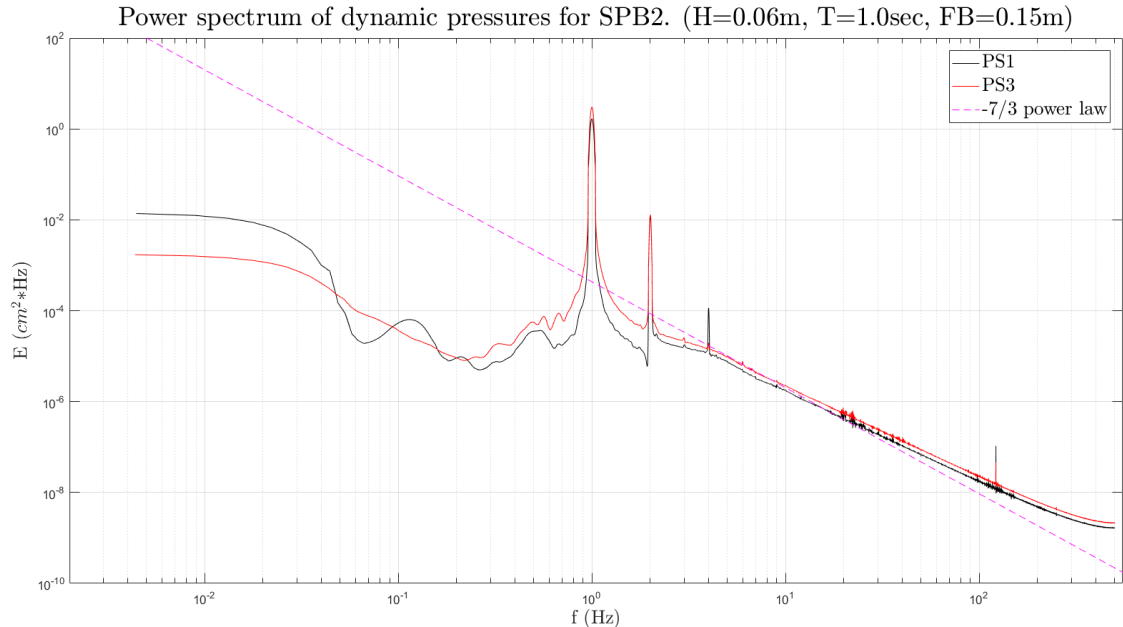
Σχήμα 5.43. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R1).



Σχήμα 5.44. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R1).

Τέλος στο Σχήμα 5.45 παρουσιάζονται τα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, και φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 1.0\text{Hz}$ ($T = 1.0\text{sec}$), και είναι ίση με $1.668\text{ (cm}^2 * \text{Hz)}$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $3.02\text{ (cm}^2 * \text{Hz)}$ για

την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζεται ένα ακόμα μέγιστο και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 2.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.011 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.013 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Τέλος, το αδρανειακό υποεύρος εντοπίζεται και για τις δύο θέσεις μέτρησης ανάμεσα στις συχνότητες $f = 4.0Hz$ μέχρι $f = 160Hz$.

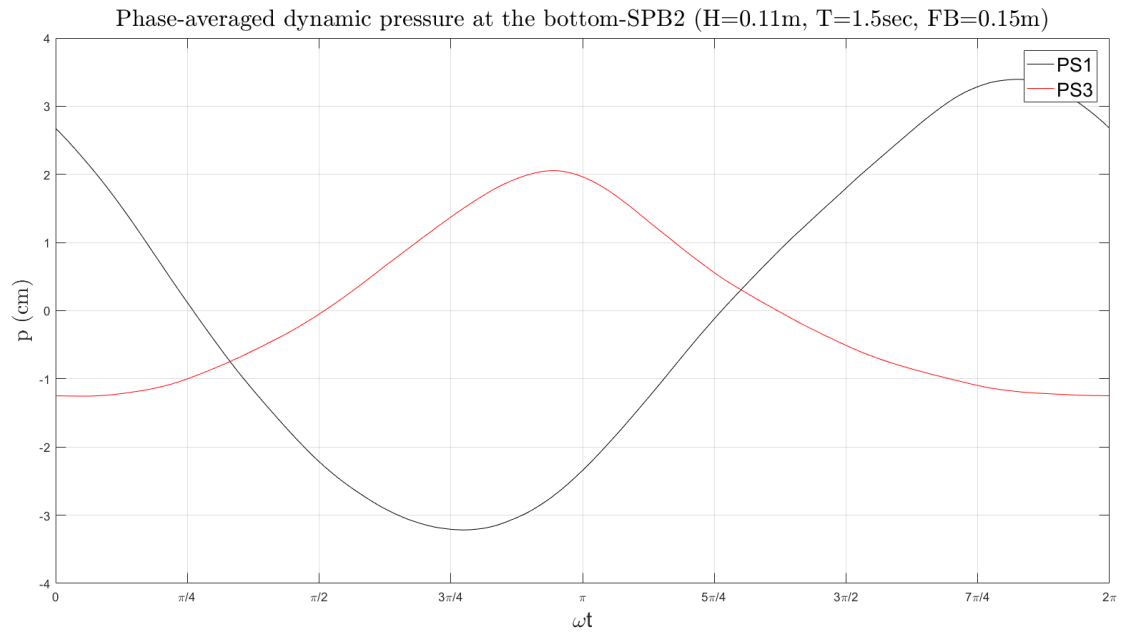


Σχήμα 5.45. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R1).

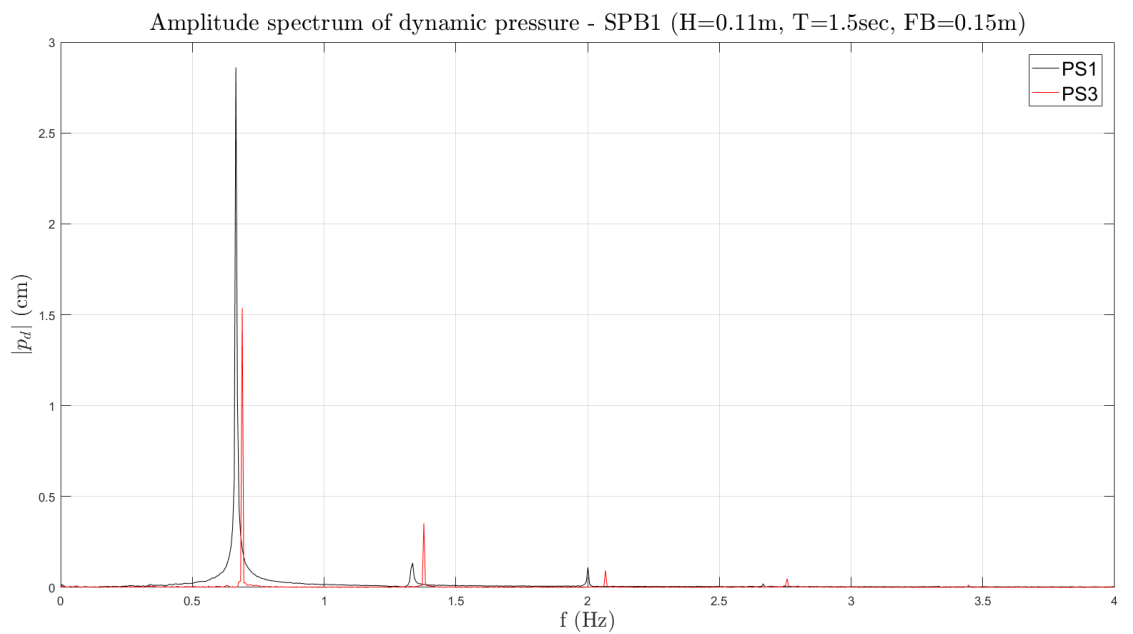
5.3.2 Κυματικό σενάριο 2-R2 (H=0.11m, T=1.5sec)

Η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.41. Από αυτό φαίνεται ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης για την προσήνεμη θέση (PS1) είναι $[-3.215, +3.393](cm)$ και για την υπήνεμη θέση (PS3) $[-1.249, +2.054](cm)$, εμφανίζονται επομένως σημαντικά αυξημένες και σε με το σενάριο 1-R2 και με το σενάριο 2-R1.

Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.47, έχουμε ότι η 1^η αρμονική της πίεσης και για τις δύο θέσεις μέτρησης εμφανίζεται περίπου για $f = 0.666Hz$ ($T = 1.5sec$), και τα αντίστοιχα εύρη είναι 2.86 (cm) (PS1) και 1.54 (cm) (PS3), με τη δυναμική πίεση στην προσήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερη κατά 46.1%. Εμφανίζονται και δύο ακόμη δευτερεύουσες αρμονικές, για την προσήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 1.336Hz$ και με εύρος 0.134 (cm) (4.7% της 1^{ης} αρμονικής) και για $f = 2.001Hz$ και με εύρος 0.111 (cm) (3.9% της 1^{ης} αρμονικής), ενώ στην υπήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 1.379Hz$ και με εύρος 0.352 (cm) (22.9% της 1^{ης} αρμονικής) και για $f = 2.068Hz$ και με εύρος 0.093 (cm) (6.0% της 1^{ης} αρμονικής). Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης της 1^{ης} αρμονικής στην προσήνεμη θέση είναι μεγαλύτερο κατά 29.6% σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέτρηση του σεναρίου 2-R1, ενώ στην υπήνεμη θέση είναι μειωμένη κατά 23.3%.



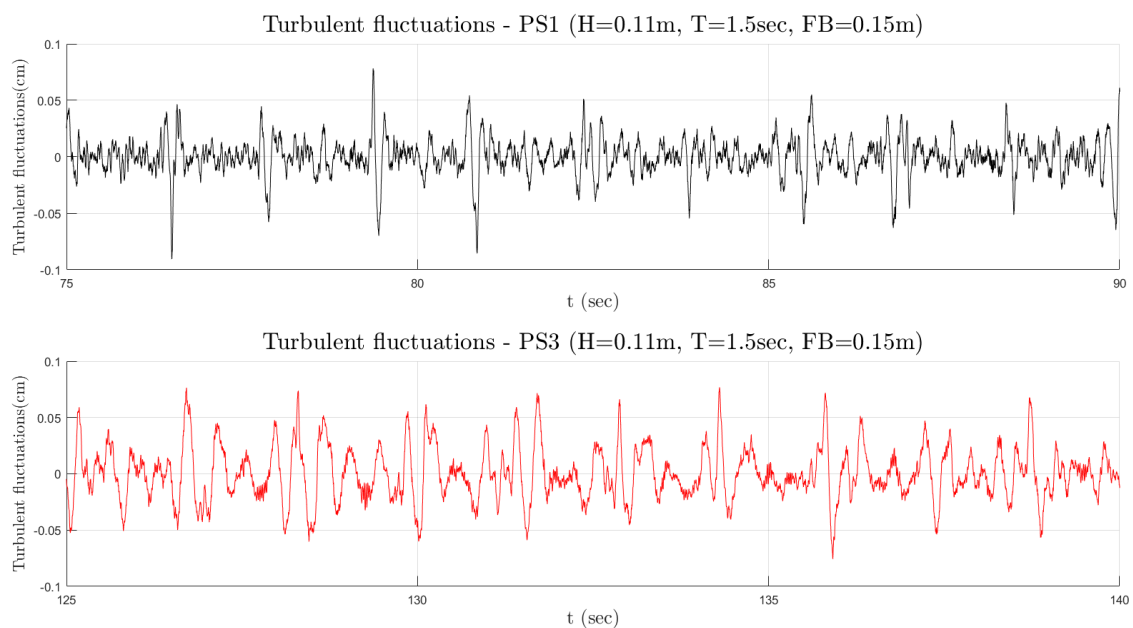
Σχήμα 5.46. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R2).



Σχήμα 5.47. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R2).

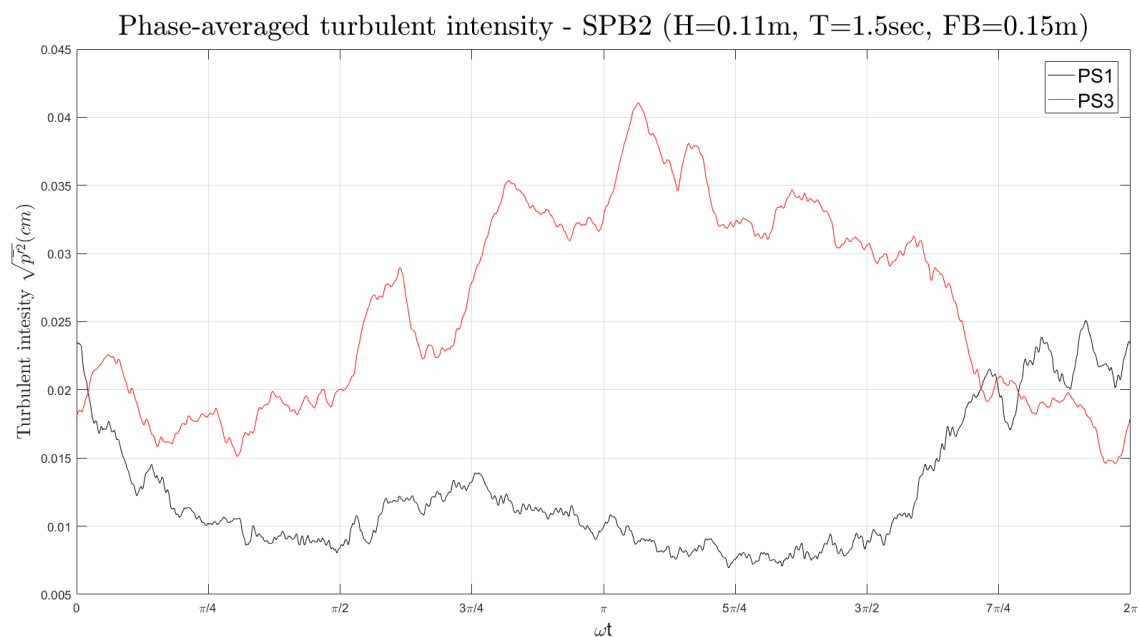
Στο παρακάτω Σχήμα 5.48 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.49.

Από αυτό έχουμε ότι η μέγιστη ένταση της τύρβης στην προσήνεμη θέση μέτρησης (PS1) εμφανίζεται εντός της φάσης του κυματισμού για $[6.015(rad), 0.025(cm)]$. Λόγω της ύπαρξης της κατασκευής, ο κυματισμός υπόκειται σε μετασχηματισμούς καθώς μεταδίδονται πάνω από την κατασκευή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο έντονης τύρβης, η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.49 από την εμφάνιση τριών 'κορυφών', οι οποίες είναι οι παρακάτω $[3.351(rad), 0.041(cm)]$, $[2.576(rad), 0.036(cm)]$ και $[1.931(rad), 0.029(cm)]$.

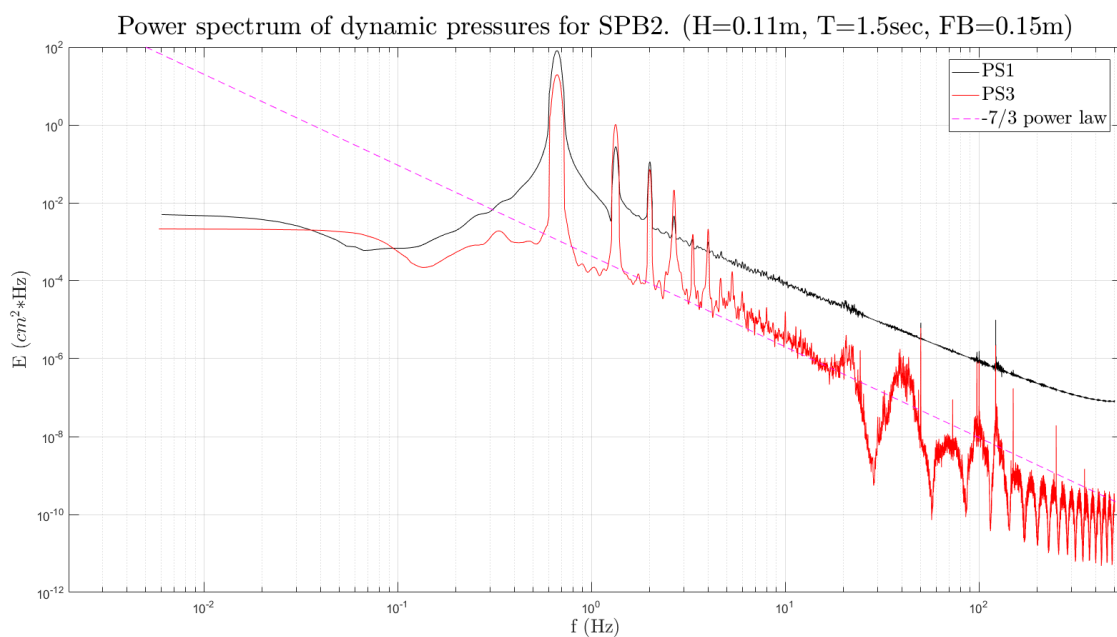


Σχήμα 5.48. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R2).

Τέλος, στο Σχήμα 5.50 παρουσιάζονται τα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, και φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.665Hz$ ($T = 1.5sec$), και είναι ίση με $80.17 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $19.48 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται τρεις ακόμα σημαντικές 'κορυφές' του φάσματος και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 1.33Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.276 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $1.027 (cm^2 * Hz)$ (PS3), για συχνότητα $f = 2.01Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.113 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.072 (cm^2 * Hz)$ και για συχνότητα $f = 2.66Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.005 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.022 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Τέλος, το αδρανειακό υποεύρος εντοπίζεται και για τις δύο θέσεις μέτρησης ανάμεσα στις συχνότητες $f = 2.0Hz$ μέχρι $f = 200Hz$.



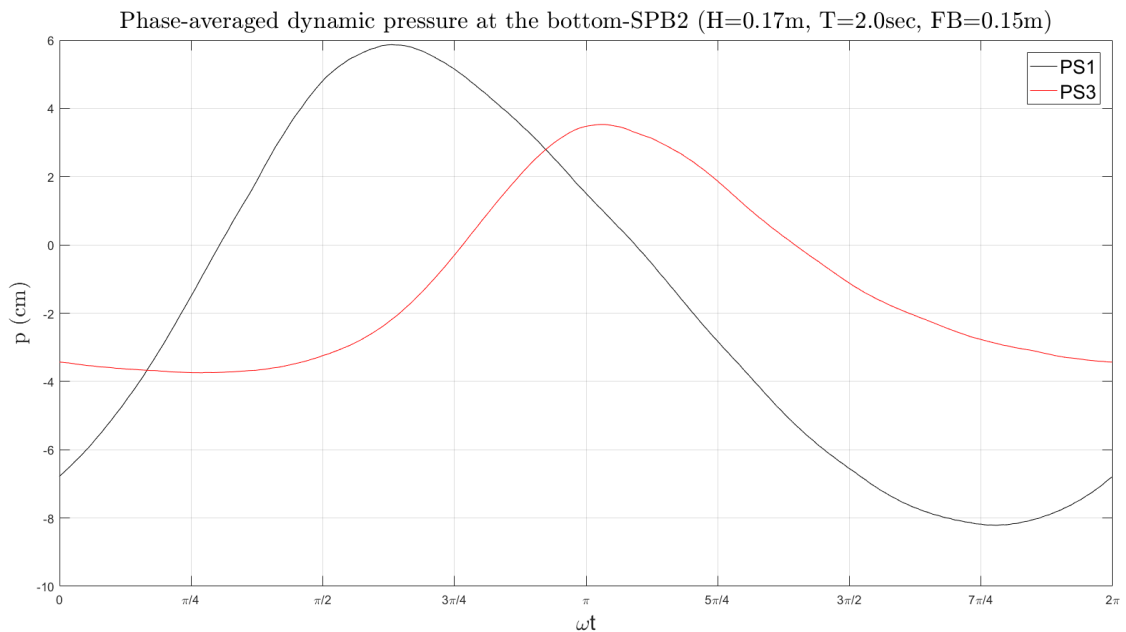
Σχήμα 5.49. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R2).



Σχήμα 5.50. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R2).

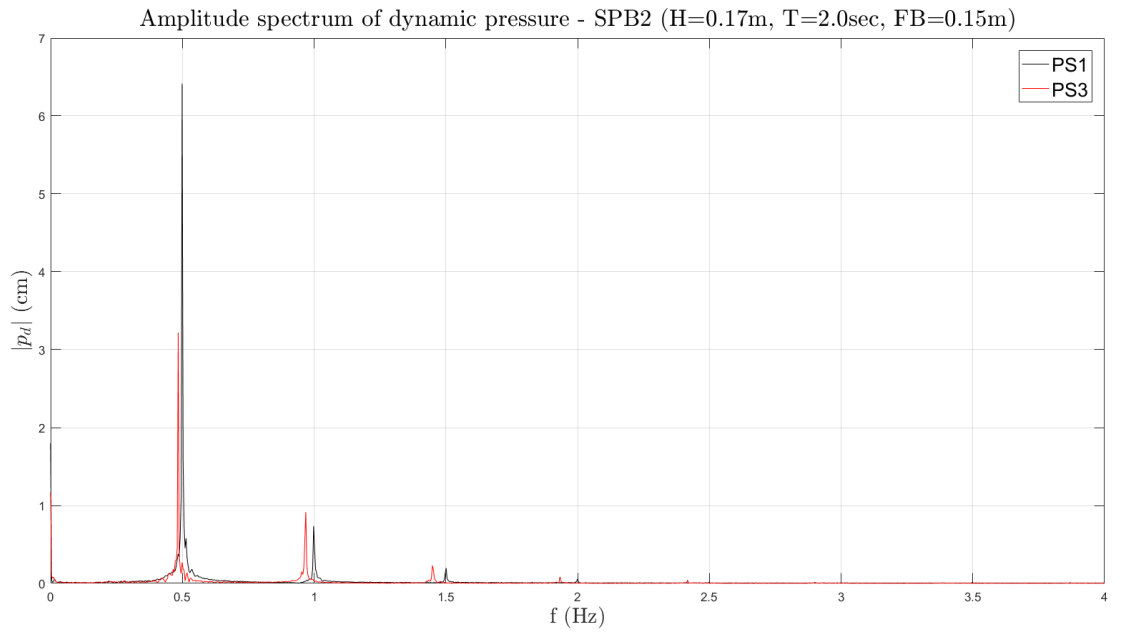
5.3.3 Κυματικό σενάριο 2-R3 (H=0.17m, T=2.0sec)

Στο παρακάτω Σχήμα 5.51 παρουσιάζεται η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμική πίεση. Από αυτό φαίνεται ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης για την προσήνεμη θέση (PS1) είναι $[-8.213, +5.866]$ (cm) και για την υπήνεμη θέση (PS3) $[-3.741, +3.523]$ (cm), εμφανίζονται επομένως αυξημένες σε σύγκριση με το σενάριο 2-R2. Στη θέση του πιεσομέτρου PS1 η μέγιστη μέση αρνητική πίεση έχει αυξηθεί κατά 16.2%, ενώ η θετική είναι μειωμένη κατά 9.8% σε σύγκριση με το σενάριο 1-R3, και αντίστοιχα στη θέση του πιεσομέτρου PS3 η αρνητική πίεση είναι μειωμένη κατά 17.5% και η θετική κατά 19.6%.

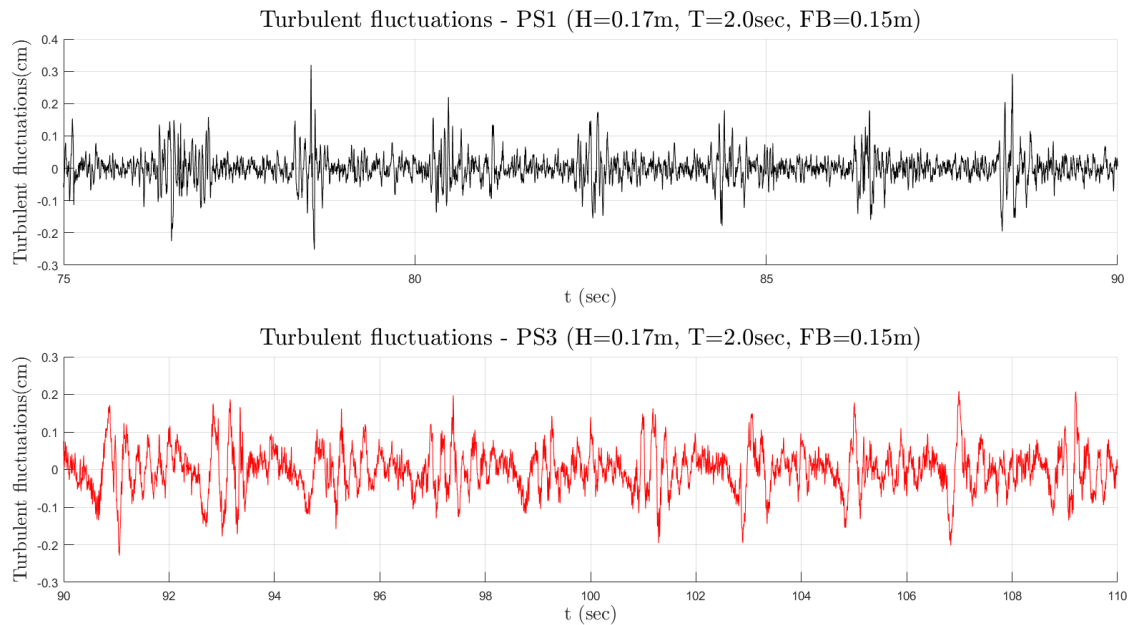


Σχήμα 5.51. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R3).

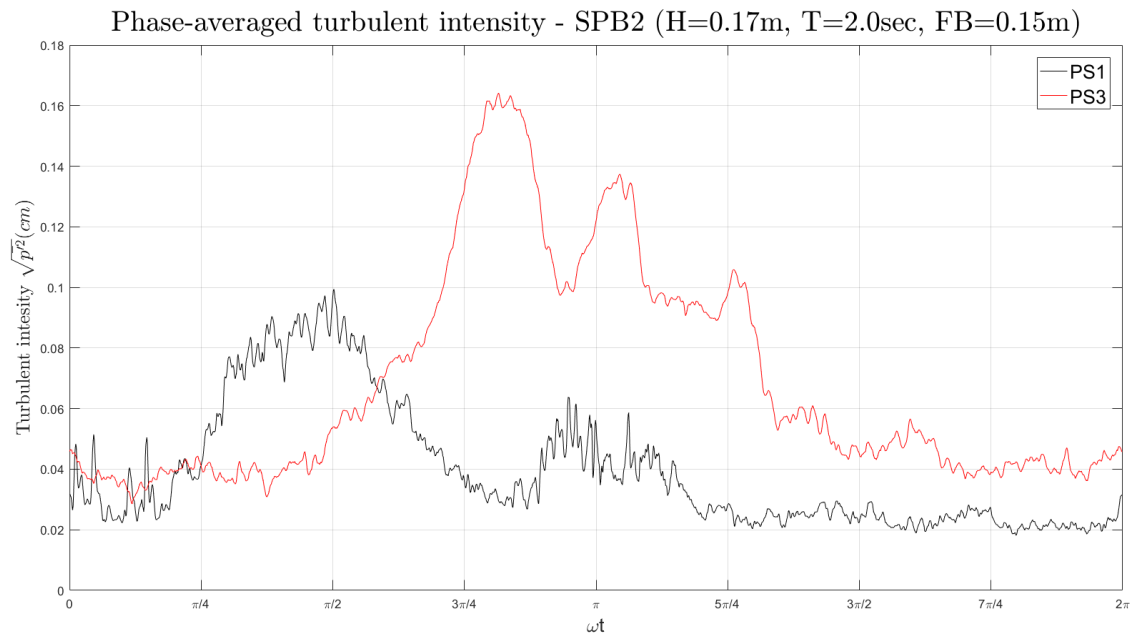
Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.52, έχουμε ότι η 1^η αρμονική και για τις δύο θέσεις μέτρησης εμφανίζεται περίπου για $f = 0.5Hz$, και τα αντίστοιχα εύρη είναι 6.414 (cm) (PS1) και 3.22 (cm) (PS3), με τη δυναμική πίεση στην προσήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερη κατά 49.8%. Εμφανίζεται και δύο ακόμη δευτερεύουσες αρμονικές, για την προσήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 1.0Hz$ και με εύρος 0.735 (cm) (16.7% της 1^{ης} αρμονικής) και για $f = 1.5Hz$ και με εύρος 0.198 (cm) (4.5% της 1^{ης} αρμονικής), ενώ στην υπήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 0.97Hz$ και με εύρος 0.918 (cm) (28.5% της 1^{ης} αρμονικής) και για $f = 1.45Hz$ και με εύρος 0.23 (cm) (7.1% της 1^{ης} αρμονικής). Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης της 1^{ης} αρμονικής στην προσήνεμη θέση είναι μεγαλύτερο κατά 55.4% σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέτρηση του σεναρίου 2-R2, και στην υπήνεμη θέση κατά 52.2%.



Σχήμα 5.52. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R3).



Σχήμα 5.53. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R3).

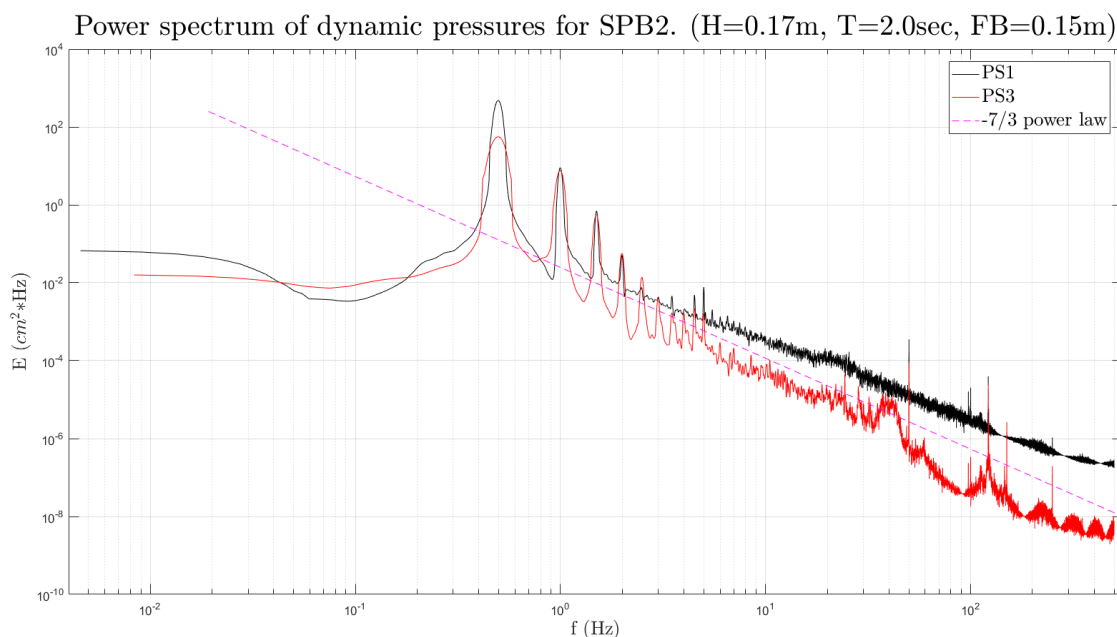


Σχήμα 5.54. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R3).

Στο Σχήμα 5.53 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.54.

Από το Σχήμα 5.54 έχουμε ότι η μέγιστη ένταση της τύρβης, στην προσήνεμη θέση μέτρησης (PS1), εμφανίζεται εντός της φάσης του κυματισμού για $[1.577(rad), 0.099(cm)]$, ενώ εμφανίζεται ένα ακόμα μέγιστο για $[2.975(rad), 0.064(cm)]$. Λόγω της ύπαρξης της κατασκευής ο κυματισμός υπόκειται σε μετασχηματισμούς καθώς μεταδίδονται πάνω από την κατασκευή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο έντονης τύρβης, η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.54 από την εμφάνιση τριών 'κορυφών', οι οποίες είναι οι παρακάτω $[2.554(rad), 0.164(cm)]$, $[3.283(rad), 0.137(cm)]$ και $[3.958(rad), 0.106(cm)]$.

Τέλος στο Σχήμα 5.55 παρουσιάζονται τα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, και φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.499Hz$ ($T = 2.0sec$), και είναι ίση με $474.1 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $55.68 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται τρία ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 0.998Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $8.98 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $7.47 (cm^2 * Hz)$ (PS3), για συχνότητα $f = 1.5Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.69 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.56 (cm^2 * Hz)$ (PS3) και για συχνότητα $f = 1.99Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.05 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.06 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Τέλος, το αδρανειακό υποέυρος εντοπίζεται και για τις δύο θέσεις μέτρησης ανάμεσα στις συχνότητες $f = 1.0Hz$ μέχρι $f = 340Hz$.



Σχήμα 5.55. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R3).

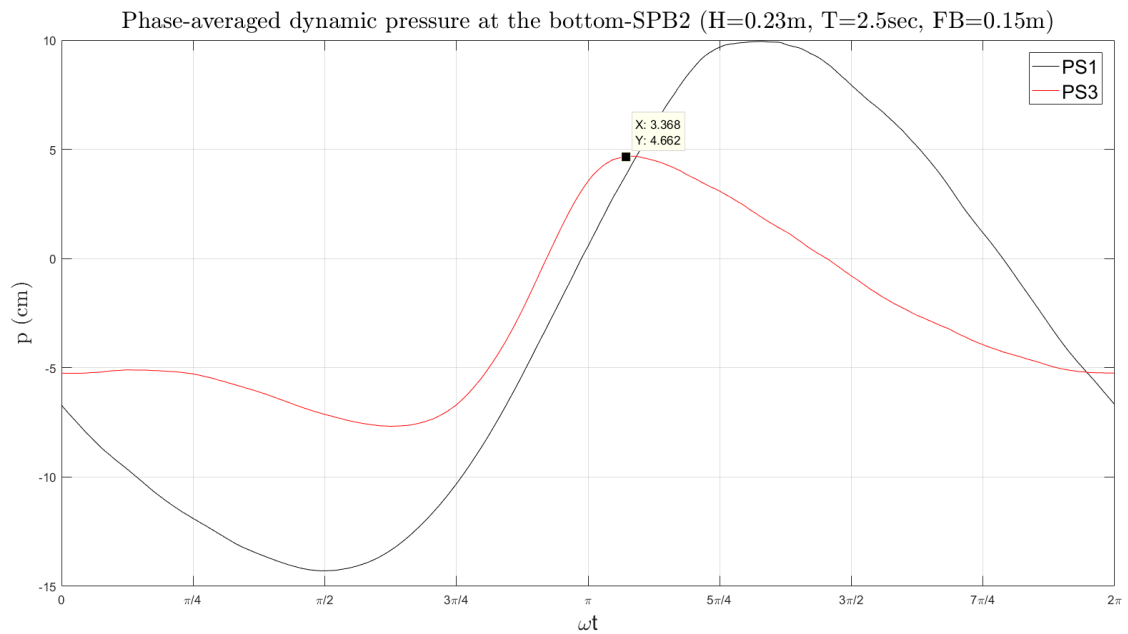
5.3.4 Κυματικό σενάριο 2-R4 (H=0.23m, T=2.5sec)

Η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση, όπως υπολογίστηκε μετά από το φιλτράρισμα των δεδομένων φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.56. Όπως παρατηρείται, το εύρος των δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά είναι μεγαλύτερο από αυτό στην υπήνεμη και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιτελείται θραύση και άρα απόσβεση ενέργειας. Συγκεκριμένα, το εύρος των πιέσεων στη θέση του (PS1) είναι $[-14.29, +9.937]$ (cm), ενώ για το (PS3) είναι $[-7.667, +4.662]$ (cm). Μάλιστα στο Σχήμα 5.56 αποτυπώνεται σε μεγάλο βαθμό και ο μετασχηματισμός του κύματος λόγω της επιρροής της κατασκευής, αφού είναι φανερό ότι η μέτρηση στην υπήνεμη θέση δίνει διάγραμμα πιέσεων που παύει πλέον να έχει ημιτονοειδή μορφή. Τέλος, και στη θέση του PS1 και του PS3 εμφανίζονται σημαντικές υποπιέσεις, καθώς οι αρνητικές τιμές είναι περίπου 30% μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες θετικές.

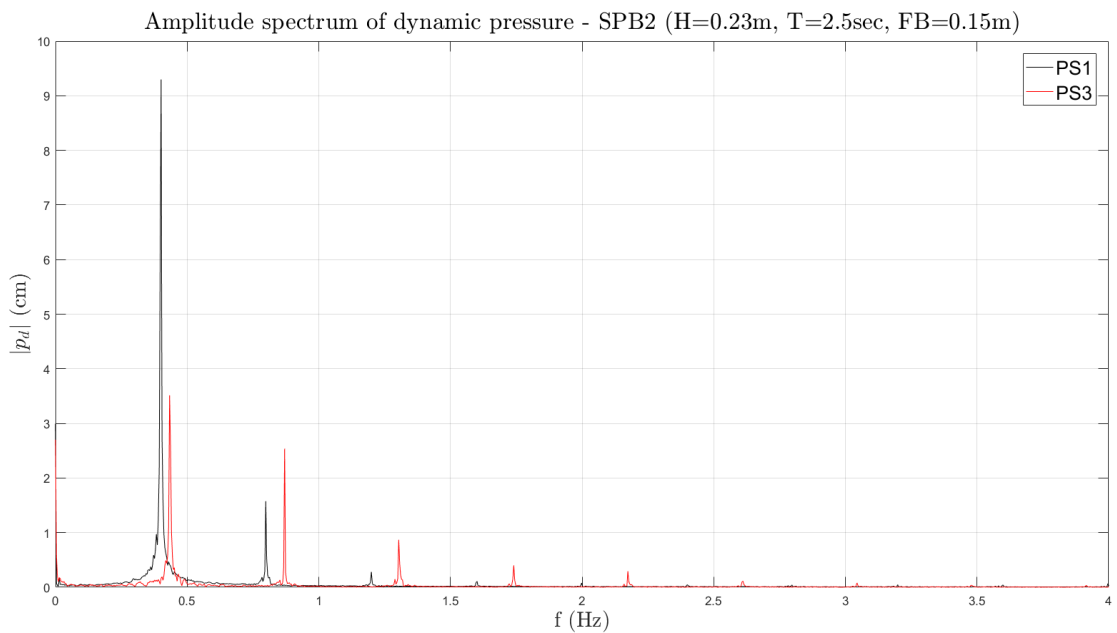
Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.52, έχουμε ότι η 1^{η} αρμονική εμφανίζεται περίπου για $f = 0.4\text{Hz}$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και έχει εύρος 9.297 (cm), ενώ για την υπήνεμη θέση (PS3) η 1^{η} αρμονική εμφανίζεται για $f = 0.43\text{Hz}$ και έχει εύρος 3.52 (cm), με τη δυναμική πίεση στην προσήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερη κατά 62.2%. Εμφανίζονται και κάποιες ακόμη δευτερεύουσες αρμονικές, για την προσήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 0.8\text{Hz}$ και με εύρος 1.576 (cm) (16.9% της $1^{\eta\varsigma}$ αρμονικής) και για $f = 1.2\text{Hz}$ και με εύρος 0.282 (cm) (3.0% της $1^{\eta\varsigma}$ αρμονικής), ενώ στην υπήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 0.87\text{Hz}$ και με εύρος 2.538 (cm) (72.1% της $1^{\eta\varsigma}$ αρμονικής), για $f = 1.3\text{Hz}$ και με εύρος 0.87 (cm) (24.7% της $1^{\eta\varsigma}$ αρμονικής) και για $f = 1.74\text{Hz}$ και με εύρος 0.402 (cm) (11.4% της $1^{\eta\varsigma}$ αρμονικής). Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης της $1^{\eta\varsigma}$ αρμονικής στην προσήνεμη θέση είναι μεγαλύτερο κατά 31.0% σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέτρηση του σεναρίου 2-R3, και στην υπήνεμη

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

θέση κατά 8.52%, αλλά όσο αφορά την υπήνεμη θέση το εύρος της 2^{ης} αρμονικής σε σύγκριση με αυτή του προηγούμενου σεναρίου έχει αυξηθεί κατά 63.8%.

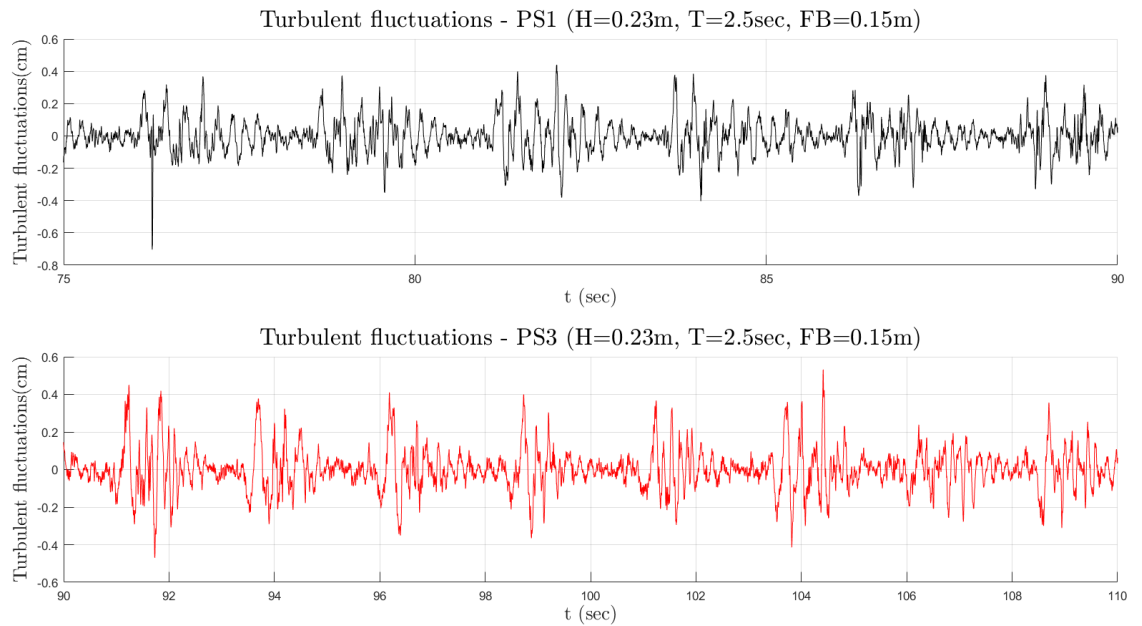


Σχήμα 5.56. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R4).

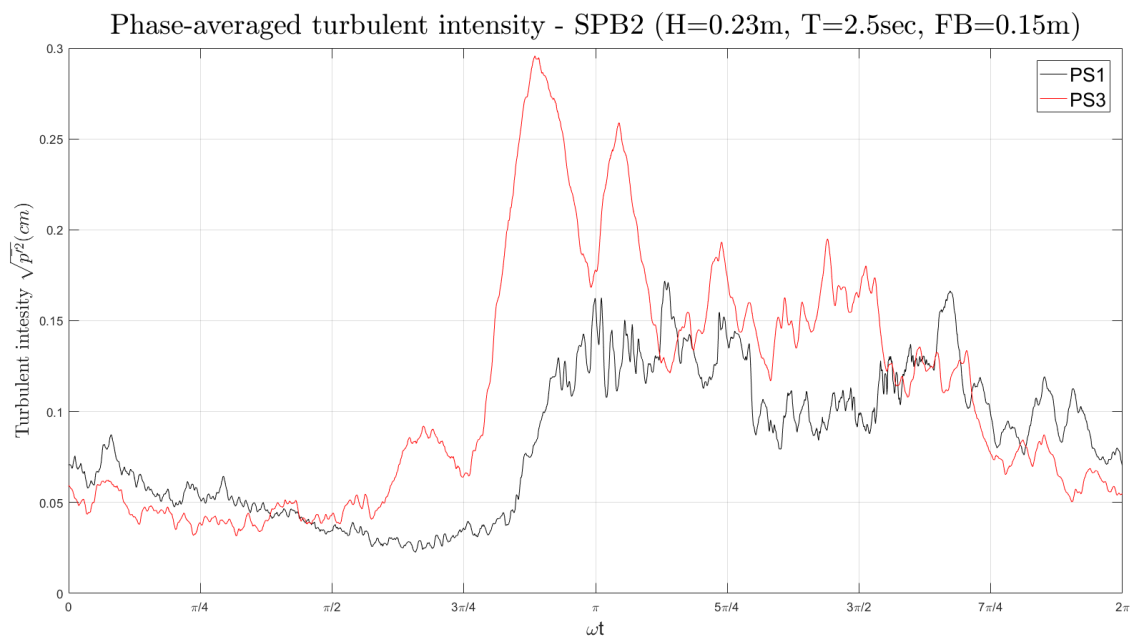


Σχήμα 5.57. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R4).

Στο Σχήμα 5.58 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.59.

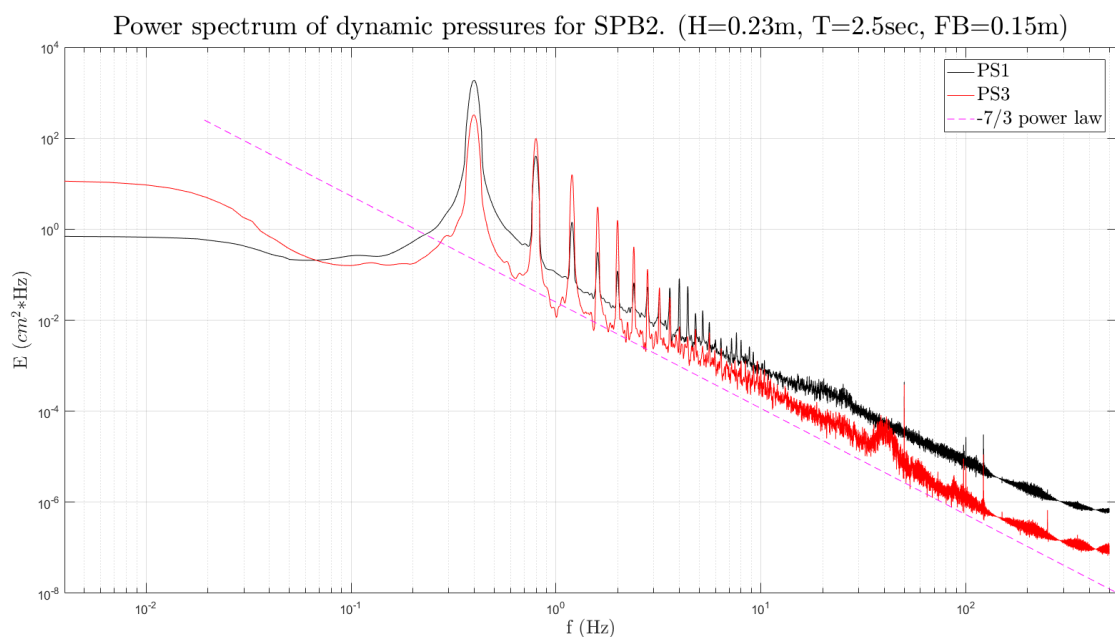


Σχήμα 5.58. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R4).



Σχήμα 5.59. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R4).

Από το Σχήμα 5.59 έχουμε ότι η μέγιστη ένταση της τύρβης στην προσήνεμη θέση μέτρησης (PS1) εμφανίζεται εντός της φάσης του κυματισμού για $[3.551(rad), 0.171(cm)]$, ενώ εμφανίζεται ένα ακόμα μέγιστο για $[5.253(rad), 0.166(cm)]$. Λόγω της ύπαρξης της κατασκευής ο κυματισμός υπόκειται σε μετασχηματισμούς καθώς μεταδίδονται πάνω από την κατασκευή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο έντονης τύρβης, η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.54 από την εμφάνιση τριών 'κορυφών' στις μετρήσεις που αφορούν την υπήνεμη θέση (PS3), οι οποίες είναι οι παρακάτω $[2.780(rad), 0.296(cm)]$, $[3.282(rad), 0.259(cm)]$, $[3.891(rad), 0.193(cm)]$ και $[4.526(rad), 0.194(cm)]$. Παρατηρείται, επομένως, ότι η μέγιστη τυρβώδης ένταση στην προσήνεμη θέση (PS1) έχει αυξηθεί σε σύγκριση με εκείνη του σεναρίου 2-R3 κατά 42.1% και στην υπήνεμη (PS3) κατά 29.6%. Τέλος, ότι η μέγιστη τυρβώδης ένταση στην προσήνεμη θέση (PS1) έχει αυξηθεί σε σύγκριση με εκείνη του σεναρίου 1-R4 κατά 11.1% και στην υπήνεμη (PS3) κατά 28.0%.



Σχήμα 5.60. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R4).

Τέλος, στο Σχήμα 5.60 παρουσιάζονται τα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, και φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.401Hz$ ($T = 2.5sec$), και είναι ίση με $1842 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $324.2 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται πέντε ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 0.799Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $40.24 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $97.87 (cm^2 * Hz)$ (PS3), για συχνότητα $f = 1.2Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $1.41 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $15.74 (cm^2 * Hz)$ (PS3), για συχνότητα $f = 1.6Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.31 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $3.07 (cm^2 * Hz)$, για συχνότητα $f = 1.998Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.121 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $1.56 (cm^2 * Hz)$ και για συχνότητα $f = 2.4Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.07 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.41 (cm^2 * Hz)$ (PS3). Τέλος, το αδρανειακό υποέυρος εντοπίζεται και για τις δύο θέσεις μέτρησης ανάμεσα στις συχνότητες $f = 0.8Hz$

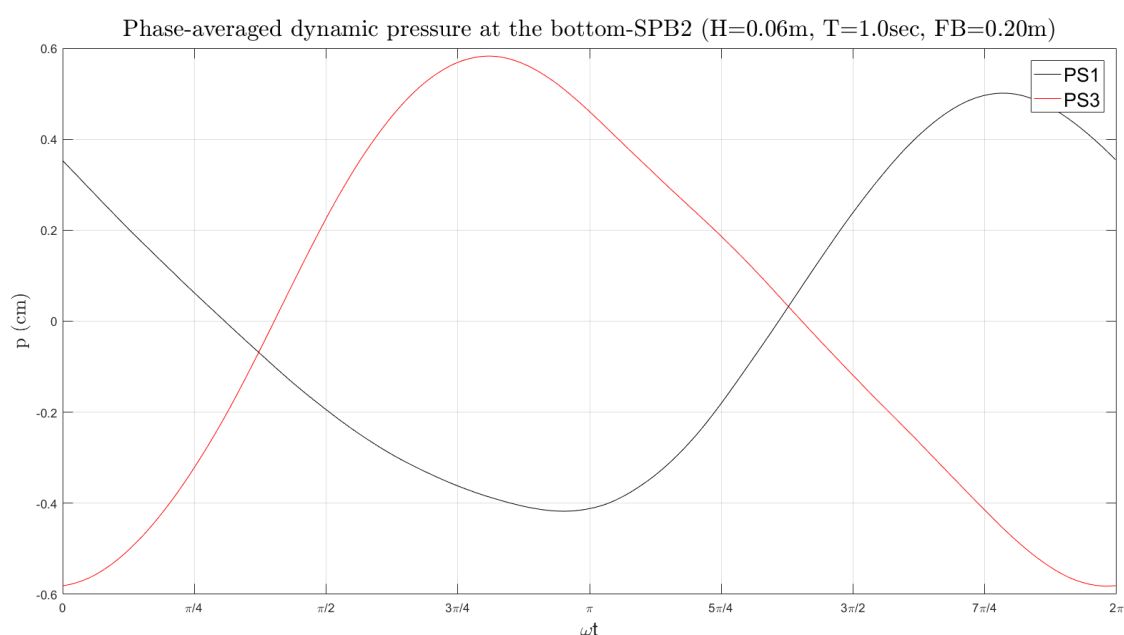
μέχρι $f = 350Hz$.

5.4 Μοντέλο SPB2 και βάθος νερού 0.70m

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που αφορούν τον κυματοθραύστη SPB2, με γεωμετρία όπως περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και για ελεύθερο ύψος πάνω από τη στέψη του κυματοθραύστη ίσο με **0.20 cm** ($z/d = 0.07$).

5.4.1 Κυματικό σενάριο 2-R5 ($H=0.06m$, $T=1.0sec$)

Όπως και για τα παραπάνω κυματικά σενάρια, η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 5.61.

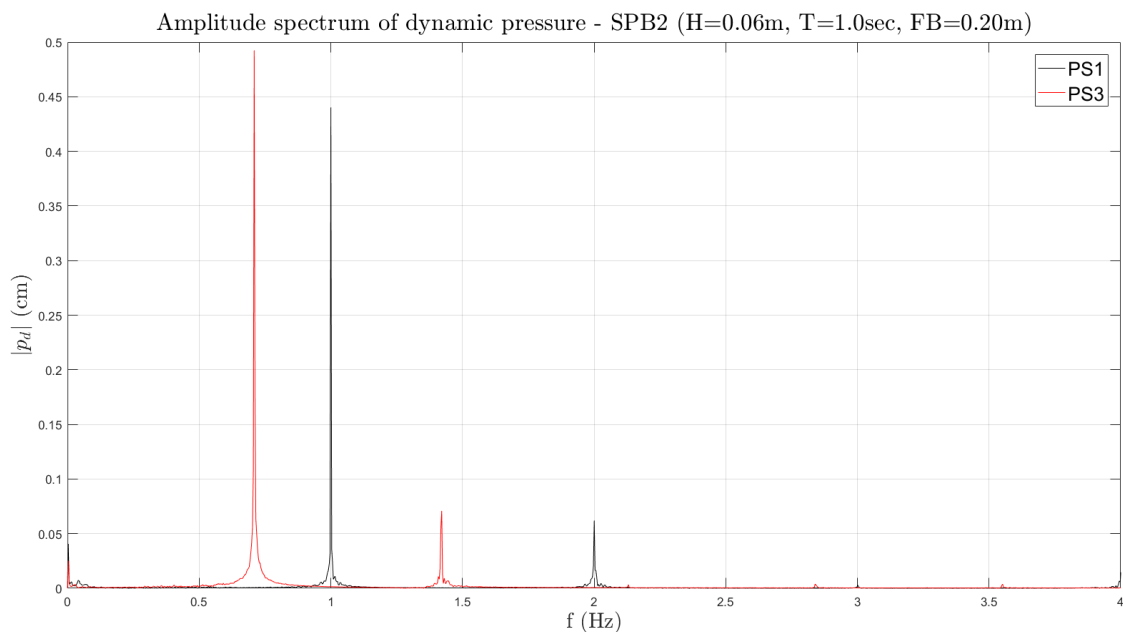


Σχήμα 5.61. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R5).

Από το Σχήμα 5.61 φαίνεται ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης για την προσήνεμη θέση (PS1) είναι $[-0.471, +0.501](cm)$ και για την υπήνεμη θέση (PS3) $[-0.581, +0.582](cm)$. Από τα παραπάνω προκύπτει, ότι η δυναμική πίεση στην υπήνεμη θέση είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την προσήνεμη θέση, ταυτόχρονα όμως παρατηρείται και μια σημαντική αύξηση της δυναμικής πίεσης σε σύγκριση με το σενάριο 1-R5, κάτι το οποίο οφείλεται στη γεωμετρία της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μεγαλύτερο πλάτος της στέψης.

Στο παρακάτω Σχήμα 5.62 παρουσιάζονται τα φάσματα εύρους για την υπήνεμη (PS3) και την προσήνεμη θέση (PS1) μέτρησης. Από αυτό φαίνεται ότι ενώ η περίοδος του κύματος που εφαρμόστηκε σε αυτό το σενάριο είναι $T = 1.0sec$, το μέγιστο εύρος για την υπήνεμη θέση μέτρησης βρίσκεται για $f = 0.709Hz$ κάτι το οποίο πιθανότατα οφείλεται σε σφάλμα του οργάνου καθώς σε αυτή τη σειρά πειραμάτων εμφανίστηκαν και άλλες παρόμοιες αποκλίσεις

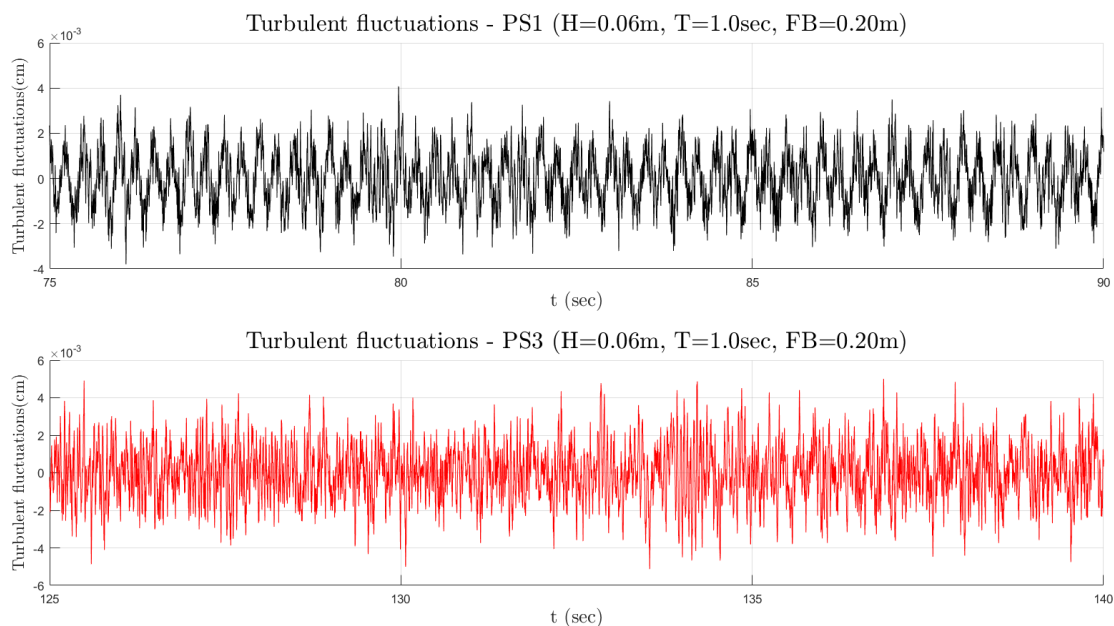
αν και λιγότερο σημαντικές. Άλλη πιθανή αιτία που οδήγησε σε αυτή την απόκλιση είναι ότι ο χρόνος δειγματοληψίας ήταν μικρός και επομένως δεν δόθηκε χρόνος' ώστε το φαινόμενο να μονιμοποιηθεί. Από αυτό το σχήμα έχουμε επομένως ότι η 1^η αρμονική εμφανίζεται περίπου για $f = 1.0\text{Hz}$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και έχει εύρος 0.44 (cm), ενώ για την υπήνεμη θέση (PS3) η 1^η αρμονική εμφανίζεται για $f = 0.709\text{Hz}$ και έχει εύρος 0.492 (cm), με τη δυναμική πίεση στην προσήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερη κατά 62.2%. Εμφανίζεται επίσης και μια ακόμη δευτερεύουσα αρμονική για κάθε περίπτωση, που για την προσήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 2.0\text{Hz}$ και με εύρος 0.06 (cm) (13.6% της 1^{ης} αρμονικής), ενώ στην υπήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 1.421\text{Hz}$ και με εύρος 0.071 (cm) (14.5% της 1^{ης} αρμονικής).



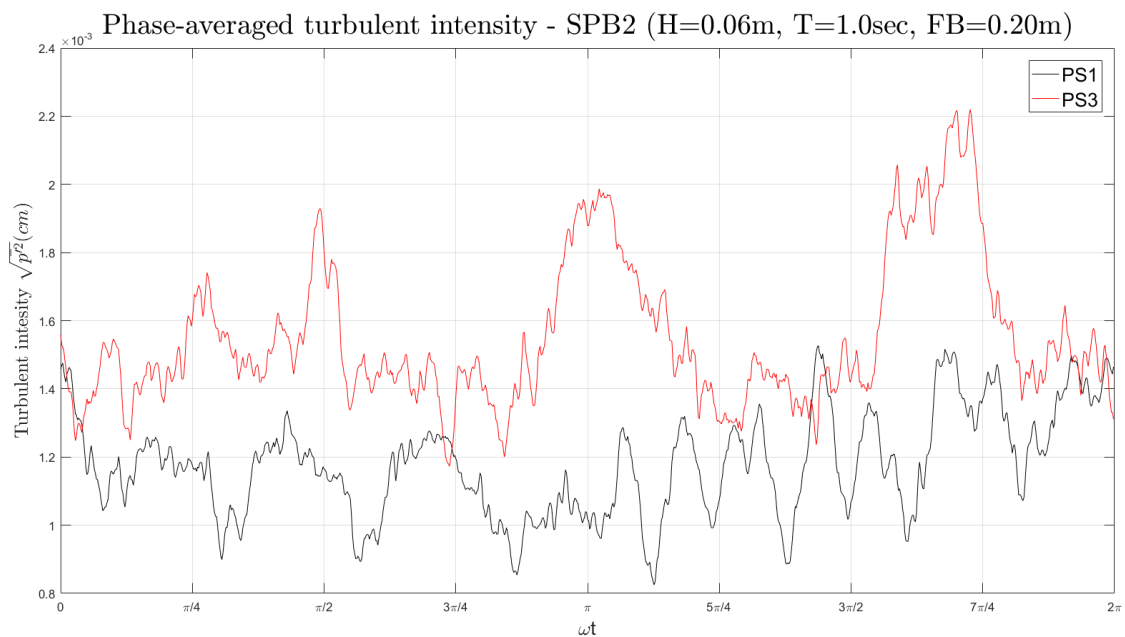
Σχήμα 5.62. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R5).

Στο Σχήμα 5.63 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.64.

Από το Σχήμα 5.64, φαίνεται ότι η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων είναι πρακτικά μηδενική και η μέτρησή τους δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη, καθώς για τόσο μικρές τιμές και με δεδομένο ότι η τάξη μεγέθους τους είναι μικρότερη ακόμα και από το θόρυβο του οργάνου, τα φιλτραρισμένα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή για εξαγωγή συμπερασμάτων. Οι μέγιστες τιμές που υπολογίστηκαν είναι στην προσήνεμη θέση (PS1) $1.5 \cdot 10^{-3}$ cm και για την υπήνεμη θέση (PS3) $2.22 \cdot 10^{-3}$ cm.



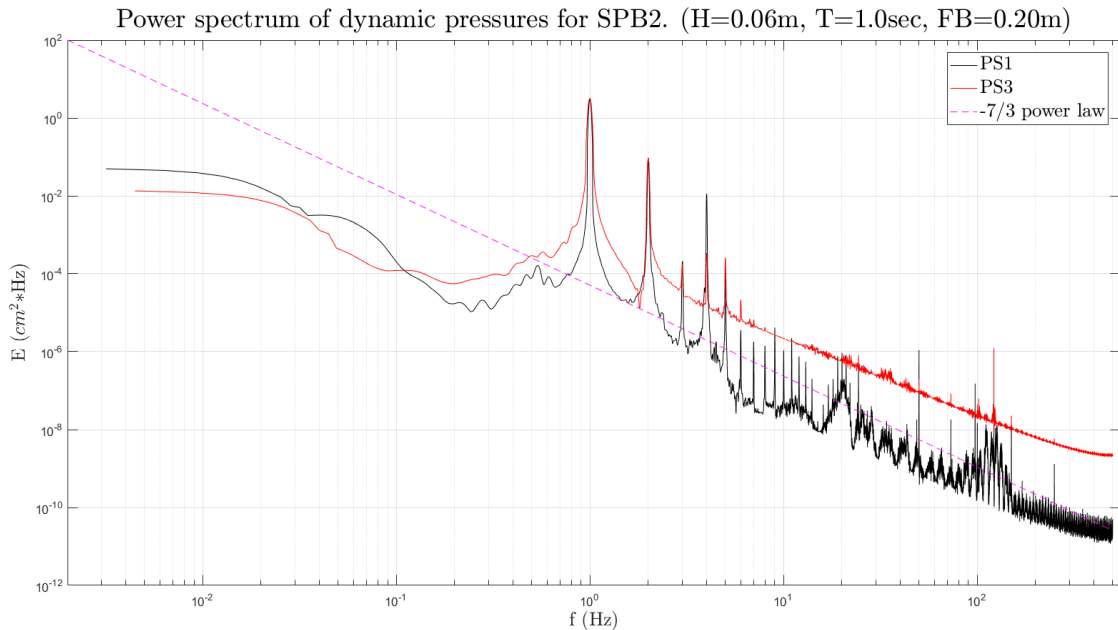
Σχήμα 5.63. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R5).



Σχήμα 5.64. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R5).

Τέλος, το Σχήμα 5.65 αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 1.0\text{Hz}$ ($T = 1.0\text{sec}$), και είναι ίση με $3.002 \text{ (cm}^2 * \text{Hz)}$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $3.18 \text{ (cm}^2 * \text{Hz)}$ για την

υπήνημη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται τρία ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 2.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.07 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.095 (cm^2 * Hz)$ (PS3), για $f = 3.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $2.0 * 10^{-4} (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $1.7 * 10^{-4} (cm^2 * Hz)$ και για $f = 4.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $0.011 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $3.4 * 10^{-4} (cm^2 * Hz)$. Ο νόμος δύναμης του $-7/3$ του Kolmogorov εμφανίζεται και για τις δυο θέσεις ανάμεσα στις συχνότητες $f = 3.0Hz$ και $f = 240Hz$.



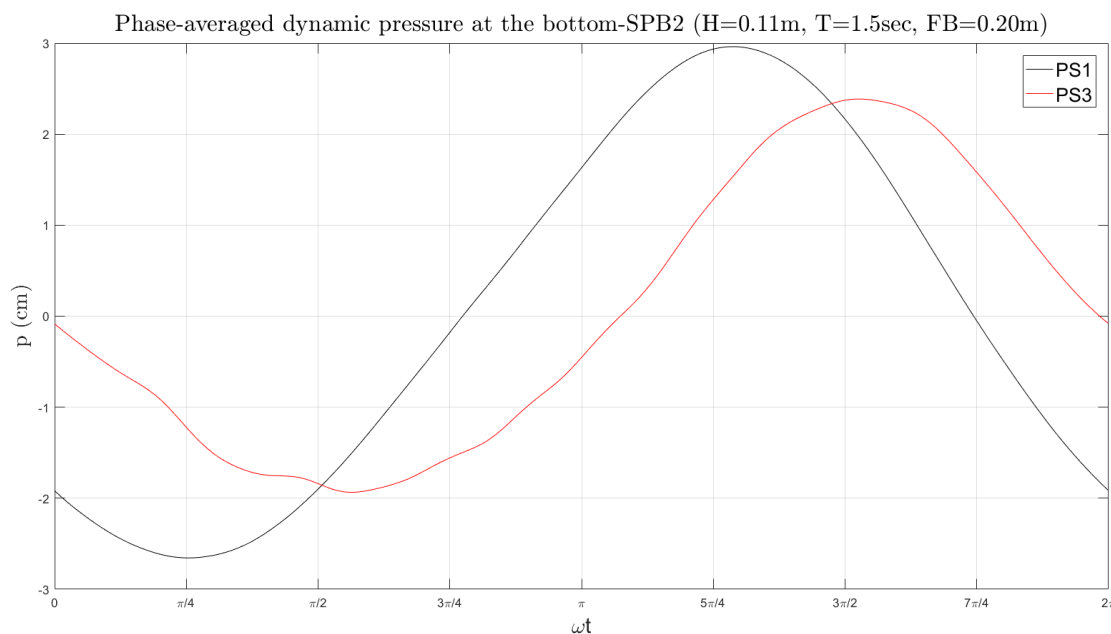
Σχήμα 5.65. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R5).

5.4.2 Κυματικό σενάριο 2-R6 (H=0.11m, T=1.5sec)

Στο παρακάτω Σχήμα 5.66 παρουσιάζεται η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμική πίεση. Από αυτό φαίνεται ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης για την προσήνεμη θέση (PS1) είναι $[-2.655, +2.961](cm)$ και για την υπήνεμη θέση (PS3) $[-1.934, +2.385](cm)$, εμφανίζονται επομένως αυξημένες σε σύγκριση με το σενάριο 2-R2. Στη θέση του πιεσομέτρου PS1 η μέγιστη μέση αρνητική πίεση έχει αυξηθεί κατά 9.2%, ενώ η θετική είναι μειωμένη κατά 24.0% σε σύγκριση με το σενάριο 1-R6, και αντίστοιχα στη θέση του πιεσομέτρου (PS3) είναι η αρνητική πίεση είναι μειωμένη κατά 24.7% και η θετική έχει αυξηθεί κατά 0.6% (είναι πρακτικά αμετάβλητη).

Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.67, έχουμε ότι η 1^η αρμονική εμφανίζεται περίπου για $f = 0.666Hz$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και έχει εύρος 1.771 (cm), ενώ για την υπήνεμη θέση (PS3) η 1^η αρμονική εμφανίζεται για $f = 0.643Hz$ και έχει εύρος 1.654 (cm), με το εύρος της δυναμικής πίεσης στην προσήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερο κατά 6.6%. Εμφανίζονται και κάποιες ακόμη δευτερεύουσες αρμονικές, για την προσήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 1.33Hz$ και με εύρος 0.181 (cm) (10.2% της 1^{ης} αρμονικής) και για $f = 1.998Hz$ και με εύρος 0.05

(cm) (2.8% της 1^{ης} αρμονικής), ενώ στην υπήνεμη θέση εντοπίζονται για $f = 1.281Hz$ και με εύρος 0.215 (cm) (13% της 1^{ης} αρμονικής) και για $f = 1.924Hz$ και με εύρος 0.09 (cm) (5.4% της 1^{ης} αρμονικής). Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης της 1^{ης} αρμονικής στην προσήνεμη θέση είναι μικρότερο κατά 28.0% σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέτρηση του σεναρίου 1-R6, και στην υπήνεμη θέση κατά 27.1%.



Σχήμα 5.66. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R6).

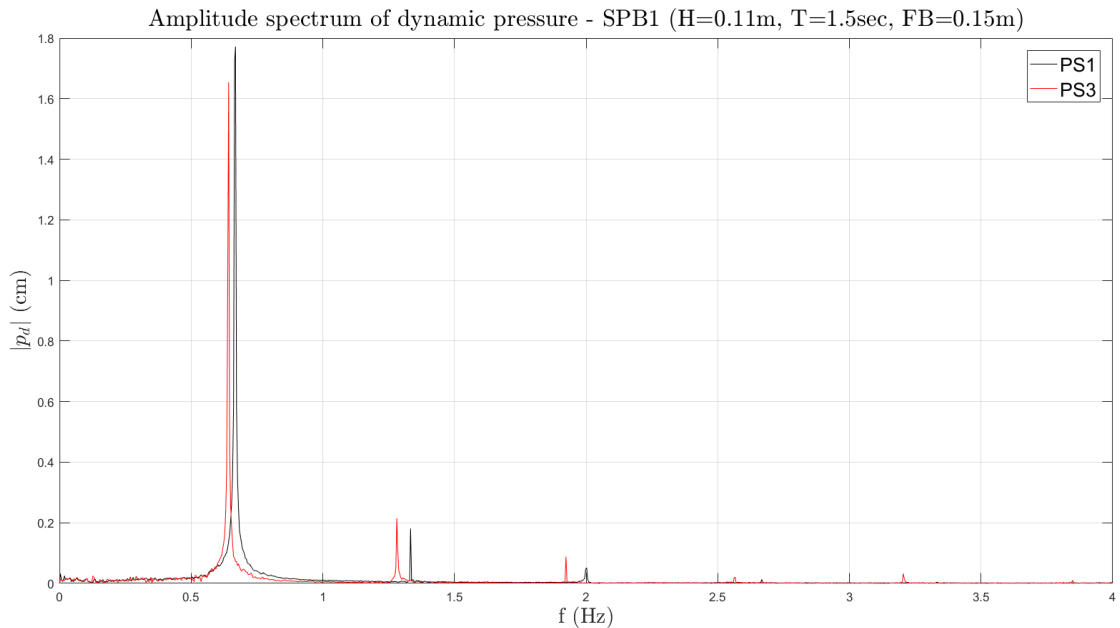
Στο Σχήμα 5.68 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.69.

Από το Σχήμα 5.69 έχουμε ότι η μέγιστη ένταση της τύρβης στην προσήνεμη θέση μέτρησης PS1 εμφανίζεται εντός της φάσης του κυματισμού για $[2.564(rad), 0.015(cm)]$, ενώ εμφανίζεται ένα ακόμα μέγιστο για $[4.679(rad), 0.014(cm)]$. Λόγω της ύπαρξης της κατασκευής ο κυματισμός υπόκεινται σε μετασχηματισμούς καθώς μεταδίδονται πάνω από την κατασκευή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο έντονης τύρβης, η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.69 από την εμφάνιση των παρακάτω μεγίστων: $[0.754(rad), 0.033(cm)]$, $[1.311(rad), 0.026(cm)]$, $[5.064(rad), 0.025(cm)]$ και $[4.44(rad), 0.026(cm)]$.

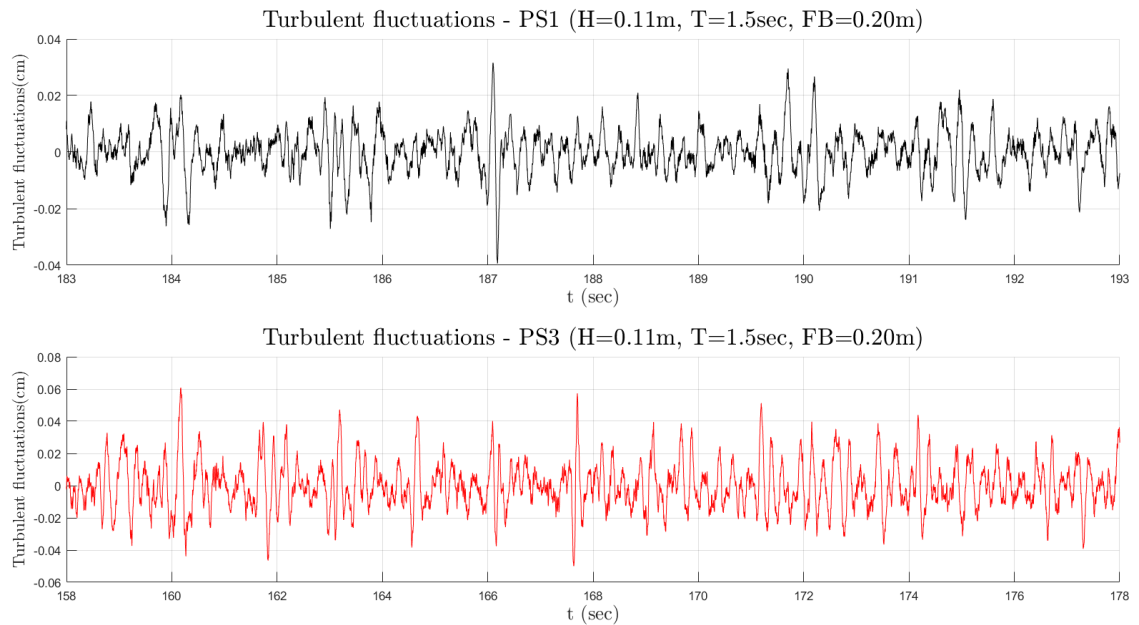
Τέλος, το Σχήμα 5.70 αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.665Hz$ ($T = 1.5sec$), και είναι ίση με $91.97 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $51.13 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται τρία ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 1.334Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $0.43 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.79(cm^2 * Hz)$ (PS3), για $f = 1.998Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι 0.073

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

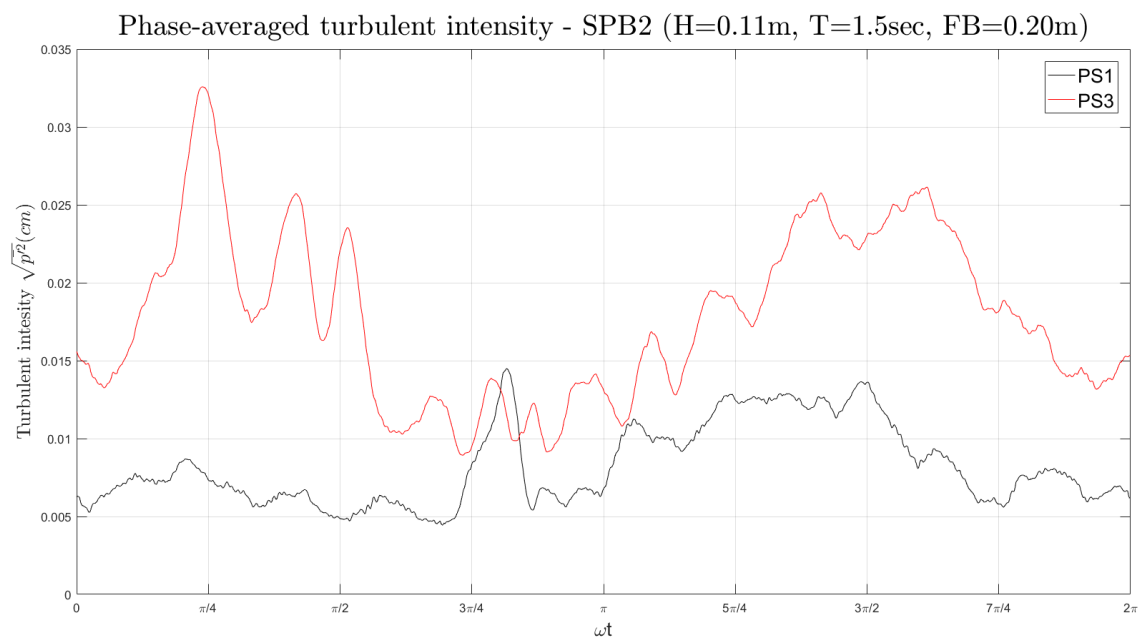
($cm^2 * Hz$) (PS1) και $0.097 (cm^2 * Hz)$ και για $f = 2.667 Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $0.0028 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.011 (cm^2 * Hz)$. Ο νόμος δύναμης $-7/3$ του Kolmogorov εμφανίζεται και για τις δυο θέσεις ανάμεσα στις συχνότητες $f = 1.35 Hz$ και $f = 300 Hz$.



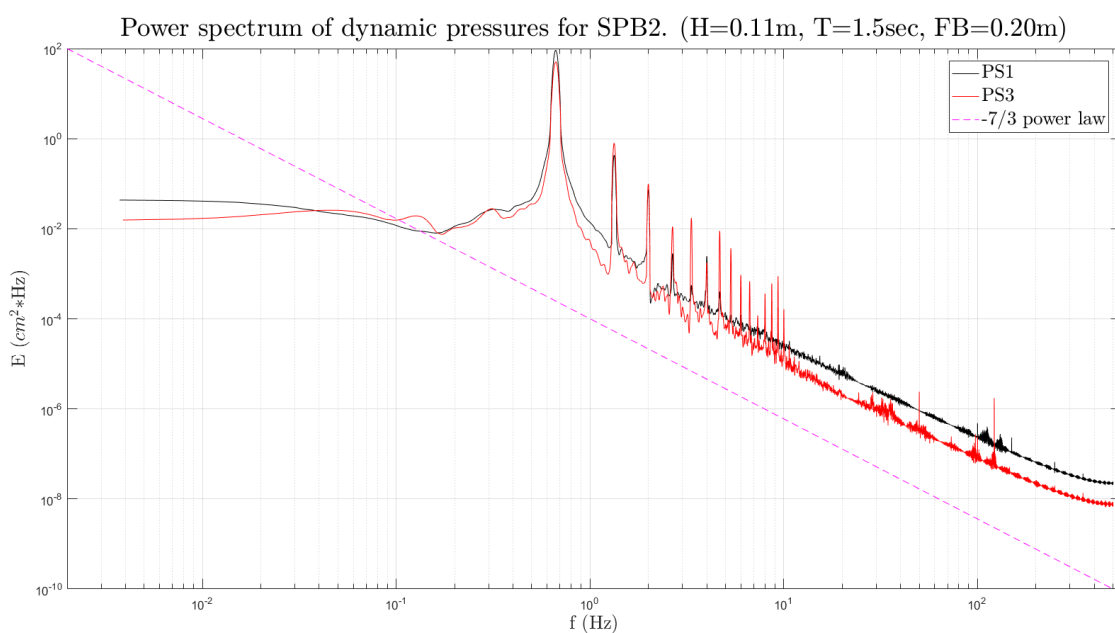
Σχήμα 5.67. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R6).



Σχήμα 5.68. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R6).



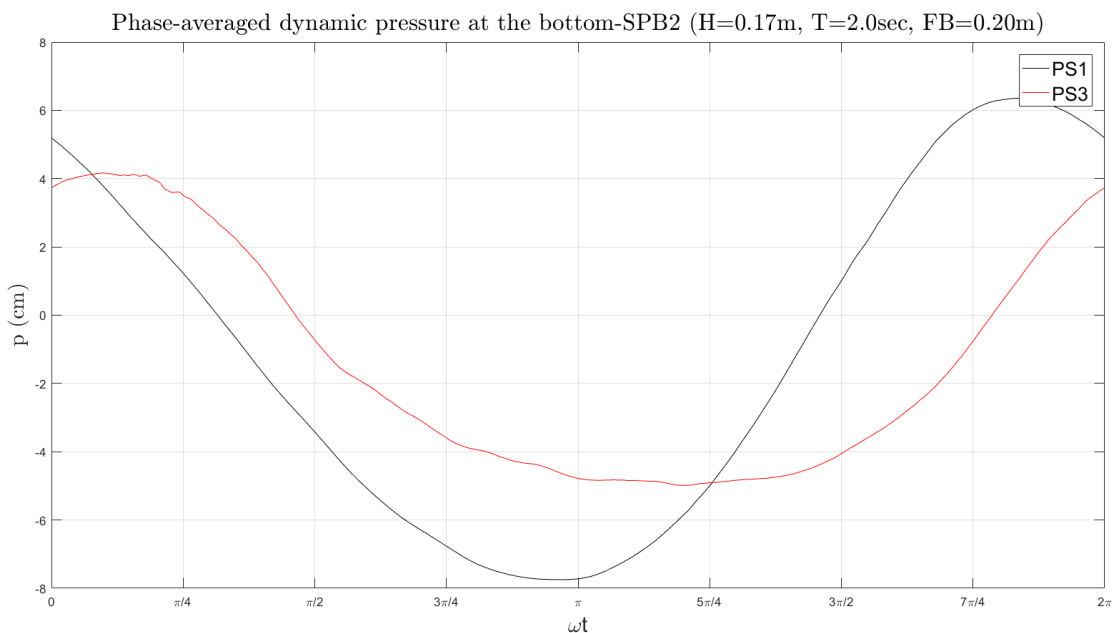
Σχήμα 5.69. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R6).



Σχήμα 5.70. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R6).

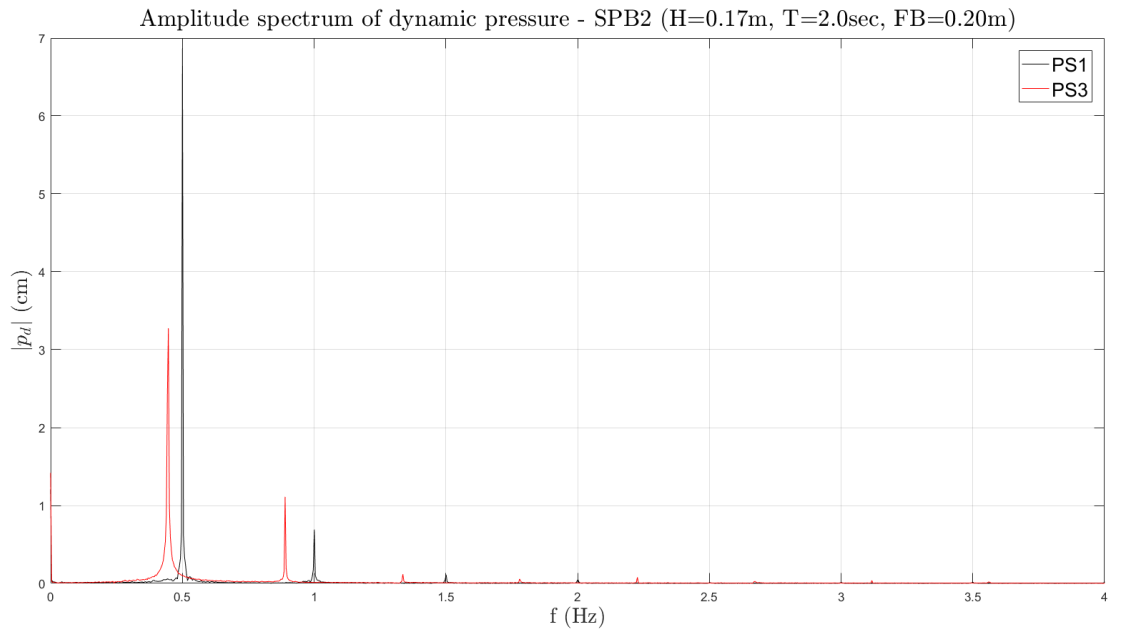
5.4.3 Κυματικό σενάριο 2-R7 (H=0.17m, T=2.0sec)

Η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.71. Όπως παρατηρείται, το εύρος των δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά είναι μεγαλύτερο από αυτό στην υπήνεμη και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επιτελείται θραύση και άρα απόσβεση ενέργειας. Συγκεκριμένα, το εύρος των πιέσεων στη θέση του PS1 είναι $[-7.735, +6.356]$ (cm), ενώ για το PS3 είναι $[-4.98, +4.16]$ (cm). Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή της μέσης πίεσης $|\bar{P}|$ είναι αυξημένη τόσο στην προσήνεμη θέση (PS1) όσο και στην υπήνεμη θέση (PS3) σε σύγκριση με το σενάριο 1-R7, που το κύμα έχει ίδιο ύψος H και περίοδο T, και το βάθος του νερού είναι ίδιο, αλλά αυτή τη φορά έχει αλλάξει η γεωμετρία της κατασκευής. Συγκεκριμένα, για το σημείο μέτρησης του πιεσόμετρου PS1 η μείωση είναι 18.2%, αλλά στη θέση του πιεσόμετρου PS3 είναι αυξημένη κατά 8.2% λόγω ασθενέστερης θραύσης.

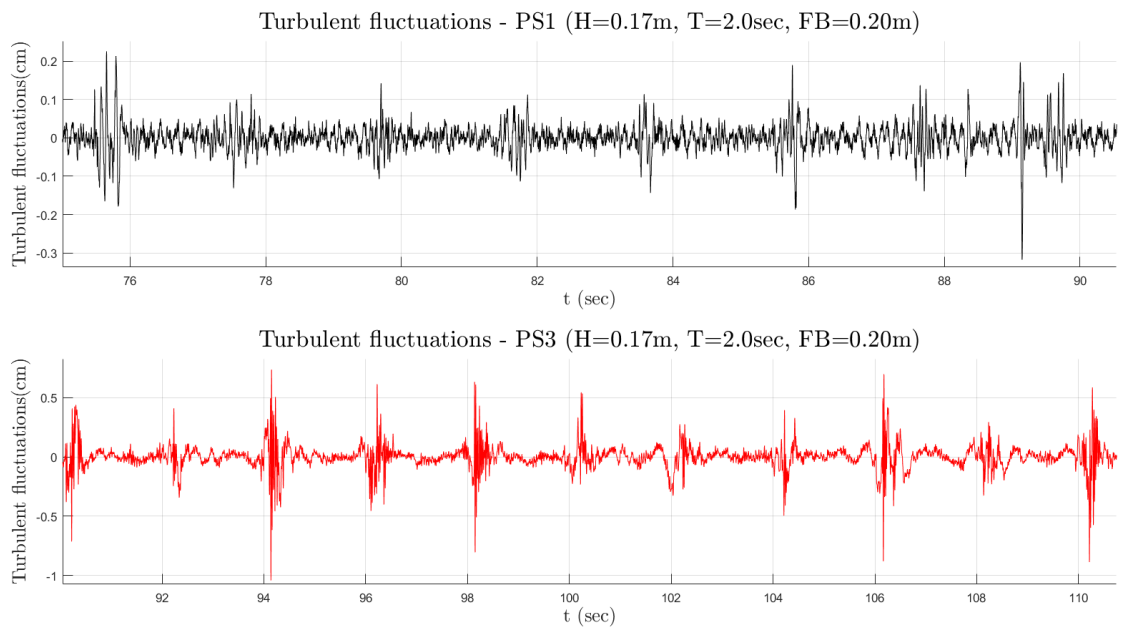


Σχήμα 5.71. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R7).

Από την ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.72, έχουμε ότι η 1^η αρμονική εμφανίζεται περίπου για $f = 0.5Hz$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και έχει εύρος 6.869 (cm), ενώ για την υπήνεμη θέση (PS3) η 1^η αρμονική εμφανίζεται για $f = 0.447Hz$ και έχει εύρος 3.276 (cm), με το εύρος της δυναμικής πίεσης στην προσήνεμη θέση να είναι μεγαλύτερο κατά 52.3%. Εμφανίζεται και μια ακόμη δευτερεύουσα αρμονική, για την προσήνεμη θέση εντοπίζεται για $f = 1.0Hz$ με εύρος 0.69(cm) (10.0% της 1^{ης} αρμονικής), ενώ στην υπήνεμη θέση εντοπίζεται για $f = 1.111Hz$ και με εύρος 0.89 (cm) (27.2% της 1^{ης} αρμονικής). Αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης της 1^{ης} αρμονικής στην προσήνεμη θέση (PS1) είναι μεγαλύτερο κατά 31.7% σε σύγκριση με την αντίστοιχη μέτρηση του σεναρίου 1-R7, ενώ στην υπήνεμη θέση (PS3) είναι μικρότερο κατά 7.9%.



Σχήμα 5.72. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R7).

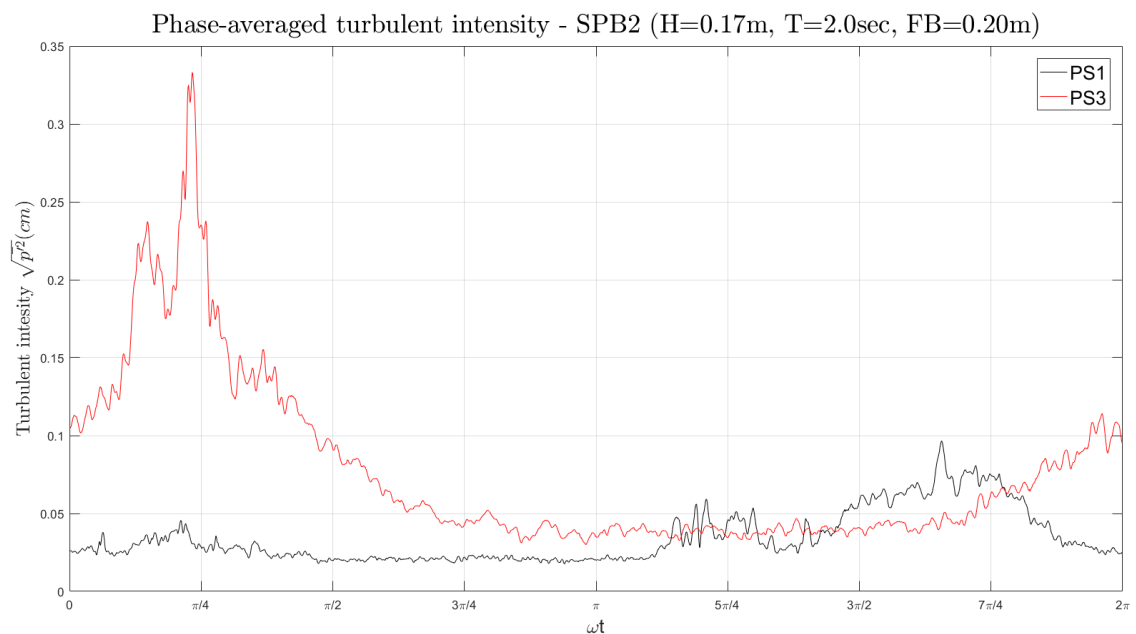


Σχήμα 5.73. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R7).

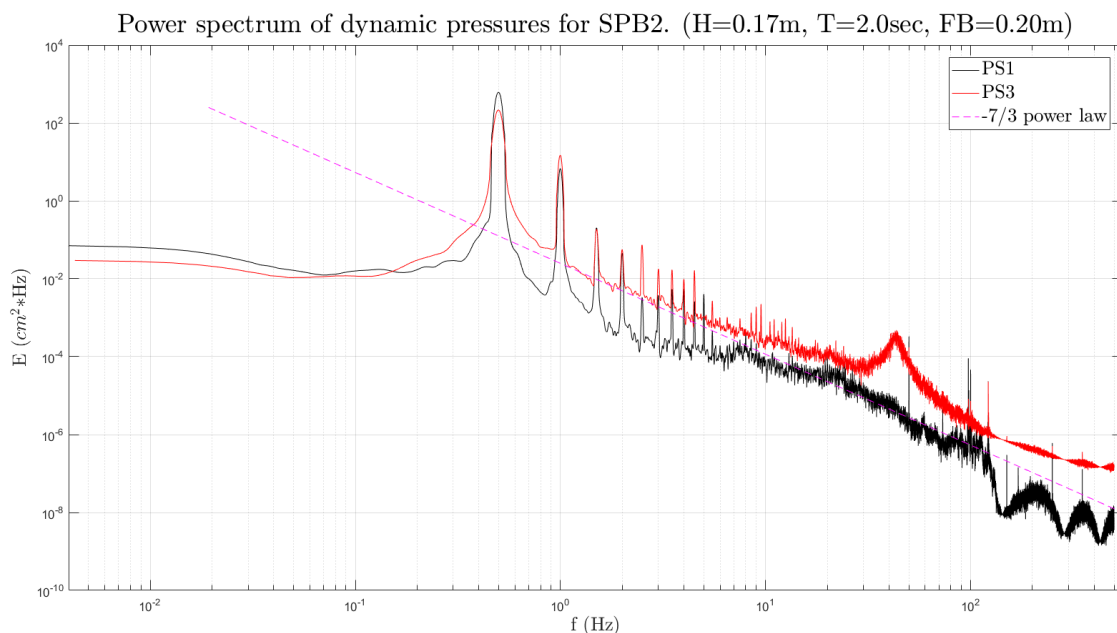
Στο Σχήμα 5.73 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.74.

Από το Σχήμα 5.74 έχουμε ότι η μέγιστη ένταση της τύρβης στην προσήνεμη θέση μέτρησης PS1 εμφανίζεται εντός της φάσης του κυματισμού για $[5.209(rad), 0.095(cm)]$. Λόγω της ύπαρξης της κατασκευής ο κυματισμός υπόκεινται σε μετασχηματισμούς καθώς μεταδίδονται πάνω από την κατασκευή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο έντονης τύρβης, η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.74 από την εμφάνιση των παρακάτω μεγίστων: $[0.732(rad), 0.333(cm)]$, $[0.465(rad), 0.237(cm)]$ και $[6.161(rad), 0.114(cm)]$.

Τέλος, το Σχήμα 5.75 αναφέρεται στα φάσματα ενέργειας της πίεσης για της δύο θέσεις μέτρησης, φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.5Hz (T = 2.0sec)$, και είναι ίση με $607.4 (cm^2 * Hz)$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και $214.8 (cm^2 * Hz)$ για την υπήνεμη θέση (PS3), ενώ εμφανίζονται τρία ακόμα μέγιστα και στις δύο περιπτώσεις, για συχνότητα $f = 1.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές της ενέργειας είναι $6.712 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $14.77 (cm^2 * Hz)$ (PS3), για $f = 1.5Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $0.203 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.186 (cm^2 * Hz)$ και για $f = 2.0Hz$, όπου οι αντίστοιχες τιμές είναι $0.046 (cm^2 * Hz)$ (PS1) και $0.056 (cm^2 * Hz)$. Ο νόμος δύναμης του $-7/3$ του Kolmogorov εμφανίζεται και για τις δυο θέσεις ανάμεσα στις συχνότητες $f = 1.0Hz$ και $f = 320Hz$.



Σχήμα 5.74. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R7).



Σχήμα 5.75. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R7).

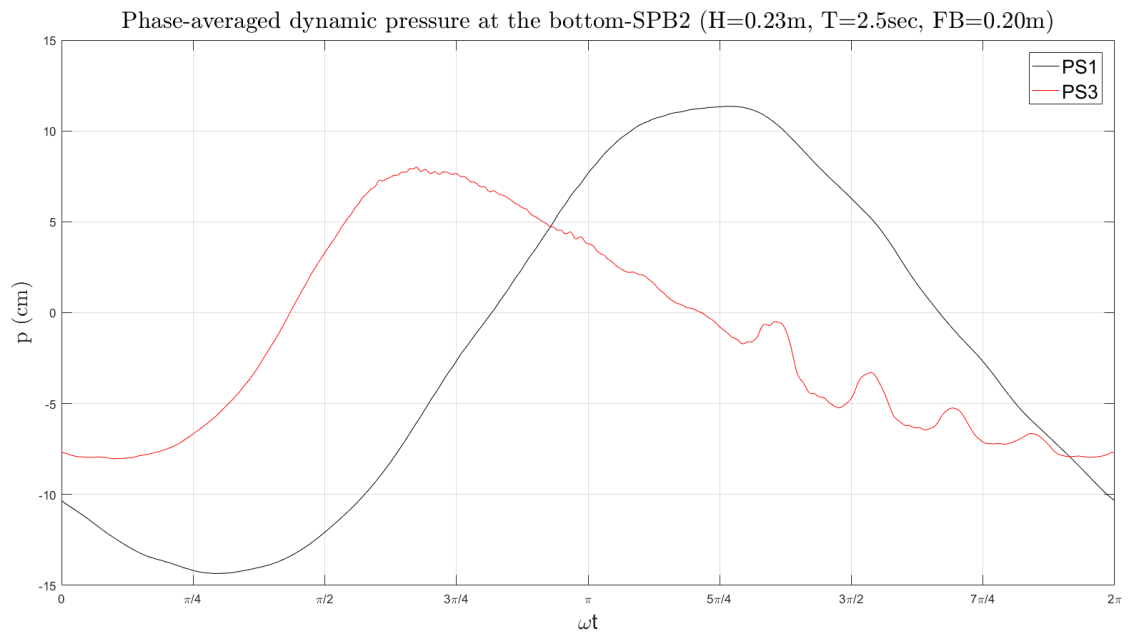
5.4.4 Κυματικό σενάριο 2-R8 (H=0.23m, T=2.5sec)

Σε αυτό το κυματικό σενάριο διαπιστώθηκε σφάλμα στο πιεσόμετρο που ήταν τοποθετημένο στην υπήνεμη θέση (PS3), με αποτέλεσμα οι διαθέσιμες μετρήσεις να δίνουν χρονοσειρά πιέσεων μόλις 80 sec, κάτι το οποίο δεν αρκεί για να γίνει φασματική ανάλυση αλλά και γενικότερα για να βγουν ασφαλή συμπεράσματα.

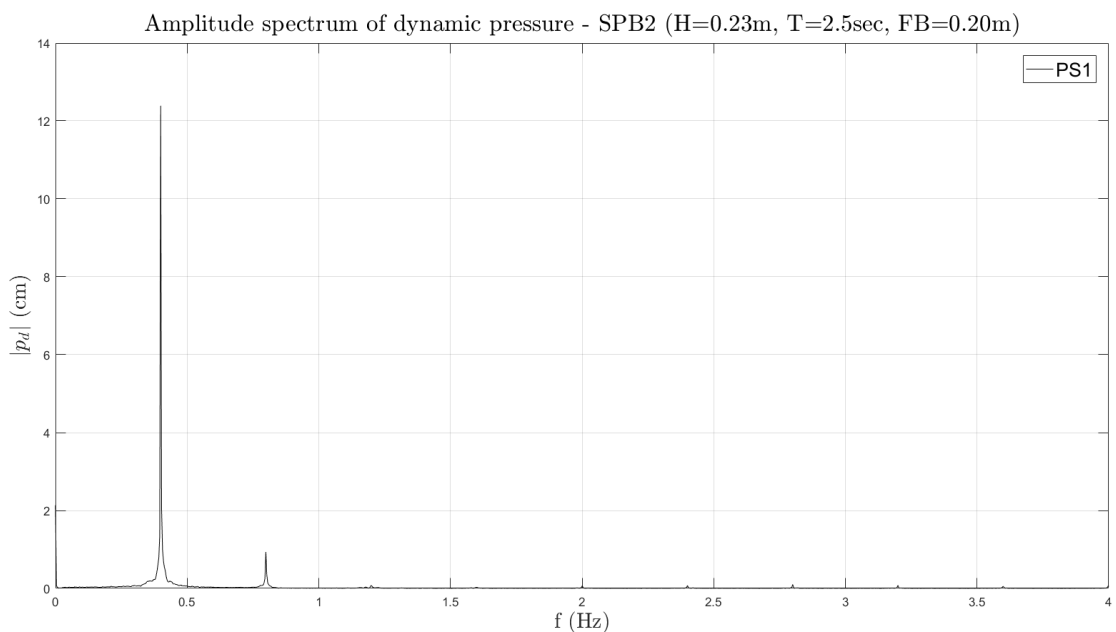
Στο παρακάτω Σχήμα 5.76 παρουσιάζεται η μέση ως προς τη φάση του κυματισμού ωt δυναμική πίεση. Από αυτό φαίνεται ότι το εύρος της δυναμικής πίεσης για την προσήνεμη θέση (PS1) είναι [-14.33,+11.34](cm) και για την υπήνεμη θέση (PS3) [-8.015,+7.976](cm), εμφανίζονται επομένως αυξημένες σε σύγκριση με το σενάριο 2-R2. Στη θέση του πιεσομέτρου PS1 η μέγιστη μέση αρνητική πίεση έχει αυξηθεί κατά 17.2%, ενώ η θετική κατά 4.6% σε σύγκριση με το σενάριο 1-R8, και αντίστοιχα στη θέση του πιεσομέτρου (PS3) είναι η αρνητική πίεση είναι μειωμένη κατά 20.0% και η θετική έχει αυξηθεί κατά 7.3%. Άρα, συνολικά για την προσήνεμη θέση (PS1), η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή της μέσης πίεσης $|\bar{P}|$ είναι αυξημένη κατά 17.2% και για την υπήνεμη θέση (PS3) είναι αυξημένη κατά 7.8%.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω δεν ήταν δυνατό να γίνει ανάλυση των χρονοσειρών στο πεδίο των συχνοτήτων για το πιεσόμετρο στην υπήνεμη πλευρά της κατασκευής, κι γι αυτό στο παρακάτω Σχήμα 5.77 έχουμε το διάγραμμα που αφορά την προσήνεμη θέση (PS1). Γι αυτή τη θέση έχουμε ότι η 1^η αρμονική εμφανίζεται περίπου για $f = 0.4\text{Hz}$ για την προσήνεμη θέση (PS1) και έχει εύρος 12.39 (cm), ενώ εμφανίζεται και μια ακόμη δευτερεύουσα αρμονική, για $f = 0.8\text{Hz}$, με εύρος 0.94 (cm) (7.6% της 1^{ης} αρμονικής).

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

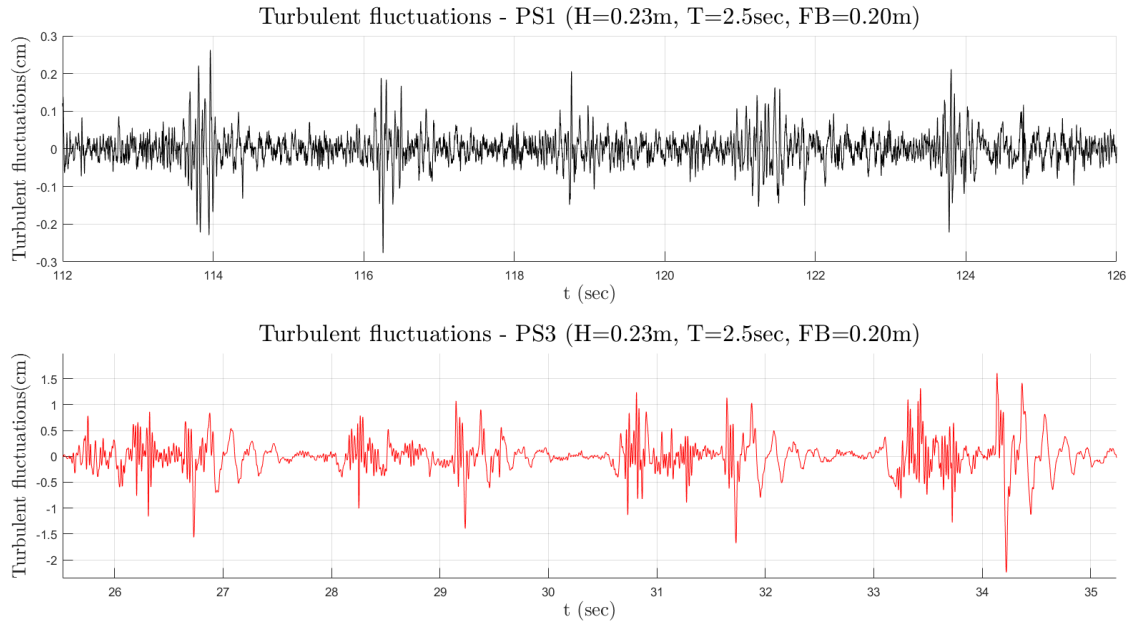


Σχήμα 5.76. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού δυναμικές πιέσεις σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3) (Σενάριο 2-R8).

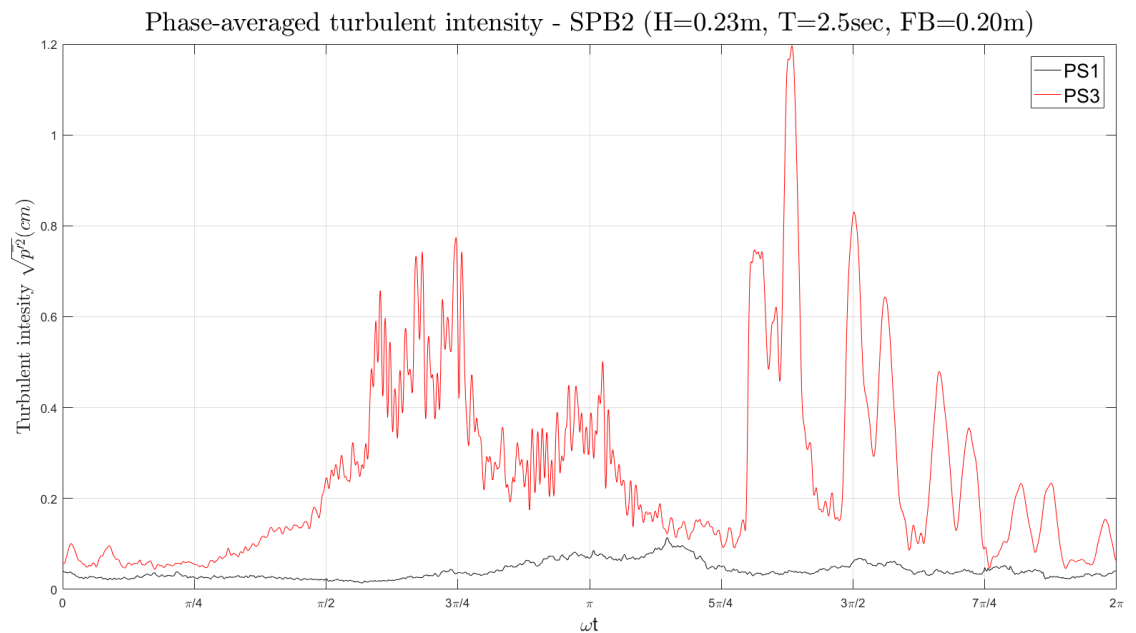


Σχήμα 5.77. Φάσμα εύρους δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) (Σενάριο 2-R8).

Στο Σχήμα 5.78 φαίνεται η μορφή των τυρβωδών διακυμάνσεων στις δύο θέσεις μέτρησης. Από τη χρονοσειρά των τυρβωδών διακυμάνσεων προέκυψε το διάγραμμα των τυρβωδών εντάσεων ως προς τη φάση του κυματισμού ωt , που φαίνεται στο Σχήμα 5.79.



Σχήμα 5.78. Τυρβώδεις διακυμάνσεις πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1) και στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R8).

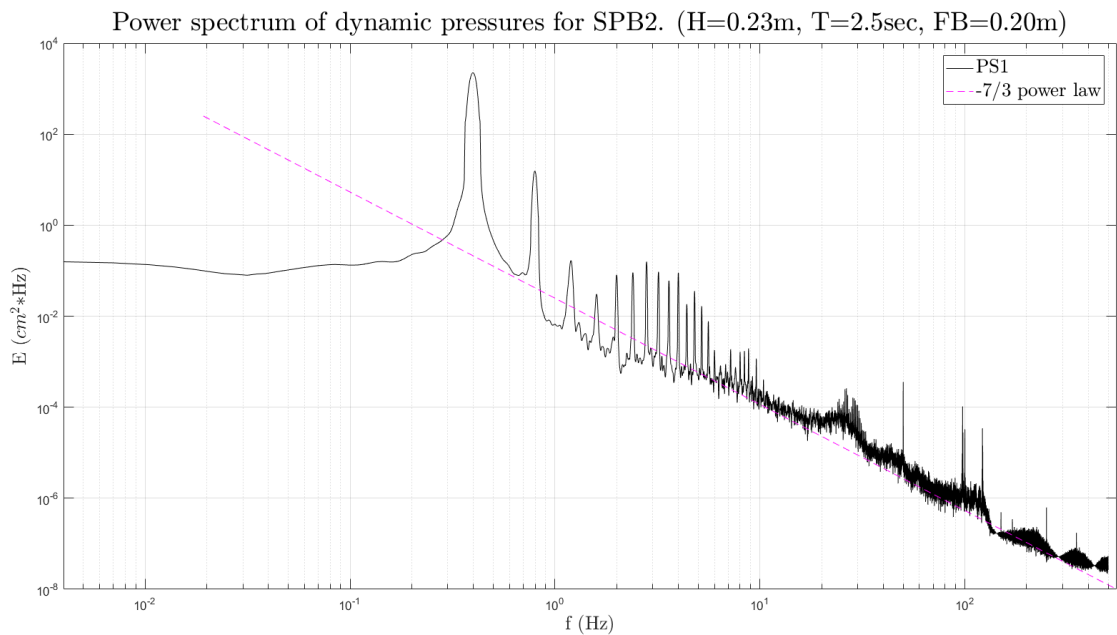


Σχήμα 5.79. Μέσες ως προς τη φάση του κυματισμού τυρβώδεις εντάσεις πιέσεων σε δύο θέσεις, α) στον πυθμένα στην προσήνεμη πλευρά (PS1), β) στον πυθμένα στην υπήνεμη πλευρά (PS3)(Σενάριο 2-R8).

Από το Σχήμα 5.79 έχουμε ότι η μέγιστη ένταση της τύρβης στην προσήνεμη θέση μέτρησης PS1 εμφανίζεται εντός της φάσης του κυματισμού για $[3.599(rad), 0.111(cm)]$. Λόγω της ύπαρξης της κατασκευής ο κυματισμός υπόκειται σε μετασχηματισμούς

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

καθώς μεταδίδονται πάνω από την κατασκευή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση πιο έντονης τύρβης, η οποία αποτυπώνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.79 από την εμφάνιση των παρακάτω μεγίστων: $[4.345(rad), 1.194(cm)]$, $[4.715(rad), 0.829(cm)]$, $[4.132(rad), 0.743(cm)]$, $[2.345(rad), 0.775(cm)]$ και $[2.144(rad), 0.743(cm)]$. Είναι φανερό ότι σε αυτό το σενάριο η ένταση της τύρβης είναι πάρα πολύ έντονη, συγκεκριμένα η μέγιστη ένταση για αυτό το σενάριο είναι μεγαλύτερη κατά περίπου 500%, το οποίο όμως ίσως δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο, λόγω της μικρής δειγματοληψίας.



Σχήμα 5.80. Φάσμα ενέργειας δυναμικών πιέσεων στην προσήνεμη πλευρά (PS1)(Σενάριο 2-R8).

Τέλος, το Σχήμα 5.80 αναφέρεται στο φάσμα ενέργειας της πίεσης για την προσήνεμη θέση μέτρησης (PS1), και φαίνεται ότι η μέγιστη ενέργεια εντοπίζεται για $f = 0.4Hz (T = 2.5sec)$, και είναι ίση με $2224 (cm^2 * Hz)$ και εντοπίζεται και ένα ακόμα μέγιστο για $f = 0.8Hz$ και είναι ίση με $15.38 (cm^2 * Hz)$. Τέλος, ο νόμος δύναμης $-7/3$ του Kolmogorov εμφανίζεται και για τις δυο θέσεις ανάμεσα στις συχνότητες $f = 0.6Hz$ και $f = 360Hz$.

5.5 Συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα

Σε αυτή την ενότητα θα δοθούν σε πίνακες και διαγράμματα οι βασικότερες τιμές καθώς και οι αποκλίσεις των τιμών αυτών μεταξύ των διάφορων σεναρίων, έτσι ώστε να γίνει πιο εύκολη η εξαγωγή συμπερασμάτων αλλά και η κατανόηση της επιρροής των χαρακτηριστικών του κύματος, αλλά και της γεωμετρίας της κατασκευής, στη δυναμική πίεση και στην έκλυση της τύρβης στις θέσεις όπου έγιναν μετρήσεις.

5.5.1 Μέση και Μέγιστη Δυναμική Πίεση

Στους παρακάτω Πίνακες 5.1 & 5.2 συνοψίζονται οι Μέγιστες και Μέσες τιμές των **Δυναμικών Πιέσεων**, και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση αυτών, ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή τη καμπυλότητας του κύματος αλλά και της γεωμετρίας της κατασκευής σε αυτές τις τιμές.

Πίνακας 5.1. Μέσες και Μέγιστες Δυναμικές Πιέσεις για το μοντέλο SPB1

Δυναμικές Πιέσεις (cm) για τη διατομή SPB1.								
	Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος $H(m)$	Περίοδος κύματος $T(sec)$	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη			
					Προσήνεμη (PS1)		Υπήνεμη (PS3)	
					Mean	Max	Mean	Max
SPB1	1 – R1	0.65 ($z/d=0.08$)	0.06	1.0	0.191	0.411	0.300	0.656
	1 – R2		0.11	1.5	1.556	2.810	1.556	2.936
	1 – R3		0.17	2.0	4.347	7.712	2.776	6.118
	1 – R4		0.23	2.5	7.229	12.970	4.094	9.827
	1 – R5	0.70 ($z/d=0.07$)	0.06	1.0	0.110	0.446	0.248	0.753
	1 – R6		0.11	1.5	1.489	2.804	1.579	2.714
	1 – R7		0.17	2.0	3.856	7.636	2.986	5.970
	1 – R8		0.23	2.5	7.213	12.182	4.215	7.877

Πίνακας 5.2. Μέσες και Μέγιστες Δυναμικές Πιέσεις για το μοντέλο SPB2

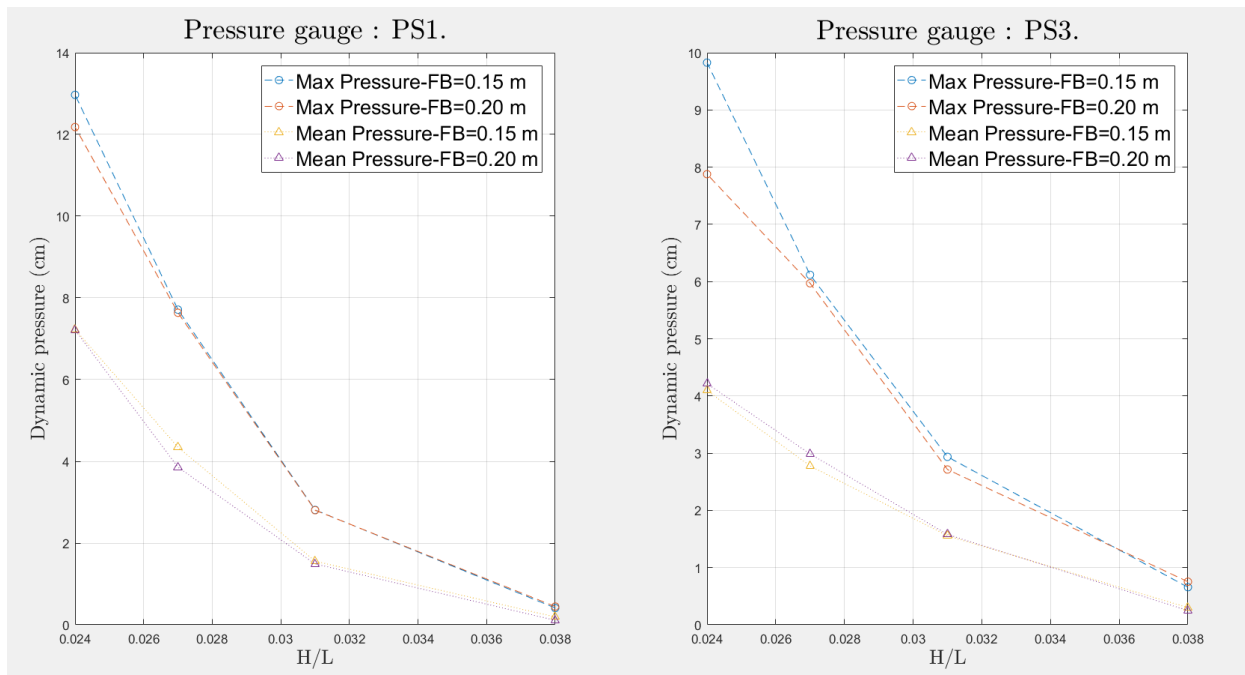
Δυναμικές Πιέσεις (cm) για τη διατομή SPB2.								
	Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος $H(m)$	Περίοδος κύματος $T(sec)$	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη			
					Προσήνεμη (PS1)		Υπήνεμη (PS3)	
					Mean	Max	Mean	Max
SPB2	2 – R1	0.65 ($z/d=0.08$)	0.06	1.0	0.251	0.544	0.335	0.902
	2 – R2		0.11	1.5	2.044	3.521	0.984	2.211
	2 – R3		0.17	2.0	4.634	9.364	2.545	5.015
	2 – R4		0.23	2.5	8.151	15.013	4.390	8.822
	2 – R5	0.70 ($z/d=0.07$)	0.06	1.0	0.285	0.625	0.352	0.731
	2 – R6		0.11	1.5	1.740	3.133	1.313	2.667
	2 – R7		0.17	2.0	4.554	8.675	3.287	5.276
	2 – R8		0.23	2.5	8.334	14.804	5.077	10.814

Πίνακας 5.3. Σύγκριση Δυναμικών πιέσεων μοντέλων *SPB1* & *SPB2*

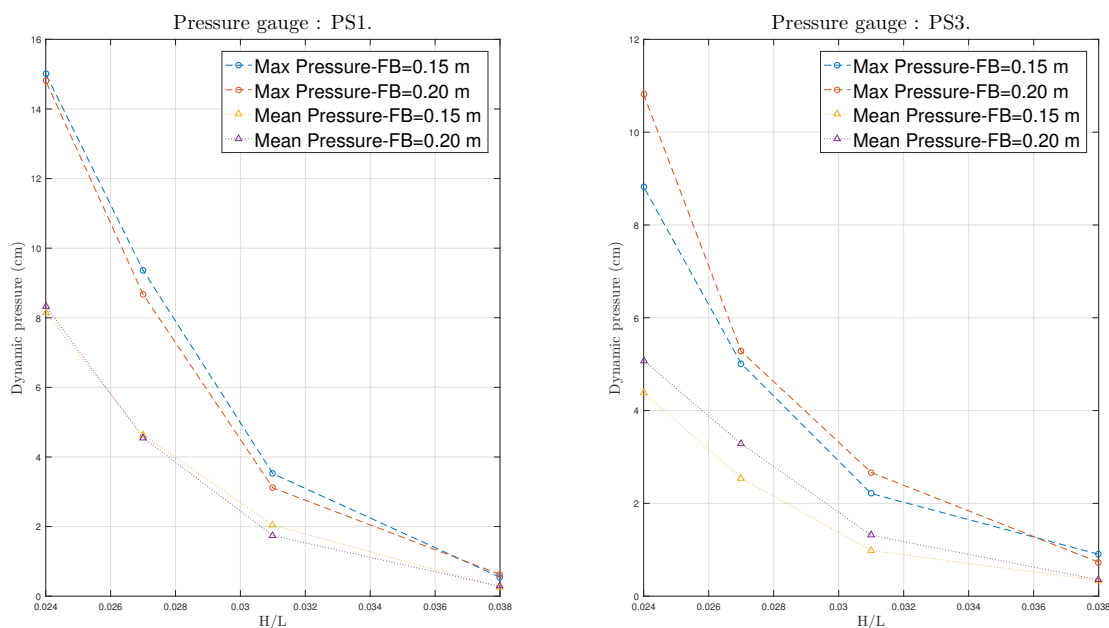
Σύγκριση Δυναμικών πιέσεων μοντέλων <i>SPB1</i> & <i>SPB2</i>							
Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος $H(m)$	Περίοδος κύματος $T(sec)$	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη			
				Προσήνεμη (<i>PS1</i>)		Υπήνεμη (<i>PS3</i>)	
				<i>Mean</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>Max</i>
1/2 - R1	0.65 ($z/d=0.08$)	0.06	1.0	+31.4%	+41.1%	+11.7%	+37.6%
1/2 - R2		0.11	1.5	+31.4%	+25.3%	-56.1%	-28.1%
1/2 - R3		0.17	2.0	+6.6%	+21.4%	-8.3%	-18.0%
1/2 - R4		0.23	2.5	+12.8%	+15.8%	+7.2%	-10.2%
1/2 - R5	0.70 ($z/d=0.07$)	0.06	1.0	+159.1%	+40.1%	+41.9%	-2.9%
1/2 - R6		0.11	1.5	+16.9%	+11.7%	-16.8%	-1.7%
1/2 - R7		0.17	2.0	+18.1%	+13.6%	+10.1%	-11.6%
1/2 - R8		0.23	2.5	+15.5%	+21.5%	+20.5%	+37.2%

Από τον παραπάνω Πίνακα 5.3 φαίνεται ότι η δυναμική πίεση στην προσήνεμη θέση *PS1* είναι μεγαλύτερη και σε μέσες και σε μέγιστες τιμές στη διάταξη κυματοθραύστη *SPB2* σε σύγκριση με τη διατομή *SPB1*, ενώ όσο αφορά την υπήνεμη θέση **PS3** οι μέσες τιμές γενικά αυξάνονται, εκτός απ την περίπτωση του σεναρίου 1-R3, 1-R4 και 2-R2, αλλά γενικά οι μέγιστες τιμές για αυτή τη θέση μειώνονται, με αύξηση να παρατηρείται μόνο στο σενάριο 1-R1 και 2-R4, οι οποίες όμως δε θεωρούνται αξιόπιστες, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της μέσης και μέγιστης δυναμικής πίεσης για διάφορες τιμές καμπυλότητας κύματος H/L , για τη διατομή *SPB1* και για τη διατομή *SPB2*.



Σχήμα 5.81. Μεταβολή μέσων και μέγιστων τιμών Δυναμικής Πίεσης, για διάφορες τιμές καμπυλότητας κύματος H/L (Διατομή *SPB1*)



Σχήμα 5.82. Μεταβολή μέσων και μέγιστων τιμών Δυναμικής Πίεσης, για διάφορες τιμές καμπυλότητας κύματος H/L (Διατομή SPB2)

Από το Σχήμα 5.81 φαίνεται ότι για τη διατομή SPB1 η μέση (min) και η μέγιστη (max) πίεση είναι μεγαλύτερη για $FB=0.15$ (m) κυρίως στις ενδιάμεσες και μικρές καμπυλότητες κύματος H/L , όσο αφορά την προσήνεμη θέση. Όσο αφορά την υπήνεμη θέση, η μέγιστη (max) πίεση είναι αρκετά μεγαλύτερη (+20%) για $FB=0.15$ (m) για μικρές καμπυλότητες κύματος ($H/L < 0.028$), ενώ η μέση (min) τιμή της πίεσης είναι λίγο μεγαλύτερη για $FB=0.20$ (m), για μικρές και ενδιάμεσες καμπυλότητες κύματος ($H/L < 0.03$).

Αντίστοιχα από το Σχήμα 5.82 φαίνεται ότι για τη διατομή SPB2 η μέση πίεση στην προσήνεμη θέση (PS1) είναι ανεξάρτητη από το Free Board, καθώς έχουν παρόμοιες τιμές για όλες τις τιμές καμπυλότητας, αλλά στην υπήνεμη θέση (PS3) οι μέσες τιμές της πίεσης είναι γενικά μεγαλύτερες για $FB=0.20$ (m), ειδικά για κυματισμούς μικρής καμπυλότητας H/L . Όσο αφορά τις μέγιστες τιμές της δυναμικής πίεσης, φαίνεται ότι στην προσήνεμη θέση (PS1) οι μέγιστες τιμές της είναι μεγαλύτερες για το $FB=0.15$ (m), ενώ αντίθετα στην υπήνεμη θέση (PS3) είναι μεγαλύτερες για $FB=0.20$ (m).

5.5.2 Μέση και Μέγιστη Τυρβώδης Ένταση Πιέσεων

Στους παρακάτω Πίνακες 5.1 & 5.2 συνοψίζονται οι Μέγιστες και Μέσες τιμές των **Δυναμικών Πιέσεων**, και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση αυτών, ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή τη καμπυλότητας του κύματος αλλά και της γεωμετρίας της κατασκευής σε αυτές τις τιμές.

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

Πίνακας 5.4. Μέσες και Μέγιστες Τυρβωδών Εντάσεων Πίεσης για το μοντέλο SPB1

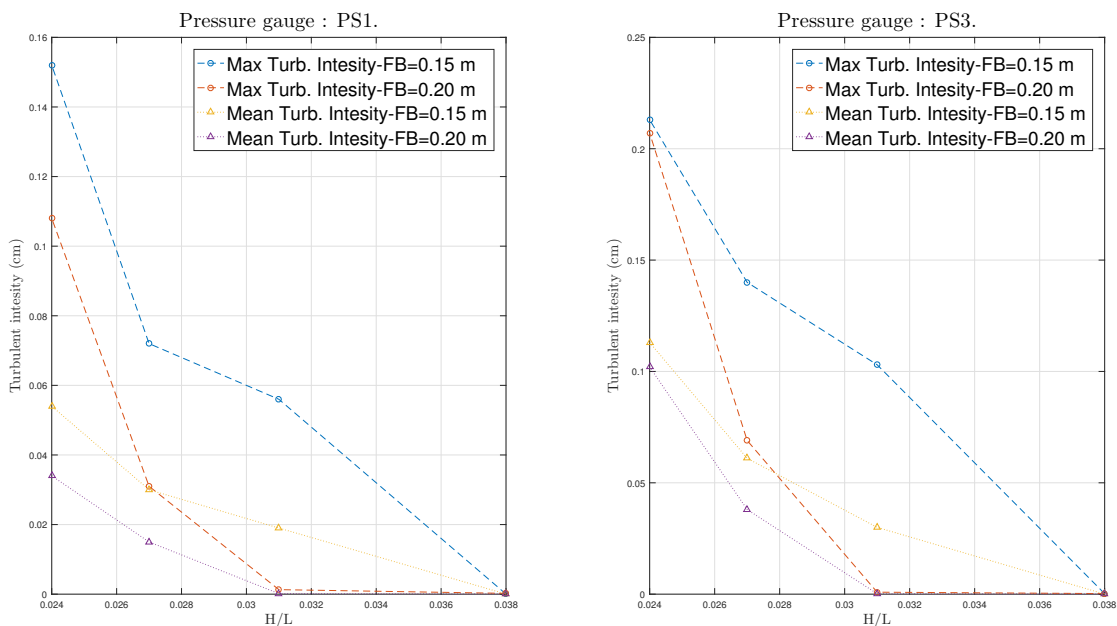
Μέση και Μέγιστη Τυρβώδης Ένταση (cm) - SPB1								
	Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H(m)	Περίοδος κύματος T(sec)	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη			
					Προσήνεμη (PS1)		Υπήνεμη (PS3)	
					Mean	Max	Mean	Max
SPB1	1 – R1	0.65	0.06	1.0	$3.2 * 10^{-5}$	$2.5 * 10^{-4}$	$3.2 * 10^{-5}$	$2.2 * 10^{-4}$
	1 – R2		0.11	1.5	0.019	0.056	0.030	0.103
	1 – R3		0.17	2.0	0.030	0.072	0.061	0.140
	1 – R4		0.23	2.5	0.054	0.152	0.113	0.213
	1 – R5	0.70	0.06	1.0	$4.5 * 10^{-5}$	$2.3 * 10^{-4}$	$4.4 * 10^{-5}$	$2.6 * 10^{-4}$
	1 – R6		0.11	1.5	$1.5 * 10^{-4}$	$13 * 10^{-4}$	$1.9 * 10^{-4}$	$8.9 * 10^{-4}$
	1 – R7		0.17	2.0	0.015	0.031	0.038	0.069
	1 – R8		0.23	2.5	0.034	0.108	0.102	0.207

Πίνακας 5.5. Μέσες και Μέγιστες Τυρβωδών Εντάσεων Πίεσης για το μοντέλο SPB2

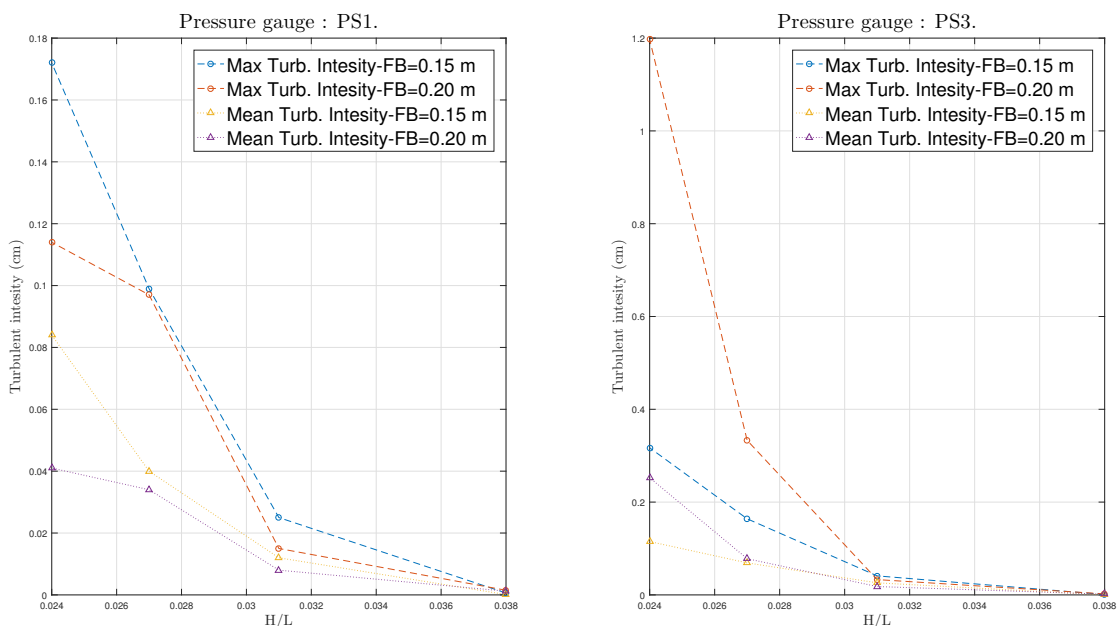
Μέση και Μέγιστη Τυρβώδης Ένταση (cm) - SPB2								
	Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H(m)	Περίοδος κύματος T(sec)	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη			
					Προσήνεμη (PS1)		Υπήνεμη (PS3)	
					Mean	Max	Mean	Max
SPB2	2 – R1	0.65	0.06	1.0	$1.2 * 10^{-4}$	$6.1 * 10^{-4}$	$7.5 * 10^{-5}$	$8.7 * 10^{-4}$
	2 – R2		0.11	1.5	0.012	0.025	0.026	0.041
	2 – R3		0.17	2.0	0.040	0.099	0.069	0.164
	2 – R4		0.23	2.5	0.084	0.172	0.115	0.317
	2 – R5	0.70	0.06	1.0	0.001	0.002	0.0016	0.0022
	2 – R6		0.11	1.5	0.008	0.015	0.018	0.033
	2 – R7		0.17	2.0	0.034	0.097	0.078	0.333
	2 – R8		0.23	2.5	0.041	0.114	0.252	1.197

Πίνακας 5.6. Σύγκριση Τυρβωδών Εντάσεων μοντέλων SPB1 & SPB2

Σύγκριση Τυρβωδών Εντάσεων για τα μοντέλα SPB1&SPB2							
Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H(m)	Περίοδος κύματος T(sec)	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη			
				Προσήνεμη (PS1)		Υπήνεμη (PS3)	
				Mean	Max	Mean	Max
1/2 – R1	0.65	0.06	1.0	+275%	+144%	+134%	295%
1/2 – R2		0.11	1.5	-36.8%	-55.4%	-13.3%	-60.2%
1/2 – R3		0.17	2.0	+33.3%	+37.5%	+13.1%	+17.1%
1/2 – R4		0.23	2.5	+55.5%	+13.2%	+1.8%	+48.8%
1/2 – R5	0.70	0.06	1.0	+2100%	+770%	+2100%	+700%
1/2 – R6		0.11	1.5	+400	105%	+9300%	+3600%
1/2 – R7		0.17	2.0	+127%	+213%	+105%	+383%
1/2 – R8		0.23	2.5	+20.6%	+5.6%	+147%	+2310%



Σχήμα 5.83. Μεταβολή μέσων και μέγιστων τιμών Τυρβώδους Έντασης, για διάφορες τιμες καμπυλότητας κύματος H/L (Διατομή SPB1)



Σχήμα 5.84. Μεταβολή μέσων και μέγιστων τιμών Τυρβώδους Έντασης, για διάφορες τιμες καμπυλότητας κύματος H/L (Διατομή SPB2)

Από τον παραπάνω Πίνακα 5.6, όσο αφορά το πιεσόμετρο στην προσήνεμη θέση (PS1)

5. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

φαίνεται μια καθαρή τάση αύξησης τόσο των μέσων όσο και των μέγιστων τυρβωδών εντάσεων, με την αύξηση του πλάτους στέψης της κατασκευής (SPB2), και αυτό μπορεί να διαπιστωθεί κυρίως για τα σενάρια 1/2-R3-4 και 1/2-R7-8, στα οποία οι τιμές μπορούν να θεωρηθούν απολύτως αξιόπιστες. Η ίδια τάση φαίνεται να υπάρχει και για το πιεσόμετρο που είναι τοποθετημένο στην υπήνεμη θέση (PS3), αν και καλό είναι να αγνοηθούν τα αποτελέσματα που αφορούν το (FB=0.20), καθώς όπως έχει αναφερθεί και στην προηγούμενη ενότητα, υπάρχουν ενδείξεις ότι το όργανο μέτρησης δεν λειτουργούσε σωστά στη θέση αυτή, για (FB=0.20) και για τη διατομή (SPB2)(Σενάρια 2-R5/R6/R7/R8).

Από τα Σχήματα 5.83 και 5.84 έχουμε ότι τόσο οι μέγιστες όσο και οι μέσες τυρβώδεις εντάσεις είναι μεγαλύτερες για FB=0.15 m, κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο καθώς το μικρότερο ελεύθερο ύψος έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντικότερη επιρροή της κατασκευής στο μετασχηματισμό και τη θραύση του κύματος, ανά και σε μεγαλύτερη έκλυση τύρβης. Το διάγραμμα για το πιεσόμετρο στην υπήνεμη θέση στην περίπτωση της διατομής SPB2 δείχνει μια αντίθετη τάση, αλλά όπως αναφέρθηκε οι μετρήσεις αυτές δε θεωρούνται αξιόπιστες.

5.5.3 Προφίλ αρμονικών συνιστωσών πίεσης

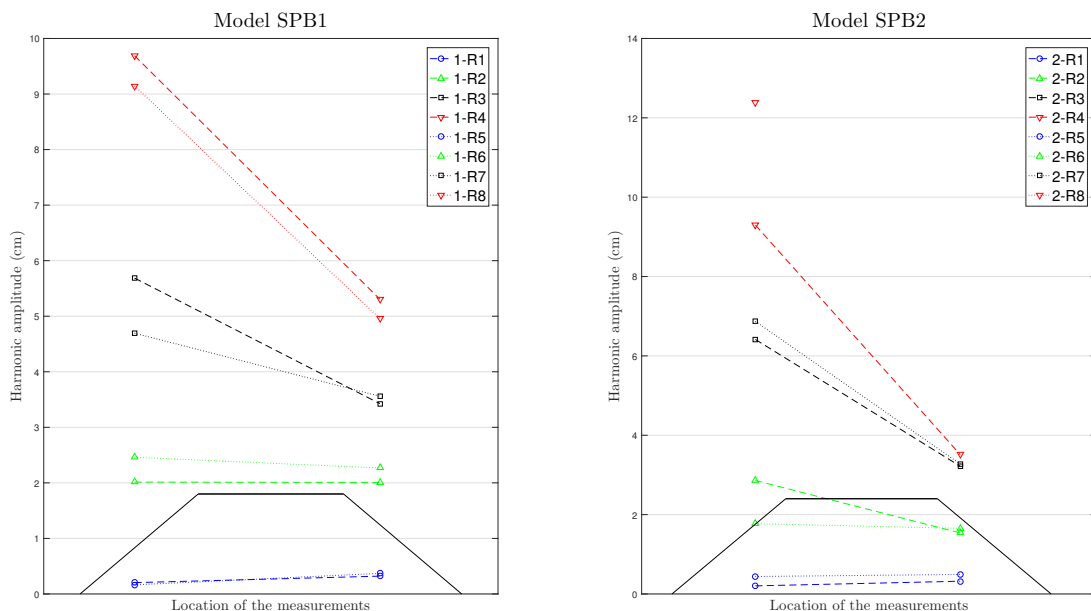
Πίνακας 5.7. Πλάτος αρμονικών συνιστωσών πίεσης για το μοντέλο SPB1

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών (cm) για το μοντέλο SPB1									
Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H(m)	Περίοδος κύματος T(sec)	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη					
				Προσήνεμη (PS1)			Υπήνεμη(PS3)		
				1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
1 – R1	0.65	0.06	1.0	0.204	0.006	0.002	0.321	0.018	0.001
1 – R2		0.11	1.5	2.014	0.100	0.095	2.008	0.169	0.258
1 – R3		0.17	2.0	5.686	0.406	0.222	3.426	0.734	0.140
1 – R4		0.23	2.5	9.689	0.955	0.162	5.305	1.823	0.530
1 – R5	0.70	0.06	1.0	0.164	0.010	0.000	0.371	0.014	0.000
1 – R6		0.11	1.5	2.461	0.154	0.039	2.268	0.137	0.042
1 – R7		0.17	2.0	4.694	0.373	0.088	3.559	0.650	0.118
1 – R8		0.23	2.5	9.145	0.677	0.180	4.958	1.636	0.639

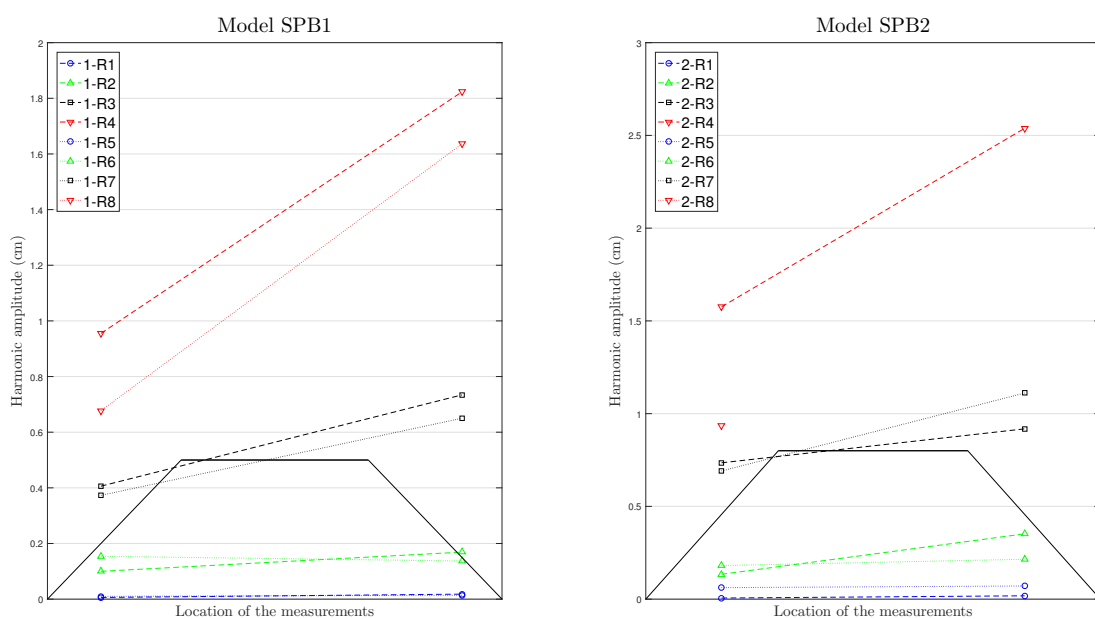
Πίνακας 5.8. Πλάτος αρμονικών συνιστωσών πίεσης για το μοντέλο SPB2

Πλάτος αρμονικών συνιστωσών (cm) για το μοντέλο SPB2									
Κυματικό Σενάριο	Βάθος νερού (m)	Ύψος κύματος H(m)	Περίοδος κύματος T(sec)	Θέση μέτρησης στον κυματοθραύστη					
				Προσήνεμη (PS1)			Υπήνεμη(PS3)		
				1 ^η	2 ^η	3 ^η	1 ^η	2 ^η	3 ^η
2 – R1	0.65	0.06	1.0	0.039	0.031	0.000	0.512	0.031	0.000
2 – R2		0.11	1.5	2.860	0.134	0.111	1.538	0.352	0.093
2 – R3		0.17	2.0	6.414	0.735	0.197	3.220	0.918	0.230
2 – R4		0.23	2.5	9.297	1.576	0.282	3.515	2.538	0.869
2 – R5	0.70	0.06	1.0	0.440	0.062	0.003	0.492	0.071	0.004
2 – R6		0.11	1.5	1.771	0.181	0.052	1.654	0.215	0.088
2 – R7		0.17	2.0	6.869	0.691	0.112	3.276	1.111	0.118
2 – R8		0.23	2.5	12.390	0.935	0.075	-	-	-

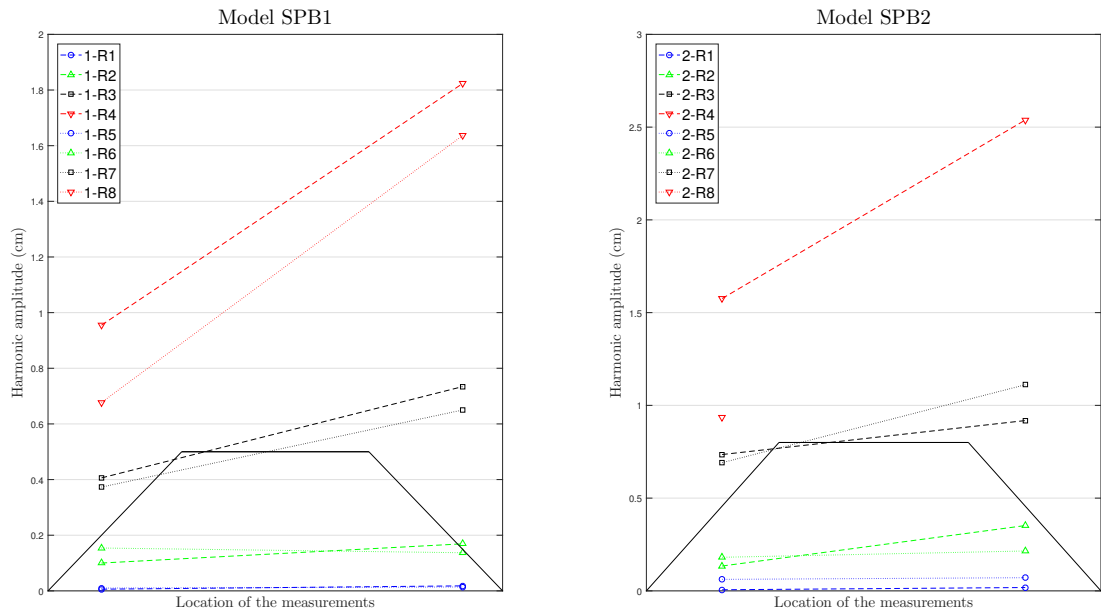
Στους παραπάνω Πίνακες 5.7 και 5.8 δίνονται τα πλάτη ταλάντωσης των τριών πρώτων αρμονικών συνιστωσών της πίεσης στην προσήνεμη PS1 και την υπήνεμη PS3 πλευρά των φυσικών μοντέλων SPB1 και SPB2 που κατασκευάστηκαν, και για τα δύο βάρη ύδατος που εφαρμόστηκαν, δηλαδή για βάθη 0.65 m και 0.70 m.



Σχήμα 5.85. Μεταβολή του πλάτους της 1^{ης} αρμονικής κατά μήκος της κατασκευής.



Σχήμα 5.86. Μεταβολή του πλάτους της 2^{ης} αρμονικής κατά μήκος της κατασκευής.



Σχήμα 5.87. Μεταβολή του πλάτους της 3^{ης} αρμονικής κατά μήκος της κατασκευής.

Στα παραπάνω Σχήματα 5.85, 5.86 και 5.87 παρουσιάζεται η μεταβολή της 1^{ης}, της 2^{ης} και της 3^{ης} αρμονικής ανάμεσα στην προσήνεμη και την υπήνεμη θέση, έτσι ώστε να παρθούν συμπεράσματα για την επιρροή της κατασκευής στην απομείωση της ενέργειας του κύματος, αλλά και στην εμφάνιση μη-γραμμικοτήτων λόγω μετασχηματισμών του κυματισμού κατά την μετάδοση πάνω από την κατασκευή.

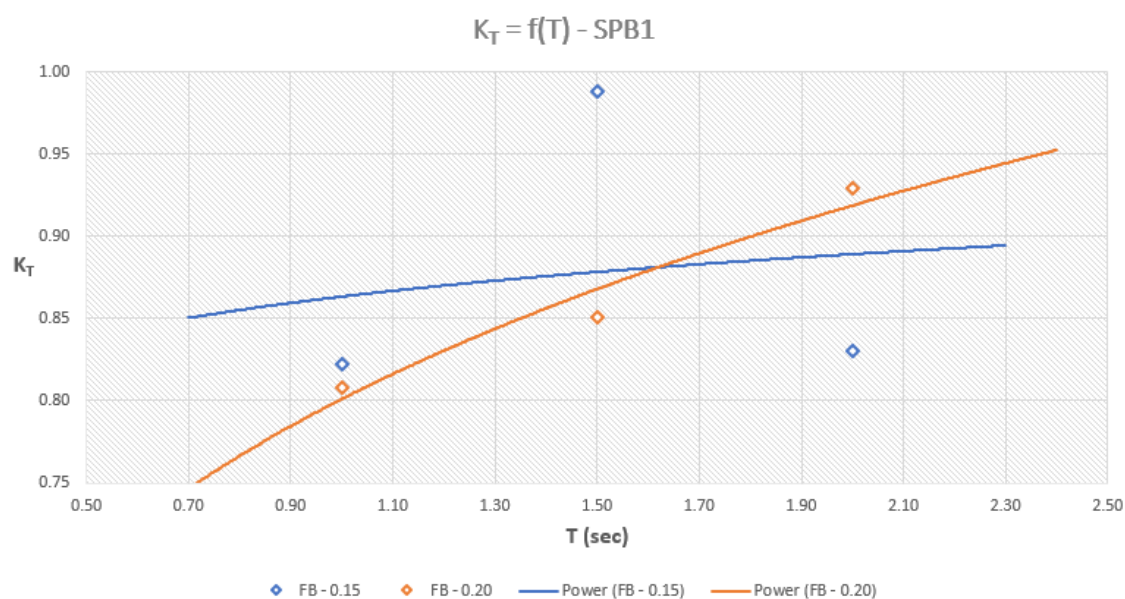
Από τα παραπάνω Σχήματα φαίνεται ότι η 1^η αρμονική μειώνεται αισθητά στην υπήνεμη πλευρά, αντίθετα η 2^η και η 3^η είναι κατά πολύ μεγαλύτερες στην υπήνεμη πλευρά σε σύγκριση με την προσήνεμη και αυτό λόγω μετασχηματισμού του κύματος, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επίσης, φαίνεται ότι, γενικά, τα εύρη και των τριών αρμονικών, για όλες τις περιπτώσεις, είναι μεγαλύτερα και για τις δύο θέσεις, στην περίπτωση της διατομής SPB2.

6 Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης

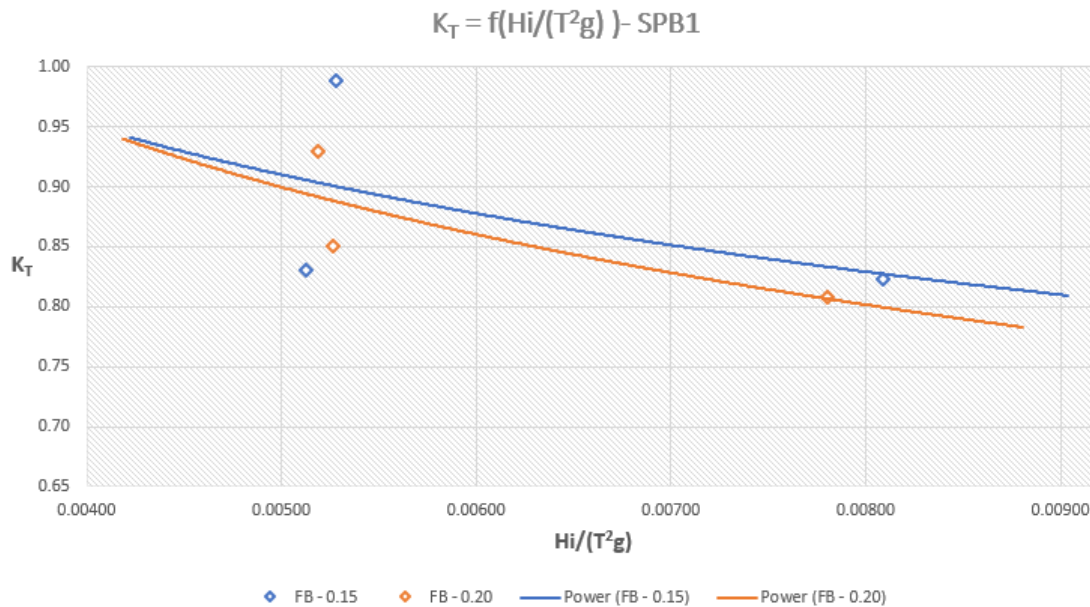
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα από την επεξεργασία των χρονοσειρών των μετρημένων ανυψώσεων (η_t) για όλα τα μοντέλα. Γι αυτό έγινε, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στατιστική επεξεργασία των χρονοσειρών με τη μέθοδο Zero Up-crossing, από όπου και υπολογίστηκε το σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ και η μέση περίοδος T_m . Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν τη μεταβολή του συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς το εισερχόμενο ύψος κύματος H_i , την περίοδο του εισερχόμενου κύματος T , το αδιάστατο μέγεθος $H_i/(T^2g)$, το οποίο στην ουσία δηλώνει την καμπυλότητα του εισερχόμενου κύματος H_i , η οποία εξαρτάται τόσο από το ύψος όσο και απ την περίοδο του κύματος. Τέλος, παρατίθενται μερικά ακόμα διαγράμματα που συνδέουν το συντελεστή μετάδοσης K_t με το λόγο του ελεύθερου ύψους (Free Board) προς το ύψος κύματος (FB/H_i), για να φανεί η επιρροή του ελεύθερου ύψους στην απομείωση της ενέργειας του κύματος.

Τα αποτελέσματα παρατίθενται με τη σειρά για κάθε μοντέλο που κατασκευάστηκε ξεκινώντας από το μοντέλο SPB1, συνεχίζοντας με το SPB2, το SPB3 και το SPB4.

6.1 Μοντέλο SPB1, (d=0.65-0.70m)



Σχήμα 6.1. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB1 και για ύψος ύδατος 0.65m και 0.70m (FB=0.15~0.20 m).



Σχήμα 6.2. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB1 και για ύψος ύδατος 0.65m και 0.70m ($FB=0.15 \approx 0.20$ m).

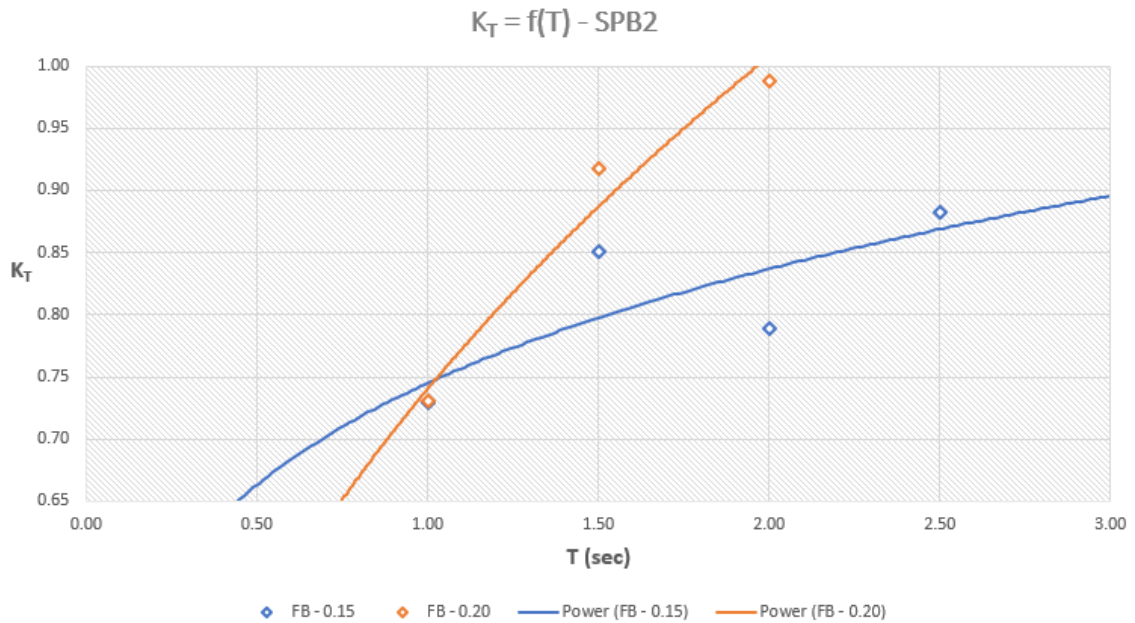
Από τα παραπάνω δύο Σχήματα 6.1-2 μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο ελάχιστος συντελεστής μετάδοσης είναι $K_t = 0.82$ και εντοπίζεται για τα σενάρια 1-R1 και 1-R5, τα οποία αφορούν τη μικρότερη περίοδο ($T = 1\text{sec}$).
2. Και για τις δύο περιπτώσεις ελεύθερου ύψους ο συντελεστής μετάδοσης K_t αυξάνει όσο μεγαλώνει η περίοδος του κύματος, με μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται για το $FB = 0.20\text{m}$.
3. Ο συντελεστής μετάδοσης μειώνεται όσο αυξάνει η καμπυλότητα του κύματος και στις δύο περιπτώσεις.

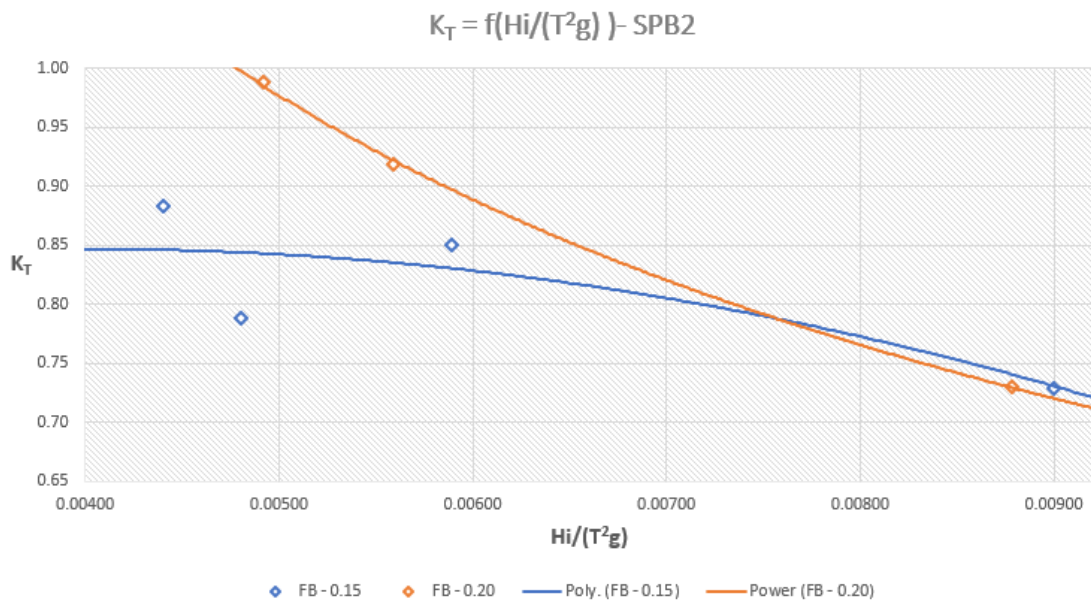
6.2 Μοντέλο SPB2, ($d=0.65\text{-}0.70\text{m}$)

Παρομοίως με τα αποτελέσματα που αφορούν το μοντέλο SPB1, από τα παρακάτω δύο Σχήματα 6.3-4 μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα για το μοντέλο SPB2:

1. Ο ελάχιστος συντελεστής μετάδοσης είναι $K_t = 0.73$ και εντοπίζεται για τα σενάρια 2-R1 και 2-R5, τα οποία αφορούν τη μικρότερη περίοδο ($T = 1\text{sec}$), και παρατηρείται μια γενικότερη μείωση που οφείλεται στο μεγαλύτερο πλάτος στέψης ($B = 0.65\text{m}$).
2. Και για τις δύο περιπτώσεις ελεύθερου ύψους, όπως και για το μοντέλο SPB1, ο συντελεστής μετάδοσης K_t αυξάνει όσο μεγαλώνει η περίοδος του κύματος, με μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται για το $FB = 0.20\text{m}$.
3. Ο συντελεστής μετάδοσης μειώνεται όσο αυξάνει η καμπυλότητα του κύματος και στις δύο περιπτώσεις, ενώ για τις μικρές συχνότητες ο συντελεστής μετάδοσης είναι μικρότερος όταν το ελεύθερο ύψος είναι μικρότερος, αλλά όσο μεγαλώνει η περίοδος τείνει να μην επηρεάζει την απομείωση του κύματος.



Σχήμα 6.3. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB2 και για ύψος ύδατος 0.65m και 0.70m (FB=0.15~0.20 m).



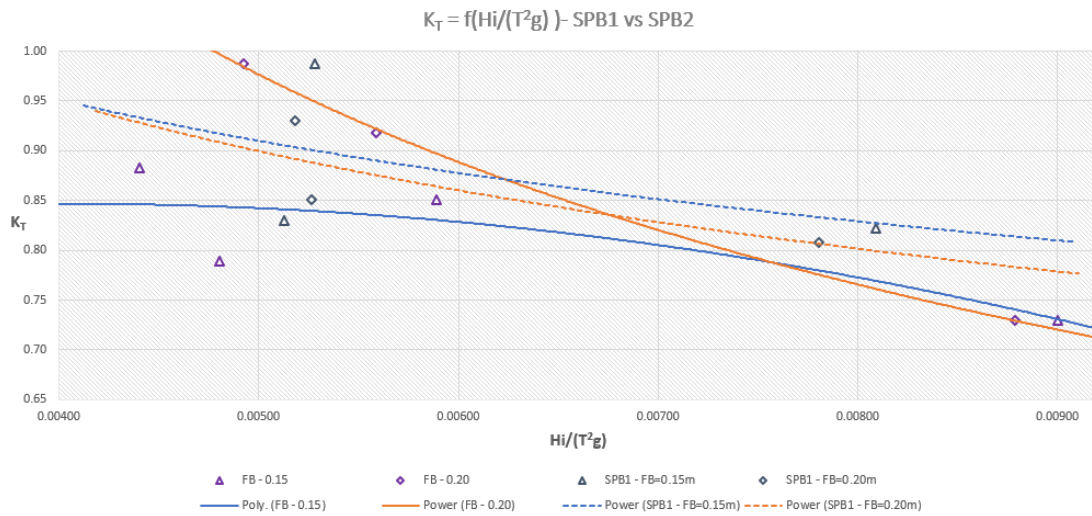
Σχήμα 6.4. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB2 και για ύψος ύδατος 0.65m και 0.70m (FB=0.15~0.20 m).

6.3 Σύγκριση φυσικών ομοιωμάτων SPB1 και SPB2

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται το διάγραμμα 6.5, ώστε να φανεί η επιρροή του μεγαλύτερου πλάτους στέφης στην απομείωση του μεταδιδόμενου κύματος. Υπενθυμίζεται ότι τα μοντέλα SPB1 και SPB2 είναι πανομοιότητα με τη διαφορά ότι το πλάτος στέφης από 0.40m μεγαλώνει και γίνεται 0.65m στο μοντέλο SPB2. Και στις δύο περιπτώσεις είναι

6. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης

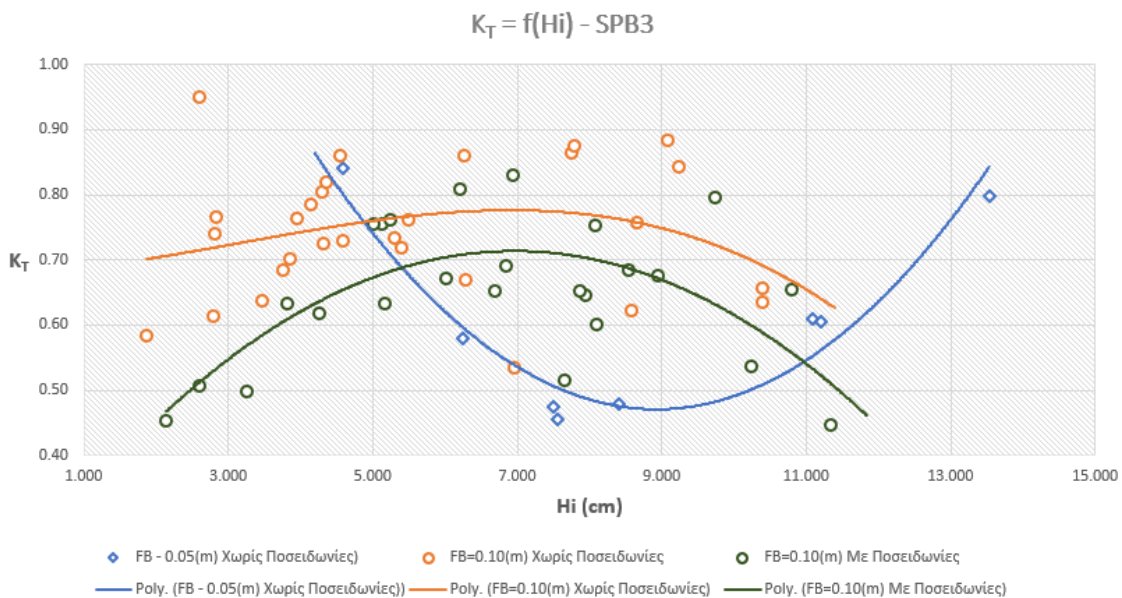
φανερό ότι όσο η καμπυλότητα αυξάνει ο συντελεστής μετάδοσης μειώνεται αισθητά, κατά περίπου 15~20%.



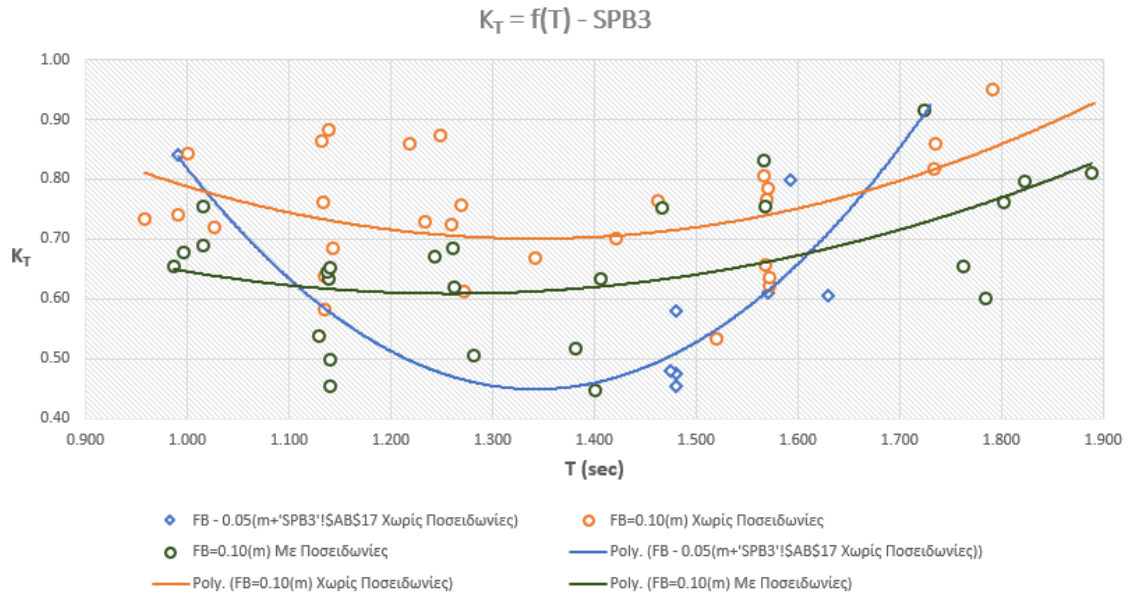
Σχήμα 6.5. Σύγκριση Συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για τα μοντέλα SPB1 και SPB2.

6.4 Μοντέλο SPB3, ($d=0.55-0.60m$)

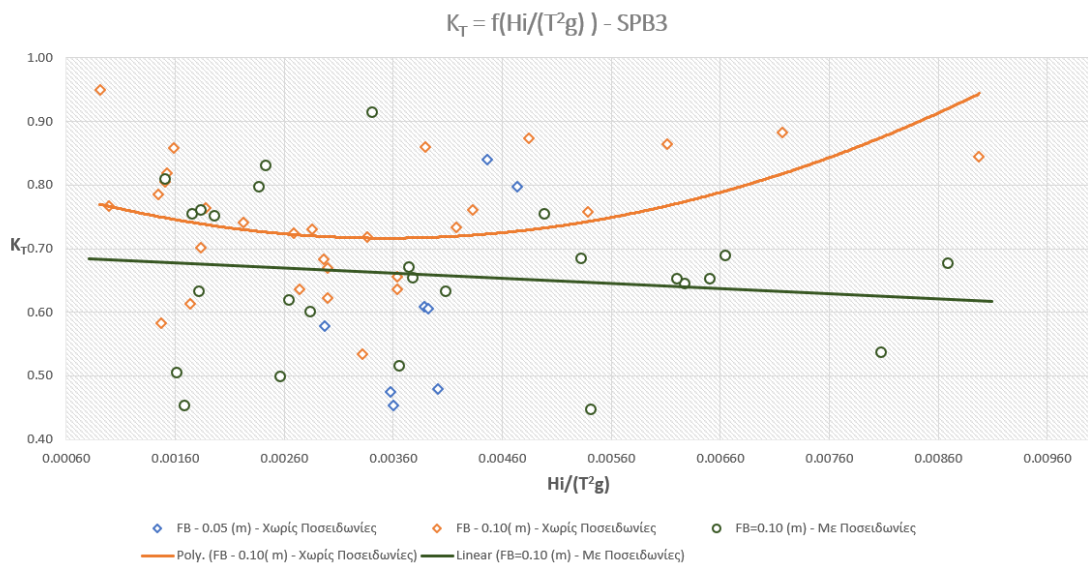
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα διαγράμματα που αφορούν το μοντέλο SPB3, για το οποίο έχουν γίνει μετρήσεις για ελεύθερο ύψος 0.05m και για 0.10m και για τη δεύτερη περίπτωση εξετάζεται και η περίπτωση που έχουν τοποθετηθεί ποσειδωνίες στην στέψη της κατασκευής.



Σχήμα 6.6. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς το ύψος κύματος H_i για το μοντέλο SPB3.



Σχήμα 6.7. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB3.



Σχήμα 6.8. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB3.

Από τα παραπάνω δύο Σχήματα 6.6-8 μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο συντελεστής μετάδοσης συνδέεται πολύ άμεσα με την περίοδο του κύματος, και συγκεκριμένα σε όλες τις περιπτώσεις φαίνεται από τις καμπύλες τάσης ότι ο ελάχιστος συντελεστής μετάδοσης K_t είναι για περίοδο κύματος περίπου 1.3sec. Για την περίπτωση του ελεύθερου ύψους ίσου με 0.05 m, φαίνεται ότι η κλίση της καμπύλης είναι πιο έντονη και επιτυγχάνονται πολύ μικρότεροι συντελεστές μετάδοσης για αυτή την περίοδο (περίπου 0.45 ο ελάχιστος).

6. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης

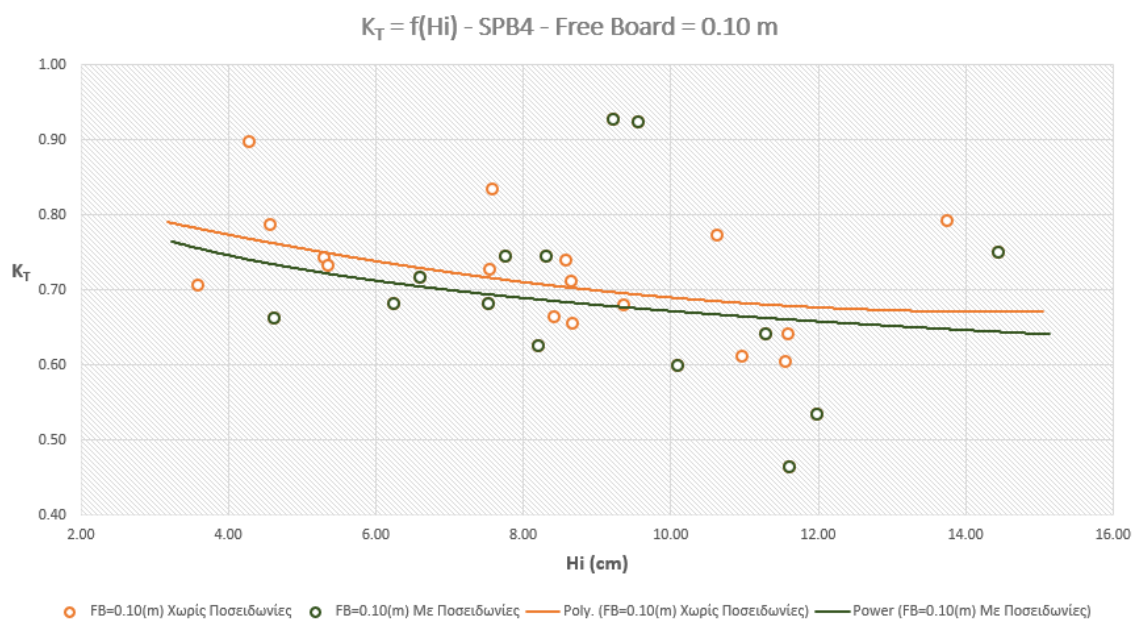
2. Ο συντελεστής μετάδοσης γενικά μειώνεται όταν τα ύψη κύματος H_i που κατευθύνονται προς την κατασκευή γίνονται μεγάλα, και ειδικότερα για $H_i > 7\text{cm}$. Αυτό δεν παρατηρείται στην περίπτωση του ελεύθερου ύψους ίσου με 0.05 m , καθώς τα μεγάλα ύψη κύματος έχουν συνδυαστεί με μεγάλη περίοδο, και έτσι φαίνεται πόσο καθοριστική είναι η περίοδος του κύματος για το αν θα διαπεράσει ή όχι την κατασκευή και κατά πόσο θα απομειωθεί, δεδομένου ότι το μοντέλο SPB3 έχει πολύ μεγάλο πορώδες ($n = 0.45$).
3. Είναι φανερό και από τα τρία διαγράμματα ότι οι ποσειδωνίες επιδρούν καταλυτικά στην απομείωση του κύματος.
4. Ο συντελεστής μετάδοσης όσο αυξάνει η καμπυλότητα του κύματος μειώνεται στην περίπτωση που υπάρχουν ποσειδωνίες, με την κλίση του να είναι μικρή και να ξεκινά από περίπου 0.7 και να καταλήγει να είναι περίπου 0.60 , για κυματισμούς μεγάλης καμπυλότητας.

6.5 Μοντέλο SPB4, ($d=0.50-0.60\text{m}$)

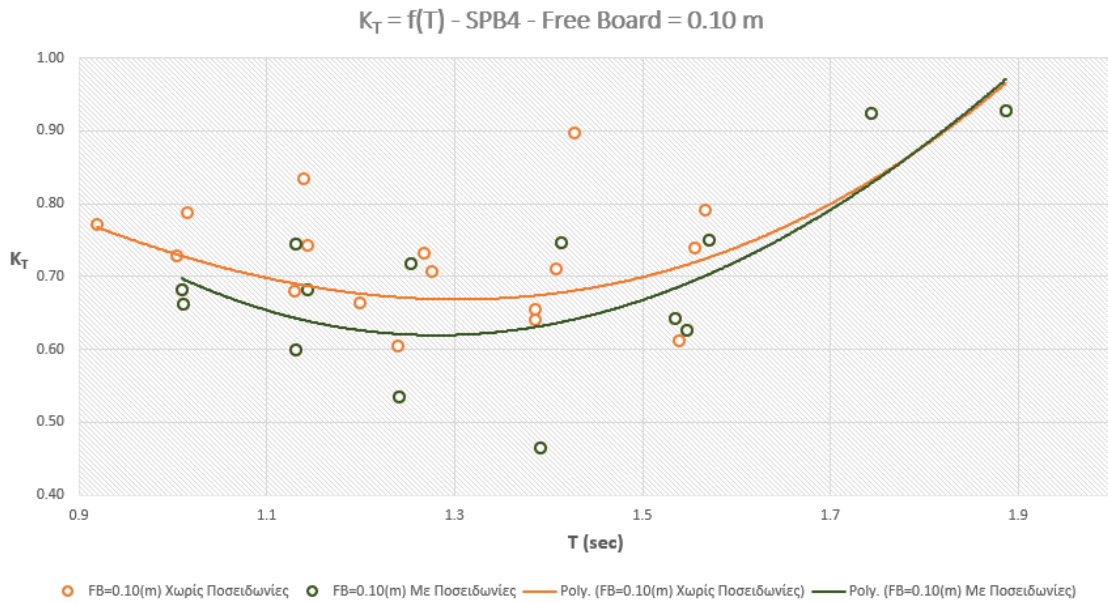
Σε αυτή την ενότητα θα δοθούν διαγράμματα του συντελεστή μετάδοσης K_t ανά περίπτωση ελεύθερου ύψους, ώστε να φανεί σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά η επιρροή της ποσειδωνίας στη στέψη της κατασκευής, αλλά και διαγράμματα με και χωρίς ποσειδωνίες και με διαφορετικό ύψος ύδατος, άρα και ελεύθερου ύψους, ώστε να εξαστεί και αυτή ως παράμετρος απομείωσης του κύματος. Τέλος, θα δοθούν και διαγράμματα του συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς το λόγο του Free Board ως προς το ύψος κύματος H_i , και διαγράμματα $f(T)$ και $f(H_i/(T^2g))$.

6.5.1 Ελεύθερο ύψος (Free Board) ίσο με 10 cm

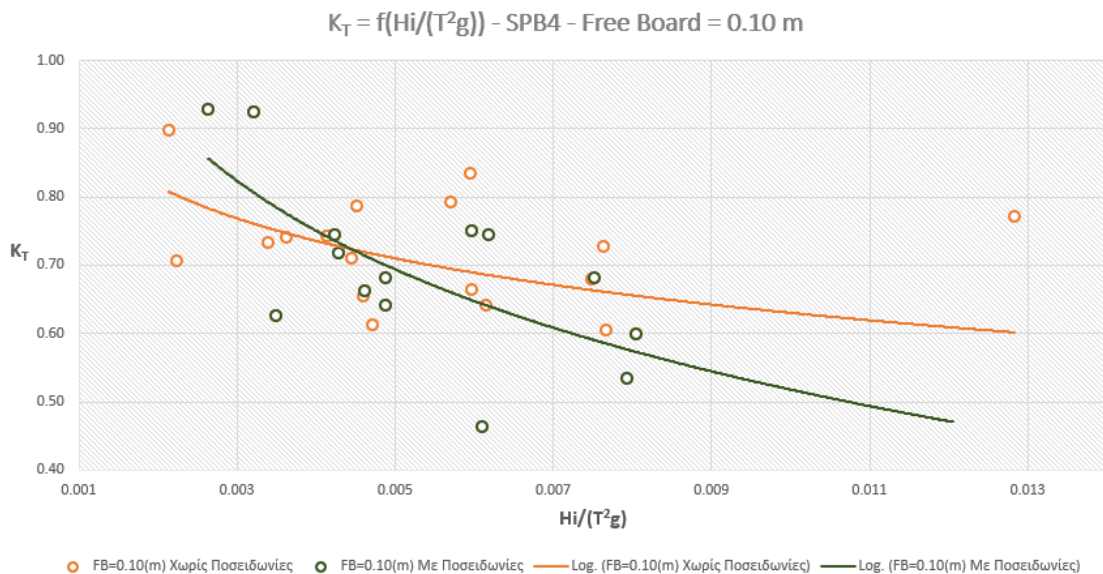
Σε αυτή την υπό-ενότητα δίνονται διαγράμματα για την περίπτωση ελεύθερου ύψους 0.10m , και για την περίπτωση με ποσειδωνίες και χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη της κατασκευής.



Σχήμα 6.9. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς το ύψος κύματος H_i για το μοντέλο SPB4(FB=0.10m).



Σχήμα 6.10. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB4(FB=0.10m).



Σχήμα 6.11. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB4(FB=0.10m).

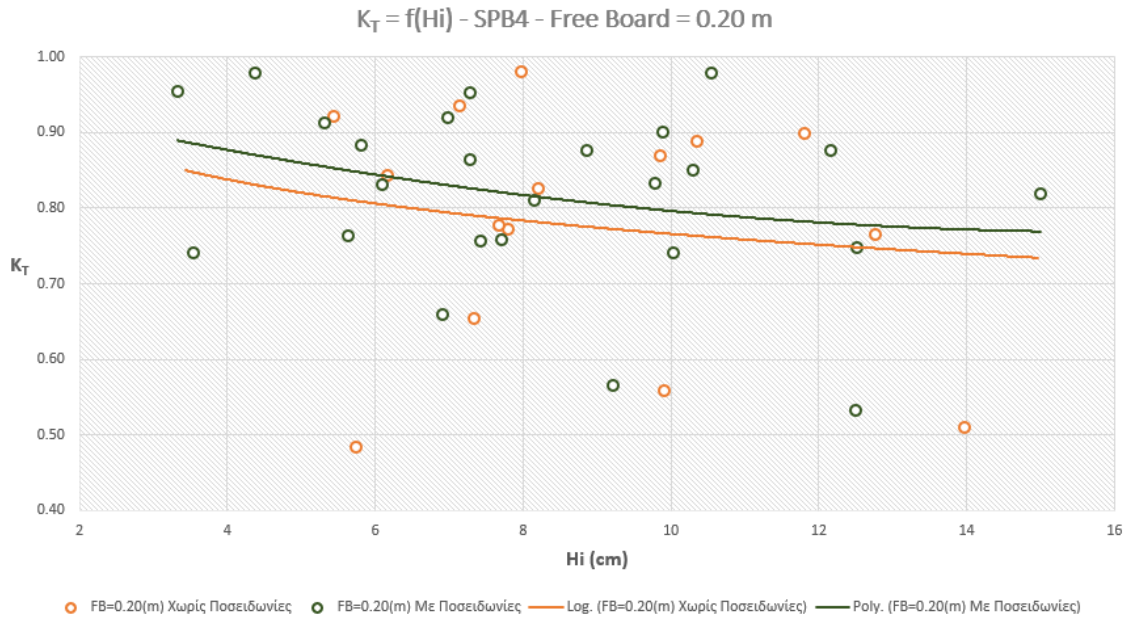
Από τα παραπάνω δύο Σχήματα 6.9-11 μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο μικρότερος συντελεστής μετάδοσης K_t καταγράφηκε για την περίπτωση με ποσειδωνίες στην στέψη της κατασκευής και είναι ίσος με 0.46 για $T \approx 1.4 \text{ sec}$.
2. Ο συντελεστής μετάδοσης K_t αυξάνει όσο αυξάνει η περίοδος T και μειώνεται για μεγάλα ύψη κύματος H_i .
3. Ο συντελεστής μετάδοσης K_t μειώνεται καθώς η καμπυλότητα του κύματος αυξάνει, και ειδικά γίνεται πολύ μικρός για την περίπτωση με τις ποσειδωνίες στην στέψη του,

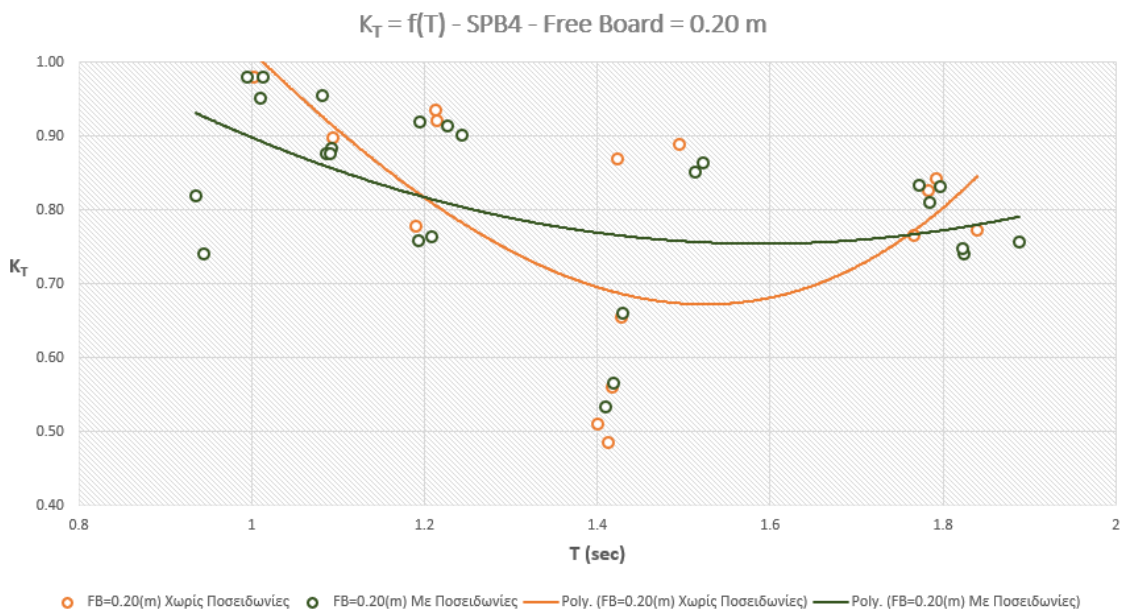
ενώ για μικρή καμπυλότητα η συν περιφορά είναι παρόμοια και για τις δύο περιπτώσεις.

6.5.2 Ελεύθερο ύψος (Free Board) ίσο με 20 cm

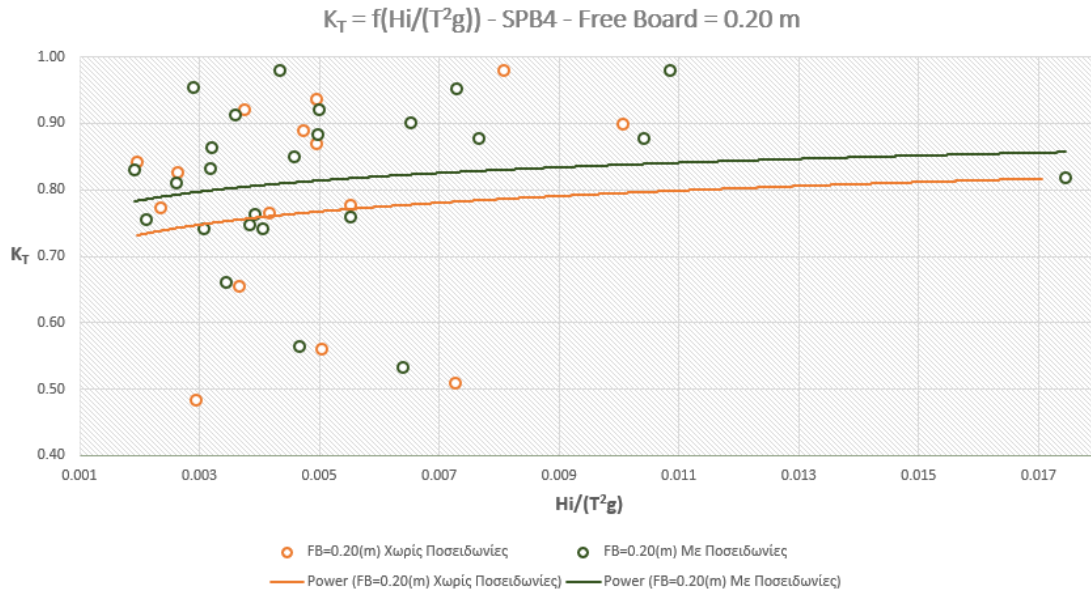
Σε αυτή την υπό-ενότητα δίνονται διαγράμματα για την περίπτωση ελεύθερου ύψους 0.20m, και για την περίπτωση με ποσειδωνίες και χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη της κατασκευής.



Σχήμα 6.12. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς το ύψος κύματος H_i για το μοντέλο SPB4(FB=0.20m).



Σχήμα 6.13. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB4(FB=0.20m).



Σχήμα 6.14. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB4(FB=0.20m).

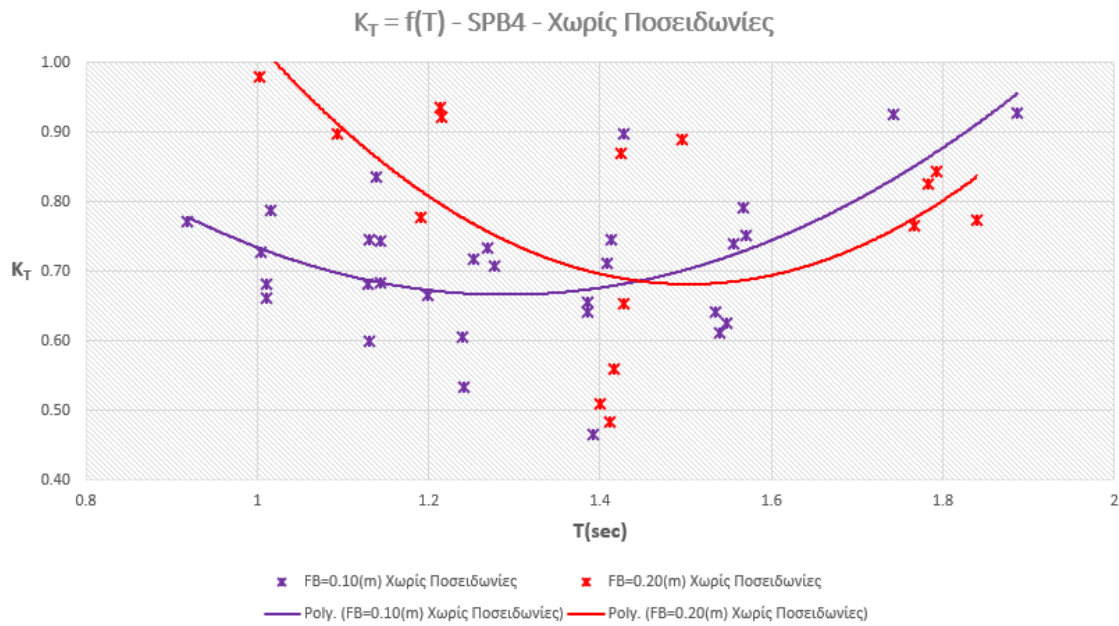
Από τα παραπάνω Σχήματα 6.12-14 μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο μικρότερος συντελεστής μετάδοσης K_t καταγράφηκε για την περίπτωση χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη της κατασκευής και είναι ίσος με 0.48, ενώ στην περίπτωση με ποσειδωνίες ο μικρότερος είναι ίσος με 0.52. Και στις δύο περιπτώσεις η περίοδος του κύματος είναι $T \approx 1.4sec$.
2. Ο συντελεστής μετάδοσης K_t μειώνεται όσο μεγαλώνει το ύψος κύματος H_i .
3. Ο συντελεστής μετάδοσης K_t εμφανίζει τις ελάχιστες τιμές του για περίοδο $T \approx 1.4sec$, ενώ για μικρότερες και μεγαλύτερες τιμές η τοποθέτηση ποσειδωνίας στην στέψη αυξάνει την αποδοτικότητα του κυματοθραύστη να απομειώνει το κύμα.
4. Η καμπυλότητα του κύματος έχει μικρότερη σημασία σε αυτή την περίπτωση στην απομείωση του κύματος, καθώς δε διαφαίνεται κάποια σημαντική κλίση της τάσης του συντελεστή μετάδοσης K_t .

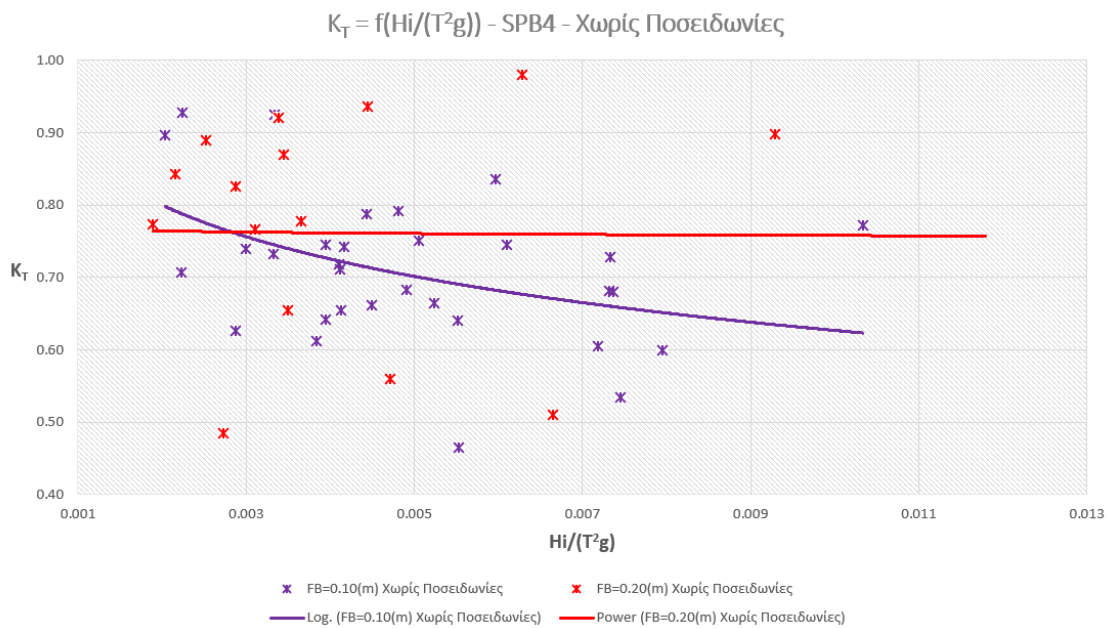
6.5.3 Αποδοτικότητα μοντέλου SPB4 χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη του

Σε αυτή την υπό-ενότητα εξετάζεται η αποδοτικότητα του φυσικού ομοιώματος SPB4, για την περίπτωση χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη της κατασκευής και για δύο διαφορετικά ελεύθερα ύψη. Με άλλα λόγια, ελέγχεται η επιρροή του πλάτους στέψης στην απομείωση της ενέργειας του κύματος. Δίνονται τα διαγράμματα που συσχετίζουν το συντελεστή μετάδοσης K_t με την περίοδο του κύματος T , τον αδιάστατο λόγο FB/H_i και την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$.

6. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης



Σχήμα 6.15. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB4 χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη του.



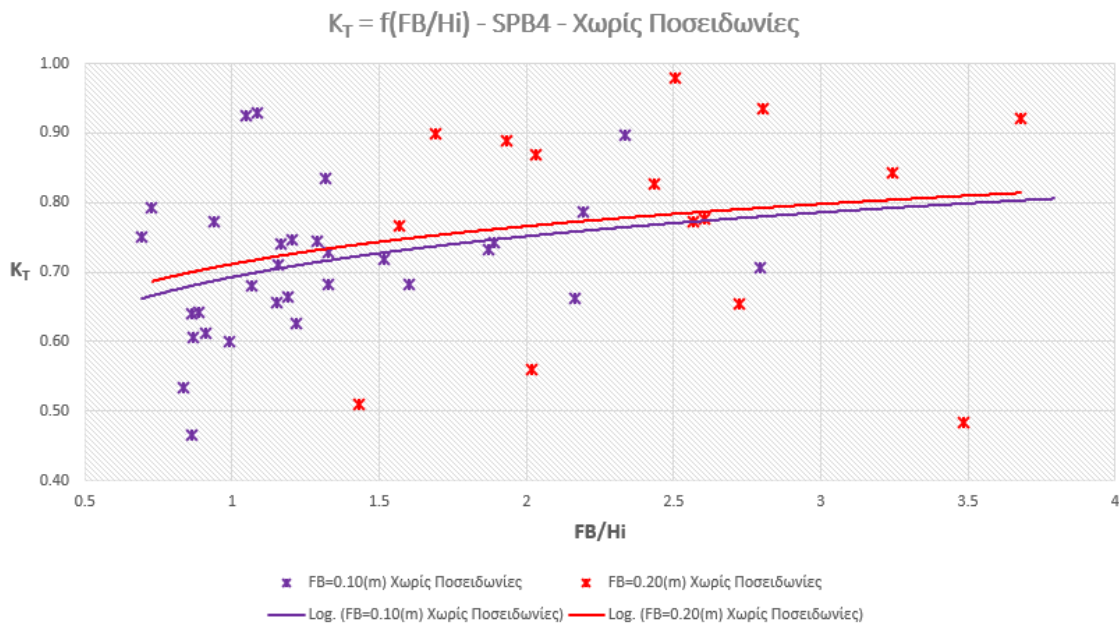
Σχήμα 6.16. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB4 χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη του.

Από τα παραπάνω δύο Σχήματα 6.15-16 μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Από τα παραπάνω Σχήματα, φαίνεται ότι ο συντελεστής μετάδοσης K_t είναι ελάχιστος κοντά στις περιόδους $T \approx 1.4\text{sec}$, και συγκεκριμένα ο ελάχιστος συντελεστής είναι 0.46 για $FB = 10\text{cm}$ και 0.48 για $FB = 20\text{cm}$.
2. Για μικρές περιόδους κύματος, $T < 1.5\text{sec}$, το μεταδιδόμενο κύμα απομειώνεται

αποτελεσματικότερα για $FB = 10cm$, όπως αναμενόταν, ενώ είναι ελαφρώς καλύτερη η απόδοση του κυματοθραύστη όταν $FB = 20cm$ για περιόδους $T > 1.6sec$.

- Όπως προκύπτει και από το συσχετισμό του K_t με την περίοδο του κύματος T , για μικρές καμπυλότητες κύματος η απομείωση του ύψους του κύματος είναι ελαφρώς μικρότερη στην περίπτωση του $FB = 20cm$, αλλά για $H_i/(T^2g) > 0.003$ η απομείωση του ύψους κύματος είναι σημαντικά μεγαλύτερη για $FB = 20cm$, που για μεγάλες τιμές καμπυλότητας φτάνει να είναι και της τάξης του 20%.



Σχήμα 6.17. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς τον αδιάστατο λόγο FB/H_i για το μοντέλο SPB4 χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη του.

Από το Σχήμα 6.17, που ο συντελεστής μετάδοσης K_t συσχετίζεται με τον αδιάστατο λόγο FB/H_i , φαίνεται ότι όταν το ελεύθερο ύψος είναι μικρότερο επιτυγχάνονται σταθερά μικρότεροι συντελεστές μετάδοσης, και άρα το ελεύθερο ύψος από τη στέψη της κατασκευής είναι καθοριστική παράμετρος.

6.5.4 Αποδοτικότητα μοντέλου SPB4 με ποσειδωνίες στην στέψη του

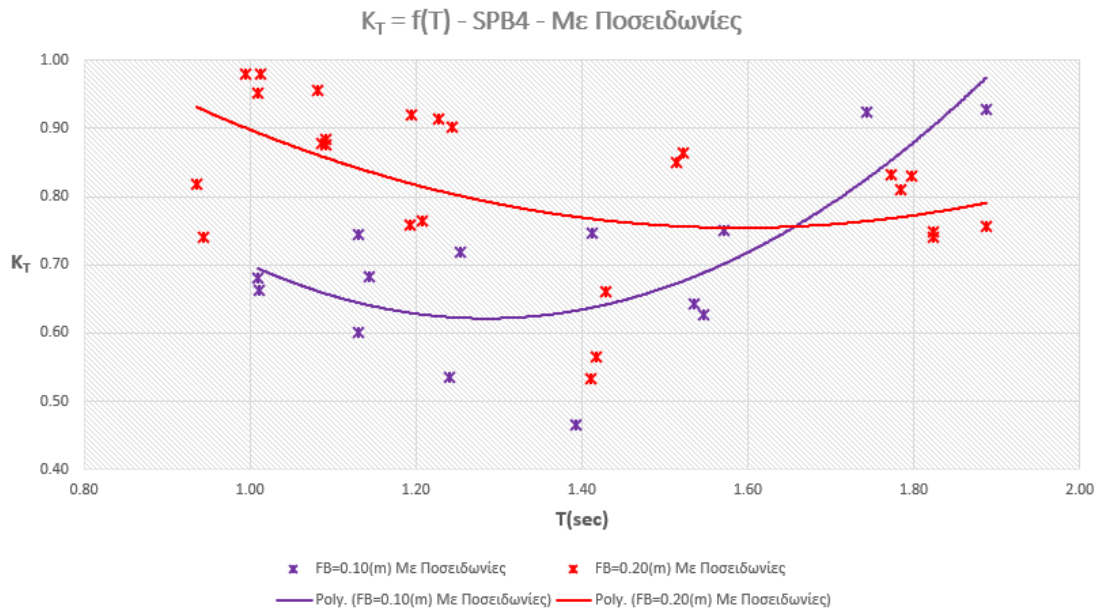
Σε αυτή την υπό-ενότητα εξετάζεται η αποδοτικότητα του φυσικού ομοιώματος SPB4, για την περίπτωση με ποσειδωνίες στην στέψη της κατασκευής και για δύο διαφορετικά ελεύθερα ύψη. Δίνονται τα διαγράμματα που συσχετίζουν το συντελεστή μετάδοσης K_t με την περίοδο του κύματος T , τον αδιάστατο λόγο FB/H_i και την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$.

Από τα παρακάτω δύο Σχήματα 6.15-16 μπορούν να βγουν τα εξής συμπεράσματα:

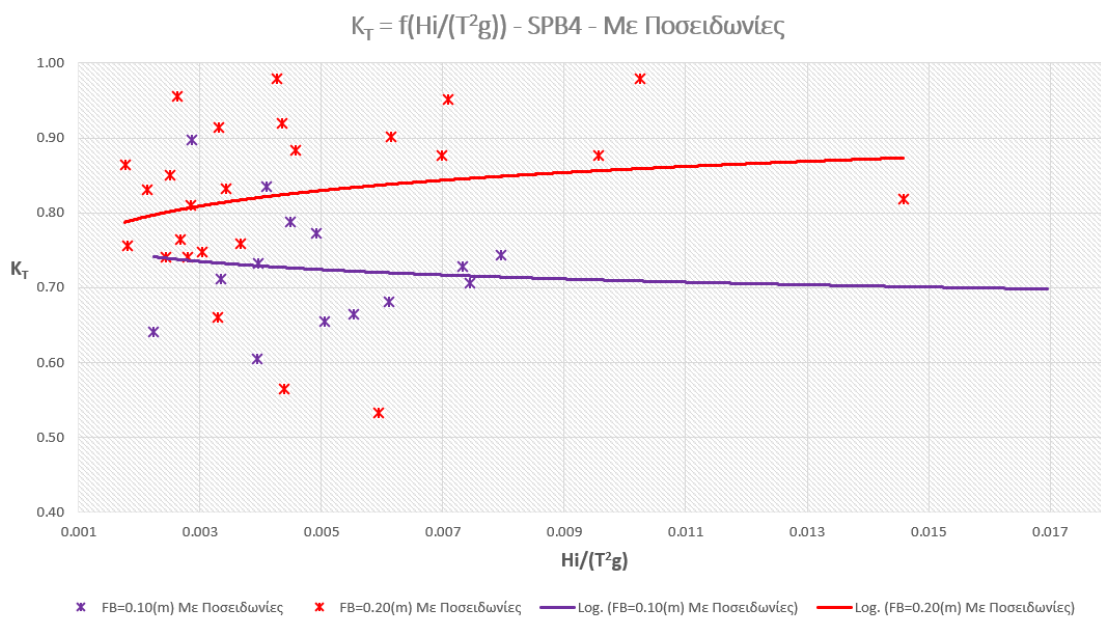
- Όπως και στην περίπτωση χωρίς ποσειδωνίες, ο συντελεστής K_t είναι ελάχιστος κοντά στις περιόδους $T \approx 1.4sec$, με τις ελάχιστες τιμές να είναι 0.46 για $FB = 10cm$ και 0.53 για $FB = 20cm$.

6. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης

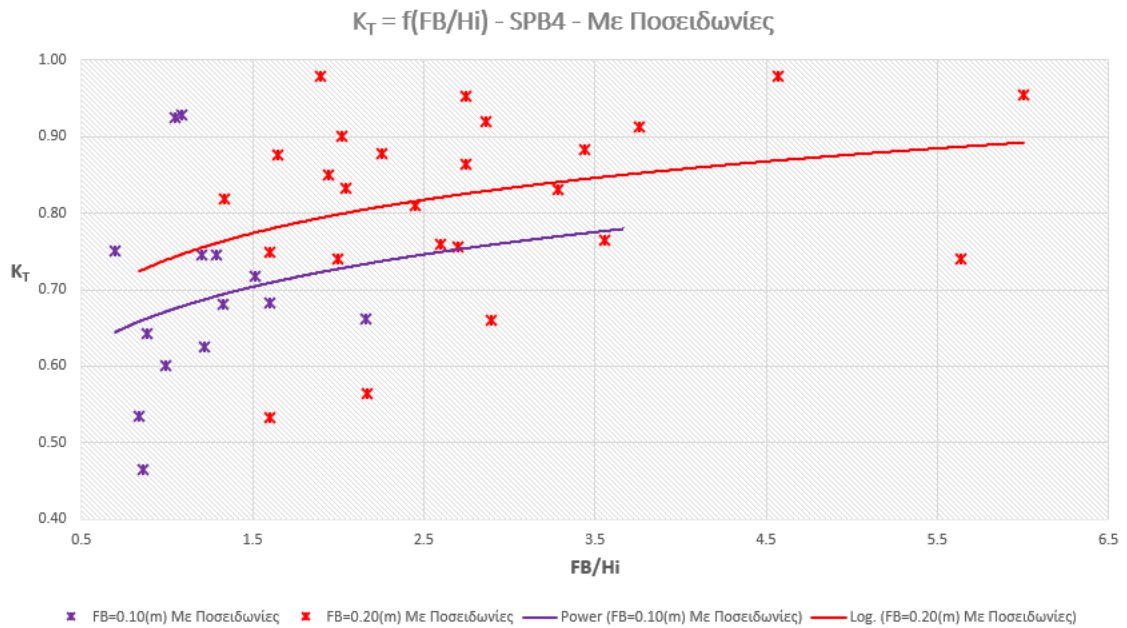
2. Για μικρές περιόδους κύματος, $T < 1.5\text{sec}$, το μεταδιδόμενο κύμα απομειώνεται αποτελεσματικότερα για $FB = 10\text{cm}$, ενώ είναι ελαφρώς καλύτερη η απόδοση του κυματοθραύστη όταν $FB = 20\text{cm}$ για περιόδους $T > 1.7\text{sec}$.
3. Από το διάγραμμα $f(H_i/(T^2g))$, για όλες τις τιμές καμπυλότητας κύματος ο K_t είναι μικρότερος για $FB = 10\text{cm}$ σε σχέση με το $FB = 20\text{cm}$. Από το Σχήμα 6.19, φαίνεται επίσης ότι ενώ για το $FB = 10\text{cm}$ αύξηση της καμπυλότητας οδηγεί σε μικρότερους συντελεστές K_t , δεν συμβαίνει το ίδιο για την περίπτωση του $FB = 20\text{cm}$.



Σχήμα 6.18. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB4 με ποσειδωνίες στην στέψη του.



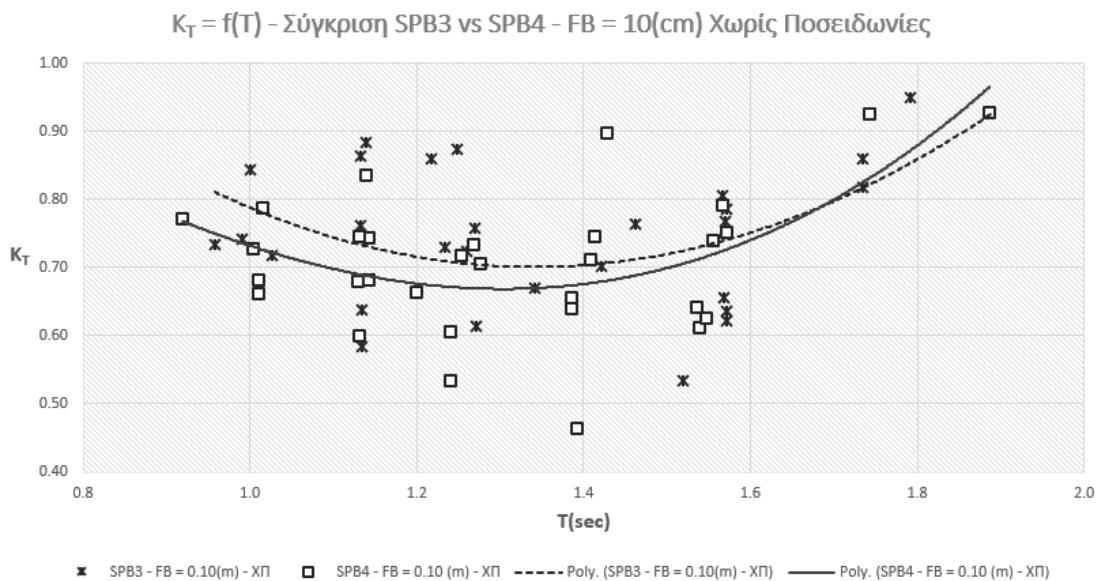
Σχήμα 6.19. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB4 με ποσειδωνίες στην στέψη του.



Σχήμα 6.20. Συντελεστής μετάδοσης K_t ως προς τον αδιάστατο λόγο FB/H_i για το μοντέλο SPB4 με ποσειδωνίες στην στέψη του.

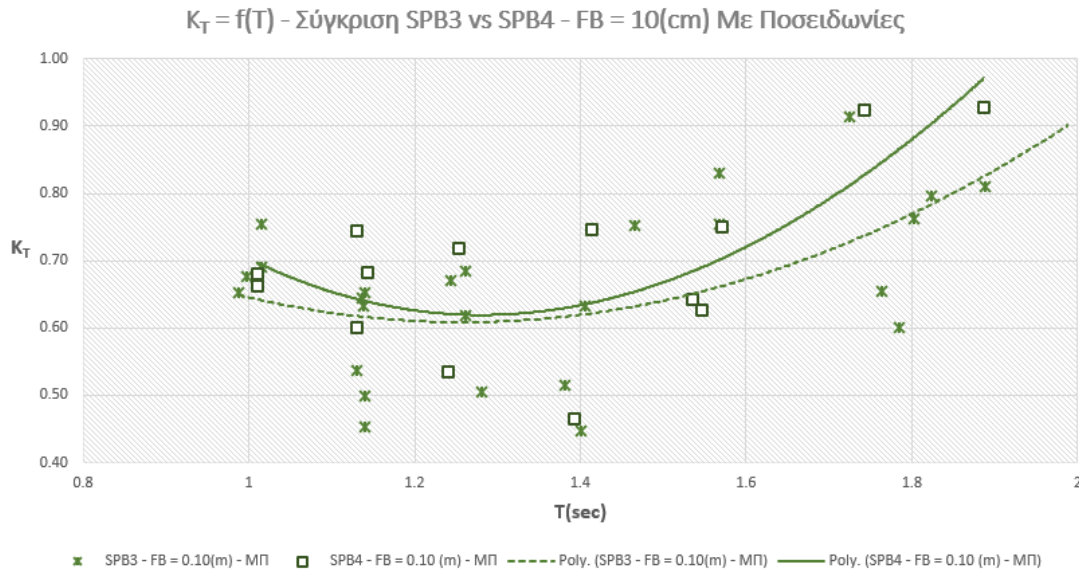
Από το Σχήμα 6.17, όπως και στο Σχήμα 6.20, φαίνεται ότι όταν το ελεύθερο ύψος είναι μικρότερο επιτυγχάνονται σταθερά μικρότεροι συντελεστές μετάδοσης. Επίσης, όσο αυξάνεται ο λόγος FB/H_i , δηλαδή όσο το ελεύθερο ύψος μεγαλώνει σε σύγκριση με το ύψος κύματος του μεταδιδόμενου στην προσήνεμη πλευρά κύματος, ο συντελεστής K_t μεγαλώνει.

6.6 Σύγκριση φυσικών ομοιωμάτων SPB3 και SPB4



Σχήμα 6.21. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για τα μοντέλα SPB3 και SPB4, χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη του.

6. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης



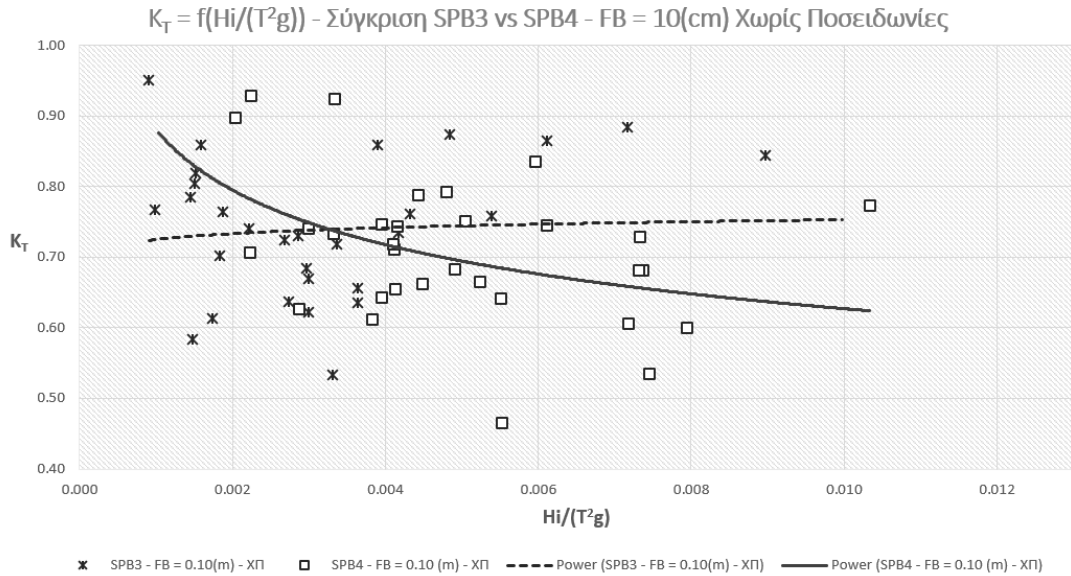
Σχήμα 6.22. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για τα μοντέλα SPB3 και SPB4, με ποσειδωνίες στην στέψη του.

Στα παραπάνω Σχήματα 6.21-22 γίνεται μια σύγκριση των μοντέλων SPB3 και SPB4 για την κοινή περίπτωση του $FB = 10\text{cm}$. Παρόλα αυτά, πρέπει να σημειωθεί ότι ο λόγος του ελεύθερου ύψους προς το ύψος της κατασκευής δεν είναι ίδιος για τα δύο μοντέλα, καθώς το ύψος του μοντέλου SPB3 είναι 50 cm, ενώ το ύψος του μοντέλου SPB4 είναι 40 cm, και επομένως οι λόγοι διαμορφώνονται ίσοι με 0.20 και 0.25 αντίστοιχα.

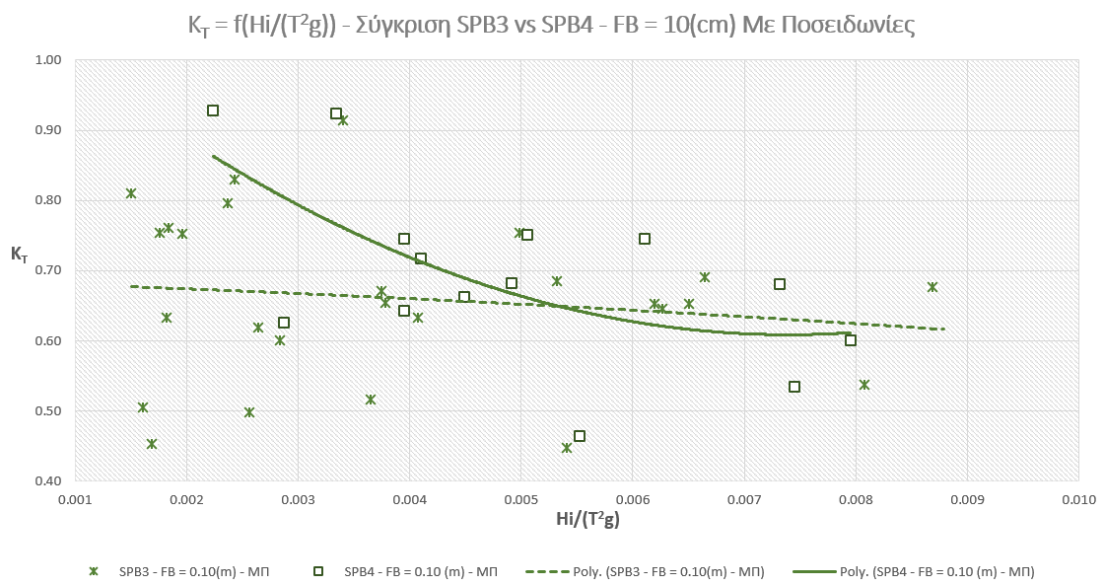
Τελικά, από τα παραπάνω δύο Σχήματα συμπεραίνονται τα εξής:

1. Για την περίπτωση χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη (Σχήμα 6.21), φαίνεται πως το μοντέλο SPB3, του οποίου το πλάτος στέψης είναι 80 cm, είναι πιο αποδοτικό στις συχνότητες $T < 1.7\text{sec}$.
2. Για την περίπτωση με ποσειδωνίες στην στέψη (Σχήμα 6.21), φαίνεται πως το μοντέλο SPB4 είναι πιο αποδοτικό σε όλο το εύρος συχνοτήτων.
3. Οι μικρότεροι συντελεστές μετάδοσης K_t καταγράφονται για περιόδους ανάμεσα σε $T = 1 \sim 1.6\text{sec}$.
4. Οι συντελεστές μετάδοσης K_t στην περίπτωση με ποσειδωνίες στην στέψη είναι μειωμένοι κατά περίπου 10 ~ 15% σε σύγκριση με τις περιπτώσεις χωρίς ποσειδωνίες, για το εύρος συχνοτήτων $T = 1 \sim 1.6\text{sec}$.
5. Για την περίπτωση χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη, ο ελάχιστος συντελεστής μετάδοσης K_t είναι $K_t = 0.53$ για $T = 1.53\text{sec}$ για το μοντέλο SPB3, και $K_t = 0.47$ για $T = 1.39\text{sec}$ για το μοντέλο SPB4.
6. Για την περίπτωση με ποσειδωνίες στην στέψη, ο ελάχιστος συντελεστής μετάδοσης K_t είναι $K_t = 0.45$ για $T = 1.14\text{sec}$ και $T = 1.40\text{sec}$ για το μοντέλο SPB3, και $K_t = 0.47$ για $T = 1.39\text{sec}$ για το μοντέλο SPB4.

Στα επόμενα δύο Σχήματα 6.23-24 παρουσιάζεται η σύγκριση των μοντέλων SPB3 και SPB4, αυτή τη φορά ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$.



Σχήμα 6.23. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για τα μοντέλα SPB3 και SPB4, χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη του.



Σχήμα 6.24. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για τα μοντέλα SPB3 και SPB4, με ποσειδωνίες στην στέψη του.

Από τα παραπάνω δύο Σχήματα 6.23-24 συμπεραίνονται τα εξής:

1. Στην περίπτωση του μοντέλου SPB4 η απόδοση του κυματοθραύστη επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την καμπυλότητα του κυματισμού, καθώς για μικρή καμπυλότητα ο K_t έχει τιμές κοντά στο 0.85 με ή χωρίς ποσειδωνίες, αλλά για μεγάλες καμπυλότητες ($H_i/(T^2g) > 0.008$) προσεγγίζει την τιμή 0.65 για την περίπτωση χωρίς ποσειδωνίες στην στέψη, και την τιμή 0.60 για την περίπτωση με ποσειδωνίες στην στέψη.

2. Στην περίπτωση του μοντέλου SPB3 για τα κύματα μεγάλης καμπυλότητας, η ύπαρξη ποσειδωνίας στην στέψη βελτιώνει πολύ την απόδοση του κυματοθραύστη, καθώς για τιμές καμπυλότητας στο εύρος 0.004 ~ 0.008, ο συντελεστής μετάδοσης K_t , όταν δεν υπάρχουν ποσειδωνίες στην στέψη του, παίρνει τιμές σε ένα εύρος τιμών από 0.75 μέχρι 0.90, ενώ με ποσειδωνίες στην στέψη ο K_t μειώνεται αισθητά και εντοπίζεται στο εύρος 0.55 με 0.75. Παρόμοια τάση διαπιστώνεται και για το μοντέλο SPB3.

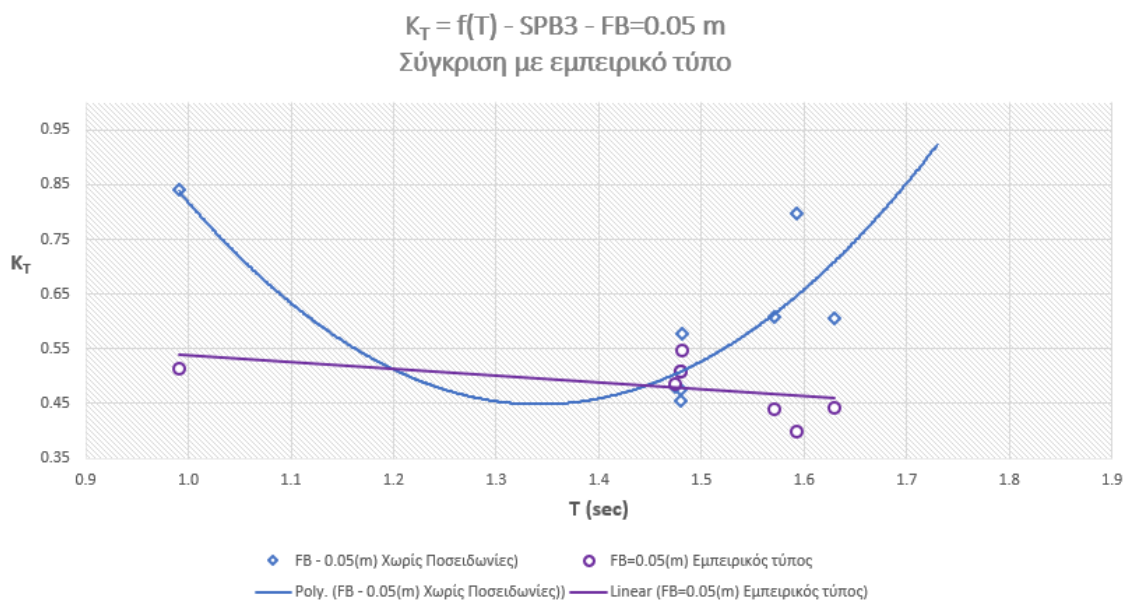
6.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων με εμπειρικό τύπο (Σαλιμίδης, 2015)

Σε αυτή την ενότητα, συγκρίνονται τα διαγράμματα του συντελεστή μετάδοσης K_t συναρτήσει της περιόδου T , και της καμπυλότητας του κύματος $H_i/(T^2g)$, με ένα εμπειρικό τύπο (Σαλιμίδης, 2015)[38], που αφορά διαπερατούς ύφαλους κυματοθραύστες. Αυτός ο τύπος έχει προκύψει με χρήση στατιστικής ανάλυσης μη-γραμμικής παλινδρόμησης, και είναι ο εξής[38]:

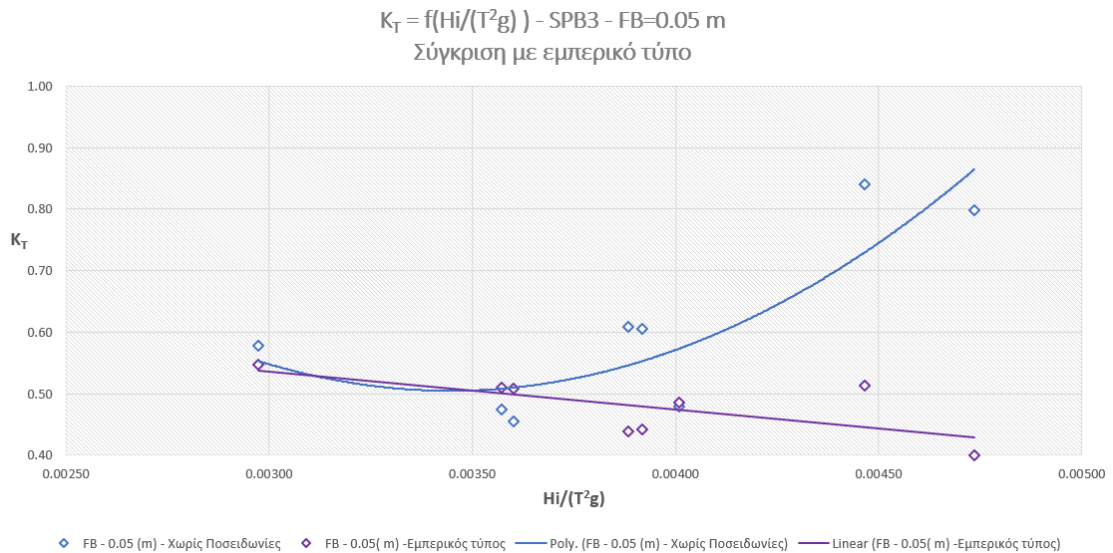
$$K_t = 0.2042 \ln \frac{F^2}{H_i h} - 0.2683 \frac{B}{L_i} + 2.5364n \quad (6.1)$$

όπου F το ελεύθερο ύψος από τη στέψη της κατασκευής (Free Board), H_i το εισερχόμενο κύμα, h το βάθος, B το πλάτος στέψης, L_i το μήκος κύματος του εισερχόμενου κύματος και n το πορώδες της κατασκευής.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν τη σύγκριση των μετρήσεων που αφορούν το μοντέλο SPB3 και στη συνέχεια αυτά που αφορούν το μοντέλο SPB4, χωρίς ποσειδωνία στην στέψη της κατασκευής.



Σχήμα 6.25. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB3 (FB=0.05m) και το εμπειρικό τύπο [38].



Σχήμα 6.26. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB3 (FB=0.05m) και το εμπειρικό τύπο [38].

Από τα παραπάνω δύο Σχήματα 6.25-26, που αφορούν το μοντέλο SPB3 και ελεύθερο ύψος από τη στέψη ίσο με 5 cm, συμπεραίνονται τα εξής:

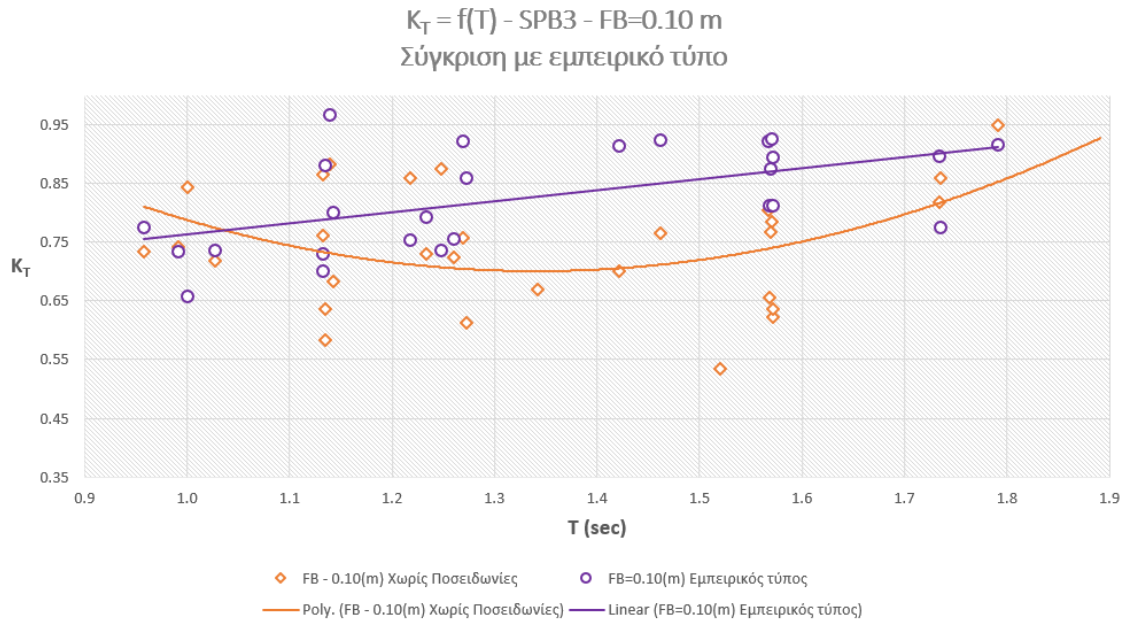
1. Για περίοδο κύματος $T \sim 1.5sec$ η αντιστοιχία των πειραματικών μετρήσεων με τις τιμές που προκύπτουν από το εμπειρικό μοντέλο έχουν πολύ καλή αντιστοιχία, ενώ για μικρότερες τιμές της περιόδου T ο εμπειρικός τύπος υπό-εκτιμά την τιμή του συντελεστή K_t .
2. Αντίστοιχα για τις μικρότερες τιμές καμπυλότητας φαίνεται ότι υπάρχει καλή αντιστοιχία μεταξύ του εμπειρικού τύπου και των μετρήσεων, αλλά από καμπυλότητα $H_i/(T^2g) > 0.004$, έχουν μετρηθεί μεγαλύτερες τιμές συντελεστή μετάδοσης K_t .

Πρέπει να τονιστεί ξανά, ότι για το μοντέλο SPB3 και ύψος στάθμης 0.55 m, το μέγεθος των πειραματικών δεδομένων είναι μικρό και έχει επιλεγεί να αυξάνεται η περίοδος ταυτόχρονα με το ύψος κύματος στα διάφορα κυματικά σενάρια και, επομένως, υπάρχουν πεδία ενδιαφέροντος που δεν έχουν καλυφθεί και ίσως μην μπορούν να βγουν με σιγουριά κάποια ασφαλή συμπεράσματα.

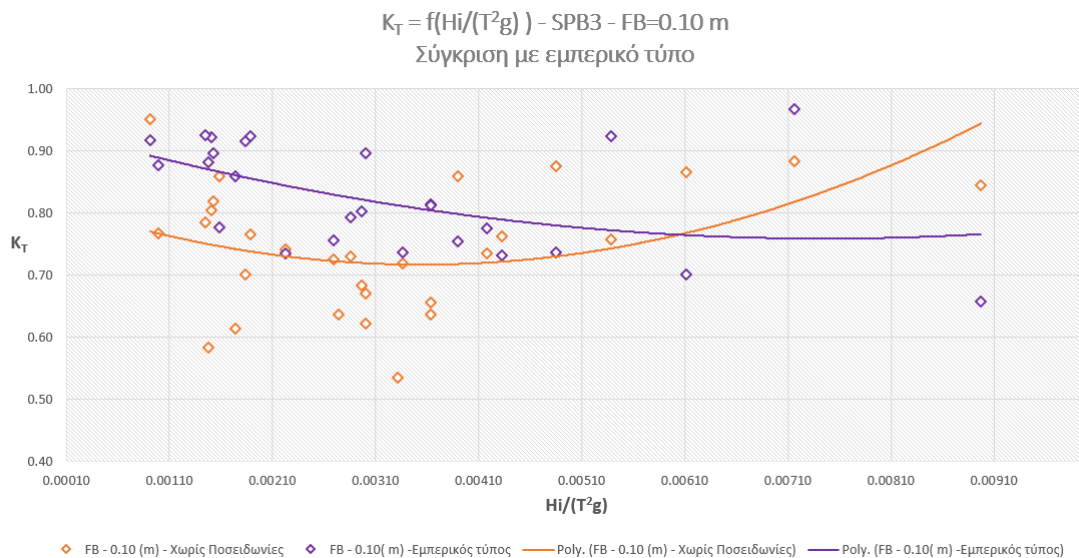
Στα επόμενα δύο διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων, που αφορούν το μοντέλο SPB3 όταν το ύψος ύδατος ήταν 0.60 m, και επομένως το ελεύθερο ύψος από τη στέψη ίσο με 10 cm. Από αυτά παρατηρείται ότι:

1. Υπάρχει γενικά πολύ καλή αντιστοιχία ανάμεσα στις μετρημένες και στις υπολογισμένες από τον εμπειρικό τύπο τιμές, αν και ο τύπος αυτός μας δίνει μια περίπου γραμμική αύξηση του συντελεστή K_t , όσο μεγαλώνει η περίοδος, αλλά όπως έχει ειπωθεί και παραπάνω, από τις μετρήσεις έχει παρατηρηθεί ότι οι ελάχιστες τιμές του K_t είναι για τιμές περιόδου κοντά στο $1.4 \sim 1.5sec$.
2. Αντίστοιχα, ο εμπειρικός τύπος υπερεκτιμά την τιμή του συντελεστή K_t για πολύ μικρές τιμές καμπυλότητας και τον υποεκτιμά για μεγάλες τιμές καμπυλότητας κύματος $H_i/(T^2g)$.

6. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης



Σχήμα 6.27. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB3 (FB=0.10m) και το εμπειρικό τύπο [38].



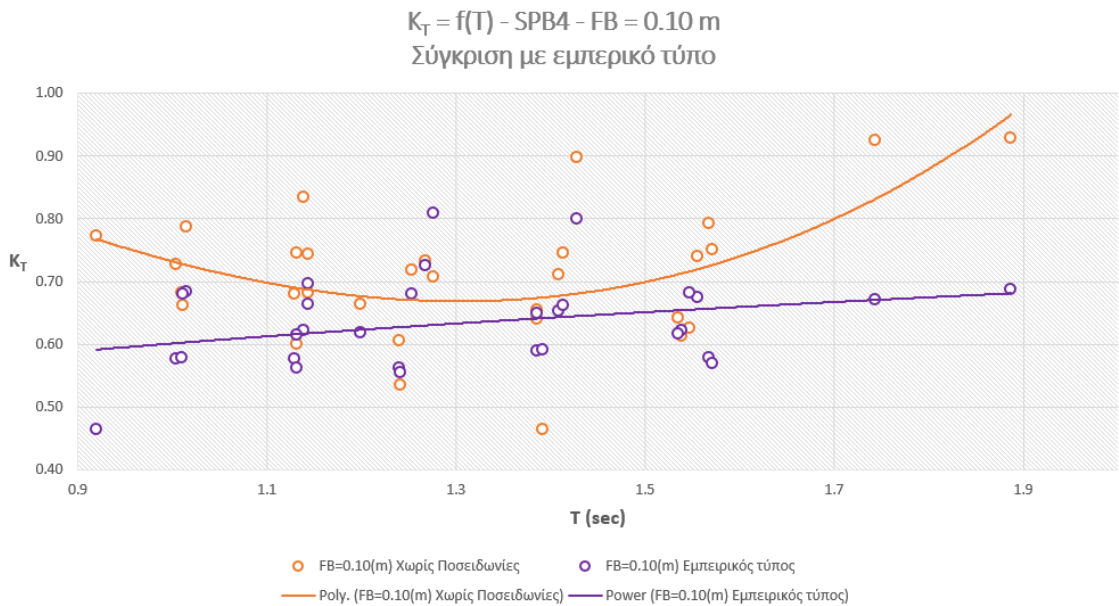
Σχήμα 6.28. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB3 (FB=0.10m) και το εμπειρικό τύπο [38].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν το μοντέλο SPB4, για τις δύο στάθμες ύδατος που έγιναν μετρήσεις, δηλαδή για 0.50 m και 0.60 m, οι οποίες αντιστοιχούν σε ελεύθερο ύψος από τη στέψη ίσο με 0.10 m και 0.20 m.

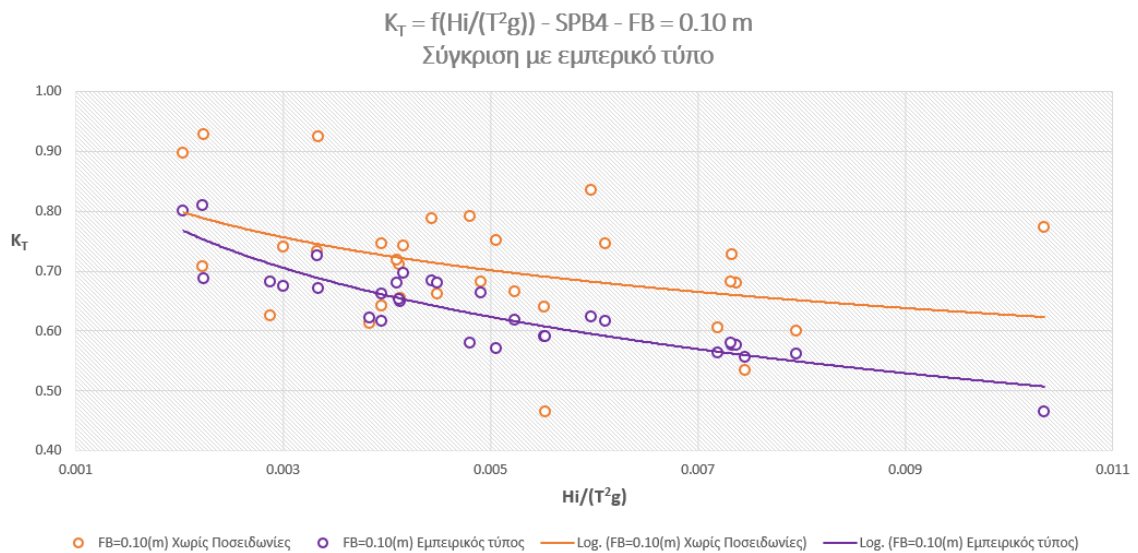
Από τα παρακάτω Σχήματα 6.29 και 6.30, φαίνεται ότι και γι αυτή την περίπτωση υπάρχει καλή αντιστοιχία μεταξύ των μετρημένων και των υπολογισμένων τιμών. Συγκεκριμένα:

1. Στις ενδιάμεσες συχνότητες ($1.1 < T < 1.6 \text{ sec}$), η αντιστοιχία είναι πάρα πολύ καλή.

2. Ο εμπειρικός τύπος δίνει πιο έντονη τάση μείωσης του K_t με αύξηση της καμπυλότητας του κύματος, σε σύγκριση με αυτή που μετρήθηκε.



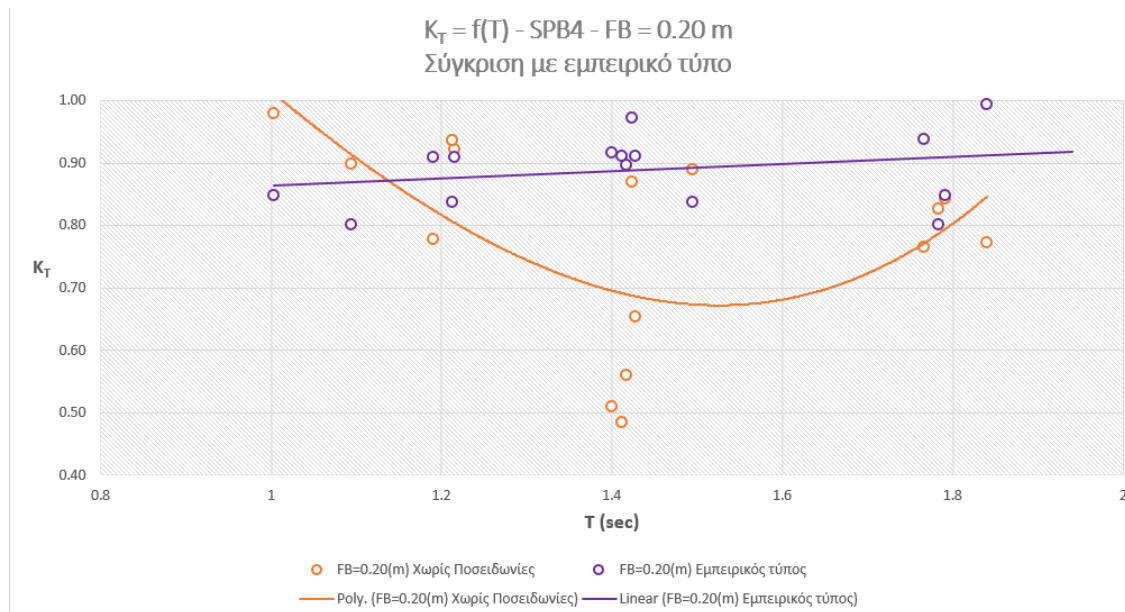
Σχήμα 6.29. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB4 (FB=0.10m) και το εμπειρικό τύπο [38].



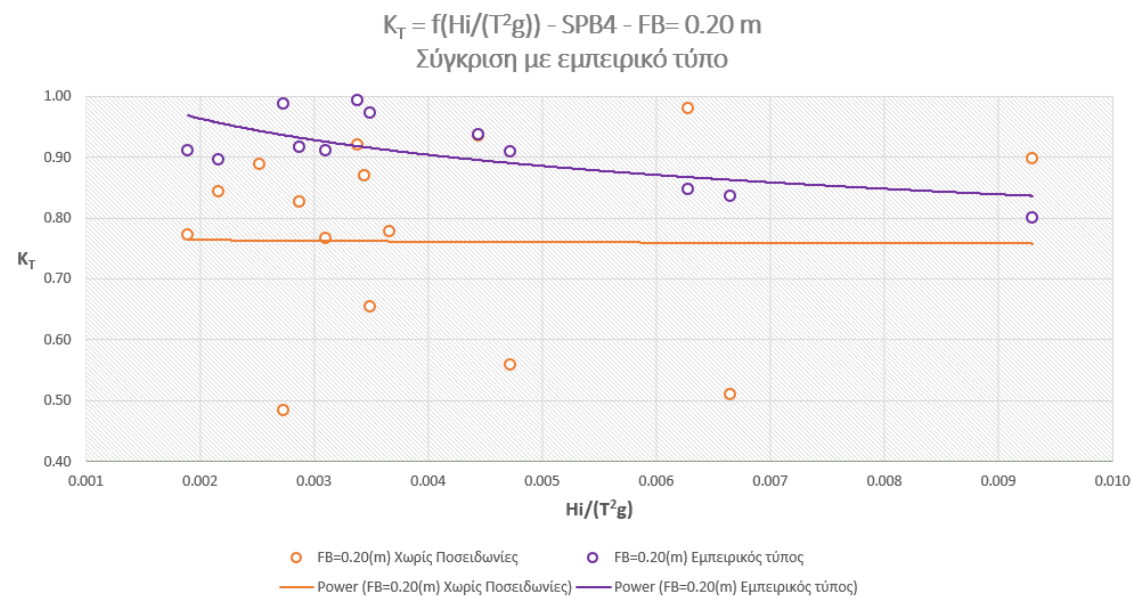
Σχήμα 6.30. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB4 (FB=0.10m) και το εμπειρικό τύπο [38].

Τέλος, παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα (Σχήματα 6.31-32), που αφορούν την περίπτωση του μοντέλου SPB4 με στάθμη ύδατος ίση με 0.60 m, και επομένως ελεύθερο ύψος ίσο με 20 cm.

6. Αποτελέσματα ανάλυσης χρονοσειρών ανυψώσης



Σχήμα 6.31. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την περίοδο του κύματος T για το μοντέλο SPB4 (FB=0.20m) και το εμπειρικό τύπο [38].



Σχήμα 6.32. Σύγκριση συντελεστή μετάδοσης K_t ως προς την καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$ για το μοντέλο SPB4 (FB=0.20m) και το εμπειρικό τύπο [38].

Και σε αυτή την περίπτωση φαίνεται ότι:

1. Ο εμπειρικός τύπος δεν συμβαδίζει με αυτό που υπολογίστηκε και σε αυτή την περίπτωση, ότι δηλαδή ο συντελεστής K_t αποκτά την ελάχιστη τιμή του για περίοδο $T \approx 1.4 \text{ sec}$, αν και δίνει παρόμοια αποτελέσματα με τις μετρημένες τιμές για μικρές περιόδους $T < 1.2 \text{ sec}$.

2. Ο εμπειρικός τύπος δίνει γενικά μεγαλύτερες τιμές συντελεστή μετάδοσης K_t για όλες σχεδόν τις τιμές καμπυλότητας κύματος, κάτι που πιθανόν οφείλεται στο ότι το ελεύθερο ύψος είναι μεγάλο συγκριτικά με το ύψος της κατασκευής και υποεκτιμά τον συντελεστή K_t σε σχέση με το τι προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις.

7 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των χρονοσειρών των πιέσεων, αλλά και από την ανάλυση των χρονοσειρών των ανυψώσεων της μέσης στάθμης. Τα συμπεράσματα αυτά θα παρουσιαστούν σε δυο ενότητες και στη συνέχεια θα προταθούν κάποιες ιδέες για περαιτέρω έρευνα.

7.1 Συμπεράσματα ανάλυσης χρονοσειρών πιέσεων

Στόχος αυτής της εργασίας είναι να γίνει μια αποτίμηση του μεγέθους της πίεσης και των διακυμάνσεων της, στο εσωτερικό των πόρων μιας διαπερατής κατασκευής, ώστε να μπορούν να αξιοποιηθούν από θαλάσσιους βιολόγους και να βγουν συμπεράσματα, για το αν αυτές οι κατασκευές μπορούν να λειτουργήσουν ως τεχνητοί οικότοποι, για διάφορους θαλάσσιους οργανισμούς και ψάρια.

Κάποια γενικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των πιέσεων και της διακύμανσής τους είναι τα εξής:

1. Η ανύψωση της μέσης στάθμης και όχι η περίοδος έχει πρωτεύοντα ρόλο για την τιμή της πίεσης, κάτι το οποίο είναι σημαντικό για την πρόβλεψη των τιμών της πίεσης στο εσωτερικό ενός βυθισμένου έργου στο φυσικό περιβάλλον. Αυτή η παρατήρηση συμβαδίζει και με τον κλασσικό ορισμό της Δυναμικής Πίεσης που εκφράζεται και στον τύπο 2.5, στην ενότητα 2.3 της παρούσας εργασίας.
2. Γενικά, οι μέσες (mean) και μέγιστες (max) τιμές της Δυναμικής Πίεσης είναι μειωμένες στην υπήνεμη θέση σε σχέση με την προσήνεμη, με τη μεγαλύτερη μείωση να εμφανίζεται για τα θραυόμενα κύματα. Συγκεκριμένα, για τα μη θραυόμενα κύματα η μείωση είναι γενικά της τάξης του 0 ~ 15%, ενώ για τα θραυόμενα είναι 15 ~ 50%. Μεγαλύτερη μείωση παρατηρείται στο μοντέλο SPB2, όπου το πλάτος στέψης της κατασκευής είναι μεγαλύτερο και επομένως η αλληλεπίδραση της κατασκευής με το κύμα και κατ' επέκταση η θραύση είναι πιο έντονη.
3. Όσο αφορά τις τυρβώδεις διακυμάνσεις παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο. Συγκεκριμένα, και για τα δύο μοντέλα (SPB1 και SPB2) οι τυρβώδεις-τυχαίες διακυμάνσεις της Δυναμικής Πίεσης, είναι μεγαλύτερες στην υπήνεμη θέση σε σύγκριση με την προσήνεμη, με τις μέγιστες τιμές να εμφανίζονται για τους θραυόμενους κυματισμούς, και πιο συγκεκριμένα όσο πιο έντονη η θραύση τόσο πιο έντονες οι τυρβώδεις διακυμάνσεις.
4. Τόσο οι μέσες (mean) όσο και οι μέγιστες (max) τυρβώδεις διακυμάνσεις της Δυναμικής Πίεσης εμφανίζουν τις μέγιστες τιμές τους για το μικρότερο ελεύθερο ύψος (Free Board) που εξετάστηκε, και είναι ίσο με 0.15 m, όταν δηλαδή η αλληλεπίδραση της κατασκευής με το διερχόμενο κύμα είναι πιο έντονη.
5. Για το μοντέλο SPB2 οι τυρβώδεις διακυμάνσεις είναι αρκετά αυξημένες και στην υπήνεμη και την προσήνεμη θέση μέτρησης σε σύγκριση με το μοντέλο SPB1. Αυτό

- μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο πλάτος στέφης της κατασκευής, που λόγω της αλληλεπίδρασης με τα κύματα, και κυρίως με αυτά με μεγάλο ύψος κύματος, παρατηρήθηκε πιο έντονο wave set-up στην προσήνεμη πλευρά και κατ' επέκταση πιο έντονη θραύση του κυματισμού, με σχηματισμό περισσότερων και μεγαλύτερων δινών.
6. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι οι τυχαίες διακυμάνσεις της Δυναμικής Πίεσης, είναι πολύ μικρές για τα πολύ μικρά κύματα, δεδομένου ότι οι μετρήσεις πάρθηκαν κοντά στον πυθμένα του καναλιού και επομένως η επιρροή του κύματος είναι η ελάχιστη. Για τα μικρά κύματα οι τυρβώδεις διακυμάνσεις είναι τόσο μικρές που προσεγγίζουν την τάξη μεγέθους του θορύβου του οργάνου, αλλά δεν είναι και κρίσιμες από άποψη μεγέθους για αυτό ακριβώς το λόγο.
 7. Οι τυρβώδεις διακυμάνσεις για τα μεγαλύτερα ύψη κύματος είναι πιο σημαντικές, ειδικά στις μετρήσεις που πάρθηκαν στην υπήνεμη θέση όπου συντελείται και θραύση. Συγκεκριμένα, εμφανίζονται διακυμάνσεις της πίεσης, που στην προσήνεμη θέση είναι σε μέγεθος περίπου 2 ~ 4% της μέσης δυναμικής πίεσης, ενώ στην υπήνεμη θέση είναι της τάξης του 3 ~ 8%.
 8. Τέλος, από τα φάσματα εύρους της Δυναμικής Πίεσης παρατηρήθηκε ότι η πρώτη (1^η) αρμονική είναι πάντα μεγαλύτερη στην προσήνεμη από ότι στην υπήνεμη θέση, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για τη δεύτερη (2^η) και τρίτη (3^η) αρμονική και που είναι πάντα μεγαλύτερες στην υπήνεμη θέση, λόγω μη-γραμμικού μετασχηματισμού του κύματος. Το πλάτος της 2^{ης} αρμονικής στην υπήνεμη πλευρά για τα θραυόμενα κύματα φτάνει να είναι 25 ~ 35% της 1^{ης}, ενώ στην προσήνεμη πλευρά για τα αντίστοιχα κύματα το πλάτος της 2^{ης} αρμονικής είναι 6 ~ 9% της 1^{ης}. Οι μετασχηματισμοί του κύματος είναι αρκετά έντονοι όταν συντελείται θραύση με αποτέλεσμα και η 3^η αρμονική να είναι περίπου 3 ~ 13% της 1^{ης}, ενώ στην προσήνεμη πλευρά το πλάτος της 3^{ης} αρμονικής είναι περίπου 1 ~ 3% της 1^{ης} (τα μεγάλα ποσοστά αφορούν κυρίως τα σενάρια 1-R4 και 2-R4, όπου έχουμε το μέγιστο κύμα ($Hi = 0.23m$) και $FB = 0.15m$).

7.2 Συμπεράσματα από ανάλυση χρονοσειρών ανυψώσεων

Ο έτερος στόχος αυτής της εργασίας είναι να αξιολογηθούν διάφορες γεωμετρικές διαπερατών βυθισμένων κυματοθραυστών μεγάλου πορώδους, ως προς την αποτελεσματικότητά τους να απομειώνουν την κυματική ενέργεια. Οι χρονοσειρές των ανυψώσεων αναλύθηκαν και διαμορφώθηκε σειρά διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 6, και τώρα παρουσιάζονται χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά.

Κάποια γενικά συμπεράσματα που ισχύουν σε μεγάλο βαθμό για όλες τις γεωμετρίες που εξετάστηκαν, είναι τα εξής:

1. Είναι φανερό ότι η περίοδος T είναι η πιο κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει το συντελεστή μετάδοσης K_T . Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε, κυρίως στα μοντέλα SPB3 και SPB4, ότι ο K_T ελαχιστοποιείται για ενδιάμεσες περιόδους, δηλαδή για περιόδους περίπου και ανά περίπτωση ανάμεσα σε 1.2 και 1.7 sec. Για τα μοντέλα SPB1 και SPB2 παρατηρήθηκε ότι αυξάνει σταθερά ο K_T όσο αυξάνει η περίοδος T , αλλά πρέπει να σημειωθεί ότι για αυτές τις δύο σειρές πειραμάτων είχε προγραμματιστεί να αυξάνει ταυτόχρονα και το ύψος κύματος Hi και η περίοδος T , και επομένως δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα για να υποστηρίξουμε με ασφάλεια ότι αυτή είναι η τάση.

2. Παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής K_T μειώνεται σταθερά όσο αυξάνει η καμπυλότητα του κύματος $H_i/(T^2g)$.
3. Το ύψος της ελεύθερης στάθμης (Free Board) είναι σημαντική, επίσης, παράμετρος και συγκεκριμένα υπολογίστηκαν μικρότεροι συντελεστές K_T για μικρότερο ελεύθερο ύψος, καθώς η αλληλεπίδραση του κύματος με την κατασκευή γίνεται πιο έντονη.
4. Οι ποσειδωνίες στη στέψη της κατασκευής βελτίωσαν τις μηχανικές ιδιότητες της κατασκευής, καθώς συνδράμουν στην απομείωση της ενέργειας του κύματος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι οι μικρότερες τιμές συντελεστή μετάδοσης υπολογίστηκαν στις περιπτώσεις με ποσειδωνίες στη στέψη της κατασκευής και είναι περίπου 0.45 για περίοδο κύματος $T \approx 1.3 \sim 1.4sec$. Γενικά, παρατηρείται ότι η μείωση του K_T είναι της τάξης του 10 ~ 15%, όταν έχουν τοποθετηθεί ποσειδωνίες στη στέψη του κυματοθραύστη.
5. Τέλος, το πλάτος στέψης είναι μια σημαντική παράμετρος. Συγκεκριμένα, αν και δεν υπάρχουν εκτενή δεδομένα για να συγκριθούν γεωμετρικές με σταθερές τις άλλες παραμέτρους και μόνο διαφορετικό πλάτος στέψης, φαίνεται πως οι γεωμετρίες με μεγαλύτερο πλάτος στέψης οδηγούν σε μικρότερους συντελεστές μετάδοσης K_T .

Τέλος, από τη σύγκριση με τον εμπειρικό τύπο φάνηκε ότι υπάρχει καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, αλλά αυτό το εμπειρικό μοντέλο δεν μπόρεσε να 'προβλέψει' τη μεγάλη μείωση του συντελεστή μετάδοσης στις ενδιάμεσες περιόδους κύματος $T \approx 1.3 \sim 1.5sec$, κάτι το οποίο αποτελεί αρκετά ενδιαφέρον εύρημα αυτής της πειραματικής έρευνας.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Το πεδίο της ανάλυσης της τύρβης των δυναμικών πιέσεων είναι ένα σχετικά ανεξερεύνητο πεδίο έρευνας και εμφανίζει πολλές προκλήσεις, λόγω κυρίως της ευαισθησίας των συγκεκριμένων οργάνων, που καθιστά το σωστό σχεδιασμό αυτών των πειραμάτων μια πρόκληση. Προκειμένου να γίνουν καλύτερα αντιληπτές οι τυχαίες/τυρβώδεις διακυμάνσεις της πίεσης, προτείνεται να σχεδιαστούν μετρήσεις πίεσης και των τριών συνιστωσών με κατάλληλη τοποθέτηση των πιεσόμετρων, ώστε να γίνει εφικτή η στατιστική επεξεργασία τους κατά Reynolds, στον τρισδιάστατο χώρο (x,y,z) και γενικά να σχεδιάζονται πειράματα με προσεκτική επιλογή της διάταξης και τοποθέτησης των οργάνων, που θα προσφέρουν μετρήσεις όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικές και αντιπροσωπευτικές της μέσης κατάστασης. Επίσης, προτείνεται να γίνει επεξεργασία των πιέσεων με ταυτόχρονη επεξεργασία των ανυψώσεων έτσι ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η φάση του κύματος στις χρονοσειρές των πιέσεων, και να γίνει πιο εύκολο να αφαιρεθούν επιδράσεις που οφείλονται σε ανακλάσεις εντός της διώρυγας μετρήσεων, αλλά και να αφαιρεθεί η επίδραση της μεταβολής της μέσης στάθμης.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε, παρατηρήθηκε ότι οι μικρότεροι συντελεστές μετάδοσης προκύπτουν για περιόδους $T \approx 1.3 \sim 1.4sec$. Αυτό, πιθανόν να οφείλεται στο πορώδες n της κατασκευής το οποίο δίνει τη δυνατότητα στο κύμα να ενεργεί εντός της, και επομένως προτείνεται να ερευνηθεί περαιτέρω για ποιες γεωμετρίες και ποιο πορώδες επέρχεται συντονισμός της κατασκευής με κύματα συγκεκριμένης περιόδου T . Τέλος, προτείνεται να συνεχιστεί η έρευνα της αποδοτικότητας των κυματοθραυστών με τοποθετημένες ποσειδωνίες στη στέψη τους, καθώς φαίνεται να βελτιώνουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητές τους.

Βιβλιογραφία

- [1] , Jensen, A., *Artificial reefs of Europe: perspective and future*, ICES Journal of Marine Science, Vol. 59, S3-S13pp, 2002.
- [2] , Χρ. Κονταξή, Κ. Μέμος, *Οι βυθισμένοι κυματοθραύστες ως τεχνητοί οικότοποι για τους οργανισμούς *Mytilus galloprovincialis* (ΜΥΔΙ) and *Strongylocentrotus nudus* (ΑΧΙΝΟΣ)*, Πανελλήνιο Συνέδριο Λιμενικών Έργων, 331-342, 2005.
- [3] , Jensen, A.C., Hamer, B.A. and J.F. Wickins, *Ecological implications of developing coastal protection structures*, Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers, London, UK, Institution of Civil Engineers, Thomas Telford, 70-81p, 1998.
- [4] , Ελπιδοφόρος-Ευγένιος Γ. Ρεπούσης, *Διερεύνηση υδροδυναμικού πεδίου σε ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., 2016.
- [5] , Νικόλαος Διπλαράκος, *Τυρβώδη μεγέθη σε ύφαλους διαπερατούς κυματοθραύστες*, Μεταπτυχιακή Εργασία, Ε.Μ.Π., 2017.
- [6] , Eckman, J.E. and D.O. Duggins, *Effects of flow speed on growth of Benthic Suspension Feeders*, Biological Bulletin, Vol. 185, 28-41p, 1993.
- [7] , Tanner JE, Theil MJ, *Adelaide Seagrass Rehabilitation Project: 2014-2016*, SARDI Publication No. F2009/000210-2. SARDI Research Report Series No. 914. 43pp., South Australian Research and Development Institute (Aquatic Sciences), Adelaide, 2016.
- [8] , Van Gent, M. R. A. *Wave Interaction with Permeable Coastal Structures*, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, 1995.
- [9] , Losada, I.J., Losada, M.A., Martin, A., *Experimental study of wave-induced flow in a porous structure*, Coastal Engineering, 26(1-2), 77-98.
- [10] , Chan, H.C., Leu, G.M., Lai, C.J., *Velocity and turbulence field around permeable structure: Comparisons between laboratory and numerical experiments*, J. Hydraulic Research, 45(2), 216-226, 2007.
- [11] , Bjarne Jensen, Erik D. Christensen, B. Multu Sumer, and Martin Vistisen, *Flow and Turbulence at Rubble-Mound breakwater armor layers under solitary wave*, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 04015006-1 - 14, 2015.
- [12] , Clemente Cantelmo, William Allsop and Scott Dunn, *Wave pressures in and under rubble mound breakwaters*, Fifth International Conference on Scour and Erosion, HR Wallingford, 2010.
- [13] , Goda, Y., Takeda, H., and Moriya, Y., *Laboratory investigation on wave transmission over breakwater*, Report of Port and Harbor Institute, No. 3, pp. 3-32, 1967

- [14] , Liberatore, G., and Petti, M., *Wave transformations over a submerged bar: Experiments and theoretical interpretations*, Proc. of the 23rd Conference Coastal Engineering (ICCE), Venice, pp. 447-459, ASCE, New York, 1992.
- [15] , Van der Meer, J. W., and Daemen, I. F., *Stability and wave transmission at low crested rubble mound structure*, Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering, 1, pp. 1–19, 1994.
- [16] , Seabrook, S. R., and Hall, K. R., *Wave transmission at submerged rubblemound breakwaters*, Proc. 26th Int. Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 2000–2013, 1998.
- [17] , Stuart R. Seabrook, Kevin R. Hall, *Wave Transmission at Submerged Rubblemound Breakwaters*, Coastal Engineering Proceedings; No 26 (1998): Proceedings of 26th Conference on Coastal Engineering, Copenhagen, Denmark, 1998.
- [18] , Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, *Coastal Processes with engineering applications*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2004.
- [19] , Battjes, J.A., *Surf Similarity*, Proc. 14th Intl. Conf. Coastal Eng., ASCE, Copenhagen, 466-480, 1974.
- [20] , Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific Publishing CO, Pte, Ltd, Singapore, 1998..
- [21] , David C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, Third Ed., DCW Industries Inc, California, USA, 2006.
- [22] , Hinje, J.O., *Turbulence*, Second Ed., McGraw-hill, New York, NY, 1975.
- [23] , B. Mutlu Sumer, *Lecture Notes on Tutbulence*, DTU, DTU Mekanik, Section for Fluid Mechanics, Coastal and Maritime Engineering, Revised 2013.
- [24] , Taylor, D. I., *Statistical Theory of Turbulence*, Proc. R. Soc, Lond., Vol. A151, p.421.
- [25] , W. K. George, P. D. Beuther, R. E. A. Arndt, *Pressure Spectra in Turbulent Free Shear Flows*, Journal of Fluid Mechanics, pp 155-191, Nov. 1984.
- [26] , Novak, P., Cabelka, J., *Models in hydraulic engineering*, Pitman, Boston, 1981.
- [27] , Hughes, S.A., *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*, World Scientific, London, 1993.
- [28] , Valentin Heller (IAHR Member), Research Fellow, *Scale effects in physical hydraulic engineering models*, School of Civil Engineering and the Environment, University of Southampton, Highfield, UK, 2011.
- [29] , Yalin, M.S., *Theory of hydraulic models*, Manmillan, London, 1971.
- [30] , Kobus, H., ed., *Hydraulic modelling*, German association for water resources and land improvement, Bulletin 7. Parey, Hamburg, 1980.
- [31] , Kobus, H., ed., *Scale effects in modelling hydraulic structures*, 0(3),1-5. H. Rouse, ed. Technische Akademie, Esslingen, 1984.

-
- [32] , Κουτίτας Χριστόφορος, *Εισαγωγή στη Παράκτια Τεχνική και τα Λιμενικά Έργα*, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1994.
- [33] , Sophocles J. Orfanidis, *Introduction to Signal Processing*, Prentice Hall Inc, Rutgers University, 2010.
- [34] , William H. Press, Saul A. Teulkosky, *Savitzky-Golay Smoothing Filters*, American Institute of Physics, 669-672, 1990.
- [35] , A. Svendsen, *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*, World Scientific, 2005.
- [36] , Michael E. McCormick, *Ocean Engineering Mechanics with applications*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2010.
- [37] , Leo H. Holthuijsen, *Wave in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 2007.
- [38] , Σαλμίδης Νικόλαος, *Κυματική μετάδοση πίσω από ύφαλους κυματοθραύστες*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., 2015.

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Διεπιστημονικό -Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Ηρώων Πολυτεχνείου 5, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

15780, Αθήνα

devel.postgra.hydro.ntua.gr

Τηλ: (+30) 210 772 2325

Φαξ: (+30) 210 772 2847

E-mail: postgrad@hydro.ntua.gr