ΕΝΟΤΗΤΑ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 4. Εργαστηριακά πειράματα σχετικά με λοξή διάδοση κυμάτων και θραύση.

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διάδοση και η θραύση τόσο μονοχρωματικών, όσο και φασματικών κυματισμών αποτέλεσαν και συνεχίζουν να αποτελούν το αντικείμενο μελέτης μιας πληθώρας ερευνητικών εργασιών, καθώς η ροή που αναπτύσσεται λόγω αυτών των μηχανισμών, τόσο στην παράκτια ζώνη, όσο και στην ζώνη απόσβεσης, επιδρά σημαντικά στην ευστάθεια πληθώρας λιμενικών - παράκτιων έργων, καθώς και στην παράλληλη και εγκάρσια στην ακτογραμμή μεταφορά ιζήματος.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε μια σειρά από πειραματικές μετρήσεις της ροής που αναπτύσσεται από την διάδοση και θραύση τόσο μονοχρωματικών, όσο και φασματικών κυματισμών, υπεράνω πυθμένων διαφορετικής κλίσης και τραχύτητας, και πιο συγκεκριμένα υπεράνω ενός τραχέως πυθμένα απότομης κλίσης 1/3 και ενός λείου πυθμένα ήπιας κλίσης 1/15. Τα αποτελέσματα μας περιλαμβάνουν λεπτομερείς μετρήσεις του πεδίου της ταχύτητας με χρήση των μεθοδολογιών Particle Image Velocimetry (PIV) και Acoustic Doppler Velocimetry (ADV), καθώς και χρονοσειρές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας. Οι μετρήσεις αξιοποιήθηκαν περαιτέρω για την εξαγωγή μέσων, ως προς την περίοδο και την φάση του διαδιδόμενου κυματισμού, τιμών των στατιστικών ποσοτήτων της ροής, καθώς και για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την τύρβη.

4.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Οι πειραματικές μετρήσεις της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν στην δεξαμενή κυμάτων του Εργαστηρίου Υδραυλικής Μηχανικής με διαστάσεις μήκους 12 m, πλάτους 7 m και βάθους νερού 1 m. Οι κυματισμοί δημιουργήθηκαν από κυματογεννήτρια τύπου αναδευτήρα (paddle wavemaker), η οποία είναι εξοπλισμένη με σύστημα ενεργής απορρόφησης των ανακλώμενων κυματισμών (Active Wave Absorption System) (Εικόνα 4.1).

Η καταγραφή του πεδίου των ταχυτήτων με χρήση της μεθοδολογίας PIV έγινε χρησιμοποιώντας μια υποβρύχια διάταξη PIV. Η διάταξη PIV αποτελείται από ένα laser διπλού παλμού τύπου Nd:YAG (Neodymium-doped: Yttrium Aluminium Garnet), μια υποβρύχια διάταξη οπτικών φακών για την δημιουργία φύλλου φωτός, και μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή υψηλής ταχύτητας τύπου CCD (Charged-Coupled Device) (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.1. Κυματογεννήτρια τύπου αναδευτήρα



Εικόνα 4.2. (α) Κεφαλή laser, (β) Τροφοδοτικό laser, (γ) Υποβρύχια διάταξη οπτικών φακών και (δ) Υποβρύχια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή συστήματος PIV.

Η ρύθμιση της λειτουργίας τόσο του laser, όσο και της φωτογραφικής μηχανής (π.χ. χρονική απόσταση διαδοχικών παλμών, μήκος εστίασης, άνοιγμα διαφράγματος κ.τ.λ.) γίνεται μέσω του εμπορικού κώδικα DaVis 8.1 (LaVision, 2011). Για την οπτικοποίηση της ροής χρησιμοποιήθηκαν κοίλες γυάλινες σφαίρες με μέση διάμετρο ίση με 10 μm και πυκνότητα της τάξης των 1.1g/cc.

Η καταγραφή του πεδίου των ταχυτήτων με χρήση της μεθοδολογίας ADV έγινε χρησιμοποιώντας την διάταξη 16-MHz MicroADV Probe της εταιρείας SonTek/YSI, η οποία είναι εφοδιασμένη με τέσσερις ακουστικούς αισθητήρες, έναν πομπό και τρεις δέκτες (Εικόνα 4.4). Ο όγκος στον οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση της χρονοσειράς της ταχύτητας είναι κυλινδρικός και ίσος με 0,3 cm³, και βρίσκεται σε απόσταση ίση με 5 cm από τον ακουστικό αισθητήρα που λειτουργεί ως πομπός (SonTek/YSI, 2002).



Εικόνα 4.3. Διάταξη 16-MHz Micro ADV Probe της εταιρίας SonTek/ YSI.

4.2.1 Εργαστηριακό ομοίωμα τραχέως πυθμένα απότομης κλίσης

Το εργαστηριακό ομοίωμα του πυθμένα απότομης κλίσης 1/3 κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας ένα ανοξείδωτο μεταλλικό πλαίσιο, το οποίο ήταν επενδυμένο με ένα φύλλο ανοξείδωτης λαμαρίνας, πάνω στο οποίο τοποθετήθηκαν δύο σειρές από ογκολίθους μέσου βάρους $W_{50} = 0,925$ N, ειδικού βάρους S = 2,72, ισοδύναμης κατά όγκο διαμέτρου κόκκου $D_{n50} = 3,25$ cm και μέσης διαμέτρου κόκκου $D_{50} = 4,4$ cm (Εικόνα 4.5). Το εργαστηριακό ομοίωμα του τραχέως πυθμένα απότομης κλίσης τοποθετήθηκε μέσα στην δεξαμενή κυματισμών, απέναντι από την κυματογεννήτρια και σε απόσταση 7,3 m από αυτήν. Το αδιατάρακτο βάθος στην περιοχή μεταξύ της κυματογεννήτριας και του πόδα του εργαστηριακού ομοιώματος ήταν ίσο με h = 1 m.



Εικόνα 4.4. Εργαστηριακό ομοίωμα τραχύ πυθμένα απότομης κλίσης 1/3.

4.2.2 Εργαστηριακό ομοίωμα λείου πυθμένα ήπιας κλίσης

Το εργαστηριακό ομοίωμα του λείου πυθμένα ήπιας κλίσης 1/15 κατασκευάστηκε από δικτυώματα, τα οποία αποτελούνται από γραμμικά προφίλ ανοδιωμένου αλουμινίου και τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με εγκάρσιες δοκούς αλουμινίου, ενώ καλύπτονται από ανοξείδωτη λαμαρίνα αλουμινίου. Οι τελικές διαστάσεις του ομοιώματος ήταν 9 m μήκος και 4 m πλάτος (Εικόνα 4.6).

Μια σειρά από εργαστηριακές δοκιμές διαφορετικών περιπτώσεων μονοχρωματικών κυματισμών ανέδειξαν προβλήματα ανακλάσεων από τα τοιχώματα της δεξαμενής κυματισμών. Για το λόγο αυτό, σε δεύτερη φάση, το εργαστηριακό ομοίωμα βελτιώθηκε με την τοποθέτηση πλευρικών κατακόρυφων τοιχωμάτων στα όρια του ομοιώματος, και με την κατασκευή απορροφητικών πρανών ογκολίθων εκατέρωθεν του εργαστηριακού ομοιώματος (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.5: Εργαστηριακό ομοίωμα λείου πυθμένα ήπιας κλίσης 1/15.



Εικόνα 4.6: Βελτίωση του φυσικού ομοιώματος με χρήση κατακόρυφων πλευρικών τοιχωμάτων (αριστερά) και απορροφητικών πρανών ογκολίθων (δεξιά).

4.2.3 Εργαστηριακό ομοίωμα πυθμένα τύπου Larson

Προκειμένου να εξεταστεί η ροή που αναπτύσσεται από την διάδοση κυμάτων υπεράνω ακτής με διατομή πυθμένα που ακολουθεί την θεωρητική κατανομή μορφολογίας πυθμένα που πρότεινε ο Larson (1988), το εργαστηριακό ομοίωμα λείου πυθμένα που περιγράφτηκε στην ενότητα 4.2.2 μετασχηματίστηκε κατάλληλα με χρήση ειδικών κατασκευών από διογκωμένη πολυστερίνη (φελιζόλ). Η τελική διαμόρφωση του ομοιώματος περιελάμβανε κλίση πυθμένα ίση με 1/15 στα βαθύτερα ύδατα (πλησίον της κυματογεννήτριας), και κλίση πυθμένα ίση με 1/12 στην ακτογραμμή (Εικόνα 4.8.α,4.8.β,4.8.γ).



Εικόνα 4.7.α: Εργαστηριακό ομοίωμα πυθμένα τύπου Larson.



Εικόνα 4.7.β: Εργαστηριακό ομοίωμα πυθμένα τύπου Larson.



Εικόνα 4.7. γ: Εργαστηριακό ομοίωμα πυθμένα τύπου Larson.

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ

4.3.1 Εργαστηριακό ομοίωμα τραχέως πυθμένα απότομης κλίσης

Στην περίπτωση του τραχέως πυθμένα απότομης κλίσης, τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις κυματισμών μελετήθηκαν. Οι δύο περιπτώσεις περιελάμβαναν μονοχρωματικούς κυματισμούς με περίοδο κύματος T = 1,134 s και ύψη κύματος H =0,04 m και 0,08 m, αντίστοιχα, ενώ σε δεύτερη φάση εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις κυματισμών. πραγματικών (φασματικών) Οı πραγματικοί κυματισμοί δημιουργήθηκαν με χρήση ενός φάσματος JONSWAP με περίοδο κορυφής ίση με T_p = 1,134 s και χαρακτηριστικά ύψη κύματος $H_s = 0,04$ m 0,08 m. Σε όλες τις εξετασθείσες περιπτώσεις, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε τρεις διαφορετικές θέσεις του ομοιώματος, βάθους 150 mm, 200 mm και 250 mm, αντίστοιχα. Στο εργαστηριακό ομοίωμα του τραγύ πυθμένα, οι καταγραφές των ταχυτήτων έγιναν με γρήση μόνο της μεθοδολογίας PIV. ενώ πραγματοποιήθηκαν και καταγραφές της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας.

4.3.2 Εργαστηριακό ομοίωμα λείου πυθμένα ήπιας κλίσης

Στην περίπτωση του λείου πυθμένα ήπιας κλίσης, εξετάστηκαν μια σειρά από διαφορετικές περιπτώσεις μονοχρωματικών κυματισμών με ύψη κύματος H που κυμαίνονταν από 0,08 m έως 0,12 m και περιόδους κύματος T από 1 έως 2 s. Σε κάθε περίπτωση η ταχύτητα της ροής μετρήθηκε σε διάφορα βάθη, πριν και μετά την θέση θραύσης των επερχόμενων κυματισμών, με χρήση τόσο της μεθοδολογίας ADV, ενώ πραγματοποιήθηκαν και καταγραφές της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας σε διάφορες θέσεις του ομοιώματος.

4.3.3 Εργαστηριακό ομοίωμα λείου πυθμένα τύπου Larson

Στην περίπτωση του λείου πυθμένα τύπου Larson, εξετάστηκαν μια σειρά από διαφορετικές περιπτώσεις μονοχρωματικών κυματισμών με ύψη κύματος H που κυμαίνονταν από 0,08 m έως 0,12 m και περιόδους κύματος T από 1 έως 2 s. Σε κάθε περίπτωση η ταχύτητα της ροής μετρήθηκε σε διάφορα βάθη, πριν και μετά την θέση θραύσης των επερχόμενων κυματισμών, με χρήση τόσο της μεθοδολογίας ADV, ενώ πραγματοποιήθηκαν και καταγραφές της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας σε διάφορες θέσεις του ομοιώματος.

4.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία PIV για την μέτρηση των ταχυτήτων της υπό μελέτη ροής, τόσο η καταγραφή, όσο και η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση του εμπορικού κώδικα DaVis 8.1, ο οποίος αναπτύχθηκε από την LaVision (2011). Ο υπολογισμός των στιγμιαίων ταχυτήτων έγινε προσδιορίζοντας τη μετατόπιση των σωματιδίων ετεροσυσχετίζοντας δυο διαδοχικά φωτογραφικά στιγμιότυπα (two-frame cross correlation). Η χρονική υστέρηση μεταξύ των δυο διαδοχικά καταγραφέντων φωτογραφικών στιγμιότυπων (frames) ήταν συγκεκριμένη και γνωστή για κάθε περίπτωση που εξετάσαμε. Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό των ταχυτήτων αποτελούνταν από κελιά (interrogation windows) συνολικού εμβαδού ίσου με 24 x24 pixels², τα οποία αλληλεπικαλύπτονταν κατά 50%.

Στις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία ADV για την μέτρηση των ταχυτήτων της υπό μελέτη ροής, η καταγραφή, καθώς και ένα μέρος της ανάλυσης των αποτελεσμάτων έγινε με χρήση των προγραμμάτων HorizonADV (SonTek/YSI, 2002) και WinADV (Wahl, T., 2002), αντίστοιχα.

4.5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.5.1 Εργαστηριακό ομοίωμα τραχέως πυθμένα απότομης κλίσης

Για το εργαστηριακό ομοίωμα του τραχύ πυθμένα απότομης κλίσης αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα στιγμιαία πεδία των ταχυτήτων που καταγράφηκαν με την μεθοδολογία PIV, και από αυτά εξήχθησαν οι μέσες, ως προς την περίοδο και ως προς την φάση, τιμές των στατιστικών ποσοτήτων της ταχύτητας και της τύρβης. Στο Σχ. 4.1 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές των ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας για 8 διαδοχικά κύματα όπως αυτές μετρήθηκαν από τα πειραματικά σενάρια των μονοχρωματικών κυματισμών που εξετάσαμε, σε απόσταση 4,9 m από την κυματογεννήτρια.



Σχήμα 4.1: Χρονοσειρές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για 8 διαδοχικά κύματα με περίοδο κύματος T = 1,134 sec και ύψη κύματος ίσα με H = 0,04 m (αριστερά) και H = 0,08 m (δεξιά) αντίστοιχα.

Προκειμένου να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι στατιστικές ποσότητες της ροής που εξετάζεται, ελέγχεται η επαναληψιμότητα των κυματικών συνθηκών εντός της δεξαμενής κυματισμών μέσω του εμπορικού κώδικα Wave Synthesizer - Crossing Analysis Module (DHI, 2005). Για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με ύψος κύματος H = 0,08 m και περίοδο T = 1,134 sec, οι r.m.s. αποκλίσεις των υψών και των περιόδων κύματος προέκυψαν ίσες με 2,6% και 1%, αντίστοιχα, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για μονοχρωματικό κυματισμό με ύψος κύματος H = 0,04 m και περίοδο T = 1,134 sec ήταν ακόμα μικρότερες. Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε με ασφάλεια ότι οι κυματικές συνθήκες εντός της δεξαμενής κυματισμών παρουσιάζουν αρκετά καλή επαναληψιμότητα.

Για λόγους καλύτερης εποπτείας τα πειραματικά σενάρια που εξετάσαμε στην περίπτωση του εργαστηριακού ομοιώματος τραχύ πυθμένα απότομης κλίσης συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Αρ.	Θέση	Βάθος	Τύπος	Ύψος		Περίοδος	
Σεναρίου	Μέτρησης	Νερού	Κύματος	Κύματος		Κύματος	
		<i>d</i> (m)		Η	$H_{S}(\mathbf{m})$	<i>T</i> (s)	$T_P(s)$
				(m)			
1	FOV 1	0.125	R	0.04	-	1.134	-
2	FOV 1	0.125	R	0.08	-	1.134	-
3	FOV 2	0.175	R	0.04	-	1.134	-
4	FOV 2	0.175	R	0.08	-	1.134	-
5	FOV 3	0.225	R	0.04	-	1.134	-
6	FOV 3	0.225	R	0.08	-	1.134	-
7	FOV 1	0.125	Ι	-	0.04	-	1.194
8	FOV 1	0.125	Ι	-	0.08	-	1.194
9	FOV 2	0.175	Ι	-	0.04	-	1.194
10	FOV 2	0.175	Ι	-	0.08	-	1.194
11	FOV 3	0.225	Ι	-	0.04	-	1.194
12	FOV 3	0.225	Ι	-	0.08	-	1.194

Πίνακας 4.1: Πειραματικά σενάρια για την περίπτωση του ομοιώματος τραχέως πυθμένα απότομης κλίσης

13	FOV 4	0.150	R	0.08	-	1.134	-	
----	-------	-------	---	------	---	-------	---	--

Στο Σχ. 4.2 παρουσιάζονται τα κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας για τα πειραματικά σενάρια των μονοχρωματικών κυμάτων που εξετάσαμε. Στα αποτελέσματα αυτά αποτυπώνεται ξεκάθαρα η ύπαρξη ενός ισχυρού κυματογενούς ρεύματος με κατεύθυνση προς τα βαθιά. Στην πιο ρηχή θέση μέτρησης (Test 1 και 2) το κυματογενές ρεύμα εξαρτάται γραμμικά από το βάθος, ενώ η μέγιστη τιμή του είναι ίση περίπου με $0,9 \cdot U_0$, χωρίς ιδιαίτερες διαφορές ανάμεσα στα κύματα με ύψος H = 0,04 m και H = 0,08 m. Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι η U_0 είναι η ταχύτητα της ροής στα βαθιά και δίνεται από την σχέση:

$$U_0 = \frac{\pi H_0}{T} \tag{4.1}$$

Στις βαθύτερες θέσεις μέτρησης το κυματογενές ρεύμα εξαρτάται γραμμικά από το βάθος σε όλο το ύψος της υδάτινης στήλης για την περίπτωση μονοχρωματικού κύματος με ύψος H = 0,08 m και περίοδο T = 1,134 sec (Test 4 και 6). Για την περίπτωση μονοχρωματικού κύματος με ύψος H = 0,04 m και περίοδο T = 1,134 sec (Test 3 και 5) το κυματογενές ρεύμα εμφανίζει γραμμική κατανομή σε σχέση με το βάθος μέχρι ενός συγκεκριμένου σημείου και παραμένει αμετάβλητο από εκεί και μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια. Στην βαθύτερη θέση μέτρησης, η τραχιά γεωμετρία του πυθμένα ευνοεί την δημιουργία κυματογενούς ρεύματος οριακού στρώματος (streaming) με κατεύθυνση προς τα ρηχά.



Σχήμα 4.2: Κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με περίοδο κύματος T = 1,134 sec και ύψη κύματος H = 0,04 m (αριστερή στήλη) και H = 0,08 m (δεξιά στήλη), σε βάθη d = 0,125 m (Test 1 και 2), d = 0,175 m (Test 3 και 4) και d = 0,225 m (Test 5 και 6).

Στο Σχ. 4.3 παρουσιάζεται ένα τμήμα των χρονοσειρών των ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας όπως αυτές μετρήθηκαν από τα πειραματικά σενάρια των φασματικών κυματισμών που εξετάσαμε.



Σχήμα 4.3: Χρονοσειρές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για φασματικούς κυματισμούς με περίοδο κορυφής $T_p = 1,194$ sec και χαρακτηριστικά ύψη κύματος ίσα με $H_s = 0,04$ m (αριστερά) και $H_s = 0,08$ m (δεξιά) αντίστοιχα.

Στο Σχ. 4.4 παρουσιάζονται τα κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας για τα πειραματικά σενάρια των φασματικών κυμάτων που εξετάσαμε. Όπως και στα αποτελέσματα των μονοχρωματικών κυματισμών, έτσι και εδώ αποτυπώνεται ξεκάθαρα η ύπαρξη ενός ισχυρού κυματογενούς ρεύματος με κατεύθυνση προς τα βαθιά, ωστόσο μικρότερου σε μέγεθος (σχεδόν 50% μικρότερο) από εκείνο που παρατηρήθηκε στους μονοχρωματικούς κυματισμούς, το οποίο επίσης εμφανίζει μια γραμμική κατανομή σε σχέση με το βάθος.

Όσον αφορά τις μέσες ως προς την φάση του κύματος τιμές του πεδίου των ταχυτήτων, αυτές είναι δυνατόν να εξαχθούν μόνο για τις πειραματικά σενάρια των μονοχρωματικών κυματισμών. Στο Σχ. 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται τα μέσα ως προς την φάση του κύματος πεδία της ταχύτητας κάτω από το επίπεδο της κοιλίας και για το διάστημα μιας περιόδου, για το πειραματικό σενάριο μονοχρωματικού κυματισμόν με περίοδο T = 1,134 sec και ύψος H = 0,08 m, σε βάθη d =0,125 m d= 0,175 m, αντίστοιχα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η διέλευση της κοιλίας του κύματος διαρκεί περισσότερο από την διέλευση της κορυφής αυτού, σε διάστημα μιας περιόδου, ενώ και οι αντίστοιχες ταχύτητες - κατά την διέλευση της κοιλίας του κύματος διαρκεί περισσότερο από την διέλευση της κορυφής αυτού, σε διάστημα μιας περιόδου, ενώ και οι αντίστοιχες ταχύτητες - κατά την διέλευση της κοιλίας του κύματος μικρότερο από αυτό της διαμήκους ταχύτητας, ενώ και οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας, ενώ και οι δύο συνιστώσες της ταχύτητας γίνεται πιο ημιτονοειδής σε σχέση με την φάση, ενώ και οι δύο συνιστώσες μειώνονται ανάλογα με το βάθος.



Σχήμα 4.4: Κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας για την περίπτωση φασματικού κυματισμού με περίοδο κύματος T = 1,194 sec και χαρακτηριστικά ύψη κύματος H = 0,04 m (αριστερή στήλη) και H = 0,08 m (δεξιά στήλη), σε βάθη d = 0,125 m (Test 7 και 8), d = 0,175 m (Test 9 και 10) και d = 0,225 m (Test 11 και 12).



Σχήμα 4.5: Κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την φάση του κύματος ταχύτητας, κάτω από το επίπεδο της κοιλίας (z = 0 είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας) κατά την διάρκεια μιας περιόδου, μονοχρωματικού κύματος με περίοδο T = 1,134 sec και ύψος H = 0,08 m, στην θέση μέτρησης με βάθος d = 0,125 m.



Σχήμα 4.6: Κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την φάση του κύματος ταχύτητας, κάτω από το επίπεδο της κοιλίας (z = 0 είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας) κατά την διάρκεια μιας περιόδου, μονοχρωματικού κύματος με περίοδο T = 1,134 sec και ύψος H = 0,08 m, στην θέση μέτρησης με βάθος d = 0,175 m.

Για τα πειραματικά σενάρια των μονοχρωματικών κυματισμών, εκτός από τις μέσες, ως προς την περίοδο και ως προς την φάση, τιμές της ροής, εξετάστηκε και η συμπεριφορά των τυρβωδών διακυμάνσεων της ταχύτητας. Στο Σχ. 4.7.α και 4.7.β παρουσιάζονται κάποια στιγμιότυπα του στιγμιαίου πεδίου των ταχυτήτων (u,w), των διακυμάνσεων της ταχύτητας (u',w'), της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k,, καθώς και των παραγόντων u'w', για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με περίοδο T = 1,134 sec και ύψος κύματος ίσο με H = 0,08 m.



Σχήμα 4.7.α: Στιγμιότυπα του πεδίου των στιγμιαίων ταχυτήτων (αριστερή στήλη), του πεδίου των διακυμάνσεων της ταχύτητας (δεξιά στήλη), της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k και των παραγώγων u'w', κάτω από το επίπεδο της κοιλίας, για μονοχρωματικό κυματισμό με περίοδο T = 1,134 sec και ύψος κύματος ίσο με H = 0,08 m.



Σχήμα 4.7.β: Στιγμιότυπα του πεδίου των στιγμιαίων ταχυτήτων (αριστερή στήλη), του πεδίου των διακυμάνσεων της ταχύτητας (δεξιά στήλη), της τυρβώδους κινητικής ενέργειας k και των παραγώγων u'w', κάτω από το επίπεδο της κοιλίας, για μονοχρωματικό κυματισμό με περίοδο T = 1,134 sec και ύψος κύματος ίσο με H = 0,08 m.

Η τυρβώδης κινητική ενέργεια ορίζεται ως:

$$k = \frac{1}{2} \left(u'^{2} + v'^{2} + w'^{2} \right)$$
(4.2)

ενώ στην παρούσα εργασία, μετά από μια σειρά αναλύσεων βρέθηκε ότι μπορούμε να την υπολογίσουμε προσεγγιστικά από την σχέση:

$$k = \frac{1.39}{2} \left(u'^2 + w'^2 \right) \tag{4.3}$$

εφόσον η εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας δεν ήταν δυνατόν να μετρηθεί στην πλειονότητα των πειραμάτων.

Η συμπεριφορά των στιγμιαίων παραγώγων *u'w'*, αναλύθηκε μέσω μιας quadrant ανάλυσης, σύμφωνα με την οποία τέσσερα διαφορετικά είδη τυρβωδών συμβάντων μπορούν να αναγνωριστούν, όπως φαίνεται και στο Σχ. 4.8. Εστιάζουμε την προσοχή μας στα συμβάντα εκτίναξης (ejection events) και αναρρόφησης (sweep events), τα οποία σχετίζονται άμεσα με την παραγωγή τύρβης πλησίον του τραχύ πυθμένα. Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι ο ορισμός των συμβάντων εκτίναξης και αναρρόφησης εξαρτώνται από την κατεύθυνση της παλλόμενης ροής.



Σχήμα 4.8: Σκαρίφημα της quadrant ανάλυσης σύμφωνα με το οποίο γίνεται η αναγνώριση των τυρβωδών συμβάντων. (αριστερά) για τις φάσεις γύρω από την κορυφή του κύματος (θετικές τιμές των *u*,*w*) και (δεξιά) για τις φάσεις γύρω από την κοιλία του κύματος (αρνητικές τιμές των *u*,*w*).

Παρατηρούμε ότι καθ' όλη την διάρκεια της περιόδου, η τυρβώδης κινητική ενέργεια παράγεται σε περιοχές του πυθμένα όπου λαμβάνει χώρα αποκόλληση της ροής γύρω από ιδιαιτέρως τραχιά τμήματα του πρανούς ογκολίθων. Η παραγωγή της τύρβης συσχετίστηκε με την παρουσία ισχυρών συμβάντων εκτίναξης και αναρρόφησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συμβάντα εκτίναξης και αναρρόφησης αντιστοιχούν σε αρνητικές τιμές του παράγοντα *u'w'* για τις φάσεις γύρω από την κοιλία του κύματος.

Όσον αφορά τον συντελεστή ανάκλασης του εργαστηριακού ομοιώματος του τραχύ πυθμένα απότομης κλίσης, αυτός προσδιορίστηκε με χρήση του εμπορικού κώδικα Wave Synthesizer - Reflection Analysis Module (DHI, 2005), ο οποίος γρησιμοποιεί την μέθοδο των ελαγίστων τετραγώνων που προτάθηκε από τους Mansard & Funke (1980, 1987), και βελτιώθηκε από τους Zelt and Skjelbreia (1992). Η μέθοδος απαιτεί καταγεγραμμένες χρονοσειρές της ελεύθερης επιφάνειας σε τρεις τουλάχιστον θέσεις, οι οποίες βρίσκονται πάνω σε μια διεύθυνση παράλληλη με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η απόσταση μεταξύ των θέσεων καταγραφής της ελεύθερης επιφάνειας επιλέχτηκε σύμφωνα με τις υποδείξεις των Mansard & Funke (1980), ενώ απείχαν και τουλάχιστον ένα μήκος κύματος τόσο από την κυματογεννήτρια, όσο και από τον πόδα του πρανούς, ούτως ώστε να αποφευχθούν πιθανές διακυμάνσεις του ύψους κύματος, οι οποίες δύναται να δημιουργηθούν πλησίον ανακλαστικών κατασκευών. Τελικά, η μέση τιμή του συντελεστή ανάκλασης προσδιορίστηκε ίση με $C_R = 0.262$ και $C_R = 0.189$, για επερχόμενους μονοχρωματικούς κυματισμούς με περίοδο T = 1,134 sec και ύψος κύματος H = 0.04m και H = 0.08 m, αντίστοιχα, τιμές που βρίσκονται σε καλή συμφωνία με αυτές που προκύπτουν από τον εμπειρικό τύπο που πρότεινε ο Allsop (1990), οι οποίες είναι ίσες με $C_R = 0.247$ και $C_R = 0.153$.

4.5.2 Εργαστηριακό ομοίωμα λείου πυθμένα ήπιας κλίσης

Για το εργαστηριακό ομοίωμα του λείου πυθμένα ήπιας κλίσης καταγράφηκαν τα στιγμιαία πεδία των ταχυτήτων με την μεθοδολογία PIV, και από αυτά εξήχθησαν οι μέσες, ως προς την περίοδο και ως προς την φάση, τιμές των στατιστικών ποσοτήτων της ταχύτητας και της τύρβης. Στο Σχ. 4.9 παρουσιάζονται τμήματα των χρονοσειρών των ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας όπως αυτές μετρήθηκαν από τα πειραματικά σενάρια των μονοχρωματικών κυματισμών που εξετάσαμε, σε απόσταση x = 1,96 m από την κυματογεννήτρια.

Όπως και στην περίπτωση του εργαστηριακού ομοιώματος τραχέως πυθμένα με απότομη κλίση, έτσι και για το ομοίωμα του λείου πυθμένα ήπιας κλίσης έπρεπε να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα του προσπίπτοντος κύματος. Συνεπώς, αξιοποιήσαμε και σε αυτήν την περίπτωση τον εμπορικό κώδικα Wave Synthesizer - Crossing Analysis Module (DHI, 2005) και προσδιορίσαμε ότι για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με ύψος κύματος H = 0,10 m και περίοδο T = 1 sec, οι r.m.s. αποκλίσεις των υψών και των περιόδων κύματος κυμαίνονταν κάτω από 3% και 0,83%, αντίστοιχα. Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε με ασφάλεια ότι οι κυματικές συνθήκες εντός της δεξαμενής κυματισμών παρουσιάζουν αρκετά καλή επαναληψιμότητα και σε αυτήν την περίπτωση.



Σχήμα 4.9: Χρονοσειρές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για μονοχρωματικούς κυματισμούς σε απόσταση x = 1,96 m από την κυματογεννήτρια.

Για λόγους καλύτερης εποπτείας τα πειραματικά σενάρια που εξετάσαμε στην περίπτωση του εργαστηριακού ομοιώματος λείου πυθμένα ήπιας κλίσης συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.

Αρ.	Θέση	Βάθος Νερού	Τύπος	Ύψος	Περίοδος	Βάθος
Σεναρίου	Μέτρησης		Κύματος	Κύματος	Κύματος	Θραύσης
		<i>d</i> (m)		$H(\mathbf{m})$	<i>T</i> (s)	$d_{b}\left(\mathrm{m} ight)$
1	FOV 1 - 6		R	0.10	1	0,110
2	FOV 1 - 6		R	0.10	1,5	0,125
3	FOV 1 - 6	**	R	0.10	2	0,115
4	FOV 1 - 6		R	0.08	1,5	0,090
5	FOV 1 - 6		R	0.12	1,5	0,155

Πίνακας 4.2: Πειραματικά σενάρια για την περίπτωση του ομοιώματος λείου πυθμένα ήπιας κλίσης

^{**}Βάθη ανά θέση μέτρησης: (α) FOV 1 σε d=0,20 m, (β) FOV 2 σε d=0,18 m, (γ) FOV 3 σε d=0,16 m, (δ) FOV 4 σε d=0,14 m, (ε) FOV 5 σε d=0,12 m και (ζ) FOV 6 σε d=0,10 m

Στο Σχ. 4.9 παρουσιάζονται τα κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας για το πειραματικό σενάριο του μονοχρωματικού κύματος με ύψος H = 0.10 m και με περίοδο κύματος T = 1 sec, σε διαφορετικές θέσεις κατά μήκος του ομοιώματος λείου πυθμένα ήπιας κλίσης. Στις βαθύτερες θέσεις μέτρησης (d = 0,20 m και d = 0,18 m) παρουσιάζεται ξεκάθαρα ένα ασθενές κυματογενές ρεύμα με μέγεθος της τάξης του 0,025 U_o , και κατεύθυνση προς τα βαθιά, όπου U_0 είναι η ταχύτητα της ροής στα βαθιά και δίνεται από την σχέση 4.1. Το κυματογενές αυτό ρεύμα εμφανίζει μια γραμμική κατανομή σε σχέση με το βάθος, η οποία γίνεται εντονότερη καθώς πηγαίνουμε προς μικρότερα βάθη (d = 0,16 m και d = 0,14 m), ενώ η ένταση του ρεύματος αυξάνει σε περίπου 0,07 U_o , πλησίον της ελεύθερης επιφάνειας. Η ένταση του ρεύματος εξακολουθεί να αυξάνει καθώς τα βάθη μειώνονται, ενώ στις πιο ρηχές θέσεις μέτρησης (d = 0,12 m και d = 0,10 m), οι οποίες βρίσκονται πλησίον της θέσης θραύσης του κύματος, παρατηρούμε την δημιουργία κυματογενούς ρεύματος οριακού στρώματος (streaming), με κατεύθυνση προς την ακτογραμμή και με ένταση της τάξης 0,017 U_o .

Στο Σχ. 4.10 παρουσιάζονται τα κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας στην θέση μέτρησης με βάθος d = 0,14 m, για επερχόμενους κυματισμούς με ύψος κύματος H = 0.10 m και με περιόδους κύματος T = 1 sec, T = 1,5 sec και T = 2 sec, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι και στα τρία πειραματικά σενάρια είναι ξεκάθαρη η παρουσία κυματογενούς ρεύματος με κατεύθυνση προς τα βαθιά, με ένταση που αυξάνει καθώς το μήκος κύματος αυξάνει, ενώ η εμφάνιση του κυματογενούς ρεύματος οριακού στρώματος (streaming) γίνεται σε μεγαλύτερο βάθος.

Στο Σχ. 4.11 παρουσιάζονται τυπικές χρονοσειρές των τριών συνιστωσών της ταχύτητας της ροής, για επερχόμενο κυματισμό με ύψος κύματος H = 0,10m και περίοδο κύματος T = 1 s, σε βάθος νερού d = 14 cm και σε απόσταση 3,4 cm από τον πυθμένα. Από το Σχ. 4.11 παρατηρούμε ότι στη θέση αυτή, η οποία βρίσκεται πριν από την θέση θραύσης των επερχόμενων κυματισμών, η οριζόντια ταχύτητα κυριαρχεί, παρουσιάζοντας τιμές έως και τρείς φορές μεγαλύτερες από ότι η κατακόρυφη συνιστώσα. Η θεωρητική μέγιστη τιμή τόσο της u, όσο και της w συνιστώσας περιμένουμε να είναι της τάξης των:

$$u_{\max} \square w_{\max} \square \frac{\pi H}{T} = 31.42 \frac{cm}{s}$$
(4.4)

τιμή που σε γενικές γραμμές συνάδει με την μετρημένη τιμή τουλάχιστον της οριζόντιας ταχύτητας.



Σχήμα 4.10: Κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με περίοδο κύματος T = 1 sec και ύψος κύματος H = 0,10 m, σε βάθη (α) d = 0,20 m, (β) d = 0,18 m, (γ) d = 0,16 m, (δ) d = 0,14 m, (ε) d = 0,12 m και (ζ) d = 0,10 m.



Σχήμα 4.11: Κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας, σε βάθος d = 0,14 m, για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με ύψος κύματος H = 0,10 m και περίοδο κύματος (α) T = 1 sec, (β) T = 1,5 sec και (γ) T = 2 sec.



Σχήμα 4.12: Χρονοσειρές των τριών συνιστωσών της ταχύτητας, για επερχόμενο κυματισμό με ύψος κύματος στα βαθιά H = 0,10m και περίοδο T = 1 s, σε βάθος νερού d = 14 cm και σε απόσταση 3.4cm από τον πυθμένα.

4.5.3 Εργαστηριακό ομοίωμα λείου πυθμένα τύπου Larson

Για το εργαστηριακό ομοίωμα του λείου πυθμένα τύπου Larson καταγράφηκαν τα στιγμιαία πεδία των ταχυτήτων με την μεθοδολογία PIV, και από αυτά εξήχθησαν οι μέσες, ως προς την περίοδο και ως προς την φάση, τιμές των στατιστικών ποσοτήτων της ταχύτητας και της τύρβης. Στο Σχ. 4.12 παρουσιάζονται τμήματα των χρονοσειρών των ανυψώσεων της ελεύθερης επιφάνειας όπως αυτές μετρήθηκαν από τα πειραματικά σενάρια των μονοχρωματικών κυματισμών που εξετάσαμε, σε απόσταση x = 1,96 m από την κυματογεννήτρια.



Σχήμα 4.13: Χρονοσειρές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας για μονοχρωματικούς κυματισμούς σε απόσταση x = 1,96 m από την κυματογεννήτρια.

Και σε αυτήν την περίπτωση αξιοποιήσαμε τον εμπορικό κώδικα Wave Synthesizer - Crossing Analysis Module (DHI, 2005), προκειμένου να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα του προσπίπτοντος κύματος και προσδιορίσαμε ότι για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με ύψος κύματος H = 0,10 m και περίοδο T=1 sec, οι r.m.s. αποκλίσεις των υψών και των περιόδων κύματος κυμαίνονταν κάτω από 3,85% και 0,93%, αντίστοιχα. Επομένως, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι κυματικές συνθήκες εντός της δεξαμενής κυματισμών παρουσιάζουν αρκετά καλή επαναληψιμότητα και στην περίπτωση του εργαστηριακού ομοιώματος λείου πυθμένα τύπου Larson.

Στο Σχ. 4.13 παρουσιάζονται τα κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας στην θέση μέτρησης με βάθος d = 0.10 m, για επερχόμενους κυματισμούς με ύψος κύματος H = 0.10 m και με περιόδους κύματος T= 1 sec, T = 1.5 sec και T = 2 sec, αντίστοιχα, όπως αυτά καταγράφηκαν υπεράνω του λείου πυθμένα τύπου Larson. Παρατηρούμε ότι και στα τρία πειραματικά σενάρια είναι ξεκάθαρη η παρουσία κυματογενούς ρεύματος με κατεύθυνση προς τα βαθιά, το μέτρο του οποίου αυξάνει καθώς κινούμαστε προς την ελεύθερη επιφάνεια. Πλησίον του πυθμένα το μέτρο του κυματογενούς ρεύματος λαμβάνει τιμές της τάξης του $0,01U_{o}$, όπου U_{0} είναι η ταχύτητα της ροής στα βαθιά και δίνεται από την σχέση 4.1, ενώ όσο κινούμαστε προς την ελεύθερη επιφάνεια το μέτρο αυτό αυξάνει έως την τιμή 0,08 U_o για επερχόμενους κυματισμούς με ύψος κύματος H = 0.10 m και με περιόδους κύματος T = 1 sec και T = 2 sec, και έως την τιμή 0,10 U_o για τον επεργόμενο κυματισμό με ύψος κύματος H = 0.10 m και με περίοδο κύματος T = 1.5sec. Η βασική διαφορά που παρατηρούμε σε σχέση με τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το ομοίωμα του λείου πυθμένα ήπιας κλίσης, είναι ότι δεν είναι πλέον ξεκάθαρη η παρουσία του κυματογενούς ρεύματος οριακού στρώματος (streaming), στην περίπτωση του λείου πυθμένα τύπου Larson, όπως φαίνεται από σύγκριση των σχημάτων 4.9.ζ και 4.13.α.



Σχήμα 4.14: Κατακόρυφα πεδία της μέσης, ως προς την περίοδο του κύματος ταχύτητας, σε βάθος d = 0,10 m, για την περίπτωση μονοχρωματικού κυματισμού με ύψος κύματος H = 0,10 m και περίοδο κύματος (α) T = 1 sec, (β) T = 1,5 sec και (γ) T = 2 sec.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Allsop, N. W. H. (1990). "Reflection performance of rock armoured slopes in random waves." *Proc.* 22nd *Int. Conf. Coastal Eng.*, Delft, Netherlands, 2, 1460-1472.
- DHI (2005). *DHI Wave Synthesizer*, User Guides for Wave Generation, Data Acquisition and Data Analysis, Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Larson, M., 1988. Quantification of Beach Profile Change. Report No. 1008, Department of Water Resources and Engineering, University of Lund, Lund, Sweden
- LaVision (2011). Product-Manual of DaVis 8.0 Software, LaVision GmbH, Göttingen, Germany.

- Mansard, E. P. D., and Funke, E. R. (1980). "The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method." *Proc.* 17th Int. Conf. Coastal Eng., Sydney, Australia, 154-172.
- Mansard, E. P. D., and Funke, E. R. (1987). *On the reflection analysis of irregular waves*, Technical Report TR-HY-017, NRCC No. 27522, National Research Council of Canada.
- SonTek/ YSI, 2002. *ADVField/ Hydra Operation Manual*, SonTek/ YSI, Inc., San Diego, CA.
- Zelt, J. A., and Skjelbreia, J. E. (1992). "Estimating incident and reflected wave fields using an arbitrary number of wave gauges." *Proc.* 23rd Int. Conf. Coastal Eng., Venice, Italy, 777-789.