



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



**ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΩΜΑΤΟΣ
ΥΦΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΜΕ ΠΟΡΩΔΕΣ**

ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ Α. ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Μέμος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΩΜΑΤΟΣ
ΥΦΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΜΕ ΠΟΡΩΔΕΣ**

ΑΡΓΥΡΟΠΟΥΛΟΣ Α. ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ

Επιβλέπων : Κωνσταντίνος Δ. Μέμος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κωνσταντίνο Μέμο, καθηγητή Ε.Μ.Π. για την επίβλεψη κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας με τίτλο «Υδροδυναμική διερεύνηση σώματος ύφαλου κυματοθραύστη με πορώδες».

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υποψήφιο Διδάκτορα και φίλο Μιχάλη Χονδρό για τις πολύτιμες υποδείξεις και την καθοδήγησή του, καθώς και τον μεταπτυχιακό φοιτητή Γιώργο Κλωνάρη για τη βοήθειά του.

Ευχαριστώ τους Καθηγητές του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., τον κ. Κωνσταντίνο Μέμο, τον κ. Κωνσταντίνο Μουτζούρη, και τον Επικ. Καθηγητή κ. Παναγιώτη Παπανικολάου που δέχτηκαν να συμμετέχουν στην εξεταστική επιτροπή καθώς και για τις υποδείξεις και το σχολιασμό τους.

Ειδικές ευχαριστίες στην Λέκτορα κα. Βίκυ Τσουκαλά και τον μεταπτυχιακό φοιτητή και φίλο Γιάννη Μπούνδρη που στάθηκαν αρωγοί στη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και στους φίλους Γιάννη, Γιώργο, Γιώργο, Κώστα, Παναγιώτη, Παναγιώτη και Παναγιώτη για την ψυχολογική υποστήριξη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου που με στήριξε με κάθε δυνατό τρόπο από την αρχή της φοίτησής μου μέχρι και την παρουσίαση της παρούσας εργασίας μου, τελευταία πράξη της προπτυχιακής μου ζωής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ	
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</i>	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	2
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
<i>ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....</i>	5
2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ.....	6
2.2 ΘΡΑΥΣΗ.....	6
2.3 ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ.....	12
2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	15
2.5 ΘΕΩΡΙΕΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΡΟΩΘΟΥΜΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ.....	17
2.5.1 Θεωρία γραμμικών κυματισμών απειροστού εύρους (Airy ή Stokes 1 ^{ης} τάξης).....	17
2.5.2 Μη γραμμικές θεωρίες.....	21
2.5.3 Μαθηματικά ομοιώματα.....	34
2.5.4 Ομοιώματα διάθλασης-περίθλασης: εξίσωσης ήπιας κλίσης.....	35
2.6 ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΘΕΩΡΙΩΝ.....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	
<i>ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ.....</i>	43
3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ.....	44
3.1.1 Διαστάσεις – περιγραφή.....	44
3.1.2 Κυματογεννήτρια.....	47
3.1.3 Παραγόμενοι κυματισμοί.....	49

3.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	51
3.3	ΠΟΡΩΔΕΣ.....	59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ..... 61

4.1	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟΝ ΥΦΑΛΟ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΑΤΗ ΣΤΕΨΗΣ.....	62
4.1.1	Βάθος νερού 50cm.....	62
4.1.2	Βάθος νερού 60cm.....	69
4.1.3	Βάθος νερού 40cm.....	77
4.2	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟΝ ΥΦΑΛΟ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΒΑΘΗ.....	84
4.2.1	Πλάτος στέψης 60cm.....	84
4.2.2	Πλάτος στέψης 80cm.....	89
4.2.3	Πλάτος στέψης 100cm.....	93
4.3	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑ STOKES 2 ^{ης} ΤΑΞΗΣ.....	97
4.4	ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (u/c) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (H/D).....	102

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... 107

5.1	ΓΕΝΙΚΑ.....	108
5.2	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΣΤΕΨΗΣ.....	108
5.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ.....	109
5.4	STOKES 2 ^{ης} ΤΑΞΗΣ.....	109

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ..... 113

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α..... 115

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β..... 141

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.2.1	Κατανομή ταχυτήτων στο θραυόμενο κύμα.....	7
Σχήμα 2.2.2	Διάφορα είδη θραύσεως κυμάτων (στο μέτωπο, στην κορυφή και στη βάση αντίστοιχα).....	7
Σχήμα 2.4.1	Τυπική διατομή κύματος.....	15
Σχήμα 3.1.1.1	Κάτοψη και τομή της πειραματικής διώρυγας.....	45
Σχήμα 3.1.1.2	Άποψη της πειραματικής διώρυγας από την πλευρά της κυματογεννήτριας.....	46
Σχήμα 3.1.1.3	Άποψη του εσωτερικού της διώρυγας βαρύτητας του εργαστηρίου λιμενικών έργων.....	46
Σχήμα 3.1.2.1	Κυματογεννήτρια στο άκρο της διώρυγας τοποθετημένη στο βάθος.....	47
Σχήμα 3.1.2.2	Πτερύγιο κυματιστήρα και διάταξη διάτρητων πλακών ομαλοποίησης του κυματισμού.....	48
Σχήμα 3.1.2.3	Το κιβώτιο ταχυτήτων της κυματογεννήτριας το οποίο καθορίζει τις περιόδους παραγόμενου κυματισμού.....	48
Σχήμα 3.2.1	Novonic StreamFlo – Η επιστημονική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις.....	51
Σχήμα 3.2.2	Novonic StreamFlo – Η επιστημονική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις.....	51
Σχήμα 3.2.3	Ο μιλίσκος που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων.....	52
Σχήμα 3.2.4	Ο μιλίσκος που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων.....	52
Σχήμα 3.2.5	Οριζόντιοι υποδοχής των ανοξειδωτων σωλήνων και βαθμονομημένος γνώμονας για τις οπτικές παρατηρήσεις.....	53
Σχήμα 3.2.6	Οριζόντιοι υποδοχής των ανοξειδωτων σωλήνων και βαθμονομημένος γνώμονας για τις οπτικές παρατηρήσεις.....	53
Σχήμα 3.2.7	Διάταξη για πλάτος στέψης 60cm.....	55
Σχήμα 3.2.8	Διάταξη για πλάτος στέψης 80cm.....	56
Σχήμα 3.2.9	Διάταξη για πλάτος στέψης 100cm.....	57
Σχήμα B.1	Άποψη ύφαλου κυματοθραύστη.....	138
Σχήμα B.2	Διάτρητες μεταλλικές πλάκες για τον περιορισμό της περίθλασης.....	138
Σχήμα B.3	Στοιβάδα απορρόφησης κυματικής ενέργειας (sponge).....	139
Σχήμα B.4	Σημείο μέτρησης 5 στο εσωτερικό του κυματοθραύστη.....	139
Σχήμα B.5	Άποψη διώρυγας και ύφαλου κυματοθραύστη με κυματισμό.....	140
Σχήμα B.6	Θραύση των κυματισμών στη στέψη.....	140
Σχήμα B.7	Θραύση των κυματισμών στη στέψη.....	141
Σχήμα B.8	Θραύση των κυματισμών στη στέψη.....	141
Σχήμα B.9	Συρμάτινο πλαίσιο για την ασφάλεια του μιλίσκου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο εσωτερικό του κυματοθραύστη.....	142

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

	<u>Βάθος 50cm-Μεταβολή πλάτους στέψης</u>	
Διάγραμμα 4.1.1.1	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1	
	Σύγκριση με ταχύτητες Stokes.....	62
Διάγραμμα 4.1.1.2	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2.....	63
Διάγραμμα 4.1.1.3	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 3.....	64
Διάγραμμα 4.1.1.4	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 4.....	65
Διάγραμμα 4.1.1.5	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 5.....	66
Διάγραμμα 4.1.1.6	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 6.....	67
Διάγραμμα 4.1.1.7	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 7.....	68
	<u>Βάθος 60cm-Μεταβολή πλάτους στέψης</u>	
Διάγραμμα 4.1.2.1	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1.....	69
Διάγραμμα 4.1.2.2	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2.....	70
Διάγραμμα 4.1.2.3	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 3.....	71
Διάγραμμα 4.1.2.4	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 4.....	72
Διάγραμμα 4.1.2.5	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 5.....	73
Διάγραμμα 4.1.2.6	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 6.....	74
Διάγραμμα 4.1.2.7	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 7.....	75
	<u>Βάθος 40cm-Μεταβολή πλάτους στέψης</u>	
Διάγραμμα 4.1.3.1	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1.....	77
Διάγραμμα 4.1.3.2	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2.....	78
Διάγραμμα 4.1.3.3	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 3.....	79
Διάγραμμα 4.1.3.4	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 4.....	80
Διάγραμμα 4.1.3.5	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 5.....	81
Διάγραμμα 4.1.3.6	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 6.....	82
Διάγραμμα 4.1.3.7	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 7.....	82
	<u>Πλάτος στέψης 60cm-Μεταβολή βάθους</u>	
Διάγραμμα 4.2.1.1	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1.....	85
Διάγραμμα 4.2.1.2	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2.....	85
Διάγραμμα 4.2.1.3	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 3.....	86
Διάγραμμα 4.2.1.4	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 4.....	86
Διάγραμμα 4.2.1.5	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 5.....	87
Διάγραμμα 4.2.1.6	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 6.....	87
Διάγραμμα 4.2.1.7	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 7.....	88
	<u>Πλάτος στέψης 80cm-Μεταβολή βάθους</u>	
Διάγραμμα 4.2.2.1	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1.....	89
Διάγραμμα 4.2.2.2	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2.....	89
Διάγραμμα 4.2.2.3	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 3.....	90
Διάγραμμα 4.2.2.4	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 4.....	90
Διάγραμμα 4.2.2.5	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 5.....	91
Διάγραμμα 4.2.2.6	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 6.....	91

Διάγραμμα 4.2.2.7	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 7.....	92
	<u>Πλάτος στέψης 100cm-Μεταβολή βάθους</u>	
Διάγραμμα 4.2.3.1	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1.....	93
Διάγραμμα 4.2.3.2	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2.....	93
Διάγραμμα 4.2.3.3	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 3.....	94
Διάγραμμα 4.2.3.4	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 4.....	94
Διάγραμμα 4.2.3.5	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 5.....	95
Διάγραμμα 4.2.3.6	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 6.....	95
Διάγραμμα 4.2.3.7	Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 7.....	96
	<u>Πειραματικές ταχύτητες-Ταχύτητες Stokes</u>	
Διάγραμμα 4.3.1	Σύγκριση ταχυτήτων για πλάτος στέψης 60cm.....	98
Διάγραμμα 4.3.2	Σύγκριση ταχυτήτων για πλάτος στέψης 80cm.....	98
Διάγραμμα 4.3.3	Σύγκριση ταχυτήτων για πλάτος στέψης 100cm.....	99
	<u>H/D-u/c</u>	
Διάγραμμα 4.4.1	Για πλάτος στέψης 60cm και περίοδο T=2,12sec.....	103
Διάγραμμα 4.4.2	Για πλάτος στέψης 60cm και περίοδο T=1,85sec.....	103
Διάγραμμα 4.4.3	Για πλάτος στέψης 60cm και περίοδο T=1,58sec.....	104
Διάγραμμα 4.4.4	Για πλάτος στέψης 80cm και περίοδο T=2,12sec.....	106
Διάγραμμα 4.4.5	Για πλάτος στέψης 100cm και περίοδο T=2,12sec.....	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.2.1	Εμπειρικοί συντελεστές χαρακτηριστικών σχέσεων.....	9
Πίνακας 3.1.3.1	Όρια παραγόμενων κυματισμών.....	49
Πίνακας 3.1.3.2	Ταχύτητες κυματιστήρα – περίοδοι παραγόμενων κυματισμών.....	50
Πίνακας 1-189	Πειραματικές μετρήσεις.....	112

ΟΡΙΣΜΟΙ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

A) Σύμβολα με ελληνικά γράμματα

- Δx :** χωρικό βήμα
 Δt : χρονικό βήμα
 ε : παράμετρος κλίμακας που εκφράζει τη μη γραμμικότητα $\varepsilon=H/d$
 ϵ : αδιάστατο ύψος κύματος ($=kH/2$)
 ζ : ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας μετρούμενη από τη στάθμη ηρεμίας
 ν : συντελεστής τυρβώδους συνεκτικότητας
 ρ : πυκνότητα νερού
 σ : παράμετρος κλίμακας που εκφράζει τη διασπορά συχνοτήτων $\sigma=d/L$
 φ : γωνία φάσης
 Φ : συνάρτηση δυναμικού
 Ψ : ροϊκή συνάρτηση
 ω : γωνιακή συχνότητα ($=2\pi/T$)

B) Σύμβολα με λατινικά γράμματα

- C :** φασική ταχύτητα ή ταχύτητα διάδοσης κύματος, $c=L/T$
 D : βάθος θάλασσας μετρούμενο από τη στάθμη ηρεμίας
 f : κυκλική συχνότητα ($=1/T$)
 g : επιτάχυνση βαρύτητας
 H : ύψος κύματος (κατακόρυφη απόσταση κοιλίας κορυφής)
 h : συνολικό βάθος $h=d+\zeta$
 b : πλάτος στέψης κυματοθραύστη
 k : αριθμός κύματος (μέτρο διανύσματος), $k=2\pi/L$
 L : μήκος κύματος
 T : περίοδος
 u : συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση x
 v : συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση y
 w : συνιστώσα ταχύτητας κατά τη διεύθυνση z

Γ) Δείκτες

- a :** μεταβλητή σε βάθος z_a
 b : συνιστώσα στον πυθμένα
 i : στοιχείο κανάβου στη διεύθυνση x
 j : στοιχείο κανάβου στη διεύθυνση y
 o : βαθιά νερά
 s : συνιστώσα στην ελεύθερη επιφάνεια
 t : παράγωγος ως προς το χρόνο
 x : χωρική παράγωγος ως προς x
 y : χωρική παράγωγος ως προς y

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση των ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων στο εσωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη και πώς αυτές μεταβάλλονται για διαφορετικά πλάτη στέψης του μοντέλου και για διαφορετικά βάθη ροής. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής μελετήθηκε η σύγκλιση των πειραματικών μετρήσεων με μαθηματικές θεωρίες κυματισμών (Stokes 1^{ης} και 2^{ης} τάξης). Οι μετρήσεις έγιναν στη διώρυγα βαρύτητας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων και ακολούθησε ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Αρχικά παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία που αφορούν στη θραύση καθώς και στα χαρακτηριστικά των δισδιάστατων κυματισμών. Επίσης γίνεται αναφορά σε μαθηματικές θεωρίες που περιγράφουν τους γραμμικούς και μη γραμμικούς κυματισμούς.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πειραματικές διατάξεις, τα όργανα με τα οποία λήφθηκαν οι μετρήσεις και ο τρόπος διεξαγωγής των πειραμάτων. Παρουσιάζονται επιπρόσθετα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για το στήσιμο του μοντέλου, καθώς και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

Τα ακόλουθα κεφάλαια αναφέρονται στα πειραματικά αποτελέσματα και την παρουσίασή τους μέσω κατάλληλων διαγραμμάτων. Γίνεται παράθεσή τους για να προβληθεί η επιρροή του πλάτους στέψης και του βάθους ροής στις ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη.

Η εργασία αυτή ολοκληρώνεται με τη σύνοψη των συμπερασμάτων για την επιρροή των παραπάνω μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών του μοντέλου στο προφίλ των ταχυτήτων που μελετήθηκαν. Μελετήθηκε η δυνατότητα των μαθηματικών θεωριών Stokes να περιγράψουν ικανοποιητικά το κατακόρυφο προφίλ των οριζόντιων ταχυτήτων στο εσωτερικό του κυματοθραύστη.

Στο παράρτημα παρατίθενται αναλυτικά όλες οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στην διώρυγα έτσι ώστε να μπορέσουν να προσφέρουν σημαντική βοήθεια για την κατανόηση της διπλωματικής εργασίας από τον αναγνώστη.

ABSTRACT

The main goal of this study is the experimental investigation of the hydrodynamic near-field processes that take place in the interaction between waves and submerged and emerged breakwaters. Specifically, small-scale laboratory tests were conducted in order to measure the velocity field in the vicinity of the breakwater, inside and outside. Varying water depths (D) and crest widths (B) were tested in order to examine the influence of the structures' geometry as follows:

Tested depths (D):	40cm	50cm	60cm
Tested crest widths (b):	60cm	80cm	100cm
Tested periods (T):	2,12sec	1,85sec	1,58sec

The convergence between experimental measurements and mathematical wave theories (Stokes 1st and 2nd class) was also studied. The measurements carried out at the wave flume in Laboratory of Harbour Works of National Technical University of Athens.

In the present work the first chapters refer to basic mathematical theories of two-dimensional waves as well as wave breaking theories that dominate in the area of submerged breakwaters. Furthermore, the experimental layout and the materials that were used are extensively described.

In the following sections the experimental results are presented and illustrated in appropriate figures, so as to export crucial conclusions. Depiction of the previous shows the influence of the crest width and water depth on the the water particles velocity in the interior of the breakwater.

This study is completed with the citation of the resulting conclusions from the experimental observations. In the Appendix the exact experimental measurements are listed, for every scenario, in order to be useful for a future research.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μερικές φορές αναγκαζόμαστε να καταφύγουμε στη λύση των ύφαλων κυματοθραυστών με πρηνή για να προστατεύσουμε μία περιοχή από τους κυματισμούς. Η στέψη των έργων αυτών βρίσκεται χαμηλότερα από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας, ενώ κατά τα λοιπά παρομοιάζουν με τους συμβατικούς κυματοθραύστες που διαπερνούν την επιφάνεια του νερού.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα των ύφαλων έργων είναι ότι εναρμονίζονται αισθητικά με το περιβάλλον, καλύτερα από τους ορατούς κυματοθραύστες. Αυτό έχει ιδιαίτερη βαρύτητα σε περιοχές ιδιαίτερου φυσικού κάλλους ή ιστορικής παράδοσης. Άλλο πλεονέκτημα είναι η μείωση των απαιτούμενων υλικών κατασκευής έναντι των αντίστοιχων ορατών έργων και η χαμηλή ανάκλαση κυματισμών. Όμως, οι ύφαλοι κυματοθραύστες υστερούν στη μεγάλη διαπερατότητα που παρουσιάζουν, καθώς και στον κίνδυνο που τίθεται για τη ναυσιπλοΐα. Η μικρή απορρόφηση ενέργειας κυματισμών που παρουσιάζουν οι ύφαλοι κυματοθραύστες οφείλεται στο ότι τα πρηνή τους δεν εκτείνονται στη ζώνη που μεταδίδεται το μεγαλύτερο ποσοστό της κυματικής ενέργειας. Για να είναι πιο αποτελεσματικό το βυθισμένο εξωτερικό έργο θα πρέπει η στέψη του να βρίσκεται όσο γίνεται κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Συνεπώς, σε περιοχές που η στάθμη της θάλασσας παρουσιάζει σημαντική διακύμανση, η πρόβλεψη τέτοιων έργων γίνεται προβληματική. Το ίδιο ισχύει και σε περιοχές έντονης κυματικής δράσης, λόγω του μεγάλου συντελεστή μετάδοσης κυματισμών.

Εν γένει το πλάτος b της στέψης του έργου προβλέπεται μεγάλο, ώστε να συντελείται εκεί θραύση σημαντικού ποσοστού κυματισμών με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση του έργου.

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται πειραματική διερεύνηση των ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων του ύδατος στο εσωτερικό και στην επιφάνεια ύφαλου κυματοθραύστη. Ερευνάται η επίδραση στην ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων:

- Του πλάτους στέψης του κυματοθραύστη (b)
- Του βάθους (D)
- Της περιόδου (T)

Γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με μαθηματικές θεωρίες (Stokes 1^{ης} και 2^{ης} τάξης) και μετά από επεξεργασία και ανάλυση η παρουσίαση τους σε κατάλληλα διαγράμματα. Παρουσιάζεται συμπερασματικά η επιρροή των παραπάνω μεγεθών στις ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων, καθώς και η δυνατότητα που έχουν οι μαθηματικές θεωρίες να περιγράψουν τα προφίλ των ταχυτήτων στο εσωτερικό του μοντέλου.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία για τη θραύση των κυματισμών, τα χαρακτηριστικά του δισδιάστατου κυματισμού, καθώς και μαθηματικές θεωρίες για τους δισδιάστατους προωθούμενους κυματισμούς που αναπτύχθηκαν κατά το παρελθόν.

Στο Κεφάλαιο 3 επιλέγονται οι πειραματικές διατάξεις που θα κατασκευαστούν με βάση τα εξεταζόμενα χαρακτηριστικά του κυματοθραύστη. Καθορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μοντέλων και παρουσιάζεται η διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα σε κατάλληλα διαγράμματα για την ταχύτητα (u) των ρευστών σωματιδίων εξαρτώμενα από τα χαρακτηριστικά των εισερχόμενων κυματισμών και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κυματοθραύστη.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα για τις ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων ανάλογα με τη μεταβολή διαφόρων μεγεθών και η

καταλληλότητα της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης να περιγράψει τι συμβαίνει στο εσωτερικό του ύφालου κυματοθραύστη.

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται αναλυτικά οι πίνακες που αποτυπώνουν τις πειραματικές μετρήσεις και τα χαρακτηριστικά της κάθε μίας από αυτές.

Στο παράρτημα Β εμπεριέχεται φωτογραφικό υλικό, σχετικό με τον μοντέλο και τα κυματικά φαινόμενα, που λήφθηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΥΘΜΕΝΑ

Ο θαλάσσιος πυθμένας επιδρά στους κυματισμούς. Η επίδραση εκδηλώνεται κατά κύριο λόγο στην υφή και μορφή των κυμάτων καθώς και στη διεύθυνση μεταδόσεως.

Η επίδραση του πυθμένα γίνεται αισθητή από τα κύματα, όταν μειωθεί αισθητά το βάθος του νερού. Κατά τις θεωρίες κυμάτων, για βάθη μεγαλύτερα του μισού μήκους κύματος η επίδραση είναι αμελητέα.

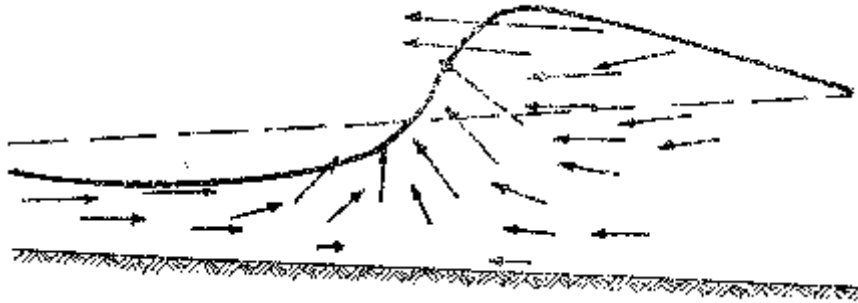
Οι κυριότερες μορφές επιδράσεως του πυθμένα στους θαλάσσιους κυματισμούς, που ενδιαφέρουν τον λιμενολόγο μηχανικό, είναι οι παραμορφώσεις, η θραύση και η διάθλαση των κυμάτων.

2.2 ΘΡΑΥΣΗ

Όταν οι παραμορφώσεις, που εμφανίζονται στη διατομή του κύματος, υπερβούν ορισμένα όρια, το κύμα θραύεται. Η θραύση οφείλεται στις μεγάλες παραμορφώσεις της διατομής από την επίδραση του πυθμένα.

Στη ζώνη θραύσης η διατομή του κύματος διαφέρει από τη διατομή του κύματος σε ανοιχτή θάλασσα. Σε μερικούς τύπους θραύσεως η κορυφή τείνει να εμφανίσει ένα γωνιακό σημείο. Η εμφάνιση ενός τέτοιου γωνιακού σημείου, που δηλώνει τη συσσώρευση πολλών αρμονικών υψηλής τάξεως, υπήρξε το πρώτο κριτήριο θραύσεως ενός κύματος στη θαλάσσια υδραυλική. Σύμφωνα με το Miche η θραύση επέρχεται, όταν τα δύο μέτωπα της διατομής σχηματίσουν μία γωνία ίση με 60° με ταυτόχρονη εμφάνιση ενός γωνιακού σημείου στην κορυφή. Ένα τέτοιο κριτήριο βέβαια δεν θεωρείται σήμερα αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας.

Η κατανομή των ταχυτήτων των σωματιδίων στις διατομές του κύματος λίγο πριν τη θραύση είναι ακανόνιστη σε αντίθεση με τις διατομές στην ανοιχτή θάλασσα. Σε γενικές γραμμές οι οριζόντιες ταχύτητες αυξάνουν πολύ στην κορυφή του κύματος, γεγονός που έχει μεγάλη σημασία στην εμφάνιση της θραύσεως.



Σχήμα 2.2.1 – Κατανομή ταχυτήτων στο θραυόμενο κύμα.

Μέρος της ενέργειας του κύματος μετατρέπεται στη διάρκεια της θραύσεως σε ενέργεια τύρβης και ταυτόχρονα η ελεύθερη επιφάνεια χάνει την κυματοειδή μορφή της. Στη ζώνη μετά τη θραύση η υγρή μάζα κινείται διαδοχικά προς την ακτή και προς την ανοιχτή θάλασσα (φάσεις ανόδου και καθόδου αντίστοιχα).

Σε γενικές γραμμές η θραύση εμφανίζεται στη βάση (θραύση εφορμήσεως) ή στο άνω μέρος του μετώπου (θραύση κυλίσεως) ή στην κορυφή (θραύση εκτινάξεως) της διατομής του κύματος. Η εμφάνιση μιας απ' αυτές τις βασικές μορφές θραύσεως εξαρτάται από τη γωνία του πυθμένα α και την καμπυλότητα γ_0 του κύματος στα ανοιχτά. Κάθε θραύση έχει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2.2.2 – Διάφορα είδη θραύσεως κυμάτων (στο μέτωπο, στην κορυφή και στη βάση αντίστοιχα).

Στη θραύση εφορμήσεως εμφανίζονται πολλές φυσαλίδες αέρα κυρίως στη βάση του κύματος. Μικρό μόνο μέρος της ενέργειας του κύματος απελευθερώνεται στη θραύση, με αποτέλεσμα τη μετατροπή της διατομής σε μία μορφή πλημμυρικού κύματος, που συνεχίζει τη μετάδοσή του προς την ακτή. Η συγκεκριμένη θραύση εμφανίζεται σε μεγάλες κλίσεις πυθμένα και μικρές καμπυλότητες κύματος στα ανοιχτά γ_0 και εν γένει τοποθετείται στο όριο μεταξύ της περιοχής των θραυόμενων κυμάτων και της περιοχής των ανακλώμενων κυμάτων.

Η θραύση στο μέτωπο του κύματος εμφανίζεται, όταν μέρος της κορυφής ή του μετώπου του κύματος καταστραφεί και κυλίσει πάνω στο μέτωπο προς τη βάση του κύματος. Χαρακτηριστικό αυτής της μορφής θραύσεως είναι ο δημιουργούμενος αφρός.

Η θραύση στην κορυφή του κύματος εμφανίζεται, όταν τα υγρά σωματίδια στην κορυφή αρχίσουν να κινούνται ταχύτερα από τα σωματίδια στην υπόλοιπη διατομή. Αποτέλεσμα αυτής της κινήσεως είναι η δημιουργία ενός είδους υγρής φλέβας, που εκτινάσσεται από την κορυφή της διατομής, διαγράφει μια σχεδόν παραβολική τροχιά και προσκρούει στην υδάτινη μάζα. Ο τύπος αυτός θραύσεως έχει τη μεγαλύτερη σημασία για την τεχνολογία των λιμενικών έργων λόγω των υψηλών πιέσεων, που αναπτύσσονται κατά την πρόσκρουση.

Έχει αποδειχθεί ότι το ύψος του κύματος μεταβάλλεται κατά την μετάδοση σ' ένα κεκλιμένο πυθμένα. Η μέγιστη τιμή του H_b εμφανίζεται στη γραμμή θραύσεως και ονομάζεται ύψος κύματος θραύσεως. Εξαρτάται από το ύψος H_0 , την καμπυλότητα γ_0 και την κλίση $\tan\alpha$.

Διάφοροι ερευνητές πρότειναν σχέσεις για τον προσδιορισμό του H_b . Σχεδόν όλες έχουν την παρακάτω μορφή:

$$\frac{H_b}{H_0} = \beta\gamma_0^\delta + \zeta \quad (2.1)$$

Στον πίνακα αναγράφονται οι εμπειρικοί συντελεστές β , δ και ζ ορισμένων χαρακτηριστικών σχέσεων.

Πίνακας 2.2.1 – Εμπειρικοί συντελεστές χαρακτηριστικών σχέσεων.

ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ	β	Δ	Z
Munk	0.30	-0.33	0
LeMehaute-Koh	$0.76(\tan\alpha)^{0.143}$	-0.25	0
Weggel	$(0.01+0.5\tan\alpha)$ $(1+\tan\alpha+\zeta)$	-0.33	$\frac{D_1(1 + \tan\alpha - D_2\{1.71 - 0.18 \exp(28\tan\alpha)\})}{D_1 - D_2}$ με $D_1=(0.01+0.5\tan\alpha)^{0.33}$ $D_2=(0.01-0.01\exp(-28\tan\alpha))^{0.33}$

Απαιτείται μεγάλη προσοχή στη χρήση των παραπάνω σχέσεων, δεδομένου ότι κάθε μία βασίστηκε είτε σε κάποια θεωρία κύματος είτε σε μετρήσεις με ορισμένο μόνο φάσμα τιμών γ_0 και α .

Η γραμμή θραύσεως x_b σε μία κεκλιμένη κατασκευή βρέθηκε καλά συσχετισμένη με τις παραμέτρους x_0 , H_0 , L_0 και α .

Για τον προσδιορισμό του βάθους νερού στη γραμμή θραύσεως είναι ευρέα διαδεδομένη η χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$\frac{H_b}{h_b} = 0.8 \quad (2.2)$$

που προκύπτει από τη θεωρία του μοναχικού κύματος στην οριακή του κατάσταση.

Ως το σημείο αυτό θεωρήθηκε ότι η γραμμή θραύσεως είναι ευθύγραμμη και παράλληλη προς την ίσαλο γραμμή. Αυτό αληθεύει στην περίπτωση, που οι ορθογωνικές των κυματισμών στα ανοικτά είναι κάθετες προς την ευθύγραμμη ίσαλο

γραμμή. Αν οι κορυφογραμμές των κυμάτων στα ανοικτά σχηματίζουν γωνία β_0 με την ευθύγραμμη ίσαλο γραμμή, η γραμμή θραύσεως είναι κεκλιμένη και σχηματίζει γωνία $\beta_b (< \beta_0)$ με την ίσαλο γραμμή.

Μετά τη θραύση η μορφή της ροής μεταβάλλεται ριζικά. Οι συνθήκες ροής μετά τη θραύση είναι κρίσιμες στην ευστάθεια μιας κεκλιμένης λιμενικής κατασκευής από λιθορριπή, λόγω των φαινομένων συντονισμού, που παρατηρούνται μερικές φορές. Το ύψος του υδάτινου στρώματος πάνω από την κατασκευή μεταβάλλεται μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής σε μία περίοδο κύματος. Η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τιμών συνηθίζεται να ονομάζεται ύψος κύματος στη ζώνη μετά τη θραύση, αν και στην πραγματικότητα η υφή κύματος έχει καταστραφεί στη θραύση. Το ύψος κύματος στη ζώνη αυτή μειώνεται μεταξύ της γραμμής θραύσεως και της ισάλου γραμμής.

Η θραύση των κυμάτων ήταν από τα πρώτα δυναμικά φαινόμενα της θαλάσσιας υδραυλικής, που συγκέντρωσε την προσοχή των ερευνητών. Άλλωστε είναι ο θεαματικότερος φυσικός μηχανισμός στη θάλασσα. Η έρευνα στη θραύση πήρε σημαντική έκταση και βάθος, ιδιαίτερα τα λίγα τελευταία χρόνια, σ' ένα σημαντικό αριθμό ερευνητικών κέντρων. Το ενδιαφέρον στη θραύση δικαιολογείται από το μεγάλο αριθμό φυσικών φαινομένων, που επηρεάζονται από αυτήν. Φαινόμενα όπως οι φορτίσεις κατασκευών, η δημιουργία ρευμάτων, η διάβρωση και η πρόσχωση των ακτών, η μεταφορά φερτών υλών, οι κινήσεις των σκαφών, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την θραύση των κυμάτων.

Παρόλο όμως το ενδιαφέρον αριθμού επιστημόνων μπορεί να λεχθεί, ότι πολύ λίγο έχει κατανοηθεί μέχρι σήμερα η θραύση. Αυτό εξάλλου φαίνεται από την εμπειρική φύση, που επικρατεί ακόμη στην προσέγγισή τους. Σχεδόν όλες οι μαθηματικές εξισώσεις, οι αναφερόμενες σ' αυτήν προέκυψαν από επεξεργασία πειραματικών δεδομένων ή από εμπειρικούς συλλογισμούς. Ένας τέτοιος επιτυχημένος εμπειρικός συλλογισμός είναι το κριτήριο της θραύσεως. Σύμφωνα μ' αυτό η θραύση εμφανίζεται, όταν για πρώτη φορά η οριζόντια ταχύτητα u του υγρού σωματιδίου στην κορυφή του κύματος υπερβεί σε μέγεθος την ταχύτητα φάσεως C του κύματος. Ο συλλογισμός αυτός επέτρεψε την κατάστρωση μιας μαθηματικής σχέσεως για τη θέση της γραμμής θραύσεως, που πολλές φορές επαληθεύτηκε από πειραματικά αποτελέσματα.

Η δυσκολία της αυστηρής μαθηματικής περιγραφής της θραύσεως των κυμάτων οφείλεται στην έλλειψη γνώσεων επί της αστάθειας της ροής, που προξενεί τη θραύση. Για το λόγο αυτό όλες οι προσπάθειες, που έχουν γίνει για την κατάστρωση μαθηματικών μοντέλων, περιλαμβάνουν και εμπειρικές σχέσεις ή εμπειρικά κριτήρια. (Κ.Ι. Μουτζούρης)

Το πρώτο μαθηματικό μοντέλο περιγραφής της θραύσεως των κυμάτων καταστρώθηκε από τον Γάλλο θεωρητικό Biesel. Ένα άλλο μοντέλο, που συγκέντρωσε μεγάλο αριθμό συζητήσεων, καταστρώθηκε το 1977 από τους Cokelet and Longuet-Higgins.

2.3 ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ

Η μελέτη της κυματικής μετάδοσης σε ύφαλο κυματοθραύστη θα γίνει με πειραματικές μεθόδους δηλαδή με την κατασκευή του ομοιώματος. Το ομοίωμα και οι απαιτούμενες μετατροπές θα έχουν χαμηλό κόστος, ενώ το ίδιο μελετάται εύκολα. Με το ομοίωμα μπορούν να αναπαρασταθούν οι συνθήκες του περιβάλλοντος και οι πολύπλοκες διεργασίες που συμβαίνουν στην κυματική μετάδοση στο πραγματικό έργο (Ρογκάν, 1981).

Μεταξύ πρωτότυπου και ομοιώματος υπάρχουν αναλογίες που ονομάζονται ομοιότητες (γεωμετρικής, κινηματικής, δυναμικής τάξης). Σε όμοια συστήματα υπάρχει αμφομονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των στοιχείων τους και τα αντίστοιχα μεγέθη, στοιχεία λέγονται ομόλογα. Η ομοιότητα μεταξύ πρωτότυπου και ομοιώματος μπορεί να είναι μόνο γεωμετρική ή κινηματική ή δυναμική. Για να φανεί ποιο είδος ομοιότητας πρέπει να υπάρξει μεταξύ πρωτοτύπου και ομοιώματος απαιτείται προσεκτική εξέταση του προβλήματος. Οι συνθήκες ομοιότητας είναι σχέσεις που μεταφράζουν τις ομοιότητες μεταξύ του πρωτοτύπου και ομοιώματος. Διακρίνονται τρία είδη ομοιότητας:

- Γεωμετρική ομοιότητα: Αναφέρεται στην ομοιότητα των σχημάτων των δύο συστημάτων. Στη γεωμετρική ομοιότητα απαιτείται σταθερός λόγος των ομόλογων (αντίστοιχων) γραμμικών διαστάσεων. Ο λόγος των ομόλογων γραμμικών διαστάσεων (σταθερά) ορίζεται ως η γεωμετρική κλίμακα ή κλίμακα μηκών.
- Κινηματική ομοιότητα: Όταν δύο συστήματα είναι κινηματικά όμοια τότε τα ομόλογα (αντίστοιχα) σωματίδια βρίσκονται σε ομόλογες (αντίστοιχες) θέσεις στις ομόλογες χρονικές στιγμές. Απ' αυτό προκύπτει ότι:
 - Σε σταθερή ροή οι τροχιές των σωματιδίων είναι καμπύλες γεωμετρικά όμοιες.

- Ο λόγος των χρόνων στους οποίους διανύονται ομόλογα διαστήματα είναι σταθερός και λέγεται κλίμακα χρόνων (Γ. Νουτσόπουλος – Γ.Χριστοδούλου, 1996).
- Δυναμική ομοιότητα: Δύο συστήματα είναι δυναμικά όμοια, αν οι συνολικές δυνάμεις, αλλά και οι επιμέρους συνιστώσες που ασκούνται σε ομόλογα ρευστά στοιχεία είναι ανάλογες. Δηλαδή ο λόγος των αντίστοιχων δυνάμεων συνισταμένων, συνιστωσών σε ομόλογα ρευστά στοιχεία διατηρείται σταθερός. Τα δυναμοπολύγωνα σε αντίστοιχα σημεία στα δύο συστήματα είναι γεωμετρικά όμοια.

Αν μεταξύ δύο συστημάτων υπάρχει όμοια κατανομή μάζας και κινηματική ομοιότητα, τότε από τη σχέση $F = m \cdot \gamma$ εξασφαλίζεται ο σταθερός λόγος των συνολικών δυνάμεων σε ομόλογα ρευστά στοιχεία. Άρα επιτρέπεται κατ' αρχήν ομοιότητα μάζας και κινηματική ομοιότητα. Επιπλέον πρέπει να διατηρηθεί σταθερός και ο λόγος των επιμέρους συνιστωσών δυνάμεων.

Ο κυματισμός θεωρείται ως ροή, με μία ή περισσότερες ελεύθερες επιφάνειες, μέσα στο πεδίο βαρύτητας, ενώ η θάλασσα ως πραγματικό ασυμπίεστο ρευστό. Η ροή περιγράφεται από τις εξισώσεις κίνησης Navier – Stokes και την εξίσωση συνέχειας. Οι δυνάμεις που δρουν σε ένα ρευστό σωματίδιο είναι δυνάμεις αδράνειας, πίεσης, ιξώδους και βαρύτητας. Οι αδιάστατοι αριθμοί Reynolds και Froude ορίζονται ως εξής:

$$R = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \text{δυνάμεις αδράνειας} / \text{δυνάμεις συνεκτικότητας} \quad (2.3 \alpha)$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{D \cdot g}} = \text{δυνάμεις αδράνειας} / \text{δυνάμεις βαρύτητας} \quad (2.3 \beta)$$

D (m)	:	χαρακτηριστική γραμμική διάσταση
V(m/s)	:	χαρακτηριστική ταχύτητα ροής
$\rho(\text{kg/m}^3)$:	πυκνότητα ρευστού
$\mu(\text{kg/ms})$:	συνεκτικότητα του ρευστού
$g(\text{m/s}^2)$:	επιτάχυνση της βαρύτητας

Οι αδιάστατοι αριθμοί δίνουν ένα μέτρο του σχετικού μεγέθους της συγκεκριμένης συνιστώσας και της επίδρασης που έχει στη ροή. Η αριθμητική τιμή του αριθμού του Froude δίνει μια τάξη μεγέθους της σπουδαιότητας που έχει η δύναμη της βαρύτητας στη ροή. Έχει ιδιαίτερη σημασία σε ροές με ελεύθερη επιφάνεια γιατί διέπονται από τη βαρύτητα.

Η δυναμική ομοιότητα σημαίνει ότι τα τετράπλευρα των δυνάμεων πάνω σε ομόλογα ρευστά σωματίδια είναι όμοια. Δηλαδή ο λόγος δύο οποιωνδήποτε δυνάμεων από τις τέσσερις είναι ο ίδιος στις δύο ροές. Άρα η πλήρης ομοιότητα δύο ροών σε ελεύθερη επιφάνεια απαιτεί δύο συνθήκες: (Ρογκάν, 1981).

$$R_1 = R_2 \quad (\text{συνθήκη του Reynolds})$$

$$F_1 = F_2 \quad (\text{συνθήκη του Froude})$$

Πρακτικά δύο ροές με ελεύθερη επιφάνεια έχουν μία μόνο συνθήκη ομοιότητας, τη συνθήκη του Froude.

$$\frac{V_1^2}{g \cdot L_1} = \frac{V_2^2}{g \cdot L_2} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (2.4)$$

$$\text{Ταχύτητα } V = L \cdot T^{-1}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{L_2 \cdot T_2^{-1}}{L_1 \cdot T_1^{-1}} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

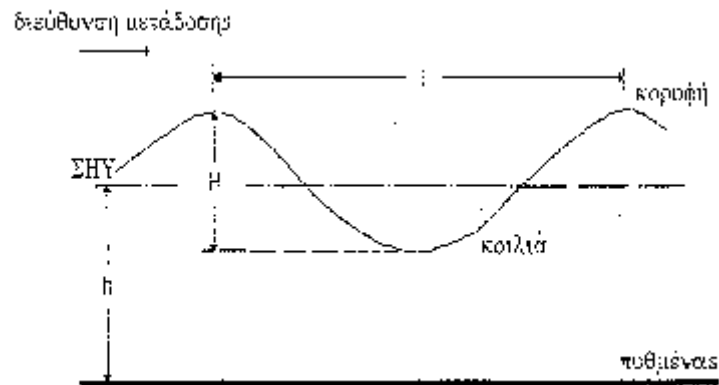
Δηλαδή:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.6)$$

Η σχέση δίνει την περίοδο των κυμάτων που πρέπει να φορτίσουν το ομοίωμα (όπου έχει επιλεγθεί η γεωμετρική κλίμακα).

2.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Τα χαρακτηριστικά των δισδιάστατων μονοχρωματικών κυματισμών βαρύτητας και οι αντίστοιχοι ορισμοί τους συνοψίζονται ακολούθως:



Σχήμα 2.4.1 – Τυπική διατομή κύματος.

- **H (m):** Ύψος κύματος είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλίας του κύματος. Ισούται δηλαδή με το διπλάσιο του εύρους ταλάντωσης των σωματιδίων.

- **L (m):** Μήκος κύματος είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλάντωσης. Μετράται κατά μήκος της διεύθυνσης μετάδοσης.
- **γ (m/m):** (H/L) Καμπυλότητα ή κυρτότητα κύματος.
- **Μέτωπο κύματος:** Είναι ένα επίπεδο κάθετο προς το επίπεδο ταλαντώσεως και εφαπτόμενο στη διατομή του κύματος.
- **Διεύθυνση μεταδόσεως (ή ακτίνα κύματος):** Είναι η κάθετη γραμμή προς το μέτωπο του κύματος η οποία κείται στο επίπεδο ταλάντωσης.
- **T (sec):** Περίοδος κύματος είναι ο χρόνος μιας πλήρους ταλάντωσης των σωματιδίων. Ορίζεται και σαν το χρονικό διάστημα μεταξύ της διελεύσεως δύο διαδοχικών κορυφών κύματος από το ίδιο σημείο.
- **C (m):** Ταχύτητα κύματος (ή ταχύτητα φάσεως) είναι η απόσταση, που διανύεται από το μέτωπο του κύματος στη μονάδα του χρόνου. Ορίζεται ως $C=L/T$.
- **Διατομή κύματος:** Είναι η κατακόρυφη διατομή του κατά τη διεύθυνση μετάδοσης
- **Κορυφή κύματος:** Είναι το υψηλότερο σημείο του πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία
- **Κοιλία κύματος:** Είναι το χαμηλότερο σημείο του κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.
- **h (m):** Βάθος νερού είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία πάνω από τον πυθμένα.
- **h/L (m/m):** Σχετικό βάθος νερού.
- **k (m⁻¹):** ($=2\pi/L$) Αριθμός κύματος.
- **ΣΗΥ:** Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος είναι η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.

2.5 ΘΕΩΡΙΕΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΠΡΟΩΘΟΥΜΕΝΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Κατά το παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορες μαθηματικές θεωρίες με σκοπό την ποσοτική περιγραφή των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών προωθούμενων δισδιάστατων κυματισμών που διαδίδονται στο κατακόρυφο επίπεδο (Oxz) με αμετάβλητη μορφή κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Ο LeMehaute (1969), καθόρισε τις περιοχές εφαρμογής των θεωριών ανάλογα με τις τιμές των αδιάστατων παραμέτρων ε και σ^2 και της παράγωγης παραμέτρου Ursell, $U_R = \varepsilon / \sigma^2$. Η παράμετρος ε ορίζεται σαν ο λόγος του ύψους κύματος προς το βάθος, $\varepsilon = H/d$, ενώ η σ^2 είναι το τετράγωνο του λόγου του βάθους προς ένα χαρακτηριστικό οριζόντιο μήκος (λαμβάνεται συνήθως ίσο με το μήκος κύματος), $\sigma^2 = (d/L)^2$, οπότε $U_R = L^2 H / d^3$.

Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι βασικές αρχές των θεωριών των γραμμικών διασπειρόμενων κυματισμών. Με τον όρο γραμμικοί χαρακτηρίζονται κυματισμοί των οποίων το προφίλ παρουσιάζει συμμετρία και προς τον οριζόντιο (Ox) και προς τον κατακόρυφο (Oz) άξονα, περιγράφεται δε από μια αρμονική (ημιτονοειδή) συνάρτηση.

2.5.1 Θεωρία γραμμικών κυματισμών απειροστού εύρους (Airy ή Stokes 1^{ης} τάξης)

Για μικρές διαταραχές της ελεύθερης επιφάνειας (μικρό εύρος κύματος $\rightarrow \alpha/L \ll 1$) οι οριακές συνθήκες στην ελεύθερη επιφάνεια γραμμικοποιούνται, και μαζί με την εξίσωση Laplace αποτελούν ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται με τη μέθοδο των χωριζόμενων μεταβλητών (Δερμίσης, 1988). Η λύση που προκύπτει είναι αρμονική ως προς τον χρόνο t και την οριζόντια απόσταση x και δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{Hg}{2\omega} \cdot \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.7)$$

Η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι της μορφής:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (2.8)$$

Με αντικατάσταση των σχέσεων (2.7) και (2.8) στην κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (2.9)$$

η οποία είναι γνωστή σαν εξίσωση διασποράς γιατί σε παράγωγη μορφή

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh kd \quad (2.10)$$

υποδηλώνει ότι η φασική ταχύτητα είναι αύξουσα συνάρτηση της περιόδου του κύματος και κατά συνέπεια ένας κυματισμός που συντίθεται από μία σειρά ημιτονοειδών κυμάτων με διαφορετικές περιόδους κατά τη διάδοσή του, διασπείρεται καθώς οι συνιστώσες με τις μεγαλύτερες περιόδους διαδίδονται ταχύτερα (Κουτίτας, 1994).

Από την εξίσωση διασποράς προκύπτει και η έκφραση για το μήκος κύματος L :

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (2.11)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας των ρευστών σωματιδίων, u και w κατά τη διεύθυνση x και z αντίστοιχα, προκύπτουν σαν παράγωγα μεγέθη από τη συνάρτηση δυναμικού Φ και είναι:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.13)$$

Η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας u έχει την ίδια φάση με την ελεύθερη επιφάνεια ζ . Επομένως, τα στοιχεία του νερού κινούνται κατά την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος όταν βρίσκονται κάτω από κορυφή, ενώ αντίθετα προς αυτήν όταν βρίσκονται κάτω από κοιλία. Η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας έχει διαφορά φάσης 90° με την ελεύθερη επιφάνεια (Δερμίσης, 1988).

Αν θεωρήσουμε τη $\theta = kx - \omega t$ σταθερή και θέσουμε

$$u_0 = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\tanh kd} \cdot \cos \theta, \quad w_0 = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{\tanh kd} \cdot \sin \theta \quad (2.14\alpha, \beta)$$

Τότε οι παραπάνω σχέσεις μετασχηματίζονται στις:

$$u = u_0 \cdot \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd}, \quad w = w_0 \cdot \frac{\sinh k(d+z)}{\cosh kd} \quad (2.15\alpha, \beta)$$

Από τις σχέσεις αυτές γίνεται φανερό ότι το εύρος των συνιστωσών της ταχύτητας μειώνεται εκθετικά με το βάθος z . Μάλιστα, για τα βάθη μεγαλύτερα του $L/2$ τα $|u(z)|$ και $|w(z)|$ είναι αμελητέα. Πράγματι:

$$\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} = \frac{e^{kd+kz} + e^{-kd-kz}}{e^{kd} + e^{-kd}} < \frac{e^{kd} \cdot e^{kz} + e^{-kd} \cdot e^{-kz}}{e^{kd}} = e^{kd} + e^{-2kd} \cdot e^{-kz} = e^{kz} \cdot (1 + e^{-2kd} \cdot e^{-2kz}) \quad (2.16)$$

Οπότε για $z = -\frac{L}{2}$, δηλαδή $d \geq \frac{L}{2}$:

$$\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} < 2e^{-\pi} = 0,086 \quad (2.17)$$

Ειδικότερα η τιμή $|u(z)|$ στην ελεύθερη επιφάνεια είναι μεγαλύτερη της αντίστοιχης τιμής της στο βάθος $L/2$ τουλάχιστον κατά μία τάξη μεγέθους. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και για την $|w(z)|$ (Δερμίσης, 1988).

Οι πιο πάνω εξισώσεις για τα c , L , u και w ισχύουν γενικά αλλά για τις ακραίες περιπτώσεις βαθιών νερών ($d/L > 0,5$) ή ρηχών νερών ($d/L < 0,05$) η ασυμπτωτική τάση του $\tanh kd$ προς τη μονάδα και το όρισμά του αντίστοιχα, οδηγεί στις εξισώσεις «βαθιών» και «ρηχών» νερών αντίστοιχα:

Εξισώσεις βαθιών νερών:

$$c_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (2.18)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (2.19)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot e^{kz} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2.20)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \cdot \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.21)$$

Εξισώσεις ρηχών νερών:

$$c = \sqrt{gd} \quad (2.22)$$

$$L = T \cdot \sqrt{gd} \quad (2.23)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{1}{kd} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (2.24)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \cdot \left(1 + \frac{z}{d}\right) \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (2.25)$$

Σχηματοποίηση των τροχιών των στοιχείων του ρευστού για τις περιπτώσεις μεγάλου και μικρού βάθους

2.5.2. Μη γραμμικές θεωρίες

Οι πρώτες προσεγγίσεις του προβλήματος των μη γραμμικών προωθούμενων κυματισμών σε νερά σταθερού βάθους έγιναν από τον Stokes (1847) και τους Korteweg και De Vries (1895). Με βάση τις εργασίες αυτές, αναπτύχθηκαν οι θεωρίες ανώτερης τάξης Stokes, 2^{ης} έως και 5^{ης} τάξης για βαθιά νερά και Cnoidal, 1^{ης} έως και 5^{ης} τάξης για ρηχά νερά. Στο πρόσφατο παρελθόν παρουσιάστηκε και μία σειρά από θεωρίες, που βασίζονται στην ανάπτυξη σε πεπερασμένες σειρές Fourier της ροϊκής συνάρτησης Ψ , γνωστές σαν «θεωρίες της Ροϊκής Συνάρτησης» (Stream Function Theories). Οι παραπάνω θεωρίες μη γραμμικών κυματισμών προβλέπουν συμμετρικά ως προς την κατακόρυφο προφίλ ελεύθερης επιφάνειας, όμως γενικότερα στη φύση οι μη γραμμικοί κυματισμοί παρουσιάζουν και κατακόρυφη ασυμμετρία. Σε αυτές τις περιπτώσεις ένα αριθμητικό μοντέλο μη γραμμικών κυματισμών (τύπου Boussinesq) μπορεί να δώσει ικανοποιητικότερα αποτελέσματα.

2.5.2.1 Θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Οι θεωρίες Stokes ανώτερης τάξης δίνουν μια προσεγγιστική λύση στο μη γραμμικό πρόβλημα βασιζόμενες στην κλασσική μέθοδο των μικρών διαταραχών (perturbation method). Κατά τη μέθοδο αυτή, κάθε εξαρτημένη μεταβλητή εκφράζεται σαν μία πεπερασμένη σειρά δυνάμεων (δυναμοσειρά) μίας μικρής αδιάστατης παραμέτρου $\epsilon = KH/2$, η οποία, στην περίπτωση των κυματισμών, σχετίζεται με το ύψος και το μήκος κύματος. Οι όροι της σειράς υπολογίζονται από την λύση του συστήματος των εξισώσεων, που προκύπτουν από την ικανοποίηση των οριακών συνθηκών στην ελεύθερη επιφάνεια.

Σύμφωνα με τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης η συνάρτηση δυναμικού Φ δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = \frac{Hg}{2\omega} \cdot \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) + \frac{3\pi H^2}{16T} \cdot \frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^4 kd} \cdot \sin 2(kz - \omega t) \quad (2.26)$$

Η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας έχει τη μορφή:

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8L} \cdot \frac{\cosh kd}{\sinh^3 kd} \cdot (\cos 2kd + 2) \cdot \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.27)$$

Η σχέση της διασποράς της θεωρίας δεύτερης τάξης ταυτίζεται με την αντίστοιχη της πρώτης τάξης, είναι δηλαδή:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (2.28)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας ενός ρευστού στοιχείου, σε οποιαδήποτε θέση x, z της μάζας του ρευστού, είναι:

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cdot \cos(kx - \omega t) + \frac{3\pi^2 H^2}{4 TL} \cdot \frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^4 kd} \cdot \cos 2(kx - \omega t) \quad (2.29)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) + \frac{3\pi^2 H^2}{4 TL} \cdot \frac{\sinh 2k(d+z)}{\sinh^4 kd} \cdot \sin 2(kx - \omega t) \quad (2.30)$$

2.5.2.2 Θεωρία Stokes 3^{ης} τάξης

Η έκφραση για τη συνάρτηση δυναμικού αν θέσουμε $\theta = kx - \omega t$ είναι:

$$\Phi = \frac{cL}{2\pi} \cdot \left[F_1 \cdot \cosh 2k(d+z) \cdot \sin \theta + \frac{1}{2} F_2 \cdot \cosh 2k(d+z) \cdot \sin 2\theta + \frac{1}{3} F_3 \cdot \cosh 3k(d+z) \cdot \sin 3\theta \right] \quad (2.31)$$

Όπου

$$F_1 = \frac{2\pi b}{L} \cdot \frac{1}{\sinh kd} - \left(\frac{2\pi b}{L} \right)^2 \cdot \frac{(1+5\cosh^2 kd) \cdot \cosh^2 kd}{8\sinh^2 kd} \quad (2.32)$$

$$F_2 = \frac{3}{4} \cdot \left(\frac{2\pi b}{L} \right)^2 \cdot \frac{1}{8\sinh^2 kd} \quad (2.33)$$

$$F_3 = \frac{3}{64} \cdot \left(\frac{2\pi b}{L} \right)^3 \cdot \frac{11-2\cosh 2kd}{\sinh^7 kd} \quad (2.34)$$

Και b μία παράμετρος μήκους συνδεόμενη με το ύψος του κύματος H με τη σχέση:

$$H = 2b + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{L}\right)^2 \cdot b^3 \cdot f_3 \quad (2.35)$$

Η παράμετρος f_3 δίνεται από τη σχέση:

$$f_3 = \frac{3}{16} \cdot \frac{1+8\cosh^6 kd}{\sinh^6 kd} \quad (2.36)$$

Η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι:

$$\zeta = b \cdot \cos\theta + \frac{\pi b^2}{L} \cdot f_2 \cdot \cos 2\theta + \frac{\pi^2 b^3}{L^2} \cdot f_3 \cdot \cosh 3\theta \quad (2.37)$$

Όπου

$$f_2 = \frac{2+\cosh 2kd}{2\sinh^3 kd} \cdot \cosh kd \quad (2.38)$$

Η σχέση διασποράς της θεωρίας τρίτης τάξης είναι διαφορετική από την αντίστοιχη της πρώτης και δεύτερης τάξης και γράφεται:

$$\omega^2 = \frac{g}{k} \cdot \tanh kd \cdot \left[1 + \left(\frac{2\pi b}{L}\right)^2 \cdot \frac{14+4\cosh^2 2kd}{16\sinh^4 kd} \right] \quad (2.39)$$

Τέλος οι συνιστώσες u και w της ταχύτητας δίνονται από τις σχέσεις:

$$\frac{u}{c} = F_1 \cdot \cosh k(d+z) \cdot \cos\theta + F_2 \cdot \cosh 2k(d+z) \cdot \cos 2\theta + F_3 \cdot \cosh 3k(d+z) \cdot \cos 3\theta \quad (2.40)$$

$$\frac{w}{c} = F_1 \cdot \sinh k(d+z) \cdot \sin\theta + F_2 \cdot \sinh 2k(d+z) \cdot \sin 2\theta + F_3 \cdot \sinh 3k(d+z) \cdot \sin 3\theta \quad (2.41)$$

2.5.2.3 Θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης

Η πιο πρόσφατη θεωρία Stokes είναι η Stokes 5^{ης} τάξης για κυματισμούς σταθερής μορφής που παρουσίασε ο Fenton (1985). Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, η λύση δίνεται σαν ένας αριθμός αναπτυγμάτων δυναμοσειρών που παραλείπονται μετά την πέμπτη τάξη. Η λύση παρουσιάζεται σε όρους του αδιάστατου ύψους κύματος $\epsilon = \frac{\kappa H}{2}$ και του αδιάστατου βάθους kd , όπου $\kappa = \frac{2\pi}{L}$ ο αριθμός κύματος.

Η έκφραση για τη συνάρτηση δυναμικού, σε ένα σύστημα αναφοράς κινούμενο με την ταχύτητα προώθησης c είναι:

$$\Phi(x, z) = -ux + C_0 \left(\frac{g}{k^3}\right)^{1/2} \sum_{i=1}^5 \epsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh jkz \cdot \sin jkx + O(\epsilon^6) \quad (2.42)$$

όπου \bar{u} η μέση οριζόντια ταχύτητα του ρευστού (mean horizontal fluid velocity), η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{u} \left(\frac{k}{g} \right)^{\frac{1}{2}} = C_0 + \epsilon^2 C_2 + \epsilon^4 C_4 + O(\epsilon^6) \quad (2.43)$$

Η εξίσωση για το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας είναι:

$$k\zeta(x) = kd + \epsilon \cos kx + \epsilon^2 B_{22} \cos 2kx + \epsilon^3 B_{31} (\cos kx - \cos 3kx) + \epsilon^4 (B_{42} \cos 2kx + B_{44} \cos 4kx + \epsilon^5 - B_{53} + B_{55} \cos kx + B_{53} \cos 3kx + B_{55} \cos 5kx + O(\epsilon^6)) \quad (2.44)$$

Η μέση ειδική παροχή κάτω από τον κυματισμό δίνεται από τη σχέση:

$$Q \left(\frac{k^3}{g} \right)^{\frac{1}{2}} = C_0 kd + \epsilon^2 (C_2 kd + D_2) + \epsilon^4 (C_4 kd + D_4) + O(\epsilon^6) = \bar{u} \left(\frac{k^3}{g} \right)^{\frac{1}{2}} + \epsilon^2 D_2 + \epsilon^4 D_4 + O(\epsilon^6) \quad (2.45)$$

Οι αδιάστατοι συντελεστές A_{ij} , B_{ij} , C_i , D_i είναι συναρτήσεις μόνο του αδιάστατου βάθους kd και οι εκφράσεις τους δίνονται στο παράρτημα Α.

Η ταχύτητα προώθησης c δίνεται από:

$$c = \bar{u} + c_E = \frac{Q}{d} + c_s \quad (2.46)$$

Όπου c_E είναι η μέση ως προς τον χρόνο ταχύτητα του ρευστού (Eulerian timemean fluid velocity) και c_s η μέση ως προς το βάθος ταχύτητα μεταφοράς μάζας (depth averaged Stokes mass transport velocity).

Η \bar{u} είναι ίση με την c σε ένα σύστημα αναφοράς ως προς το οποίο η ταχύτητα του ρεύματος είναι μηδέν, και άρα για τους γραμμικούς κυματισμούς $\bar{u} = \frac{Q}{a}$.

Από τα προηγούμενα είναι φανερό ότι για τον προσδιορισμό της ταχύτητας προώθησης c θα πρέπει να είναι γνωστή η τιμή της c_s ή της c_E . Συνήθως όμως οι τιμές αυτές είναι άγνωστες και γι αυτό στις πρακτικές εφαρμογές κάνουμε την παραδοχή ότι $c_s=0$.

Η θεωρία αυτή έχει επιβεβαιωθεί σαν θεωρητικά ορθή, για την ακρίβεια 5^{ης} τάξης της δυναμικής οριακής συνθήκης στην επιφάνεια (Fenton, 1985), ενώ ταυτόχρονα βρίσκεται σε ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά δεδομένα, με την παραδοχή $c_s=0$ (Huang, 1990, Sobey, 1990).

Το πεδίο ισχύος της θεωρίας Stokes 5^{ης} τάξης είναι η περιοχή όπου $d/L > 1/10$. Για μακρύτερους κυματισμούς θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η θεωρία Cnoidal ή η θεωρία Ροϊκής Συνάρτησης που περιγράφονται παρακάτω. Ακόμα όμως και εντός του πεδίου εφαρμογής της, στην περίπτωση μεγάλων κυματισμών η λύση παρουσιάζει στην κοιλία του κυματισμού δευτερεύουσες ταλαντώσεις.

2.5.2.4 Θεωρία Cnoidal 1^{ης} τάξης

Η πρώτη θεωρία μακρών μη γραμμικών περιοδικών κυματισμών αναπτύχθηκε από τους Korteweg και DeVries (1895) οι οποίοι έδειξαν ότι η πρώτη προσέγγιση στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας ενός μη γραμμικού σταθερά προωθούμενου κύματος στα ρηγά νερά, δίνεται από το ελλειπτικό συνημίτονο της φάσης θ και μιας παραμέτρου m ($0 \leq m < 1$). Ο Laitone (1960) παρουσίασε μια προσέγγιση δεύτερης τάξης των κυμάτων Cnoidal, ενώ η βάση για μία θεωρία 5^{ης} τάξης τέθηκε σχετικά πρόσφατα από τον Fenton (1979).

Οι Keulegan και Patterson (1940) καθόρισαν σαν περιοχή εφαρμογής της θεωρίας Cnoidal την $1/50 < d/L < 1/10$, ενώ οι Laitone et al. (1963) την $d/L < 1/8$ με τιμές της παραμέτρου Ursell, U_R μεγαλύτερες από 26. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η θεωρία 1^{ης} τάξης, η οποία εφαρμόζεται για σχετικά μικρές τιμές του λόγου d/H .

Από την επίλυση της εξίσωσης των Korteweg και DeVries (1895) προκύπτει εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\zeta = \zeta_{min} + H \cdot cn^2 \left[\frac{2K}{L} (x - ct), b \right] \quad (2.47)$$

Όπου $cn(\theta, m)$ η ελλειπτική συνάρτηση συνημίτονου.

Αν θέσουμε

$$\frac{\theta}{2K} = \frac{t}{T} - \frac{x}{L} \text{ και } m=b^2 \text{ με } m < 1$$

Τότε

$$\frac{\zeta}{H} = \frac{\zeta_{min}}{H} + cn^2(\theta, m) \quad (2.48)$$

Στις προηγούμενες σχέσεις ζ_{min} είναι η απόσταση της κοιλίας από τη στάθμη ηρεμίας η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\zeta_{min} = H \left[-1 + \frac{1}{m} \left(1 - \frac{E}{K} \right) \right] \quad (2.49)$$

Όπου οι παράμετροι K και E είναι τα πλήρη ελλειπτικά ολοκληρώματα πρώτου και δεύτερου είδους που ορίζονται από τις σχέσεις:

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1-m\sin^2\varphi}} = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{1}{2^2}m + \frac{1 \cdot 3^2}{2^2 \cdot 4^2}m^2 + \frac{1 \cdot 3^2 \cdot 5^2}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2}m^3 + \dots \right) \quad (2.50)$$

$$E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1-m\sin^2\varphi} d\varphi = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{1}{2^2}m + \frac{1 \cdot 3^2}{2^2 \cdot 4^2}m^2 - \frac{1 \cdot 3^2 \cdot 5^2}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2}m^3 + \dots \right) \quad (2.51)$$

Η τιμή της $\text{cn}^2(\theta, m)$ προσδιορίζεται με τη βοήθεια διαγράμματος συναρτήσεως της $\theta/2K$ με παράμετρο την U_R η οποία μπορεί να γραφεί:

$$U_R = \frac{HL^2}{d^3} = \frac{16}{3}mK^2 \quad (2.52)$$

Οι παράμετροι $U_R=f(m, K)=f(m, g(m))$, K , E , και ζ_{\min}/H είναι οι συναρτήσεις του m . Τότε είναι αντίστοιχα $m=m(U_R)$, $K=K(U_R)$, $E=E(U_R)$ και $\zeta_{\min}/H=f_1(U_R)$ (Δερμίσσης, 1988).

Η εξίσωση της ταχύτητας διάδοσης του κύματος σύμφωνα με τους Keulegan και Patterson (1940) και Littman (1957) είναι:

$$c = \left[gd \left(1 + A \frac{H}{d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = (gd)^{\frac{1}{2}} \left(1 + A \frac{H}{d} \right) + O \left(\frac{H}{d} \right)^2 \quad (2.53)$$

Και

$$\omega^2 = gdk^2 \left(1 + A \frac{H}{2d} \right) \quad (2.54)$$

Όπου

$$A = \frac{1}{m} \left(2 - 3 \frac{E}{K} - m \right) \quad (2.55)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας σε τυχόν σημείο του ρευστού x, z προκύπτουν από τις εξισώσεις των Keulegan και Patterson (1940):

$$\frac{u}{\sqrt{gd}} = -\frac{5}{4} + \frac{3d_t}{2d} - \frac{d_t^2}{4d^2} + \left(\frac{3H}{2h} - \frac{d_t H}{2h^2}\right) \cdot cn^2(\theta, m) - \frac{H^2}{4d^2} \cdot cn^4(\theta, m) - \frac{8HK^2}{L^2} \cdot \left(\frac{d}{3} - \frac{z^2}{2d}\right) \cdot [-msn^2(\theta, m) \cdot cn^2(\theta, m) + cn^2(\theta, m) \cdot dn^2(\theta, m) - sn^2(\theta, m) \cdot dn^2(\theta, m)] \quad (2.56)$$

$$\frac{w}{\sqrt{gd}} = z_0 \cdot \frac{2HK}{Ld} \cdot \left\{ 1 + \frac{d_t}{d} + \frac{H}{d} \cdot cn^2(\theta, m) + \frac{32K^2}{3L^2} \cdot \left(d^2 - \frac{z^2}{2}\right) \cdot [msn^2(\theta, m) - mcn^2(\theta, m) \cdot dn^2(\theta, m) \cdot sn(\theta, m) \cdot cn(\theta, m) \cdot dn(\theta, m)] \right\} \quad (2.57)$$

Όπου $d_t = d_{\min}$ και οι ελλειπτικές συναρτήσεις sn και dn προκύπτουν, όταν είναι γνωστή η cn από τις ταυτότητες:

$$sn^2(\theta, m) = 1 - cn^2(\theta, m) \quad (2.58)$$

$$dn^2(\theta, m) = 1 - m[1 - cn^2(\theta, m)] \quad (2.59)$$

2.5.2.5 Θεωρία Ροϊκής Συνάρτησης (Stream Function Theory)

Η θεωρία της ροϊκής συνάρτησης, βασίζεται στην ανάπτυξη σε πεπερασμένες σειρές Fourier της ροϊκής συνάρτησης Ψ . Υπενθυμίζεται ότι η ροϊκή συνάρτηση Ψ ορίζεται σε διδιάστατο πεδίο ροής ασυμπίεστου ρευστού από τις σχέσεις:

$$u = \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (2.60)$$

Και

$$w = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} \quad (2.61)$$

Αντικαθιστώντας τις (2.60,2.61) στη συνθήκη δισδιάστατης αστρόβιλης ροής ($\partial u/\partial z = \partial w/\partial x$) προκύπτει αντίστοιχα:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial \Psi}{\partial x} = 0 \quad (2.63)$$

$$z = -d$$

Ενώ η δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (εξίσωση Bernoulli) γράφεται:

$$\frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z} \right)^2 \right) + g\zeta = R \quad (2.64)$$

Όπου R μία θετική σταθερά.

Σε ένα κινούμενο σύστημα αναφοράς, με ταχύτητα c , ώστε να είναι σταθερός ο κυματισμός (μόνιμη ροή), η Ψ μπορεί να προσεγγιστεί:

$$\Psi(x, z) = -cz + \sum_{j=1}^N a_j \sin jkz \cdot \cos jkx \quad (2.65)$$

Όπου το N δηλώνει την τάξη της θεωρίας.

Η (2.65) ικανοποιεί ακριβώς την εξίσωση Laplace (2.62) και την οριακή συνθήκη πυθμένα (2.63), όχι όμως και την δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (2.64).

Μετά την αντικατάσταση της (2.65) στην (2.64), με ταυτόχρονη διακριτοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας από $x=0$ έως $x=L/2$, το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό της Ψ για $z=\zeta$, του R και των συντελεστών a_1, a_2, \dots, a_N .

Η κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια είναι της μορφής:

$$\Psi(x, \zeta(x)) = -Q \quad z = \zeta \quad (2.66)$$

Η ελεύθερη επιφάνεια διακριτοποιείται σε $M+1$ ίσα μέρη, από την κορυφή ως την κοιλία και έτσι οι παραπάνω εξισώσεις γίνονται:

$$\Psi(x_m, \zeta_m) = -Q \quad \text{για } m = 0, 1, 2, \dots, M \quad (2.67)$$

$$\frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}(x_m, \zeta_m) \right)^2 + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial z}(x_m, \zeta_m) \right)^2 \right) + g\zeta_m = R \quad (2.68)$$

$$H = \zeta_0 - \zeta_m \quad (2.69)$$

$$c = \bar{u} + c_E = \frac{Q}{d} + c_s \quad (2.70)$$

$$d = \frac{1}{M} \left(\frac{1}{2} \zeta_0 + \sum_{m=1}^M \zeta_m + \frac{1}{2} \zeta_m \right) \quad (2.71)$$

Όπου

$$x_m = (m - 1) \frac{L}{2M} \text{ και } \zeta_m = \zeta(x_m) \quad (2.72\alpha, \beta)$$

Οι σχέσεις (2.66) – (2.71) αποτελούν ένα μη γραμμικό σύστημα από $2M+1$ εξισώσεις με $M+N+6$ αγνώστους:

$$k, \bar{u}, c, Q \text{ και } R$$

$M+1$ τιμές της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας ζ και

N συντελεστές a_1, a_2, \dots, a_N .

Για $M = N$ το σύστημα έχει μοναδικά καθορισμένη λύση, ενώ για $M > N$ είναι υπερκαθορισμένο.

Οι Reinecker και Fenton (1981) προτείνουν για $M = N$ η επίλυση του μη γραμμικού συστήματος των εξισώσεων να γίνεται με την προσεγγιστική μέθοδο Newton. Η πρώτη προσέγγιση είναι συνήθως το γραμμικό ημιτονοειδές κύμα. Οι Dean και Dalrymple (1984) χρησιμοποίησαν την επαναληπτική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, παρόμοια με εκείνη των Chappellear (1961) και Dean (1965) που πρώτοι ασχολήθηκαν με τη μέθοδο.

Η εκλογή της τάξης της θεωρίας εξαρτάται από την περιοχή εφαρμογής της. Μικρές τιμές του N ($N=5$) μπορεί να δημιουργήσουν στα ρηχά νερά μη ρεαλιστικά μικρού μήκους παρασιτικά κύματα, τα οποία όμως δεν εμφανίζονται για μεγαλύτερες τιμές ($N=18$).

Η αριθμητική λύση, αφού γίνει και εδώ όπως και στην Stokes 5^{ης} τάξης η παραδοχή ότι $c_s=0$, δίνει τις τιμές των $\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_M$ των a_1, a_2, \dots, a_N και των k, \bar{u}, c, Q και R , από τις οποίες υπολογίζονται οι μεταβλητές $F(jk), \zeta(x), u(x,z)$ και $w(x,z)$ (Καραμπάς 1991).

2.5.3 Μαθηματικά ομοιώματα

Η αναγνώριση και η ποσοτική περιγραφή των υδροδυναμικών φαινομένων στον παράκτιο χώρο με σκοπό τη διαχείριση των παράκτιων ζωνών και το σχεδιασμό τεχνικών έργων (προστασίας ή ελλιμενισμού) οδηγούν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων στην ανάγκη κατάστρωσης και επίλυσης μαθηματικών ομοιωμάτων (μοντέλων) διάδοσης κυματισμών. Οι αναλυτικές μορφές για κύματα γραμμικά ή μη γραμμικά (θεωρίες πρώτης ή ανώτερης τάξης) που προϋποθέτουν απλά διαδιδόμενα κύματα σε νερό σταθερού βάθους, ή οι αναλυτικές και γραφικές λύσεις που προσεγγίζουν σύνθετα φαινόμενα διάθλασης, περίθλασης, ανάκλασης, ρήχωσης ή θραύσης των κυματισμών αυτοπεριορίζονται από απλοποιητικές παραδοχές που καθιστούν περιορισμένη την εφαρμοσιμότητά τους.

Ένα πλήρες μαθηματικό μοντέλο κυματισμών, με πεδίο εφαρμογής τα ενδιάμεσα και ρηχά νερά, θα πρέπει να περιγραφούν τα φαινόμενα διάθλασης, περίθλασης, ανάκλασης (μερικής και ολικής), της επίδρασης της ρηχότητας αλλά και ταυτόχρονα τη δημιουργία μακρών κυματισμών (κάτω από τις ομάδες των βραχέων) και ρευμάτων, κυρίως στη ζώνη θραύσης. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες παρέχονται από ένα μαθηματικό μοντέλο πρόγνωσης κυματισμών στα βαθιά νερά. Τα μοντέλα αυτά δίνουν ένα κατευθυντικό φάσμα, το οποίο μπορεί να αναλυθεί σε μία χρονοσειρά φασματικών κυματισμών η οποία αποτελεί και την αρχική οριακή συνθήκη των ομοιωμάτων μετάδοσης.

Υπάρχουν δύο μεγάλες ομάδες ομοιωμάτων: τα μη ολοκληρωμένα ως προς την περίοδο του κύματος (inter period) και τα ολοκληρωμένα ως προς την περίοδο (averaged over the period). Τα πρώτα προκύπτουν άμεσα από τις υδροδυναμικές εξισώσεις Navier – Stokes μετά από κάποιες παραδοχές. Η αριθμητική τους επίλυση δίνει σε κάθε χρονική στιγμή, μέσα στην περίοδο του κύματος, την ανύψωση ζ της ελεύθερης επιφάνειας και τις οριζόντιες ταχύτητες u και v . Στα δεύτερα, γίνεται η παραδοχή της ολοκλήρωσης ως προς την περίοδο T του κύματος και οι άγνωστες μεταβλητές είναι το ύψος κύματος H και το μήκος του L .

Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των ομοιωμάτων διάθλασης – περίθλασης που βασίζονται στην επίλυση της εξίσωσης ήπιας κλίσης (mild-slope

equation). Τα ομοιώματα της κατηγορίας αυτής χρησιμοποιούνται ευρύτατα τα τελευταία χρόνια, τόσο σε ερευνητικό όσο και σε επιχειρησιακό πλαίσιο, για την περιγραφή της μετάδοσης των κυματισμών και των μετασχηματισμών που υφίστανται στην παράκτια ζώνη.

Σημειώνεται ότι τα ομοιώματα διάθλασης – περίθλασης εφαρμόζονται για περιπτώσεις μονοχρωματικών κυματισμών δεδομένου ότι στηρίζονται στη γραμμική θεωρία. Στη φύση ωστόσο, οι κυματισμοί είναι μη μονοχρωματικοί. Έτσι η προσομοίωση τυχαίων (random), φασματικών κυματισμών γίνεται απλά με την επαλληλία (superposition) κυματισμών με διαφορετικές συχνότητες ή και κατευθύνσεις, χωρίς βέβαια να συμπεριλαμβάνονται οι μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις. Αντίθετα τα μαθηματικά ομοιώματα (μη γραμμικών κυματισμών) τύπου Boussinesq έχουν τη δυνατότητα να προσομοιώνουν με άμεσο τρόπο τέτοιους κυματισμούς, καλύπτοντας παράλληλα την επίδραση των μη γραμμικών όρων που είναι κατά κανόνα σημαντική, ιδίως στα ρηγά νερά.

2.5.4 Ομοιώματα διάθλασης-περίθλασης: εξίσωσης ήπιας κλίσης

Η εξίσωση ήπιας κλίσης με την οποία είναι δυνατή η περιγραφή του συνδυασμού των φαινομένων διάθλασης, περίθλασης παρουσιάστηκε αρχικά από τον Berkhoff (1972). Η εξίσωση αυτή είναι ελλειπτική της μορφής:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(c c_g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(c c_g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) + \frac{c_g}{c} \omega^2 \zeta = 0 \quad (2.73)$$

όπου,

c η φασική ταχύτητα

c_g η ταχύτητα ομάδας

ω η γωνιακή συχνότητα

Λόγω της ελλειπτικής της μορφής η (2.73) συνιστά ένα πρόβλημα συνοριακών τιμών για την επίλυση του οποίου απαιτείται η εφαρμογή περίπλοκων υπολογιστικών σχημάτων πεπερασμένων στοιχείων

Ο Radder (1979) παρουσίασε μια παραβολική προσέγγιση της εξίσωσης, με σκοπό να περιοριστεί ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος επίλυσης του μοντέλου. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το ανακλώμενο κυματικό πεδίο θεωρείται αμελητέο. Ο Copeland (1985) αργότερα, εξέφρασε την εξίσωση ήπιας κλίσης σαν ένα ζεύγος υπερβολικών εξισώσεων πρώτης τάξης, έχοντας ως αφετηρία την υπερβολική εξίσωση (ήπιας κλίσης) του Booij (1981)

$$\nabla Q + \frac{c_g}{c} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (2.74\alpha)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c c_g \nabla \zeta = 0 \quad (2.74\beta)$$

Όπου με Q συμβολίζεται το γινόμενο της ολοκληρωμένης στο βάθος οριζόντιας ταχύτητας με έναν συντελεστή n ο οποίος δίνεται από την σχέση

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (2.75)$$

Με τις παραπάνω εξισώσεις του Copeland είναι δυνατή η περιγραφή ανακλώμενων κυματισμών.

Η επίλυση των εξισώσεων παραβολικής και υπερβολικής μορφής γίνεται με αριθμητικά σχήματα πεπερασμένων διαφορών.

Η προσπάθεια να προσομοιωθούν τυχαίοι κυματισμοί οδήγησε στην ανάπτυξη μορφών της εξίσωσης ήπιας κλίσης στις οποίες υπεισέρχεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή ο χρόνος (μη ολοκληρωμένες ως προς την περίοδο εξισώσεις). Έτσι, οι Smith και Springs (1975) διατύπωσαν μια χρονικά εξαρτώμενη υπερβολική εξίσωση

ήπιας κλίσης εφαρμόζοντας μια φόρμουλα Green, ενώ οι Radder και Dingemans (1985) πρότειναν μια κανονικοποιημένη (canonical) μορφή βασιζόμενοι στη Hamiltonian θεωρία επιφανειακών κυμάτων. Στις εξισώσεις των Radder και Dingemans (1985) υπεισέρχονται ως άγνωστοι, η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και η συνάρτηση δυναμικού της ταχύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια.

Στα προαναφερθέντα μοντέλα γίνεται η υπόθεση ότι η μεταβολή του βάθους είναι μικρή δηλ. $|\nabla d|/kd \ll 1$ οπότε παραλείπονται όροι ανώτερης τάξης ανάλογοι των $(|\nabla d|)^2$ και $|\nabla^2 d|$ που εκφράζουν την επίδραση του πυθμένα. Σχετικά πρόσφατα, ο Massel (1993) ανέπτυξε χρησιμοποιώντας ιδιοσυναρτήσεις Galerkin, μια ελλειπτική εξίσωση διάθλασης – περίθλασης που περιλαμβάνει τους παραπάνω όρους ανώτερης τάξης. Παρόμοιες είναι και οι εξισώσεις των Chamberlain και Porter (1995).

Μεταγενέστερα, οι Shuh et al. (1997) χρησιμοποιώντας μια έκφραση Green και τη Hamiltonian θεωρία κατέληξαν στη διατύπωση δύο ισοδύναμων χρονικά εξαρτώμενων εξισώσεων για την προσομοίωση της διάδοσης κυματισμών σε έντονα μεταβαλλόμενη βαθυμετρία. Χωρίς τους όρους ανώτερης τάξης επίδρασης του πυθμένα οι εξισώσεις που πρότειναν μετασχηματίζονται σε αυτές των Smith και Springs (1975) και των Radder και Dingemans (1985) αντίστοιχα.

Παράλληλα στηριζόμενοι στην προσέγγιση του Berkhoff (1972, 1976), οι Chandrasekera και Cheung (1997) ανέπτυξαν ένα ελλειπτικό ομοίωμα διάθλασης – περίθλασης στο οποίο διατηρούνται οι όροι ανώτερης τάξης που εκφράζουν την επίδραση του πυθμένα. Ωστόσο, παρά τη διαφορετική μεθοδολογία ανάπτυξης όλες οι παραπάνω εξισώσεις, στην περίπτωση ενός μονοχρωματικού κύματος απλοποιούνται στην ίδια μορφή η οποία χαρακτηρίζεται στη βιβλιογραφία ως τροποποιημένη (modified) εξίσωση ήπιας κλίσης (Shu et al., 2001). Οι Lee et al. (1998) επαναδιάταξαν την τροποποιημένη εξίσωση ήπιας κλίσης σε μορφή δύο εξισώσεων πρώτης τάξης που διαμορφώνουν ένα υπερβολικό σύστημα. Τέλος οι Hsu και When (2001) παρουσίασαν μια παραβολική εκδοχή της τροποποιημένης εξίσωσης.

2.6 ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΘΕΩΡΙΩΝ

Για να είναι εφαρμόσιμες και χρηστικές οι παραπάνω θεωρίες και οι εξισώσεις τους, και να δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, θα πρέπει να εξεταστεί το πεδίο ισχύος τους. Οι μη γραμμικές θεωρίες περιγράφουν αποτελεσματικότερα μαζικές μεταφορές, φαινόμενα όπως θραύση κυματισμών, ρήγωση, ανάκλαση και άλλα μη γραμμικά χαρακτηριστικά. Γι' αυτό το λόγο, η χρήση γραμμικών θεωριών θα πρέπει να εκτιμάται προσεκτικά πριν την εφαρμογή στις ακτομηχανικές μελέτες.

Οι γραμμικοί κυματισμοί όπως και οι πεπερασμένου εύρους μπορούν να περιγραφούν προσδιορίζοντας δυο αδιάστατες παραμέτρους, το σχετικό βάθος νερού D/L και την κλίση του κύματος H/L . Το σχετικό βάθος D/L νερού προσδιορίζει εάν οι κυματισμοί είναι πλήρους ή μερικής διασποράς και τότε η ταχύτητα, το μήκος κύματος, και το ύψος κυματισμού επηρεάζονται από το βάθος του νερού. Η κλίση του κύματος H/L είναι ένα όρος που προσδιορίζει την εξάρτηση του κυματισμού από το ύψος του και καθορίζει εάν οι παραδοχές της γραμμικής θεωρίας ισχύουν.

Ένας τρίτος όρος που χρησιμοποιείται στη θέση των προηγούμενων δυο είναι ο λόγος τους, δηλαδή:

$$\frac{\frac{H}{L}}{\frac{D}{L}} = \frac{H}{D} \quad (2.76)$$

Και ονομάζεται σχετικό ύψος κύματος. Μεγάλες τιμές της κλίσης και του σχετικού ύψους κύματος δηλώνουν ότι η παραδοχή μικρού εύρους κυματισμών δεν είναι κατάλληλη.

Μια τέταρτη αδιάστατη παράμετρος που χρησιμοποιείται συχνά για την επιλογή θεωρίας διάδοσης κυματισμού, με γνωστό μήκος και ύψος κύματος σε ένα ορισμένο βάθος D , είναι ο αριθμός Ursell ή U_R , όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως (§2.5).

Μεγάλες τιμές του συντελεστή U_R προκύπτουν για πεπερασμένου εύρους, μακρούς κυματισμούς σε ρηγά νερά δηλώνοντας ότι η προσέγγιση τους πρέπει να γίνει με μη-γραμμικά χαρακτηριστικά.

Οι επεκτάσεις της θεωρίας του Stokes ισχύουν όταν: $H/D \ll (kd)^2$ για $kd < 1$ και $H/L \ll 1$ (Peregrine 1972). Αυτές οι απαιτήσεις ορίζουν έναν αριθμό Ursell, $U_R < 79$. Και έτσι αυτή η συνθήκη περιορίζει τα ύψη κυματισμών στα ρηγά νερά και περιορίζει την εφαρμογή των θεωριών Stokes (πρέπει $D/L > 1/8$ ή $kd > 0.78$). Συγκεκριμένο παράδειγμα είναι η μέγιστη τιμή του ύψους κύματος, που μπορεί να περιγραφεί από τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης, και είναι ίση με το μισό του βάθους του νερού (Fenton 1985). Το πεδίο ισχύος της θεωρίας Cnoidal $D/L < 1/8$ και ο συντελεστής $U_R > 20$.

Ο Dean (1968,1974) παρουσίασε μια ανάλυση, στην οποία όριζε τις περιοχές εφαρμογής κάθε θεωρίας, χρησιμοποιώντας τους όρους H/T^2 και d/T^2 (το T^2 είναι ανάλογο του μήκους κύματος L). Ο Le Méhauté (1976) παρουσίασε μια ελαφρώς διαφορετική ανάλυση για να προσδιορίσει τα όρια καταλληλότητας της κάθε θεωρίας διάδοσης κυματισμών. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6.1., η 4^{ης} τάξης θεωρία Stokes αντικαθίσταται με αυτή της 5^{ης} τάξης αφού η τελευταία χρησιμοποιείται συχνότερα σε πολλές εφαρμογές. Οι Dean και Le Méhauté προτείνουν και οι δυο τη θεωρία Cnoidal για κυματισμούς σε ρηγά νερά μικρής κλίσης, και τη θεωρία Stokes υψηλότερης τάξης για μεγάλης κλίσης κυματισμούς διαδιδόμενους στα βαθιά νερά. Η γραμμική θεωρία προτείνεται για μικρής κλίσης κύματα και χαμηλές τιμές δείκτη Ursell. Στα «ενδιάμεσα» και «βαθιά» νερά η γραμμική θεωρία είναι επαρκής, ωστόσο και άλλες θεωρίες συμπεριφέρονται ικανοποιητικά. Η θεωρία της ροϊκής συνάρτησης ή και η παρόμοια θεωρία του Fenton(1988) είναι κατάλληλες για μεγάλη περιοχή των κυματικών παραμέτρων. Για γνωστές τιμές των H , D και T το Σχήμα 2.6.1. χρησιμοποιείται σαν οδηγός για την επιλογή της κατάλληλης θεωρίας.

Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις οριακές τιμές του ύψους και της κλίσης κυματισμών σε διάφορα βάθη νερού, για να καθοριστεί η καταλληλότητα κάθε θεωρίας που χρησιμοποιεί την ανάλυση Stokes. Αυτό επιτυγχάνεται συγκρίνοντας το μέγεθος κάθε διαδοχικού όρου στην ανάλυση Stokes, όπου κάθε όρος πρέπει να είναι

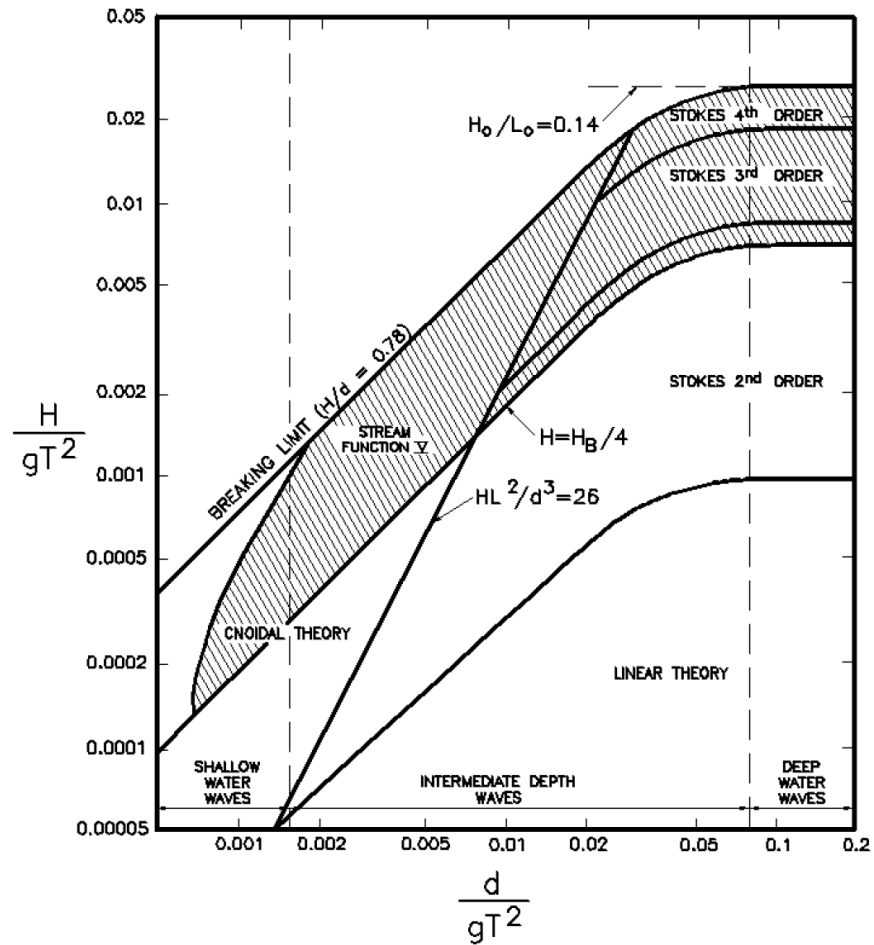
μικρότερος από αυτόν που προηγείται. Για παράδειγμα εάν ο δεύτερος όρος είναι μικρότερος από το 1% του πρώτου όρου της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης, η οριακή κλίση δίνεται από τον τύπο:

$$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{80} \cdot \frac{\sinh^3 kd}{\cosh kd \cdot (3+2\sinh^2 kd)} \quad (2.77)$$

Εάν ο όρος της τρίτης τάξης είναι μικρότερος του 1% του αντίστοιχου δεύτερης τάξης, η οριακή κλίση:

$$\frac{H}{L} \leq \frac{1}{7} \cdot \frac{\sinh^3 kd}{\sqrt{1+8\cosh^3 kd}} \quad (2.78)$$

Ομοίως, χρησιμοποιώντας την 5^{ης} τάξης ανάλυση, οι ασύμπτωτες στη 3^η τάξης θεωρία είναι $H/L_0 < 0.1$ και $H/D < 3/4(kd)^2$ για βαθιά και ρηγά νερά αντίστοιχα. Αυτό επιτρέπει την επέκταση του εύρους της θεωρίας Stokes, προσθέτοντας μικρές διαδοχικές περιοχές στο πεδίο της γραμμικής θεωρίας όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχήμα 2.6.1), μέχρι να προσεγγιστεί το όριο θραύσης.



Σχήμα 2.6.1. Περιοχές εφαρμογής διάφορων θεωριών διάδοσης κυματισμών. (Le Méhauté, 1976)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Περιγραφή πειραματικών διατάξεων

3.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ

3.1.1 Διαστάσεις – περιγραφή

Η διώρυγα κυματισμών βαρύτητας που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων βρίσκεται στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων του ΕΜΠ στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου με διαστάσεις (Βερναρδάκης, 1990):

- Καθαρό μήκος: 27.00 m
- Καθαρό πλάτος: 0.60 m
- Καθαρό ύψος: 1.53 m
- Πάχος τοιχίου: 0.21 m

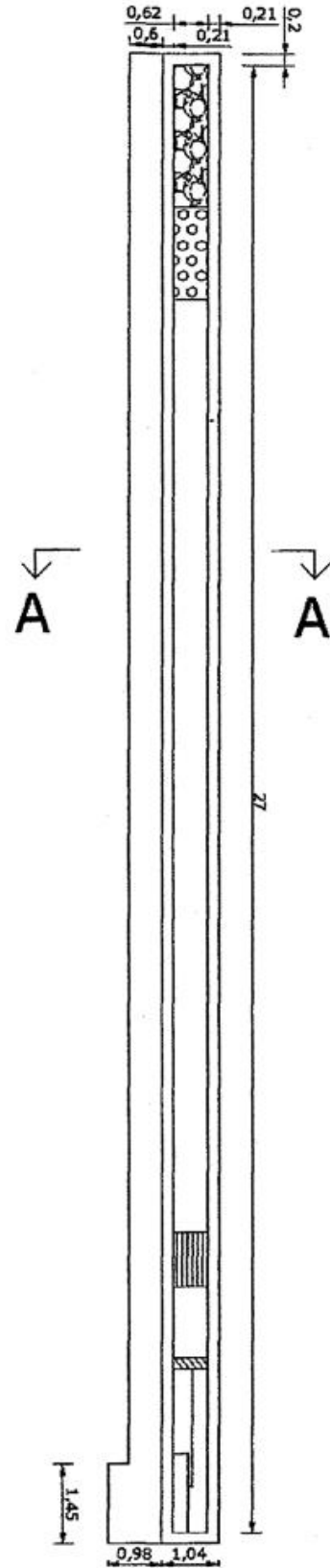
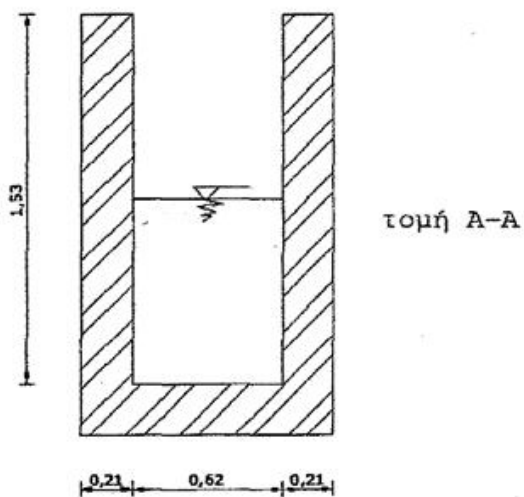
Η διώρυγα είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με διατομή ανεστραμμένου Π και στηρίζεται ως συνεχής δοκός σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα ύψους 0.80m. Στα δύο άκρα της διώρυγας υπάρχει αποσβεστήρας κυμάτων (sponge). Αυτός αποτελείται από πρανές με κροκάλες μέσης διαμέτρου 5cm που καλύπτεται με ψιλό συρματόπλεγμα για να εμποδίζεται η μετακίνησή τους.

Στην περιοχή όπου γίνονται οι μετρήσεις και σε απόσταση 5.75m από το αριστερό άκρο, υπάρχουν δύο διαφανή παράθυρα από fiber glass που επιτρέπουν την άμεση παρατήρηση των παραγόμενων κυμάτων και τη φωτογράφιση αυτών. Στο δεξί άκρο της διώρυγας είναι εγκατεστημένη η κυματογεννήτρια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των κυματισμών. Κατά μήκος της διώρυγας, σε απόσταση ένα μέτρο περίπου από το πτερύγιο της κυματογεννήτριας υπάρχει κατασκευή από παράλληλες, διάτρητες, μεταλλικές πλάκες διαστάσεων 1.0m x 1.0m. Χρησιμεύει στο να αποσβένει τις πλευρικές διαταραχές, να περιορίζεται το φαινόμενο της περίθλασης και να γίνεται αποκατάσταση της δισδιάστατης ροής.

Η διώρυγα τροφοδοτείται με νερό από ένα σωλήνα που καταλήγει στο αριστερό άκρο της. Η εκκένωσή της γίνεται από δύο φρεάτια που βρίσκονται στα δύο άκρα της διώρυγας.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΩΡΥΓΑΣ:

καθαρό μήκος : 27m
καθαρό πλάτος : 0.6m
καθαρό ύψος : 1.53m
πάχος τοιχείου : 0.21m



Σχήμα 3.1.1.1 – Κάτοψη και τομή της πειραματικής διώρυγας.



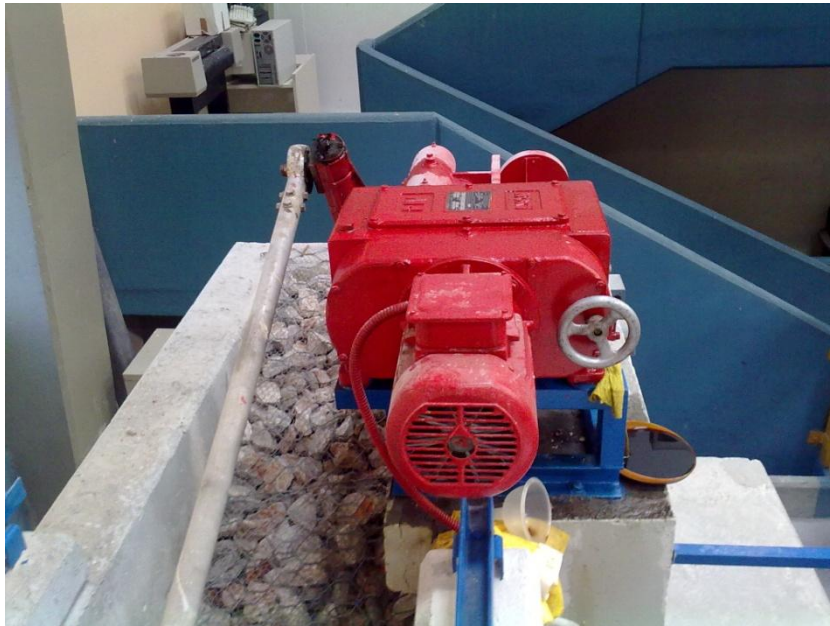
Σχήμα 3.1.1.2 – Άποψη της πειραματικής διώρυγας από την πλευρά της κυματογεννήτριας.



Σχήμα 3.1.1.3 – Άποψη του εσωτερικού της διώρυγας βαρύτητας του εργαστηρίου λιμενικών έργων.

3.1.2 Κυματογεννήτρια

Η κυματογεννήτρια βρίσκεται στο ένα άκρο της διώρυγας και είναι τοποθετημένη σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα διαστάσεων 1.45m x 0.56m και πάχους 0.18m. Αποτελείται από τον ηλεκτρικό κινητήρα, το κιβώτιο ταχυτήτων, το μετατροπέα της κίνησης και το περύγιο.



Σχήμα 3.1.2.1 – Κυματογεννήτρια στο άκρο της διώρυγας τοποθετημένη στο βάθρο.

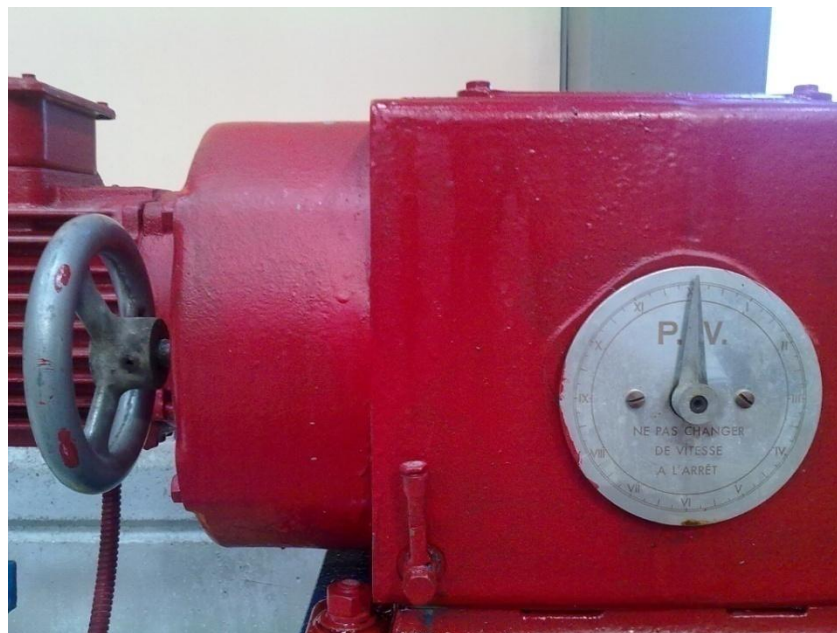
Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ισχύ 2.2KW και δουλεύει στις 1420 στροφές ανά λεπτό, με τάση 220V, 8.7A ή 380V,5A.

Στο μετατροπέα της κίνησης μεταβάλλεται η εκκεντρότητα της ράβδου που μεταφέρει την κίνηση στο περύγιο. Ο λόγος μείωσης της κίνησης είναι 1/10. Η κυκλική ανοξείδωτη μεταλλική ράβδος για την τελική μετάδοση της κίνησης του περυνγίου έχει διάμετρο 5cm και μήκος 2.70m.



Σχήμα 3.1.2.2 – Πτερύγιο κυματιστήρα και διάταξη διάτρητων πλακών ομαλοποίησης του κυματισμού.

Το πτερύγιο του κυματιστήρα έχει διαστάσεις 1.35m x 0.59m και είναι κατασκευασμένο από ελαφρύ ξύλο πάχους 6cm. Εκτελεί ταλάντωση και παράγει τους κυματισμούς.



Σχήμα 3.1.2.3 – Το κιβώτιο ταχυτήτων της κυματογεννήτριας το οποίο καθορίζει τις περιόδους παραγόμενου κυματισμού.

Οι ταχύτητες καθορίζουν τη συχνότητα κίνησης του πτερυγίου της κυματογεννήτριας, η οποία ταυτίζεται με τη συχνότητα των παραγόμενων κυματισμών. Η εκκεντρότητα της ράβδου καθορίζει το εύρος ταλάντωσης του πτερυγίου της κυματογεννήτριας και δεν επηρεάζει τη συχνότητα των παραγόμενων κυματισμών παρά μόνο το ύψος του.

3.1.3 Παραγόμενοι κυματισμοί

Η βαθμονόμηση της διώρυγας κυματισμών βαρύτητας του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων έδωσε τα εξής συμπεράσματα για τα όρια των παραγόμενων κυματισμών (Βερναρδάκης, 1990):

Πίνακας 3.1.3.1 – Όρια παραγόμενων κυματισμών.

D(βάθος)	Hmin	Hmax
(m)	(cm)	(cm)
0.40	1.12	12.20
0.50	1.38	16.20
0.60	2.20	20.00
0.70	1.90	23.70

Η περίοδος T των κυματισμών εξαρτάται από την ταχύτητα V , ενώ δεν εξαρτάται από την εκκεντρότητα του κυματιστήρα και συμπίπτει με μεγάλη ακρίβεια με την περίοδο ταλάντωσης του πτερυγίου του κυματιστήρα. Το εύρος των παραγόμενων κυματισμών για κάθε βάθος νερού d , κυμαίνεται από 0.53sec έως 2.12sec. Σε εύρος περιόδων T_a , από 2.12sec (αντιστοιχεί σε ταχύτητα κυματιστήρα $V=0$) έως 1.04sec (αντιστοιχεί σε ταχύτητα κυματιστήρα $V=4$), παρατηρούνται σχεδόν πάντα αρμονικοί κυματισμοί.

Για την ταχύτητα $V=4$ ($T=1.04$ sec) της κυματογεννήτριας, το ύψος των παραγόμενων κυματισμών αυξάνει όσο αυξάνει η εκκεντρότητα E του κυματιστήρα. Για μεγαλύτερες ταχύτητες ($V>4$) παρατηρείται πτώση του ύψους κύματος, η οποία γίνεται πιο απότομη όσο αυξάνει η εκκεντρότητα. Τα μέγιστα ύψη κυματισμών που

μπορούν να παραχθούν στη διώρυγα, παρατηρούνται για εκκεντρότητα $E=3000$ της κυματογεννήτριας (Βερναρδάκης, 1990).

Με τη χρησιμοποίηση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής και γνωρίζοντας ότι για $V=0$ είναι $T_a=2.12\text{sec}$ και για $V=4$ είναι $T=1.04\text{sec}$ έχουμε τον παρακάτω πίνακα αντιστοιχίας ταχυτήτων κυματιστήρα και περιόδων παραγόμενων κυματισμών :

Πίνακας 3.1.3.2 – Ταχύτητες κυματιστήρα – περίοδοι παραγόμενων κυματισμών.

V	T
	(sec)
0	2.12
1	1.85
2	1.58
3	1.31
4	1.04

Στην παρούσα εργασία ο κυματιστήρας χρησιμοποιήθηκε μόνο για $V=0$, $V=1$ και $V=2$ και για περιόδους κυματισμών $T_a=2.12\text{ sec}$, $T_a=1.85\text{ sec}$ και $T_a=1.58\text{ sec}$ αντίστοιχα.

3.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Οι πειραματικές μετρήσεις αποσκοπούν στην καταγραφή της κυματικής ταχύτητας ανάντη, στο εσωτερικό και κατόντη του μοντέλου, στη διώρυγα του Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων. Η κυματική ταχύτητα μετράται για διάφορες τιμές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του ύφαλου κυματοθραύστη καθώς και για διαφορετικά σενάρια εισερχόμενων κυματισμών.

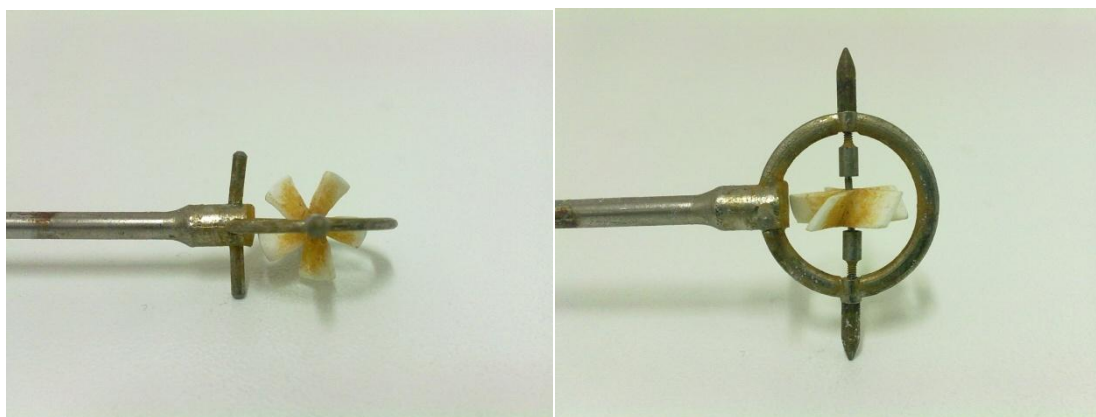
Οι μετρήσεις των υψών κυματισμού έγιναν με ανάγνωση σε κατακόρυφους κατάλληλα βαθμονομημένους χάρακες (Σχήμα 3.2.6), ενώ για τις ταχύτητες χρησιμοποιήθηκε κατάλληλη επιστημονική συσκευή (Σχήμα 3.2.1-3.2.2). Οι οπτικές μετρήσεις στους γνώμονες θεωρήθηκαν αρκετά ακριβείς καθώς έγινε μεγάλο πλήθος μετρήσεων με την πρέπουσα προσοχή και αρκετές επαναλήψεις.



Σχήμα 3.2.1-3.2.2 – Novonic StreamFlo – Η επιστημονική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις.

Το σύστημα των μετρητών συχνοτήτων που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από 2 αισθητήρες-μυλίσκους καθώς και από μία επιπλέον ηλεκτρονική συσκευή. Μέσω της συσκευής οι μυλίσκοι καταγράφουν τις μετρήσεις με συχνότητα 1sec και 10sec. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα αθροιστικών μετρήσεων των συχνοτήτων. Στις παρούσες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν οι ανά 1sec καταγραφές καθώς και οι

αθροιστικές. Με τις αθροιστικές μετρήσεις δίνεται η δυνατότητα ελέγχου της ορθότητας των μετρήσεων που λαμβάνονται ανά 1sec, καθώς υπολογίζεται ένα μ.ο. συχνοτήτων και λαμβάνεται υπ' όψιν η τάξη μεγέθους στην οποία θα έπρεπε να αντιστοιχεί η μέτρηση. Μετά την ανάγνωση των δεδομένων από την ηλεκτρονική συσκευή έγινε καταγραφή τους και μετέπειτα μεταφορά σε Η/Υ και σε έγγραφα του Microsoft Excel σε κατάλληλους κατατοπιστικούς πίνακες.



Σχήμα 3.2.3-3.2.4 – Ο μιλίσκος που χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη των πειραματικών μετρήσεων.

Ο κάθε ένας από τους δύο μετρητές είχε αναρτηθεί σε ανοξείδωτο σωλήνα ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενα προβλήματα από τη βύθισή των στο νερό (Σχήμα 3.2.5). Στο πάνω μέρος του εσωτερικού της διάρυγας, ανάντη και πάνω από τον ύφαλο κυματοθραύστη τοποθετήθηκαν κατάλληλα οριζόντιοι υποδοχείς για τους σωλήνες έτσι ώστε οι μετρητές να είναι κατακόρυφοι σε κάθε μία από τις 7 θέσεις μετρήσεων.

Η ηλεκτρονική συσκευή μηδενίζεται με τον ενδεδειγμένο τρόπο και ακολουθούν οι μετρήσεις. Η κυματογεννήτρια τίθεται σε λειτουργία και παράγεται ο κυματισμός. Οι μετρητές μέσω των μιλίσκων που βρίσκονται στο άκρο τους και της ενσύρματης σύνδεσής τους με τη συσκευή δίνουν τα αποτελέσματα στην ηλεκτρονική οθόνη.



Σχήμα 3.2.5-3.2.6 – Οριζόντιοι υποδοχείς των ανοξείδωτων σωλήνων και βαθμονομημένος γνώμονας για τις οπτικές παρατηρήσεις.

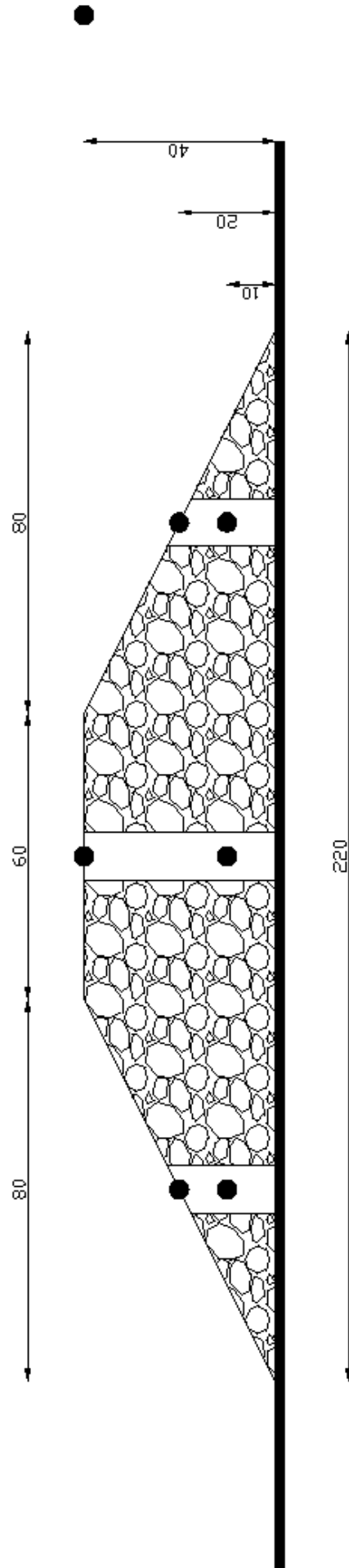
Για την παραγωγή των κυματισμών χρησιμοποιήθηκε η κυματογεννήτρια του εργαστηρίου στη διώρυγα. Ο κυματιστήρας χρησιμοποιήθηκε μόνο για ταχύτητες $V=0$, $V=1$ και $V=2$ και για περιόδους κυματισμών $T_a=2.12$ sec, $T_a=1.85$ sec και $T_a=1.58$ sec αντίστοιχα. Το βάθος νερού που χρησιμοποιήθηκε ήταν 40cm, 50cm και 60cm αντίστοιχα. Το πλάτος στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη μεταβλήθηκε από τα 60cm, στα 80cm και στα 100cm. Οι μεταβολές αυτές στους κυματισμούς και στο μοντέλο του πειράματος, σε συνδυασμό με τις 7 θέσεις στα ανάντη, στο εσωτερικό και κατόντη του κυματοθραύστη μας οδηγούν στο σύνολο των 189 μετρήσεων τα συμπεράσματα των οποίων αναπτύσσονται σε ακόλουθο κεφάλαιο.

Πριν από κάθε μέτρηση γινόταν ανάγνωση του βάθους νερού από τους βαθμονομημένους γνώμονες, ανάγνωση από τους ίδιους γνώμονες της κατακόρυφης απόστασης της κορυφής και της κοιλίας του κύματος από τον πυθμένα της διώρυγας και μηδενισμός της ηλεκτρονικής συσκευής κατά τον ενδεδειγμένο τρόπο. Έπειτα γινόταν η καταγραφή της ανά 1sec ένδειξης της συσκευής και των αθροιστικών μετρήσεων σε φάσμα 400Hz. Με διαίρεση των 400Hz προς τα δευτερόλεπτα που χρειάστηκαν για να πραγματοποιηθεί η αθροιστική μέτρηση στον οθόνη, προκύπτει το μ.ο. ανά δευτερόλεπτο, δηλαδή η τάξη μεγέθους που χρειαζόταν να είναι γνωστή.

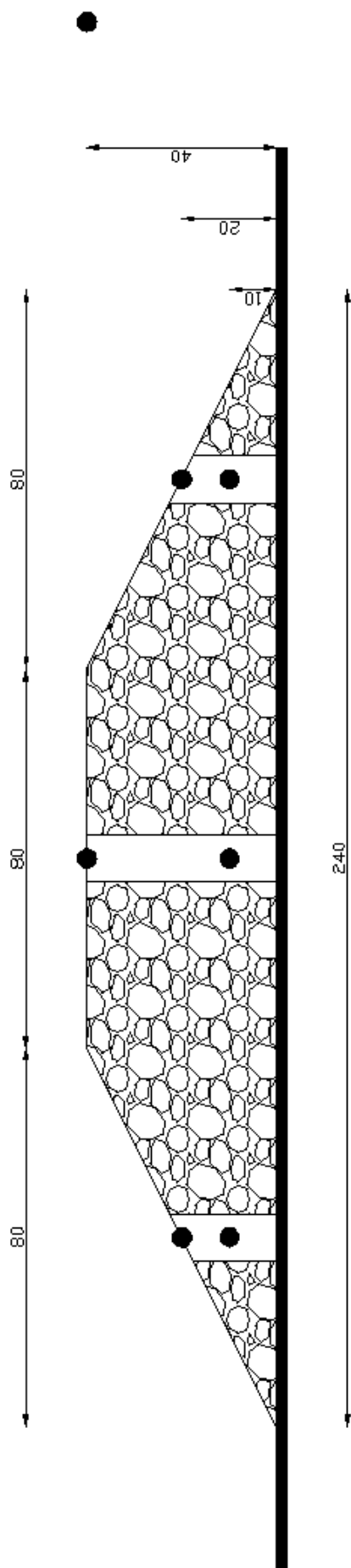
Το μοντέλο του ύφαλου κυματοθραύστη που χρησιμοποιήθηκε κατασκευάστηκε από τον ίδιο τον μελετητή στη διώρυγα. Έγινε με τη χρήση κροκάλων μέσου μεγέθους-διαμέτρου περί των 8cm από τον χώρο του εργαστηρίου. Η τοποθέτησή τους έγινε χειρονακτικά στο ενδεδειγμένο σημείο για το σχηματισμό του κυματοθραύστη. Το σημείο αυτό επελέγη από τον μελετητή αυθαίρετα έτσι ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή των μετρήσεων και κυρίως των οπτικών. Επίσης σημαντικό βήμα αποτέλεσε ο υπολογισμός της κατάλληλης απόστασης από τον κυματιστήρα έτσι ώστε ο προσπίπτων κυματισμός να μην αλλοιώνεται αλλά και στα κατάντη του μοντέλου να μην παρατηρείται το φαινόμενο της ανάκλασης. Φαινόμενο το οποίο ελαχιστοποιείται βέβαια από το απορροφητικό στρώμα που υπάρχει στο αριστερό άκρο της διώρυγας, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αρκετά έντονο έτσι ώστε να ακυρωθούν και να επαναληφθούν κάποιες μετρήσεις.

Ο ύφαλος κυματοθραύστης χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές διαδικασίες υπό 3 διαφορετικές μορφές. Κρατήθηκαν σταθερά τα οριζόντια μήκη των πρανών του καθώς και η κλίση τους. Το ύψος του κυματοθραύστη είναι $h=40\text{cm}$, η κλίση των πρανών είναι 1:2. Το αρχικό πλάτος στέψης είναι $b_1=60\text{cm}$ το οποίο ακολούθως έγινε $b_2=80\text{cm}$ και $b_3=100\text{cm}$. Το πλάτος της βάσης ήταν $B_1=220\text{cm}$, $B_2=240\text{cm}$ και $B_3=260\text{cm}$ αντίστοιχα.

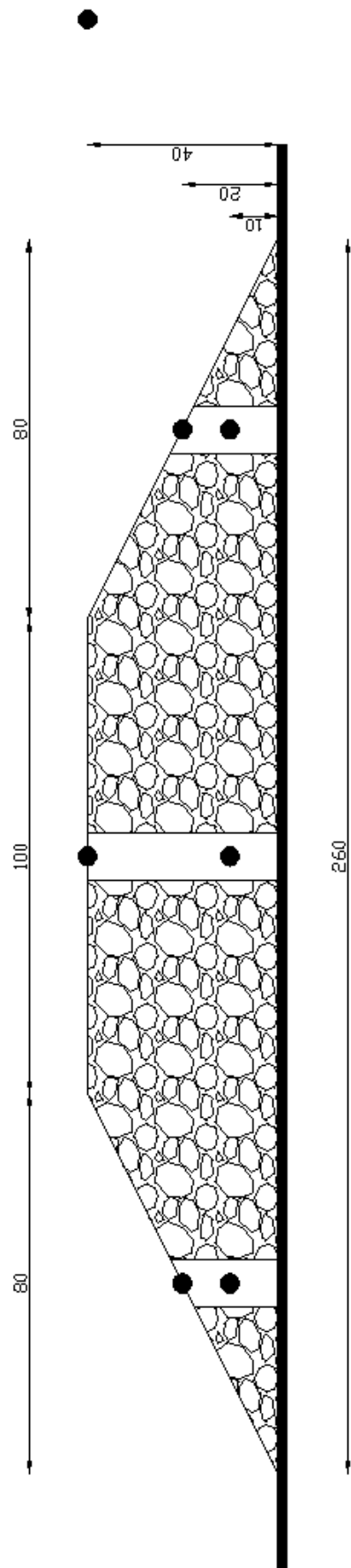
Στα σημεία όπου οι μυλίσκοι για τις μετρήσεις έπρεπε να εισέλθουν στο εσωτερικό του κυματοθραύστη τοποθετήθηκε κατάλληλα συρματόπλεγμα με αραιό και ταυτόχρονα ισχυρό πλέγμα σε σχήμα κυλίνδρου, το οποίο προστάτευε το ευαίσθητο άκρο του μετρητή από τυχούσα πτώση κροκάλας ή πιθανή αστοχία του μοντέλου, χωρίς παρόλα αυτά όμως να επηρεάζει την κυματική μετάδοση στο εσωτερικό του κυματοθραύστη.



Σχήμα 3.2.7 – Διάταξη για πλάτος στέγης 60cm.



Σχήμα 3.2.8 – Διάταξη για πλάτος στέγης 80cm.



Σχήμα 3.2.9 – Διάταξη για πλάτος στέγης 100cm.

Στα παραπάνω σχήματα απεικονίζονται οι 3 διατάξεις ύφαλου κυματοθραύστη που χρησιμοποιήθηκαν για πλάτος στέψης 60cm (Σχήμα 3.2.7), 80cm (Σχήμα 3.2.8), και 100cm (Σχήμα 3.2.9).

Στις εικόνες αυτές παρουσιάζονται και τα 7 σημεία στα οποία ελήφθησαν οι μετρήσεις.

- **Σημείο 1:** ανάντη της διάταξης και σε απόσταση κάθε φορά 5cm χαμηλότερα από την κοιλία του κύματος.
- **Σημείο 2:** στην επιφάνεια του κυματοθραύστη στη μέση του προσήνεμου πρανούς του, σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα.
- **Σημείο 3:** στο εσωτερικό του κυματοθραύστη, κάτω από το σημείο 2 και σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα.
- **Σημείο 4:** στην επιφάνεια του κυματοθραύστη στο μέσον του πλάτους στέψης του και σε απόσταση 40cm από τον πυθμένα.
- **Σημείο 5:** στο εσωτερικό του κυματοθραύστη, κάτω από το σημείο 4 και σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα.
- **Σημείο 6:** στην επιφάνεια του κυματοθραύστη στη μέση του υπήνεμου πρανούς του, σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα.
- **Σημείο 7:** στο εσωτερικό του κυματοθραύστη, κάτω από το σημείο 6 και σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα.

3.3 ΠΟΡΩΔΕΣ

Για τον υπολογισμό του πορώδους και των πυκνοτήτων του υλικού του μοντέλου δοχείο αμελητέου βάρους με νερό και ζυγίζεται. Υπολογίζεται ο όγκος του δοχείου από τη μάζα του νερού:

$$V_{\delta\sigma\chi} = V_w = M_w \cdot \rho_w$$

Το δοχείο (άδειο) πληρώνεται με δείγμα από το υλικό άρα ο ολικός όγκος του πορώδους υλικού $V_{ολ}$ είναι $V_{\delta\sigma\chi}$. Ο ολικός όγκος ισούται με τον όγκο των κενών συν τον όγκο των στερεών:

$$V_{ολ} = V_{κεν} + V_s$$

Ζυγίζεται και βρίσκεται έτσι η μάζα του υλικού που είναι ίση και με τη μάζα των στερεών:

$$M_{ολ} = M_s + M_a = M_s$$

Στο δοχείο μπαίνει νερό που καταλαμβάνει όλο τον όγκο των κενών κι αυτό ζυγίζεται πάλι $M_{ολw}$. Αφαιρώντας τους λίθους και ζυγίζοντας το νερό που μένει M_w' υπολογίζεται ο όγκος του δηλαδή ο όγκος των κενών.

$$V_{κεν} = V'_w = M'_w \cdot \rho_w$$

Το πορώδες δηλαδή ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο του υπολογίζεται ως:

$$n = \frac{V_{κεν}}{V_{ολ}}$$

Η πυκνότητα του συμπαγούς πετρώματος υπολογίζεται ως:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$$

Η πυκνότητα του υλικού υπολογίζεται από:

$$\rho = \frac{M_{ολ}}{V_{ολ}}$$

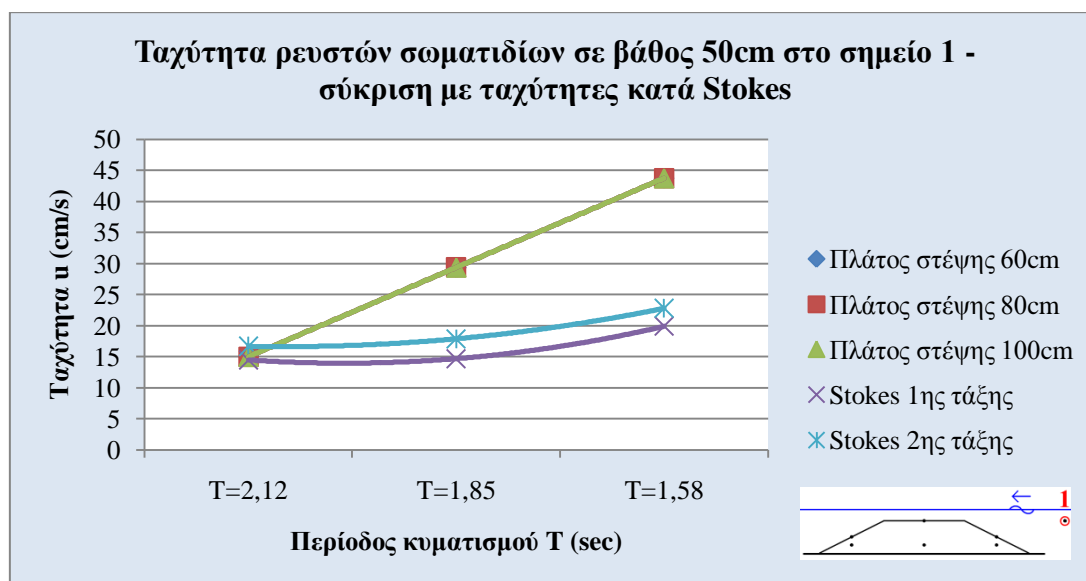
Για το υλικό του κυματοθραύστη μετρήθηκε: $M_w=11,95\text{kg}$, $M_{ολ}=16\text{kg}$, $M_{ολw}=22\text{kg}$ και $M'_w=6\text{kg}$. Με βάση τα παραπάνω η τιμή του πορώδους υπολογίστηκε **$n=0.52$** .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Πειραματικά αποτελέσματα - Σχολιασμός

4.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟΝ ΥΦΑΛΟ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΠΛΑΤΗ ΣΤΕΨΗΣ

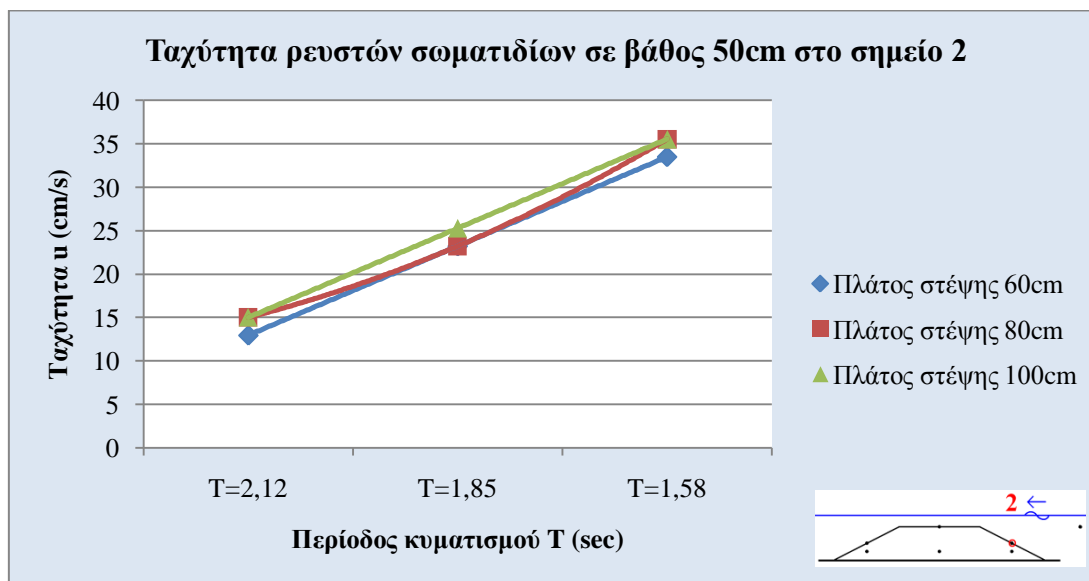
4.1.1 Βάθος νερού 50cm



Διάγραμμα 4.1.1.1 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 50cm στο σημείο 1 (ανάντη του κυματοθραύστη). Σύγκριση με ταχύτητες Stokes.

Στο σημείο 1, παρατηρείται ότι οι ταχύτητες ροής για πλάτος στέψης 60, 80 και 100cm είναι ίδιες για τις αντίστοιχες περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Αυτό συμβαίνει καθώς το σημείο 1 όπου έγιναν οι μετρήσεις βρίσκεται ανάντη του ύφαλου κυματοθραύστη, συνεπώς δεν επηρεάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την μεταβολή του πλάτους στέψης. Οι μετρήσεις στο σημείο αυτό έγιναν 5cm κάτω από τη στάθμη της κοιλίας του κύματος όπως όριζε το εγχειρίδιο της επιστημονικής συσκευής που χρησιμοποιήθηκε.

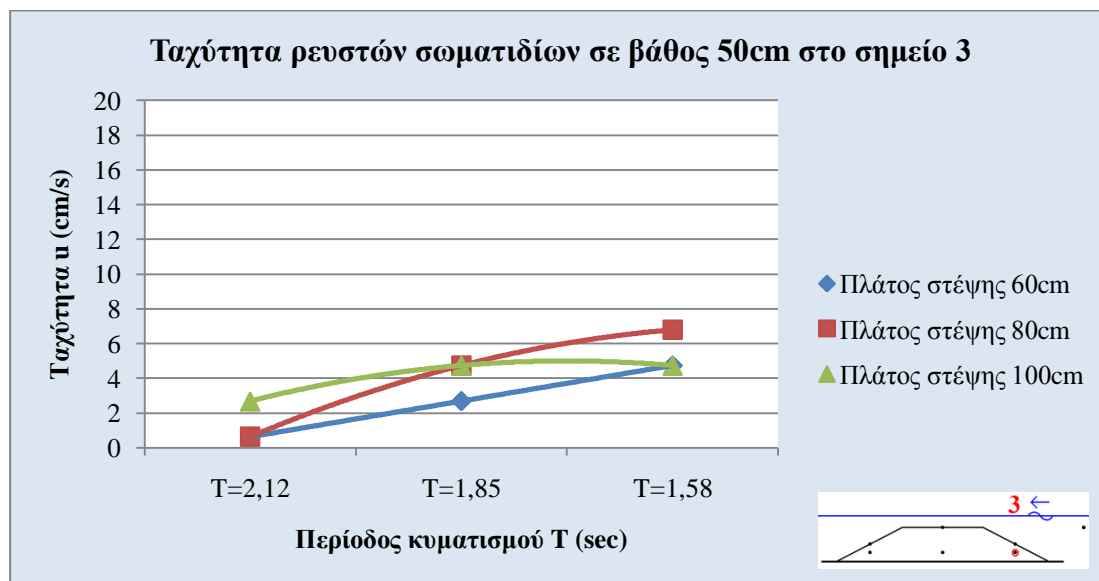
Στο σημείο 1 εξετάστηκε αν τα πειραματικά αποτελέσματα συγκλίνουν με τις ταχύτητες ροής που μας δίνουν οι κυματικές θεωρίες Stokes 1^{ης} και 2^{ης} τάξης. Από το Διάγραμμα 4.1.1.1 βλέπουμε ότι σύγκλιση των πειραματικών αποτελεσμάτων και των μαθηματικών θεωριών υπάρχει μόνο για $T=2,12\text{sec}$.



Διάγραμμα 4.1.1.2 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 50cm στο σημείο 2 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 2 και με βάθος 50cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους κύματος $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 2 βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη και σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα της πειραματικής διώρυγας. Στο σημείο αυτό παρατηρήθηκε μια σύγκλιση των τιμών που μετρήθηκαν για τις 3 διαφορετικές περιόδους του πειράματος για τα 3 διαφορετικά πλάτη στέψης που κατασκευάστηκαν, καθώς το σημείο βρίσκεται ανάντη της στέψης του κυματοθραύστη και άρα δεν επηρεάζεται από αυτήν.

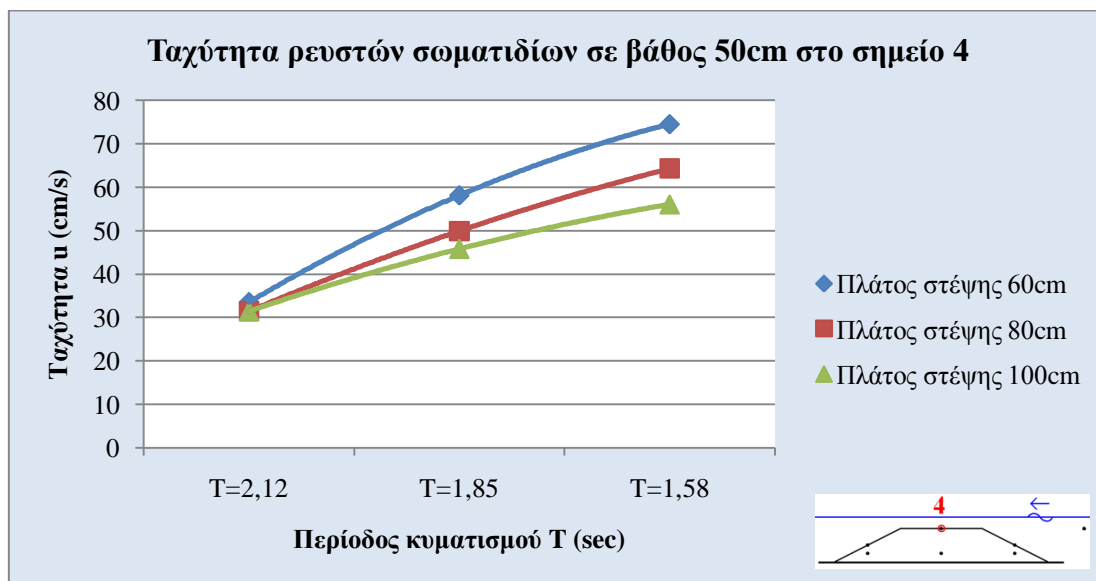
Με τη μείωση της περιόδου του εισερχόμενου κυματισμού παρατηρείται στα πειραματικά αποτελέσματα αύξηση της ταχύτητας ρευστών σωματιδίων. Η τάξη μεγέθους της αύξησης αυτής είναι παρόμοια για τις 3 διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.



Διάγραμμα 4.1.1.3 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 50cm στο σημείο 3 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 3 και με βάθος 50cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 3 βρίσκεται στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και 10cm από την επιφάνεια του στο προσήνεμο πρανές.

Στο σημείο 3 παρατηρούνται μειωμένες οι ταχύτητες των υγρών σωματιδίων και στα 3 διαφορετικά πλάτη στέψης που χρησιμοποιήθηκαν. Η στέψη του κυματοθραύστη δεν επηρεάζει τις μετρήσεις στο σημείο αυτό. Οι διαφορές στις τιμές των ταχυτήτων που παρατηρούνται μεταξύ των τριών διατάξεων για τις 3 περιόδους δικαιολογούνται από το σφάλμα των πειραματικών μετρήσεων και του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν αυτές.

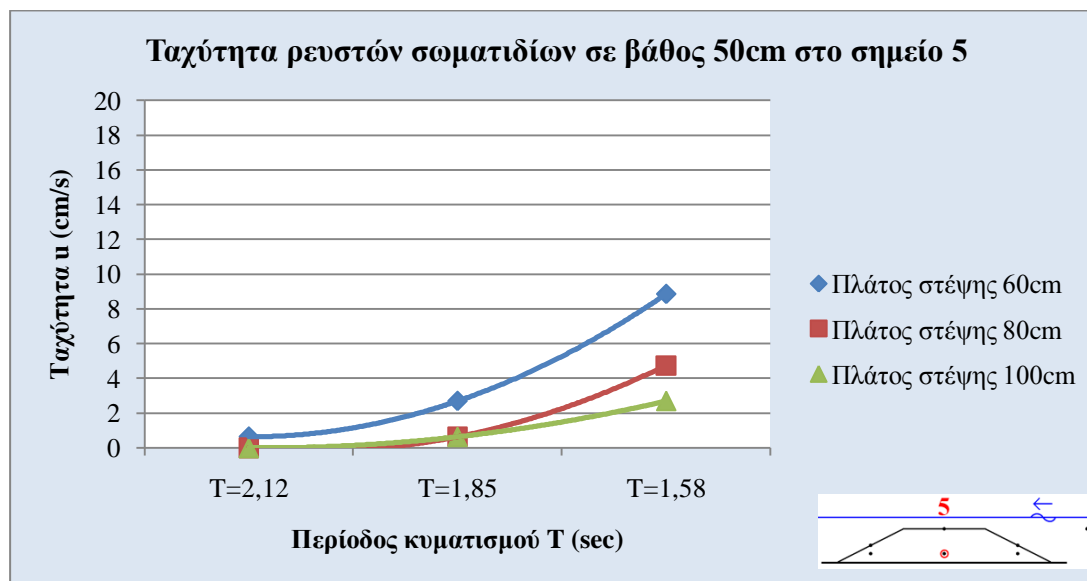


Διάγραμμα 4.1.1.4 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 50cm στο σημείο 4 στο μέσον του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 4 και με βάθος 50cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 4 βρίσκεται στο μέσον του κυματοθραύστη και στην επιφάνεια της στέψης του. Απόσταση 40cm από τον πυθμένα και 10cm από την επιφάνεια σε ηρεμία.

Στο σημείο 4 παρατηρείται με την μείωση της περιόδου, μία αύξηση της ταχύτητας των ρευστών σωματιδίων. Στο σημείο αυτό παρατηρείται επίσης και διαφορά, για την ίδια περίοδο παραγόμενου κυματισμού, στις ταχύτητες ανάλογα με το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη. Σε μεγαλύτερο πλάτος στέψης η ταχύτητα που καταγράφηκε είναι μικρότερη. Αυτό οφείλεται στην εντονότερη διάχυση ενέργειας στην περίπτωση του μεγαλύτερου πλάτους, καθώς ο κυματισμός διέρχεται της στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη.

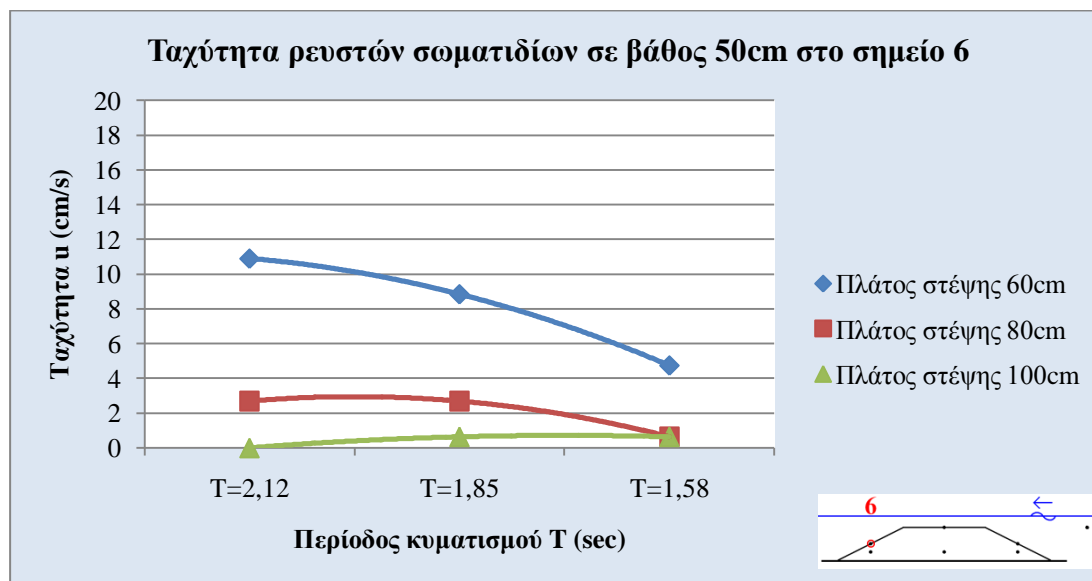
Στο σημείο 4 οι τιμές των ταχυτήτων για τις 3 περιόδους είναι μεγαλύτερες από αυτές ανάντη του κυματοθραύστη. Το νερό διέρχεται από μικρότερο εμβαδό διατομής με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του.



Διάγραμμα 4.1.1.5 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 50cm στο σημείο 5 στο μέσον του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 5 και με βάθος 50cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 5 βρίσκεται στο μέσον του κυματοθραύστη και στο εσωτερικό αυτού σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα της πειραματικής διώρυγας.

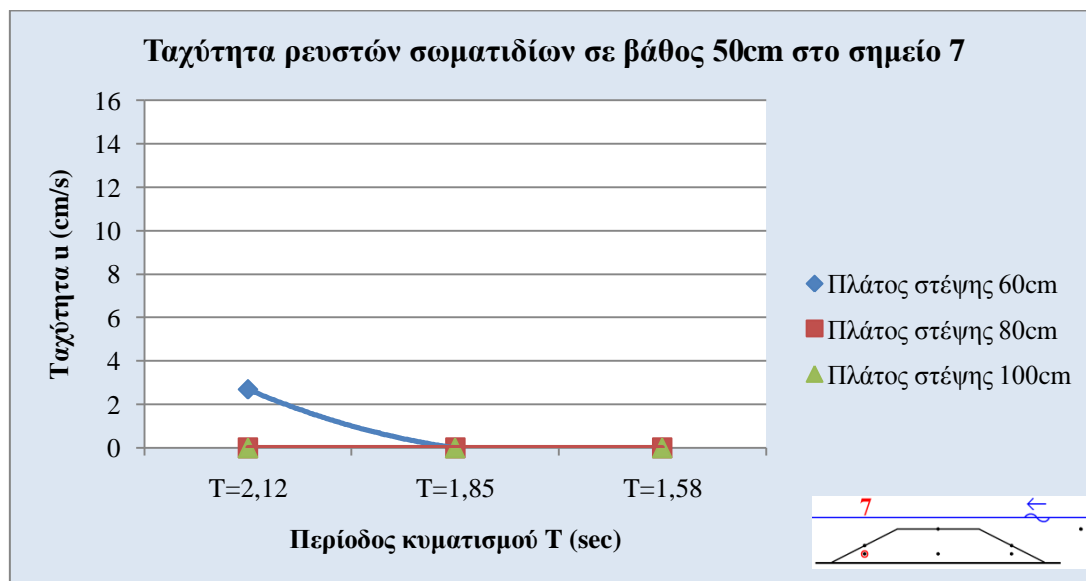
Στο σημείο 5 παρατηρούνται μικρές τιμές ταχυτήτων καθώς βρίσκεται στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και 30cm από την επιφάνειά του, πολύ κοντά δηλαδή στον πυθμένα. Οι απώλειες ενέργειας κατά τη διέλευση του νερού από το εσωτερικό του κυματοθραύστη είναι μεγάλες. Με μεγαλύτερο πλάτος στέψης οι απώλειες ενέργειας είναι μεγαλύτερες. Ως αποτέλεσμα με πλάτος στέψης 60cm παρατηρείται μεγαλύτερη ταχύτητα όσο μειώνεται η περίοδος, ενώ σε πλάτος στέψης 80cm και 100cm ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας με τη μείωση της τιμής της περιόδου είναι σαφώς μικρότερος.



Διάγραμμα 4.1.1.6 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 50cm στο σημείο 6 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 6 έγιναν μετρήσεις με βάθος νερού 50cm για 3 διαφορετικές περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 6 βρίσκεται στη επιφάνεια του υπήνεμου πρανούς του ύφαλου κυματοθραύστη και σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα.

Στο σημείο 6 παρατηρείται θραύση του κυματισμού. Για μικρότερη περίοδο το φαινόμενο της θραύσης γίνεται πιο έντονο, συνεπώς οι ταχύτητες που μετρούνται είναι μειωμένες. Για πλάτος στέψης 100cm δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για τις μετρήσεις στο συγκεκριμένο σημείο. Οι τιμές για τις 3 περιόδους είναι παραπλήσιες.

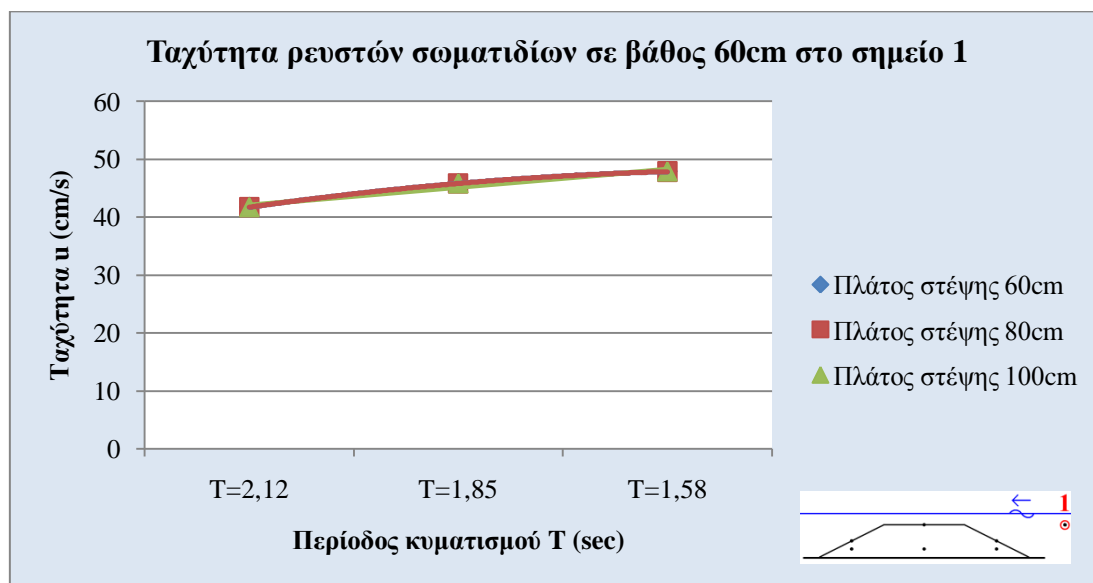


Διάγραμμα 4.1.1.7 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 50cm στο σημείο 7 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 7 έγιναν μετρήσεις με βάθος νερού 50cm για 3 διαφορετικές περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 7 βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα. Το σημείο 7 βρίσκεται στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και 10cm από την επιφάνεια του στο υπήνεμο πρανές.

Στο σημείο 7 η κυματική ενέργεια είναι πολύ μικρή λόγω των απωλειών από τη θραύση και τις τριβές. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων δεν έχει τη δυνατότητα καταγραφής τόσο χαμηλών ταχυτήτων, συνεπώς δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ακριβές συμπέρασμα για το σημείο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία πέραν των σχεδόν μηδενικών ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων. Το συμπέρασμα αυτό έρχεται σε ταύτιση με τις οπτικές παρατηρήσεις επί του μολύσκου της επιστημονικής συσκευής που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.

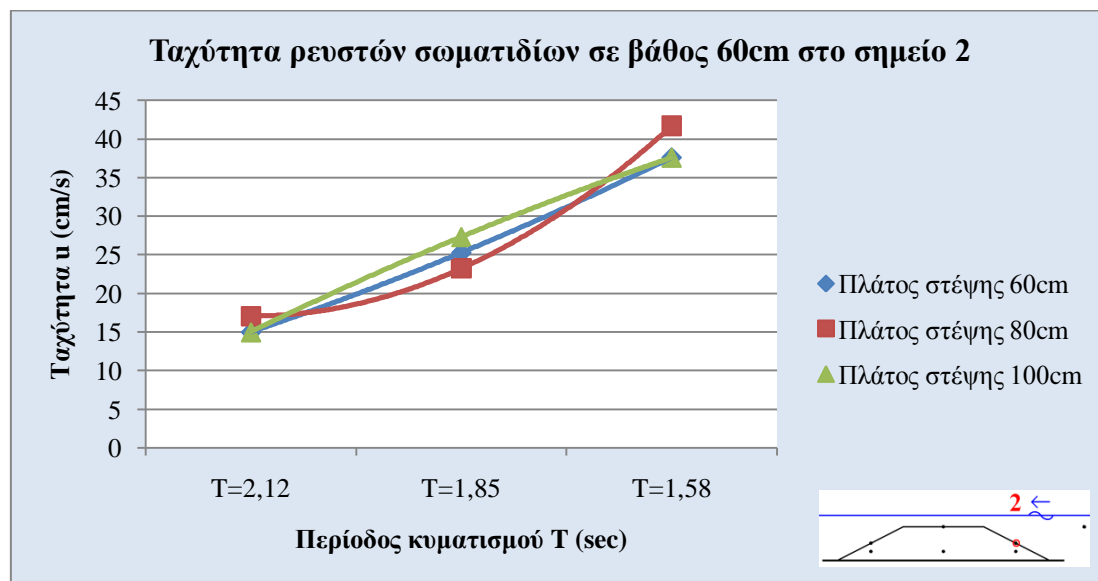
4.1.2 Βάθος νερού 60cm



Διάγραμμα 4.1.2.1 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 60cm στο σημείο 1 ανάντη του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 1, παρατηρείται ότι οι ταχύτητες ροής για πλάτος στέψης 60, 80 και 100cm είναι ίδιες για τις αντίστοιχες περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Αυτό συμβαίνει καθώς το σημείο 1 όπου έγιναν οι μετρήσεις βρίσκεται ανάντη του ύφαλου κυματοθραύστη, συνεπώς δεν επηρεάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την μεταβολή του πλάτους στέψης. Οι μετρήσεις στο σημείο αυτό έγιναν 5cm κάτω από τη στάθμη της κοιλίας του κύματος όπως όριζε το εγχειρίδιο της επιστημονικής συσκευής που χρησιμοποιήθηκε.

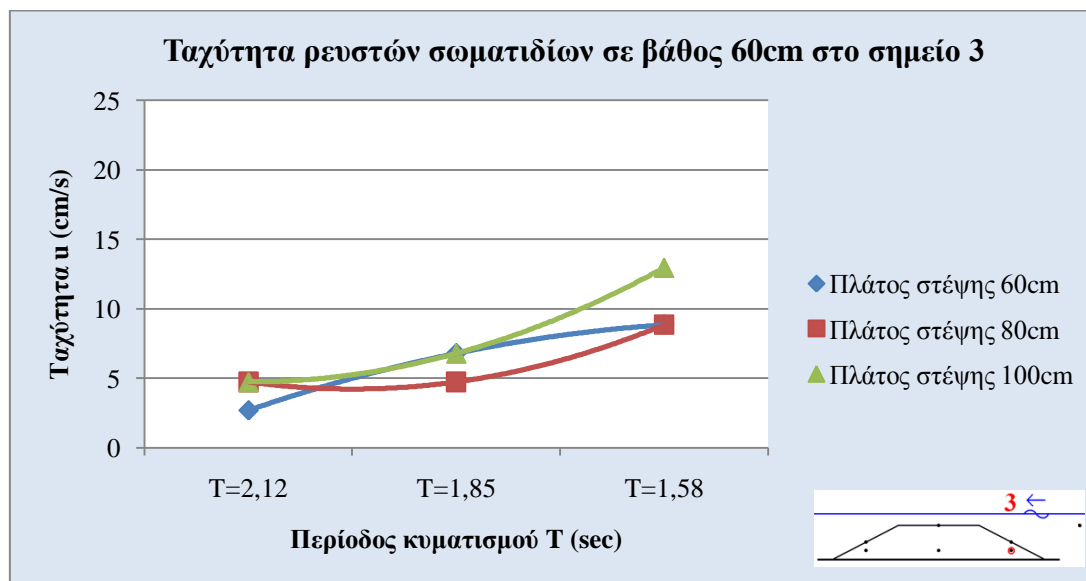
Με τη μείωση της περιόδου παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας ρευστών σωματιδίων. Η τάξη μεγέθους της αύξησης αυτής είναι παρόμοια για τις 3 διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.



Διάγραμμα 4.1.2.2 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 60cm στο σημείο 2 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 2 και με βάθος 60cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους κύματος $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 2 βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη και σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα της πειραματικής διώρυγας. Στο σημείο αυτό παρατηρήθηκε μια σύγκλιση των τιμών που μετρήθηκαν για τις 3 διαφορετικές περιόδους του πειράματος για τα 3 διαφορετικά πλάτη στέψης που κατασκευάστηκαν, καθώς το σημείο βρίσκεται ανάντη της στέψης του κυματοθραύστη και άρα δεν επηρεάζεται από αυτήν.

Με τη μείωση της περιόδου παραγόμενου κυματισμού παρατηρείται στα πειραματικά αποτελέσματα αύξηση της ταχύτητας ρευστών σωματιδίων. Η τάξη μεγέθους της αύξησης αυτής είναι παρόμοια για τις 3 διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.

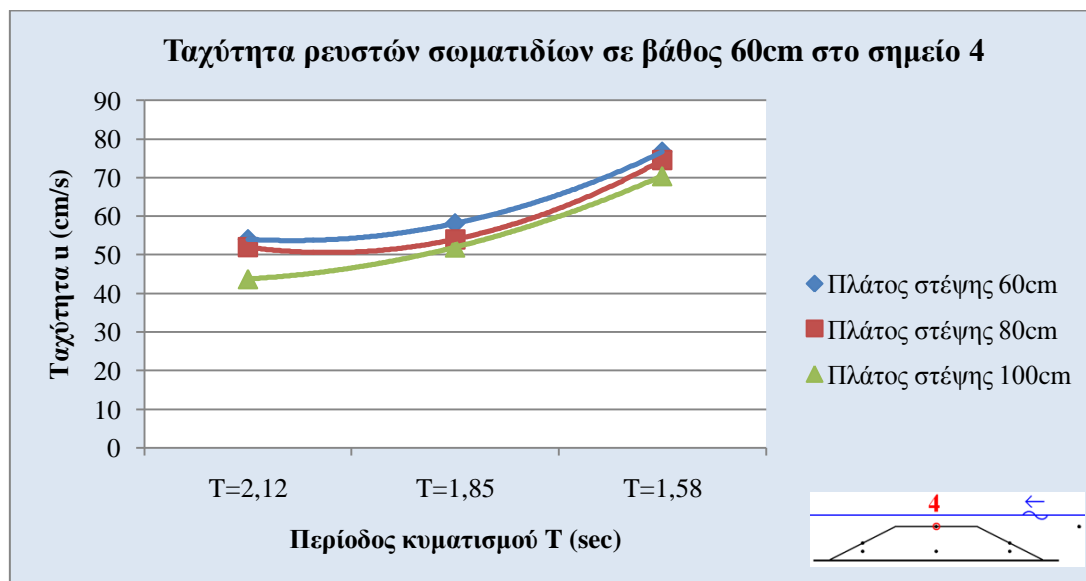


Διάγραμμα 4.1.2.3 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 60cm στο σημείο 3 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 3 και με βάθος 60cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 3 βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα.

Στο συγκεκριμένο σημείο παρατηρούνται μειωμένες οι ταχύτητες των υγρών σωματιδίων και στα 3 διαφορετικά πλάτη στέψης που χρησιμοποιήθηκαν. Η στέψη του κυματοθραύστη δεν επηρεάζει τις μετρήσεις στο σημείο αυτό. Οι διαφορές στις τιμές των ταχυτήτων που παρατηρούνται μεταξύ των τριών διατάξεων για τις 3 περιόδους δικαιολογούνται από το περιθώριο σφάλματος των πειραματικών μετρήσεων και του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν αυτές.

Παρατηρείται στο σημείο αυτό μια τάση αύξησης των ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων με τη μείωση της περιόδου παραγόμενου κυματισμού. Και στις τρεις διατάξεις ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

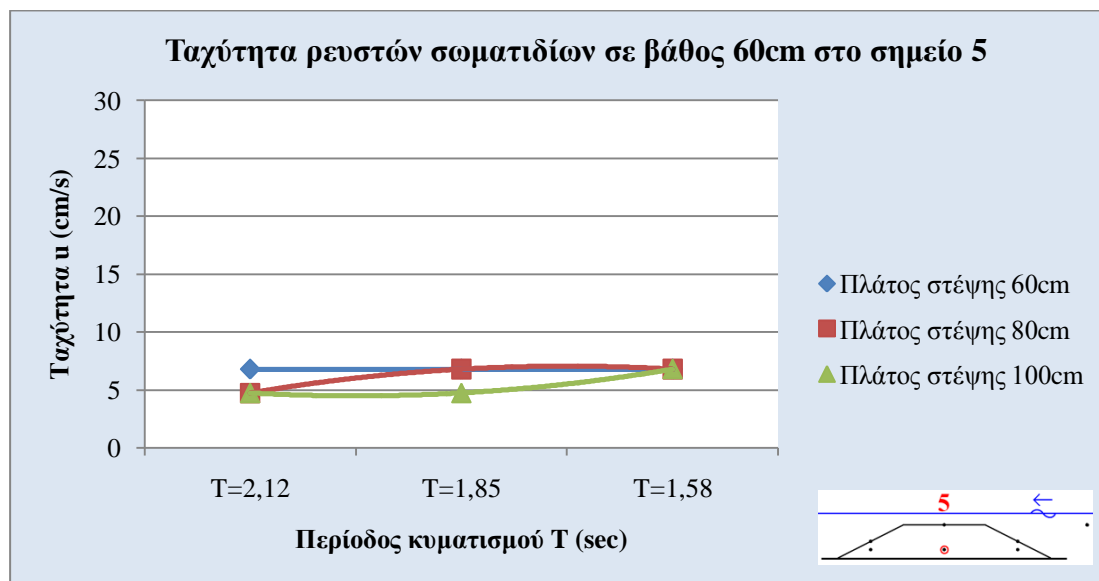


Διάγραμμα 4.1.2.4 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 60cm στο σημείο 4 στο μέσον του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 4 και με βάθος 50cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 4 βρίσκεται στο μέσον του κυματοθραύστη και στην επιφάνεια της στέψης του. Απόσταση 40cm από τον πυθμένα και 10cm από την επιφάνεια σε ηρεμία.

Στο σημείο 4 παρατηρείται με την μείωση της περιόδου, μία αύξηση της ταχύτητας των ρευστών σωματιδίων. Στο σημείο αυτό παρατηρείται επίσης και αξιόλογη διαφορά, για την ίδια περίοδο παραγόμενου κυματισμού, στις ταχύτητες ανάλογα με το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη. Σε μεγαλύτερο πλάτος στέψης η ταχύτητα που καταγράφηκε είναι μικρότερη. Αυτό οφείλεται στην απώλεια ενέργειας καθώς ο κυματισμός διέρχεται της στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη.

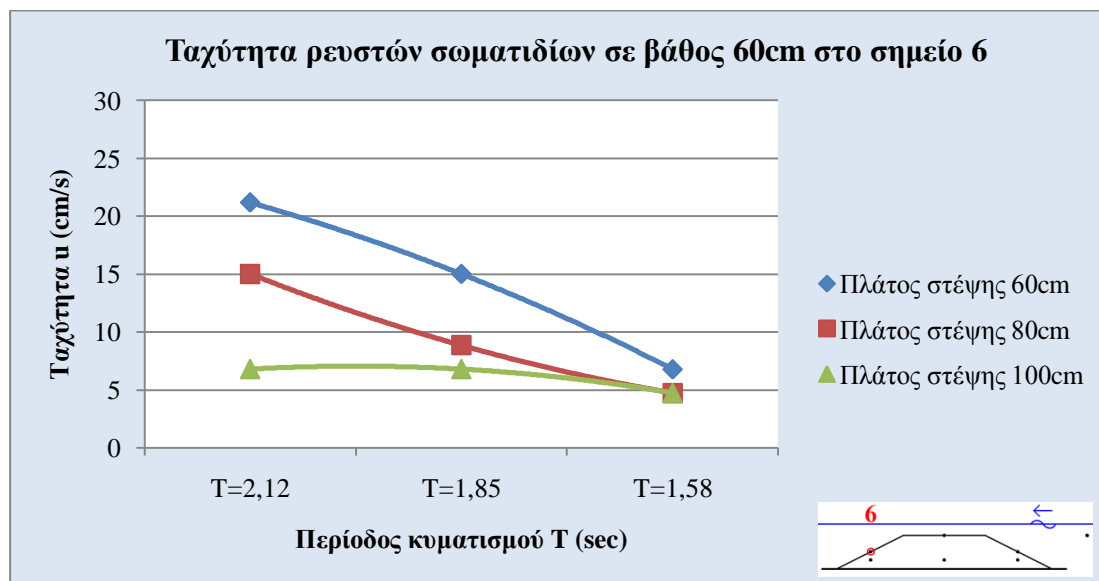
Στο σημείο 4 οι τιμές των ταχυτήτων για τις 3 περιόδους είναι μεγαλύτερες από αυτές ανάντη του κυματοθραύστη. Το νερό διέρχεται από μικρότερο εμβαδό διατομής με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας του.



Διάγραμμα 4.1.2.5 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 60cm στο σημείο 5 στο μέσον του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 5 και με βάθος 60cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 5 βρίσκεται στο μέσον του κυματοθραύστη και στο εσωτερικό αυτού σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα της πειραματικής διώρυγας.

Στο σημείο 5 παρατηρούνται μικρές τιμές ταχυτήτων καθώς βρίσκεται στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και 30cm από την επιφάνειά του, πολύ κοντά δηλαδή στον πυθμένα. Οι απώλειες ενέργειας κατά τη διέλευση του νερού από το εσωτερικό του κυματοθραύστη είναι μεγάλες. Με μεγαλύτερο πλάτος στέψης οι απώλειες ενέργειας είναι μεγαλύτερες. Για πλάτος στέψης 100cm παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες απ' ό τι στον κυματοθραύστη με πλάτος στέψης 80cm, ενώ οι μεγαλύτερες τιμές κάνουν την εμφάνισή τους σε αυτόν με 60cm. Οι τιμές των διαφορών αυτών είναι μικρές, παρόλα αυτά δείχνουν μία ξεκάθαρη τάση μείωσης της ταχύτητας για μεγαλύτερο πλάτος στέψης.

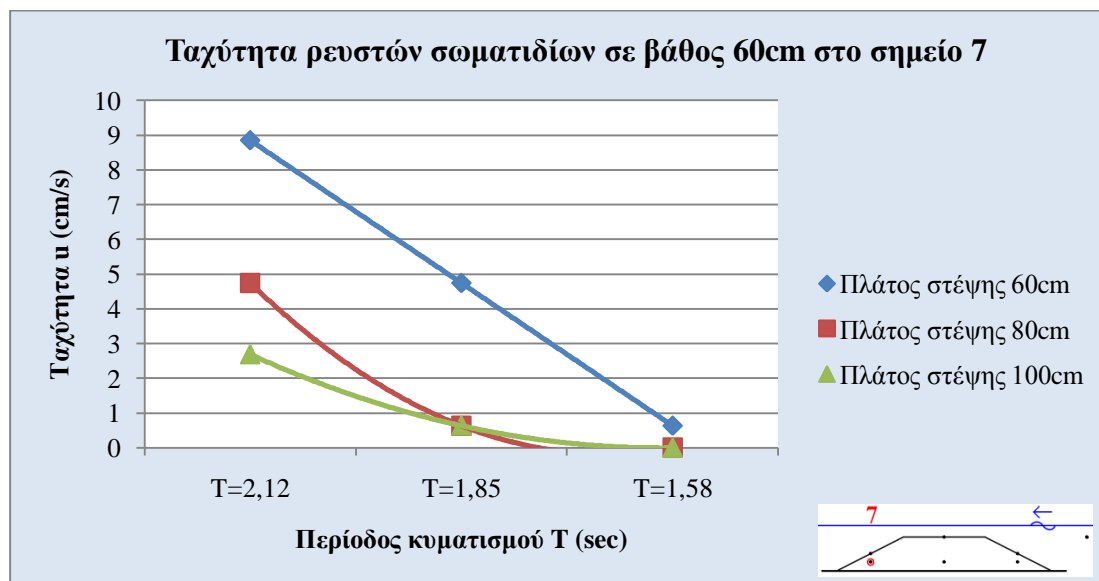


Διάγραμμα 4.1.2.6 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 60cm στο σημείο 6 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 6 έγιναν μετρήσεις με βάθος νερού 60cm για 3 διαφορετικές περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 6 βρίσκεται στη επιφάνεια του υπήνεμου πρανούς του ύφαλου κυματοθραύστη και σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα.

Στο σημείο 6 καθώς στον κυματοθραύστη θραύεται το κύμα, με τη μείωση της περιόδου, η θραύση γίνεται πιο έντονη και άρα πιο μεγάλες και οι απώλειες ενέργειας. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες για μικρότερες περιόδους.

Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος στέψης, αυξάνονται οι απώλειες ενέργειας του κύματος. Συνεπώς, για μεγαλύτερα πλάτη στέψης παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες. Στο σημείο 6 για πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ίσο με 100cm παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές ταχύτητας. Για πλάτη στέψης 80cm και 60cm οι ταχύτητες αυξάνονται αντίστοιχα.



Διάγραμμα 4.1.2.7 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 60cm στο σημείο 7 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 7 έγιναν μετρήσεις με βάθος νερού 50cm για 3 διαφορετικές περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 7 βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα. Το σημείο 7 βρίσκεται στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και 10cm από την επιφάνεια του στο υπήνεμο πρανές.

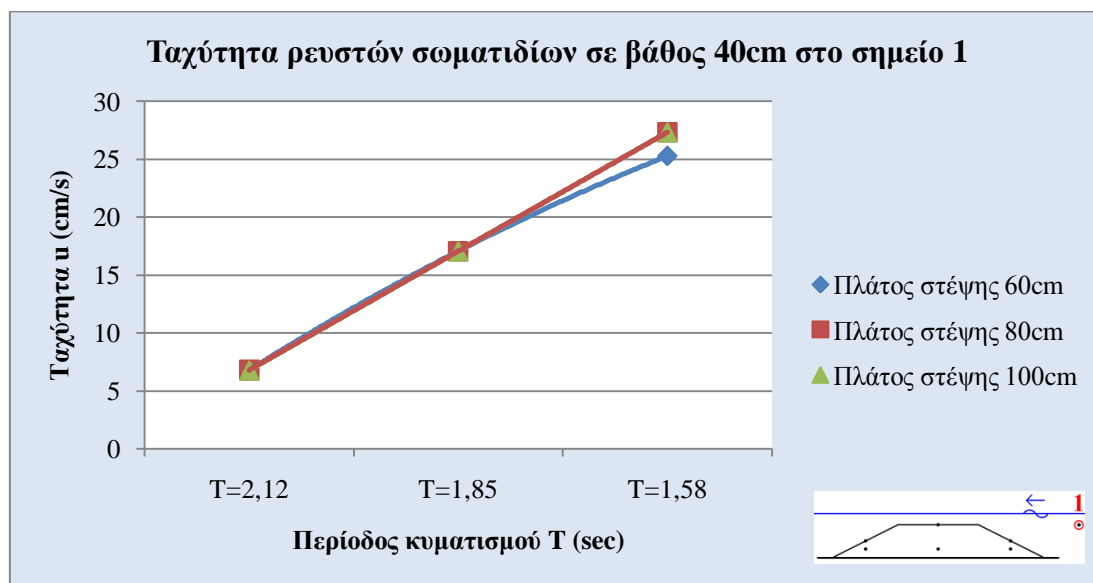
Στο σημείο 7 καθώς στον κυματοθραύστη θραύεται το κύμα, με τη μείωση της περιόδου, η θραύση γίνεται πιο έντονη και άρα πιο μεγάλες και οι απώλειες ενέργειας. Για το λόγο αυτό παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες για μικρότερες περιόδους.

Όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος στέψης, αυξάνονται οι απώλειες ενέργειας του κύματος. Συνεπώς, για μεγαλύτερα πλάτη στέψης παρατηρούνται μικρότερες ταχύτητες. Στο σημείο 7 για πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ίσο με 100cm παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές ταχύτητας. Για πλάτη στέψης 80cm και 60cm οι ταχύτητες αυξάνονται αντίστοιχα.

Το σημείο 7 συγκριτικά με το σημείο 6 που βρίσκεται 10cm άνωθεν αυτού παρουσιάζει παρόμοιο ποιοτικά διάγραμμα ταχυτήτων ρευστών σωματιδίων για τις 3

περιόδους για τις 3 διαφορετικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν με μειωμένες όμως τις τιμές αυτών. Αυτό δικαιολογείται από το αυξημένο βάθος του σημείου 7 σε σχέση με το σημείο 6, και συνεπώς των αυξημένων απωλειών ενέργειας.

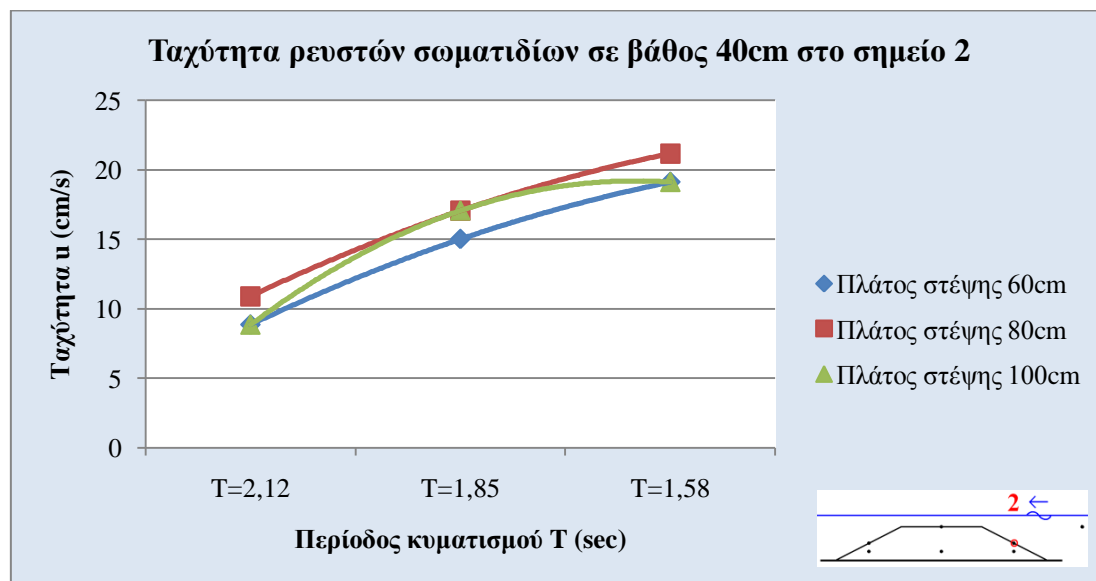
4.1.3 Βάθος νερού 40cm



Διάγραμμα 4.1.3.1 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 40cm στο σημείο 1 ανάντη του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 1, παρατηρείται ότι οι ταχύτητες ροής για πλάτος στέψης 60, 80 και 100cm είναι ίδιες για τις αντίστοιχες περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Αυτό συμβαίνει καθώς το σημείο 1 όπου έγιναν οι μετρήσεις βρίσκεται ανάντη του ύφαλου κυματοθραύστη, συνεπώς δεν επηρεάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα από την μεταβολή του πλάτους στέψης. Οι μετρήσεις στο σημείο αυτό έγιναν 5cm κάτω από τη στάθμη της κοιλίας του κύματος όπως όριζε το εγχειρίδιο της επιστημονικής συσκευής που χρησιμοποιήθηκε.

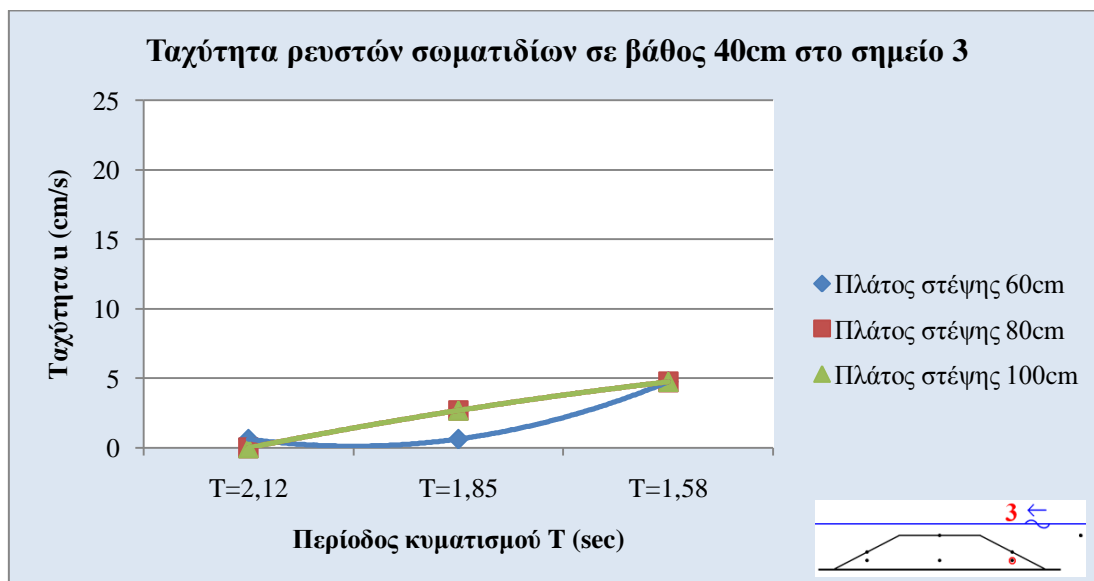
Με τη μείωση της περιόδου παραγόμενου κυματισμού παρατηρείται στα πειραματικά αποτελέσματα αύξηση της ταχύτητας ρευστών σωματιδίων. Η τάξη μεγέθους της αύξησης αυτής είναι παρόμοια για τις 3 διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.



Διάγραμμα 4.1.3.2 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 40cm στο σημείο 2 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 2 και με βάθος 40cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους κύματος $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 2 βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη και σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα της πειραματικής διώρυγας. Στο σημείο αυτό παρατηρήθηκε μια σύγκλιση των τιμών που μετρήθηκαν για τις 3 διαφορετικές περιόδους του πειράματος για τα 3 διαφορετικά πλάτη στέψης που κατασκευάστηκαν, καθώς το σημείο βρίσκεται ανάντη της στέψης του κυματοθραύστη και άρα δεν επηρεάζεται από αυτήν.

Με τη μείωση της περιόδου παραγόμενου κυματισμού παρατηρείται στα πειραματικά αποτελέσματα αύξηση της ταχύτητας ρευστών σωματιδίων. Η τάξη μεγέθους της αύξησης αυτής είναι παρόμοια για τις 3 διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.

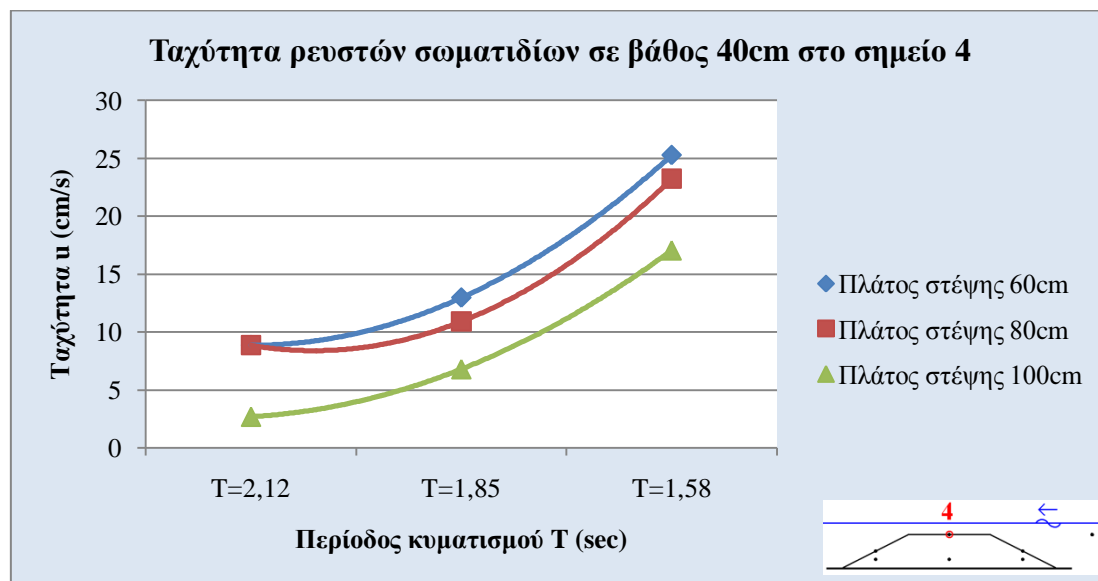


Διάγραμμα 4.1.3.3 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 40cm στο σημείο 3 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 3 και με βάθος 40cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 3 βρίσκεται στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και 10cm από την επιφάνεια του στο προσήνεμο πρανές.

Στο σημείο 3 παρατηρούνται μειωμένες οι ταχύτητες των υγρών σωματιδίων και στα 3 διαφορετικά πλάτη στέψης που χρησιμοποιήθηκαν. Η στέψη του κυματοθραύστη δεν επηρεάζει τις μετρήσεις στο σημείο αυτό. Οι διαφορές στις τιμές των ταχυτήτων που παρατηρούνται μεταξύ των τριών διατάξεων για τις 3 περιόδους δικαιολογούνται από το περιθώριο σφάλματος των πειραματικών μετρήσεων και του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε για να εξαχθούν αυτές.

Παρατηρείται στο σημείο αυτό μια τάση αύξησης των ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων με τη μείωση της περιόδου παραγόμενου κυματισμού. Και στις τρεις διατάξεις ο ρυθμός αύξησης της ταχύτητας είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

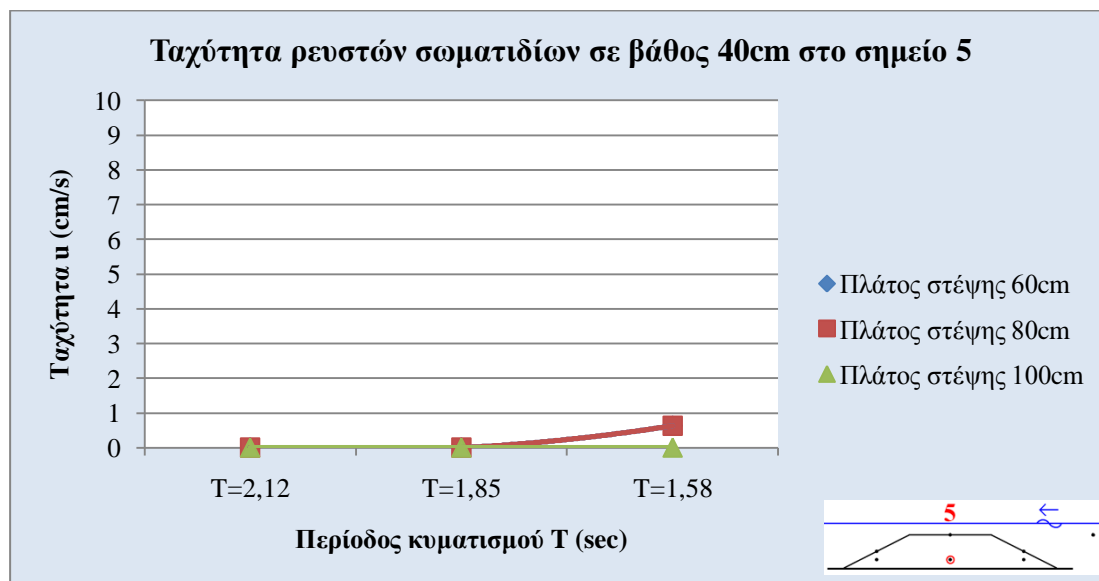


Διάγραμμα 4.1.3.4 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 40cm στο σημείο 4 στο μέσον του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 4 και με βάθος 40cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 4 βρίσκεται στο μέσον του κυματοθραύστη και στην επιφάνεια της στέψης του. Απόσταση 40cm από τον πυθμένα και 10cm από την επιφάνεια σε ηρεμία.

Στο σημείο 4 παρατηρείται με την μείωση της περιόδου, μία αύξηση της ταχύτητας των ρευστών σωματιδίων. Στο σημείο αυτό παρατηρείται επίσης και διαφορά, για την ίδια περίοδο παραγόμενου κυματισμού, στις ταχύτητες ανάλογα με το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη. Σε μεγαλύτερο πλάτος στέψης η ταχύτητα που καταγράφηκε είναι μικρότερη. Αυτό οφείλεται στην απώλεια ενέργειας που είναι μεγαλύτερη στη περίπτωση του μεγαλύτερου πλάτους, καθώς ο κυματισμός διέρχεται της στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη.

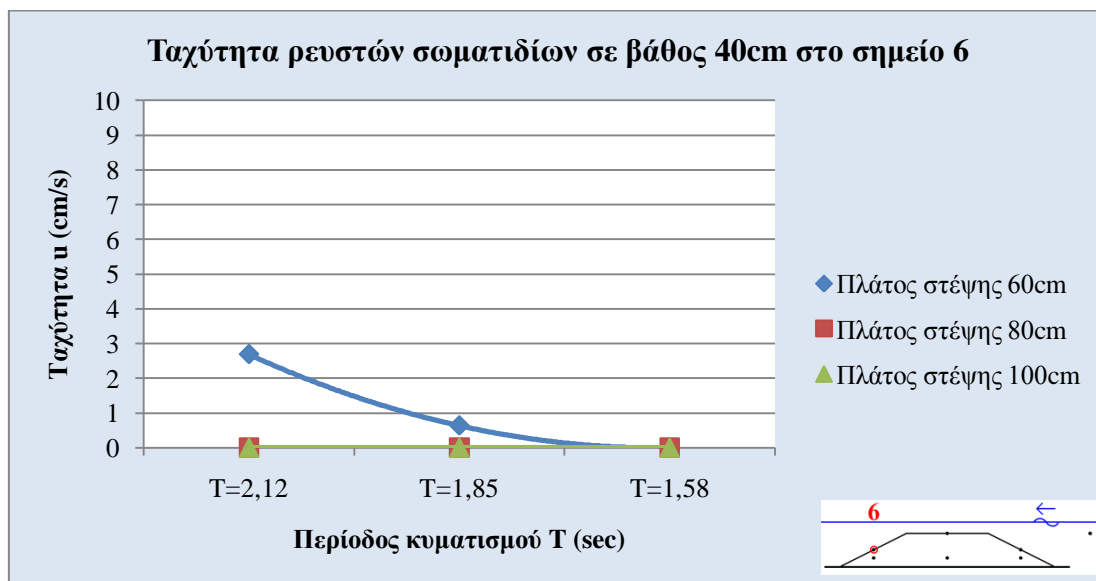
Επισημαίνεται ότι στην περίπτωση του βάθους των 40cm, στον ίσαλο δηλαδή κυματοθραύστη, η μέτρηση στο σημείο 4 έχει ληφθεί 5cm κάτω από την κοιλία του κύματος στο σημείο αυτό και όχι στο επίπεδο της στέψης του κυματοθραύστη, έτσι ώστε να είναι εφικτή η εξαγωγή της μέτρησης από το όργανο που χρησιμοποιήθηκε.



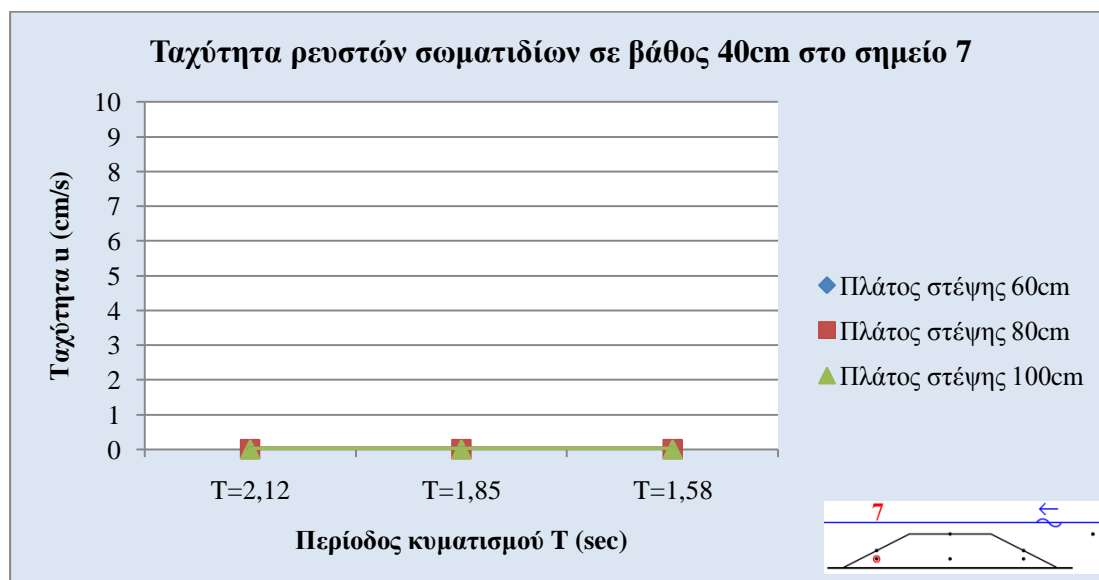
Διάγραμμα 4.1.3.5 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 40cm στο σημείο 5 στο μέσον του κυματοθραύστη.

Στο σημείο 5 και με βάθος 40cm έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$. Το σημείο 5 βρίσκεται στο μέσον του κυματοθραύστη και στο εσωτερικό αυτού σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα της πειραματικής διώρυγας.

Στο σημείο 5 λόγω των αυξημένων τριβών στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και της θραύσης του κύματος η κυματική ενέργεια είναι σημαντικά μειωμένη, συνεπώς σημαντικά μειωμένες είναι και οι ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στο Εργαστήριο Λιμενικών Έργων δεν έχει τη δυνατότητα καταγραφής τόσο χαμηλών ταχυτήτων, συνεπώς δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ακριβές συμπέρασμα για το σημείο αυτό στην παρούσα διπλωματική εργασία πέραν των σχεδόν μηδενικών ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων.



Διάγραμμα 4.1.3.6 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 40cm στο σημείο 6 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.



Διάγραμμα 4.1.3.7 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με βάθος 40cm στο σημείο 7 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Τα σημεία 6 και 7 βρίσκονται κατάντη της στέψης του κυματοθραύστη. Στην περίπτωση του βάθους των 40cm ο κυματοθραύστης είναι ίσαλος. Κατάντη του έργου η κυματική ενέργεια είναι πολύ μειωμένη, και όπως φαίνεται και στα διαγράμματα 4.1.3.6 και 4.1.3.7, οι ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων στα σημεία αυτά είναι σχεδόν μηδενικές. Στην πραγματικότητα δεν είναι μηδέν, αλλά όπως προαναφέρθηκε η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων δεν έχει τη δυνατότητα καταγραφής τόσο χαμηλών ταχυτήτων γι αυτό οι τελευταίες θεωρούνται κατά προσέγγιση μηδέν.

4.2 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΤΟΝ ΥΦΑΛΟ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΒΑΘΗ

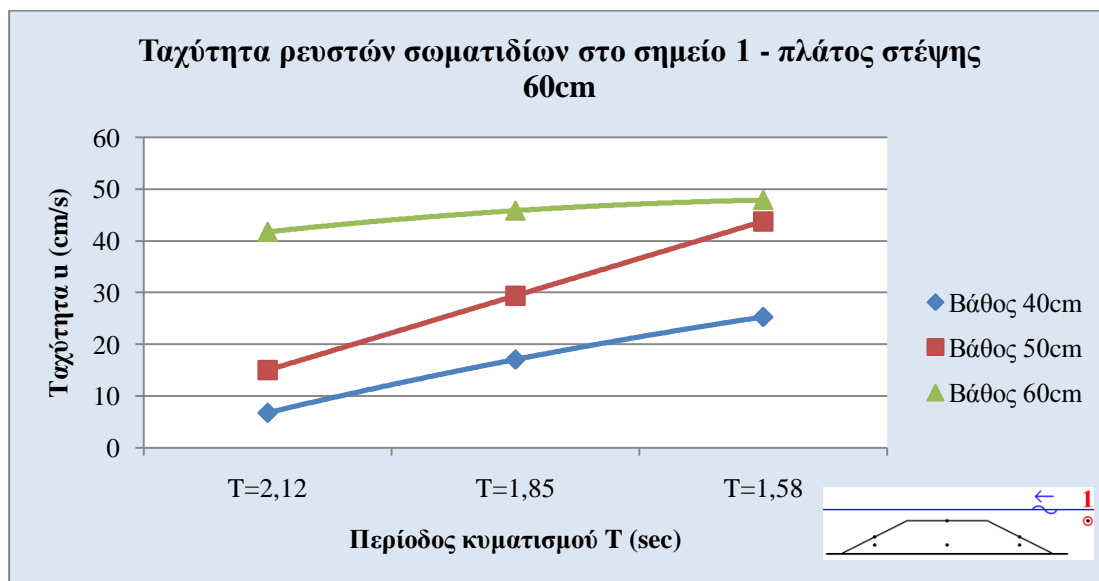
4.2.1 Πλάτος στέψης 60cm

Τα διαγράμματα 4.2.1.1 – 4.2.1.7 απεικονίζουν τη μεταβολή των ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων στα 7 σημεία που έχουν επιλεγεί για να γίνουν οι μετρήσεις. Το σημείο 1 βρίσκεται ανάντη του κυματοθραύστη σε απόσταση που δεν επηρεάζεται από την παρουσία του. Η μέτρηση από το όργανο λαμβάνεται 5cm κάτω από την κοιλία του κύματος για να εξασφαλιστεί η ορθότητά της. Το σημείο 2 βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και στην επιφάνειά του, σε απόσταση 20cm από τον πυθμένα. Το σημείο 3 βρίσκεται στο εσωτερικό του κυματοθραύστη και 10cm χαμηλότερα από το σημείο 2. Το σημείο 4 είναι στην επιφάνεια του κυματοθραύστη και στο μέσον του πλάτους στέψης του, στα 40cm από τον πυθμένα. Το σημείο 5 βρίσκεται 30cm βαθύτερα από το σημείο 4 στο εσωτερικό του μοντέλου που κατασκευάστηκε. Τα σημεία 6 και 7 βρίσκονται στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και στις αντίστοιχες θέσεις με τα σημεία 2 και 3.

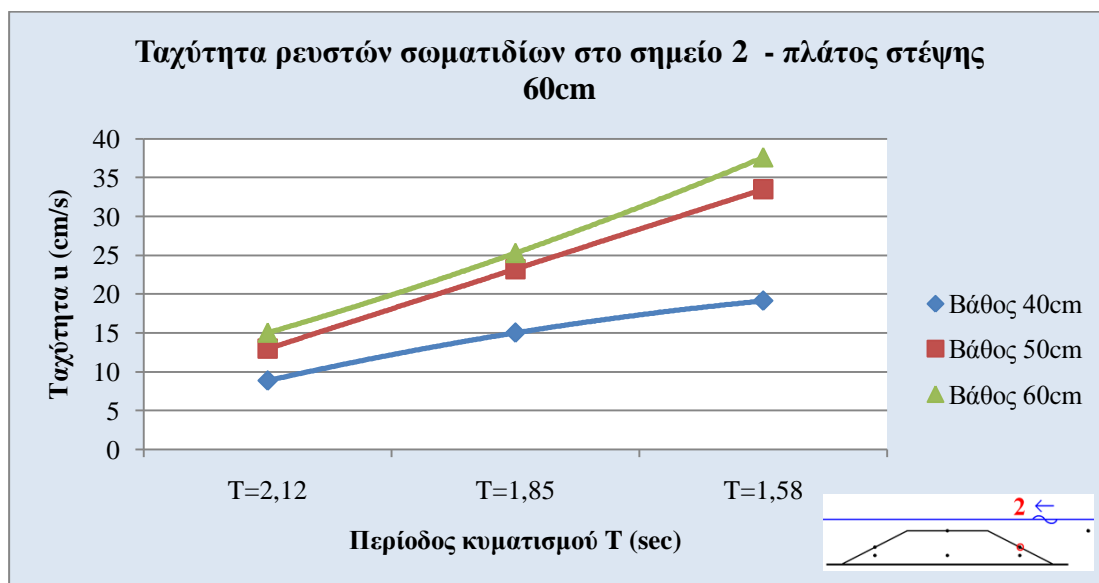
Στα διαγράμματα 4.2.1.1 – 4.2.1.5 παρατηρούνται μεγαλύτερες ταχύτητες για μικρότερες περιόδους. Στις μικρότερες περιόδους ο κυματισμός θραύεται και άρα στα σημεία κατάντη της στέψης του κυματοθραύστη οι ταχύτητες μειώνονται (διαγράμματα 4.2.1.6 και 4.2.1.7). Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρούνται αυξημένες ταχύτητες για βάθος ροής 60cm συγκριτικά με αυτές για βάθος 50cm και 40cm.

Στο διάγραμμα 4.2.1.4 και 4.2.1.5 παρατηρείται σε κάποια σημεία η ταχύτητα για βάθος 50cm ότι είναι μεγαλύτερη από αυτήν για βάθος 60cm. Το γεγονός ότι οι πειραματικές διατάξεις μελετήθηκαν μόνο για 3 διαφορετικές τιμές της περιόδου ($T=2,12\text{sec}$, $T=1,85\text{sec}$ και $T=1,58\text{sec}$) δεν επιτρέπουν μία ακριβέστερη αποτύπωση της συμπεριφοράς της μεταβολής των ταχυτήτων που μελετούνται για τα διαφορετικά βάθη. Στην πραγματικότητα και οι περιπτώσεις αυτές μας οδηγούν στο ίδιο

συμπέρασμα που προαναφέρθηκε, στο συμπέρασμα δηλαδή πως με την αύξηση του βάθους αυξάνονται και οι ταχύτητες ρευστών σωματιδίων στα σημεία μελέτης.¹

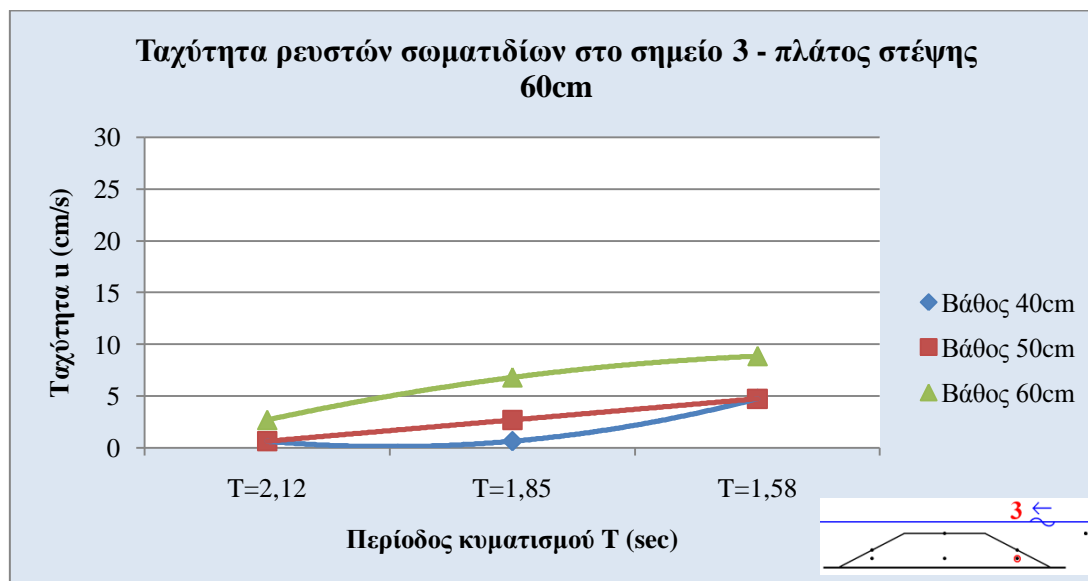


Διάγραμμα 4.2.1.1 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1 .

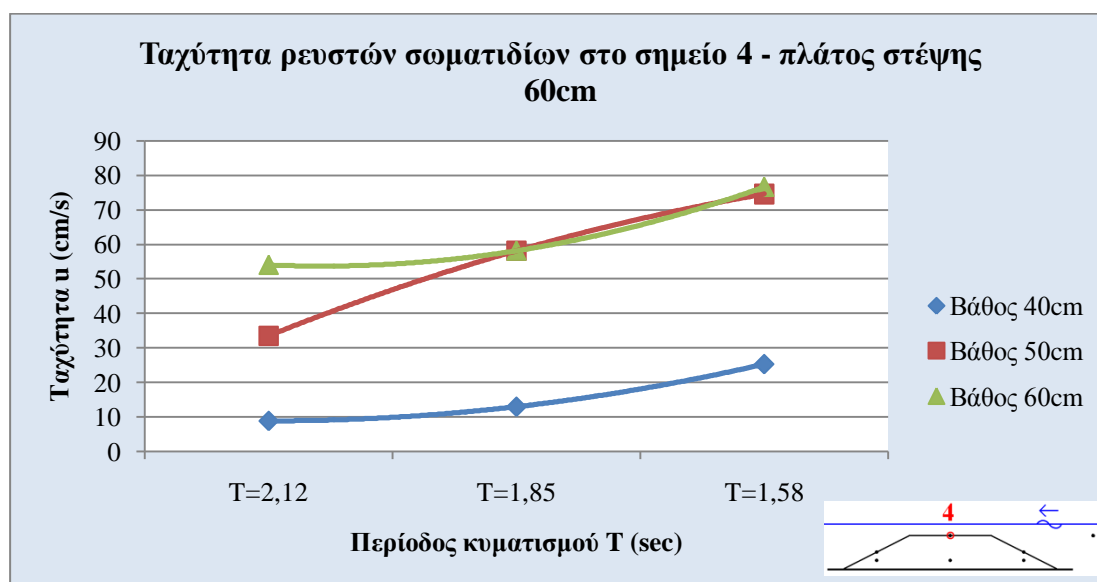


Διάγραμμα 4.2.1.2 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

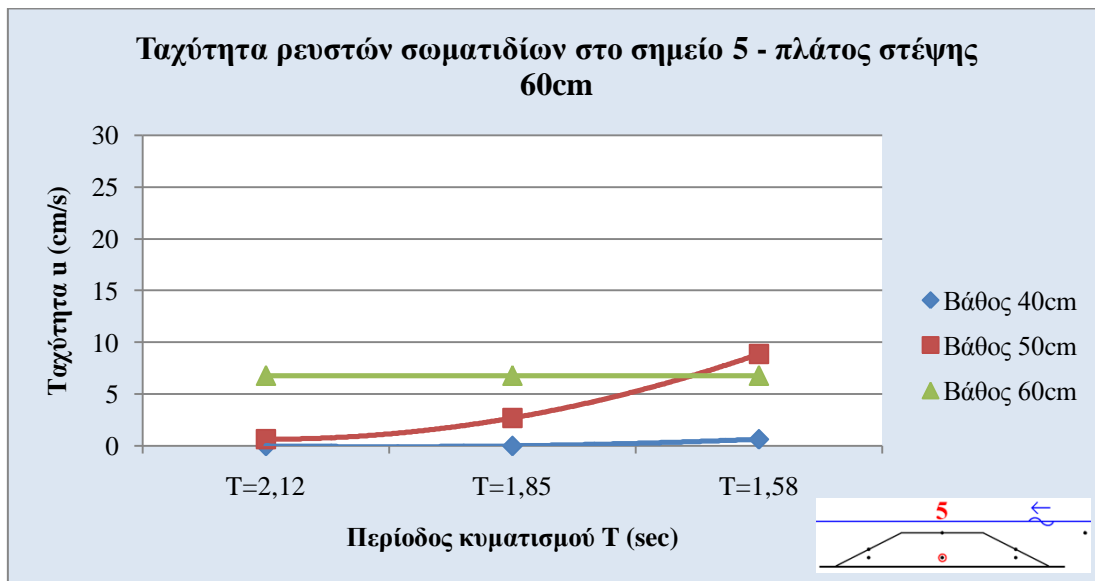
¹ Πρέπει να τονιστεί το γεγονός ότι η επιστημονική συσκευή (Novonic StreamFlo) που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις στο εργαστήριο έχει ως output διακριτές τιμές, τιμές $\in \mathbb{N}$ και όχι τιμές $\in \mathbb{R}$. Για τον λόγο αυτό μερικές τιμές ταχύτητας μετά τη μέτρηση και την «μετάφραση» αυτής μέσω του καλιμπραρίσματος του οργάνου μπορεί να αλλοιώνονται λίγο, όχι τόσο όμως ώστε να μην μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.



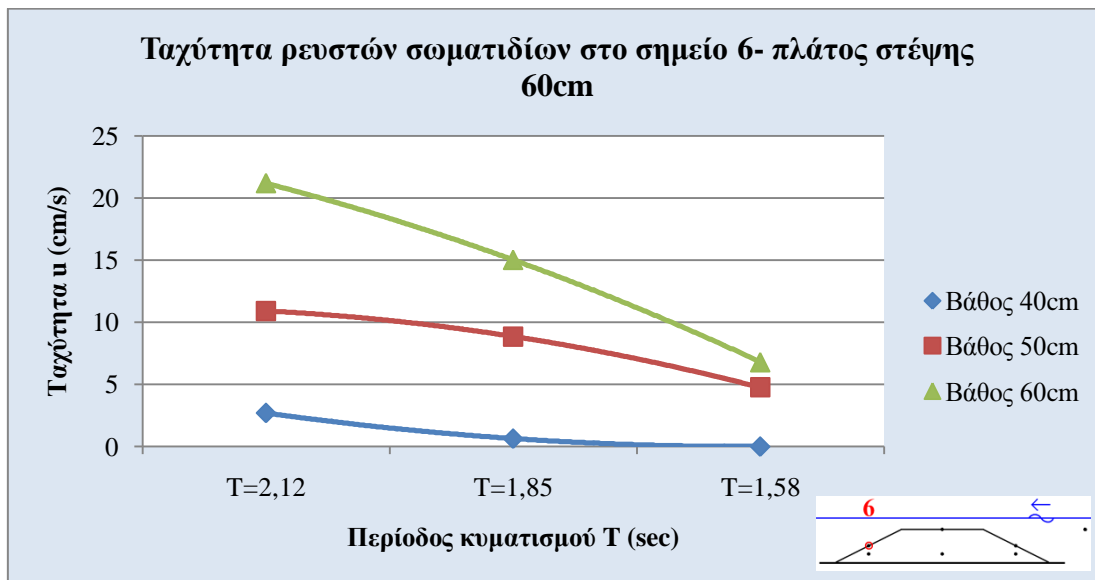
Διάγραμμα 4.2.1.3 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 60cm στο σημείο 3 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.



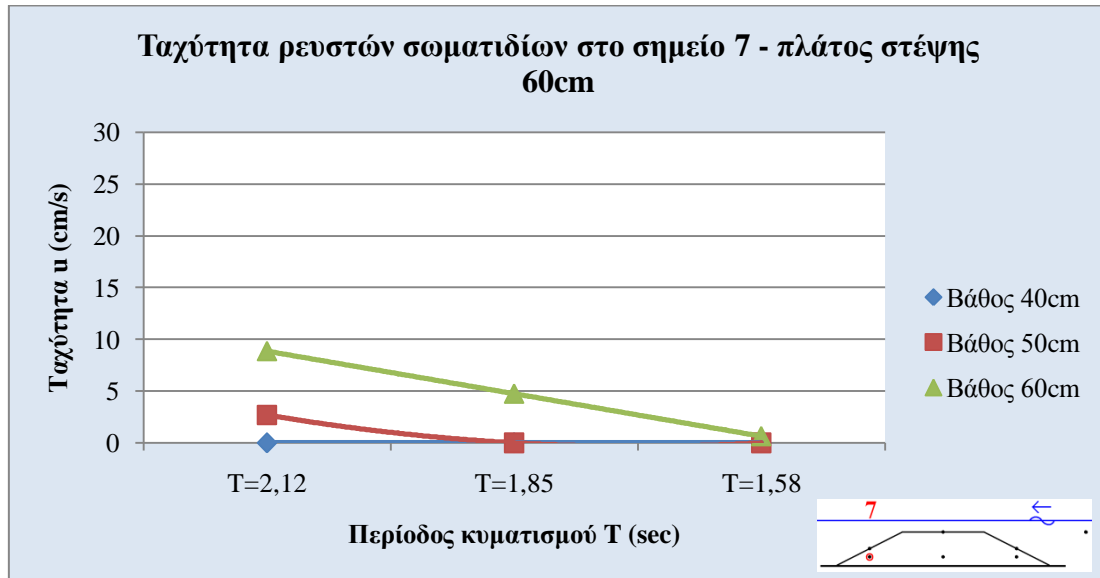
Διάγραμμα 4.2.1.4 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 60cm στο σημείο 4 στο μέσον του κυματοθραύστη.



Διάγραμμα 4.2.1.5 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 60cm στο σημείο 5 στο μέσον του κυματοθραύστη.

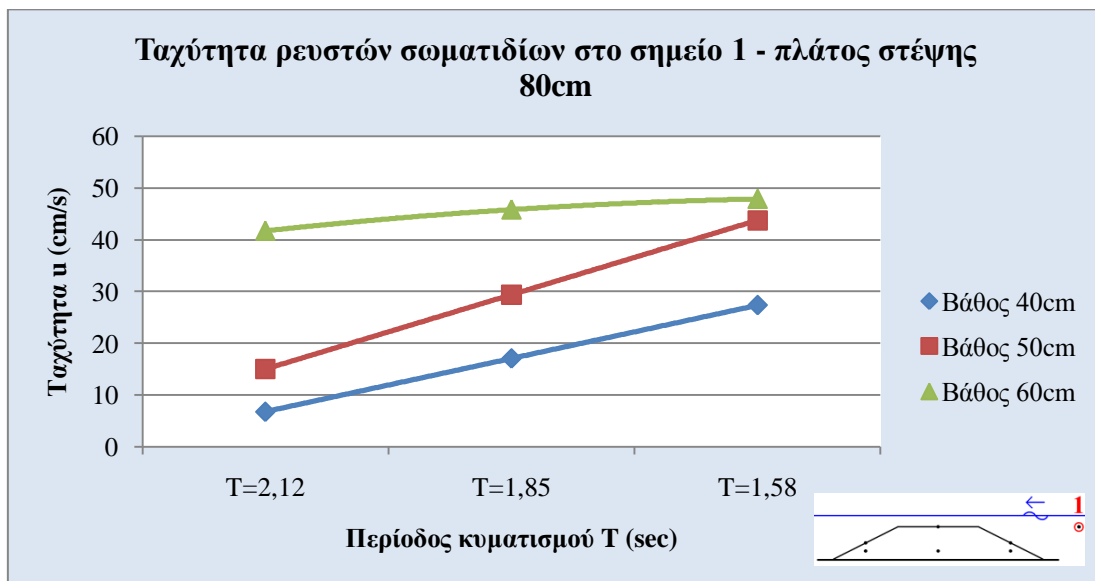


Διάγραμμα 4.2.1.6 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με πλάτος στέψης 60cm στο σημείο 6 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

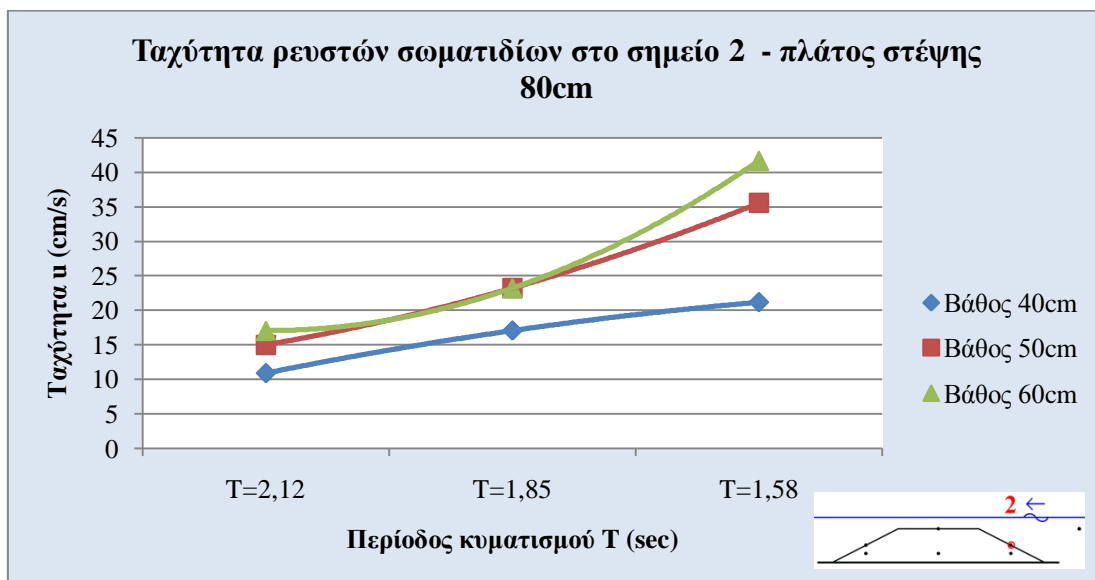


Διάγραμμα 4.2.1.7 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με πλάτος στέψης 60cm στο σημείο 7 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

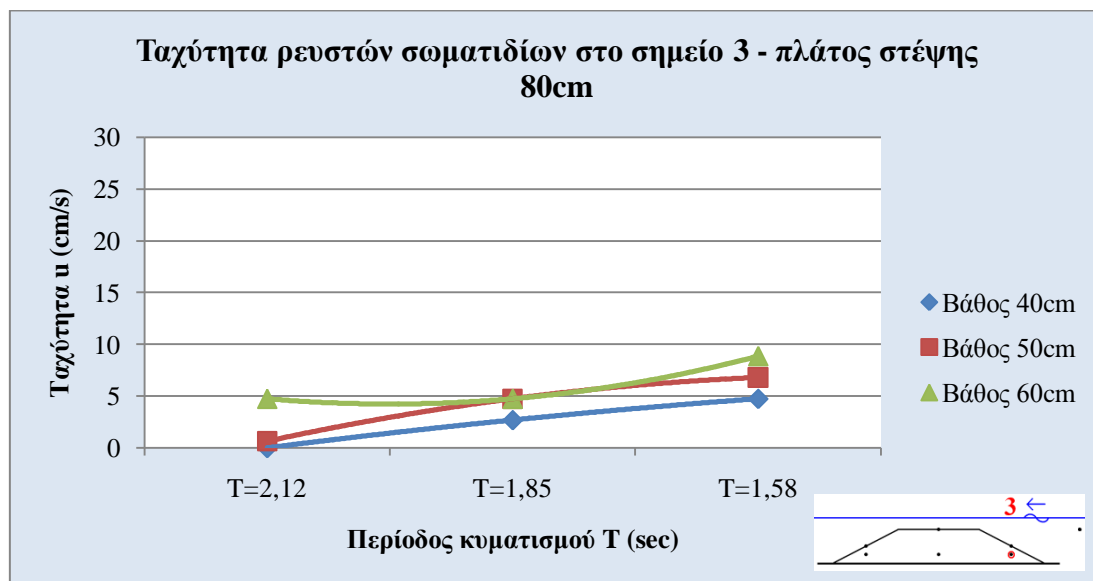
4.2.2 Πλάτος στέψης 80cm



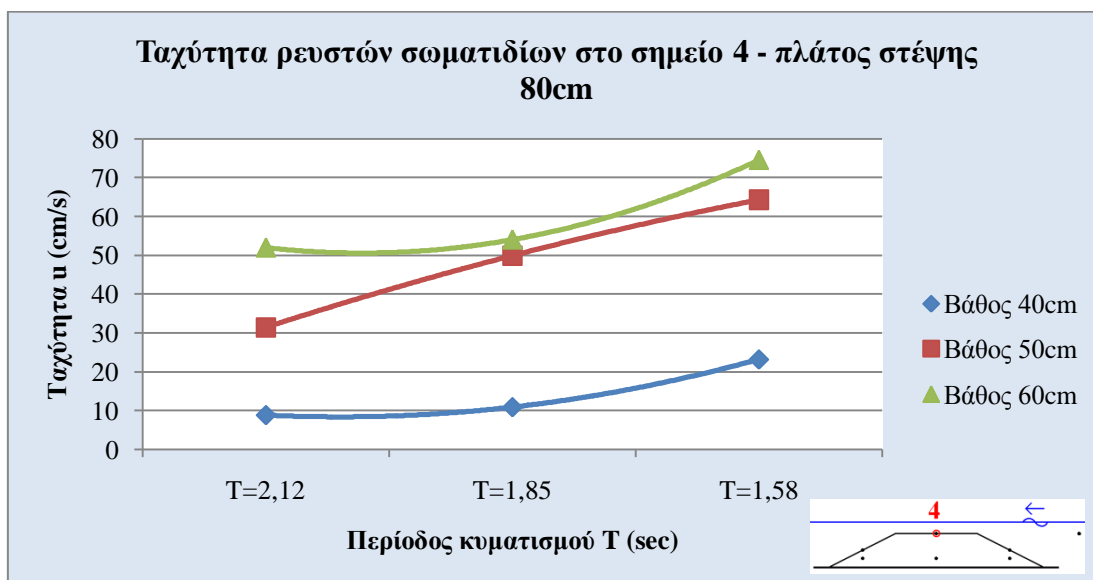
Διάγραμμα 4.2.2.1 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1 ανάντη του κυματοθραύστη.



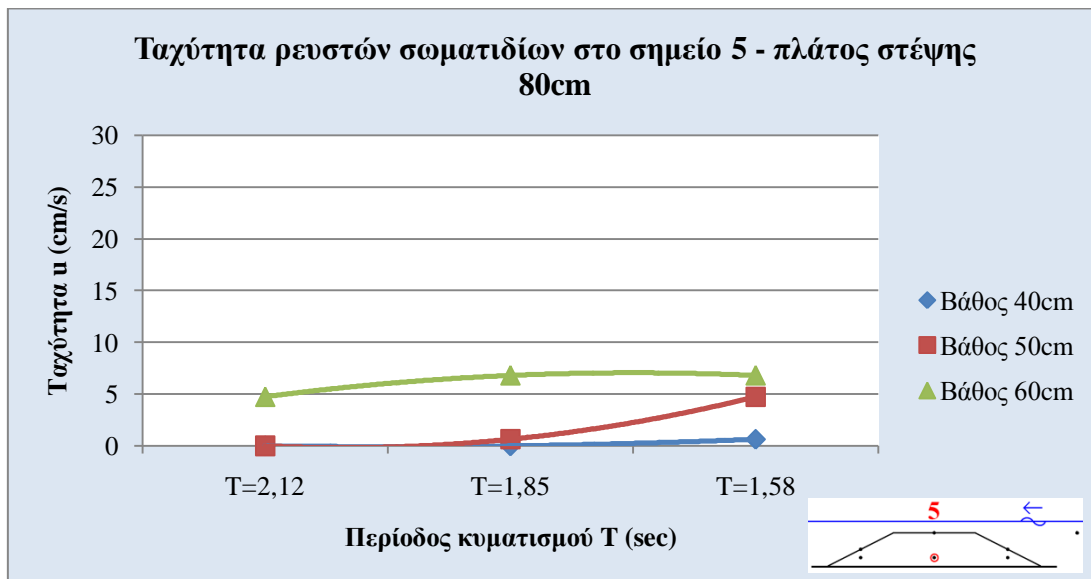
Διάγραμμα 4.2.2.2 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.



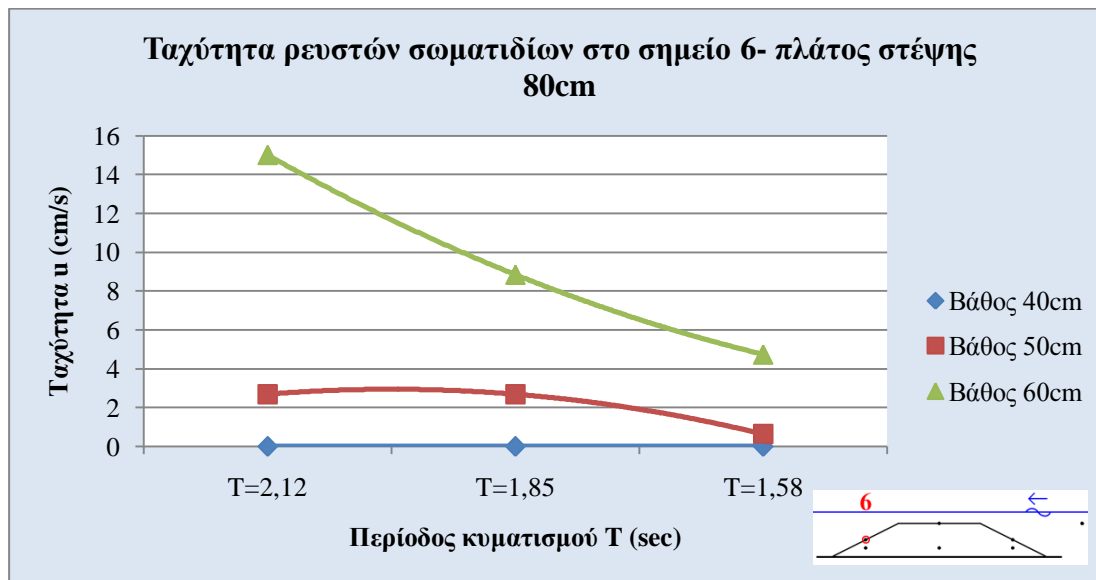
Διάγραμμα 4.2.2.3 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 80cm στο σημείο 3 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.



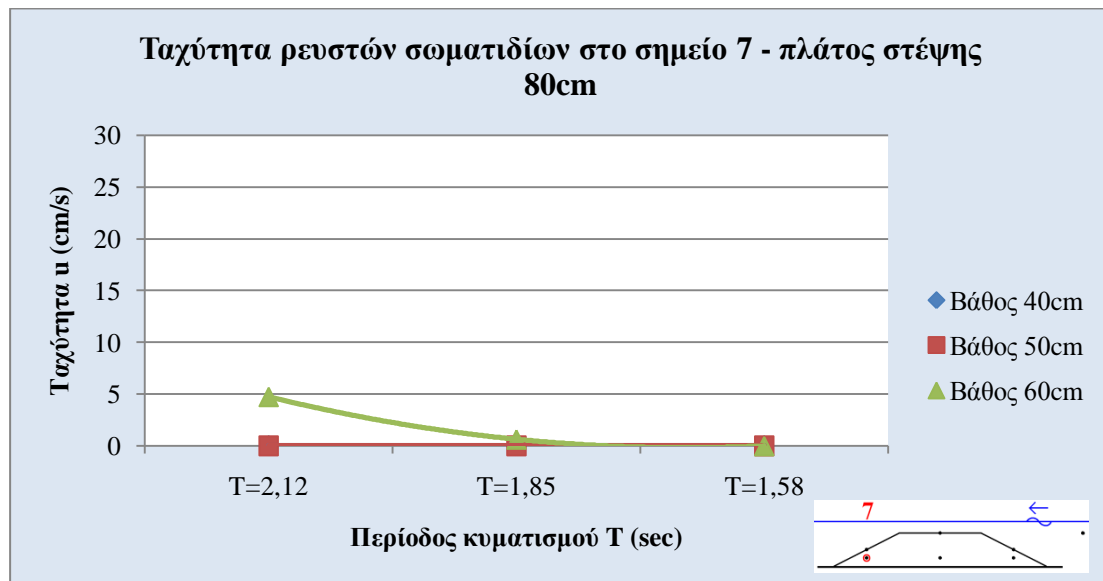
Διάγραμμα 4.2.2.4 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 80cm στο σημείο 4 στο μέσον του κυματοθραύστη.



Διάγραμμα 4.2.2.5 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 80cm στο σημείο 5 στο μέσον του κυματοθραύστη.

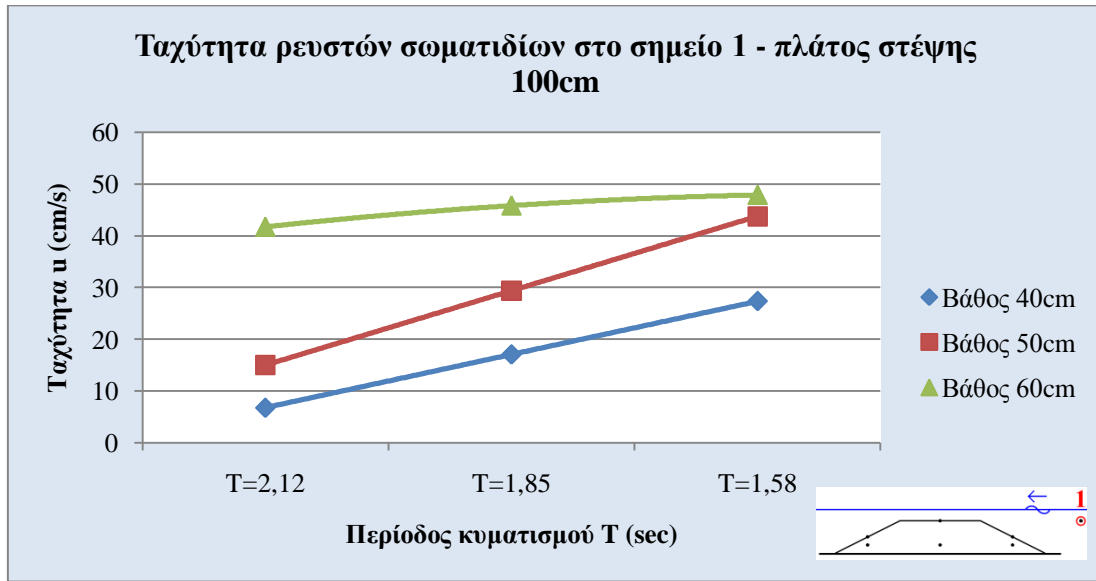


Διάγραμμα 4.2.2.6 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με πλάτος στέψης 80cm στο σημείο 6 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

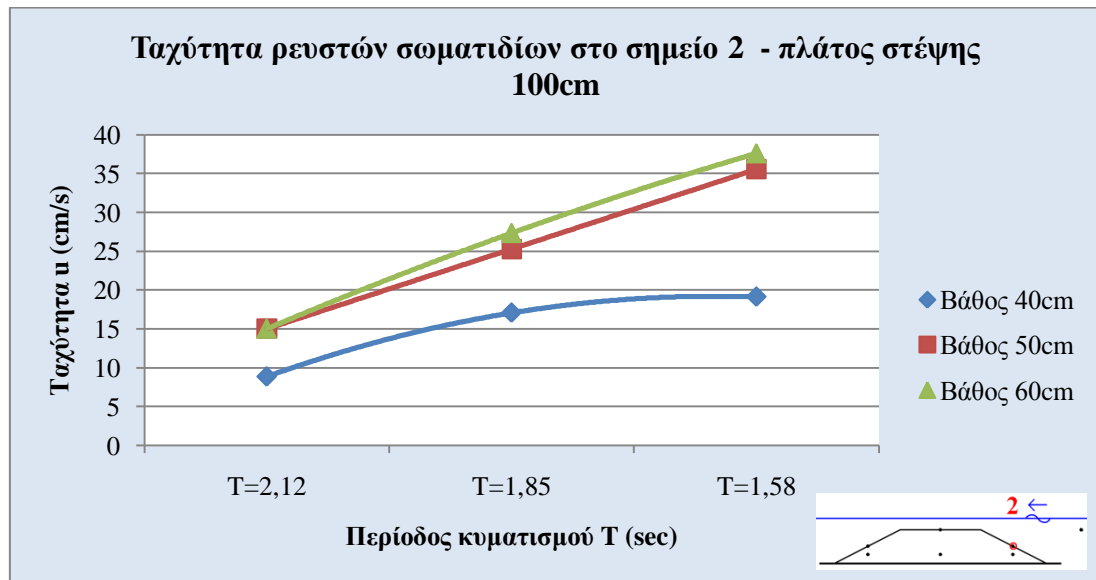


Διάγραμμα 4.2.2.7 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με πλάτος στέψης 80cm στο σημείο 7 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

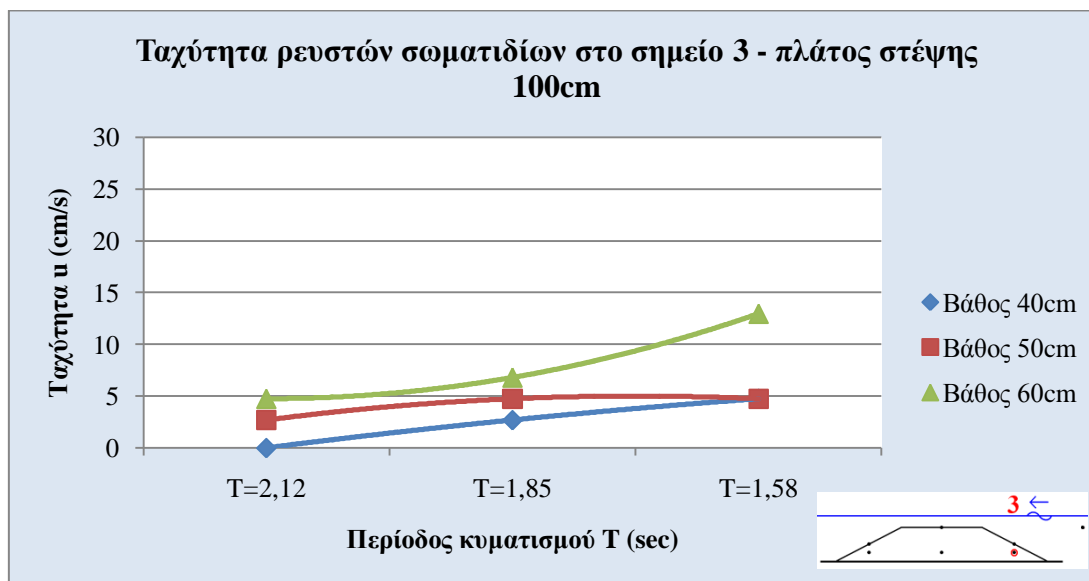
4.2.3 Πλάτος στέψης 100cm



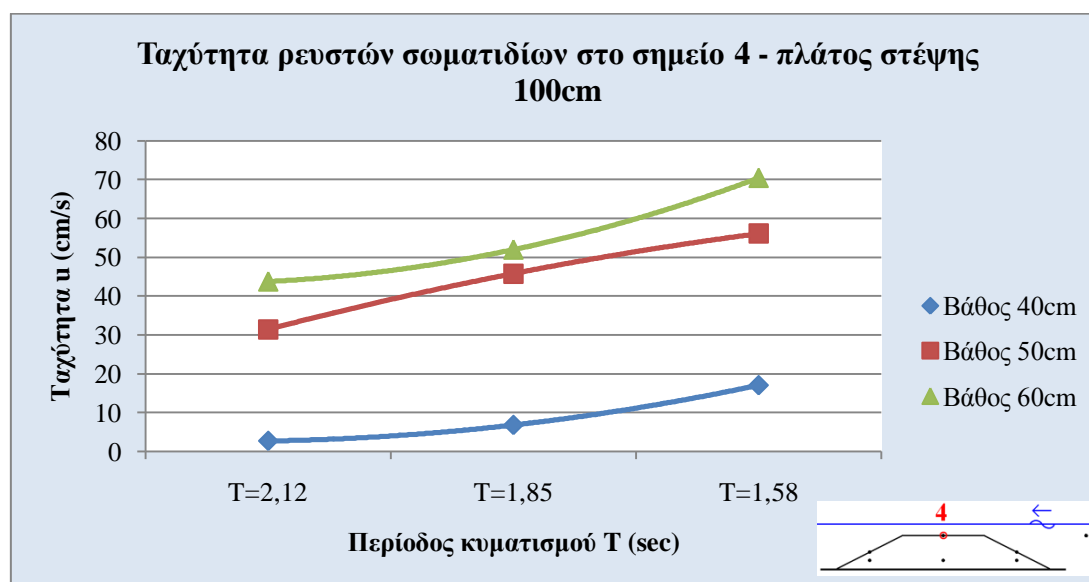
Διάγραμμα 4.2.3.1 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 1 ανάντη του κυματοθραύστη.



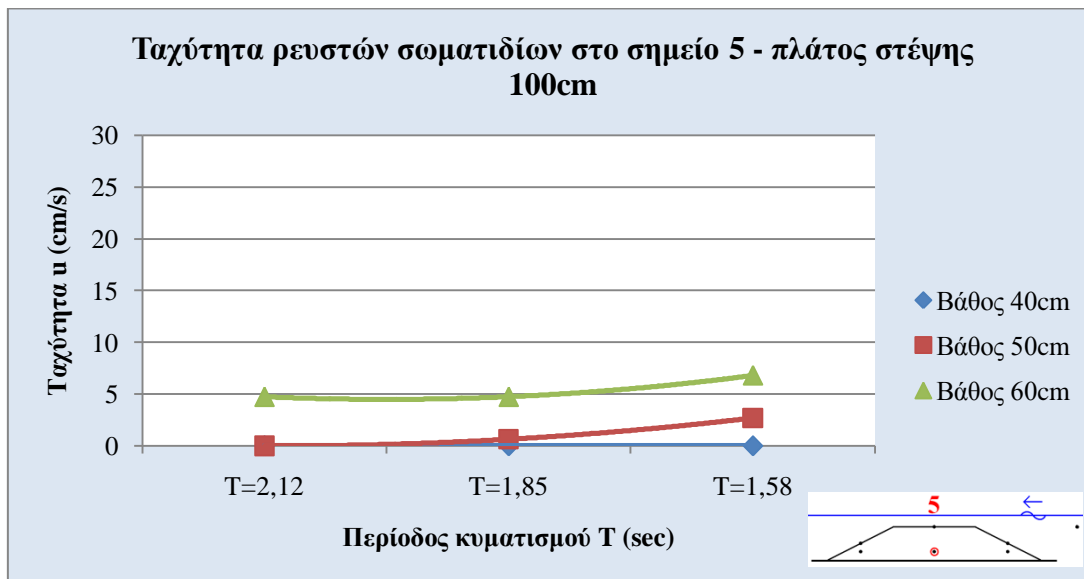
Διάγραμμα 4.2.3.2 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων στο σημείο 2 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.



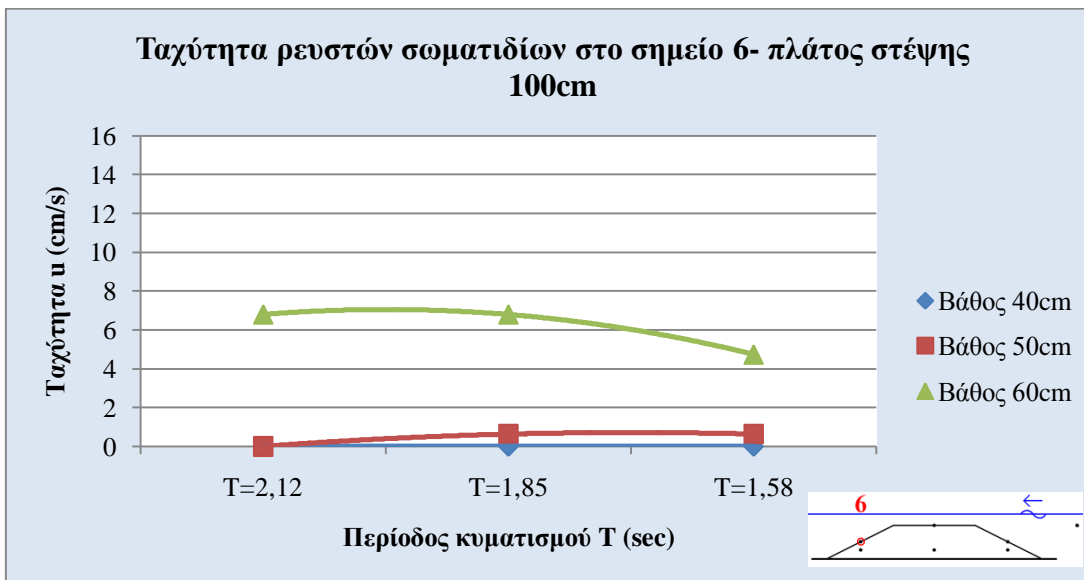
Διάγραμμα 4.2.3.3 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 100cm στο σημείο 3 στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.



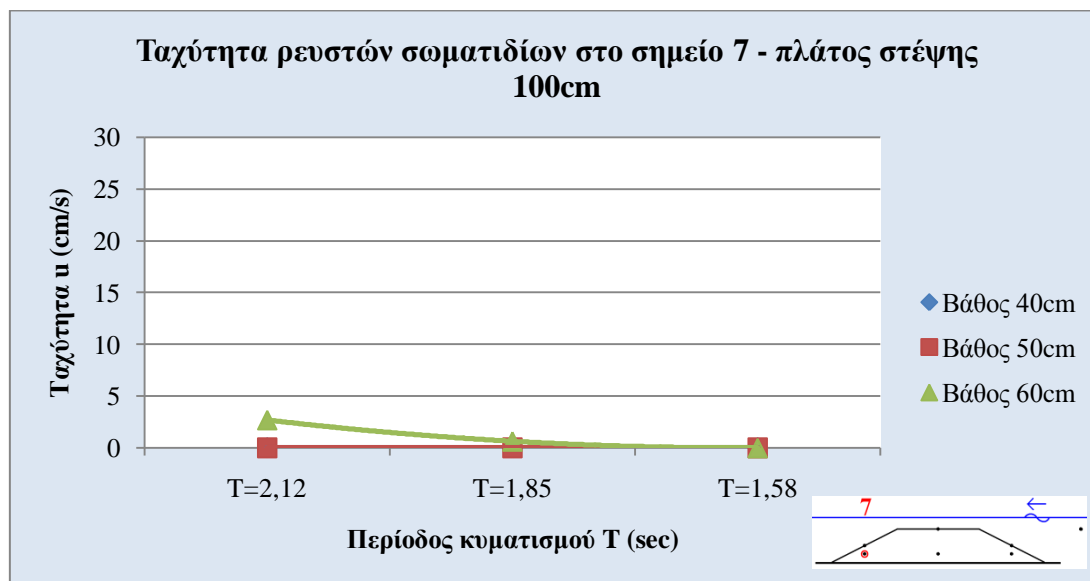
Διάγραμμα 4.2.3.4 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέψης 100cm στο σημείο 4 στο μέσον του κυματοθραύστη.



Διάγραμμα 4.2.3.5 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων για πλάτος στέφης 100cm στο σημείο 5 στο μέσον του κυματοθραύστη.



Διάγραμμα 4.2.3.6 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με πλάτος στέφης 100cm στο σημείο 6 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.



Διάγραμμα 4.2.3.7 – Ταχύτητα ρευστών σωματιδίων με πλάτος στέψης 100cm στο σημείο 7 στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

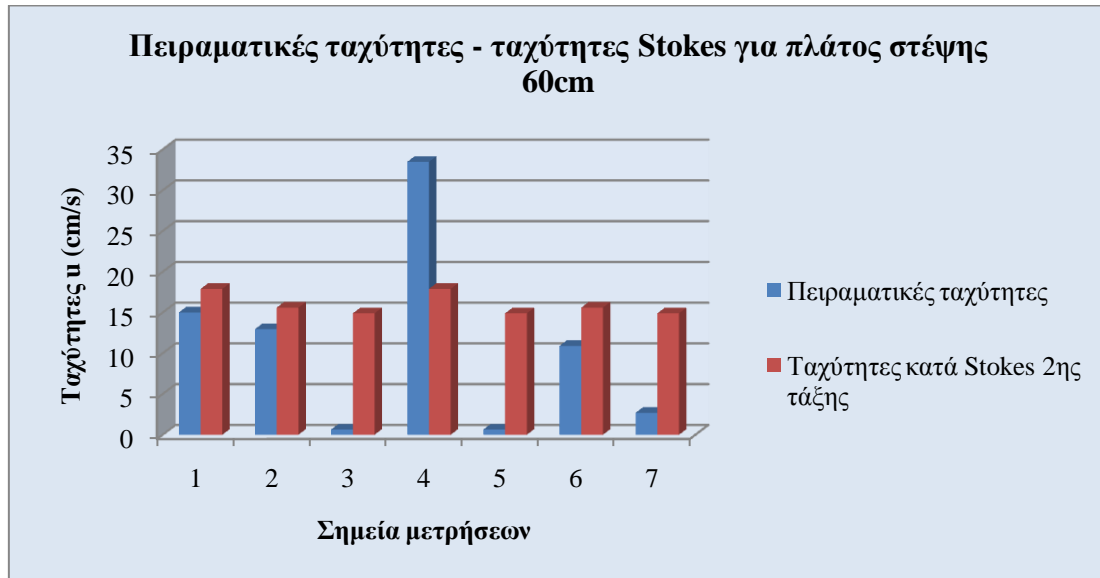
Για τους κυματοθραύστες με πλάτη στέψης 80cm και 100cm τα αποτελέσματα που ελήφθησαν παρουσιάζουν παρόμοια ποιοτικά χαρακτηριστικά με αυτά για πλάτος στέψης 60cm, με τη διαφορά ότι σε μεγαλύτερο πλάτος στέψης παρατηρούνται μειωμένες ταχύτητες στα σημεία κατάντη της στέψης λόγω των αυξημένων ενεργειακών απωλειών.

4.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΜΕ ΤΑΧΥΤΗΤΕΣ ΚΑΤΑ STOKES 2^{ης} ΤΑΞΗΣ

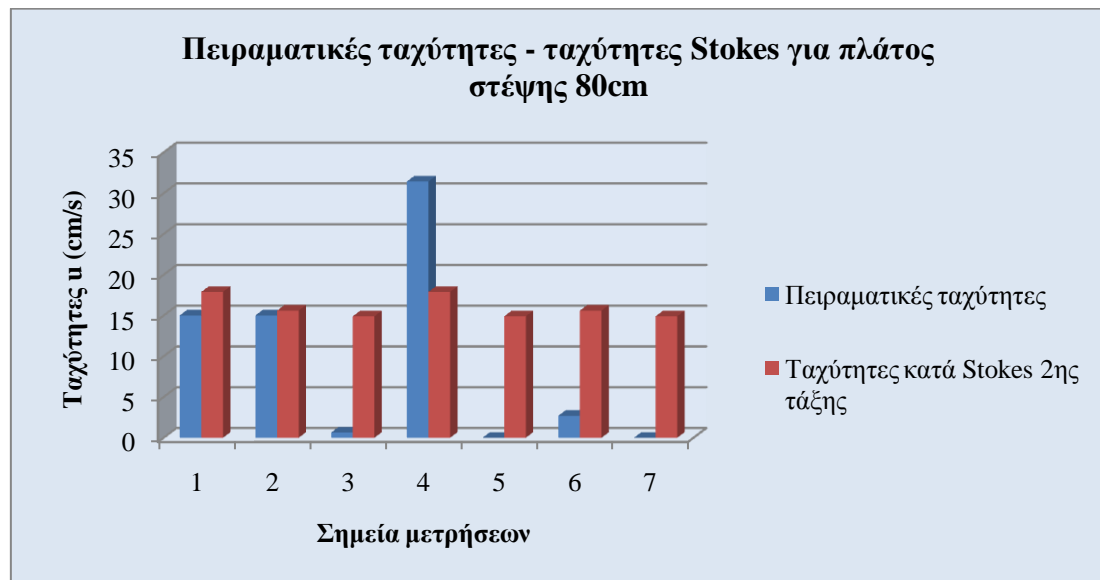
Για περίοδο κυματισμού $T=2,12\text{sec}$ παρατηρήθηκε για το σημείο 1 που βρίσκεται ανάντη του κυματοθραύστη και σε απόσταση αρκετή από αυτόν, ώστε να μην επηρεάζει τις μετρήσεις, ότι τα πειραματικά αποτελέσματα των ταχυτήτων συγκλίνουν με αυτά που δίνει η μαθηματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης για το σημείο αυτό για το δεδομένο βάθος όπου λήφθηκε η μέτρηση και για το αντίστοιχο ύψος κύματος.

Στο σημείο 1 η μέτρηση λήφθηκε 5cm κάτω από την κοιλία του κύματος δηλαδή σε κατακόρυφη απόσταση 8cm βαθύτερα από την ελεύθερη επιφάνεια. Το βάθος ήταν $D=50\text{cm}$ και το ύψος κύματος $H=8\text{cm}$.

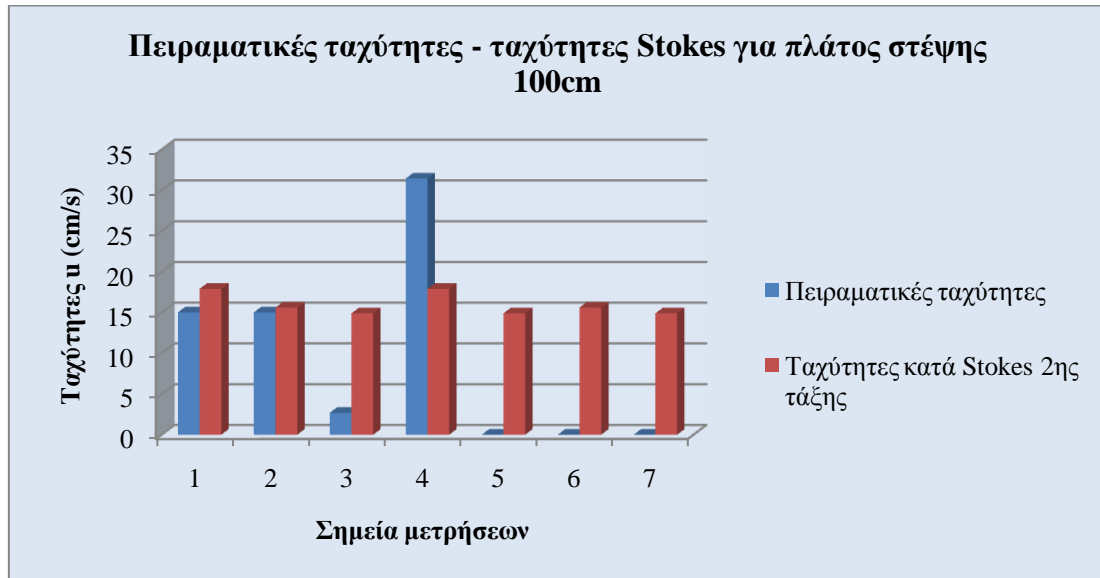
Οι ταχύτητες σύμφωνα με τη μαθηματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης υπολογίστηκαν για κάθε σημείο με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του σημείου αυτού και συγκρίθηκαν με τις πειραματικές ταχύτητες που μετρήθηκαν.



Διάγραμμα 4.3.1 – Σύγκριση πειραματικών ταχυτήτων με τις ταχύτητες κατά Stokes 2^{ης} τάξης για πλάτος στέψης 60cm.



Διάγραμμα 4.3.2 – Σύγκριση πειραματικών ταχυτήτων με τις ταχύτητες κατά Stokes 2^{ης} τάξης για πλάτος στέψης 80cm.



Διάγραμμα 4.3.3 – Σύγκριση πειραματικών ταχυτήτων με τις ταχύτητες κατά Stokes 2^{ης} τάξης για πλάτος στέψης 100cm.

Στα διαγράμματα 4.3.1 – 4.3.3 αποτυπώνονται οι πειραματικές ταχύτητες στα 7 σημεία του κυματοθραύστη όπου λήφθηκαν οι μετρήσεις συγκριτικά με τις ταχύτητες της θεωρίας Stokes 2^{ης} τάξης στα σημεία αυτά.

Στο σημείο 1 που βρίσκεται ανάντη του κυματοθραύστη, και δεν επηρεάζεται από την παρουσία του, παρατηρείται σύγκλιση των πειραματικών ταχυτήτων με αυτές που προκύπτουν από τη μαθηματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης.

Στο σημείο 2 που βρίσκεται στην επιφάνεια του κυματοθραύστη στην προσήνεμη πλευρά του και 20cm από τον πυθμένα, η παρουσία της διάταξης δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων και παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές εξακολουθούν να βρίσκονται πολύ κοντά με τη μαθηματική θεωρία.

Στο σημείο 3 που βρίσκεται στη προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη, στο εσωτερικό του, 10cm χαμηλότερα από το σημείο 2, παρατηρούνται πειραματικές ταχύτητες πολύ μικρότερες σε σχέση με τις ταχύτητες κατά Stokes 2^{ης} τάξης.

Στο σημείο 4, στην επιφάνεια της στέψης της πειραματικής διάταξης και στο μέσον αυτής, παρατηρούνται ταχύτητες πολύ αυξημένες συγκριτικά με τις ταχύτητες της μαθηματικής θεωρίας, μιας και το νερό διέρχεται από μικρότερη διατομή με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητάς του.

Στο σημείο 5, που βρίσκεται στο μέσον του κυματοθραύστη και στο εσωτερικό του σε απόσταση 10cm από τον πυθμένα, οι ταχύτητες που παρατηρήθηκαν είχαν πολύ μειωμένες τιμές, λόγω της μεγάλης απώλειας ενέργειας κατά τη διέλευση του νερού από το εσωτερικό του κυματοθραύστη. Συνεπώς οι πειραματικές ταχύτητες παρατηρούνται πολύ μικρότερες συγκριτικά με τις ταχύτητες που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη μαθηματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης για το σημείο αυτό.

Στο σημείο 6, που βρίσκεται στην επιφάνεια του κυματοθραύστη και στην αντίστοιχη θέση του σημείου 3 στην υπήνεμη πλευρά του παρατηρείται το εξής φαινόμενο. Σε πλάτος στέψης 60cm, οι πειραματικές ταχύτητες έχουν παραπλήσια τιμή με τις τιμές κατά Stokes, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 4.3.1. Οι πειραματικές ταχύτητες όμως αποκλίνουν περισσότερο όσο μεγαλώνει το πλάτος

στέψης, όπως παρατηρείται στα διαγράμματα 4.3.2 και 4.3.3 για πλάτη στέψης κυματοθραύστη 80cm και 100cm αντίστοιχα.

Στο σημείο 7, που βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη και στο εσωτερικό του, οι ταχύτητες που μετρήθηκαν, λόγω των αυξημένων απωλειών ενέργειας από την παρουσία της διάταξης, έχουν πολύ μικρές, σχεδόν μηδενικές, τιμές. Είναι προφανές ότι στο σημείο 7 δεν υπάρχει καμία σύγκλιση των πειραματικά μετρούμενων τιμών των ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων με τις ταχύτητες που υπολογίστηκαν από τη μαθηματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης για το ίδιο σημείο.

4.4 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΧΕΤΙΚΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (u/c) ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΎΨΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ (H/D)

Μελετήθηκε για όλες τις διατάξεις η μεταβολή της σχετικής ταχύτητας u/c συναρτήσει του σχετικού ύψους H/D για να είναι δυνατή η διατύπωση σαφέστερων συμπερασμάτων

Όπου u : ταχύτητα ρευστών σωματιδίων

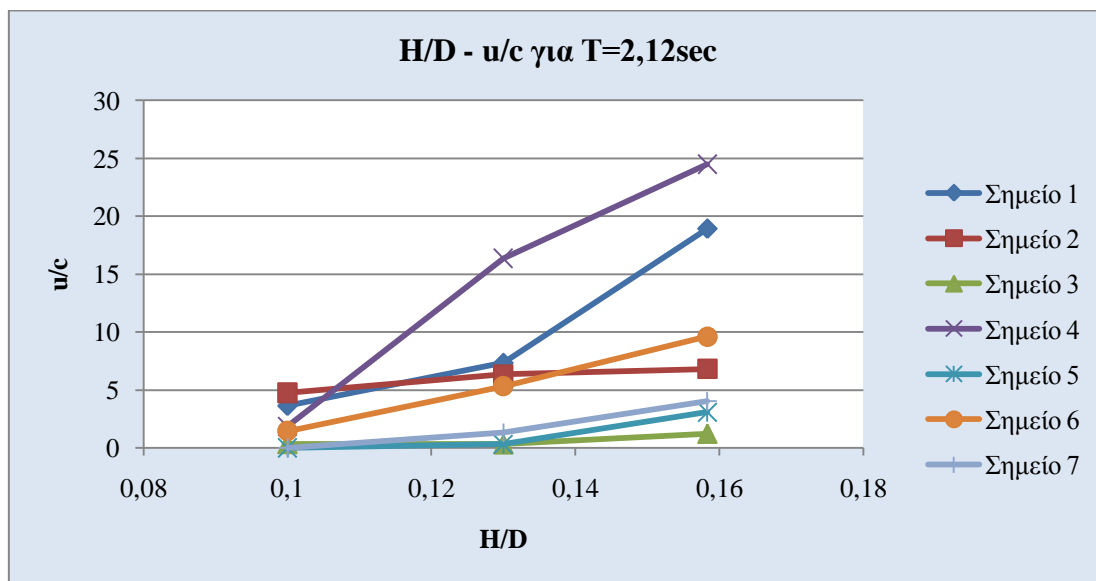
c : ταχύτητα φάσης κύματος (c =μήκος κύματος (L)/ περίοδος (T))

H : ύψος κύματος

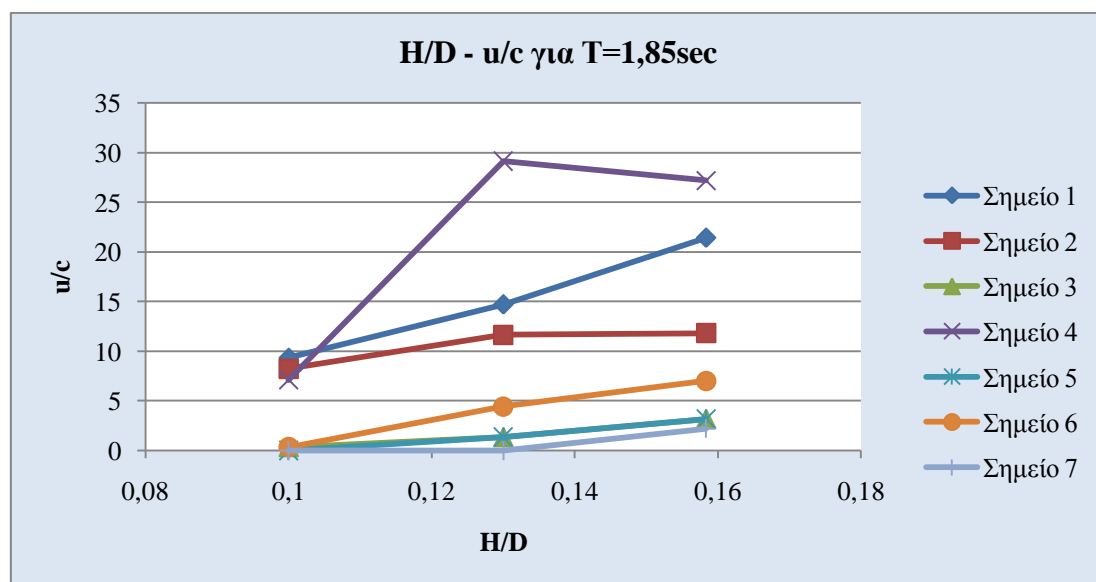
D : βάθος νερού

Οι διατάξεις που μελετήθηκαν είναι ύφαλοι κυματοθραύστες με πλάτη στέψης 60cm, 80cm και 100cm για 3 διαφορετικές περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T_1=2,12\text{sec}$, $T_2=1,85\text{sec}$ και $T_3=1,58\text{sec}$ και για 3 βάθη νερού $D_1=40\text{cm}$, $D_2=50\text{cm}$ και $D_3=60\text{cm}$.

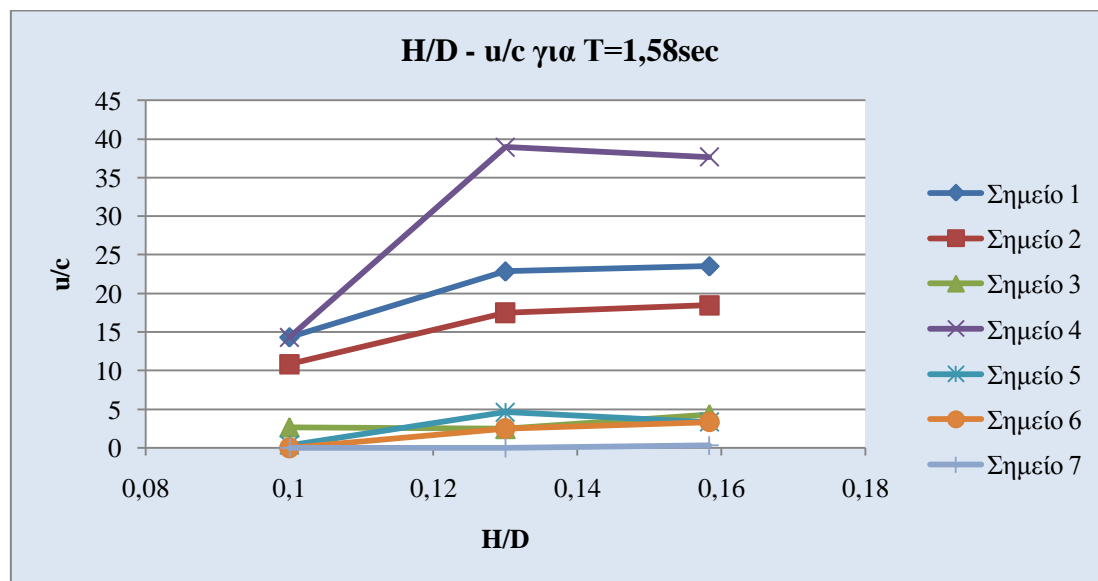
Οι μετρήσεις έγιναν στα 7 προεπιλεγμένα σημεία ανάντη, στην επιφάνεια καθώς και στο εσωτερικό της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε και μετά από κατάλληλη τροποποίηση οι πειραματικές τιμές μεταφράστηκαν στα αδιάστατα μεγέθη που προαναφέρθηκαν και διαγραμματοποιήθηκαν.



Διάγραμμα 4.4.1 – Μεταβολή σχετικής ταχύτητας ρευστών σωματιδίων συναρτήσει του σχετικού ύψους κύματος H/D για T=2,12sec και πλάτος στέψης 60cm στα 7 προεπιλεγμένα σημεία.



Διάγραμμα 4.4.2 – Μεταβολή σχετικής ταχύτητας ρευστών σωματιδίων συναρτήσει του σχετικού ύψους κύματος H/D για T=1,85sec και πλάτος στέψης 60cm στα 7 προεπιλεγμένα σημεία.



Διάγραμμα 4.4.3 – Μεταβολή σχετικής ταχύτητας ρευστών σωματιδίων συναρτήσει του σχετικού ύψους κύματος H/D για T=1,58sec και πλάτος στέψης 60cm στα 7 προεπιλεγμένα σημεία.

Στα διαγράμματα 4.4.1-4.4.3 παρατηρείται ότι με την αύξηση του H/D έχουμε και αύξηση της σχετικής ταχύτητας u/c στα 7 σημεία που επιλέχθηκαν. Σαν γενικό συμπέρασμα για τις τιμές των σχετικών ταχυτήτων μπορεί να εξαχθεί ότι δημιουργούνται διαγράμματα «3 ταχυτήτων», ανάλογα με το αν το εξεταζόμενο σημείο είναι έξω από τον κυματοθραύστη, στην επιφάνειά του, ή αν είναι στο εσωτερικό του.

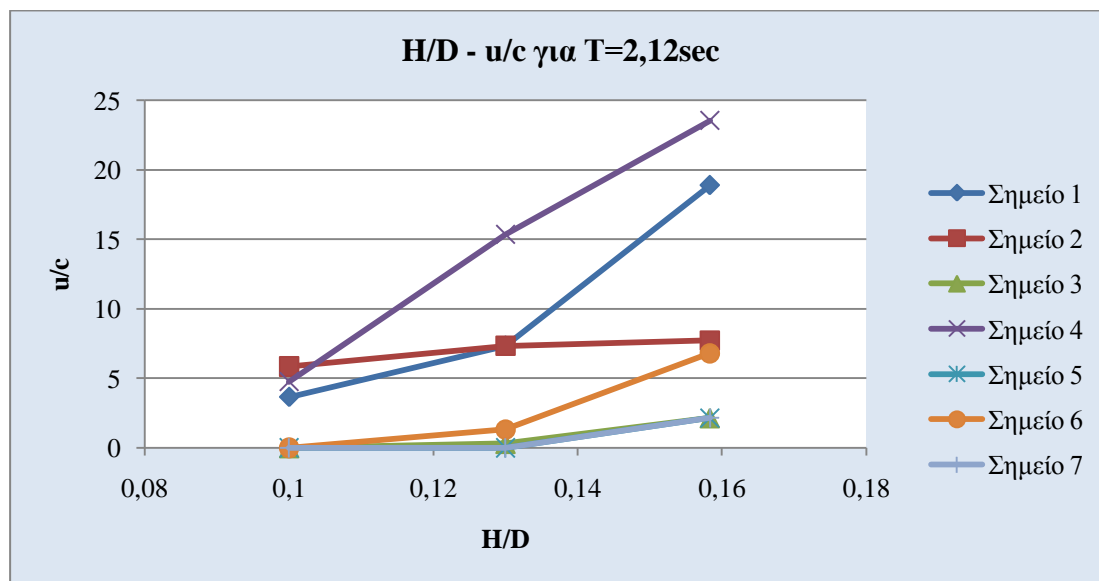
Στο διάγραμμα 4.4.1 στα σημεία 3,5 και 7 που είναι στο εσωτερικό του κυματοθραύστη οι σχετικές ταχύτητες αυξάνονται για μεγαλύτερο H/D, όμως οι τιμές τους είναι πολύ μικρές, όπως φυσιολογικά αναμένεται λόγω των αυξημένων απωλειών ενέργειας από τη ροή του νερού στο εσωτερικό του κυματοθραύστη. Στα σημεία 1 και 4 που είναι ανάντη του κυματοθραύστη και στην επιφάνειά του στη στέψη του οι τιμές των σχετικών ταχυτήτων είναι μεγάλες. Στα σημεία αυτά δεν έχουμε απώλειες ενέργειας λόγω της παρουσίας του κυματοθραύστη, συνεπώς αναμένονταν και μεγαλύτερες τιμές. Στα σημεία 2 και 6 που βρίσκονται στην

επιφάνεια στο μέσο των πρανών του κυματοθραύστη οι σχετικές ταχύτητες έχουν ενδιάμεσες τιμές

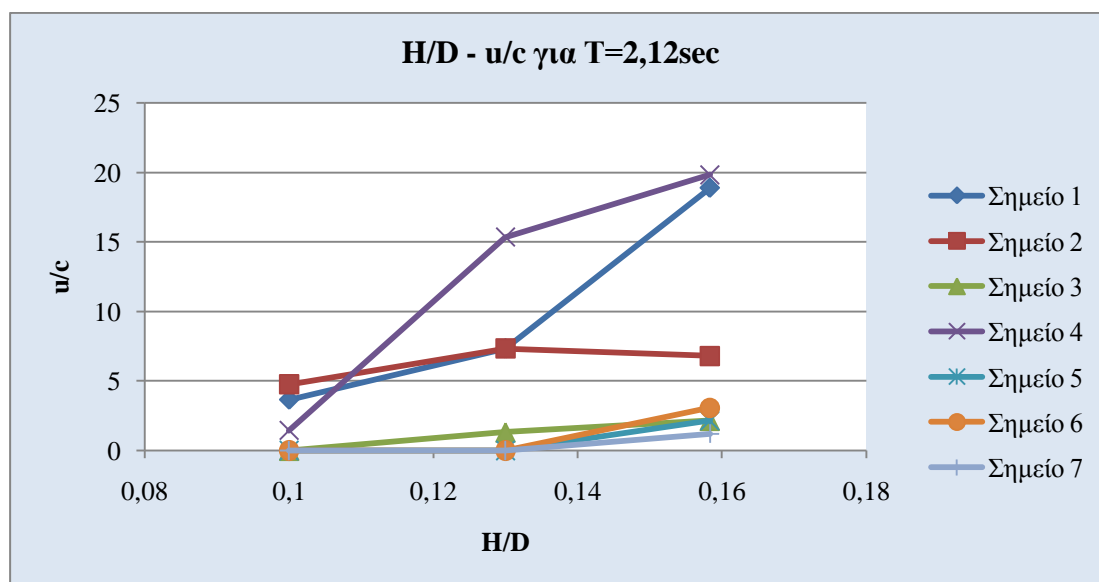
Παρατηρούνται ποιοτικά παρόμοια διαγραμματικά αποτελέσματα για τον ύφαλο κυματοθραύστη με πλάτος στέψης 60cm και για περιόδους κυματισμού $T=1,85\text{sec}$ και $T=1,58\text{sec}$. Για μικρότερη περίοδο παραγόμενου κυματισμού οι τιμές των σχετικών ταχυτήτων συνολικά σε κάθε πλάτος στέψης αυξάνονται.

Οι διαφορές που υπάρχουν έγκεινται στο γεγονός της θραύσης του κυματισμού στη στέψη του κυματοθραύστη και συνεπώς της απώλειας ενέργειας για τις μικρές περιόδους και για μεγαλύτερα βάθη νερού. Για το λόγο αυτό στο διάγραμμα 4.4.2 και 4.4.3 για το σημείο 4 στη στέψη του κυματοθραύστη παρατηρείται για βάθος 60cm και για το αντίστοιχο σχετικό ύψος κύματος μείωση της σχετικής ταχύτητας των ρευστών σωματιδίων. Για τον ίδιο λόγο παρατηρείται στο διάγραμμα 4.4.2 και 4.4.3 μία συνεχής μείωση της τιμής της σχετικής ταχύτητας κυρίως στο σημείο 6 αλλά και στο σημείο 7 που βρίσκονται κατάντη της στέψης του κυματοθραύστη.

Για κυματοθραύστες με πλάτος στέψης 80cm και 100cm έγινε η ίδια επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων και τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν παρουσιάζουν τα ίδια ποιοτικά χαρακτηριστικά με το πλάτος στέψης των 60cm. Ενδεικτικά παρουσιάζονται ακολούθως τα διαγράμματα για την κάθε διάταξη μόνο για περίοδο παραγόμενου κυματισμού $T=2,12\text{sec}$ χωρίς περαιτέρω σχολιασμό.



Διάγραμμα 4.4.4 – Μεταβολή σχετικής ταχύτητας ρευστών σωματιδίων συναρτήσει του αδιάστατου H/D για $T=2,12\text{sec}$ και πλάτος στέψης 80cm στα 7 προεπιλεγμένα σημεία.



Διάγραμμα 4.4.5 – Μεταβολή σχετικής ταχύτητας ρευστών σωματιδίων συναρτήσει του αδιάστατου H/D για $T=2,12\text{sec}$ και πλάτος στέψης 100cm στα 7 προεπιλεγμένα σημεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση των ταχυτήτων των ρευστών σωματιδίων του ύδατος στο εσωτερικό και στην επιφάνεια ύφαλου κυματοθραύστη. Ερευνάται η επίδραση στην ταχύτητα των ρευστών σωματιδίων του πλάτους στέψης του κυματοθραύστη, του βάθους και της περιόδου. Γίνεται επίσης σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις μαθηματικές θεωρίες Stokes 1^{ης} και 2^{ης} τάξης.

5.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΣΤΕΨΗΣ

Για σταθερό βάθος κυματισμού, ίσο με 50cm, οι ταχύτητες σε όλα τα σημεία μετρήσεων ανάντη και μέχρι και το πλάτος στέψης αυξάνονται με τη μείωση της περιόδου κυματισμού. Στα σημεία κατάντη της στέψης του κυματοθραύστη 6 και 7 παρατηρείται μια αντίθετη συμπεριφορά, δηλαδή οι ταχύτητες μειώνονται. Το φαινόμενο αυτό είναι αποτέλεσμα της θραύσης των κυματισμών στη στέψη του κυματοθραύστη.

Αντίστοιχη συμπεριφορά έχουμε και για βάθος νερού 60cm όπου στα πρώτα 5 σημεία μετρήσεων οι ταχύτητες αυξάνονται ενώ στα τελευταία δύο που βρίσκονται στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη παρατηρείται μείωση.

Στην περίπτωση του ίσαλου κυματοθραύστη (40cm) οι ταχύτητες που μετρήθηκαν αυξάνονται με την αντίστοιχη μείωση περιόδων των εισερχόμενων κυματισμών, ενώ στα σημεία 5,6 και 7 οι ταχύτητες ήταν αρκετά μικρότερες από την ελάχιστη ταχύτητα για την οποία μπορεί το όργανο να δώσει αποτελέσματα.

Στις παραπάνω περιπτώσεις μεγαλώνοντας το πλάτος στέψης του ύφαλου κυματοθραύστη οι τιμές των ταχυτήτων που μετρήθηκαν στα σημεία 4-7, που επηρεάζονται από την αλλαγή, ήταν σαφώς μικρότερες. Δηλαδή, όσο μεγαλύτερο

είναι το πλάτος στέψης τόσο μικρότερη είναι η ενέργεια του μεταδιδόμενου κυματισμού.

5.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΧΕΤΙΚΟΥ ΥΨΟΥΣ

Η μεταβολή του σχετικού ύψους κυματισμού (H/D) επηρεάζει καθοριστικά τις ταχύτητες ρευστών σωματιδίων στα σημεία των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, με την αύξηση του σχετικού ύψους παρατηρείται αύξηση της σχετικής ταχύτητας. Αυτή τη συμπεριφορά δεν ακολουθεί το σημείο 4 στο οποίο ο μετρητής είναι πάνω στη στέψη. Στο σημείο αυτό η τύρβη λόγω της θραύσης επηρεάζει το αποτέλεσμα της μέτρησης.

5.4 STOKES 2^{ης} ΤΑΞΗΣ

Ανάτη του κυματοθραύστη, στο σημείο 1, έγινε σύγκριση των πειραματικών ταχυτήτων με τις ταχύτητες που προκύπτουν από τις μαθηματικές θεωρίες Stokes 1^{ης} και 2^{ης} τάξης. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει σύγκλιση μόνο για περίοδο $T=2,12\text{sec}$. Για την περίοδο αυτή συγκρίθηκαν για κάθε σημείο μετρήσεων οι πειραματικές ταχύτητες με τις ταχύτητες που προκύπτουν από τη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης. Οι αποκλίσεις ήταν μεγάλες, κάτι που δείχνει ότι η συγκεκριμένη θεωρία δεν μπορεί να περιγράψει το προφίλ των ταχυτήτων στο εσωτερικό του κυματοθραύστη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Berkhoff, J.C.W., 1972.* Computation of combined refraction-diffraction. In: Proceedings of the 13th Conference of Coastal Engineering, Canada, ASCE, 471-490.
- Berkhoff, J.C.W., 1976.* Mathematical Models for Simple Harmonic Linear Water Waves: Wave Diffraction and Refraction. Publication No. 163, Delft Hydraulic Laboratory, Delft, The Netherlands.
- Βερναρδάκης, Σ., 1990.* «Βαθμονόμηση Διώρυγας Κυματισμών Βαρύτητας Εργαστηρίου Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π.» Διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Λιμενικών Έργων Ε.Μ.Π., Αθήνα.
- Booij, N., 1981.* Gravity waves on water with non-uniform depth and current. Rept. 81-1, Dept. Civ. Eng., Delft University of Technology.
- Chamberlain, P.G., Porter, D., 1995.* The modified mild-slope equation. J. Fluid Mech. 291, 393-407.
- Chandrasekera, C.N., Cheung, K.F., 1997.* Extended linear refraction-diffraction model. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. 123, 280-286.
- Chappelear J.E., 1961.* Direct numerical calculation of wave properties. J. Geophys. Res. 66 (18), 501-508.
- Copeland, G.J.M., 1985.* A practical alternative to the mild-slope equation. Coastal Eng. 9, 125-149.
- Dean, R.G., 1965.* Stream Function Representation of Nonlinear Ocean Waves. J. Geophys. Res. 70 (18), 4561-4572.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 1984.* Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 305-309.
- Δερμίσσης, Β., 1988.* Παράκτια Υδραυλική, Σημειώσεις, Α.Π.Θ.
- Fenton, J.D., 1979.* A High-order Cnoidal Wave Theory. J. Fluid Mech. 94, 129-161.
- Fenton, J.D., 1985.* A Fifth-order Stokes Theory for steady waves. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. 111 (2), 216-234.
- Hsu, T.-W., Wen, C.-C., 2001.* A parabolic equation extended to account for rapidly varying topography. Ocean Eng. 28(6), 1479-1498.
- Huang, M.-C., 1990.* Kinematics prediction by Stokes and Fourier Wave Theories. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. 116 (1), 137-148.

- Καραμπάς, Θ., 1991.* Μαθηματική περιγραφή της διάδοσης των μη γραμμικών διασπειρόμενων κυματισμών στον παράκτιο χώρο. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.
- Keulegan, G. H., Patterson, G.W., 1940.* A criterion for instability of flow in steep channels. *Eos Trans. AGU*, 21, 594-596.
- Korteweg, D.J., de Vries, G., 1895.* On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal, and on a new type of long stationary waves. *Phil. Mag.* 39, 422-443.
- Laitone, E.V., 1960.* The second approximation to Cnoidal and Solitary waves. *J. Fluid Mech.* 9, 430-444.
- LeMehaute, B., 1969.* “An introduction to Hydrodynamics and Water Waves”. *Water Wave Theories, Vol II, TR ERL 118-POL-3-2, US Department of Commerce, ESSA, Washington, D.C.*
- Littman, W., 1957.* On the existence of periodic waves near critical speed. *Comm. Pure Appl. Math.* X, 241-269.
- Massel, S.R., 1993.* Extended linear refraction-diffraction equation for surface waves. *Coastal Eng.* 19, 97-126.
- Μέμος, Κ.* Μαθήματα Λιμενικών Έργων, Αθήνα, 2005.
- Μέμος, Κ.* Λιμενικά Συστήματα, Γ' έκδοση, Αθήνα, 2008.
- Μουτζούρης Κ.* Θαλάσσια Υδραυλική, Αθήνα, 2006.
- Νουτσόπουλος Γ.-Χριστοδούλου* Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών, Αθήνα, 1996.
- Radder, A. C., 1979.* On the parabolic equation method for water wave propagation. *J. Fluid Mech.* 95 (1), 159-176.
- Radder, A.C., Dingemans, M.W., 1985.* Canonical equations for almost periodic, weekly nonlinear gravity waves. *Wave Motion* 7, 473-485.
- Reinecker, M.M., Fenton, J.D., 1981.* A Fourier Approximation Method for steady water waves. *J. Fluid Mech.* 104, 119-137.
- Ρογκάν Α. Ι.* Θαλάσσια Λιμενικά Έργα, σημειώσεις Ε.Μ.Π., 1981.
- Smith, R., Springs, T., 1975* Scattering of surface waves by a canonical island. *J. Fluid Mech.* 72, 373-384.
- Sobey, R.J., 1990.* Wave theory predictions of crest kinematics. *Water Wave Kinematics, Kluwer Academic Publishers, 215-231.*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακες μετρήσεων

1		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	7,9	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	47	

2		1 sec	(σε Hz)	20	u (cm/s) 29,3892
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	13,8	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	47	

3		1 sec	(σε Hz)	27	u (cm/s) 43,7658
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	23,1	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	45,5	

4		1 sec	(σε Hz)	12	u (cm/s) 12,9588
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	8,6	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	47	

5		1 sec	(σε Hz)	17	u (cm/s) 23,2278
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	13,3	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	47	

6		1 sec	(σε Hz)	22	u (cm/s) 33,4968
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	16,5	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	45,5	

7		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s) 0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	47	

8		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s) 2,6898
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,6	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	47	

9		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	6,2	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	45,5	

10		1 sec	(σε Hz)	22	u (cm/s) 33,4968
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	13,3	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	47	

11		1 sec	(σε Hz)	34	u (cm/s) 58,1424
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	21	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	47	

12		1 sec	(σε Hz)	42	u (cm/s) 74,5728
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	30,7	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	45,5	

13		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s) 0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,4	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	47	

14		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s) 2,6898
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	5	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	47	

15		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s) 8,8512
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	6	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	45,5	

16		1 sec	(σε Hz)	11	u (cm/s) 10,905
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	5,9	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	47	

17		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s)	8,8512
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,9		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	47		

18		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s)	4,7436
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	5,4		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	45,5		

19		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s)	2,6898
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,2		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	47		

20		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,8		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	47		

21		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,8		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	45,5		

22		1 sec	(σε Hz)	26	u (cm/s)	41,712
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	20		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	56,5		

23		1 sec	(σε Hz)	28	u (cm/s)	45,8196
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	18,2		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	54,5		

24		1 sec	(σε Hz)	29	u (cm/s)	47,8734
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	21		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	53		

25		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	9,3	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	56,5	

26		1 sec	(σε Hz)	18	u (cm/s) 25,2816
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	13,8	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	54,5	

27		1 sec	(σε Hz)	24	u (cm/s) 37,6044
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	12,4	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	53	

28		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s) 2,6898
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	3,8	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	56,5	

29		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,6	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	54,5	

30		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s) 8,8512
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,8	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	53	

31		1 sec	(σε Hz)	32	u (cm/s) 54,0348
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	23,5	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	56,5	

32		1 sec	(σε Hz)	34	u (cm/s) 58,1424
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	26,5	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	54,5	

33		1 sec	(σε Hz)	43	u (cm/s) 76,6266
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	30,5	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	53	

34		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	56,5	

35		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,3	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	54,5	

36		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	6,2	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	53	

37		1 sec	(σε Hz)	16	u (cm/s) 21,174
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	8,7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	56,5	

38		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	7,1	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	54,5	

39		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	6,9	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	53	

40		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s) 8,8512
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	56,5	

41		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,2	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	54,5	

42		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s) 0,636
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,5	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	53	

43		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	8,9	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	38	

44		1 sec	(σε Hz)	14	u (cm/s) 17,0664
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	10,5	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	38	

45		1 sec	(σε Hz)	18	u (cm/s) 25,2816
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	13,3	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	37,5	

46		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s) 8,8512
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	7,4	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	38	

47		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	9,1	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	38	

48		1 sec	(σε Hz)	15	u (cm/s) 19,1202
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	10,3	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	37,5	

49		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	4,6		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	38		

50		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	4		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	38		

51		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s)	4,7436
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	4,9		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	37,5		

52		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s)	8,8512
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5,6		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	38		

53		1 sec	(σε Hz)	12	u (cm/s)	12,9588
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	6,7		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	38		

54		1 sec	(σε Hz)	18	u (cm/s)	25,2816
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5,6		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	37,5		

55		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2,4		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	38		

56		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	3,8		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	38		

57		1 sec	<i>(σε Hz)</i>	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	40cm	continuous	<i>(σε Hz)</i>	2,2		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	<i>(σε cm)</i>	44		
Σημείο:	5	κουλία	<i>(σε cm)</i>	37,5		
58		1 sec	<i>(σε Hz)</i>	7	u (cm/s)	2,6898
Βάθος:	40cm	continuous	<i>(σε Hz)</i>	3,4		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	<i>(σε cm)</i>	42		
Σημείο:	6	κουλία	<i>(σε cm)</i>	38		
59		1 sec	<i>(σε Hz)</i>	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	40cm	continuous	<i>(σε Hz)</i>	2,7		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	<i>(σε cm)</i>	43		
Σημείο:	6	κουλία	<i>(σε cm)</i>	38		
60		1 sec	<i>(σε Hz)</i>	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	<i>(σε Hz)</i>	4,3		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	<i>(σε cm)</i>	44		
Σημείο:	6	κουλία	<i>(σε cm)</i>	37,5		
61		1 sec	<i>(σε Hz)</i>	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	<i>(σε Hz)</i>	3,3		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	<i>(σε cm)</i>	42		
Σημείο:	7	κουλία	<i>(σε cm)</i>	38		
62		1 sec	<i>(σε Hz)</i>	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	<i>(σε Hz)</i>	1,7		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	<i>(σε cm)</i>	43		
Σημείο:	7	κουλία	<i>(σε cm)</i>	38		
63		1 sec	<i>(σε Hz)</i>	2	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	<i>(σε Hz)</i>	1,4		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	<i>(σε cm)</i>	44		
Σημείο:	7	κουλία	<i>(σε cm)</i>	37,5		

64		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	8,7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	47	

65		1 sec	(σε Hz)	20	u (cm/s) 29,3892
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	14,3	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	47	

66		1 sec	(σε Hz)	27	u (cm/s) 43,7658
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	21	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	45,5	

67		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	7,7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	47	

68		1 sec	(σε Hz)	17	u (cm/s) 23,2278
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	11	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	47	

69		1 sec	(σε Hz)	23	u (cm/s) 35,5506
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	13,1	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	45,5	

70		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s) 0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	47	

71		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	5,1	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	47	

72		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	6,4	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	45,5	

73		1 sec	(σε Hz)	21	u (cm/s) 31,443
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	11,8	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	47	

74		1 sec	(σε Hz)	30	u (cm/s) 49,9272
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	19	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	47	

75		1 sec	(σε Hz)	37	u (cm/s) 64,3038
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	26,2	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	45,5	

76		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s) 0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,9	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	47	

77		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s) 0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,9	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	47	

78		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,9	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	45,5	

79		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s) 2,6898
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,5	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	47	

80		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s)	2,6898
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,3		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	47		

81		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,3		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	45,5		

82		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,3		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	47		

83		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,1		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	47		

84		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,1		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	45,5		

85		1 sec	(σε Hz)	26	u (cm/s)	41,712
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	21		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	56,6		

86		1 sec	(σε Hz)	28	u (cm/s)	45,8196
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	19		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	54,5		

87		1 sec	(σε Hz)	29	u (cm/s)	47,8734
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	23,5		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	53		

88		1 sec	(σε Hz)	14	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	9,5	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	56,5	

89		1 sec	(σε Hz)	17	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	8,9	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	54,5	

90		1 sec	(σε Hz)	26	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	12,9	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	53	

91		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	56,5	

92		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,8	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	54,5	

93		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	7,7	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	53	

94		1 sec	(σε Hz)	31	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	22,2	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	56,5	

95		1 sec	(σε Hz)	32	u (cm/s)
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	25	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	54,5	

96		1 sec	(σε Hz)	42	u (cm/s) 74,5728
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	29,6	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	53	

97		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	56,5	

98		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,3	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	54,5	

99		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,9	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	53	

100		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	6,2	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	56,5	

101		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s) 8,8512
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,6	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	54,5	

102		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	6	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	53	

103		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	6,3	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	56,5	

104		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	2,7		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	54,5		

105		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	3,4		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	53		

106		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s)	6,7974
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	8,2		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	38		

107		1 sec	(σε Hz)	14	u (cm/s)	17,0664
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	10		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	38		

108		1 sec	(σε Hz)	19	u (cm/s)	27,3354
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	15,4		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	37,5		

109		1 sec	(σε Hz)	11	u (cm/s)	10,905
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	8,5		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	38		

110		1 sec	(σε Hz)	14	u (cm/s)	17,0664
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	9,8		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	38		

111		1 sec	(σε Hz)	16	u (cm/s)	21,174
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	11,1		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	37,5		

112		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	4,4		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	38		

113		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s)	2,6898
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5,5		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	38		

114		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s)	4,7436
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5,7		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	37,5		

115		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s)	8,8512
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	4,4		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	38		

116		1 sec	(σε Hz)	11	u (cm/s)	10,905
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	6,1		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	38		

117		1 sec	(σε Hz)	17	u (cm/s)	23,2278
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5,3		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	37,5		

118		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,9		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	38		

119		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2,5		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	38		

120		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2,2		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	37,5		

121		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	3,1		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	38		

122		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2,4		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	38		

123		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	3,7		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	37,5		

124		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2,2		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	38		

125		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,5		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	38		

126		1 sec	(σε Hz)	2	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,5		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	37,5		

127		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	8,8	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	47	

128		1 sec	(σε Hz)	20	u (cm/s) 29,3892
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	14,3	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	47	

129		1 sec	(σε Hz)	27	u (cm/s) 43,7658
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	21	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	45,5	

130		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	8	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	47	

131		1 sec	(σε Hz)	18	u (cm/s) 25,2816
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	13,9	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	47	

132		1 sec	(σε Hz)	23	u (cm/s) 35,5506
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	14	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	45,5	

133		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s) 2,6898
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	47	

134		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	5,1	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	37	

135		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s)	4,7436
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	6		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	45,5		

136		1 sec	(σε Hz)	21	u (cm/s)	31,443
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	14,8		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	47		

137		1 sec	(σε Hz)	28	u (cm/s)	45,8196
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	17,8		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	47		

138		1 sec	(σε Hz)	33	u (cm/s)	56,0886
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	24,2		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	45,5		

139		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	47		

140		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,5		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	47		

141		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s)	2,6898
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,4		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	45,5		

142		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,5		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	47		

143		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,1		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	47		

144		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	4,4		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	45,5		

145		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	3,2		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	53,5		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	47		

146		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,4		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	54		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	47		

147		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	50cm	continuous	(σε Hz)	2,8		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	54,5		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	45,5		

148		1 sec	(σε Hz)	26	u (cm/s)	41,712
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	20		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	56,5		

149		1 sec	(σε Hz)	28	u (cm/s)	45,8196
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	18,6		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	54,5		

150		1 sec	(σε Hz)	29	u (cm/s)	47,8734
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	19		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	53		

151		1 sec	(σε Hz)	13	u (cm/s) 15,0126
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	9	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	56,5	

152		1 sec	(σε Hz)	19	u (cm/s) 27,3354
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	11,9	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	54,5	

153		1 sec	(σε Hz)	24	u (cm/s) 37,6044
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	12,1	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	53	

154		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,7	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	56,5	

155		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,9	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	54,5	

156		1 sec	(σε Hz)	12	u (cm/s) 12,9588
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	10	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	53	

157		1 sec	(σε Hz)	27	u (cm/s) 43,7658
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	20	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	56,5	

158		1 sec	(σε Hz)	31	u (cm/s) 51,981
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	25	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	54,5	

159		1 sec	(σε Hz)	40	u (cm/s) 70,4652
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	25	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	53	

160		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,5	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	56,5	

161		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,1	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	54,5	

162		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,6	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	53	

163		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,3	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	56,5	

164		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s) 6,7974
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,6	
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	54,5	

165		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s) 4,7436
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	6,6	
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67	
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	53	

166		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s) 2,6898
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	5,9	
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	66	
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	56,5	

167		1 sec	(σε Hz)	6	u (cm/s)	0,636
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	4,2		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	66		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	54,5		

168		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	60cm	continuous	(σε Hz)	3,9		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	67		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	53		

169		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s)	6,7974
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	6,5		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	38		

170		1 sec	(σε Hz)	14	u (cm/s)	17,0664
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	10		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	38		

171		1 sec	(σε Hz)	19	u (cm/s)	27,3354
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	13,6		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	1	κουλία	(σε cm)	37,5		

172		1 sec	(σε Hz)	10	u (cm/s)	8,8512
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	6,2		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	38		

173		1 sec	(σε Hz)	14	u (cm/s)	17,0664
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	8,8		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	38		

174		1 sec	(σε Hz)	15	u (cm/s)	19,1202
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	8,3		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	2	κουλία	(σε cm)	37,5		

175		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	3,4		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	38		

176		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s)	2,6898
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	4,5		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	38		

177		1 sec	(σε Hz)	8	u (cm/s)	4,7436
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	3	κουλία	(σε cm)	37,5		

178		1 sec	(σε Hz)	7	u (cm/s)	2,6898
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	3,8		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	38		

179		1 sec	(σε Hz)	9	u (cm/s)	6,7974
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5,3		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	38		

180		1 sec	(σε Hz)	14	u (cm/s)	17,0664
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	5,1		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	4	κουλία	(σε cm)	37,5		

181		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,3		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	38		

182		1 sec	(σε Hz)	4	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2,2		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	38		

183		1 sec	(σε Hz)	5	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	5	κουλία	(σε cm)	37,5		

184		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,4		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	38		

185		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,7		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	38		

186		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2,6		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	6	κουλία	(σε cm)	37,5		

187		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	2		
Ταχύτητα:	0	κορυφή	(σε cm)	42		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	38		

188		1 sec	(σε Hz)	3	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,9		
Ταχύτητα:	1	κορυφή	(σε cm)	43		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	38		

189		1 sec	(σε Hz)	2	u (cm/s)	0,001
Βάθος:	40cm	continuous	(σε Hz)	1,5		
Ταχύτητα:	2	κορυφή	(σε cm)	44		
Σημείο:	7	κουλία	(σε cm)	37,5		

- Οι μετρήσεις 1-63 έγιναν στον κυματοθραύστη με πλάτος στέψης 60cm
- Οι μετρήσεις 64-126 έγιναν στον κυματοθραύστη με πλάτος στέψης 80cm
- Οι μετρήσεις 127-189 έγιναν στον κυματοθραύστη με πλάτος στέψης 100cm

U(cm/s) → η ταχύτητα ρευστών σωματιδίων που προκύπτει από το καλιμπράρισμα του οργάνου που χρησιμοποιήθηκε. (προκύπτει από τη «μετάφραση» των συχνοτήτων του μιλίσκου που έχει το όργανο σαν output σε ταχύτητες)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Φωτογραφίες



Σχήμα Β.1 – Αποψη ύφαλου κυματοθραύστη



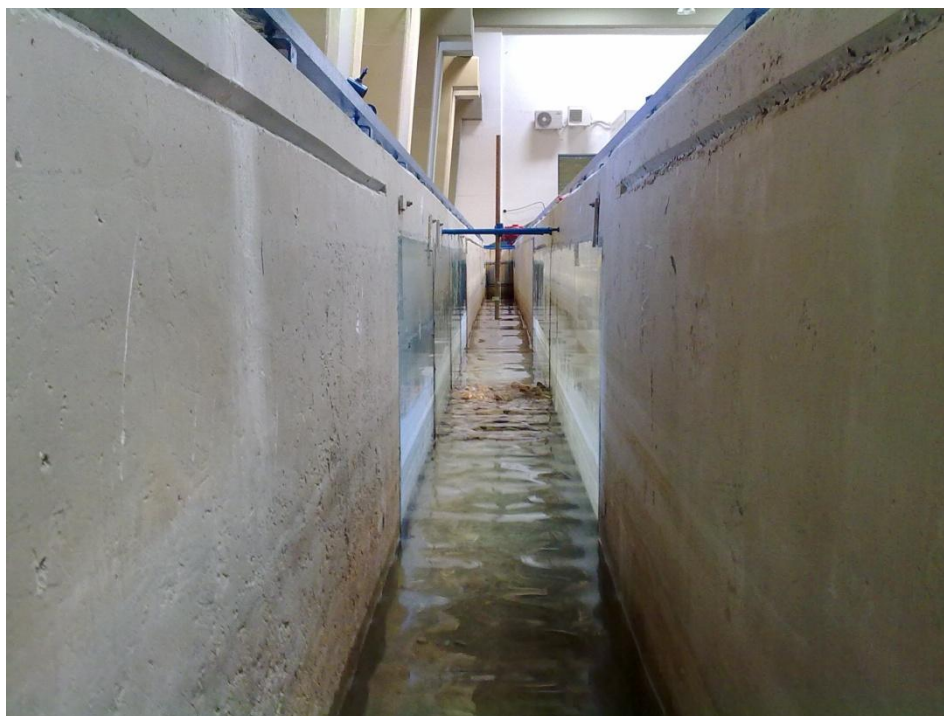
Σχήμα Β.2 – Διάτρητες μεταλλικές πλάκες για τον περιορισμό της περίθλασης



Σχήμα Β.3 – Στοιβάδα απορρόφησης κυματικής ενέργειας (sponge)



Σχήμα Β.4 – Σημείο μέτρησης 5 στο εσωτερικό του κυματοθραύστη



Σχήμα Β.5 – Άποψη διώρυγας και ύψαλου κυματοθραύστη με κυματισμό



Σχήμα Β.6 – Θραύση των κυματισμών στη στέψη



Σχήμα Β.7 – Θραύση των κυματισμών στη στέψη



Σχήμα Β.8 – Θραύση των κυματισμών στη στέψη



Σχήμα Β.9 – Συρμάτινο πλαίσιο για την ασφάλεια του μολίσκου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στο εσωτερικό του κυματοθραύστη