

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή ΕΜΠ κ. Κωνσταντίνο Μέμο για την επίβλεψη κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, με τίτλο «Το υδροδυναμικό πεδίο γύρω από ύφαλο πορώδη κυματοθραύστη», καθώς και για τις πολύτιμες συμβουλές και υποδείξεις κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες Αθανάσιο Ζήρο, Αναστάσιο Μεταλληνό και Μιχαήλ Χονδρό για τις πολύτιμες υποδείξεις τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, όπως και για την ηθική και ψυχολογική συμπαράσταση τους.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υποψήφιους διδάκτορες και φίλους Μανιατάκη Χαρίλαο, Ευαγγελινό Γρηγόριο, Πάτσιο Θεόδωρο και τον προπτυχιακό φοιτητή Κούβατα Στέργιο-Νικόλαο για την αμέριστη συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΤΟ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΦΑΛΟ ΠΟΡΩΔΗ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	2
ΟΡΙΣΜΟΙ ΣΥΜΒΟΛΩΝ.....	5
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
2 ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ	13
2.1 Γενικά περί ύφαλων κυματοθραυστών	13
2.2 Τύποι ύφαλων κυματοθραυστών χαμηλής στέψης	16
2.3 Φαινόμενα γύρω από ύφαλο κυματοθραύστη	18
2.4 Κατανομή ταχυτήτων-υδροδυναμισμός	20
2.5 Επιδράσεις πυθμένα	20
2.5.1 Θραύση.....	14
2.6 Βιολογία-θάλασσα-μαλακό υπόστρωμα	25
3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	28
3.1 Ομοιότητα.....	28
3.2 Χαρακτηριστικά μονοδιάστατων κυματισμών.....	31
3.3 Μαθηματικές θεωρίες περιγραφής μονοδιάστατων κυματισμών.....	32
3.3.1 Θεωρία Airy ή θεωρία κύματος απειροστού ύψους ή θεωρία Stokes 1 ^{ης} τάξης.....	33
3.4 Μη γραμμικές θεωρίες.....	36
3.4.1 Θεωρία Stokes 2ης τάξης.....	36
3.4.2 Θεωρία Stokes 3ης τάξης.....	37
3.4.3 Θεωρία Stokes 5ης τάξης.....	38
3.4.4 Θεωρία Cnoidal 1ης τάξης.....	40
3.4.5 Θεωρία ροικής συνάρτησης.....	42
3.5 Μαθηματικά ομοιώματα.....	44
3.5.1 Ομοιώματα διάθλασης-περίθλασης εξίσωση ήπιας κλίσης.....	45
3.6 Πεδίο εφαρμογής θεωριών.....	48
4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ.....	51
4.1 Πειραματική διάρρυγα.....	51
4.1.1 Διαστάσεις-περιγραφή.....	51

4.2 Κυματογεννήτρια.....	54
4.3 Μετρήσεις ροής.....	55
4.4 Αισθητήρες ροής με μιλίσκο.....	56
4.5 Το όργανο flowmeter MFP51.....	56
4.5.1 Οδηγίες χρήσης.....	57
4.5.1.1 Προπελάκι καρφωμένο σε ραβδί με το flowmeter MFP51.....	57
4.6 Παραγόμενοι κυματισμοί.....	58
4.7 Διαδικασία των μετρήσεων.....	59
4.7.1 Όργανα των μετρήσεων	59
4.7.2 Διαδικασία των μετρήσεων	59
4.8 Πορώδες.....	60
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	62
5.1 Μεταβολή ταχυτήτων στο εξωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη.....	62
5.1.1 Πρώτη σειρά πειραμάτων στο εξωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη.....	63
5.1.2 Δεύτερη σειρά πειραμάτων στο εξωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη.	71
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	80
6.1 Συμπεράσματα.....	80
6.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.....	81
7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83

ΟΡΙΣΜΟΙ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

1) Σύμβολα με ελληνικά γράμματα.

α : γωνία πυθμένα

β_o : γωνία κορυφογραμμών κυμάτων στα ανοιχτά με την ευθύγραμμη ίσαλο γραμμή.

β_b : γωνία γραμμής θραύσεως με την ίσαλο γραμμή

γ : καμπυλότητα κύματος

E : αδιάστατο ύψος κύματος ($=\frac{kH}{2}$)

ε : λόγος ύψους προς βάθος κύματος ($=\frac{H}{d}$)

ζ : ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας μετρούμενης από τη στάθμη ηρεμίας

κ : αριθμός κύματος ($=\frac{2\pi}{L}$)

μ (Kg/ms) : κινηματική συνεκτικότητα ρευστού

ρ (kg/m³) : πυκνότητα ρευστού

σ : λόγος βάθους προς (ένα χαρακτηριστικό) μήκος κύματος.

Φ : συνάρτηση δυναμικού

φ : γωνία φάσης

Ψ : ροική συνάρτηση

ω : γωνιακή ταχύτητα ($=\frac{2\pi}{T}$)

2) Σύμβολα με λατινικά γράμματα

C : ταχύτητα φάσεως κύματος

C_E : η μέση ως προς το χρόνο ταχύτητα του ρευστού

C_g : ταχύτητα ομάδας κυματισμών

C_n : ελλειπτική συνημιτονοειδής συνάρτηση

C_o : ταχύτητα φάσεως στα βαθιά νερά

C_s : μέση ως προς το βάθος ταχύτητα μεταφοράς μάζας

d : βάθος θάλασσας μετρούμενο από τη στάθμη ηρεμίας

F : αριθμός Froude

g (m/s^2) : επιτάχυνση της βαρύτητας

H : ύψος κύματος

H_b : ύψος κύματος θραύσεως

h : βάθος νερού μετρούμενο από τη στάθμη ηρεμίας

h_b : βάθος νερού στη γραμμή θραύσεως

K_t : συντελεστής κυματικής μετάδοσης

L : μήκος κύματος

L_o : μήκος κύματος στα βαθιά νερά

p : πίεση

p_d : δυναμική πίεση

p_h : υδροστατική πίεση

Q : μέση ειδική παροχή κάτω από τον κυματισμό

R : αριθμός Reynolds

T : περίοδος κύματος

t (sec) : χρόνος

U_R : παράμετρος ursell

u : οριζόντια ταχύτητα υγρού σωματιδίου στην κορυφή του κύματος

V(m/sec) : μέγιστη οριζόντια τροχιακή ταχύτητα ρευστών σωματιδίων

w : κατακόρυφη ταχύτητα υγρού σωματιδίου στην κορυφή του κύματος

x : θέση στην οριζόντια διεύθυνση

z : θέση στην κατακόρυφη διεύθυνση

3) Συντομεύσεις

E.A.E. : Εργαστήριο Λιμενικών Έργων

E.M.Π. : Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

L.C.D. : Liquid Crystal display

L.C.S. : Low Crested Structures

M.Σ.Η. : Μέση στάθμη ηρεμίας

M.Σ.Θ. : Μέση στάθμη θάλασσας

Σ.Η.Υ. : στάθμη ηρεμούντος ύδατος

Υ.Κ. : Ύφαλοι κυματοθραύστες

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ-ΠΙΝΑΚΩΝ

1) Σχήματα

Σχήμα 2.5.1.1 : Διάφορα είδη θραύσεως κυμάτων.....	22
Σχήμα 3.2.1 : Τυπική διατομή κύματος.....	32
Σχήμα 3.6.1 : Περιοχές εφαρμογής διαφόρων θεωριών διάδοσης κυματισμών (Le Méhauté 1976).....	50
Σχήμα 4.1.1 : Κάτοψη και τομή της πειραματικής διάωρυγας.....	52
Σχήμα 4.5.1.1 : Η προπέλα καρφωμένη σε ακόντιο σε ροή.....	57
Σχήμα 5.1.1 : Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη.....	63

2) Εικόνες

Εικόνα 4.1.2 : Άποψη της πειραματικής διάωρυγας από την πλευρά της Κυματογεννήτριας.....	54
Εικόνα 4.2.1 : Κυματογεννήτρια στο άκρο της διάωρυγας τοποθετημένη στο βαθρο..	55

3) Διαγράμματα

Διάγραμμα 5.1.1.1 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 1 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	64
Διάγραμμα 5.1.1.2 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 2 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	65
Διάγραμμα 5.1.1.3 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 3 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	66
Διάγραμμα 5.1.1.4 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 4 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	67

Διάγραμμα 5.1.1.5 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 5 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	68
Διάγραμμα 5.1.1.6 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 6 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	69
Διάγραμμα 5.1.1.7 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 7 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.....	70
Διάγραμμα 5.1.2.1 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 1 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	71
Διάγραμμα 5.1.2.2 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 2 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	72
Διάγραμμα 5.1.2.3 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 3 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	73
Διάγραμμα 5.1.2.4 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 4 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	74
Διάγραμμα 5.1.2.5 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 5 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	75
Διάγραμμα 5.1.2.6 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 6 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	76
Διάγραμμα 5.1.2.7 : Διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 7 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.....	78
4) Πίνακες	
Πίνακας 2.5.1.1 : Συντελεστές της εξίσωσης 2.5.1.1.....	23
Πίνακας 4.6.1 : Όρια παραγόμενων κυματισμών.....	58

Πίνακας 4.6.2 : Ταχύτητες κυματιστήρα-περίοδοι παραγόμενων κυματισμών.....	59
Πίνακας 5.1 : Στοιχεία των σειρών μετρήσεων.....	62
Πίνακας 5.2.1 : Αποκλίσεις των σειρών μετρήσεων από τη μαθηματική θεωρία Stokes 2ης τάξης.....	79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία ασχολούμαστε με την πειραματική διερεύνηση των ταχυτήτων στο εξωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη. Συγκεκριμένα μετράμε τις τροχιακές ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων των κυματισμών, στο εξωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη. Τις ταχύτητες τις μετράμε σε τρεις διατομές στο εξωτερικό του Υ.Κ. Στην ανάντη παρειά, στην στέψη και στην κατόντη παρειά. Και αυτό για να μελετήσουμε τα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη διάδοση των κυματισμών στον ύφαλο κυματοθραύστη και πώς αυτά επηρεάζουν την κυματική ροή στο εξωτερικό του κυματοθραύστη. Και ευελπιστούμε σε κάποια συμπεράσματα για το κατά πόσο οι Υ.Κ προστατεύουν την παράκτια ζώνη από τη διάβρωση λόγω των κυματισμών, αλλά και κατά πόσο οι Υ.Κ ευνοούν τη διενέργεια διαφόρων ανθρώπινων δραστηριοτήτων, όπως η ναυσιπλοοία, ή η ανάπτυξη θαλάσσιων βιοτόπων γύρω από τους Υ.Κ.

Η παράκτια ζώνη ανέκαθεν χαρακτηριζόταν από ευρεία πολυπλοκότητα των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτή. Έτσι η προστασία της παράκτιας ζώνης αποτελεί θέμα μείζονος σημασίας για τους μηχανικούς. Στη σύγχρονη εποχή οι απαιτήσεις για το ζήτημα του σχεδιασμού παράκτιων έργων προστασίας είναι μεγαλύτερες μιας και άλλες μη φυσικές παράμετροι το επηρεάζουν σημαντικά. Αυτές οι παράμετροι είναι περιβαλλοντικού χαρακτήρα, όπως η εξασφάλιση της αισθητικής αξίας του παράκτιου τοπίου. Σε αυτή την κατεύθυνση δοκιμάζεται η χρήση νέων μορφών έργων σε σχέση με τις παραδοσιακές κατασκευές. Τα έργα αυτά παρέχουν νέα προσέγγιση στην παράκτια προστασία καθώς προσδίδουν μια πιο ήπια μορφή στα παράκτια έργα.

Σε αυτή την κατεύθυνση είναι λογικό να προτιμούνται έργα προστασίας χαμηλής στέψης και συγκεκριμένα ύφαλοι κυματοθραύστες (Υ.Κ) οι οποίοι προκειμένου να προστατευτούν οι ακτές από τη διάβρωση αποτελούν μια τροποποιημένη εκδοχή των παραδοσιακών αποσπασμένων κυματοθραυστών. Η παρεχόμενη προστασία από τους Υ.Κ στην υπήνεμη πλευρά τους ελέγχει την παράκτια εξέλιξη των κυματισμών, την κίνηση των ιζημάτων και τελικά την μορφολογία της παράκτιας ζώνης.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών των ύφαλων κυματοθραυστών, παρατίθενται κάποια θεωρητικά στοιχεία για την θραύση των κυματισμών, το υδροδυναμικό πεδίο στο εξωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη και το θαλάσσιο οικοσύστημα.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία για τους διασπειρόμενους ή θαλάσσιους κυματισμούς.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφεται η διάταξη του ύφαλου διαπερατού κυματοθραύστη που προσομοιώθηκε στο Ε.Λ.Ε. του Ε.Μ.Π. Δίνεται αναλυτική περιγραφή των πειραματικών μετρήσεων, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των οριζοντίων τροχιακών ταχυτήτων και η διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων.

Στο κεφάλαιο 4 παρατίθενται τα πειραματικά αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων και γίνεται ο σχολιασμός τους.

Στο κεφάλαιο 5 εξάγονται συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο αντικείμενο των ύφαλων κυματοθραυστών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 ΥΦΑΛΟΙ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΕΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΥΦΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ

Η παράκτια ζώνη είναι μια ζώνη ευαίσθητη περιβαλλοντικά στην οποία αναπτύσσονται έντονα δυναμικά φαινόμενα, τα οποία έχουν σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται εύθραυστες και ευμετάβλητες ισορροπίες για το προφίλ και τη μορφολογία της παράκτιας ζώνης. Στην παράκτια ζώνη το μεγαλύτερο ποσοστό κινητικής ενέργειας καταστρέφεται από τη θραύση των κυμάτων, την αναρρίχηση στην ακτή και την τριβή στον πυθμένα. Τα παραπάνω ευθύνονται για τη διάβρωση της παράκτιας ζώνης και την στερεομεταφορά υλικού (ίζημα) από το οποίο αποτελείται από την άλλη. Η διατήρηση της ισορροπίας αφ' ενός και η προστασία της παράκτιας ζώνης αφ' ετέρου, είναι ένα θέμα που επηρεάζει περιβαλλοντικά, οικονομικά και κοινωνικά τον άνθρωπο και οικολογικά τα οικοσυστήματα και τους κατοίκους τους (άγρια ζωή).

Σχετικά πρόσφατα έχουν δημιουργηθεί έργα προστασίας μηχανικού για αυτά τα φαινόμενα τα οποία σε άλλες περιπτώσεις έχουν επιτύχει ενώ σε άλλες περιπτώσεις έχουν αποτύχει. Έχει αποδειχθεί ότι τα έργα προστασίας μηχανικού έχουν επιρροή στα φυσικά οικοσυστήματα, στους βιοτόπους, και αισθητικά και ποιοτικά στην παράκτια ζώνη.

Οι συμβατικοί έξαλοι κυματοθραύστες (των οποίων η στέψη διαπερνά τη θαλάσσια επιφάνεια) κατασκευάζονται τυπικά, έτσι ώστε να καταστρέφουν ολοκληρωτικά κατά το δυνατόν την κυματική ενέργεια στην υπήνεμη πλευρά τους για συγκεκριμένες κυματικές συνθήκες σχεδιασμού. Συνήθως αυτά τα έργα είναι ογκώδη και χονδροειδή για να αντέξουν στα ακραία καιρικά φαινόμενα τα οποία υφίστανται, με παράπλευρο όμως αποτέλεσμα να εξαφανίζουν και τα ευεργετικά αποτελέσματα της κυκλοφορίας του νερού στην προστατευόμενη περιοχή, αναφορικά με τα ποιοτικά κριτήρια που πρέπει να πληρεί το θαλάσσιο νερό της περιοχής, ειδικά όταν πρόκειται για χώρο αναψυχής.

Στην εποχή μας υπάρχουν αντιδράσεις για την χρησιμοποίηση σκληρών έργων προστασίας στην παράκτια ζώνη κυρίως για περιβαλλοντικούς αλλά και αισθητικούς λόγους. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ανάπτυξη στην κατασκευή εναλλακτικών έργων προστασίας τα οποία κατηγοριοποιούνται ως ύφαλοι κυματοθραύστες (Υ.Κ). Αυτοί είναι κατασκευές που έχουν τη στέψη τους κάτω από ένα ορισμένο ύψος το οποίο ορίζεται π.χ από τη Μ.Σ.Η. Ταυτόχρονα προσφέρουν κάποια προστασία από την κυματική προσβολή της ακτής. Επίσης επιτρέπουν την απρόσκοπτη κυκλοφορία του θαλάσσιου ύδατος κατά μήκος της ακτής. Τέλος βρίσκουν εφαρμογή ως προκαταρκτικά αμυντικά έργα σε ακραία κυματικά κλίματα για τη μείωση της κυματικής ενέργειας προτού αυτή προσεγγίσει τα κύρια έργα προστασίας (Commet 1994). Με τεχνητή επανατροφοδότηση των διαβρωμένων παράκτιων ζωνών με ίζημα οί Υ.Κ μπορούν να αποτελέσουν μια πολύ καλή εναλλακτική λύση στην προστασία παράκτιων ζωνών με μηδαμινές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι ύφαλοι κυματοθραύστες είναι μονίμως βυθισμένοι κυματοθραύστες (submerged breakwaters) που κατασκευάζονται συνήθως από λιθορριπή με τεχνητούς ή φυσικούς ογκολίθους. Σε διάφορες περιπτώσεις μπορεί να γίνει χρήση ειδικού σχήματος τεχνητών ογκολίθων ή μονάδων θωράκισης, tripods, tetrapods, dolos, reef-balls, γεωσωλήνων και γεωσάκων. Προκειμένου να δημιουργηθούν ύφαλα εμπόδια ως έργα προστασίας ακτής.

Ο σκοπός της χρήσης των Υ.Κ είναι να μειώσει τις υδραυλικές φορτίσεις κατάντη αυτού λόγω του κυματικού πεδίου σε τέτοιο σημείο, ώστε να διατηρείται μια ωφέλιμη δυναμική ισορροπία στην παράκτια ζώνη.

Τα πλεονεκτήματα των ύφαλων κυματοθραυστών είναι :

- 1) Παρέχουν ικανοποιητική προστασία απέναντι στη διάβρωση της ακτής.
- 2) Σταθεροποιούν την ακτογραμμή.
- 3) Επιτρέπουν την απρόσκοπτη κυκλοφορία του νερού αφήνοντας τα παράκτια ρεύματα να περάσουν πάνω από τη στέψη τους και μεταξύ ύφαλου κυματοθραύστη και ακτογραμμής, εμποδίζοντας τελικά τη διαμόρφωση ζωνών λιμναζόντων νερών.

4) Εναρμονίζονται αισθητικά με το περιβάλλον καλύτερα από τους ορατούς κυματοθραύστες.

5) Απαιτούν λιγότερα υλικά κατασκευής σε σχέση με τους έξαλους.

Τα μειονεκτήματα των ύφαλων κυματοθραυστών είναι :

1) Οι πολύ χαμηλές στέψεις (σε μεγάλο βάθος) μπορεί να μην μειώνουν ικανοποιητικά τις επιπτώσεις (διάβρωση) από τους επερχόμενους κυματισμούς, ειδικά σε περιοχές με μεγάλο εύρος παλίρροιας.

2) Οι ύφαλοι κυματοθραύστες μπορεί να εμποδίζουν την αναμόρφωση της ακτής κατά την διάρκεια επικράτησης υδροδυναμικών και κυματικών συνθηκών που ευνοούν την τροφοδότηση της ακτής με ίζημα.

3) Εξ αιτίας συγκεκριμένων υδροδυναμικών συνθηκών ή απότομων μεταβολών μπορεί να προκληθούν ρεύματα τέτοια, που να προκαλούν τελικά αντί να αποτρέπουν την παράκτια διάβρωση. Οι αποσπασμένοι ύφαλοι κυματοθραύστες μπορεί να δημιουργήσουν πεδία υψηλών ταχυτήτων ειδικά στα ακρομώλια ή ανάμεσα σε δύο τέτοιες κατασκευές και να προκαλέσουν υποσκαφή των έργων ή περαιτέρω διάβρωση.

4) Οι Υ.Κ μπορεί να αποτελούν δυνητικό κίνδυνο για τη ναυσιπλοΐα ή την κυκλοφορία θαλάσσιων οχημάτων αναψυχής στην παράκτια ζώνη.

5) Η επιθεώρηση της ευστάθειας και της αρτιότητας της κατασκευής είναι σχετικά δύσκολη αφού ολόκληρο το έργο βρίσκεται κάτω από την στάθμη της ελεύθερης θαλάσσιας επιφάνειας.

6) Μεγάλο κόστος κατασκευής εξ αιτίας της αναγκαίας χρησιμοποίησης φορτηγίδων και πλωτών μηχανημάτων κατασκευής.

Παρ' όλο που η έρευνα σε αυτό τον τομέα έχει κάνει σημαντικά βήματα προόδου υπάρχουν πολλά ζητήματα σχετικά με τις σχεδιαστικές προδιαγραφές και διαδικασίες που αφορούν τέτοιες κατασκευές.

2.2 ΤΥΠΟΙ ΥΦΑΛΩΝ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΣΤΕΨΗΣ

Κατασκευές χαμηλής στέψης (Low-crested-structures, LCS) ονομάζονται αυτές οι οποίες έχουν τη στέψη τους κοντά (λίγο πάνω, λίγο κάτω ή ακριβώς) στη Μέση στάθμη θάλασσας Μ.Σ.Θ. Βασικός στόχος των κατασκευών χαμηλής στέψης αλλά και των ύφαλων κυματοθραυστών γενικά, είναι να προσφέρουν ηρεμία στο κυματικό πεδίο καθορισμένων περιοχών για την προστασία είτε φυσικών ακτογραμμών είτε διαδικασιών φορτοεκφόρτωσης σε λιμενικές εγκαταστάσεις. Οι λειτουργικές απαιτήσεις διαφόρων έργων παρ' όλα αυτά δεν καθιστούν απαραίτητη την πλήρη απόσβεση της κυματικής ενέργειας. Εφ' όσον ο όγκος αλλά και το ύψος της κατασκευής είναι ανάλογα του κόστους, επιβάλλεται να υπολογίσουμε το βέλτιστο ύψος στέψης της κατασκευής (minimum-best-fit-crest height), ώστε να παρέχει ικανοποιητική προστασία στην παράκτια ζώνη.

Όσον αφορά τους έξαλους κυματοθραύστες χαμηλής στέψης (sub-aerial, LCS) διαφέρουν με τους ύφαλους κυματοθραύστες (submerged breakwaters) στο ότι οι ύφαλοι είναι μονίμως βυθισμένοι στο νερό άσχετα από τις συνθήκες παλίρροιας, ενώ οι έξαλοι τείνουν να γίνονται ξεκάθαρα εμφανείς κατά τη διάρκεια της αμπώτιδας, πολύ δε μάλλον κατά τη φάση κατώτατης ρηχίας. Αυτό συμβαίνει επειδή κατασκευάζονται σε ένα ύψος κοντά στη στάθμη ανώτατης πλήμμης.

Υπάρχει ένας ακόμα τύπος ύφαλης κατασκευής, ο τεχνητός ύφαλος (reef breakwater), με τον οποίο εννοούμε μια κατασκευή σε αρκετά μεγάλο βάθος που εξυπηρετεί πρώτιστα περιβαλλοντικούς λόγους και δεν είναι τόσο αποτελεσματική όσον αφορά την μείωση της κυματικής ενέργειας.

Οι κυματοθραύστες χαμηλής στέψης χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες :

- (i) δυναμικά ευσταθείς ύφαλοι κυματοθραύστες (reef breakwaters)
- (ii) στατικά ευσταθείς κυματοθραύστες χαμηλής στέψης με ύψος στέψης πάνω από τη Μέση στάθμη ηρεμίας (Μ.Σ.Η). [LCS, από εδώ και πέρα].
- (iii) στατικά ευσταθείς ύφαλοι (ή βυθισμένοι) κυματοθραύστες [submerged breakwaters].

(i) Οι reef breakwaters ονομάζονται και τεχνητοί ύφαλοι κυματοθραύστες καθώς αποτελούν ουσιαστικά έναν χαμηλής στέψης ομογενή σωρό από ογκόλιθους χωρίς διαχωρισμένες στρώσεις που να εξασφαλίζουν λειτουργία φίλτρου ή πυρήνα, με αποτέλεσμα να επιτρέπει την αναδιαμόρφωση της γεωμετρίας της κατασκευής κάτω από διάφορες κυματικές συνθήκες. Το αρχικό ύψος στέψης είναι κοντά στη Μ.Σ.Η και καταλήγει σε ένα τερματικό δυναμικό ύψος ισοροπίας κάτω από το καθεστώς ακραίων κυματικών συνθηκών.

(ii) Οι LCS αποτελούν κατασκευές τις οποίες υπερπηδούν τα επερχόμενα κύματα οριακά ή καθόλου αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευστάθεια, λόγω διάταξης των στρώσεων θωράκισης και πυρήνα, από τους τεχνητούς ύφαλους.

(iii) Οι submerged breakwaters αποτελούν κατασκευές οι οποίες βρίσκονται μόνιμα κάτω από τη Μ.Σ.Η αλλά και την κατώτατη ρηχία. Όλα τα κύματα, τις υπερπηδούν ή περνούν από πάνω τους. Η ευστάθεια τους αυξάνεται όσο το ύψος της κατασκευής μειώνεται.

Ειδικό τύπο τέτοιου είδους κατασκευών αποτελεί ο τύπος Reef-ball (HSAR) προτεινόμενος από τους Armonio και Hall (2002), ο οποίος είναι ένας ειδικά διαμορφωμένος διάτρητος κύκλος, ημι-σφαιρικός, τεχνητός-ύφαλος χρησιμοποιούμενος από μόνος του ή ως μονάδα κατασκευής Υ.Κ. Σκοπός του είναι η ταυτόχρονη προστασία παράκτιων περιοχών από την κυματική όχληση και η δημιουργία κατάλληλου φιλικού χώρου για ανάπτυξη πρωτοτύπων βιοκοινωνιών μέσα στο σώμα του έργου προστασίας, καθώς οι κατασκευές από Reef-ball παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα.

Δεν είναι όμως όλες οι χαμηλής στέψης κατασκευές (LCS), τύπου πρισματικής λιθορριπής. Μερικές φορές επιλέγονται κατασκευές με λεία επιφάνεια θωράκισης, στεγανές και αδιαπέρατες, οι οποίες π.χ καλύπτονται από ασφαλικές στρώσεις πλήρωσης κενών ή στις οποίες η θωράκιση τους γίνεται με έτοιμα μπλόκια από σκυρόδεμα όπως οι κρηπιδότοιχοι σε παράκτια έργα θωράκισης.

Πρώτα απ' όλα η κυματική μετάδοση είναι μεγαλύτερη για το ίδιο ύψος στέψης σε σχέση με τις κατασκευές από λιθορριπή, επειδή δεν υπάρχει απόσβεση της κυματικής ενέργειας λόγω τριβής και διήθησης μέσω του πορώδους σώματος της κατασκευής.

Κατά δεύτερο λόγο προκύπτει μικρότερη ή καθόλου επίδραση του πλάτους στέψης της κατασκευής στην εν λόγω απόσβεση της κυματικής ενέργειας, εκτός από τις ύφαλες (πλήρως βυθισμένες) κατασκευές με πολύ ευρεία όμως στέψη, ώστε να προκληθεί σίγουρα έντονη θραύση του επερχόμενου κυματισμού πάνω από αυτές. Αυτή όμως η περίπτωση δεν συναντάται συχνά ως σχεδιαστική λύση καθώς τα ασφάλινα και σκυροδεμάτινα κρηπιδώματα κατασκευάζονται στην ξηρά και όχι μέσα στην θάλασσα.

2.3 ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΥΦΑΛΟ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ

Όπως αναφέραμε οι Υ.Κ χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την επερχόμενη κυματική ενέργεια σε μια παράκτια ζώνη και συνεκδοχικά αποσκοπούν στην μείωση της μεταφοράς ιζήματος και της δυνητικής παράκτιας διάβρωσης στα κατάντη (στην υπήνεμη πλευρά) του κυματοθραύστη. Ταυτόχρονα, με τέτοιου τύπου κατασκευές εξασφαλίζεται η διατήρηση της αισθητικής και τουριστικής αξίας της παράκτιας ζώνης.

Ο λειτουργικός σχεδιασμός κυματοθραυστών χαμηλής στέψης απαιτεί ακριβείς προβλέψεις της κυματικής μετάδοσης (wave transmission) και της ανύψωσης της μέσης στάθμης ηρεμίας λόγω κυμάτων (wave set-up) στις περιοχές υπό προστασία.

Οι παρούσες μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή κυματικής μετάδοσης K_t προέρχονται από στοιχεία τα οποία έχουν προκύψει από διάφορες πειραματικές διατάξεις σε διαφορετικά εργαστήρια, με αποτέλεσμα οι διαφορές στις διαδικασίες ανάλυσης να αποφέρουν διαφορετικά αποτελέσματα. Επίσης υπάρχουν πολλές παράμετροι ανάλυσης όπως η διαπερατότητα, το πλάτος στέψης και το βάθος στο οποίο τοποθετείται η κατασκευή και δεν έχουν διευκρινιστεί ακόμη πλήρως με αποτέλεσμα να λαμβάνονται υπόψη με διαφορετικά βάρη επιρροής στη διαμόρφωση του αναλυτικού τύπου για τον K_t , για την εκάστοτε διάταξη.

Η μείωση της κυματικής ενέργειας κατάντη ενός Υ.Κ είναι αποτέλεσμα διαφόρων μηχανισμών όπως η θραύση των κυμάτων, η τριβή στον πυθμένα και η ροή σε πορώδες μέσο. Από αυτούς η θραύση είναι ο πιο σημαντικός μηχανισμός. Παρ' όλο

που έχουν εξελιχθεί μοντέλα θραύσης για παράκτιες ζώνες με ήπιες κλίσεις πυθμένα, τα μοντέλα αυτά δεν εφαρμόζονται άμεσα σε προβλήματα με παρουσία Υ.Κ. Ο Johnson (2006) μελετά ένα τέτοιο μοντέλο που έχει παραχθεί από τους Battjes and Janssen (1978) και δίνει μια απλή σχέση υπολογισμού της θραύσης των κυμάτων λόγω ρήχωσης.

Ανάλογα με το ύψος της στέψης του κυματοθραύστη από τον πυθμένα και αν αυτό βρίσκεται κοντά, πάνω ή κάτω της Μ.Σ.Η, τέτοιου είδους κατασκευές καθορίζεται εάν θα υποστούν υπερπήδηση ή απλά το κύμα θα διαδοθεί στα κατάντι τους. Είναι προφανές ότι εάν το ύψος στέψης είναι χαμηλό, η κυματική ενέργεια διέρχεται πάνω από την ύψαλη κατασκευή. Αυτό έχει σαν συνέπεια :

1) Η θωράκιση στο προσήνεμο πρηνές μπορεί να γίνει με ελαφρύτερους άρα μικρότερους ογκολίθους σε σύγκριση με κυματοθραύστες που δεν επιτρέπουν ή επιτρέπουν οριακά την υπερπήδηση του κυματισμού, επειδή οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την αναρρίχηση και κατάκλιση της θαλάσσιας στάθμης είναι μικρότερες.

2) Η στέψη και η υπήνεμη παρειά του κυματοθραύστη πρέπει να θωρακίζονται έναντι των δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω μετάδοσης ή υπερπήδησης του κυματισμού. Συνήθως εφαρμόζεται η ίδια θωράκιση ανάντι, πάνω και κατάντι της στέψης του Υ.Κ.

Ένα άλλο σημαντικό φαινόμενο αναφορικά με την απόδοση των αποσπασμένων Υ.Κ είναι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας λόγω κυμάτων (set up) [Diskin et al (1970), Dalrymple (1971), Loveless et al (1994)]. Η παρουσία του ύψαλου εμποδίου μπορεί να δημιουργήσει μια αύξηση του πιεζομετρικού φορτίου κατάντι της κατασκευής και πιθανώς να προκαλέσει ανάπτυξη υπολογίσιμου, κατά μήκος της ακτής, ρεύματος στην παράκτια ζώνη. Αυτό μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες για τη διάβρωση της ακτής καθώς μπορεί να την αυξήσει.

2.4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ-ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΣΜΟΣ

Το βασικό γενεσιουργό αίτιο ενός πεδίου κυμάτων στη θαλάσσια επιφάνεια είναι η τυρβώδης ροή του ανέμου. Η συνεχής μεταφορά ενέργειας προκαλεί την αύξηση του ύψους και της ταχύτητας των κυμάτων. Η ανομοιομορφία του πεδίου ροής του ανέμου πάνω από τη διαταραγμένη θαλάσσια επιφάνεια είναι βασικής σημασίας στην αύξηση, δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου στην κορυφή ενός κύματος μπορεί να φτάσει σε τιμές πενταπλάσιες της ταχύτητας στην κοιλιά. Η ελάχιστη αεροδυναμική πίεση αναπτύσσεται στην κορυφή. Κατά τη μεταφορά ενέργειας εμφανίζεται αποχωρισμός της ροής και δημιουργία ενός στροβίλου, που συμβάλλει στη μείωση της πίεσεως στην περιοχή εμφανίσεως του, στις ταλαντώσεις της πίεσεως και στην αύξηση του ύψους κύματος. Κατά τον Philips, τα κύματα δημιουργούνται από το συντονισμό αυτών των στροβίλων.

Ο ρυθμός αυξήσεως των χαρακτηριστικών (μήκος και ύψος) των κυμάτων με το χρόνο κατά τη διάρκεια της πνοής του ανέμου είναι γραμμικός, εφ'όσον η ταχύτητα των κυμάτων είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του ανέμου. Στη συνέχεια ο ρυθμός αυξάνει πολύ. Ο φυσικός μηχανισμός διακοπής της συνεχούς αυξήσεως των χαρακτηριστικών είναι η θραύση των κυμάτων στην ανοιχτή θάλασσα.

Εκδηλώνεται στην κορυφή των κυμάτων και δημιουργεί το χαρακτηριστικά λευκό και έντονα τυρβώδες στρώμα στη διαταραγμένη θαλάσσια επιφάνεια στα ανοιχτά. Η μεταφορά ενέργειας από την αέρια στην υδάτινη φάση μεγιστοποιείται σε μια ορισμένη συχνότητα. Σε αυτή την συχνότητα το φάσμα ενέργειας κυμάτων παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή.

2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΠΥΘΜΕΝΑ

Ο θαλάσσιος πυθμένας επιδρά στους κυματισμούς. Η επίδραση εκδηλώνεται κατά κύριο λόγο στην υφή και στην μορφή των κυμάτων και στη διεύθυνση μεταδόσεως. Οι κυριότερες μορφές επιδράσεως του πυθμένα στους θαλάσσιους κυματισμούς που ενδιαφέρουν το λιμενολόγο μηχανικό είναι : οι παραμορφώσεις, η θραύση και η διάθλαση των κυμάτων.

2.5.1 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 θραύσεως 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 τάξης, υπήρξε το πρώτο κριτήριο θραύσεως ενός κύματος στη θαλάσσια υδραυλική. Σύμφωνα με το Miche η θραύση επέρχεται, όταν τα δύο μέτωπα της διατομής σχηματίσουν μια γωνία ίση με 60° με ταυτόχρονη εμφάνιση ενός γωνιακού σημείου στην κορυφή. Ένα τέτοιο κριτήριο βέβαια δεν θεωρείται σήμερα αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας.

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 φάσεις 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 (βλ. σχημ.2.5.1.1). Η εμφάνιση μιας από 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.

Στη θραύση στη βάση 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 μετάδοση 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 αρχίζουν 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.



Σχήμα 2.5.1.1-Διάφορα είδη θραύσεως κυμάτων

Το ύψος 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_o , την καμπυλότητα γ_o και την κλίση $tana$.

Οι σχέσεις για τον υπολογισμό του H_b έχουν την παρακάτω μορφή:

$$H_b/H_o = \beta \gamma_o^\delta + \zeta \quad (2.5.1.1)$$

Στον πίνακα 2.5.1.1 αναγράφονται οι εμπειρικοί συντελεστές β , δ και ζ ορισμένων χαρακτηριστικών σχέσεων.

Πιν. 2.5.1.1- Συντελεστές της εξίσωσης 2.5.1.1

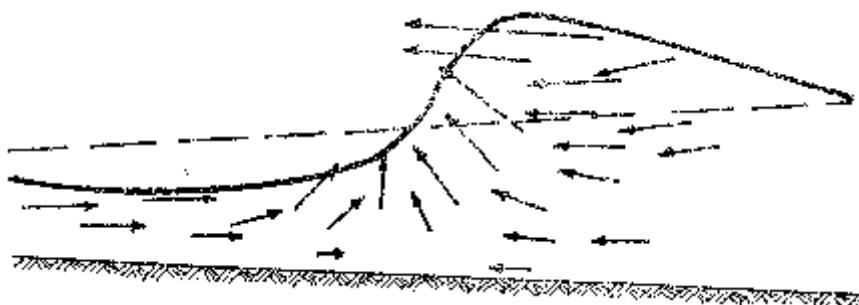
ΕΡΕΥΝΗΤΕΣ	β	δ	ζ
Munk	0.30	-0.33	0
LeMéhauté- Koh	$0.76(\tan\alpha)^{0.143}$	-0.25	0
Weggel	$(0.01+0.5\tan\alpha)$ $(1+\tan\alpha+\zeta)$	-0.33	$\frac{D_1(1 + \tan\alpha - D_2\{1.71 - 0.18 \exp(28\tan\alpha)\})}{D_1 - D_2}$ με $D_1=(0.01+0.5\tan\alpha)^{0.33}$ $D_2=(0.01-0.01\exp(-28\tan\alpha))^{0.33}$

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

$$H_b/h_b=0.8 \quad (2.5.1.2)$$

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

Στη θραύση η κατανομή των ταχυτήτων των σωματιδίων στις διατομές του κύματος λίγο πριν τη θραύση είναι ακανόνιστη σε αντίθεση με τις διατομές στην ανοιχτή θάλασσα (σχήμα 2.5.1.2). Σε γενικές γραμμές οι οριζόντιες ταχύτητες αυξάνουν πολύ στην κορυφή του κύματος, γεγονός που έχει μεγάλη σημασία στην εμφάνιση της θραύσεως.



Σχήμα 2.5.1.2- Κατανομή ταχυτήτων στο θραυόμενο κύμα.

Σε γενικές γραμμές η πίεση p συντίθεται από δύο προσθετέους, την υδροστατική P_h και την δυναμική P_d .

Η δυναμική πίεση P_d υπολογίστηκε από τη θεωρία 1^{ης} τάξης και παίρνει την μέγιστη τιμή της στον πυθμένα :

$$Maxp_d = \pm \frac{H\rho g}{\frac{\cosh 2\pi h}{L}} \quad (2.5.1.3)$$

Η τιμή με το πρόσημο (+) είναι όταν το κύμα βρίσκεται στην κορυφή και (-) όταν το κύμα βρίσκεται στην κοιλιά.

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 ανοιχτά είναι κάθετες προς την ευθύγραμμη ίσαλο γραμμή. Αν οι κορυφογραμμές των κυμάτων στα ανοιχτά σχηματίσουν γωνία β_o με την ευθύγραμμη ίσαλο γραμμή, η γραμμή θραύσεως είναι κεκλιμένη και σχηματίζει γωνία $\beta_b (< \beta_o)$ με την ίσαλο γραμμή.

Μετά τη θραύση η μορφή της ροής μεταβάλλεται ριζικά, όπως προαναφέρθηκε. Οι συνθήκες ροής στη ζώνη μετά τη θραύση είναι κρίσιμες για την 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 μια 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 το ενδιαφέρον των ερευνητών. Άλλωστε είναι ο θεαματικότερος φυσικός μηχανισμός στη θάλασσα. Η έρευνα στη θραύση πήρε σημαντική έκταση και βάθος, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, σε έναν σημαντικό αριθμό ερευνητικών κέντρων.

Η θραύση επηρεάζει πολλά φυσικά φαινόμενα όπως οι φορτίσεις κατασκευών, η δημιουργία ρευμάτων, η διάβρωση και η πρόσχωση των ακτών, η μεταφορά φερτών υλών και οι κινήσεις σκαφών. Παρ'όλο όμως το ενδιαφέρον αριθμού επιστημών μπορεί να λεχθεί ότι πολύ λίγο έχει κατανοηθεί μέχρι σήμερα η θραύση. Εκεί έγκειται και η εμπειρική που την περιγράφει καθώς όλες οι μαθηματικές εξισώσεις που αναφέρονται στη θραύση προέκυψαν από εμπειρικές εξισώσεις ή πειραματικά δεδομένα.

Το κριτήριο θραύσεως λέει ότι 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 οδήγησε στην κατάστρωση μιας μαθηματικής σχέσεως για τη θέση της γραμμής θραύσεως, που πολλές φορές επαληθεύτηκε από πειραματικά αποτελέσματα.

Είναι δύσκολο να περιγράψουμε μαθηματικά τη θραύση των κυμάτων επειδή δεν έχουμε επαρκείς γνώσεις επί της αστάθειας που προξενεί τη θραύση. Γι'αυτό στα μαθηματικά μοντέλα για τη θραύση περιλαμβάνονται εμπειρικές σχέσεις ή εμπειρικά κριτήρια. Το πρώτο διατυπώθηκε από το Γάλλο θεωρητικό Biesel ενώ το 1977 οι Cokelet and Longuet-Higgins δημιούργησαν ένα άλλο μοντέλο που συζητήθηκε πολύ.

2.6 ΒΙΟΛΟΓΙΑ-ΘΑΛΑΣΣΑ-ΜΑΛΑΚΟ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ

Τα ύδατα των θαλασσών και των ωκεανών χαρακτηρίζονται από ορισμένες φυσικές ιδιότητες όπως : η κίνηση, η θερμοκρασία, η διαύγεια και το χρώμα, η υδροστατική πίεση και η ταχύτητα του ήχου μέσα στον υδάτινο όγκο.

Οι κινήσεις των θαλάσσιων μαζών διακρίνονται σε περιοδικές (παλίρροια) και απεριοδικές (κύματα, ρεύματα, στρόβιλοι).

Οικολογικά οι παλίρροιες επιδρούν καλύπτοντας περιοδικά και αποκαλύπτοντας τις παράκτιες περιοχές επηρεάζοντας τη σύνθεση της χλωρίδας και της πανίδας που εγκαθίσταται εκεί. Τα κύματα διακρίνονται σε 3 μεγάλες κατηγορίες : επιφανειακά, στάσιμα και Tsunamis. Τα επιφανειακά προκαλούνται από τον άνεμο και το μέγεθος

τους εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, τα στάσιμα δημιουργούνται σε κλειστούς κόλπους, και τα Tsunamis από σεισμούς.

Οικολογικά τα κύματα επιδρούν κυρίως στην παράκτια ζώνη. Εκεί η ένταση του κυματισμού επιδρά στην κάθετη κατανομή των κυματισμών και καθορίζει το είδος της πανίδας που εγκαθίσταται σε κάθε περιοχή. Επίσης επηρεάζει την μορφολογία των οργανισμών και ομογενοποιεί τη θερμοκρασία στις παράκτιες περιοχές και διευκολύνει την οξυγόνωση του νερού και τη χρήση θρεπτικών αλάτων που κατακάθονται στον πυθμένα από αυτότροφους οργανισμούς.

Η θερμοκρασία επηρεάζει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού αφ' ενός και τις φυσιολογικές διεργασίες των οργανισμών αφ' ετέρου. Γενικά οι υψηλές θερμοκρασίες επιταχύνουν τον ρυθμό ανάπτυξης των οργανισμών.

Το φως αποτελεί σημαντικό οικολογικό παράγοντα γιατί συνδέεται με φαινόμενα και λειτουργίες που καθορίζουν την ύπαρξη της ζωής όπως είναι : η φωτοσύνθεση, η όραση, η θέρμανση και η ακτινοβολία.

Στο θαλάσσιο οικοσύστημα διακρίνουμε τους παραγωγούς και τους καταναλωτές. Οι παραγωγοί είναι υδρόβιοι φυτικοί οργανισμοί που έχουν χλωροφύλλη και φωτοσυνθέτουν. Οι καταναλωτές (πρωτογενείς τρέφονται με φυτοπλαγκτον, δευτερογενείς τρέφονται με πρωτογενείς, τριτογενείς τρέφονται με δευτερογενείς) είναι ζώντες οργανισμοί που τρέφονται με οργανική ύλη φυτικής ή ζωικής προέλευσης.

Οι θαλάσσιοι οργανισμοί διακρίνονται σε βενθικούς και πελαγικούς. Οι βενθικοί ζουν και κινούνται πολύ πλησίον του βυθού. Οι πελαγικοί ζουν και κινούνται μέσα στη στήλη του νερού από την επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα των ωκεανών και των θαλασσών. Οι πελαγικοί διακρίνονται περαιτέρω σε πλαγκτόν και νηκτόν. Οι πλαγκτικοί είναι αυτοί που μεταφέρονται παθητικά με την κίνηση των θαλάσσιων μαζών. Οι πλαγκτικοί διακρίνονται σε φυτοπλαγκτόν (φυτικοί) και ζωοπλαγκτόν (ζωικοί).

Νηκτόν είναι οι θαλάσσιοι ζωικοί οργανισμοί που έχουν την ικανότητα να κολυμπούν και να κινούνται με ευχέρεια ανεξάρτητα από τον τρόπο κίνησης των υδάτων.

Οι βενθικοί οργανισμοί διακρίνονται σε φυτοβένθος και ζωοβένθος (μικροβένθος, μειοβένθος, μακροβένθος). Οι βυθοί κοντά στην ξηρά είναι πλούσιοι σε νεκρή οργανική ύλη και σε φερτά υλικά που προέρχονται από την ξηρά.

Η παλίρροια προκαλεί έντονη ζώνωση των οργανισμών ανάλογα με την ανθεκτικότητά τους στις σκληρές συνθήκες που συνδέονται με το φαινόμενο. Η σύνθεση των βιοκοινωνιών εξαρτάται από τη φύση του υποστρώματος.

Στα μαλακά υποστρώματα οι οργανισμοί που ζουν εκεί εξαρτώνται από το μέγεθος των κόκκων του υποστρώματος και την περιεκτικότητά του σε οργανική ύλη. Όσον αφορά την πανίδα έχουμε μικροβένθος, το οποίο αποτελείται από μικροσκοπικούς οργανισμούς όπως βακτήρια, πρωτόζωα, τριχόζωα, μικρούς νηματώδεις οργανισμούς για τους οποίους οι γνώσεις είναι περιορισμένες. Το μειοβένθος περιλαμβάνει αντιπροσώπους από τις περισσότερες ομάδες των ασπόνδυλων, όπως στροβιλιστικοί, νηματώδεις, αμφίποδα, μαλάκια. Το μακροβένθος είναι ζωικοί οργανισμοί σκαπτικού τύπου που ζουν βυθισμένοι μέσα στο βυθό. Η παρουσία τους γίνεται αισθητή από ορισμένα βιοδηλωτικά ίχνη, όπως οπές, σωλήνες και κάψες. Κατά κανόνα στις αμμώδεις ακτές παρατηρείται ζώνωση ανάλογη με αυτή που περιγράφηκε για το σκληρό υπόστρωμα, η οποία αντιστοιχεί στις διαβαθμίσεις της παλιρροϊκής και υποπαλιρροϊκής ζώνης. Στην ανώτερη παλιρροϊκή ζώνη έχω αμφίποδα, στην ενδιάμεση πολύχαιτους δακτυλιοσκόληκες *Arenicola*, αμφίποδα και ισόποδα. Στην υποπαλιρροϊκή έχω πολύχαιτους, μαλάκια, ολοθούρια και ανεμώνες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 ΟΜΟΙΟΤΗΤΑ

Η μελέτη της μετάδοσης των κυματισμών μέσα από ύφαλο κυματοθραύστη θα γίνει με πειραματικές μεθόδους, δηλαδή με τη μέθοδο του ομοιώματος. Στο ομοίωμα αναπαρίστανται οι συνθήκες περιβάλλοντος και οι πολύπλοκες διεργασίες που συμβαίνουν στο πραγματικό έργο (Ρογκάν 1981).

Μεταξύ περιβάλλοντος και ομοιώματος υπάρχουν αναλογίες που καλούνται ομοιότητες (γεωμετρικής, κινηματικής και δυναμικής τάξης). Σε όμοια συστήματα υπάρχει μια αμφιμονοσήμαντη αντιστοιχία μεταξύ των στοιχείων. Τα στοιχεία του περιβάλλοντος και του ομοιώματος που έχουν αναλογίες καλούνται ομόλογα. Για να διαλέξουμε ποιο από τα τρία είδη ομοιότητας θα χρησιμοποιήσουμε πρέπει να μελετήσουμε προσεκτικά το πρόβλημα. Οι συνθήκες ομοιότητας είναι μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στα στοιχεία του περιβάλλοντος και του ομοιώματος.

Υπάρχουν τρία είδη ομοιότητας :

Γεωμετρική :

Στη γεωμετρική ομοιότητα απαιτείται αντιστοιχία μεταξύ των σχημάτων των δύο συστημάτων. Συγκεκριμένα ο λόγος των γραμμικών διαστάσεων (αντίστοιχες) των δύο συστημάτων πρέπει να είναι σταθερός. Ο σταθερός αυτός λόγος καλείται κλίμακα μηκών ή γεωμετρική κλίμακα.

Κινηματική :

Δύο συστήματα είναι κινηματικά όμοια όταν τα ομόλογα (αντίστοιχα) σωματίδια, βρίσκονται σε ομόλογες (αντίστοιχες) θέσεις, σε ομόλογες (αντίστοιχες) χρονικές στιγμές. Επομένως σε σταθερή ροή οι τροχιές των σωματιδίων είναι καμπύλες σταθερής τροχιάς και τα σωματίδια των συστημάτων διανύουν ομόλογα διαστήματα σε σταθερούς χρόνους οι οποίοι λέγονται κλίμακα χρόνων.

Δυναμική :

Δύο συστήματα είναι δυναμικά όμοια εάν οι συνολικές δυνάμεις, αλλά και οι επιμέρους συνιστώσες που ασκούνται σε ομόλογα ρευστά σωματίδια στα δύο συστήματα είναι ανάλογες. Δηλαδή, εάν ο λόγος των συνισταμένων αλλά και συνιστωσών δυνάμεων που ασκούνται σε ομόλογα ρευστά σωματίδια στα δύο συστήματα είναι σταθερός. Τα δυναμοπολύγωνα στα αντίστοιχα σημεία των συστημάτων είναι γεωμετρικά όμοια.

Αν μεταξύ δύο συστημάτων υπάρχει ομοιότητα κατανομής μάζας και κινηματική ομοιότητα τότε από τη σχέση : $F=ma$ προκύπτει ο σταθερός λόγος μεταξύ των συνολικών δυνάμεων που ασκούνται σε ομόλογα ρευστά σωματίδια των δύο συστημάτων. Ο σταθερός λόγος πρέπει να διατηρηθεί και για τις επιμέρους συνιστώσες που ασκούνται στα ομόλογα ρευστά σωματίδια.

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

$$R = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{\text{δυν.αδρανειας}}{\text{δυν.συνεκτικότητας}} \quad (3.1.1)$$

$$F = \frac{V}{\sqrt{D \cdot g}} = \frac{\text{δυν.αδρανειας}}{\text{δυν.βαρυτητας}} \quad (3.1.2)$$

m : χαρακτηριστική διάσταση ροής

$V(m/s)$: χαρακτηριστική ταχύτητα ροής

$\rho(kg/m^3)$: πυκνότητα ρευστού

$\mu(Kg/ms)$: κινηματική συνεκτικότητα ρευστού

$g(m^3/s)$: 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 Froude δίνει μια τάξη μεγέθους της σπουδαιότητας που έχει η δύναμη βαρύτητας στη ροή. Έχει ιδιαίτερη σημασία σε ροές με ελεύθερη επιφάνεια γιατί διέπονται από τη βαρύτητα.

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

$$R_1 = R_2 \text{ (συνθήκη Reynolds)} \quad (3.1.3)$$

$$F_1 = F_2 \text{ (συνθήκη Froude)} \quad (3.1.4)$$

Πρακτικά δύο ροές με ελεύθερη επιφάνεια έχουν μια μόνο συνθήκη ομοιότητας τη συνθήκη Froude :

$$\frac{V_1^2}{gL_1} = \frac{V_2^2}{gL_2} \quad (3.1.5)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} \quad (3.1.6)$$

Ταχύτητα : $V = LT^{-1}$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{L_2 T_2^{-1}}{L_1 T_1^{-1}} = \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.7)$$

$$\text{Δηλαδή : } \frac{T_2}{T_1} = \frac{L_2}{L_1} \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.1.8)$$

Η σχέση αυτή δείχνει το λόγο των περιόδων των κυμάτων σε ένα ομοίωμα (με επιλεγμένη γραμμική κλίμακα).

3.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Τα χαρακτηριστικά στο οριζόντιο επίπεδο μονοδιάστατων μονοχρωματικών κυματισμών βαρύτητας και οι αντίστοιχοι ορισμοί τους συνοψίζονται ακολούθως :

Ύψος κύματος H : είναι η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της κορυφής και της κοιλάς του κύματος. Ισούται με το διπλάσιο του εύρους ταλαντώσεως των σωματιδίων.

Μήκος κύματος L : είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ δύο σωματιδίων, που βρίσκονται στην ίδια φάση ταλαντώσεως. Μετράται κατά μήκος της διεύθυνσης μεταδόσεως.

Καμπυλότητα ή κυρτότητα κύματος $\gamma = H/L$.

Μέτωπο κύματος : είναι επίπεδο κάθετο προς το επίπεδο ταλαντώσεως και εφαπτόμενο στη διατομή του κύματος.

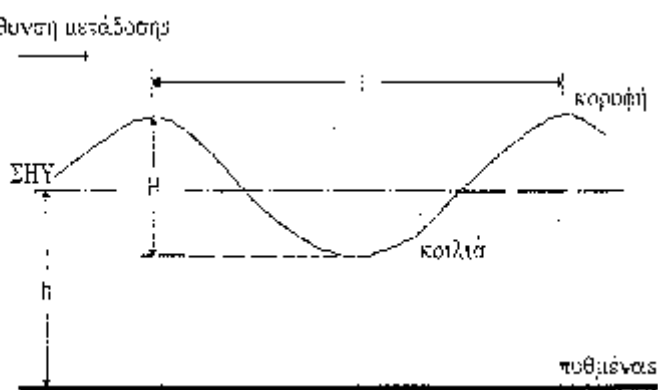
Διεύθυνση μεταδόσεως (ή ακτίνα κύματος) : είναι η κάθετη γραμμή προς το μέτωπο του κύματος (κείται στο επίπεδο ταλαντώσεως).

Περίοδος κύματος T : είναι ο χρόνος μιας πλήρους ταλαντώσεως των σωματιδίων. Ορίζεται και σαν το χρονικό διάστημα μεταξύ της διελεύσεως δύο διαδοχικών κορυφών κύματος από ένα ορισμένο σημείο.

Ταχύτητα κύματος C : (ή ταχύτητα φάσεως) είναι η απόσταση που διανύεται από το μέτωπο του κύματος στη μονάδα του χρόνου. Εξ' ορισμού $C=L/T$.

Διατομή κύματος : είναι η κατακόρυφη διατομή του κατά τη διεύθυνση μεταδόσεως.

Στο σχήμα 3.2.1 φαίνεται μια τυπική διατομή κύματος.



Σχήμα 3.2.1-Τυπική διατομή κύματος

Κορυφή κύματος : είναι το υψηλότερο σημείο του πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.

Κοιλιά κύματος : είναι το χαμηλότερο σημείο του κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία.

Βάθος νερού h : είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας σε ηρεμία πάνω από τον πυθμένα.

Σχετικό βάθος νερού : h/l

Αριθμός κύματος : $\kappa = 2\pi/L$

ΣΗΥ : είναι η ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας σε ηρεμία (Στάθμη Ηρεμούντος Ύδατος).

3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΩΝ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ

Έχουνε γίνει πολλές προσπάθειες να περιγραφούν με μαθηματικές θεωρίες οι μεταβολές των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών των γραμμικών μονοδιάστατων κυματισμών. Οι κυματισμοί αυτοί, διαδίδονται κατά μία οριζόντια διεύθυνση (Οx)

χωρίς να μεταβάλλονται τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά τους κατ' αυτήν. Ο Le Méhauté (1969) καθόρισε τις περιοχές εφαρμογής των θεωριών αυτών ανάλογα με τις τιμές των αδιάστατων παραμέτρων ε και σ^2 από τις οποίες προκύπτει η παράγωγη παράμετρος Ursell, $U_R = \frac{\varepsilon}{\sigma^2}$. Η ε είναι ο λόγος του ύψους προς το βάθος κύματος $\varepsilon = H/d$. Η σ^2 είναι το τετράγωνο του λόγου του βάθους προς ένα χαρακτηριστικό μήκος (λαμβάνεται συνήθως το μήκος κύματος) $\sigma^2 = (d/L)^2$ οπότε προκύπτει $U_R = \frac{L^2 H}{d^3}$.

Στις επόμενες παραγράφους αναπτύσσονται οι βασικές αρχές των θεωριών γραμμικών μονοδιάστατων κυματισμών. Λέγονται γραμμικοί γιατί το προφίλ τους παραμένει συμμετρικό κατά τον άξονα Ox και περιγράφονται από μία (ημιτονοειδής) αρμονική συνάρτηση.

3.3.1 ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΜΑΤΟΣ ΑΠΕΙΡΟΣΤΟΥ ΥΨΟΥΣ Η ΘΕΩΡΙΑ AIRY Η ΘΕΩΡΙΑ STOKES 1^{ης} ΤΑΞΗΣ.

Για μικρές διαταραχές της ελεύθερης επιφάνειας, δηλαδή μικρό εύρος κύματος $a/L \ll 1$, οι οριακές συνθήκες γραμμικοποιούνται και με την εξίσωση Laplace σχηματίζουν ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, το οποίο λύνεται με τη μέθοδο των χωριζομένων μεταβλητών. Η λύση είναι αρμονική ως προς x και t :

$$\Phi = \frac{Hg \cosh k(d+z)}{2\omega \cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (3.3.1.1)$$

οπότε προκύπτει η εξίσωση ελεύθερης επιφάνειας :

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3.3.1.2)$$

με αντικατάσταση των σχέσεων (3.3.1.1) και (3.3.1.2) στην κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας προκύπτει η εξίσωση :

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3.3.1.3)$$

η οποία είναι γνωστή σαν εξίσωση διασποράς. Η οποία σε παράγωγη μορφή δίνει :

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh kd \quad (3.3.1.4)$$

από την οποία προκύπτει ότι η ταχύτητα φάσης είναι αύξουσα συνάρτηση της περιόδου, οπότε ένας κυματισμός σύνθετος από ημιτονοειδή κύματα διασπείρεται επειδή οι κυματισμοί με τις μεγαλύτερες περιόδους διαδίδονται πιο γρήγορα.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh kd \quad (3.3.1.5)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας των ρευστών σωματιδίων u και w κατά τη διεύθυνση x και z προκύπτουν με παραγωγή της συνάρτησης δυναμικού :

$$u = \frac{d\Phi}{dx} = \frac{\pi H}{T} \times \frac{\cosh k(d+z)}{\sin kd} \cos(kx - wt) \quad (3.3.1.6)$$

$$w = \frac{d\Phi}{dz} = \frac{\pi H}{T} \frac{\sin k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - wt) \quad (3.3.1.7)$$

Η συνάρτηση u έχει την ίδια φάση με την ελεύθερη επιφάνεια, κάτω από την κορυφή, τα στοιχεία διαδίδονται στην κατεύθυνση μετάδοσης του κυματισμού, ενώ αντίθετα από αυτή όταν βρίσκονται κάτω από κοιλία. Η συνάρτηση w έχει διαφορά φάσης $\pi/2$ με την ελεύθερη επιφάνεια.

Έστω $\theta = kx - wt$ σταθερή και θέσουμε :

$$u_o = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\tanh kd} \cos\theta, \quad w_o = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{\tanh kd} \sin\theta$$

$$\text{παίρνω : } u = u_o \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \quad (3.3.1.8)$$

$$w = w_o \frac{\sinh(d+z)}{\cosh kd} \quad (3.3.1.9)$$

από όπου προκύπτει ότι το εύρος συνιστωσών της ταχύτητας μειώνεται εκθετικά με το βάθος z .

Για $z > L/2$ τα $u(z)$ και $w(z)$ είναι αμελητέα.

$$\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} = \frac{e^{kd+kz} + e^{-kd-kz}}{e^{kd} + e^{-kd}} < \frac{e^{kd} \cdot e^{kz} + e^{-kd} e^{-kz}}{e^{kd}} = e^{kd} + e^{-2kd} \cdot e^{-kz} \quad (3.3.1.10)$$

οπότε για $z = -L/2$ δηλαδή $d > L/2$

$$\frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} < 2e^{-\pi} \quad (3.3.1.11)$$

Για τις ακραίες περιπτώσεις βαθιών νερών $d/L > 0,5$ αλλά και ρηχών νερών $d/L < 0,04$ λόγω της ασυμπτωτικής τάσης του $\tanh kd$, αλλά και του ορίσματος του, έχουμε τις εξισώσεις για τα βαθιά και τα ρηχά νερά :

Βαθιά νερά :

$$C_0 = gT/2\pi \quad (3.3.1.12)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (3.3.1.13)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} e^{kz} \cos(kx - wt) \quad (3.3.1.14)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{Z}{d}\right) \sin(kx - wt) \quad (3.3.1.15)$$

Ρηχά νερά :

$$C = \sqrt{gd} \quad (3.3.1.16)$$

$$L = T \sqrt{gd} \quad (3.3.1.17)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{1}{kd} \cos(kx - wt) \quad (3.3.1.18)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{d}\right) \sin(kx - wt) \quad (3.3.1.19)$$

3.4 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ

Έχουν αναπτυχθεί πολλές θεωρίες για να περιγράψουν τους μη γραμμικούς προωθούμενους κυματισμούς. Για νερά σταθερού βάθους ο Stokes (1847) και οι Korteweg και De Vries (1895) εισήγαγαν τέτοιες θεωρίες. Έτσι είχαμε τις θεωρίες Stokes 2^{ης}, 3^{ης}, 4^{ης}, 5^{ης} τάξης για βαθιά νερά και τις θεωρίες Cnoidal 1^{ης}, 2^{ης}, 3^{ης}, 4^{ης}, 5^{ης} τάξης για ρηχά νερά. Επίσης αναπτύχθηκαν οι "θεωρίες ροικής συνάρτησης" (stream function theories) οι οποίες αναπτύσσονται σε πεπερασμένες σειρές Fourier τη ροική συνάρτηση Ψ . Όλες αυτές οι θεωρίες αναφέρονται σε συμμετρικά προφίλ ελεύθερης επιφάνειας ως προς την κατακόρυφο. Στη φύση υπάρχει και κατακόρυφη ασυμμετρία ως προς το προφίλ και εκεί ενδείκνυται ένα αριθμητικό μοντέλο τύπου Boussinesq για να τις περιγράψει.

3.4.1 Θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης

Οι θεωρίες Stokes ανώτερης τάξης δίνουν μια προσεγγιστική λύση στο μη γραμμικό πρόβλημα των κυματισμών. Οι λύσεις βασίζονται στη μέθοδο των μικρών διαταραχών (perturbation Method) : κάθε εξαρτημένη μεταβλητή εκφράζεται σαν μια πεπερασμένη σειρά δυνάμεων (δυναμοσειρά) μιας μικρής αδιάστατης παραμέτρου $E = KH/2$ η οποία σχετίζεται με το ύψος και το μήκος κύματος (για την περίπτωση κυματισμών).

Η ικανοποίηση των οριακών συνθηκών στην επιφάνεια μας δίνει ένα σύστημα εξισώσεων μέσω του οποίου υπολογίζονται οι όροι της σειράς.

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

$$\Phi = \frac{Hg}{2\omega} \frac{\cos k(d+z)}{\cosh kd} \sin(kx - wt) + \frac{3\pi H^2}{16T} \cos 2k \frac{(d+z)}{\sinh^4 kd} \sin 2(kz - wt) \quad (3.4.1.1)$$

Η εξίσωση ελεύθερης επιφάνειας είναι :

$$\zeta = \frac{H}{2} \cos(kx - wt) + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh kd}{\sinh kd} (\cos 2kd + 2) \cos 2(kx - wt) \quad (3.4.1.2)$$

Η εξίσωση διασποράς είναι ίδια με της πρώτης τάξης :

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (3.4.1.3)$$

Οι συνιστώσες της ταχύτητας u και w σε οποιαδήποτε θέση της μάζας του ρευστού είναι :

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \cos(kx - wt) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H^2}{TL} \frac{\cosh 2k(d+z)}{\sinh^4 kd} \cos 2(kx - wt) \quad (3.4.1.4)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - wt) + \frac{3}{4} \frac{\pi^2 H^2}{TL} \frac{\sinh 2k(d+z)}{\sinh^4 kd} \sin 2(kx - wt) \quad (3.4.1.5)$$

3.4.2 Θεωρία Stokes 3^{ης} τάξης

Αν θέσουμε: $\theta = kx - wt$, έχω την εξίσωση για τη συνάρτηση δυναμικού :

$$\Phi = \frac{ik}{2\pi} \left[F_1 \cdot \cosh 2k(d+z) \cdot \sin \theta + \frac{1}{2} F_2 \cdot \cosh 2k(d+z) \cdot \sin 2\theta + \frac{1}{2} F_3 \cdot \cosh 3k(d+z) \cdot \sin 3\theta \right] \quad (3.4.2.1)$$

Όπου :

$$F_1 = \frac{2\pi b}{L} \frac{1}{\sinh kd} - \left(\frac{2\pi b}{L} \right)^2 \frac{(1 + 5 \cosh^2 kd) \cosh^2 kd}{8 \sinh^2 kd} \quad (3.4.2.2)$$

$$F_2 = \frac{3}{4} \left(\frac{2\pi b}{L} \right)^2 \frac{1}{8 \sinh^2 kd} \quad (3.4.2.3)$$

$$F_3 = \frac{3}{64} \left(\frac{2\pi b}{L} \right)^3 \frac{11 - 2 \cosh 2kd}{\sinh^7 kd} \quad (3.4.2.4)$$

όπου b παράμετρος μήκους που συνδέεται με το H με τη σχέση :

$$H = 2b + 2 \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 b^3 f_3 \quad (3.4.2.5)$$

$$\text{Όπου : } f_3 = \frac{3}{16} \frac{1 + 8 \cosh^6 kd}{\sinh^4 kd} \quad (3.4.2.6)$$

η εξίσωση ελεύθερης επιφάνειας είναι :

$$\zeta = b \cos \theta + \frac{\pi b^2}{L} f_2 \cos 2\theta + \frac{\pi^2 b^3}{L^2} f_3 \cosh 3\theta \quad (3.4.2.7)$$

$$\text{όπου : } f_2 = \frac{2 + \cosh 2kd}{2 \sinh^3 kd} \cosh kd \quad (3.4.2.8)$$

Η σχέση διασποράς είναι διαφορετική από τη θεωρία Stokes 1^{ης} και 2^{ης} τάξης :

$$\omega^2 = \frac{g}{k} \tanh kd \left[1 + \left(\frac{2\pi b}{L} \right)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2 2kd}{16 \sinh^4 kd} \right] \quad (3.4.2.9)$$

Τέλος οι εξισώσεις για τις συνιστώσες της ταχύτητας είναι :

$$\frac{u}{c} = F_1 \cosh k(d+z) \cos \theta + F_2 \cosh 2k(d+z) \cos 2\theta + F_3 \cosh 3k(d+z) \cos 3\theta \quad (3.4.2.10)$$

$$\frac{w}{c} = F_1 \sinh k(d+z) \sin \theta + F_2 \sinh 2k(d+z) \sin 2\theta + F_3 \sinh 3k(d+z) \sin 3\theta \quad (3.4.2.11)$$

3.4.3 Θεωρία Stokes 5^{ης} τάξης

Για κυματισμούς σταθερής μορφής η πιο πρόσφατη θεωρία είναι αυτή του Fenton (1985). Η λύση αποτελείται από έναν αριθμό αναπτυγμάτων δυναμοσειρών που παραλείπονται μετά την 5^η τάξη και παρουσιάζεται σε αδιάστατους όρους ύψους κύματος και αδιάστατους όρους βάθους kd όπου $k=2\pi/L$ ο αριθμός κύματος.

Η συνάρτηση δυναμικού δίνεται από τη σχέση :

$$\Phi(x, z) = -ux + C_0 \left(\frac{g}{k^3}\right)^{1/2} \sum_{i=1}^3 \epsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh jkz \cdot \sin jkx + O(\epsilon^6) \quad (3.4.3.1)$$

όπου c : ταχύτητα προώθησης.

Η μέση οριζόντια ταχύτητα του ρευστού u δίνεται από τη σχέση :

$$u \left(\frac{k}{g}\right)^{1/2} = c_0 + E^2 C_2 + E^4 C_4 + O(E^6) \quad (3.4.3.2)$$

η ελεύθερη επιφάνεια έχει προφίλ :

$$k\zeta(x) = kd + \epsilon \cos kx + \epsilon^2 B_{22} \cos 2kx + \epsilon^3 B_{31} (\cos kx - \cos 3kx) + \epsilon^4 (B_{42} \cos 2kx + B_{44} \cos 4kx) + \epsilon^5 [-(B_{33} + B_{53}) \cos kx + B_{33} \cos 3kx + B_{53} \cos 5kx] + O(\epsilon^6) \quad (3.4.3.3)$$

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

$$q \left(\frac{k^3}{g}\right)^{1/2} = c_3 kd + \epsilon^2 (c_2 kd + D_2) + \epsilon^4 (c_4 kd + D_4) + O(\epsilon^6) = \bar{u} \left(\frac{k^3}{g}\right)^{1/2} + \epsilon^2 D_2 + \epsilon^4 D_4 + O(\epsilon^6) \quad (3.4.3.4)$$

Η ταχύτητα προώθησης C δίνεται από τη σχέση :

$$c = u + C_E = Q/d + C_S \quad (3.4.3.5)$$

όπου :

C_E είναι η μέση (ως προς το χρόνο) ταχύτητα ρευστού (Eulerian timemean fluid velocity).

C_S είναι η μέση (ως προς το βάθος) ταχύτητα μεταφοράς μάζας (depth averaged Stokes mass transport velocity).

Για τους γραμμικούς κυματισμούς είναι $u=Q/d$. Είναι φανερό ότι για να βρούμε την ταχύτητα προώθησης c πρέπει να ξέρουμε τις C_E και C_S , αυτές συνήθως είναι άγνωστες οπότε κάνουμε την παραδοχή $C_S=0$.

Η θεωρία αυτή, έχει επιβεβαιωθεί για την ακρίβεια 5^{ης} τάξης στην δυναμική οριακή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας (Fenton 1985), ενώ ταυτόχρονα προσεγγίζει ικανοποιητικά πειραματικά αποτελέσματα με την παραδοχή $C_S=0$ (Huang 1990 και Sobey 1990).

Το πεδίο ισχύος της θεωρίας αυτής είναι για $d/L > 0,1$.

Για μακρύτερους κυματισμούς θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η θεωρία Cnoidal ή η θεωρία ροϊκής συνάρτησης. Ακόμα και στο πεδίο εφαρμογής της η θεωρία για μεγάλους κυματισμούς στη λύση της παρουσιάζει στην κοιλιά του κύματος δευτερεύουσες ταλαντώσεις.

3.4.4 Θεωρία Cnoidal 1^{ης} τάξης

Οι Korteweg και De Vries (1895) έδειξαν ότι η πρώτη προσέγγιση στο προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας ενός μη γραμμικού σταθερά προωθούμενου κύματος στα ρηχά νερά δίνεται από το ελλειπτικό συνημίτονο της φάσης θ και μία παράμετρο m ($0 < m < 1$). Ο Laitone (1960) έδωσε μία προσέγγιση για τα κύματα Cnoidal 2^{ης} τάξης ενώ ο Fenton (1979) έθεσε τη βάση για τη θεωρία 5^{ης} τάξης. Οι Keulegan και Patterson (1940) όρισαν σαν περιοχή εφαρμογής της θεωρίας Cnoidal την $1/50 < d/L < 1/10$, ενώ οι Laitone et al (1963) όρισαν την $d/L < 1/8$ με παράμετρο Ursell $U_R > 26$.

Για σχετικά μικρές τιμές d/H έχω την θεωρία Cnoidal 1^{ης} τάξης. Η εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι :

$$\zeta = \zeta_{\min} + Hcn^2 \left[\frac{2k}{L}(x - ct), b \right] \quad (3.4.4.1)$$

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

Αν θέσουμε : $\frac{\theta}{2K} = \frac{t}{T} - \frac{X}{L}$ και με $m < 1$ έχω :

$$\frac{J}{H} = \frac{J_{\min}}{H} + cn^2(\theta, m) \quad (3.4.4.2)$$

όπου ζ_{\min} η απόσταση κοιλιάς από τη στάθμη ηρεμίας, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\zeta_{\min} = H \left[-1 + \frac{1}{m} \left(1 - \frac{E}{K} \right) \right], \text{ όπου } K, E \text{ τα πλήρη ελλειπτικά ολοκληρώματα πρώτου και}$$

δεύτερου τύπου :

$$E = \int_0^{\pi/2} \left(\sqrt{1 - m \cdot \sin^2 \varphi} \right) d\varphi = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{1}{2^2} m + \frac{1}{2^2} \frac{3^2}{4^2} m^2 - \frac{1}{2^2} \frac{3^2}{4^2} \frac{5^2}{6^2} m^3 + \dots \right) \quad (3.4.4.3)$$

$$K = \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - m \sin^2 \varphi}} = \frac{\pi}{2} \left(1 + \frac{1}{2^2} m + \frac{1 \cdot 3^2}{2^2 \cdot 4^2} m^2 + \frac{1 \cdot 3^2 \cdot 5^2}{2^2 \cdot 4^2 \cdot 6^2} m^3 + \dots \right) \quad (3.4.4.4)$$

Η τιμή της $cn^2(\theta, m)$ προσδιορίζεται με τη βοήθεια διαγράμματος συναρτήσεων της $\theta/2K$ με παράμετρο την U_R :

$$U_R = \frac{HL^2}{d^3} = \frac{16}{3} mK^2 \quad (3.4.4.5)$$

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

$$m = m(U_R) \quad (3.4.4.6)$$

$$K = K(U_R) \quad (3.4.4.7)$$

$$E = E(U_R) \quad (3.4.4.8)$$

$$\zeta_{\min}/H = f_1(U_R) \quad (3.4.4.9)$$

Η εξίσωση διάδοσης της ταχύτητας του κύματος βάσει των Keulegan και Patterson (1940) και Littman(1957) είναι :

$$C = \left[gd \left(1 + A \frac{H}{D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = (gd)^{\frac{1}{2}} \left(1 + A \frac{H}{d} \right) + O\left(\frac{H}{d} \right)^2 \quad (3.4.4.10)$$

$$\text{Η εξίσωση διασποράς είναι : } \omega^2 = gdK^2 \left(1 + A \frac{H}{2d}\right) \quad (3.4.4.11)$$

όπου η παράμετρος A είναι ίση με :

$$A = \frac{1}{m} \left(2 - 3 \frac{E}{K} - M\right) \quad (3.4.4.12)$$

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

$$\frac{u}{\sqrt{gd}} = -\frac{b}{4} + \frac{2d_t}{2d} - \frac{d_t^2}{4d^2} + \left(\frac{2H}{2h} - \frac{d_t H}{2h^2}\right) \cdot cn^2(\theta, m) - \frac{H^2}{4d^2} \cdot cn^4(\theta, m) - \frac{2Hd_t^2}{L^2} \cdot \left(\frac{d}{3} - \frac{z^2}{2d}\right) \cdot [-msn^2(\theta, m) \cdot cn^2(\theta, m) + cn^2(\theta, m) \cdot dn^2(\theta, m) - sn^2(\theta, m) \cdot dn^2(\theta, m)] \quad (3.4.4.13)$$

$$\frac{w}{\sqrt{gd}} = z_0 \cdot \frac{2HK}{Ld} \cdot \left\{1 + \frac{d_t}{d} + \frac{H}{d} \cdot cn^2(\theta, m) + \frac{2HK^2}{2L^2} \cdot (d^2 - \frac{z^2}{2}) \cdot [msn^2(\theta, m) - mcn^2(\theta, m) - dn^2(\theta, m)]\right\} \cdot sn(\theta, m) \cdot cn(\theta, m) \cdot dn(\theta, m) \quad (3.4.4.14)$$

όπου $d_t = d_{t \min}$ και με γνωστή τη cn προκύπτουν οι ελλειπτικές συναρτήσεις :

$$sn^2(\theta, m) = 1 - cn^2(\theta, m) \quad (3.4.4.15)$$

$$dn^2(\theta, m) = 1 - m[1 - cn^2(\theta, m)] \quad (3.4.4.16)$$

3.4.5 Θεωρία ροϊκής συνάρτησης (stream function theory)

Η θεωρία ροϊκής συνάρτησης βασίζεται στην ανάπτυξη σε πεπερασμένες σειρές Fourier της ροϊκής συνάρτησης Ψ που ορίζεται σε δυσδιάστατο πεδίο ροής ασυμπίεστου υγρού. Οι συνιστώσες της ταχύτητας u , w είναι : $u = d\Psi/dz$, $w = -d\Psi/dx$

Από τη συνθήκη δυσδιάστατης αστρόβιλης ροής : $du/dz = dw/dx$ (1) προκύπτουν :

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} + \frac{d^2\Psi}{dz^2} = 0 \quad (3.4.5.1)$$

$$\text{η οριακή συνθήκη στον πυθμένα : } d\Psi/dx = 0, z = -d \quad (3.4.5.2)$$

η δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια (εξίσωση Bernoulli) :

$$\frac{1}{2} \left(\left(\frac{d\Psi}{dx} \right)^2 + \left(\frac{d\Psi}{dz} \right)^2 \right) + g\zeta = R \quad (3.4.5.3)$$

όπου R μια θετική σταθερά.

Σε μόνιμη ροή δηλαδή σταθερό κυματισμό έχουμε :

$$\Psi(x, z) = -cz + \sum_{j=1}^N a_j \sin jkz \cdot \cos jkx \quad (3.4.5.4)$$

όπου N η τάξη της θεωρίας.

Η σχέση αυτή ικανοποιεί την εξίσωση 1 και την οριακή συνθήκη στον πυθμένα δεν ικανοποιεί την δυναμική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια.

Κινηματική συνθήκη στην ελεύθερη επιφάνεια :

$$\Psi(x, \zeta(x)) = -Q. \quad (3.4.5.5)$$

Όπου : $Z = \zeta$ η ελεύθερη επιφάνεια.

Η ελεύθερη επιφάνεια διακριτοποιείται σε $M+1$ ίσα μέρη από την κορυφή στην κοιλιά άρα :

$$\Psi(x_m, \zeta_m) = -Q \quad (3.4.5.6)$$

για $m=0, 1, 2, \dots, M$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{d\Psi}{dx}(x_m, \zeta_m) \right)^2 + \left(\frac{d\Psi}{dz}(x_m, \zeta_m) \right)^2 + g\zeta_m = R \quad (3.4.5.7)$$

$$H = \zeta_0 - \zeta_m \quad (3.4.5.8)$$

$$c = \bar{u} + c_E = \frac{Q}{\alpha} + c_r \quad (3.4.5.9)$$

$$d = \frac{1}{N} \left(\frac{1}{2} \zeta_0 + \sum_{m=1}^M \zeta_m + \frac{1}{2} \zeta_m \right) \quad (3.4.5.10)$$

$$X_m = (m-1) \frac{L}{2M} \text{ και } \zeta_m = \zeta(X_m) \quad (3.4.5.11)$$

προκύπτει έτσι ένα γραμμικό σύστημα από $M+N+6$ αγνώστους : k, u, c, Q και R

$M+1$ τιμές της στάθμης ελεύθερης επιφάνειας ζ και N συντελεστές $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$

Για $M=N$ έχουμε μια μοναδική καθορισμένη λύση, ενώ για $M>N$ το σύστημα είναι υπερκαθορισμένο. Η εκλογή της τάξης της θεωρίας εξαρτάται από την περιοχή εφαρμογής της.

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

Όσον αφορά την τάξη της θεωρίας που θα επιλέξουμε αυτή εξαρτάται από την περιοχή εφαρμογής της. Για μικρές τιμές του N π.χ ($N=5$), 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 $\zeta_0, \zeta_1, \dots, \zeta_m$ και των $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N$ και των k, u, c, Q , και R , από τις οποίες υπολογίζονται οι μεταβλητές $F(jk), j(x), u(x,z)$ και $w(x,z)$ (Καραμπάς 1991).

3.5 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΟΜΟΙΩΜΑΤΑ

Ένα πλήρες μαθηματικό μοντέλο κυματισμών με πεδίο εφαρμογής τα ρηχά νερά έχει σκοπό να περιγράψει τα φαινόμενα της διάθλασης, περίθλασης, ανάκλασης (μερικής ή ολικής), της επίδρασης της ρηχότητας αλλά και ταυτόχρονα τη δημιουργία μακρών κυματισμών και ρευμάτων στη ζώνη θραύσεως κυρίως. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες οδηγούν σε ένα μαθηματικό μοντέλο πρόγνωσης κυμάτων στα βαθιά νερά. Τα μοντέλα αυτά δίνουν ένα κατευθυντικό φάσμα που μπορεί να

αναλυθεί σε μια χρονοσειρά φασματικών κυματισμών, η οποία αποτελεί και την αρχική οριακή συνθήκη των ομοιωμάτων μετάδοσης.

Έχουμε δύο ομάδες ομοιωμάτων : τα μη ολοκληρωμένα ως προς την περίοδο (inter period) και τα ολοκληρωμένα ως προς την περίοδο (averaged over the period). Τα πρώτα προκύπτουν άμεσα από τις 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, v του κυματικού πεδίου. Στα δεύτερα γίνεται η παραδοχή της ολοκλήρωσης ως προς την περίοδο T του κύματος με άγνωστες μεταβλητές τις H ύψος κύματος και L μήκος κύματος .

Τα ομοιώματα διάθλασης-περίθλασης βασίζονται στην εξίσωση ήπιας κλίσης. Τα ομοιώματα αυτά χρησιμοποιούνται ευρύτατα τα τελευταία χρόνια σε ερευνητικό και επιχειρησιακό πλαίσιο για την περιγραφή της μετάδοσης των κυματισμών. Τα ομοιώματα διάθλασης-περίθλασης χρησιμοποιούνται για την επίλυση μονοχρωματικών κυματισμών που βασίζονται στη γραμμική θεωρία. Στη φύση όμως συναντώνται μονοχρωματικοί κυματισμοί. Η προσομοίωση τυχαίων φασματικών γίνεται με επαλληλία κυματισμών με διαφορετικές συχνότητες ή και κατευθύνσεις.

Αντίθετα τα μαθηματικά ομοιώματα τύπου Boussinesq καλύπτουν την επίδραση των μη γραμμικών όρων που είναι συνηθισμένη στα ρηχά νερά.

3.5.1 Ομοιώματα διάθλασης, περίθλασης και εξίσωση ήπιας κλίσης.

Η εξίσωση διατυπώθηκε αρχικά από τον Berkhoff (1972) η οποία χρησιμοποιείται για να περιγράψει συνδυασμό των φαινομένων διάθλασης-περίθλασης. Η εξίσωση είναι ελλειπτική :

$$\frac{d}{dx} \left(C C_g \frac{d\zeta}{dx} \right) + \frac{d}{dY} \left(C C_g \frac{d\zeta}{dY} \right) + \frac{C_g}{C} \omega^2 \zeta = 0 \quad (3.5.1.1)$$

Όπου :

C : η φασική ταχύτητα

C_g : η ταχύτητα ομάδας

ω : γωνιακή ταχύτητα

Η εξίσωση συνιστά πρόβλημα συνοριακών τιμών που για την επίλυση του απαιτείται η εφαρμογή περίπλοκων υπολογιστικών σχημάτων πεπερασμένων στοιχείων. Ο Radder (1979) διατύπωσε μια παραβολική προσέγγιση της εξίσωσης που είχε σαν σκοπό να περιορίσει τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο επίλυσης του μοντέλου. Επίσης θεωρείται αμελητέο το ανακλώμενο κυματικό πεδίο. Ο Copeland (1985) διατύπωσε την εξίσωση σαν ζεύγος υπερβολικών εξισώσεων πρώτης τάξης, έχοντας ως αφετηρία την υπερβολική εξίσωση ήπιας κλίσης Booij (1981) :

$$\nabla Q + \frac{C_g}{C} \frac{d\zeta}{d\tau} = 0 \quad (3.5.1.2)$$

$$\frac{dQ}{d\tau} + CC_g \nabla \zeta = 0 \quad (3.5.1.3)$$

όπου :

Q : γινόμενο ολοκληρωμένης στο βάθος οριζόντιας ταχύτητας με έναν συντελεστή n

Όπου :

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \quad (3.5.1.4)$$

στην περίπτωση δυνατής περιγραφής ανακλώμενων κυματισμών.

Η επίλυση εξισώσεων παραβολικής και υπερβολικής μορφής βασίζεται σε αριθμητικά σχήματα πεπερασμένων διαφορών. Η προσομοίωση τυχαίων κυματισμών βασίζεται στην ανάπτυξη μορφών εξίσωσης ήπιας κλίσης στις οποίες υπεισέρχεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή ο χρόνος (μη ολοκληρωμένες ως προς την περίοδο εξισώσεις).

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 μορφή βασισμένη στη Hamiltonian θεωρία επιφανειακών κυμάτων. Σε αυτή την υπερβολική εξίσωση ήπιας κλίσης είναι άγνωστοι η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και η συνάρτηση δυναμικού της ταχύτητας στην ελεύθερη επιφάνεια.

Όλα τα προηγούμενα μοντέλα βασίζονται στην υπόθεση ότι η μεταβολή του βάθους είναι μικρή : $|\nabla d| \frac{1}{kd} \ll 1$, παραλείπονται όροι ανώτερης τάξης ανάλογοι των $(|\nabla d|)^2$ και $|\nabla^2 d|$ (επίδραση πυθμένα).

Ο Massel (1993) βασίστηκε στις ιδιοσυναρτήσεις Galerkin και εισήγαγε μια ελλειπτική εξίσωση διάθλασης-περίθλασης που περιλαμβάνει τους παραπάνω όρους ανώτερης τάξης. Παρόμοιες είναι και οι εξισώσεις των Chamberlain και Porter (1995).

Οι Shuh et al. (1997) εμπνευσμένοι από Green και τη Hamiltonian θεωρία προχώρησαν στην διατύπωση δύο ισοδύναμων χρονικά εξαρτώμενων εξισώσεων για την προσομοίωση της διάδοσης των κυματισμών σε έντονα μεταβαλλόμενη βαθυμετρία. Χωρίς τους όρους ανώτερης τάξης του πυθμένα οι εξισώσεις που πρότειναν μετασχηματίζονται σε αυτές των Smith και Springs (1975) και Radder και Dingemans (1985) αντίστοιχα.

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 πυθμένα.

Όλες οι παραπάνω εξισώσεις για ένα μονοχρωματικό κύμα απλοποιούνται στην ίδια μορφή τροποποιημένης εξίσωσης ήπιας κλίσης βάσει βιβλιογραφίας (Shuh et al. 2001). Οι Lee et al (1998) την επανεδιέταξαν σε μορφή δύο εξισώσεων πρώτης τάξης που διαμορφώνουν ένα υπερβολικό σύστημα Hsu και When (2001) το οποίο αντιπροσωπεύει μια παραβολική εκδοχή της τροποποιημένης εξίσωσης.

3.6 ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΘΕΩΡΙΩΝ

Θα πρέπει να διευρενήσουμε το πεδίο εφαρμογής των θεωριών αυτών. Οι μη γραμμικές θεωρίες περιγράφουν μαζικές μεταφορές και φαινόμενα όπως η θραύση κυματισμών, η ρήγωση, η ανάκλαση και άλλα μη γραμμικά χαρακτηριστικά.

Οι γραμμικοί κυματισμοί περιγράφονται από δύο αδιάστατες παραμέτρους, το σχετικό βάθος νερού D/L και την κλίση του κύματος H/L . Το σχετικό βάθος νερού D/L προσδιορίζει εάν οι κυματισμοί είναι πλήρους ή μερικής διασποράς και πότε η ταχύτητα, το ύψος κύματος και το μήκος κύματος επηρεάζονται από το βάθος νερού.

Η κλίση κύματος H/L δείχνει την εξάρτηση του κυματισμού από το ύψος του και καθορίζει εάν οι παραδοχές της γραμμικής θεωρίας ισχύουν. Μια τρίτη αδιάστατη παράμετρος στη θέση των άλλων δύο είναι ο λόγος τους :

$$\frac{H}{L} = \frac{H}{D} \cdot \frac{D}{L}, \text{ σχετικό ύψος κύματος} \quad (3.6.1)$$

Μεγάλες τιμές H/L και H/D δηλώνουν ότι η παραδοχή μικρού εύρους κυματισμών δεν είναι κατάλληλη. Μια τέταρτη αδιάστατη παράμετρος που χρησιμοποιείται για την επιλογή θεωρίας διάδοσης κυματισμών είναι ο αριθμός Ursell ή U_R . Μεγάλες τιμές U_R αντιστοιχούν σε πεπερασμένου εύρους μακρούς κυματισμούς σε ρηγά νερά δηλώνοντας ότι η προσέγγισή τους μπορεί να γίνει με μη γραμμικά χαρακτηριστικά.

Επεκτάσεις της θεωρίας Stokes ισχύουν όταν : $H/D \ll (kd)^2$ για $kd < 1$ και $H/L \ll 1$ (Peregrine 1972) προκύπτει $U_R < 79$. Αυτή η συνθήκη περιορίζει τα ύψη κυματισμών στα ρηγά νερά, αλλά και την εφαρμογή των θεωριών Stokes (πρέπει $D/L > 1/8$ ή $kd > 0,78$). Συγκεκριμένο παράδειγμα είναι η μέγιστη τιμή ύψους κύματος. Αυτή στη θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης είναι ίση με το μισό του βάθους του νερού (Fenton 1985). Το πεδίο ισχύος της θεωρίας Cnoidal είναι : $D/L < 1/8$ και για το συντελεστή U_R να ισχύει $U_R > 20$.

Ο Dean (1968, 1974) παρουσίασε μια ανάλυση, στην οποία όριζε τις περιοχές εφαρμογής της κάθε θεωρίας με όρους H/T^2 και d/T^2 (το T^2 είναι ανάλογο του μήκους κύματος L). Ο Le Méhauté (1976) απέδειξε ότι η 4^{ης} τάξης θεωρία Stokes

αντιστοιχίζεται με αυτήν της 5^{ης} τάξης, αφού η τελευταία χρησιμοποιείται συχνότερα σε πολλές εφαρμογές. Και οι δύο προτείνουν την Cnoidal για κυματισμούς σε ρηγά νερά μικρής κλίσης και τη θεωρία Stokes υψηλότερης τάξης για μεγάλης κλίσης κυματισμούς διαδιδόμενους σε ρηγά νερά. Η γραμμική θεωρία προτείνεται για μικρής κλίσης κύματα και χαμηλές τιμές του δείκτη Ursell. Στα «ενδιάμεσα» και «βαθιά» νερά η γραμμική θεωρία είναι επαρκής ενώ κάποιες άλλες είναι ικανοποιητικές. Η θεωρία ροικής συνάρτησης ή η παρόμοια θεωρία Fenton (1988) είναι κατάλληλες για μεγάλη περιοχή κυματικών παραμέτρων. Εάν γνωρίζουμε τις τιμές των H , D , T το σχήμα 3.6.1 χρησιμοποιείται για την επιλογή της κατάλληλης θεωρίας.

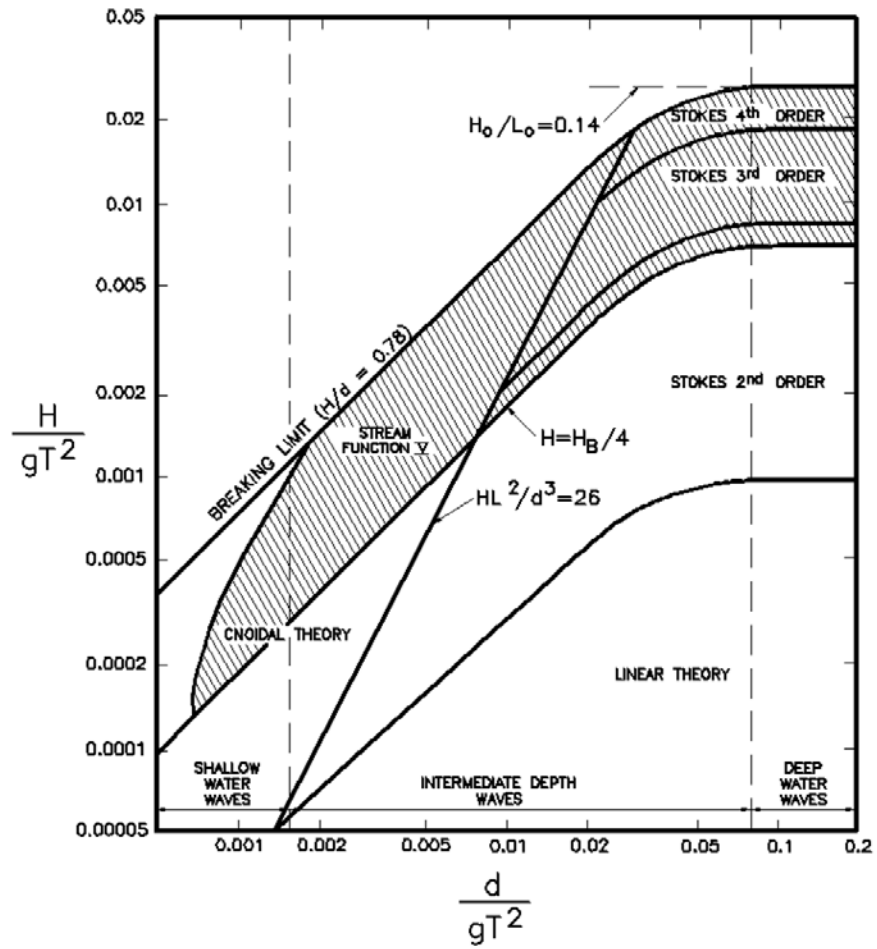
Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις οριακές τιμές του ύψους και της κλίσης κυματισμών σε διάφορα βάθη νερού, για να καθοριστεί η καταλληλότητα κάθε θεωρίας που χρησιμοποιεί Stokes, όπου κάθε όρος πρέπει να είναι μικρότερος από τον προηγούμενο του. Π.χ εάν ο δεύτερος όρος <1% του πρώτου όρου θεωρίας δεύτερης τάξης, η οριακή κλίση δίνεται :

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

Εάν ο όρος 3^{ης} τάξης <1% του αντίστοιχου 2^{ης} τάξης τότε :

$$H/L \leq \frac{1}{7} \frac{\sinh^3 kd}{\sqrt{1 + 8 \cosh^3 kd}}$$

Χρησιμοποιώντας 5^{ης} τάξης ανάλυση οι ασύμπτωτες στην 3^η τάξη θεωρία είναι $H/L_0 < 0.1$ και $H/D < 3/4(KD)^2$ για βαθιά και ρηγά νερά αντιστοίχως. Αυτό επιτρέπει την επέκταση της θεωρίας Stokes προσθέτοντας μικρές διαδοχικές περιοχές στο πεδίο γραμμικής θεωρίας μέχρι να προσεγγιστεί το όριο θραύσης. Στο σχήμα 3.6.1 φαίνεται ένα γράφημα με τις περιοχές εφαρμογής των θεωριών διάδοσης κυματισμών.



Σχήμα 3.6.1-Περιοχές εφαρμογής διαφόρων θεωριών διάδοσης κυματισμών (Le Méhauté 1976).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ

4.1.1 Διαστάσεις-περιγραφή

Για την εκτέλεση των πειραματικών μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε διώρυγα κυματισμών βαρύτητας, η οποία βρίσκεται στο Ε.Λ.Ε. του Ε.Μ.Π στη πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου με διαστάσεις :

Μήκος : 27m

Πλάτος : 1m

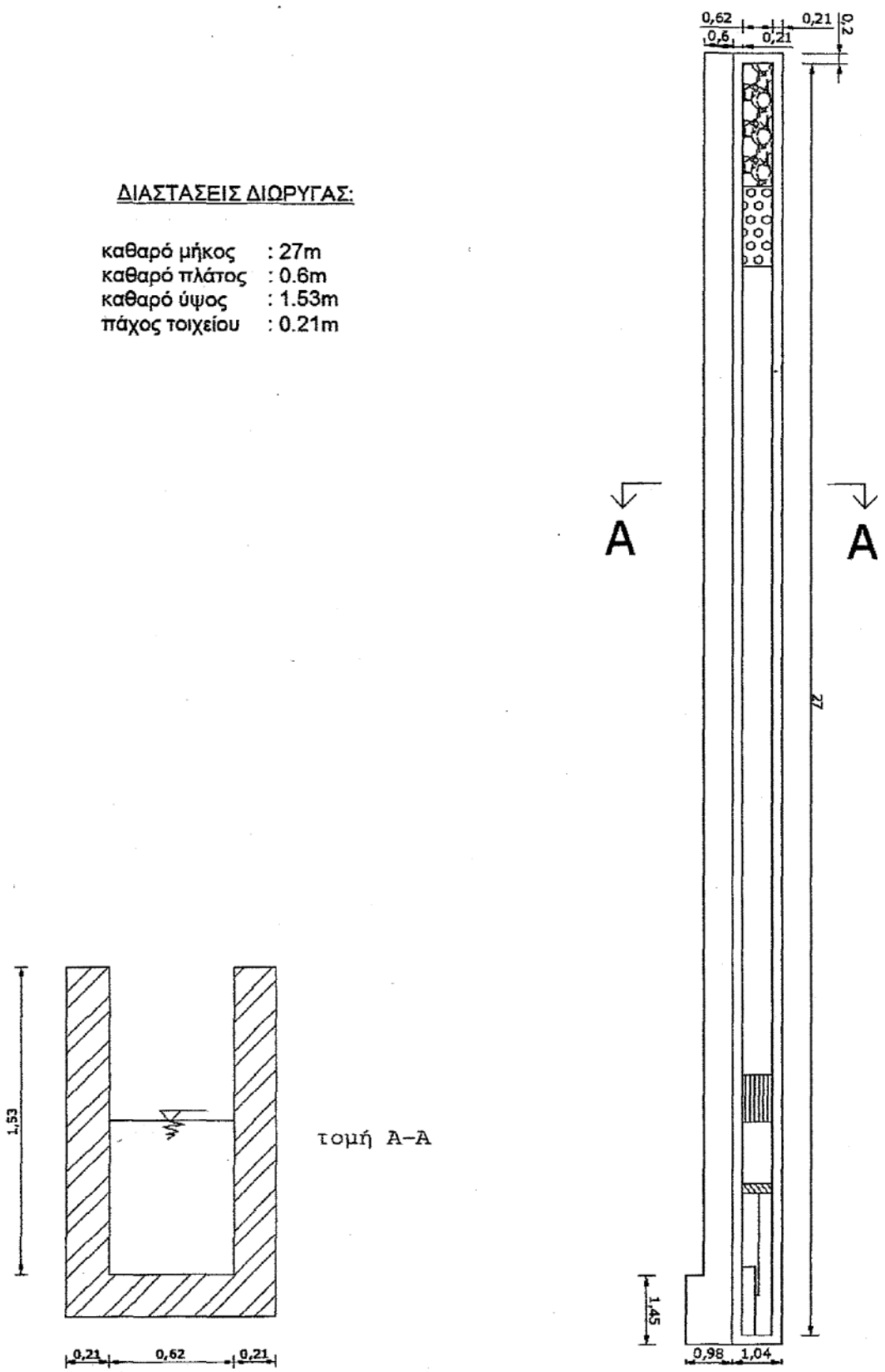
Ύψος : 1,53m

Πάχος τοιχείου : 0,21m

Στο σχήμα 4.1.1 φαίνεται η κάτοψη και η τομή της πειραματικής διώρυγας του Ε.Λ.Ε όπου έγιναν οι μετρήσεις.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΔΙΩΡΥΓΑΣ:

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



Σχήμα 4.1.1-Κάτοψη και τομή της πειραματικής διώρυγας.

Η διώρυγα είναι κατασκευασμένη από οπλισμένο σκυρόδεμα με διατομή ανεστραμμένου Π. Στηρίζεται σαν συνεχής δοκός σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα ύψους 0,80m. Στα δύο άκρα της διώρυγας υπάρχει αποσβεστήρας κυμάτων (sponge), ο οποίος αποτελείται από πρανές με κροκάλες μέσης διαμέτρου 5 cm το οποίο καλύπτεται από ψιλό συρματόπλεγμα για να εμποδίζεται η μετακίνηση των κροκάλων.

Σε απόσταση 5,75 m από το αριστερό άκρο της διώρυγας βρίσκονται δύο διαφανή παράθυρα fiber glass, τα οποία χρησιμεύουν για την παρατήρηση και την φωτογράφιση κυμάτων.

Στο δεξί άκρο της διώρυγας υπάρχει κυματογεννήτρια η οποία έχει σαν σκοπό την παραγωγή κυματισμών.

Κατά μήκος της διώρυγας και σε απόσταση 1m από το πτερύγιο της κυματογεννήτριας υπάρχει κατασκευή από παράλληλες διάτρητες μεταλλικές πλάκες διαστάσεων 1,0x1,0m η οποία αποσβένει τις πλευρικές διαταραχές, περιορίζει το φαινόμενο περίθλασης και αποκαθιστά τη δυσδιάστατη ροή.

Η τροφοδοσία με νερό της διώρυγας γίνεται από ένα σωλήνα που καταλήγει στο αριστερό άκρο της. Με δύο φρεάτια στα άκρα της διώρυγας πραγματοποιείται η εκκένωση της. Στην εικόνα 4.1.2 φαίνεται η άποψη της πειραματικής διώρυγας από την πλευρά της κυματογεννήτριας σε φωτογραφία.



Εικόνα 4.1.2-Άποψη της πειραματικής διώρυγας από την πλευρά της κυματογεννήτριας.

4.2 ΚΥΜΑΤΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ

Η κυματογεννήτρια βρίσκεται στο ένα άκρο της πειραματικής διώρυγας. Είναι τοποθετημένη σε βάθρο από οπλισμένο σκυρόδεμα διαστάσεων $1,45\text{m} \times 0,56\text{m}$ και $0,18\text{m}$. Αποτελείται από ηλεκτρικό κινητήρα, κιβώτιο ταχυτήτων, μετατροπέα κίνησης και ένα πτερύγιο.

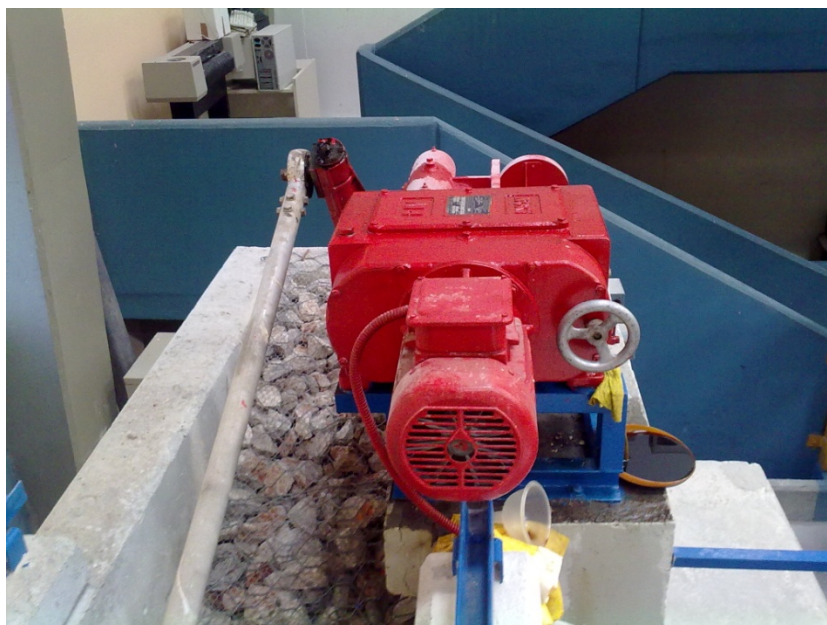
Ο ηλεκτρικός κινητήρας ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην κυματογεννήτρια έχει ισχύ $P=2,2\text{KW}$ και πραγματοποιεί 1420 στροφές/λεπτό. Η τάση και η ένταση είναι $V=220\text{V}$, $I=8,7\text{A}$ ή $V=380\text{V}$, $I=5\text{A}$.

Ο μετατροπέας κίνησης έχει κύριο έργο να μεταβάλλει την εκκεντρότητα της ράβδου που μεταφέρει την κίνηση στο πτερύγιο. Ο λόγος μείωσης της κίνησης είναι $1/10$. Επίσης υπάρχει μια κυκλική ανοξείδωτη μεταλλική ράβδος για την τελική μετάδοση κίνησης του πτερυγίου που έχει διάμετρο $D=5\text{cm}$ και μήκος $L=2,70\text{ m}$.

Το πτερύγιο του κυματιστήρα με διαστάσεις $1,35\text{m} \times 0,59\text{m}$ είναι κατασκευασμένο από ελαφρύ ξύλο πάχους 6 cm . Το πτερύγιο αυτό εκτελεί ταλάντωση και παράγει τους κυματισμούς.

Στο κιβώτιο ταχυτήτων οι ταχύτητες καθορίζουν τη συχνότητα κίνησης του πτερυγίου της κυματογεννήτριας η οποία ταυτίζεται με τη συχνότητα κίνησης των παραγόμενων κυματισμών.

Η εκκεντρότητα της ράβδου που μεταφέρει την κίνηση στο περύγιο καθορίζει το εύρος ταλάντωσης του περυγίου της κυματογεννήτριας και επηρεάζει το ύψος των παραγόμενων κυματισμών. Δεν επηρεάζει τη συχνότητα των παραγόμενων κυματισμών. Στην εικόνα 4.2.1 φαίνεται φωτογραφημένη η κυματογεννήτρια.



Εικόνα 4.2.1-Κυματογεννήτρια στο άκρο της διάρυγας τοποθετημένη στο βάθρο.

4.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΟΗΣ

Η Μέτρηση ροής είναι απαραίτητη σε πολλές βιομηχανίες. Η ροή διακρίνεται σε ροή ανοιχτού καναλιού και ροή κλειστού αγωγού. Τα περισσότερα όργανα μετράνε τη ροή έμμεσα και διαχωρίζονται σε αυτά που μετράνε ταχύτητα και σε αυτά που μετράνε πίεση ή στάθμη.

Οι αισθητήρες που παρέχει η Σίγμα Ελλάς είναι της πρώτης κατηγορίας και διακρίνονται περαιτέρω σε αισθητήρες με φτερωτή, υπερήχων και θερμοδομετρικούς.

4.4 ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ ΡΟΗΣ ΜΕ ΜΥΛΙΣΚΟ

Αισθητήρες ροής με "T" εγκατάστασης PVC.

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των αισθητήρων ροής είναι ένας μυλίσκος έξι πτερυγίων, που έχει δικό του μη μαγνητικό μηχανισμό αίσθησης. Αυτή η μορφή μυλίσκου παρέχει υψηλότερη και περισσότερο σταθερή ροπή από τον αντίστοιχο τεσσάρων πτερυγίων και είναι λιγότερο επιρρεπής στο να λερώνεται από τα σκουπίδια που δημιουργεί το νερό.

4.5 ΤΟ ΟΡΓΑΝΟ FLOWMETER MFP51

Το όργανο Flowmeter MFP51 είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που μετρά σήματα από μια προπέλα καρφωμένη σε ακόντιο ή από το ανεμόμετρο ανάλογα με την ταχύτητα που μετράμε. Ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων ανά μονάδα χρόνου (κανονικά 1 λεπτό) μπορεί να μετατραπεί σε τιμές ταχύτητας με τη βοήθεια μιας μαθηματικής σχέσης.

Η μονάδα έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

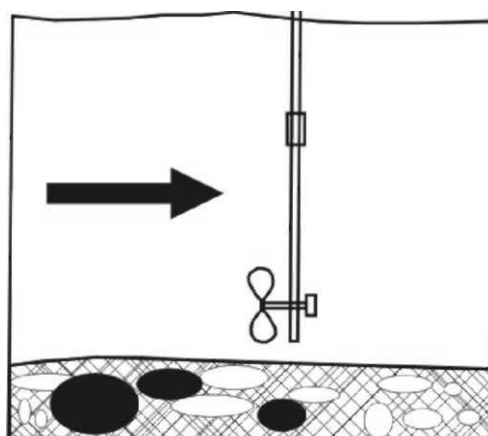
- Ένα LCD (liquid crystal display) μετρητή.
- Μια πρίζα για την ηλεκτρική σύνδεση.
- Ένα τριπλό ηλεκτρικό διακόπτη ρεύματος στον οποίο οι θέσεις είναι :
 - NEUTRAL** κεντρική θέση διακόπτη.
 - START** κατέβασμα διακόπτη.
 - STOP** επιστρέφω στην κεντρική.
 - RESET** (to zero) Ξανατοποθετώ στην κορυφαία θέση.
 - NEUTRAL** Κεντρική θέση πάλι.

Η κίνηση της εισαγωγής της πρίζας από το προπελάκι πάνω στο ραβδί ανάβει το μετρητή. Έχοντας εισάγει την πρίζα η τιμή στο LCD θα πρέπει να δείχνει μηδέν εκείνη τη στιγμή. Αν δεν συμβαίνει αυτό με τον πάνω διακόπτη περιστρέψτε την προπέλα να κλείσει εν μέρει την αναμετάδοση. Ύστερα μετακινήστε το διακόπτη στην NEUTRAL θέση.

4.5.1 ΟΔΗΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ

4.5.1.1 Προπελάκι καρφωμένο σε ραβδί με το flowmeter MFP51

Τοποθετήστε τους μοχλούς της προπέλας μαζί και ανασηκώστε την προπέλα στην στάθμη ροής του κινούμενου νερού στο απαιτούμενο βάθος (σχήμα 4.5.1.1). Χρησιμοποιήστε ένα ή περισσότερους από τους τρεις ανυψωτικούς μοχλούς για να ανυψώσετε την προπέλα από τον πυθμένα αν είναι απαραίτητο (σχήμα 4.5.1.1).



Σχήμα 4.5.1.1 Η προπέλα καρφωμένη σε ακόντιο σε ροή.

Όταν το προπελάκι γυρίζει στο σωστό βάθος, (το οποίο εξαρτάται από το σκοπό των μετρήσεων σας) χτυπήστε ελαφρά τον διακόπτη κάτω στη θέση εκκίνησης και κρατήστε για 60 sec (συνιστάται να κρατάτε χρονόμετρο). Σταματήστε τις μετρήσεις (CENTRE θέση) στο σωστό χρόνο και σημειώστε την τιμή μέτρησης. Προσδιορίστε την ταχύτητα ροής από το διάγραμμα που προκύπτει.

Εναλλακτικά, η ταχύτητα ροής (V), σε m/s δίνεται από τον ακόλουθο τύπο στον οποίο C είναι ο αριθμός στροφών ανά λεπτό :

Water velocity (V) m/s = (0,000854 C) + 0,05

Μηδενίστε το μετρητή-ανυψώστε τη θέση του διακόπτη (γυρίστε την προπέλα ελαφρά, εάν είναι απαραίτητο, για να κλείσετε την αναμετάδοση) και επιστρέψτε στη θέση CENTRE έτοιμοι για περαιτέρω μετρήσεις.

4.6 ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΙ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ

Από τη βαθμονόμηση διώρυγας κυματισμών βαρύτητας του Ε.Λ.Ε προκύπτουν κάποια συμπεράσματα για τα όρια παραγόμενων κυματισμών (Βερναδάκης, 1990) :

Πιν. 4.6.1-Όρια παραγόμενων κυματισμών :

D (βάθος) (m)	H_{\min} (cm)	H_{\max} (cm)
0,50	1,38	16,20

Η περίοδος των κυματισμών εξαρτάται από την ταχύτητα αλλά δεν εξαρτάται από την εκκεντρότητα του κυματιστήρα. Συμπίπτει με μεγάλη ακρίβεια με την περίοδο ταλάντωσης του πτερυγίου του κυματιστήρα. Το εύρος των παραγόμενων κυματισμών για βάθος νερού $d=50$ cm και για περιόδους ταλάντωσης του πτερυγίου του κυματιστήρα από 0,53 έως 2,12 sec. Σε εύρος περιόδων T_a από 2,12 (αντιστοιχεί σε ταχύτητα κυματιστήρα $V=0$) έως 1,04 sec (αντιστοιχεί σε ταχύτητα κυματιστήρα $V=4$), παρατηρούνται σχεδόν πάντα αρμονικοί κυματισμοί.

Για την $V=4$ ($T=1,04$) το ύψος κύματος αυξάνει όσο αυξάνει η εκκεντρότητα E του κυματιστήρα. Για $V>4$ παρατηρείται πτώση 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 (Βερναδάκης 1990).

Με την χρησιμοποίηση της μεθόδου της γραμμικής παρεμβολής και γνωρίζοντας ότι για $V=0$ είναι $T_a = 2,12$ sec και για $V=4$ είναι $T=1,04$ sec έχουμε τον παρακάτω πίνακα αντιστοιχίας ταχυτήτων κυματιστήρα και περιόδων παραγόμενων κυματισμών:

Πιν 4.6.2- 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 $V=1$ και $V=2$ και για περιόδους κυματισμών $T_a=1,85$ sec, $T_a=1,58$ sec αντίστοιχα.

4.7 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

4.7.1 Όργανα των μετρήσεων

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το όργανο Flowmeter MFP51 της εταιρείας Georacks. Πρόκειται για έναν απλό ψηφιακό μιλίσκο με ακόντιο ύψους 1.5m, ενσύρματη καταγραφική μονάδα και προπέλα διαμέτρου 6cm. Για την καταγραφή του πειράματος χρησιμοποιείται η ψηφιακή κάμερα D520 της εταιρείας Canon.

4.7.2 Διαδικασία των μετρήσεων

Το Flowmeter καταγράφει σε πραγματικό χρόνο τον συνολικό αριθμό των στροφών (counts) της φτερωτής από την εκκίνηση του πειράματος. Παράλληλα η ψηφιακή κάμερα καταγράφει σε συνεχές video την εξέλιξη του ανωτέρω αριθμού. Η κάμερα καταγράφει με ρυθμό 15 fps δηλαδή 1 καρέ κάθε 0,067 sec.

Αρχικά, με ανάλυση του λογιστικού φύλλου Ms excel παράγεται ο ρυθμός μεταβολής των στροφών στη μονάδα του χρόνου. Για ενδιάμεσες τιμές μεταξύ δύο συνεχόμενων κύκλων της φτερωτής γίνεται παραδοχή γραμμικής παρεμβολής.

Για την μετατροπή του ρυθμού C (counts/min) σε ταχύτητα ροής του νερού V (water velocity m/s) χρησιμοποιείται έτοιμο διάγραμμα το οποίο παράχθηκε κατά την εργαστηριακή βαθμονόμηση του οργάνου από τον κατασκευαστή. Επισημαίνεται ότι η ελάχιστη ταχύτητα που καταγράφεται από το όργανο είναι $0,05 m/sec$. Η μαθηματική σχέση έχει ως εξής :

$$V(m/s) = 0,000854 \cdot C(counts / min) + 0,05m/sec \quad (4.7.2.1)$$

Έτσι τελικά παράγεται το διάγραμμα μεταβολής της ταχύτητας ροής στο χρόνο στο εκάστοτε σημείο μέτρησης. Τα σημεία ήταν τα 1,2,3 της προσήνεμης πλευράς, το σημείο 4 της στέψης, και τα σημεία 5,6,7 της υπήνεμης πλευράς. Τα σημεία διατάσσονται καθ' ύψος σε μια διατομή και με αποστάσεις μεταξύ τους $10 cm$. Τα σημεία 1,5 βρίσκονται ακριβώς $3 cm$ πάνω από την διεπιφάνεια κυματοθραύστη και νερού. Τα παραπάνω φαίνονται αναλυτικά στο σχήμα 5.1.1 όπου φαίνεται η τυπική διατομή του ύφαλου κυματοθραύστη. Έτσι είναι δυνατόν να παραχθεί το διάγραμμα μεταβολής των ταχυτήτων σε μια διατομή με το ύψος και το χρόνο.

4.8 ΠΟΡΩΔΕΣ

Για τον υπολογισμό του πορώδους και των πυκνοτήτων του υλικού του μοντέλου, δοχείο αμελητέου βάρους με νερό ζυγίζεται :

Υπολογισμός όγκου νερού (από τη μάζα του νερού).

$$V_{\delta\sigma\chi} = V_w = M_w \rho_w \quad (4.8.1)$$

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 :

$$V_{ολ} = V_{κεν} + V_S \quad (4.8.2)$$

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

$$M_{ολ} = M_S + M_a = M_S \quad (4.8.3)$$

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 των κενών :

$$V_{κεν} = V_w = M_w P_w \quad (4.8.4)$$

Το πορώδες υπολογίζεται :

$$n = V_{κεν} / V_{ολ} \quad (4.8.5)$$

η πυκνότητα του συμπαγούς πετρώματος :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (4.8.6)$$

η πυκνότητα του υλικού υπολογίζεται από :

$$\rho_s = \frac{M_{ολ}}{V_{ολ}} \quad (4.8.7)$$

Για το υλικό του κυματοθραύστη : $M_w=11,95 \text{ kg}$, $M_{ολ}=16 \text{ kg}$, $M_{ολw}=22 \text{ kg}$ και $M'=6 \text{ kg}$.

Με βάση τα παραπάνω η τιμή του πορώδους υπολογίστηκε $n=0,52$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί παραθέτουμε τα στοιχεία των σειρών μετρήσεων με το d να είναι το βάθος νερού στο οποίο έγιναν οι μετρήσεις, T η περίοδος του παραγόμενου κυματισμού και H το ύψος κύματος.

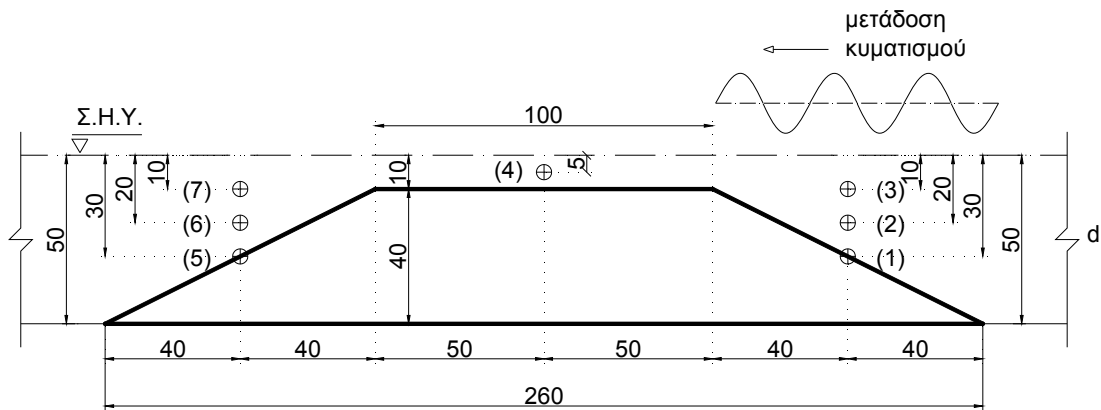
Πιν. 5.1 Στοιχεία των σειρών μετρήσεων.

Στοιχεία των σειρών μετρήσεων	d (cm)	T (sec)	H (m)
Πρώτη σειρά μετρήσεων	50	1,85	0,08
Δεύτερη σειρά μετρήσεων	50	1,58	0,095

5.1 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΥΦΑΛΟΥ

ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ ΓΙΑ ΒΑΘΟΣ ΝΕΡΟΥ $d=50$ cm.

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο λιμενικών έργων δύο σειρές πειραμάτων για παραγόμενους κυματισμούς από την κυματογεννήτρια διαφορετικών περιόδων και διαφορετικών ύψων κύματος σε σταθερό βάθος κυματισμών $d=50$ cm. Για κάθε σειρά πειραμάτων οι μετρήσεις έγιναν σε τρεις διατομές στο εξωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη. Στην προσήνεμη πλευρά, στην υπήνεμη πλευρά και στην στέψη. Στις διατομές στην προσήνεμη πλευρά και στην υπήνεμη πλευρά τα σημεία όπου έγιναν οι μετρήσεις των ταχυτήτων απείχαν μεταξύ τους κατά 10 cm καθ' ύψος. Στη διατομή στο μέσον της στέψης λήφθηκε ένα σημείο το οποίο απείχε 5 cm από το μέσον της στέψης του κυματοθραύστη. Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη είναι $b=100$ cm. Μετρήσαμε τις μέγιστες οριζόντιες τροχιακές ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων στα παραπάνω σημεία, οι οποίες λαμβάνουν θετικές και αρνητικές τιμές. Στο σχήμα 5.1.1 φαίνεται μια τυπική διατομή του ύφαλου κυματοθραύστη.

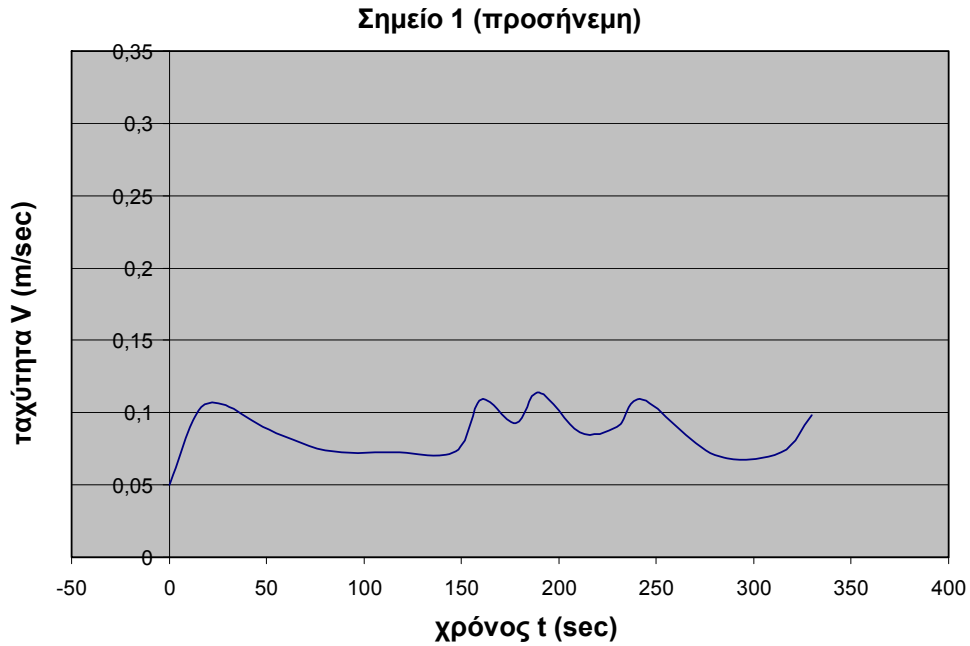


Σχήμα 5.1.1-Τυπική διατομή ύφαλου κυματοθραύστη (μονάδες σε cm).

5.1.1 ΠΡΩΤΗ ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΥΦΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ.

Σημείο 1 :

Το σημείο 1 βρίσκεται στο πρηνές της προσήνεμης πλευρά του κυματοθραύστη και απέχει 20 cm από τον πυθμένα του κυματοθραύστη. Οι μετρήσεις έγιναν για βάθος νερού $d=50$ cm και περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,85$ sec. Το ύψος κύματος ήταν 8 cm. Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ήταν $b=100$ cm. Σημειώνεται ότι η ταχύτητα V στον κατακόρυφο άξονα, αναφέρεται στις μέγιστες, οριζόντιες, τροχιακές ταχύτητες των ρευστών σωματιδίων των κυματισμών.

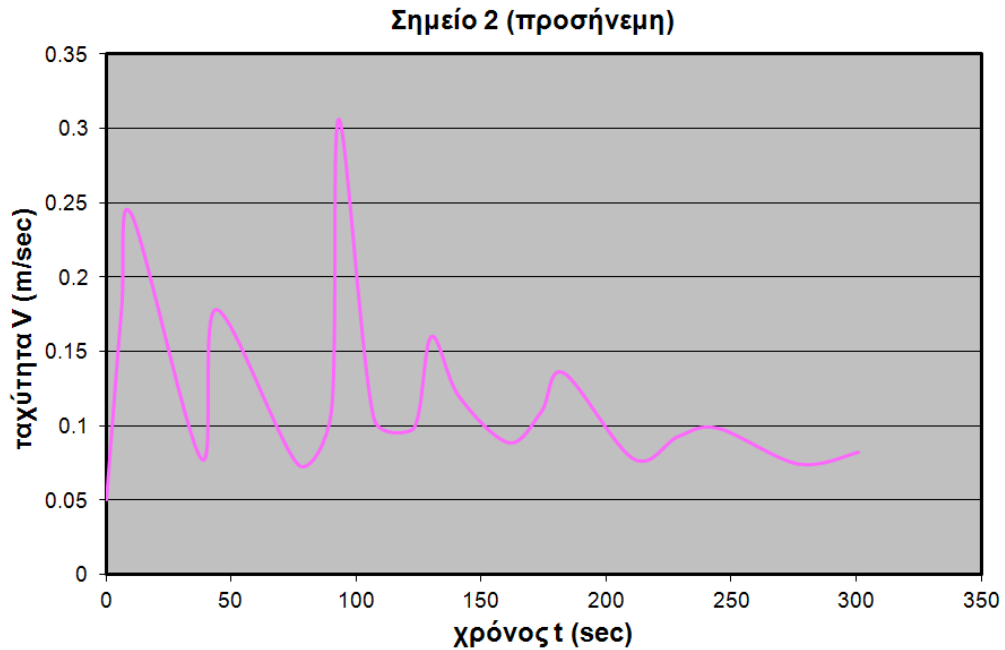


Διάγραμμα 5.1.1.1: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 1 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 1 έχει αυτή την μορφή διότι η ταχύτητα στο σημείο 1 ήταν τόσο μικρή που το όργανο των μετρήσεων δεν μπορούσε να την αντιληφθεί. Από $t=75 \text{ sec}$ έως $t=150 \text{ sec}$ η ταχύτητα είναι σταθερή. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=190 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,12 \text{ m/sec}$. Όπως και στην περιοχή από $t=85 \text{ sec}$ έως και $t=150 \text{ sec}$ έτσι και στην περιοχή των $t=300 \text{ sec}$ το διάγραμμα παρουσιάζει μια πλατιά κοιλιά.

Σημείο 2 :

Το σημείο 2 βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και απέχει 30 cm από τον πυθμένα του κυματοθραύστη. Στο σημείο 2 έγιναν μετρήσεις για βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$ και για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,85 \text{ sec}$. Το ύψος κύματος ήταν $H=8 \text{ cm}$. Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ήταν $b=100 \text{ cm}$.



Διάγραμμα 5.1.1.2: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 2 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα των ταχυτήτων με το χρόνο στο σημείο 2 έχει περίπου ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=100 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,3 \text{ m/sec}$. Με την πάροδο του χρόνου οι μέγιστες ταχύτητες φθίνουν. Όντως $V_2 > V_1$ μιας και το σημείο 1 είναι σε μεγαλύτερο βάθος από το σημείο 2.

Σημείο 3 :

Το σημείο 3 βρίσκεται στην προσήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και απέχει 40 cm από τον πυθμένα. Στο σημείο 3 έγιναν μετρήσεις για βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$ και για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,85 \text{ sec}$. Το ύψος κύματος ήταν $H=8 \text{ cm}$. Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ήταν $b=100 \text{ cm}$.

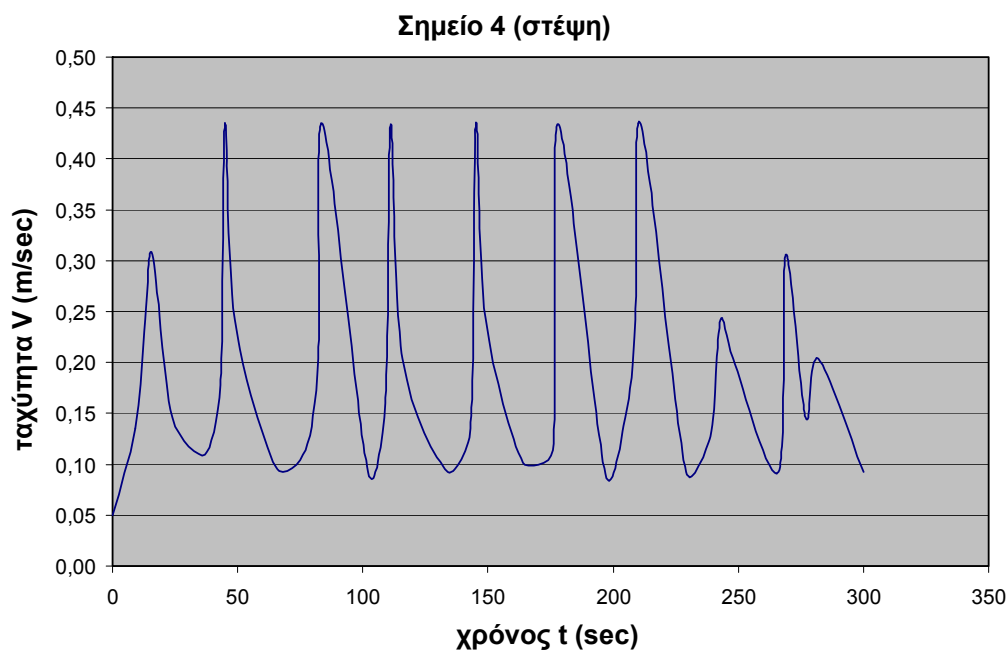


Διάγραμμα 5.1.1.3: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 3 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 3 έχει ημι-περιοδική μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=205 \text{ sec}$ και $t=300 \text{ sec}$ και $t=310 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,31 \text{ m/sec}$. Για $t=280 \text{ sec}$ παρουσιάζεται η ελάχιστη ταχύτητα και είναι ίση με $V=0,06 \text{ m/sec}$. Όντως $V_3 > V_2$ μιας και το σημείο 2 είναι σε μεγαλύτερο βάθος από το σημείο 3.

Σημείο 4 :

Το σημείο 4 βρίσκεται στο μέσον της στέψης του κυματοθραύστη και απέχει 5 cm από αυτή, και 5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια του κυματισμού. Στο σημείο 4 έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,85 \text{ sec}$ και βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$. Το ύψος κύματος ήταν 8 cm . Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ήταν $b=100 \text{ cm}$.

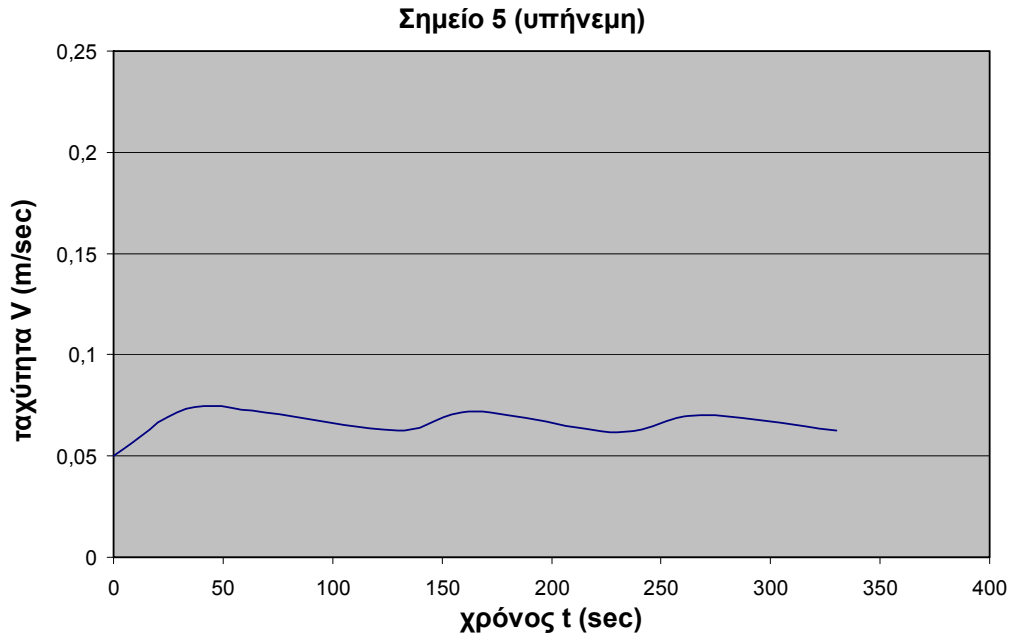


Διάγραμμα 5.1.1.4: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 4 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα των ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 4 έχει περίπου ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται για $t=49 \text{ sec}$, $t=90 \text{ sec}$, $t=110 \text{ sec}$, $t=149 \text{ sec}$, $t=180 \text{ sec}$, $t=220 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,44 \text{ m/sec}$. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη ταχύτητα στο σημείο 4 είναι αρκετά μεγαλύτερη από ότι στα σημεία 1,2,3 και αυτό διότι στο σημείο 4 μικραίνει η διατομή από την οποία διέρχεται ο κυματισμός με την ίδια "παροχή" και άρα μεγαλώνει η μέγιστη ταχύτητα των κυματισμών.

Σημείο 5 :

Το σημείο 5 βρίσκεται στην επιφάνεια του υπήνεμου πρανούς του κυματοθραύστη και απέχει από τον πυθμένα του 20 cm . Στο σημείο 5 έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,85 \text{ sec}$ και βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$. Το ύψος κύματος ήταν 8 cm . Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ήταν $b=100 \text{ cm}$.

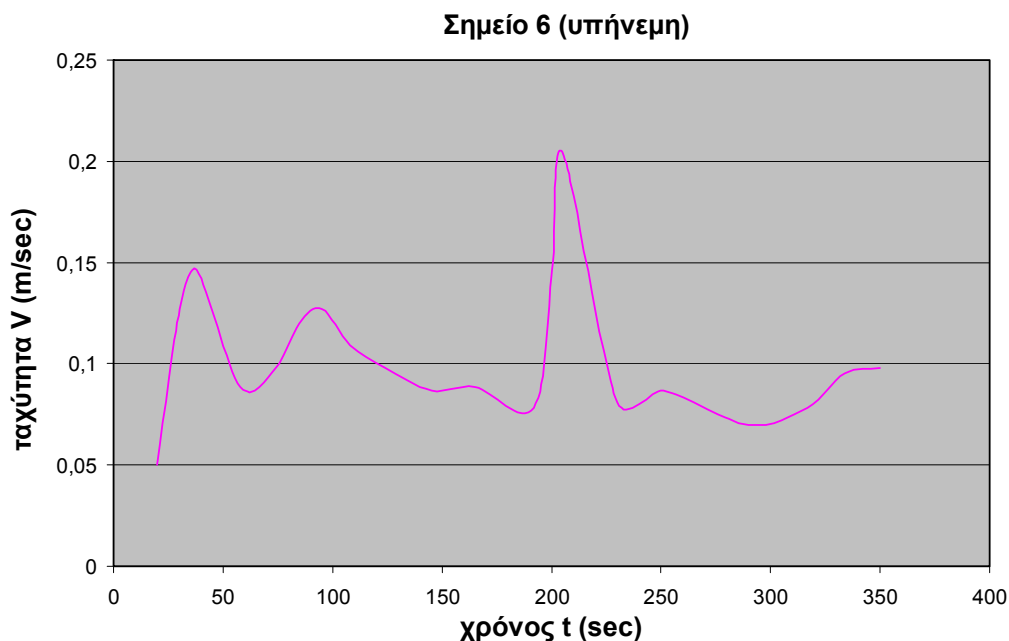


Διάγραμμα 5.1.1.5: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 5 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 5 έχει αυτή την μορφή γιατί η ταχύτητα στο σημείο 5 ήταν τόσο μικρή που το όργανο μετρήσεων δεν μπορούσε να την αντιληφθεί. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=40$ sec και είναι ίση με $V=0,075$ m/sec. Σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο της προσήνεμης πλευράς, το σημείο 1, παρατηρούμε ότι η μέγιστη ταχύτητα δεν είναι τόσο μικρή όση περιμέναμε να είναι για την υπήνεμη πλευρά. Στο σημείο 1 έχουμε $V=0,12$ m/sec ενώ στο σημείο 5 έχουμε $V=0,075$ m/sec. Αυτό οφείλεται στο φαινόμενο της περιδίνησης της ροής που λαμβάνει χώρα στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη. Με το στροβιλισμό που συμβαίνει κατά το φαινόμενο αυτό, οι ταχύτητες παρουσιάζονται αυξημένες σε σχέση με αυτές που θα ήταν, εάν δεν συνέβαινε η περιδίνηση της ροής στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Σημείο 6 :

Το σημείο 6 βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και απέχει 30 cm από τον πυθμένα του. Οι μετρήσεις των παραγόμενων κυματισμών έγιναν για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,85$ sec και βάθος νερού $d=50$ cm. Το ύψος κύματος ήταν $H=8$ cm. Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ήταν $b=100$ cm.

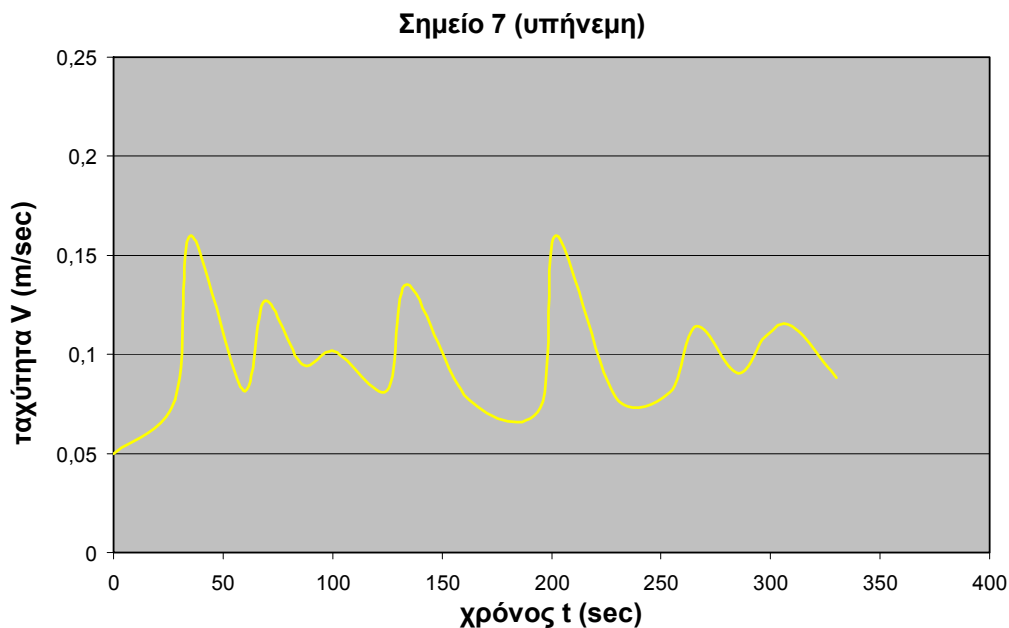


Διάγραμμα 5.1.1.6: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 6 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Στο διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 6 η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=210 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,21 \text{ m/sec}$. Σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο της προσήνεμης πλευράς, το σημείο 2, η μέγιστη ταχύτητα δεν είναι τόσο μειωμένη όσο θα περιμέναμε για την υπήνεμη πλευρά. Στο σημείο 2 έχουμε $V=0,3 \text{ m/sec}$ ενώ στο σημείο 6 έχουμε $V=0,21 \text{ m/sec}$, λόγω του φαινομένου της περιδίνησης της ροής που λαμβάνει χώρα στην υπήνεμη πλευρά. Ο στροβιλισμός που συμβαίνει κατά το φαινόμενο αυτό συντελεί ώστε οι ταχύτητες να παρουσιάζονται αυξημένες απ' όσο θα περιμέναμε. Όντως $V_6 > V_5$ αφού το σημείο 5 είναι σε μεγαλύτερο βάθος από το σημείο 6.

Σημείο 7 :

Το σημείο 7 βρίσκεται στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και απέχει 40 cm από τον πυθμένα του. Στο σημείο 7 έγιναν μετρήσεις για βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$ και περίοδο παραγόμενου κυματισμού από την κυματογεννήτρια $T=1,85 \text{ sec}$. Το ύψος κύματος ήταν $H=8 \text{ cm}$. Το πλάτος στέψης ήταν $b=100 \text{ cm}$.



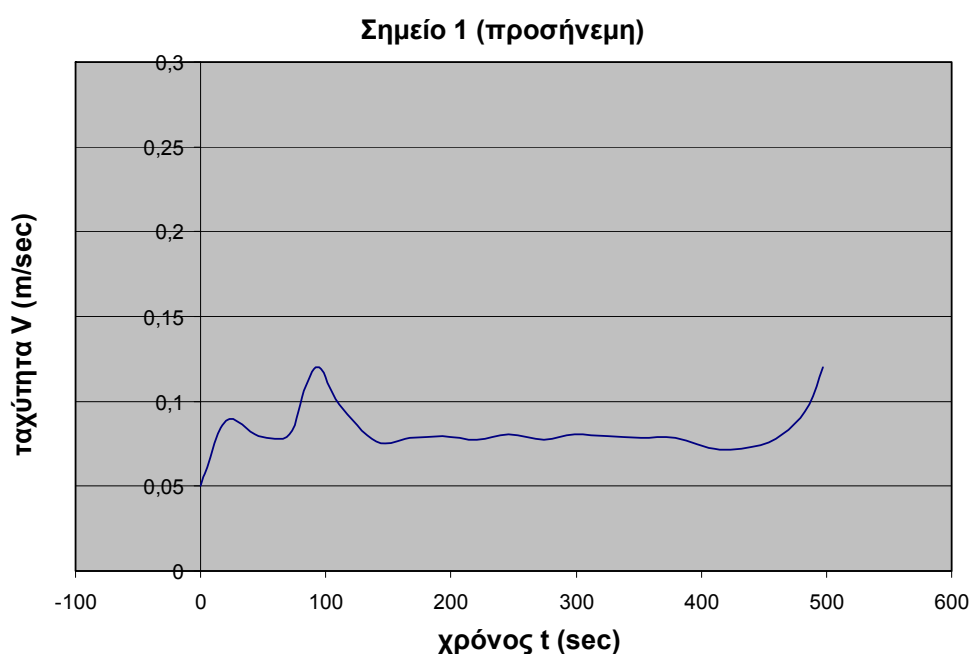
Διάγραμμα 5.1.1.7: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 7 για την πρώτη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 7 έχει περίπου ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται για $t=35 \text{ sec}$ και για $t=205 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,16 \text{ m/sec}$. Αναφορικά με το αντίστοιχο σημείο της προσήνεμης πλευράς, το σημείο 3, η μέγιστη ταχύτητα δεν έχει μειωθεί όσο θα περιμέναμε για την υπήνεμη πλευρά. Στο σημείο 3 έχουμε $V=0,31 \text{ m/sec}$ ενώ στο σημείο 7 έχουμε $V=0,16 \text{ m/sec}$. Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας του φαινομένου της περιδίνησης της ροής που λαμβάνει χώρα στην υπήνεμη πλευρά και με τον στροβιλισμό του φαινομένου αυτού οι ταχύτητες παρουσιάζονται αυξημένες. Επίσης παρατηρούμε ότι στο σημείο 6 έχουμε μεγαλύτερη ταχύτητα από το σημείο 7, παρ' ότι το σημείο 7 είναι σε μικρότερο βάθος από το σημείο 6. Και αυτή η παρατήρηση οφείλεται στο φαινόμενο της περιδίνησης της ροής που λαμβάνει χώρα στην υπήνεμη πλευρά, και με το στροβιλισμό που συμβαίνει, το σημείο 6 παρουσιάζει μεγαλύτερη ταχύτητα από το σημείο 7.

5.1.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΣΕΙΡΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΥΦΑΛΟΥ ΚΥΜΑΤΟΘΡΑΥΣΤΗ.

Σημείο 1 :

Στο σημείο 1 έγιναν μετρήσεις για βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$ και περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,58 \text{ sec}$. Το ύψος κύματος ήταν $H= 0,095 \text{ m}$. Το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη ίδιο και με την πρώτη σειρά μετρήσεων $b=100 \text{ cm}$.

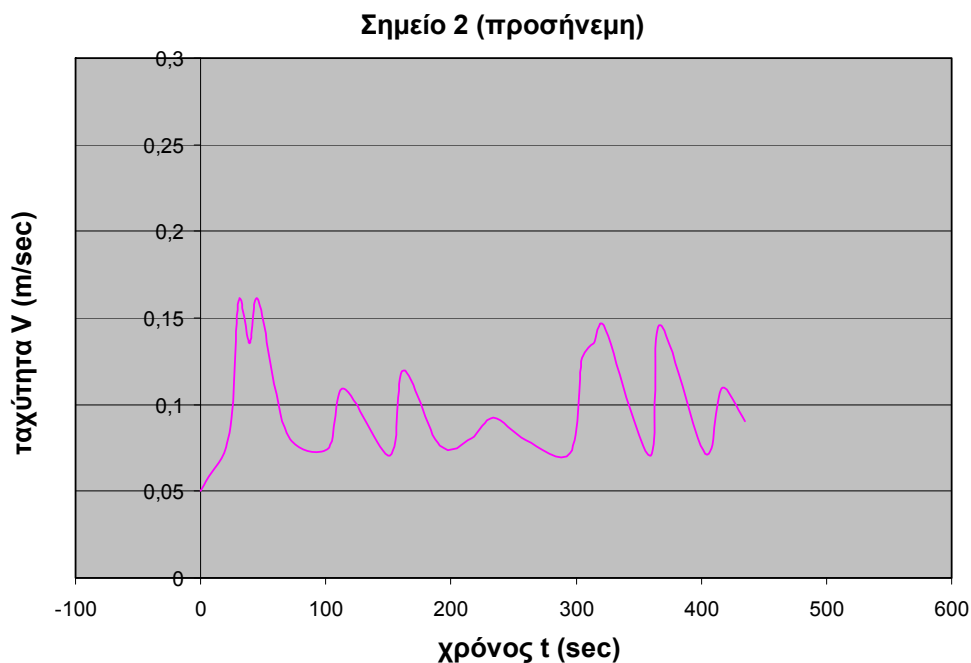


Διάγραμμα 5.1.2.1: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 1 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 1 για την δεύτερη σειρά πειραμάτων έχει αυτή την μορφή διότι το όργανο μετρήσεων δεν μπορούσε να αντιληφθεί την ταχύτητα γιατί αυτή ήταν πολύ μικρή. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=95 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,125 \text{ m/sec}$. Από την χρονική στιγμή $t=140 \text{ sec}$ έως την στιγμή $t=390 \text{ sec}$, το διάγραμμα έχει σταθερή μορφή. Με την μείωση της περιόδου και την αύξηση του ύψους κύματος, για την δεύτερη σειρά πειραμάτων η ταχύτητα αυξήθηκε ελάχιστα.

Σημείο 2 :

Στο σημείο 2 έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T=1,58 \text{ sec}$ και βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$. Το ύψος κύματος ήταν $H=0,095 \text{ m}$. Το πλάτος στέψης ήταν $b=100 \text{ cm}$.

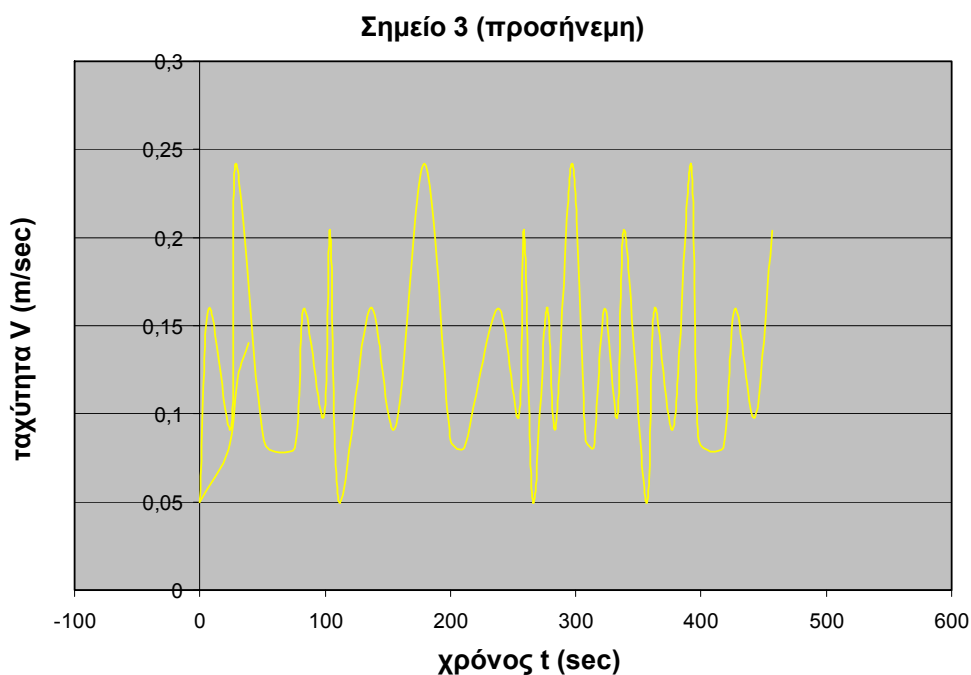


Διάγραμμα 5.1.2.2: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 2 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 2 για την δεύτερη σειρά πειραμάτων έχει περίπου ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=40 \text{ sec}$ και $t=60 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,16 \text{ m/sec}$. Όντως η $V_2 > V_1$ για την δεύτερη σειρά μετρήσεων κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο μιας και το σημείο 1 έχει μεγαλύτερο βάθος από το σημείο 2. Με την μείωση της περιόδου και την αύξηση του ύψους κύματος, για την δεύτερη σειρά πειραμάτων η ταχύτητα μειώθηκε. Αυτό συμβαίνει επειδή στη δεύτερη σειρά μετρήσεων αυξάνει η καμπυλότητα του κυματισμού H/L , κάτι που έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερη ανάκλαση από το μέτωπο για το σημείο 2 η οποία μειώνει την οριζόντια ταχύτητα V .

Σημείο 3 :

Στο σημείο 3 έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού $T= 1,58 \text{ sec}$ και βάθος νερού $d=50 \text{ cm}$. Το ύψος κύματος ήταν $H=0,095 \text{ m}$. Το πλάτος στέψης ήταν ίδιο με την πρώτη σειρά πειραμάτων $b=100 \text{ cm}$.

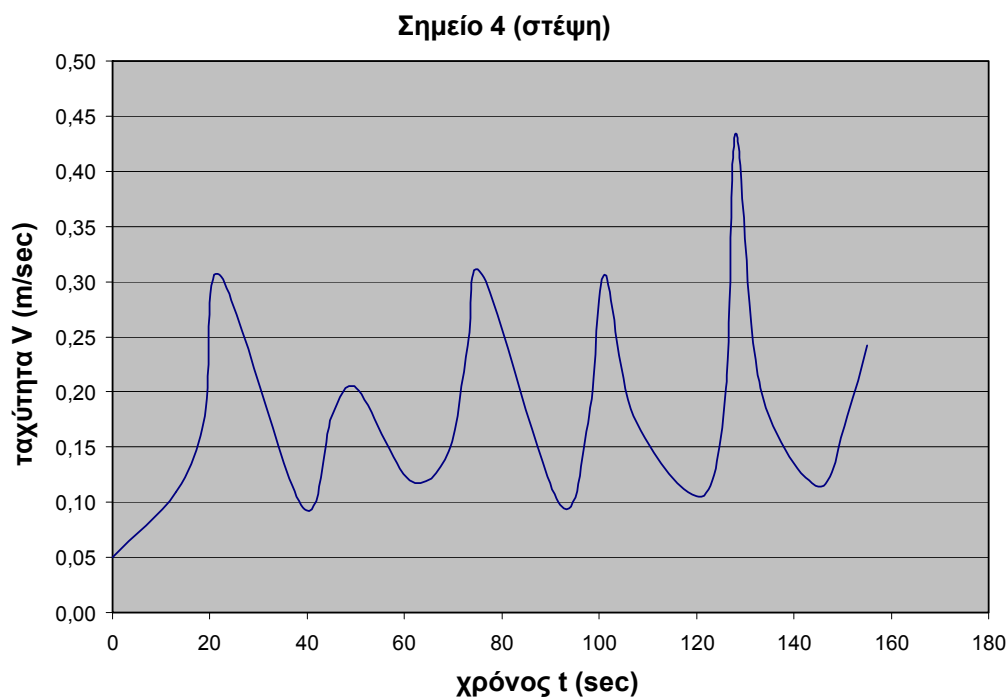


Διάγραμμα 5.1.2.3: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 3 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 3 για την δεύτερη σειρά πειραμάτων έχει ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται για $t=30 \text{ sec}$, για $t=180 \text{ sec}$, για $t=300 \text{ sec}$ και για $t=390 \text{ sec}$ και είναι $V=0,24 \text{ m/sec}$. Όντως ισχύει $V_3 > V_2 > V_1$ για την προσήνεμη πλευρά για την δεύτερη σειρά πειραμάτων στο εξωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη. Με την μείωση της περιόδου κατά την δεύτερη σειρά πειραμάτων και την αύξηση του ύψους κύματος, η ταχύτητα μειώθηκε από $V=0,31 \text{ m/s}$ σε $V=0,24 \text{ m/s}$. Αυτό συμβαίνει λόγω μεγαλύτερης ανάκλασης του κυματισμού από το μέτωπο, επειδή αυξήθηκε η καμπυλότητα του κυματισμού.

Σημείο 4 :

Στο σημείο 4 έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού από την κυματογεννήτρια $T= 1,58 \text{ sec}$. Το ύψος κύματος ήταν $H=0,095 \text{ m}$. Το βάθος νερού ήταν $d=50 \text{ cm}$. Το πλάτος στέψης ήταν $b=100 \text{ cm}$.



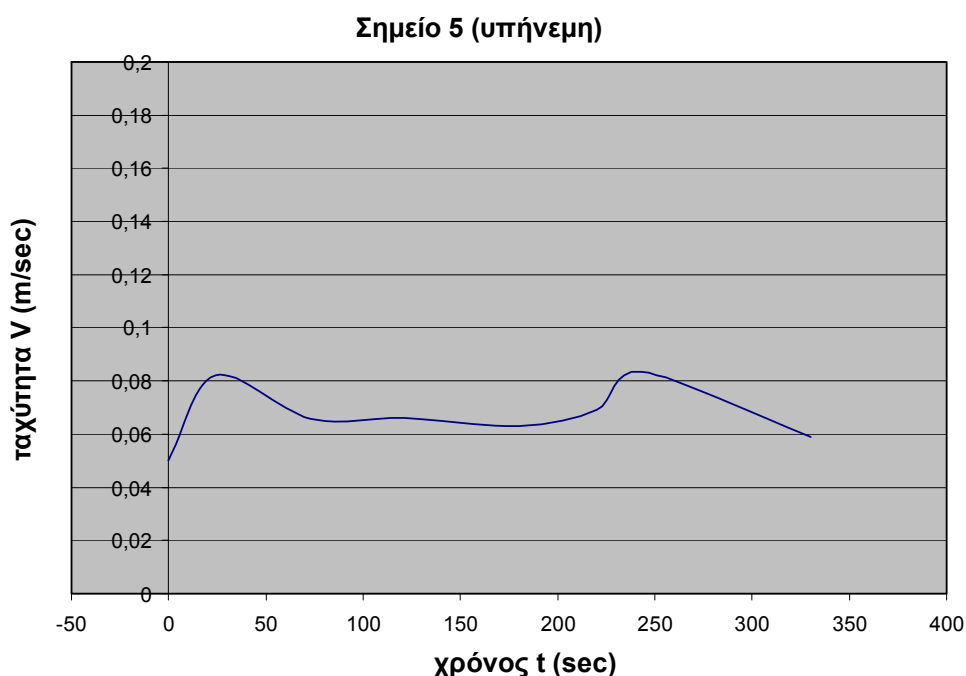
Διάγραμμα 5.1.2.4: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 4 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 4 για την δεύτερη σειρά πειραμάτων έχει ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται για $t=135 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,44 \text{ m/sec}$. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη ταχύτητα στο σημείο 4 είναι μεγαλύτερη από τις μέγιστες ταχύτητες στα σημεία 1,2,3 της προσήνεμης πλευράς για την δεύτερη σειρά πειραμάτων και αυτό διότι μίκρυνε η διατομή από την οποία διέρχεται ο κυματισμός με την ίδια "παροχή" οπότε αυξήθηκε η ταχύτητα. Με την μείωση της περιόδου T για την δεύτερη σειρά μετρήσεων και την αύξηση του ύψους κύματος η μέγιστη ταχύτητα παρέμεινε σταθερή. Το αναμενόμενο ήταν η ταχύτητα να αυξηθεί, βάσει της εξίσωσης Stokes. Αυτό δεν συμβαίνει επειδή στη δεύτερη

σειρά πειραμάτων αυξάνει η καμπυλότητα του κύματος κάτι που έχει σαν συνέπεια μεγαλύτερη ανάκλαση από το μέτωπο και επιπλέον στο σημείο 4 έχουμε θραύση του κυματισμού. Αυτές οι δύο συνιστώσες μειώνουν την οριζόντια ταχύτητα V .

Σημείο 5 :

Στο σημείο 5 έγιναν μετρήσεις για περίοδο παραγόμενων κυματισμών από την κυματογεννήτρια $T=1,58 \text{ sec}$ με ύψος κύματος $H=0,095 \text{ m}$. Το βάθος νερού ήταν $d=50 \text{ cm}$. Το πλάτος στέψης ήταν ίδιο με την πρώτη σειρά μετρήσεων $b=100 \text{ cm}$.



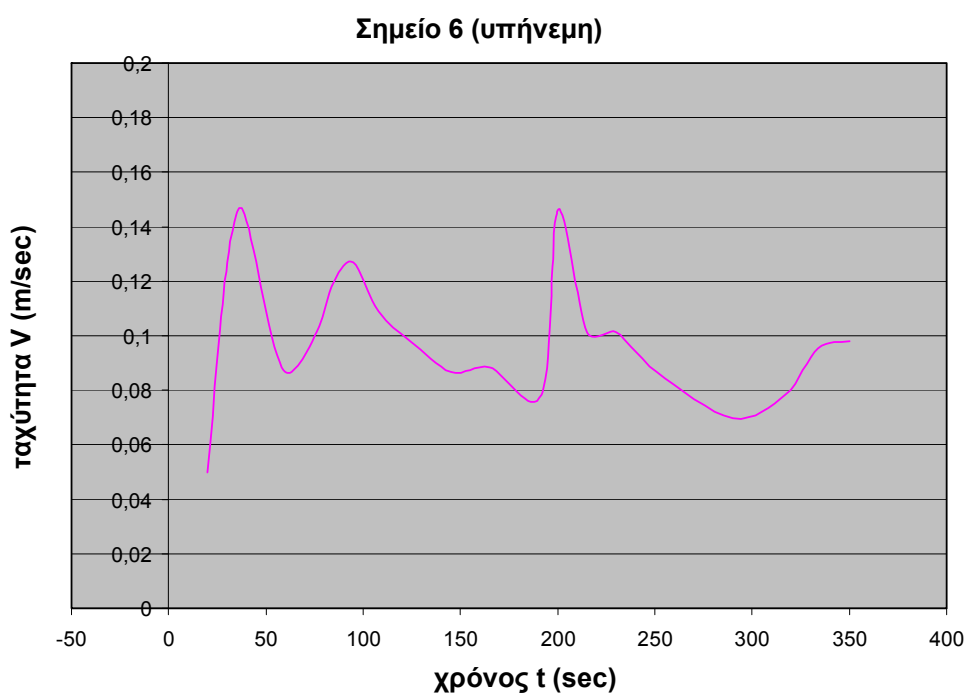
Διάγραμμα 5.1.2.5: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 5 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου για το σημείο 5 της υπήνεμης πλευράς για την δεύτερη σειρά μετρήσεων έχει αυτή την μορφή διότι το όργανο των μετρήσεων δεν μπορούσε να αντληφθεί την ταχύτητα η οποία ήταν πολύ μικρή. Η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται για $t=245 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,085 \text{ m/sec}$. Σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο της προσήνεμης πλευράς, το σημείο 1 στο οποίο η μέγιστη ταχύτητα μετρήθηκε για την δεύτερη σειρά πειραμάτων ίση με $V=0,125 \text{ m/sec}$

παρατηρούμε ότι η μέγιστη ταχύτητα δεν μειώθηκε όσο θα περιμέναμε για την υπήνεμη πλευρά. Αυτό συμβαίνει εξ αιτίας του φαινομένου της περιδίνησης της ροής που λαμβάνει χώρα στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη και με το οποίο η ταχύτητα στο σημείο 5 της υπήνεμης πλευράς λόγω του στροβιλισμού που συμβαίνει κατά το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται αυξημένη σε σχέση με αυτή που θα περιμέναμε. Με την μείωση της περιόδου για την δεύτερη σειρά πειραμάτων και την αύξηση του ύψους κύματος, η ταχύτητα στο σημείο 5 αυξήθηκε από $V=0,075 \text{ m/sec}$ σε $V=0,085 \text{ m/sec}$.

Σημείο 6 :

Στο σημείο 6 έγιναν μετρήσεις για περίοδο παραγόμενων κυματισμών $T=1,58 \text{ sec}$ και το ύψος κύματος ήταν $H=0,095 \text{ m}$. Το πλάτος στέψης ήταν $b=100 \text{ cm}$. Το βάθος νερού ήταν $d=50 \text{ cm}$.

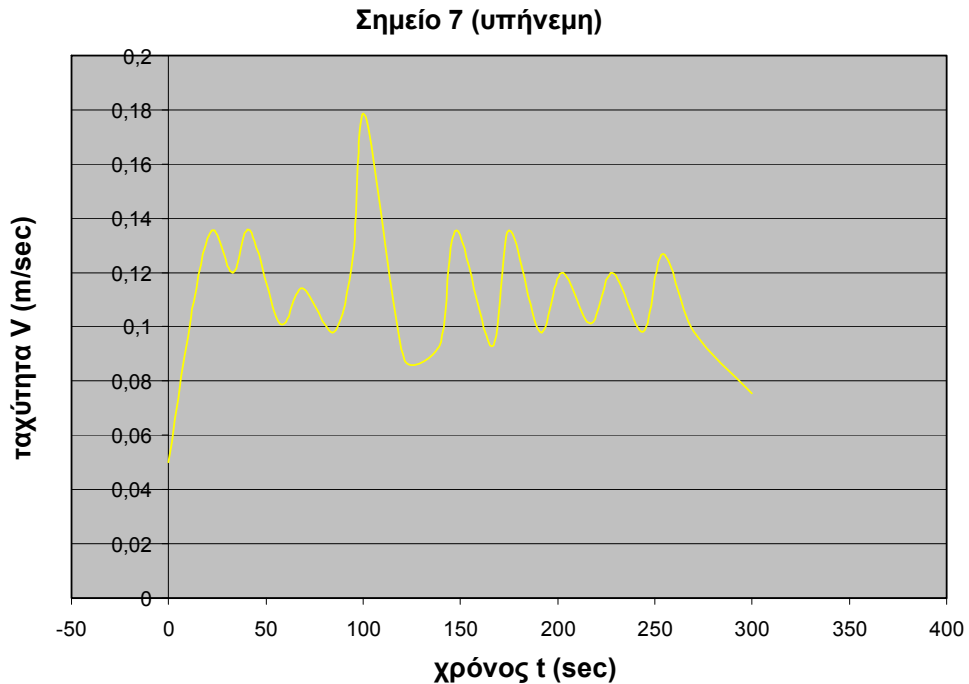


Διάγραμμα 5.1.2.6: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 6 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα των ταχυτήτων-χρόνου στο σημείο 6 της υπήνεμης πλευράς έχει ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται για $t=40 \text{ sec}$ και για $t=201 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,149 \text{ m/sec}$. Όντως και εδώ $V_6 > V_5$ μιας και το σημείο 5 βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος από το σημείο 6 στην υπήνεμη πλευρά. Σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο 2 της προσήνεμης πλευράς, η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται πολύ αυξημένη από όσο θα περιμέναμε για την υπήνεμη πλευρά. Η μέγιστη ταχύτητα στο σημείο 2 είναι $V=0,16 \text{ m/sec}$. Αυτό συμβαίνει λόγω του φαινομένου της περιδίνησης της ροής που με το στροβιλισμό του, αυξάνει τις ταχύτητες στα σημεία της υπήνεμης πλευράς. Με την μείωση της περιόδου για την δεύτερη σειρά πειραμάτων και την αύξηση του ύψους κύματος, η ταχύτητα στο σημείο 6 της υπήνεμης πλευράς μειώθηκε. Από $V=0,21 \text{ m/s}$ έγινε $V=0,149 \text{ m/s}$. Αυτή η μείωση της ταχύτητας οφείλεται στο φαινόμενο της θραύσης που συμβαίνει στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη.

Σημείο 7 :

Στο σημείο 7 έγιναν μετρήσεις για περιόδους παραγόμενου κυματισμού από την κυματογεννήτρια $T=1,58 \text{ sec}$. Το ύψος κύματος ήταν $H=0,095 \text{ m}$. Το βάθος νερού ήταν $d=50 \text{ cm}$. Το πλάτος στέψης ήταν $b=100 \text{ cm}$.



Διάγραμμα 5.1.2.7: Διάγραμμα ταχυτήτων – χρόνου στο Σημείο 7 για την δεύτερη σειρά μετρήσεων.

Το διάγραμμα ταχυτήτων-χρόνου για το σημείο 7 της υπήνεμης πλευράς έχει ημιτονοειδή μορφή. Η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται για $t=100 \text{ sec}$ και είναι ίση με $V=0,18 \text{ m/sec}$. Όντως για την δεύτερη σειρά πειραμάτων για την υπήνεμη πλευρά ισχύει $V_7 > V_6 > V_5$ μιας και το σημείο 7 βρίσκεται σε μικρότερο βάθος από το σημείο 6 και αυτό από το σημείο 5 στην υπήνεμη πλευρά του ύφαλου κυματοθραύστη. Σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο της προσήνεμης πλευράς, το σημείο 3, η μέγιστη ταχύτητα παρουσιάζεται μειωμένη λόγω του φαινομένου της θραύσης που συμβαίνει στην υπήνεμη πλευρά. Με την μείωση της περιόδου για την δεύτερη σειρά πειραμάτων και την αύξηση του ύψους κύματος η μέγιστη ταχύτητα αυξάνει από $V=0,16 \text{ m/sec}$ σε $V=0,18 \text{ m/sec}$ όπως είναι αναμενόμενο από την εξίσωση Stokes.

Συγκρίνουμε τα πειραματικά αποτελέσματα με την πιο κατάλληλη από το διάγραμμα Le Méhauté μαθηματική θεωρία. Αυτή είναι η Stokes 2^{ης} τάξης. Αυτό θα το κάνουμε για τα σημεία της προσήνεμης πλευράς τα σημεία 1,2,3. Για την πρώτη σειρά πειραμάτων, για το σημείο 1 παρατηρείται μια μείωση των πειραματικών μετρήσεων σε σχέση με τη θεωρία, της τάξης του 18 %. Για το σημείο 2 παρατηρείται πολύ μικρή αύξηση της τάξης του 0,7 %. Για το σημείο 3 παρατηρείται σχετικά μικρή αύξηση της τάξης του 6%. Όσον αφορά την δεύτερη σειρά

πειραμάτων, για το σημείο 1, παρατηρείται μείωση των πειραματικών μετρήσεων σε σχέση με τη θεωρία της τάξης του 37,3 %. Για το σημείο 2 παρατηρείται μια μείωση της τάξης του 23,8 %. Για το σημείο 3 παρατηρείται μια σχετικά μικρή μείωση της τάξης του 8,3 %. Αυτές οι αποκλίσεις οφείλονται στο φαινόμενο της ανάκλασης από το μέτωπο. Καθώς οι κυματισμοί προσπίπτουν σε κεκλιμένη κατασκευή ένα μέρος της ενέργειας τους ανακλάται, με αποτέλεσμα τη μείωση των ταχυτήτων στα σημεία της προσήνεμης πλευράς σε σχέση με αυτή που προβλέπει η θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης. Στον πίνακα 5.2.1 παρατίθενται οι παραπάνω αποκλίσεις για τις δύο σειρές μετρήσεων.

Πιν.5.2.1 Αποκλίσεις των δύο σειρών μετρήσεων από τη μαθηματική θεωρία Stokes 2^{ης} τάξης.

Σημεία	1^η σειρά μετρήσεων	2^η σειρά μετρήσεων
1	-18 %	-37,3 %
2	+ 0,7 %	-23,8 %
3	+6 %	-8,3 %

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή ασχοληθήκαμε με την συμπεριφορά των κυματισμών στο εξωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη, μετρώντας τις ταχύτητες σε τρεις διατομές στο εξωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη. Στην στέψη, στην προσήνεμη πλευρά και στην υπήνεμη πλευρά.

1) Στην στέψη του κυματοθραύστη παρατηρούνται μεγαλύτερες ταχύτητες από την προσήνεμη και την υπήνεμη πλευρά. Αυτό συμβαίνει διότι οι κυματισμοί διέρχονται από την στέψη με την ίδια "παροχή" λόγω εξίσωσης συνέχειας ή αρχής διατήρησης μάζας, αλλά σε μικρότερη διατομή με αποτέλεσμα την αύξηση των ταχυτήτων στην στέψη. Η αύξηση αυτή λοιπόν των ταχυτήτων στη στέψη ενέχει κινδύνους για την ναυσιπλοΐα.

2) Στην υπήνεμη πλευρά του κυματοθραύστη παρατηρείται το φαινόμενο της περιδίνησης της ροής. Ένα φαινόμενο που με τον στροβιλισμό ο οποίος το συνοδεύει αυξάνει τις ταχύτητες στην υπήνεμη πλευρά και τις παρατηρούμε στις πειραματικές μετρήσεις αυξημένες από όσο θα περιμέναμε να είναι για την υπήνεμη πλευρά. Επίσης λόγω του ίδιου φαινομένου παρατηρούνται οι ταχύτητες να είναι μεγαλύτερες σε μεγαλύτερο βάθος στην υπήνεμη πλευρά. Και αυτή η ιδιομορφία ενέχει κινδύνους για την ναυσιπλοΐα.

3) Στην δεύτερη σειρά πειραμάτων όπου μειώσαμε την περίοδο και αυξήσαμε το ύψος κύματος παρατηρείται για τα σημεία της προσήνεμης πλευράς, τα σημεία 1,2,3, μικρή αύξηση της μέγιστης ταχύτητας για το σημείο 1, και για τα σημεία 2,3 η μέγιστη ταχύτητα μειώνεται. Στο σημείο της στέψης, το σημείο 4, η ταχύτητα παραμένει σταθερή. Αναμέναμε αύξηση των μέγιστων ταχυτήτων και στα σημεία 2,3,4 βάσει της εξίσωσης Stokes. Όμως αυτό δεν συμβαίνει εξ αιτίας του φαινομένου της ανάκλασης από το μέτωπο, με το οποίο ένα μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος κυματισμού ανακλάται. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει επειδή αυξάνει

η καμπυλότητα του κυματισμού στη δεύτερη σειρά μετρήσεων. Στο σημείο της στέψης, το σημείο 4 συμβαίνει και θραύση του κυματισμού η οποία μειώνει την ταχύτητα, γι' αυτό και στο σημείο 4 η ταχύτητα παραμένει σταθερή. Και όσον αφορά τα σημεία της υπήνεμης πλευράς, τα σημεία 5,6,7, στα σημεία 5,7 η μέγιστη ταχύτητα αυξάνεται και στο σημείο 6 μειώνεται. Η μείωση αυτή της μέγιστης ταχύτητας στο σημείο 6 συμβαίνει εξ αιτίας του φαινομένου της θραύσης που συμβαίνει στην υπήνεμη πλευρά το οποίο μειώνει την ταχύτητα V .

4) Εξ αιτίας των στροβιλισμών που δημιουργούνται στο κατάντη τμήμα του κυματοθραύστη, το τμήμα της υπήνεμης πλευράς δηλαδή, κρίνεται απαραίτητη η θωράκιση του κυματοθραύστη στην υπήνεμη πλευρά του μέχρι τον πόδα της κατασκευής προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωση του πόδα και η υποσκαφή του.

5) Οι ταχύτητες στα σημεία της προσήνεμης πλευράς είναι μεγαλύτερες από τις ταχύτητες στα σημεία της υπήνεμης πλευράς, και για τις δύο σειρές πειραμάτων. Αυτό σημαίνει πως η προσήνεμη πλευρά διαβρώνεται πιο πολύ από τους κυματισμούς, και έχει ανάγκη δημιουργίας στρώσης θωράκισης για προστασία από την διάβρωση των κυματισμών.

6) Η κυματική μετάδοση κατάντη και ανάντη των ύφαλων κυματοθραυστών αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο φαινόμενο το οποίο δεν μπορεί να περιγραφεί με απόλυτη πληρότητα από τις υπάρχουσες ημι-εμπειρικές αναλυτικές εκφράσεις.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

1) Μια πρόταση είναι να αλλάζουμε το πλάτος στέψης του κυματοθραύστη και να κρατήσουμε σταθερή την περίοδο από την παραγόμενη κυματογεννήτρια και κατά συνέπεια το ύψος κύματος σταθερό για να διαπιστώσουμε πόσο επηρεάζει την ταχύτητα η αλλαγή του πλάτους στέψης του κυματοθραύστη. Να πάρουμε τρία πλάτη στέψης 80 cm, 100 cm, 120 cm και να μετρήσουμε ταχύτητες με την ίδια διαδικασία.

2) Επίσης μπορούμε να αλλάζουμε το βάθος νερού και να κρατήσουμε την περίοδο και το πλάτος στέψης σταθερά για να διαπιστώσουμε πόσο επηρεάζει την ταχύτητα

αυτή η αλλαγή και στο εξωτερικό αλλά και στο εσωτερικό του ύφαλου κυματοθραύστη.

3) Να μελετήσουμε και θραυόμενους κυματισμούς πάνω από τη στέψη του κυματοθραύστη και να συγκρίνουμε τις πειραματικές μετρήσεις με τις μαθηματικές θεωρίες κυματισμών.

4) Περαιτέρω πειράματα για να διαπιστωθεί η περατότητα του κυματοθραύστη στους κυματισμούς και με διαφορετικά πορώδη.

5) Διερεύνηση των μηχανισμών αστοχίας των ύφαλων κυματοθραυστών, όπως η άμεση τοπική καταστροφή της στρώσης θωράκισης, η γενικότερη ολίσθηση των λίθων θωράκισης, υπερβολικές καθιζήσεις, σεισμική επιβάρυνση.

6) Έλεγχος σε σεισμική επιβάρυνση για πιθανόν κακές συνθήκες θεμελιώσεως. Για την απομάκρυνση του κινδύνου αστοχίας μπορούμε να επέμβουμε στην γεωμετρία της διατομής με ηπιότερες κλίσεις

7) Διερεύνηση της επίδρασης των ύφαλων κυματοθραυστών στα οικοσυστήματα των παραθαλάσσιων περιοχών. Κατά πόσο μπορούν να επιβιώσουν μικροοργανισμοί στο εσωτερικό ύφαλου κυματοθραύστη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Παρακάτω δίνεται μια καταγραφή συγγραμμάτων, εργασιών και βιβλίων στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη της παρούσας εργασίας. Οι αναφορές ταξινομούνται αλφαβητικά.

- Αργυρόπουλος Α. Επαμεινώνδας, (2010). "Υδροδυναμική διερεύνηση σώματος ύφαλου κυματοθραύστη με πορώδες". Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π
- Battjes, JA, and Janssen (1978). "Energy Loss and set up due to Breaking Random Waves," Proc 16th Int. Conf. on Coastal Engineering.
- Berkhoff, J.C.W., (1972). "Computation of combined refraction-diffraction. In : Proceedings of the 13th conference of coastal Engineering ", Canada, ASCE, 471-490.
- Βερναδάκης, Σ. , (1990) "Βαθμονόμηση διώρυγας κυματισμών βαρύτητας εργαστηρίου λιμενικών έργων Ε.Μ.Π. " Διπλωματική εργασία, εργαστήριο λιμενικών έργων Ε.Μ.Π.
- Booij, N., (1981). "Gravity waves on water with non-uniform depth and current ". Rept.81-1, Dept.Civ.Eng., Delft University of Technology.
- Chandrasekera, C.N., Cheng, K.F., (1997). "Extended linear refraction-diffraction model ". J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.123, 280-286.
- Chappellear J.E., (1961). "Direct numerical calculation of wave properties". J.Geophys.Res.66 (18), 501-508.
- Commet, A., Mansard, E. and Funke, E (1994). " Wave transformation and Load Reduction Using a small Tandem Reef Breakwater-Physical Model Tests". Ocean Wave Measurement and Analysis, American society of civil engineers, New York, 1994, pp.1008-1023.
- Dean, R.G., Dalrymple, R.A., (1984). "Water wave mechanics for engineers and Scientists". Englewood Cliffs, Precentice-Hall, 305-309.
- Δερμίσσης Β, (1988) " Παράκτια υδραυλική ", Σημειώσεις Α.Π.Θ.
- Diskin, MH, Vajda, ML, and Amir, I (1970). " Pilling-up behind Low and Submerged Permeable Breakwater", J.Waterways and Harbours Div, 96.
- 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.
- Johnson, HK (2006). "Wave modelling in the Vicinity of submerged Breakwaters", Coastal Engineering, Vol 53, pp 39-48.
- Καραμπάς, Θ, (1991) " Μαθηματική περιγραφή της διάδοσης των μη γραμμικών Διασπειρόμενων κυματισμών στον παράκτιο χώρο ". Διδακτορική διατριβή.
- 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.
- Le Méhauté, 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.
- Loveless, JH, Debski, D, and MacLeod, AB (1998). "Sea Level Set-up Behind Detached Breakwaters", Proc 26rd International Conference on Coastal Engineering, 2, pp.1665-1678.
- Μακρής Χρήστος, (2007). "Μετάδοση κυματισμού κατόντη του ύφαλου Κυματοθραύστη ". Διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π.
- Massel, S.R., (1993). "Extended linear refraction-deffraction 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.

- Peregrine, DM (1967). "Long waves on a Beach ", J Fluid Mechanics, Vol 27, Part 4.
- Radder, A.C., (1979). "On the parabolic equation method for water wave Propagation ". J.Fluid Mech. 95 (1), 159-176.
- 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.
- Stokes, (1847) "Μη γραμμικοί προωθούμενοι κυματισμοί".