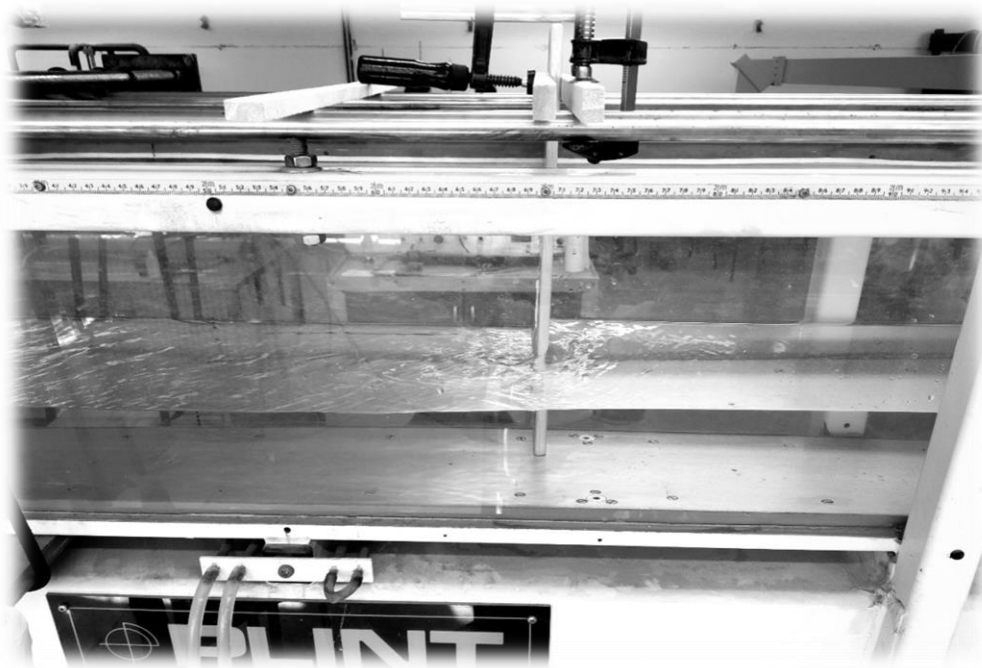




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Πτυχιακή Εργασία
της Ελευθερίας Κουρέα

**Πειραματική μελέτη της ροής σε ανοικτό αγωγό γύρω από
εγκάρσιο πρόβολο**



Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Θ. Φουρνιώτης, Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ 2022

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη σπουδάστρια έχει επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνει υπεύθυνα ότι είναι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολόκληρου του κειμένου εξίσου, έχει δε αναφέρει στη βιβλιογραφία της όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησε και έλαβε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνει επίσης, ότι οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχει ενσωματώσει στην εργασία της προερχόμενο από βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχει πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχει αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ελευθερία Κουρέα

(Υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Πολίτικων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου (πρώην ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας), υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή Νικόλαου Θ. Φουρνιώτη.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Νικόλαο Φουρνιώτη για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της παρούσας εργασίας αλλά και για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε στο διάστημα αυτό. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου, Ευστράτιο Τζιρτζιλάκη και τον διδάκτορα Ανδρέα Βούρο για την πολύτιμη βοήθεια τους στη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη και τα εφόδια που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια ώστε να καταφέρω να πραγματοποιήσω τους στόχους μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εστιάζει στον υπολογισμό της δομής που έχει η ροή γύρω από εγκάρσιους προβόλους. Οι εγκάρσιοι πρόβολοι είναι κατασκευές που τοποθετούνται σε ποταμούς με σκοπό την διατήρηση ενός επιθυμητού βάρους για τον έλεγχο πλημμυρικών φαινομένων αλλά και την αποφυγή της διάβρωσης των οχθών.

Κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκε αλλαγή της ελεύθερης επιφάνειας πλησίον του προβόλου. Συγκεκριμένα, ανάντη του προβόλου παρατηρήθηκε ομαλή αύξηση της στάθμης, ενώ κατάντη υπήρξε πτώση της στάθμης, η οποία σταδιακά αυξήθηκε και επανήλθε στην αρχική της τιμή. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι πριν τον πρόβολο παρατηρήθηκε στροβιλισμός της ροής, ο οποίος ενδεχομένως να προκαλέσει με το πέρασμα του χρόνου υποσκαφή στην περιοχή αυτή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗ	i
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	viii
Κεφάλαιο 1: Εγκάρσιοι πρόβολοι (Groynes)	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Τύποι εγκάρσιων προβόλων.....	3
1.3 Σχεδιασμός προβόλων.....	9
1.4 Επιρροή των εγκάρσιων προβόλων στα ποτάμια	13
1.4.1 Πεδίο ροής κοντά σε έναν πρόβολο	13
1.4.2 Γεωμετρία της περιοχής αποκόλλησης.....	14
1.4.3 Οριζόντιες μεγάλες δίνες.....	16
1.4.4 Διακύμανση της στάθμης του νερού	17
Κεφάλαιο 2: Στοιχεία της ροής σε ανοικτούς αγωγούς	18
2.1 Ορισμός.....	18
2.2 Είδη ανοικτών αγωγών.....	18
2.3 Είδη ροής σε ανοικτούς αγωγούς	19

2.4 Κατηγορίες ροής με βάση τους αδιάστατους αριθμούς.....	20
2.5 Βασικές εξισώσεις	20
Κεφάλαιο 3: Πειραματική διάταξη	22
3.1 Εργαστηριακός ανοικτός αγωγός	22
3.2 Ξύλινο ομοίωμα (Μοντέλο)	23
3.3 Μέτρηση παροχής.....	27
3.4 Μέτρηση στάθμης.....	28
Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία	29
4.1 Υπολογισμός και Ρύθμιση παροχής.....	29
4.2 Τοποθέτηση ξύλινου ομοιώματος εγκάρσιου προβόλου	32
4.3 Μετρήσεις στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας.....	35
4.4 Εφαρμογή ιχνηθέτη (tracer)	36
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση και Αποτελέσματα	37
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	42
Πηγές και Βιβλιογραφία	43

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1:	Ξύλινος εγκάρσιος πρόβολος	4
Εικόνα 1.2:	Χαλύβδινος πρόβολος	5
Εικόνα 1.3:	Πρόβολος από σκυρόδεμα	6
Εικόνα 1.4:	Πέτρινος πρόβολος	7
Εικόνα 1.5:	Πρόβολος από μπάζα	7
Εικόνα 1.6:	Πρόβολος από σάκους με άμμο	8
Εικόνα 3.1:	Ανοικτός αγωγός εργαστηρίου	22
Εικόνα 3.2:	Κατασκευή ομοιομορφισμού της ροής	23
Εικόνα 3.3:	Όψεις ξύλινου ομοιώματος στην αρχική του φάση	25
Εικόνα 3.4:	Όψεις ξύλινου ομοιώματος στη τελική του φάση	26
Εικόνα 3.5:	Μανόμετρο Υδραργύρου – Νερού και Νερού - Αέρα.	27
Εικόνα 3.6:	Σταθμήμετρο τύπου ακίδας	28
Εικόνα 3.7:	Χάρακας	28
Εικόνα 4.1:	Ομοιόμορφη ροή σε ανοικτό αγωγό	31
Εικόνα 4.2:	Τοποθέτηση αυτοκόλλητων στηριγμάτων	32
Εικόνα 4.3:	Σταθεροποίηση ξύλινου ομοιώματος	33
Εικόνα 4.4:	Ημικυκλικό άκρο ξύλινου ομοιώματος	34
Εικόνα 4.5:	Σταθμήμετρο και ξύλινο ομοίωμα	35
Εικόνα 4.6:	Συμπεριφορά ιχνηθέτη εντός του πεδίου ροής	36
Εικόνα 5.1:	Στροβιλισμός νερού κατάντη του προβόλου	41
Εικόνα 5.2:	Στροβιλισμός νερού ανάντη του προβόλου	41

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1:	Κύρια μέρη προβόλου	3
Σχήμα 1.2:	Διατάξεις προβόλων σύμφωνα με το σχήμα τους	9
Σχήμα 1.3:	Προσανατολισμός προβόλων	12
Σχήμα 1.4:	Κεκαμμένοι πρόβολοι	12
Σχήμα 2.1:	Ομοιόμορφη ροή	19
Σχήμα 2.2:	Ανομοιόμορφη ροή	19
Σχήμα 3.1:	Κάτοψη ξύλινου ομοιώματος	24
Σχήμα 3.2:	Τρισδιάστατη απεικόνιση ξύλινου ομοιώματος	24
Σχήμα 5.1:	Αποτελέσματα μετρήσεων	38
Σχήμα 5.2:	Διακύμανση ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος του αγωγού	39
Σχήμα 5.3:	Διακύμανση ελεύθερης επιφάνειας εγκάρσια του αγωγού	40

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 5.1: Καθορισμός της θέσης και μέτρηση της αντίστοιχης στάθμης κατά μήκος του αγωγού	37
Πίνακας 5.2: Καθορισμός της θέσης και μέτρηση της αντίστοιχης στάθμης εγκάρσια του αγωγού	40

Κεφάλαιο 1: Εγκάρσιοι πρόβολοι (Groynes)

1.1 Γενικά

Η αλόγιστη χρήση των ποταμών και τα προβλήματα που προέκυψαν από αυτή οδήγησαν στην εφαρμογή έργων διευθέτησης και καθοδήγησης της κυρίως ροής των ποταμών, μέσω της σταθεροποίησης του καναλιού για τη διατήρηση της επιθυμητής διατομής και του επιθυμητού βάθους ροής με σκοπό τον έλεγχο των πλημμυρικών φαινομένων, την αποφυγή της διάβρωσης των οχθών και τη βελτιωμένη πλοήγηση.

Η πρακτική αυτή χρονολογείται από τον 16^ο αιώνα, όταν στον Κίτρινο Ποταμό της Κίνας κατασκευάστηκαν επιχώματα κατά μήκος των οχθών του, με σκοπό τον περιορισμό της ροής και τη δημιουργία ενός βαθέος καναλιού για την μεταφορά των ιζημάτων στη θάλασσα. Ωστόσο, η σύγχρονη πρακτική των έργων αυτών, ξεκίνησε τον 19^ο αιώνα στην Ευρώπη, υποκινούμενη από τις απαιτήσεις της Βιομηχανικής Επανάστασης, για τη διατήρηση επαρκούς βάθους ροής και βελτιωμένης πλοήγησης.

Οι βασικοί στόχοι διευθέτησης και καθοδήγησης της ροής των ποταμών είναι οι εξής:

- Η αύξηση της ασφάλειας έναντι των πλημμυρών με την προσαρμογή της πλημμυρικής ροής.
- Η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της μεταφοράς των ιζημάτων.
- Η ελαχιστοποίηση της διάβρωσης των οχθών.
- Η κατεύθυνση της ροής σε μια επιθυμητή ποτάμια έκταση.
- Η βελτίωση της ναυσιπλοΐας, που επιτυγχάνεται με τη διατήρηση ενός συγκεκριμένου βάθους ροής¹.

Η ισορροπία μεταξύ του φορτίου ιζήματος που παρέχεται στο κανάλι και η ικανότητα μεταφοράς της ροής μπορεί να διαταραχθούν από τις διάφορες φυσικές διεργασίες και την ανθρώπινη παρέμβαση. Ορισμένα παραδείγματα αιτιών διατάραξης της ισορροπίας είναι η εκβάθυνση του ποταμού, οι εποχικές διακυμάνσεις

¹M. F. M. Yossef, “The effect of groynes on rivers”, 23.8.2002, διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Yossef/publication/228716610_The_Effect_of_Groynes_on_Rivers/links/0c96052e119a07aa07aa000000/The-Effect-of-Groynes-on-Rivers.pdf, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022, σ. 11

της ροής, η κατασκευή ταμιευτήρα και η αποψίλωση των δασών σε περιοχές κοντά στον ποταμό.

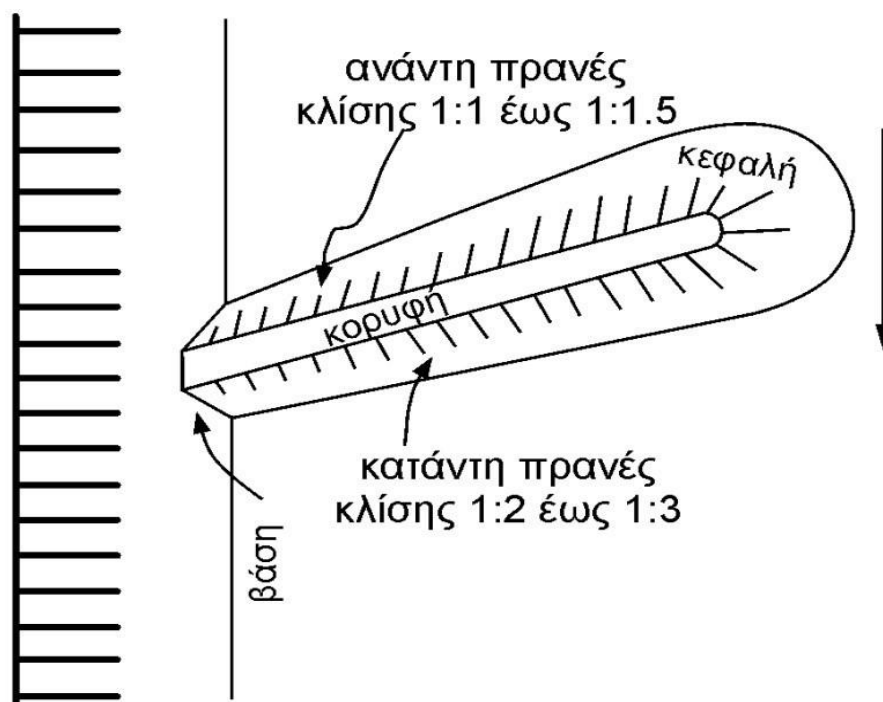
Έτσι, για την αποφυγή των προαναφερθεισών διαταραχών είναι απαραίτητη η κατασκευή έργων διαχείρισης. Τα έργα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Τεχνικά εγκάρσια έργα στην ακτή, όπως αναβαθμοί από σκυρόδεμα, λιθοδομή ή συρματόπλεκτα κιβώτια και πρόβολοι από συρματόπλεκτα κιβώτια, ξύλινους πασσάλους και διάφορα άλλα υλικά.
- Τεχνικά έργα κατά μήκος της ακτής, όπως τοίχοι από λιθοδομή ή σκυρόδεμα, τοίχοι με ξύλινους πασσάλους και επενδύσεις με συρματόπλεκτα κιβώτια, συρματοκυλίνδρους, προκατασκευασμένες τσιμεντόπλακες ή με μεταλλικές πασσαλοσανίδες και κυματοθραύστες.
- Βοηθητικά τεχνικά έργα, όπως αύξηση των διαστάσεων της κοίτης, θωράκιση των ακτών, κατασκευή τεχνητών λιμνών, καθαρισμός της κοίτης από αποθέσεις και άλλα πολλά².

Η παρούσα εργασία εστιάζει στους εγκάρσιους προβόλους (groynes), οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στα τεχνικά εγκάρσια έργα. Είναι άκαμπτες κατασκευές που τοποθετούνται κάθετα ή υπό γωνία στην ακτογραμμή του ποταμού προκειμένου να εκτραπεί η ροή του νερού μακριά από τις κρίσιμες ζώνες και να περιοριστεί η στερεομεταφορά η οποία επηρεάζει σημαντικά τη μορφολογία των ακτών. Οι εγκάρσιοι πρόβολοι υπάρχουν επίσης σε πολλαπλές μορφές, πολλά υλικά και σχεδιαστικές προσεγγίσεις και μπορούν να αποδειχθούν αποτελεσματικοί σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Κάποια από τα υλικά κατασκευής τους είναι το χόμα ή οι σωροί, η πέτρα, το χαλίκι και ο βράχος. Επιπρόσθετα, τα κύρια μέρη των προβόλων είναι α) η κεφαλή (δηλαδή το άκρο του), β) το κύριο σώμα, το οποίο αποτελείται από τα πρηνή (πλευρές) και την κορυφή (στέψη) και γ) τη βάση (ρίζα), δηλαδή τη σύνδεση με τη φυσική κοίτη (Σχήμα 1.1)³.

² Θ. Καραμπάς, Α. Δήμας, Ε. Λουκογεωργάκη, *Ακτομηχανική και λιμενικά έργα*, Θεσσαλονίκη 2020, σ. 328

³ Β. Χρυσάνθου, «Ποτάμια Υδραυλική και Τεχνικά Έργα», 2020, διαθέσιμο στο: <https://www.researchgate.net/profile/Vlassios->



Σχήμα 1.1: Κύρια μέρη προβόλου (Διαδίκτυο 1).

1.2 Τύποι εγκάρσιων προβόλων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο υπάρχουν διάφοροι τύποι προβόλων ανάλογα με την κατασκευή, την όψη και τη δράση τους στη ροή, οι οποίοι μπορούν να ταξινομηθούν:

- i. Σύμφωνα με τη μέθοδο και τα υλικά κατασκευής: Οι πρόβολοι μπορεί να είναι διαπερατοί επιτρέποντας στο νερό να ρέει με μειωμένες ταχύτητες ή μη διαπερατοί μπλοκάροντας και εκτρέποντας τη ροή. Τα υλικά τους, τα οποία καθορίζουν και τη μέθοδο κατασκευής τους είναι το ξύλο (διαπερατοί πρόβολοι), ο χάλυβας, το σκυρόδεμα, τα μπάζα και οι σάκοι με άμμο (μη διαπερατοί).

Ξύλινοι εγκάρσιοι πρόβολοι: Οι ξύλινοι εγκάρσιοι πρόβολοι (Εικόνα 1.1) είναι συνήθως δομές μίας ή δύο σειρών με βασικό πλεονέκτημα το μικρό τους μέγεθος, που τους

καθιστά πιο προσιτούς στην ανέγερση τους σε σύγκριση με άλλους τύπους εγκάρσιων προβόλων. Οι ξύλινοι εγκάρσιοι πρόβολοι μιας σειράς είναι γενικά μερικώς διαπερατές δομές. Η διαπερατότητα αποτρέπει την κυκλοφορία του νερού κοντά στην ακτογραμμή, μειώνοντας έτσι τη διάβρωση της. Η επιλογή ενός ξύλινου εγκάρσιου προβόλου δύο σειρών παρέχει περισσότερη ασφάλεια καθώς επιτρέπει σε μικρότερη ποσότητα νερού να περάσει μέσα του. Παρόλο που είναι φθηνοί, δεν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, καθώς είναι πιο επιρρεπείς στην αποσύνθεση από το νερό. Μια αποτελεσματικότερη λύση είναι η χρήση πλαστικού ξύλου, το οποίο έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μπορεί να ενισχυθεί με υαλοβάμβακα, κάτι που το καθιστά πιο ανθεκτικό από το κανονικό ξύλο⁴.



Εικόνα 1.1: Ξύλινος εγκάρσιος πρόβολος (Διαδίκτυο 2).

Χαλύβδινοι εγκάρσιοι πρόβολοι: Οι χαλύβδινοι εγκάρσιοι πρόβολοι (Εικόνα 1.2) αποτελούνται από κάθετους πασσάλους λαμαρίνας, μονούς ή διπλούς, με διάφορα προφίλ, που βρίσκονται κάθετα στην ακτή. Ανήκουν στην

⁴Zbigniew Pruszek, “Groynes”, διαθέσιμο στο: <http://www.coastalwiki.org/wiki/Groynes>, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022

κατηγορία των μη διαπερατών προβόλων και ενώ ο χάλυβας φαίνεται σαν ένα ισχυρό υλικό, δεν είναι ανθεκτικό σε υδάτινα περιβάλλοντα λόγω της διάβρωσης και της τριβής που υφίσταται το υλικό από την κινούμενη άμμο αλλά και της σκουριάς από το νερό και τις διαλυμένες ουσίες που περιέχει. Πιο σταθερές και ανθεκτικές είναι οι μικτές ογκώδεις κατασκευές, που αποτελούνται από χάλυβα και σκυρόδεμα.



Εικόνα 1.2: Χαλύβδινος πρόβολος (Διαδίκτυο 3).

Εγκάρσιοι πρόβολοι από στοιχεία σκυροδέματος: Ένα κοινό υλικό για την κατασκευή των εγκάρσιων προβόλων είναι το σκυρόδεμα λόγω της ελαστικότητας του. Οι εγκάρσιοι πρόβολοι από σκυρόδεμα (Εικόνα 1.3) ανήκουν στις πιο σταθερές και παράκτιες κατασκευές και μπορούν να περιλαμβάνουν ενισχύσεις για να γίνουν ακόμα πιο ανθεκτικοί. Αρχικά εμφανίζονται με τη μορφή χαλύβδινων ράβδων που υπάρχουν ως ένα είδος εσωτερικού σκελετού, γύρω από τις οποίες αργότερα στερεοποιείται το σκυρόδεμα. Ο χάλυβας δέχεται ποσότητα των τάσεων που αντιμετωπίζει το σκυρόδεμα, γεγονός που εμποδίζει το σκυρόδεμα να ραγίσει εύκολα ή να σπάσει μπροστά στα κύματα. Ένα από τα βασικά θέματα της συγκεκριμένης κατασκευής οφείλεται στο μεγάλο βάρος του σκυροδέματος, το οποίο καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη κατάλληλων συνθηκών εδάφους και κατάλληλης βάσης.



Εικόνα 1.3: Πρόβολος από σκυρόδεμα (Διαδίκτυο 4).

Πέτρινοι εγκάρσιοι πρόβολοι: Οι πέτρινοι εγκάρσιοι πρόβολοι (Εικόνα 1.4) βρίσκονται μεταξύ μερικών από τις πιο εύκολες κατασκευές γιατί αποτελούν χωριστούς βράχους ακανόνιστου σχήματος. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τους κατασκευαστές, καθώς δεν χρειάζονται ακριβείς διαστάσεις και εξαρτήματα για την κατασκευή τους. Τα κενά των πέτρινων προβόλων μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικά απορροφώντας και διανέμοντας τη δύναμη των κυμάτων αλλά μπορούν συνάμα να αποτελέσουν μειονέκτημα της κατασκευής καθώς επιτρέπουν τη διέλευση ιζημάτων. Ακόμα ένα πλεονέκτημα τους είναι ότι μπορούν να αποσυναρμολογηθούν εύκολα και να ανακατασκευαστούν σε νέες θέσεις, σε περίπτωση που η ακτογραμμή μετατοπιστεί με την πάροδο του χρόνου.



Εικόνα 1.4: Πέτρινος πρόβολος (Διαδίκτυο 5).

Εγκάρσιοι πρόβολοι από μπάζα: Οι εγκάρσιοι πρόβολοι από μπάζα (Εικόνα 1.5) αποτελούνται από ανομοιόμορφα κομμάτια, που προκύπτουν από τα υπολείμματα άλλων κατασκευών. Ο μεγάλος τους όγκος και η τραχύτητα τους, τους καθιστούν πιο στιβαρούς και λιγότερο δαπανηρούς, μιας και έχουν λιγότερες ανάγκες συντήρησης.



Εικόνα 1.5: Πρόβολος από μπάζα (Διαδίκτυο 6).

Εγκάρσιοι πρόβολοι από σάκους με άμμο: Οι εγκάρσιοι πρόβολοι από σάκους με άμμο (Εικόνα 1.6) είναι μη διαπερατά εμπόδια, που αποτελούν προσωρινό μέτρο με λειτουργικότητα περίπου πέντε χρόνια. Η αντοχή τους

εξαρτάται από το βάρος των σάκων, οι οποίοι θα πρέπει να υπερβαίνουν τα πενήντα κιλά⁵.



Εικόνα 1.6: Πρόβολος από σάκους με άμμο (Διαδίκτυο 7).

ii. Σύμφωνα με τη στάθμη της κορυφής τους: Οι πρόβολοι διακρίνονται σε:

- Πλήρως βυθισμένους, όταν ολόκληρος ο πρόβολος βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια του νερού.
- Μη βυθισμένους, όταν η κορυφή του προβόλου βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του νερού.

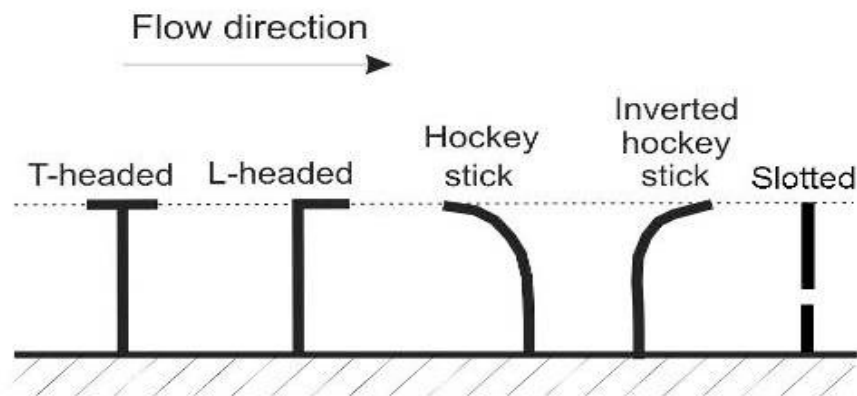
Οι συνθήκες σχεδιασμού καθορίζουν ποιος από τους δύο τύπους θα χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε περίπτωση.

iii. Σύμφωνα με τη δράση της ροής: Οι πρόβολοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε αυτούς που προσελκύουν τη ροή, σε αυτούς που απωθούν τη ροή και σε αυτούς που εκτρέπουν τη ροή. Οι πρόβολοι προσέλκυσης έχουν κλίση προς τα κατάντη και χρησιμεύουν στο να έλκουν τη ροή προς το μέρος τους, χωρίς να την απωθούν στην αντίπερα όχθη. Οι πρόβολοι εκτροπής έχουν γενικά μικρό μήκος και χρησιμεύουν για την τοπική προστασία και για την αλλαγή της κατεύθυνσης της ροής χωρίς την απομάκρυνση της.

⁵“The different types of groynes”, 10.11.2020, διαθέσιμο στο: <https://tangentmaterials.com/the-different-types-of-groynes/>, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022

Τέλος οι πρόβολοι απόθησης έχουν κλίση προς τα ανάντη για να απωθούν τη ροή μακριά τους.

- iv. Σύμφωνα με το σχήμα τους: Οι πρόβολοι μπορούν να κατασκευαστούν σε διάφορα σχήματα. Τέτοια παραδείγματα είναι οι πρόβολοι με κεφαλή σχήματος L, με σχήμα μαστουνιού του χόκεϋ, με σχήμα ανεστραμμένου μαστουνιού του χόκεϋ, οι ευθύγραμμοι πρόβολοι, οι ευθύγραμμοι διακοπτόμενοι και οι πρόβολοι με κεφαλή σχήματος T (Σχήμα 1.2)⁶.



Σχήμα 1.2: Διατάξεις προβόλων σύμφωνα με το σχήμα τους (Διαδίκτυο 8).

1.3 Σχεδιασμός προβόλων

Τα πιο σημαντικά ζητήματα που αφορούν τον σχεδιασμό των εγκάρσιων προβόλων είναι το σχήμα της κάτοψης, το μήκος, η απόσταση μεταξύ τους, ο προσανατολισμός τους σε σχέση με τη ροή, η στάθμη της στέψης, η διατομή τους, τα υλικά κατασκευής και η διάβρωση του εδάφους της περιοχής⁷.

Σχήμα: Από τους προαναφερθέντες τύπους εγκάρσιων προβόλων ανάλογα με το σχήμα τους, οι ευθύγραμμοι πρόβολοι τοποθετούνται υπό γωνία (10° - 170°) από την όχθη και η στρογγυλεμένη τους κεφαλή χρησιμεύει για την παροχή επιπλέον

⁶M. F. M. Yossef, "The effect of groynes on rivers", 23.8.2002, διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Yossef/publication/228716610_The_Effect_of_Groynes_on_Rivers/links/0c96052e119a07aafc000000/The-Effect-of-Groynes-on-Rivers.pdf, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022, σ. 12

⁷M. F. M. Yossef., *ό.π.*, σ. 12

επιφάνειας διάτμησης και όγκου, ο οποίος προκαλεί τη διάβρωση στη γειτονιά της κεφαλής, μειώνοντας έτσι το βάθος διαβρώσεως. Οι πρόβολοι τύπου T είναι συνήθως τοποθετημένοι σε ορθή γωνία από την όχθη και έχουν ένα ευθύγραμμο στέλεχος με ορθογωνικό περύγιο προσδιορισμού της κατεύθυνσης της ροής προς το εξωτερικό άκρο. Οι πρόβολοι με κεφαλή τύπου L παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποθέσεις ιζημάτων, μικρότερη διάβρωση στην κεφαλή τους, παρέχουν μεγαλύτερη προστασία στις όχθες και μια πιο αποτελεσματική διαμόρφωση του καναλιού για πλοήγηση σε συνθήκες όπου το μήκος τους πλησιάζει το 45% με 65% της απόστασης μεταξύ των προβόλων. Οι πρόβολοι σε σχήμα μαστουριού του χόκεϋ εμφανίζουν πιο εκτεταμένες κοίλες περιοχές διαβρώσεως συγκριτικά με αυτές στους προβόλους τύπου T.

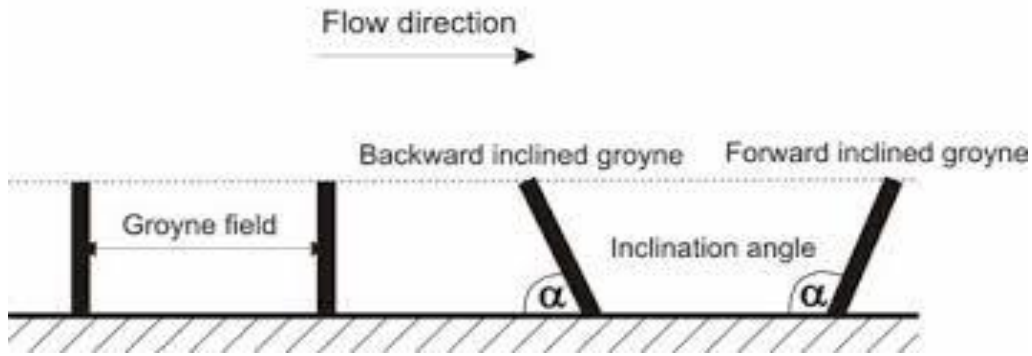
Μήκος: Το μήκος των προβόλων εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων όπως είναι η τοποθεσία, η απόσταση, ο σκοπός και το κόστος κατασκευής. Στο συνολικό μήκος του προβόλου περιλαμβάνονται το ενεργό μήκος που παραμένει στη ροή και το μήκος αγκύρωσης που παραμένει εγκιβωτισμένο στην όχθη. Ο προσδιορισμός του επιθυμητού πλάτους και βάθους του καναλιού μπορεί να καθορίσει το μήκος. Το ενεργό μήκος συνήθως διατηρείται μεταξύ του κατώτερου και ανώτερου ορίου του μέσου βάθους και του ενός τετάρτου του μέσου πλάτους της ελεύθερης επιφάνειας αντίστοιχα. Το μήκος αγκύρωσης, από την άλλη, συνίσταται να είναι μικρότερο του ενός τετάρτου του ενεργού μήκους⁸.

Απόσταση μεταξύ προβόλων: Η απόσταση μεταξύ των προβόλων μετράται στη όχθη μεταξύ των σημείων εκκίνησης τους. Συνδέεται με το μήκος του προβόλου, το πλάτος του ποταμού, τη γωνία του προβόλου ως προς την όχθη, την ταχύτητα ροής, τον προσανατολισμό του προβόλου σε σχέση με τη ροή, την καμπυλότητα της όχθης και τον σκοπό ύπαρξης του προβόλου. Αρκετές φορές όμως, εκφράζεται ως πολλαπλάσιο του μήκους του προβόλου. Ο Richardson (1975) προτείνει μια απόσταση από 1.5 έως 6 φορές το μήκος του προβόλου. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα καλώς ορισμένο βάθος πλοήγησης συνίσταται η διατήρηση μιας απόστασης 1.5 έως 2 φορές του μήκους του προβόλου ενώ για την προστασία της όχθης ο λόγος της απόστασης προς το μήκος του προβόλου είναι μικρότερος. Χρησιμοποιούνται αποστάσεις από 2 έως 6 φορές το μήκος του προβόλου αν και

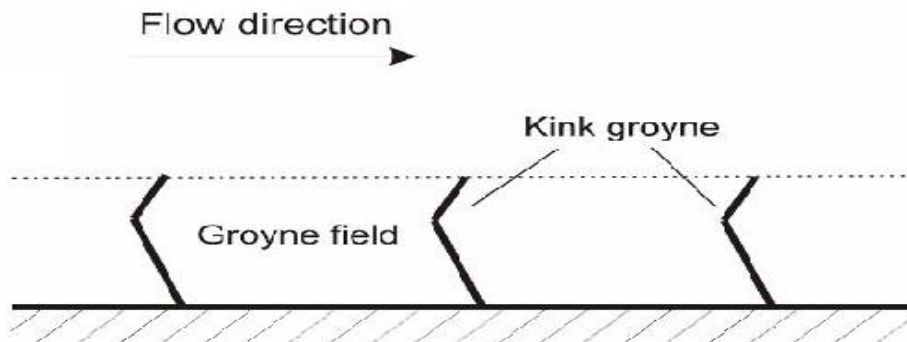
⁸M. F. M. Yossef, *ό.π.*, σ. 12

υπάρχουν παραδείγματα προστασία της όχθης με τη χρήση κοντών προβόλων, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι σε απόσταση 10 έως 100 φορές το μήκος τους, εκεί όπου οι όχθες προστατεύονται με λιθορριπή ή βλάστηση. Ακόμα, όταν η απόσταση μεταξύ των προβόλων είναι πολύ μεγάλη σχηματίζεται μια μαιανδρική ροή. Οι πρόβολοι που έχουν μεγάλο μήκος και είναι τοποθετημένοι σε μεγάλη απόσταση, μπορούν να οδηγήσουν σε υποβάθμιση του πυθμένα, διάβρωση της όχθης, αποτελώντας εμπόδιο στην πλοήγηση. Απεναντίας όταν οι πρόβολοι τοποθετούνται πολύ κοντά, αυξάνεται το κόστος κατασκευής και μειώνεται η αποτελεσματικότητα τους χωρίς να γίνεται η αξιοποίηση του μεμονωμένου προβόλου με τον καλύτερο τρόπο.

Προσανατολισμός προβόλων: Η τοποθέτηση των προβόλων μπορεί να γίνεται είτε κάθετα στη ροή είτε με κλίση προς αυτή (Σχήμα 1.3). Ο εκάστοτε προσανατολισμός επηρεάζει με διαφορετικό τρόπο τη ροή, επιδρώντας διαφορετικά στην εναπόθεση ιζήματος στην περιοχή γύρω από τον πρόβολο. Η τοποθέτηση ενός προβόλου προσέγκυσης γίνεται με κλίση προς τα κατάντη, οδηγώντας έτσι στην προσέγκυση της ροής προς τον εαυτό του. Αντίθετα με κλίση προς τα ανάντη τοποθετούνται οι πρόβολοι απώθησης, οι οποίοι απωθούν τη ροή και οι πρόβολοι εκτροπής, οι οποίοι εκτρέπουν τη ροή μακριά από την όχθη. Επίσης, υπάρχουν και οι κεκαμμένοι πρόβολοι (kinkgroynes) (Σχήμα 1.4), που χρησιμοποιήθηκαν σε πρόσφατες μελέτες και συνδύαζαν τα πλεονεκτήματα των προς τα κατάντη και ανάντη κεκλιμένων προβόλων.



Σχήμα 1.3: Προσανατολισμός προβόλων (Διαδίκτυο 9).



Σχήμα 1.4: Κεκαμμένοι πρόβολοι (Διαδίκτυο 10).

Στάθμη στέψης: Ο προσδιορισμός της στάθμης της στέψης γίνεται ανάλογα με το σκοπό και τα προβλήματα που παρουσιάζονται λόγω των πλημμυρικών παροχών και του πάγου. Για να προστατευτεί η όχθη θα πρέπει η στέψη να είναι τουλάχιστον όσο ψηλά είναι και η όχθη. Για την αποφυγή της επικάλυψης της στέψης με πάγο, η στάθμη της θα πρέπει να είναι σε υψηλότερα επίπεδα από τα αναμενόμενα του πάγου. Η στέψη πρέπει να είναι επίπεδη ή με κλίση προς τα κατάντη από την όχθη προς την άκρη του προβόλου. Για προστασία της όχθης ο Alvarez (1989) προτείνει του προβόλους με κεκλιμένη στέψη με κλίση από 0.1 έως 0.25, λόγω της ικανότητας τους να μειώνουν τη διάβρωση του εδάφους στη ρίζα του προβόλου, της ανάγκης χρησιμοποίησης λιγότερου υλικού κατασκευής και της γρηγορότερης εναπόθεσης ιζήματος μεταξύ των προβόλων. Για τον καλύτερο έλεγχο της ναυσιπλοΐας οι πρόβολοι με επίπεδη στέψη δουλεύουν καλύτερα κάθετα στη ροή

ή με κλίση προς τα κατάντη, ενώ οι πρόβολοι με κεκλιμένη στέψη δουλεύουν καλύτερα κάθετα ή με κλίση προς τα ανάντη⁹

Διατομή: Τα πλάτη της στέψης κυμαίνονται από 1m έως 6m και οι πλευρικές κλίσεις από 1:1.25 έως 1:1.5. Ο έλεγχος του ελάχιστου πλάτους στέψης (1m) γίνεται από τον εξοπλισμό που τοποθετεί τους προβόλους, ενώ πιο ευρείς στέψεις κάνουν ευκολότερη την τοποθέτηση.

Υλικά κατασκευής: Από ένα ευρύ φάσμα υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των προβόλων παραδείγματα αποτελούν οι ξύλινοι πάσσαλοι, οι κορμοί δέντρων, οι σάκοι άμμου, οι βράχοι, τα προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος, το σύρμα και ο χάλυβας.

Διάβρωση εδάφους: Κατά τον προσδιορισμό του βάθους της θεμελίωσης των προβόλων θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν το αναμενόμενο βάθος διάβρωσης του πυθμένα.

1.4 Επιρροή των εγκάρσιων προβόλων στα ποτάμια

1.4.1 Πεδίο ροής κοντά σε έναν πρόβολο

Το πεδίο ροής κοντά στους προβόλους εμφανίζει σημαντικά στοιχεία διαφοροποίησης στην περίπτωση τους ενός προβόλου σε σχέση με μια σειρά από προβόλους. Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εστιάζεται στη χρήση μεμονωμένου προβόλου, η οποία τεκμηριώνεται με την διεξαγωγή πειράματος που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια.

Ο πρόβολος περιορίζει ένα συγκεκριμένο τμήμα της διατομής του ποταμού, επηρεάζοντας έτσι τη δομή της ροής στη γύρω από αυτόν περιοχή. Εξαιτίας της συστολής της διατομής, η μέση ταχύτητα και η παροχή επηρεάζονται, με αποτέλεσμα να αυξάνονται. Η εν λόγω αύξηση της μέσης ταχύτητας οδηγεί σε αύξηση των κλίσεων της και σε πιο έντονη παραγωγή τύρβης. Σύμφωνα με τη μελέτη αρκετών ερευνητών σχετικά με τη μορφή της ροής στην περιοχή γύρω από τον πρόβολο, επισημαίνονται τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

⁹M. F. M. Yossef, *ό.π.*, σ. 13

- Η περιοχή αποκόλλησης.
- Οι μετακινούμενοι οριζόντιοι μεγάλοι στρόβιλοι ή δίνες.
- Η διακύμανση της στάθμης του νερού.

1.4.2 Γεωμετρία της περιοχής αποκόλλησης

Τα χαρακτηριστικά της περιοχής αποκόλλησης που σχηματίζεται πίσω από ένα πρόβολο, ερευνήθηκαν από αρκετούς ερευνητές, όπως Ishii et al. (1983), Chen & Ikeda (1997) και Ouillon & Dartus. Οι μελέτες αυτές έδωσαν μια πρώτη εικόνα για τη γεωμετρία της περιοχής αποκόλλησης κατάντη ενός προβόλου σε ένα ορθογώνιο κανάλι. Σε έρευνα σχετικά με τη ζώνη επανακυκλοφορίας που πραγματοποιήθηκε στο ποτάμι Colorado κατά μήκος του οποίου υπήρχαν μπάρες από άμμο παρατηρήθηκε διαχωρισμός του πεδίου ροής σε τέσσερις κύριες ζώνες¹⁰:

- Την κύρια ζώνη ροής.
- Τη ζώνη ανακυκλοφορίας της ροής.
- Το συνοριακό στρώμα.
- Τη ζώνη επανακόλλησης.

Λόγω της μείωσης του πλάτους του καναλιού η ταχύτητα της ροής επιταχύνεται από την άκρη του προβόλου έως την απέναντι όχθη. Αυτή ονομάζεται κύρια ζώνη ροής. Η ζώνη ανακυκλοφορίας αποτελείται από δύο σχετικά μεγάλες δίνες και εμφανίζεται στην κατάντη πλευρά του προβόλου. Από τις δύο δίνες το κέντρο της μεγαλύτερης βρίσκεται σε μια απόσταση περίπου έξι φορές το μήκος του προβόλου, ενώ της μικρότερης σε απόσταση μια φορά το μήκος του προβόλου. Ανάμεσα στην κύρια ζώνη και τη ζώνη ανακυκλοφορίας, δημιουργείται ένα διατμητικό στρώμα. Η ζώνη συνήθως απλοποιείται από αρκετούς ερευνητές σε ένα σημείο, το οποίο ορίζεται ως το σημείο εκείνο όπου η γραμμή ροής επανακολλάται στο σύνορο του καναλιού. Εξαιτίας όμως του μη μόνιμου χαρακτήρα των δινών στο διατμητικό στρώμα, της ασταθούς ισορροπίας της συμπαράσυρσης ρευστού και της βαθμίδας πίεσης μεταξύ κύριας ζώνης και της ζώνης επανακυκλοφορίας, το στιγμιαίο

¹⁰M. F. M. Yossef, "The effect of groynes on rivers", 23.8.2002, διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Yossef/publication/228716610_The_Effect_of_Groynes_on_Rivers/links/0c96052e119a07aa07aa000000/The-Effect-of-Groynes-on-Rivers.pdf, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022, σ. 19

σημείο επανακόλλησης παλινδρομεί μπρος και πίσω. Ακόμα, μπορούμε να θεωρήσουμε ως ανάντη άκρο της ζώνης επανακόλλησης το σημείο όπου η μέγιστη στιγμιαία ταχύτητα ισούται με το μηδέν και αντίστοιχα κατόντη άκρο το σημείο όπου η ελάχιστη στιγμιαία ταχύτητα ισούται με το μηδέν. Σύμφωνα με τους Chen & Ikeda (1997) παρατηρήθηκε διακύμανση του μήκους της ζώνης επανακόλλησης, με μεγαλύτερο το μήκος περίπου δεκαεπτά φορές το μήκος του προβόλου και μικρότερο το μήκος περίπου 11 φορές το μήκος του προβόλου. Παρόλα αυτά, όσον αφορά το χρόνο ως μέσο σημείο επανακόλλησης μπορεί να ορισθεί το σημείο εκείνο στο οποίο η μέση ως προς το χρόνο ταχύτητα είναι ίση με το μηδέν. Οι Chen & Ikeda (1997) συμφωνούν ότι το σημείο επανακόλλησης τοποθετείται σε μια απόσταση περίπου 14 φορές το μήκος του προβόλου. Σε μια σύγκριση μεταξύ αριθμητικών μοντέλων και πειραματικών αποτελεσμάτων υπήρξε διάσταση απόψεων μεταξύ των Ouillon & Dartus (1997) και των Tingsanchali & Maheswari (1990). Οι μεν ανέφεραν ότι σύμφωνα με τα πειράματα το μήκος επανακόλλησης είναι της τάξεως των 12.5 φορές του μήκους του προβόλου, ενώ οι δε ότι είναι της τάξεως των 11.5 φορές του μήκους των προβόλων¹¹.

Σε μια πειραματική έρευνα που πραγματοποίησαν οι Ishii et al. (1983) διερεύνησαν την επιρροή κάποιων αδιάστατων παραμέτρων στο σχήμα της περιοχής αποκόλλησης σε υποκρίσιμη ροή. Προέκυψε ότι υπήρξε ελάχιστη επιρροή στο σχήμα της ζώνης αποκόλλησης από τον αριθμό Froude (Fr) και οι διαστάσεις του μήκους της κυμαίνονταν από 10 έως 12 φορές το μήκος του προβόλου και το μέγιστο πλάτος, μετρούμενο από το πλευρικό τοίχωμα, ήταν δύο φορές το μήκος του προβόλου (για σταθερή γωνία 90° και μήκος προβόλου ίσο με το 10% του πλάτους του καναλιού). Με την αύξηση του σχετικού μήκους του προβόλου από 10% σε 40% του πλάτους του καναλιού, το αντίστοιχο μήκος της ζώνης αποκόλλησης μειώθηκε από δώδεκα σε επτά φορές το μήκος του προβόλου, ενώ η γωνία επανακόλλησης της γραμμής ροής του ορίου, με την οποία η κύρια ζώνη και η ζώνη αποκόλλησης διαχωρίζονται, παρέμεινε σταθερή στις 15°. Επιπρόσθετα, η γεωμετρία της ζώνης αποκόλλησης παραμένει σχεδόν σταθερή έπειτα από την αλλαγή της γωνίας προβολής του προβόλου στη ροή από 90° σε 150° προς τα κατόντη. Ωστόσο με τη μείωση της γωνίας από 90° σε 30° προς τα ανάντη το σχετικό μήκος μειώθηκε από δεκατέσσερις σε έντεκα φορές το μήκος του προβόλου αλλά το σχετικό πλάτος και η γωνία

¹¹M. F. M. Yossef, *ό.π.*, σ. 20

επανακόλλησης παραμένουν σταθερά και ισούνται με δύο φορές το μήκος του προβόλου και 10° αντίστοιχα. Η ανάντη γωνία αποκόλλησης εξαρτάται μόνο από τη γωνία προβολής του προβόλου στη ροή και κυμαίνεται από 30° έως 60° για αλλαγή στη γωνία προβολής του προβόλου από 30° έως 90° , ενώ παραμένει σταθερή στις 60° για κάθε γωνία προβολής του προβόλου μεγαλύτερη των 90° .

Από τα ανωτέρω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το μήκος της περιοχής αποκόλλησης ποικίλει από επτά έως δεκαπέντε φορές το μήκος του προβόλου. Το σχετικό πλάτος της ζώνης δεν μεταβάλλεται και έχει τιμή μικρότερη από δύο φορές το μήκος του προβόλου. Η κατάντη γωνία επανακόλλησης μπορεί να κυμαίνεται από 15° έως 10° με τις υψηλότερες τιμές για σχετικά υψηλή τραχύτητα τοιχώματος, ανάλογα βέβαια με τη σχετική τραχύτητα του τοιχώματος. Επιπλέον ανάλογα με τη γωνία προβολής του προβόλου στη ροή η ανάντη γωνία επανακόλλησης κυμαίνεται από 30° έως 60° ¹².

1.4.3 Οριζόντιες μεγάλες δίνες

Μια άλλη σημαντική πτυχή του πεδίου ροής κοντά σε έναν πρόβολο είναι οι μεγάλες οριζόντιες δίνες που ξεκινούν από την κορυφή του προβόλου. Οι Chen & Ikeda (1997) βρήκαν μέσω της μέτρησης των διακυμάνσεων της στάθμης του νερού κατά μήκος της κεντρικής γραμμής των διαδιδόμενων δινών, ότι υπάρχουν περιοδικές διακυμάνσεις της στάθμης του νερού. Αυτές οι διακυμάνσεις έχουν διαφορά φάσης μεταξύ των σημάτων, σε δύο διαδοχικά σημεία κατά μήκος του άξονα των διαδιδόμενων δινών. Ο χρόνος υστέρησης μεταξύ των αιχμών των δύο σημάτων ισούται με το χρόνο που χρειάζεται μια διαδιδόμενη δίνη να μετακινηθεί από το ένα σημείο στο άλλο. Χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους για την ανάλυση της περιοδικότητας και της χρονικής υστέρησης μεταξύ ενός ζεύγους σημάτων, βρέθηκε ότι η μέση ταχύτητα κίνησης των δινών είναι περίπου σταθερή και παίρνει μια τιμή ελαφρώς υψηλότερη (1.5%) από τη μέση ταχύτητα κίνησης της ροής. Καθώς οι δίνες κινούνται προς τα κατάντη συγχωνεύονται, με αποτέλεσμα η κλίμακα του μήκους τους να αυξάνεται. Δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης είναι σταθερή, η χρονική κλίμακα των δινών θα πρέπει επίσης να αυξηθεί προς τα κατάντη. Οι Chen & Ikeda (1997) έδειξαν την αυξανόμενη τάση στη χρονική κλίμακα των οριζόντιων δινών, η

¹²M. F. M. Yossef, *ό.π.*, σ. 20

οποία δείχνει την ύπαρξη μιας συχνής συγχώνευσης δινών μικρής κλίμακας, που ξεκινούν από την κορυφή του προβόλου μέχρι μια ορισμένη απόσταση και στη συνέχεια παραμένουν σταθερές.

1.4.4 Διακύμανση της στάθμης του νερού

Η επιφάνεια του νερού παλινδρομεί καθώς οι μεγάλες οριζόντιες δίνες ενώνονται προς τα κατάντη, γι' αυτό και οι ιδιότητες των δινών θα μπορούσαν να μελετηθούν μετρώντας τη διακύμανση της επιφάνειας του νερού. Γενικά, παρατηρείται μια αύξηση της στάθμης του νερού στην ανάντη πλευρά του προβόλου και μια μείωση στην κατάντη πλευρά. Οι Chen & Ikeda (1997) μελέτησαν τις διακυμάνσεις της επιφάνειας του νερού σχεδιάζοντας διαγράμματα της τετραγωνικής ρίζας των διακυμάνσεων αυτών σε διάφορες διατομές κατάντη του προβόλου. Για κάθε διατομή βρέθηκε μια κορυφή, η οποία υποδείκνυε το κέντρο της μεγάλης δίνης. Ωστόσο, η επιρροή του προβόλου στις διακυμάνσεις εκτείνεται σε μια απόσταση ίση με δέκα φορές το μήκος του προβόλου¹³.

¹³M. F. M. Yossef, *ό.π.*, σ. 21

Κεφάλαιο 2: Στοιχεία της ροής σε ανοικτούς αγωγούς

2.1 Ορισμός

Όταν το κινούμενο ρευστό μέσα σε έναν αγωγό δεν περιορίζεται πλήρως από τα στερεά τοιχώματα αλλά έχει ελεύθερη επιφάνεια, η πίεση της οποίας ισούται με την ατμοσφαιρική πίεση, ο αγωγός είναι γνωστός ως ανοικτός αγωγός ή αγωγός ελεύθερης ροής. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή στους αγωγούς αυτούς είναι η βαρύτητα, η αδράνεια και το ιξώδες¹⁴.

2.2 Είδη ανοικτών αγωγών

Οι ανοικτοί αγωγοί μπορούν να διακριθούν σε φυσικούς, τεχνητούς, πρισματικούς και μη πρισματικούς ανάλογα με τον τρόπο διαμόρφωσης της διατομής και της κλίσης του πυθμένα τους.

Φυσικοί ονομάζονται οι αγωγοί, οι οποίοι έχουν δημιουργηθεί από φυσικές διεργασίες χωρίς ουσιαστική παρέμβαση του ανθρώπου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι ποταμοί, οι χείμαρροι, τα ρυάκια και τα ρέματα.

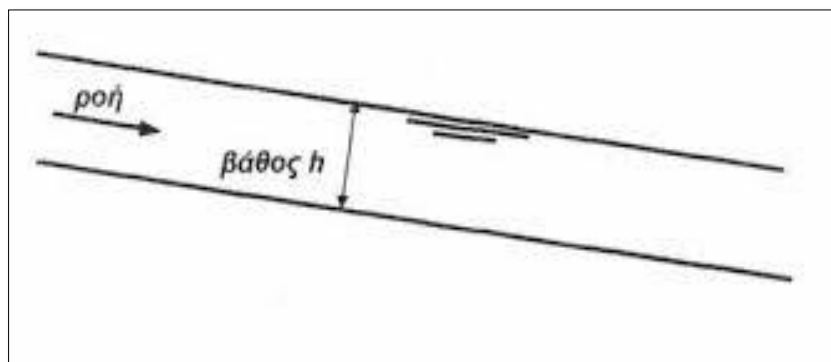
Τεχνητοί ονομάζονται οι αγωγοί που έχουν δημιουργηθεί έπειτα από ανθρώπινη παρέμβαση σύμφωνα με την οποία μπορεί να καθοριστεί και το σχήμα διατομής τους. Οι συνηθέστεροι τύποι αγωγών σύμφωνα με τη διατομή τους είναι οι ορθογωνικοί, οι τραπεζοειδείς, οι τριγωνικοί και οι κυκλικοί. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα κανάλια άρδευσης και αποστράγγισης, οι διώρυγες, οι αποχετεύσεις λυμάτων και όμβριων υδάτων.

Πρισματικοί ονομάζονται οι αγωγοί με αμετάβλητη διατομή και κλίση πυθμένα, ενώ **μη πρισματικοί** ονομάζονται οι αγωγοί όπου η διατομή και η κλίση πυθμένα μεταβάλλονται κατά μήκος τους.

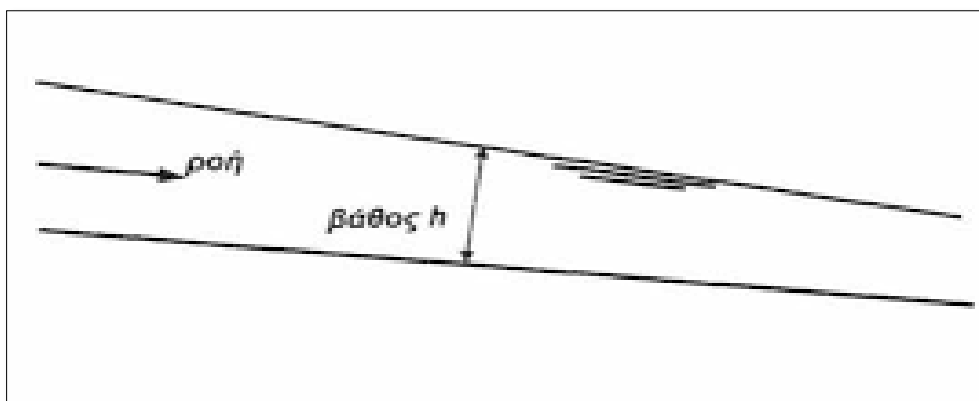
¹⁴ Π. Πρίνος, *Υδραυλική ανοικτών αγωγών*, Θεσσαλονίκη 2009, σ.1

2.3 Είδη ροής σε ανοικτούς αγωγούς

Με βάση τη χρονική μεταβολή του βάθους και της μέσης ταχύτητας της ροής, η ροή μπορεί να διακριθεί σε μόνιμη και μη μόνιμη. Ως **μόνιμη** ορίζεται η ροή όπου το βάθος, η παροχή Q και η μέση ταχύτητα δεν μεταβάλλονται με το χρόνο, ενώ όταν οι παραπάνω ποσότητες μεταβάλλονται με το χρόνο η ροή ονομάζεται **μη μόνιμη**. Ακόμα, **ομοιόμορφη** θεωρείται η ροή όταν το βάθος, η παροχή και η μέση ταχύτητα της δεν μεταβάλλονται κατά μήκος του αγωγού (Σχήμα 2.1), ενώ όταν υπάρχει μεταβολή των προαναφερθέντων μεγεθών η ροή ονομάζεται **ανομοιόμορφη** (Σχήμα 2.2) ¹⁵.



Σχήμα 2.1: Ομοιόμορφη ροή (Διαδίκτυο 11).



Σχήμα 2.2: Ανομοιόμορφη ροή (Διαδίκτυο 12).

¹⁵ Π. Πρίνος, *Υδραυλική κλειστών και ανοικτών αγωγών*, Θεσσαλονίκη 2015, σ. 236

2.4 Κατηγορίες ροής με βάση τους αδιάστατους αριθμούς

Η ροή σε ανοικτούς αγωγούς επηρεάζεται από τις δυνάμεις λόγω αδράνειας, βαρύτητας και ιξώδους. Η σχέση ανάμεσα στις δυνάμεις αυτές εκφράζεται με δυο αδιάστατους αριθμούς, τον αριθμό Reynolds (Re) και τον αριθμό Froude (Fr) βάσει των οποίων γίνεται ο προσδιορισμός της ροής.

Ο λόγος της δύναμης αδράνειας προς τη δύναμη ιξώδους (ανά μοναδιαίο όγκο) είναι γνωστός ως αριθμός Reynolds (Re) και εκφράζεται με τη σχέση $Re = \frac{U \times L}{\nu}$, όπου U είναι η χαρακτηριστική ταχύτητα, L το χαρακτηριστικό μήκος και ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Για χαμηλές τιμές του Re η ροή ακολουθεί συγκεκριμένη τροχιά και ονομάζεται στρωτή ροή, ενώ για μεγάλες τιμές η ροή δεν ακολουθεί συγκεκριμένες τροχιές, καθώς πραγματοποιείται ανάμιξη μεταξύ διάφορων στοιβάδων του ρευστού, και ονομάζεται τυρβώδης.

Εν συνεχεία, ως αριθμός Froude (Fr) ορίζεται το πηλίκο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις βαρύτητας (ανά μονάδα όγκου). Εκφράζεται με τη σχέση $Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}}$, όπου g η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας. Ανάλογα με το μέγεθος του αριθμού Froude η ροή διακρίνεται σε υποκρίσιμη ή ποτάμια ($Fr < 1$), κρίσιμη ($Fr = 1$), υπερκρίσιμη ή χειμαρρώδης ($Fr > 1$)¹⁶.

2.5 Βασικές εξισώσεις

Για την περιγραφή της ροής σε ανοικτούς αγωγούς χρησιμοποιούμε τις παρακάτω βασικές εξισώσεις:

- Την Εξίσωση Συνέχειας η οποία αναπτύσσεται από τη γενική αρχή διατήρησης της μάζας, που λέει ότι η μάζα ενός συστήματος παραμένει σταθερή στον χρόνο.

$$Q = A_1 U_1 = A_2 U_2 = A_3 U_3$$

- Την Εξίσωση Ενέργειας

$$\pm h_m + \left(\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + Z_1 \right) = \left(\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 \right) + h_L^{(1 \rightarrow 2)}$$

¹⁶Frank M. White, *Fluid mechanics*, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής 1999, σ. 661 - 663

Όπου:

$$\frac{v^2}{2g} = \text{Φορτίο ταχύτητας}$$

$$\frac{P}{\gamma} = \text{Φορτίο πίεσης}$$

Z = Δυναμικό φορτίο

h_m = Φορτίο μηχανών (αντλία «+», στρόβιλος «-»)

h_L = Τοπικές απώλειες φορτίου και απώλειες φορτίου λόγω τριβών

- Την Εξίσωση Ορμής σύμφωνα με την οποία η συνισταμένη των δυνάμεων που δρουν πάνω στο υγρό που περιέχεται στον όγκο ελέγχου ισούται με την ορμή εξόδου μείον την ορμή εισόδου ανά μονάδα χρόνου.

$$\Sigma F_i = \rho \times Q (V_{\text{εκροής}} - V_{\text{εισοής}})$$

- Την Εξίσωση Manning

$$V = \frac{m}{n} \times R_h^{2/3} \times S^{1/2}$$

Όπου:

R_h η υδραυλική ακτίνα (m)

$$m = 1$$

S η υδραυλική κλίση

n ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning

Κεφάλαιο 3: Πειραματική διάταξη

Το πείραμα υλοποιήθηκε στον εργαστηριακό ανοικτό αγωγό του εργαστηρίου Ρευστομηχανικής και Ρευστοδυναμικών Μηχανών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου που βρίσκεται στην Πάτρα.

3.1 Εργαστηριακός ανοικτός αγωγός

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε ανοικτό αγωγό ορθογωνικής διατομής μήκους 8 m, πλάτους 20 cm και βάθους ροής 30 cm. Ο πυθμένας του αγωγού είναι οριζόντιος (μπορεί να λαμβάνει διάφορες κλίσεις) και καλυμμένος με plexiglass όπως και τα πλευρικά του τοιχώματα (Εικόνα 3.1). Το plexiglass μας επιτρέπει να παρακολουθούμε τη ροή κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Στην είσοδο του καναλιού τοποθετήσαμε μια κατασκευή από καλαμάκια (Εικόνα 3.2) με την οποία επιτυγχάνεται ο ομοιομορφισμός της ροής, κατά την είσοδο της ροής στον αγωγό. Η τροφοδοσία του καναλιού γίνεται από δεξαμενή σταθερού υδραυλικού φορτίου που βρίσκεται στο εργαστήριο και η παροχή ρυθμίζεται μέσω αντλίας.



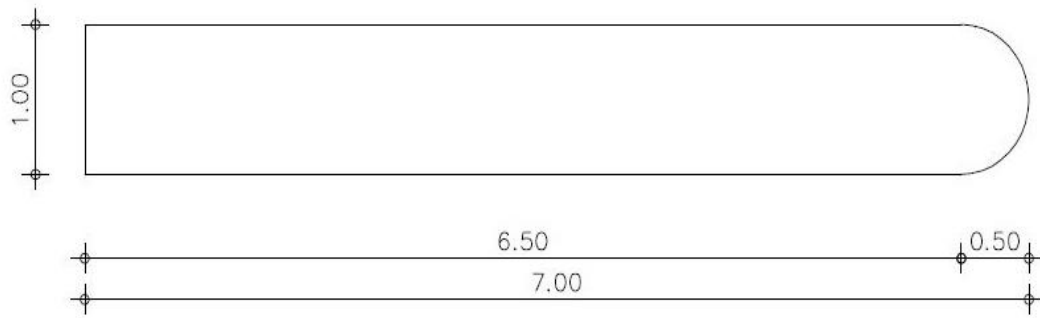
Εικόνα 3.1: Ανοικτός αγωγός εργαστηρίου.



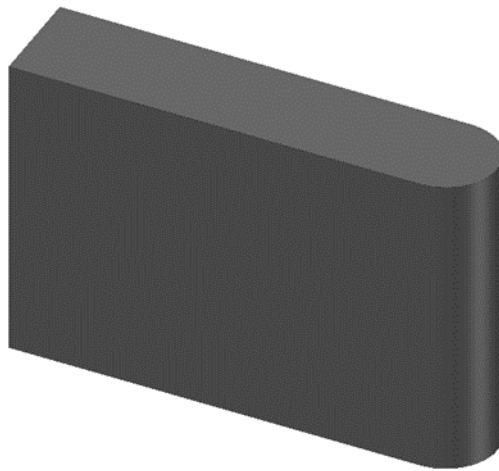
Εικόνα 3.2: Κατασκευή ομοιομορφισμού της ροής.

3.2 Ξύλινο ομοίωμα (Μοντέλο)

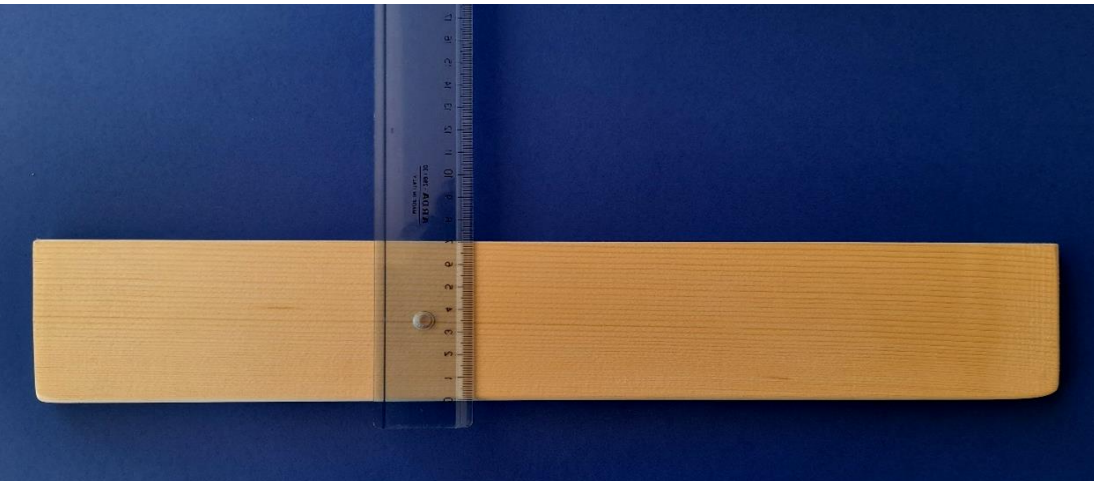
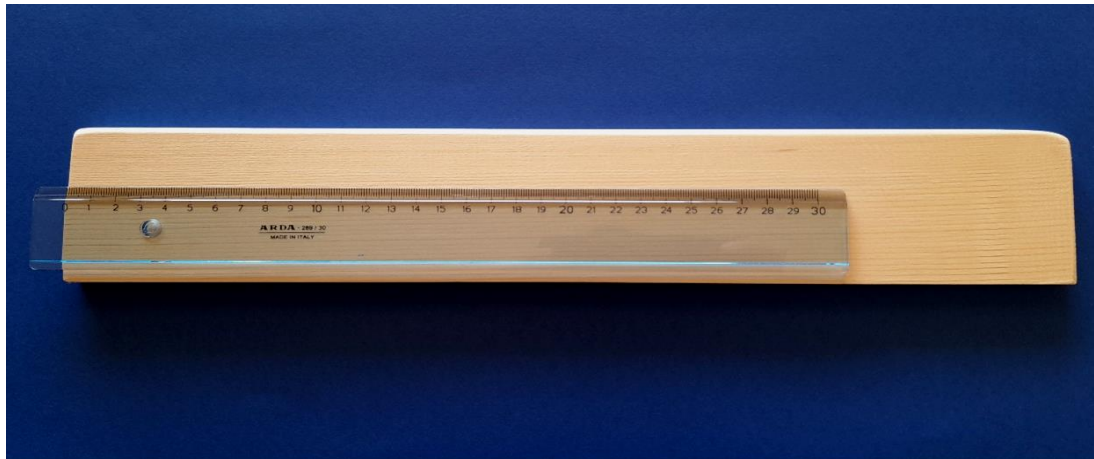
Το ξύλινο ομοίωμα είναι κατασκευασμένο από ξύλο πεύκου και έχει ορθογωνική διατομή με ένα ημικυκλικό άκρο (Σχήματα 3.1 & 3.2). Έχει μήκος 7 cm, πλάτος 1 cm και ύψος 40 cm. Η αναλογία του μήκους του προς το πλάτος του εργαστηριακού αγωγού είναι 1:3 ($\cong 20/7$), αναλογία που μπορεί να παρατηρηθεί σε ποτάμια. Για την κατασκευή του ομοιώματος κόψαμε πρώτα το ξύλο στις διαστάσεις που αναφέραμε παραπάνω (Εικόνα 3.3). Έπειτα το τρίψαμε με γυαλόχαρτο νούμερο 800 για να μειώσουμε τον συντελεστή τριβής και να αποκτήσει μια σχετικά λεία επιφάνεια, μειώνοντας την φυσική του τραχύτητα. Στη συνέχεια το περάσαμε με άχρωμο βερνίκι νερού για να αντισταθεί στην υγρασία, όταν τοποθετηθεί μέσα στον εργαστηριακό αγωγό και έρθει σε επαφή με το νερό. Τέλος, το περάσαμε με ακόμα ένα άχρωμο βερνίκι για να αποκτήσει αυτή τη φορά όσο το δυνατόν πιο λεία επιφάνεια (Εικόνα 3.4).



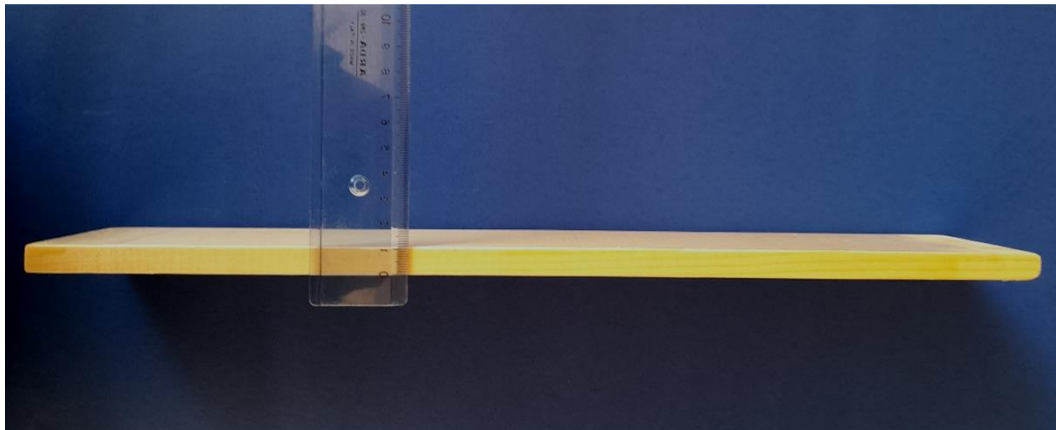
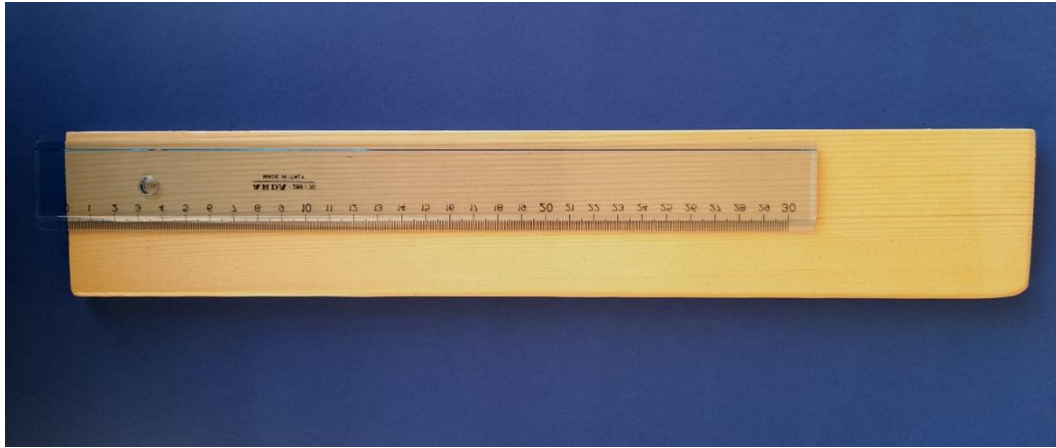
Σχήμα 3.1: Κάτοψη ξύλινου ομοιώματος.



Σχήμα 3.2: Τρισδιάστατη απεικόνιση ξύλινου ομοιώματος.



Εικόνα 3.3: Όψεις ξύλινου ομοιώματος στην αρχική του φάση.

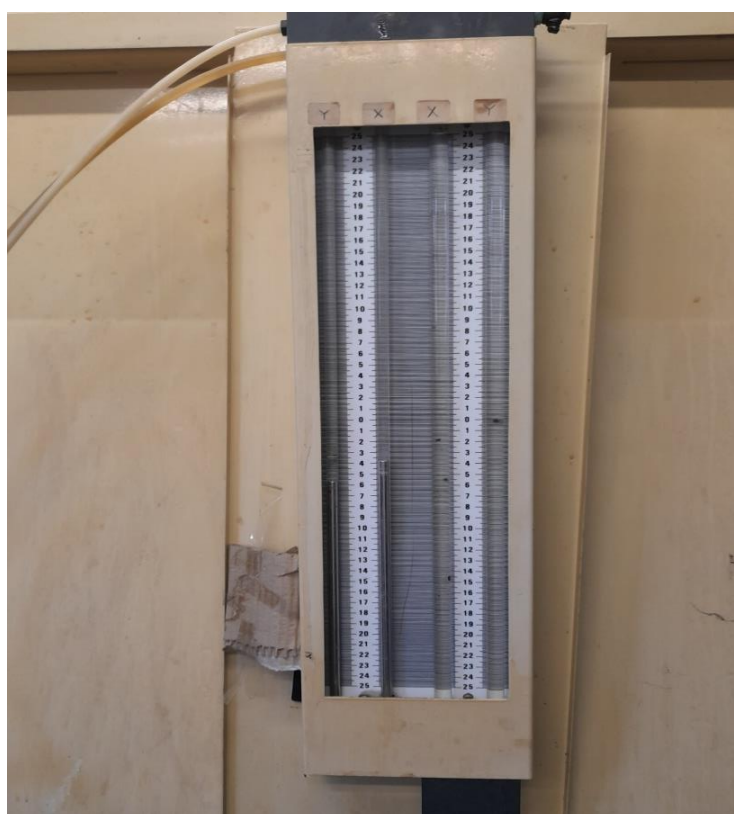


Εικόνα 3.4: Όψεις ξύλινου ομοιώματος στην τελική του φάση.

3.3 Μέτρηση παροχής

Για να ρυθμίσουμε την παροχή της ροής στον ανοικτό αγωγό χρησιμοποιήσαμε το μανόμετρο Νερού - Αέρα, το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω στον αγωγό του εργαστηρίου. Η παροχή προσδιορίζεται από την σχέση $Q = 2 \times 10^{-3} \sqrt{\Delta H}$, όπου Q η παροχή σε m^3/s και ΔH η διαφορά πιέσεων από το μανόμετρο σε cm .

Επίσης, ένας άλλος τρόπος για να μετρήσουμε την παροχή είναι να χρησιμοποιήσουμε μανόμετρο Υδραργύρου - Νερού. Στην περίπτωση αυτή η παροχή προσδιορίζεται από την σχέση $Q = 7,1 \times 10^{-3} \sqrt{\Delta H}$, όπου Q η παροχή σε m^3/s και ΔH η διαφορά πιέσεων από το μανόμετρο σε cm Hg (Εικόνα 3.5).



Εικόνα 3.5: Μανόμετρο Υδραργύρου – Νερού και Νερού - Αέρα.

3.4 Μέτρηση στάθμης

Κατά την πειραματική διαδικασία έγιναν μετρήσεις της στάθμης του νερού ανάντη και κατάντη του ομοιώματος του εγκάρσιου προβόλου. Συγκεκριμένα, σε απόσταση 62 cm πριν και 98 cm μετά από τη θέση που τοποθετήθηκε ο πρόβολος έγιναν διάφορες μετρήσεις, έτσι ώστε να παρατηρήσουμε τη διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε σταθμήμετρο τύπου ακίδας (Εικόνα 3.6) και στα σημεία κοντά στον εγκάρσιο πρόβολο χρησιμοποιήσαμε χάρακα (Εικόνα 3.7), για την μέτρηση της στάθμης.



Εικόνα 3.6: Σταθμήμετρο τύπου ακίδας.



Εικόνα 3.7: Χάρακας.

Κεφάλαιο 4: Πειραματική διαδικασία

4.1 Υπολογισμός και Ρύθμιση παροχής

Η παροχή στον ανοικτό αγωγό ρυθμίστηκε με την βοήθεια του μανόμετρου σύμφωνα με τα αποτελέσματα των παρακάτω υπολογισμών. Μελετήθηκε η περίπτωση υποκρίσιμης ροής με $Fr < 1$. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιήθηκε για αριθμό Froude της ροής ίσο με 0.2 (Εικόνα 4.1).

Για $Fr = 0.2$ προκύπτει ότι :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gd}} \Rightarrow U = Fr \times \sqrt{gd} = 0.2 \times \sqrt{9.81 \times 0.1} \Rightarrow U = 0.1981 \text{ m/s}$$

$$A = d \times B = 0.1 \times 0.2 = 0.02 \text{ m}^2$$

$$Q = U \times A = 0.1981 \text{ m/s} \times 0.02 \text{ m}^2 \Rightarrow Q = 0.003962 \text{ m}^3/\text{s} \text{ ή}$$

$$Q = 3.962 \text{ lt/s} \text{ (} Q \cong 4 \text{ lt/s)}$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{B \times d}{B + 2d} = \frac{0.1 \times 0.2}{0.2 + 2 \times 0.1} = \frac{0.02}{0.4} \Rightarrow R_h = 0.05 \text{ m}$$

$$Re = \frac{U \times R_h}{\nu} = \frac{0.1981 \times 0.05 \text{ m}^2/\text{s}}{1.005 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \Rightarrow Re = 0.9856 \times 10^4 \text{ ή } Re \cong 10^4$$

Όπου:

- Fr είναι ο αριθμός Froude (αδιάστατος)
- U η χαρακτηριστική ταχύτητα (m/s)
- g η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας (m^2/s)
- d το βάθος ροής, σε κλίμακα 1:100 (m)
- A η επιφάνεια του καναλιού (m^2)
- B το πλάτος του καναλιού, σε κλίμακα 1:100 (m)
- Q η παροχή (m^3/s)
- R_h η υδραυλική ακτίνα (m)
- P η βρεχόμενη περίμετρος (m)
- Re ο αριθμός Reynolds (αδιάστατος)
- ν το κινηματικό ιξώδες του ρευστού (m^2/s)

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα η τιμή της παροχής που χρειαζόμαστε για το πείραμα είναι ίση με 4 lt/s.

Το πείραμα θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και για τιμές Froude ίσες με 0.5 και 0.8, για τις οποίες θα είχαμε πάλι συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Συγκεκριμένα, επαναλαμβάνοντας τους παραπάνω υπολογισμούς λαμβάνουμε τις αντίστοιχες τιμές για την παροχή και τον αριθμό Reynolds (Re).

Για $Fr = 0.5$ προκύπτει ότι :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gd}} \Rightarrow U = Fr \times \sqrt{gd} = 0.5 \times \sqrt{9.81 \times 0.1} \Rightarrow U = 0.4952 \text{ m/s}$$

$$A = d \times B = 0.1 \times 0.2 = 0.02 \text{ m}^2$$

$$Q = U \times A = 0.4952 \text{ m/s} \times 0.02 \text{ m}^2 \Rightarrow Q = 0.009904 \text{ m}^3/\text{s} \quad \eta$$

$$Q = 9.904 \text{ lt/s} \quad (Q \cong 10 \text{ lt/s})$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{B \times d}{B + 2d} = \frac{0.1 \times 0.2}{0.2 + 2 \times 0.1} = \frac{0.02}{0.4} \Rightarrow R_h = 0.05 \text{ m}$$

$$Re = \frac{U \times R_h}{\nu} = \frac{0.4952 \times 0.05 \text{ m}^2/\text{s}}{1.005 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \Rightarrow Re = 2.464 \times 10^4 \quad \eta \quad Re \cong 2.5 \times 10^4$$

Για $Fr = 0.8$ προκύπτει ότι :

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gd}} \Rightarrow U = Fr \times \sqrt{gd} = 0.8 \times \sqrt{9.81 \times 0.1} \Rightarrow U = 0.7924 \text{ m/s}$$

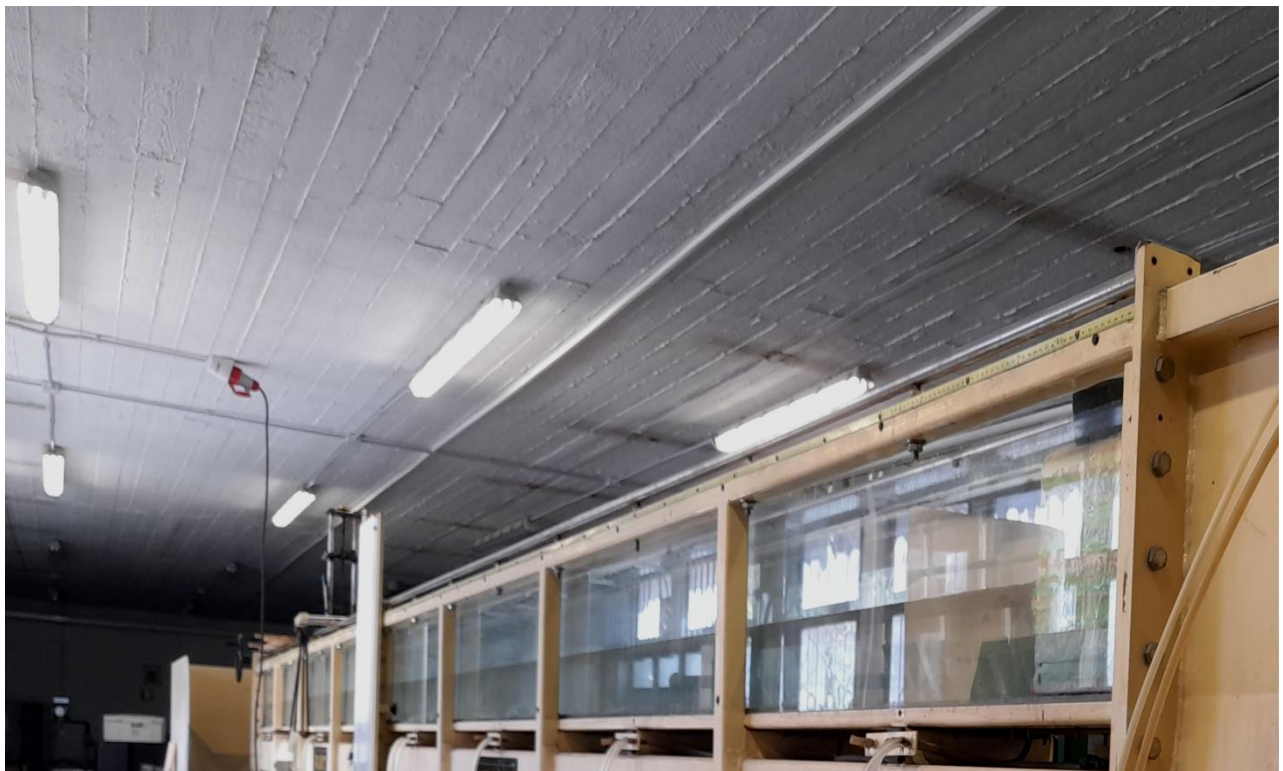
$$A = d \times B = 0.1 \times 0.2 = 0.02 \text{ m}^2$$

$$Q = U \times A = 0.7924 \text{ m/s} \times 0.02 \text{ m}^2 \Rightarrow Q = 0.015847 \text{ m}^3/\text{s} \quad \eta$$

$$Q = 15.847 \text{ lt/s} \quad (Q \cong 16 \text{ lt/s})$$

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{B \times d}{B + 2d} = \frac{0.1 \times 0.2}{0.2 + 2 \times 0.1} = \frac{0.02}{0.4} \Rightarrow R_h = 0.05 \text{ m}$$

$$Re = \frac{U \times R_h}{\nu} = \frac{0.7924 \times 0.05 \text{ m}^2/\text{s}}{1.005 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \Rightarrow Re = 3.942 \times 10^4 \quad \eta \quad Re \cong 3.9 \times 10^4$$



Εικόνα 4.1: Ομοιόμορφη ροή σε ανοικτό αγωγό.

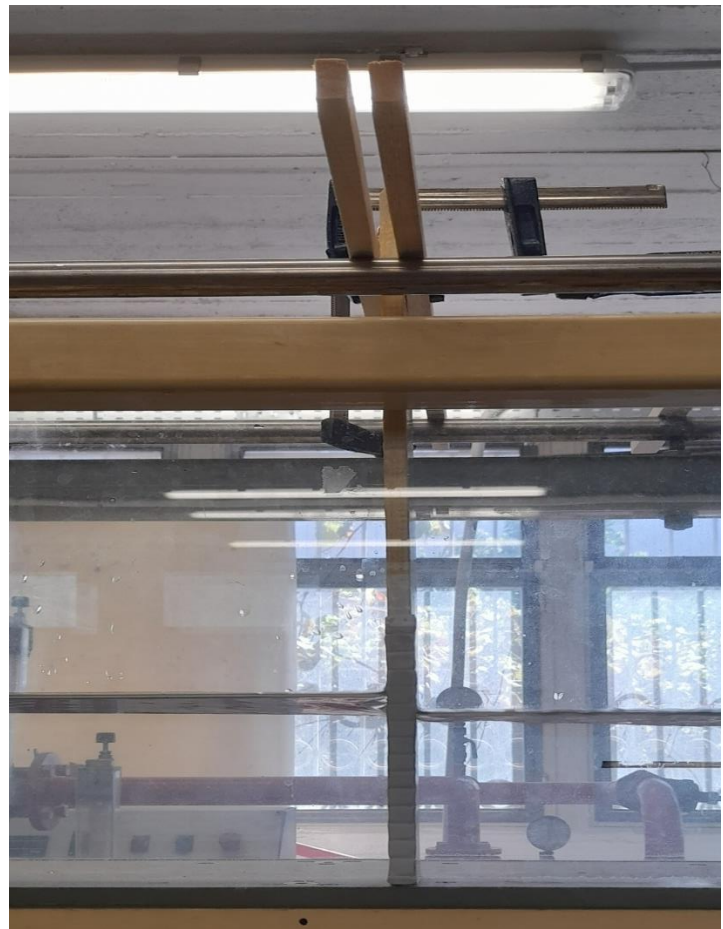
4.2 Τοποθέτηση ξύλινου ομοιώματος εγκάρσιου προβόλου

Το ξύλινο ομοίωμα τοποθετήθηκε κάθετα στο πλευρικό τοίχωμα του εργαστηριακού αγωγού και σε απόσταση 5.29 m από την είσοδο του αγωγού, απόσταση στην οποία θεωρείται ότι η ροή έχει αναπτυχθεί. Για να γίνει η κάθετη τοποθέτηση του προβόλου χρησιμοποιήθηκε αλφάδι και για να προσαρμοστεί κατάλληλα ώστε να μην υπάρχουν απώλειες στη ροή τοποθετήσαμε μια σειρά από αυτοκόλλητα στηρίγματα (multi tack) ανάμεσα στην κάθετη πλευρά του προβόλου και το τοίχωμα του ανοικτού αγωγού (Εικόνα 4.2).

Το μεγάλο ύψος του προβόλου, στην κατακόρυφη διεύθυνση, διευκολύνει την σταθεροποίηση του στο κανάλι αλλά ταυτόχρονα του εξασφαλίζει ότι θα παραμένει αβύθιστο σε οποιεσδήποτε συνθήκες ροής. Η σταθεροποίηση του ξύλινου ομοιώματος στον ανοικτό αγωγό γίνεται στο επάνω μέρος του. Εκατέρωθεν του προβόλου τοποθετούνται ξύλινα πηγάκια μήκους 40 cm έκαστο, τα οποία συγκρατούνται με μεταλλικούς σφιγκτήρες (Εικόνα 4.3). Επιπρόσθετα, το ημικυκλικό άκρο του ομοιώματος βρίσκεται μέσα στο σώμα του νερού (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.2: Τοποθέτηση αυτοκόλλητων στηριγμάτων.



Εικόνα 4.3: Σταθεροποίηση ξύλινου ομοιώματος.



Εικόνα 4.4: Ημικυκλικό άκρο ξύλινου ομοιώματος.

4.3 Μετρήσεις στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας

Για να παρατηρήσουμε τις διακυμάνσεις της ελεύθερης επιφάνειας του νερού στα σημεία που ήταν πιο απομακρυσμένα από τον εγκάρσιο πρόβολο χρησιμοποιήσαμε το σταθμήμετρο, το οποίο τοποθετήσαμε σε ειδική βάση στο επάνω μέρος του αγωγού. Οι μετρήσεις έγιναν σε απόσταση 3.5 cm από το τοίχωμα που ήταν τοποθετημένο το ξύλινο ομοίωμα. Για τα σημεία που βρίσκονταν κοντά στον εγκάρσιο πρόβολο χρησιμοποιήσαμε χάρακα. Η χρήση διαφορετικών οργάνων για την μέτρηση της στάθμης οφείλεται στο γεγονός ότι το σταθμήμετρο λόγω του μεγάλου μεγέθους της βάσης που ήταν τοποθετημένο δεν μπορούσε να προσεγγίσει τον πρόβολο (Εικόνα 4.5). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 23 μετρήσεις.



Εικόνα 4.5: Σταθμήμετρο και ξύλινο ομοίωμα.

4.4 Εφαρμογή ιχνηθέτη (tracer)

Για να παρατηρήσουμε καλύτερα τη διαμόρφωση του πεδίου ροής στον εργαστηριακό ανοικτό αγωγό αλλά και για να κατανοήσουμε καλύτερα πως συμπεριφέρεται η ροή, σε έναν ανοικτό αγωγό, με την παρουσία ενός εγκάρσιου προβόλου, εισήχθη κοντά στη θέση του προβόλου ποσότητα χρωματισμένου νερού (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Συμπεριφορά ιχνηθέτη εντός του πεδίου ροής.

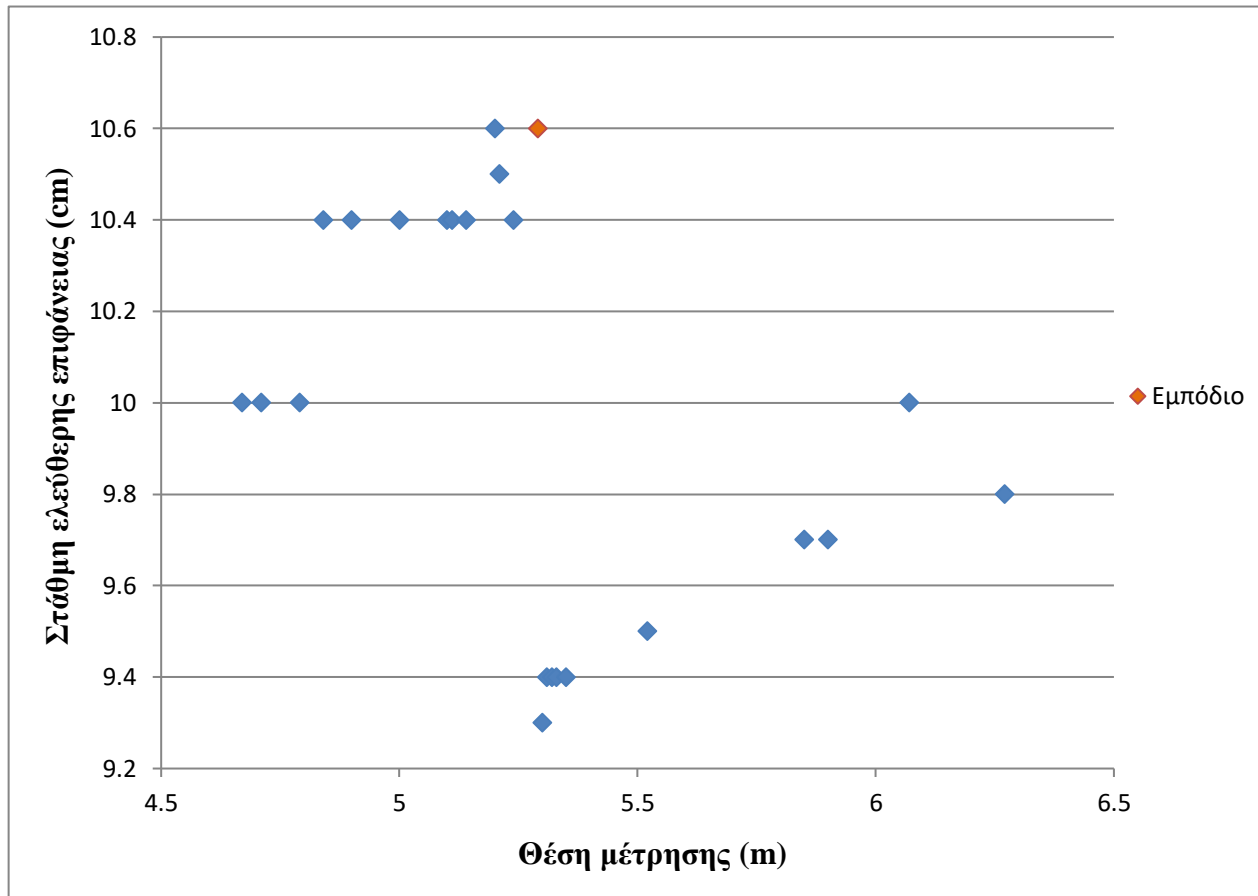
Κεφάλαιο 5: Ανάλυση και Αποτελέσματα

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έγιναν κατά μήκος του αγωγού σε διάφορα σημεία ανάντη και κατόντη του προβόλου, για να παρατηρηθεί η διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας. Στην πρώτη στήλη του πίνακα καταγράφεται η θέση όπου έγινε η μέτρηση και στη δεύτερη η αντίστοιχη στάθμη της. Ο πρόβολος είναι τοποθετημένος σε απόσταση 5.29 m από την είσοδο του αγωγού.

ΘΕΣΗ (m)	ΣΤΑΘΜΗ (cm)
4.67	10
4.71	10
4.79	10
4.84	10.4
4.9	10.4
5	10.4
5.1	10.4
5.11	10.4
5.14	10.4
5.2	10.6
5.21	10.5
5.24	10.4
5.29	10.6
5.3	9.3
5.31	9.4
5.32	9.4
5.33	9.4
5.35	9.4
5.52	9.5
5.85	9.7
5.9	9.7
6.07	10
6.27	9.8

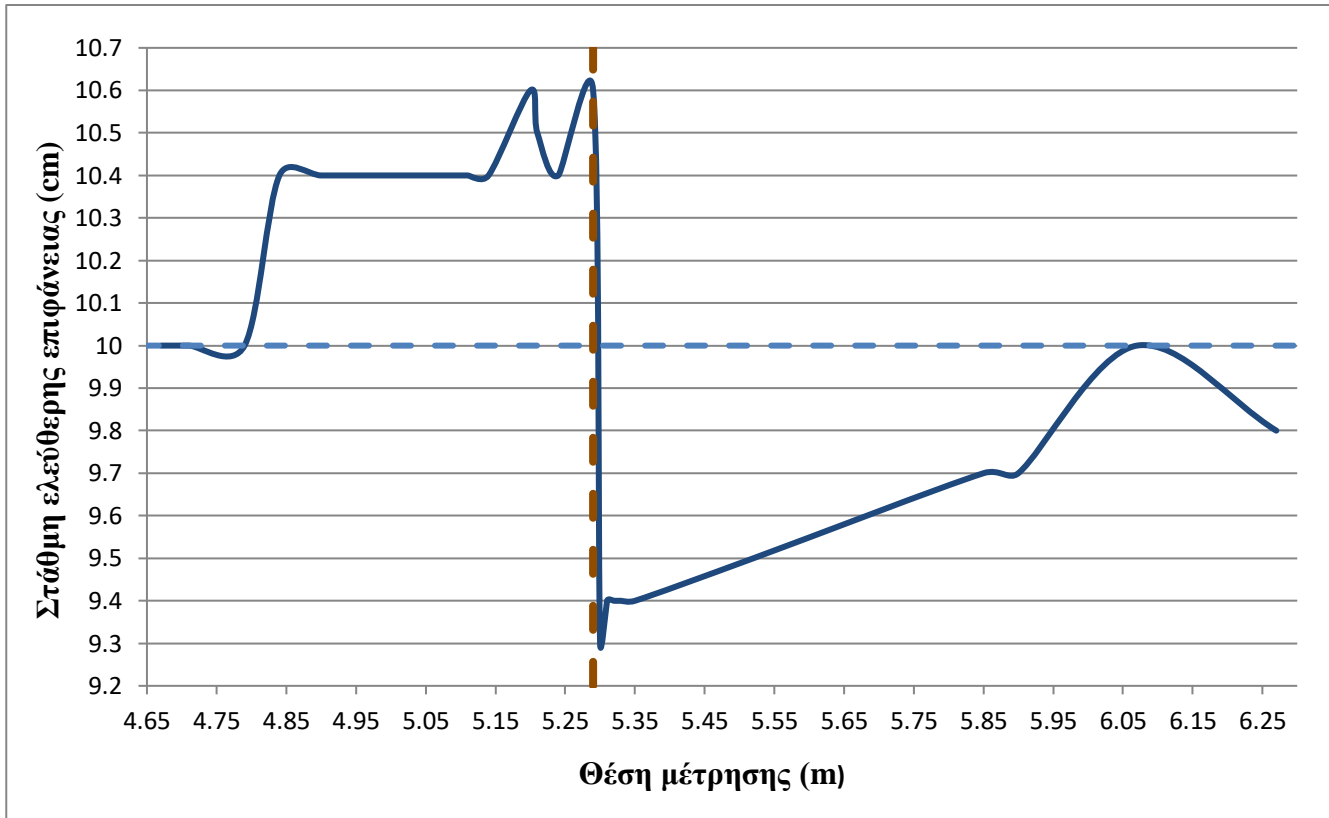
Πίνακας 5.1: Καθορισμός της θέσης και μέτρηση της αντίστοιχης στάθμης κατά μήκος του αγωγού.

Στο σχήμα 5.1 βλέπουμε με μπλε χρώμα την στάθμη που έχει κάθε σημείο που μετρήσαμε και με πορτοκαλί χρώμα βλέπουμε την στάθμη στον εγκάρσιο πρόβολο. Παρατηρούμε πως ανάντη του προβόλου έχουμε σημαντική υπερύψωση της στάθμης ενώ κατάντη έχουμε πτώση.



Σχήμα 5.1: Αποτελέσματα μετρήσεων.

Στο σχήμα 5.2 η μπλε γραμμή παριστάνει τη διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας. Η διακεκομμένη καφέ γραμμή δείχνει την θέση που είναι τοποθετημένο το ξύλινο ομοίωμα και η γαλάζια διακεκομμένη γραμμή την αρχική στάθμη της επιφάνειας (10 cm) του νερού στον αγωγό.

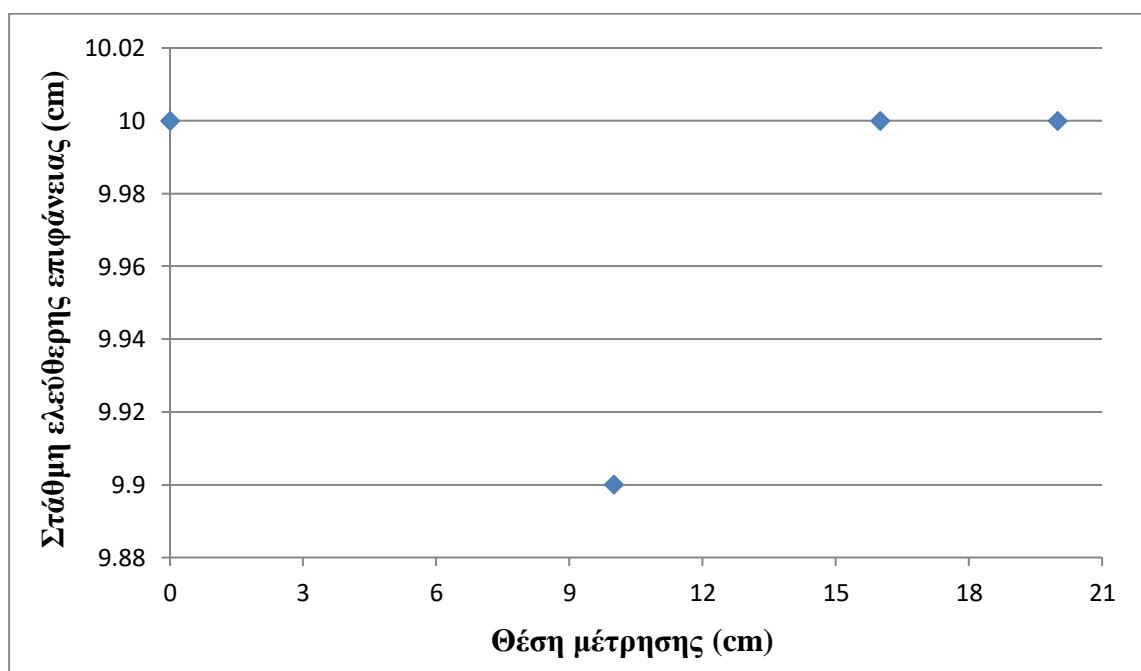


Σχήμα 5.2: Διακύμανση ελεύθερης επιφάνειας κατά μήκος του αγωγού.

Στον πίνακα 5.2 δίνονται οι μετρήσεις που έγιναν εγκάρσια του ανοικτού αγωγού για να παρατηρήσουμε την ελεύθερη επιφάνεια και σ' αυτή τη διεύθυνση (Σχήμα 5.3). Το μηδέν ορίζεται στο δεξιό τοίχωμα με βάση την κατεύθυνση της ροής, δηλαδή το τοίχωμα του αγωγού στο οποίο έχει τοποθετηθεί το ξύλινο ομοίωμα.

ΘΕΣΗ (cm)	ΣΤΑΘΜΗ (cm)
0	10
10	9.9
16	10
20	10

Πίνακας 5.2: Καθορισμός της θέσης και μέτρηση της αντίστοιχης στάθμης εγκάρσια του αγωγού.



Σχήμα 5.3: Διακύμανση ελεύθερης επιφάνειας εγκάρσια του αγωγού.

Στις παρακάτω εικόνες τονίζονται τα σημεία στα οποία κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκε ανακυκλοφορία της ροής κοντά στην θέση του προβόλου. Συγκεκριμένα, πλησίον της ελεύθερης επιφάνειας στα κατόντη του προβόλου παρατηρήθηκε ανακυκλοφορία της ροής (Εικόνα 5.1), όπως επίσης και στα ανάντη του προβόλου κοντά στη βάση του (Εικόνα 5.2).



Εικόνα 5.1: Στροβιλισμός νερού κατόντη του προβόλου.



Εικόνα 5.2: Στροβιλισμός νερού ανάντη του προβόλου.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Στην παρούσα Πτυχιακή Εργασία μελετήθηκαν πειραματικά οι αλλαγές που επιφέρει η τοποθέτηση ενός εγκάρσιου προβόλου, σε ανοικτό αγωγό, στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής.

Διασαφηνίστηκαν έννοιες σχετικά με τους εγκάρσιους προβόλους (groynes) και τη χρησιμότητα της κατασκευής τους αλλά και βασικές έννοιες της υδραυλικής των ανοικτών αγωγών που ήταν χρήσιμες για την υλοποίηση του πειράματος.

Τέλος, μέσω της πειραματικής διαδικασίας καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

- Ανάντη του προβόλου παρατηρήθηκε υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, η οποία σε πραγματικές συνθήκες θα μπορούσε να οδηγήσει σε πλημμυρικά φαινόμενα.
- Όταν η ροή προσεγγίζει τον πρόβολο, δεδομένου ότι είναι υποκρίσιμη, παρατηρείται πτώση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή πλησίον του προβόλου. Στη συνέχεια, η ελεύθερη επιφάνεια αυξάνεται έως ότου επανέλθει στην αρχική της στάθμη.
- Κατά τη διέλευση της ροής από την περιοχή του προβόλου παρατηρείται αποκόλληση της ροής στα κατάντη, όπου αναπτύσσεται ζώνη ανακυκλοφορίας. Μέσα στη ζώνη ανακυκλοφορίας μειώνεται σημαντικά το πεδίο ταχυτήτων, με αποτέλεσμα να προκαλούνται μικρές τιμές διαμητικής τάσης. Επίσης, παρατηρείται μια περιοχή ανακυκλοφορίας της ροής ανάντη του προβόλου, πλησίον του πυθμένα, η οποία σε βάθος χρόνου θα μπορούσε να προκαλέσει υποσκαφή στην περιοχή αυτή.
- Η ροή αποκτά το αρχικό της βάθος, κατάντη του προβόλου, σε απόσταση περίπου ίση με 12 φορές (11.14) το μήκος του προβόλου.

Πηγές και Βιβλιογραφία

A. Πηγές

1. Διαδικτυακές πηγές

- Β. Χρυσάνθου, «Ποτάμια Υδραυλική και Τεχνικά Έργα», 2020, διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/profile/Vlassios-Hrissanthou/publication/344950077_Potamia_Ydraulike_kai_Technika_Erga/links/5f9aa82b299bf1b53e4ef676/Potamia-Ydraulike-kai-Technika-Erga.pdf, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022
- Μ. F. M. Yossef, “The effect of groynes on rivers”, 23.8.2002, διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/profile/Mohamed-Yossef/publication/228716610_The_Effect_of_Groynes_on_Rivers/links/0c96052e119a07aafc000000/The-Effect-of-Groynes-on-Rivers.pdf, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022
- «The different types of groynes», 10.11.2020, διαθέσιμο στο: <https://tangentmaterials.com/the-different-types-of-groynes/>, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022
- Zbigniew Pruszek, “Groyes”, διαθέσιμο στο: <http://www.coastalwiki.org/wiki/Groynes>, ανακτήθηκε στις: 29.8.2022
- Διαδίκτυο 1: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/5433>
- Διαδίκτυο 2: https://www.google.com/search?q=groynes&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiA3_L34t_5AhWVQvEDHYfMBAkQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgrc=RjFCxJO2R5bR1M&imgdii=a3kXaQ7Y1iSI7M
- Διαδίκτυο 3: https://www.google.com/search?q=steel+groyne&tbn=isch&ved=2ahUKEwiEp6jaufH5AhVnkP0HHcepBxcQ2-cCegQIABAA&oq=steel+groyne&gs_lcp=CgNpbWcQAzIFCAAQgAQ6Bg_gAEB4QBVDTDljDhAFggYcBaAtwAHgAgAGaAYgB-hOSAQUxNS4xMJgBAKABAaoBC2d3cy13aXotaW1nsAEAwAEB&scient=img&ei=y4UPY8SVFeeg9u8Px9OeuAE&bih=937&biw=1920#imgrc=UgnU5RgGAtXcM

- Διαδίκτυο 4:
https://www.google.com/search?q=kink+groynes&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiI_Jrb5d_5AhXsX_EDHUY4AZoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgrc=9UrQs9V60w4ijM
- Διαδίκτυο 5:
https://www.google.com/search?q=stone+groynes&tbm=isch&ved=2ahUKEwirvpTK0vH5AhVunP0HHblbBgcQ2-cCegQIABAA&oq=stone+groynes&gs_lcp=CgNpbWcQAzIFCAAQgARQnQxY32lgznBoAHAeACAAbUBiAHIC5IBBDEyLjOYAQCgAQGqAQond3Mtd2l6LWltZ7ABAMABAQ&sclient=img&ei=4J8PY6vOF649u8PubeZOA&bih=937&biw=1920#imgrc=NXD03PeKhbKylM&imgdii=G7ar3uu2R5wdQM
- Διαδίκτυο 6:
https://www.google.com/search?q=groynes&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiA3_L34t_5AhWVQvEDHYfMBAkQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgrc=-nW2O7Xd56cfNM
- Διαδίκτυο 7:
https://www.google.com/search?q=groynes&hl=en&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjFuIrFpvH5AhXj8rsIHTOUCt0Q_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgrc=Y_NU_UY_TcE98M&imgdii=LIZhLcdPgDEJBM
- Διαδίκτυο 8:
https://www.google.com/search?q=kink+groynes&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiI_Jrb5d_5AhXsX_EDHUY4AZoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgrc=01lqJressC2_M
- Διαδίκτυο 9:
https://www.google.com/search?q=kink+groynes&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiI_Jrb5d_5AhXsX_EDHUY4AZoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgrc=-UZSLCK94I1qiM
- Διαδίκτυο 10:
https://www.google.com/search?q=kink+groynes&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiI_Jrb5d_5AhXsX_EDHUY4AZoQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1920&bih=937&dpr=1#imgrc=e8MxxbNvWmOiCM

- Διαδίκτυο 11:

https://www.google.com/search?q=%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%B9%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%B7+%CF%81%CE%BF%CE%AE&sxsrf=ALiCzsaelab9bMPbmhR2Js2VWEYpgANVMA:1666195555694&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiWreSR1uz6AhVE_rsIHdXHA5IQ_AUoAnoECAIQBA&biw=1920&bih=880&dpr=1#imgrc=Gd_rGmp8Z9P-aM&imgdii=IkOHm6Hd48LmxM

- Διαδίκτυο 12:

https://www.google.com/search?q=%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%B9%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%B7+%CF%81%CE%BF%CE%AE&tbm=isch&ved=2ahUKEwiamoKT1uz6AhUN66QKHSYZAQM2-cCegQIABAA&oq=%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%B9%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%81%CF%86%CE%B7+%CF%81%CE%BF%CE%AE&gs_lcp=CgNpbWcQDDoECCMQJ1CTFFigGWCbMWgAcAB4AIABlgGIAeECkgEDMS4ymAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWfAAQE&sclient=img&ei=ZiBQY5rPEI3WkwWmsoQY&bih=880&biw=1920#imgrc=WOCdn-jB61jZ5M&imgdii=MIP1mx-Rj0hWEM

B. Βιβλιογραφία

- Θ. Καραμπάς, Α. Δήμας, Ε. Λουκογεωργάκη, *Ακτομηχανική και λιμενικά έργα*, Θεσσαλονίκη 2020
- Π. Πρίνος, *Υδραυλική ανοικτών αγωγών*, Θεσσαλονίκη 2009
- Π. Πρίνος, *Υδραυλική κλειστών και ανοικτών αγωγών*, Θεσσαλονίκη 2015

Ξενόγλωσση

- Frank M. White, *Fluid mechanics*, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής 1999