

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΥΠΙΚΕΣ ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΤΣΙΝΤΖΕΛΗ ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΦΟΥΡΝΙΩΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ, 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε των ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας υπό την επίβλεψη του κ. Νικολάου Φουρνιώτη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Νικόλαο Φουρνιώτη για τη βοήθεια του στους προβληματισμούς μου κατά τη διάρκεια της εργασίας μου. Επίσης για την υπομονή και την προθυμία του που κατάφερε πάντα να μου εξηγήει οποιαδήποτε απορία μου μέχρι την κατανόηση της.

Επιπλέον ευχαριστίες αποδίδονται στον κ. Διονύσιο Μπισκίνη για τη βοήθειά του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της Πτυχιακής Εργασίας, καθώς και στον κ. Ιωάννη Ραγκαβάνη για την βοήθειά του κατά την πειραματική διαδικασία.

Υπεύθυνη δήλωση σπουδάστριας: 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 ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Η σπουδάστρια

Τσιντζέλη Ευαγγελία

(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πτυχιακή εργασία έχει ως σκοπό τη μελέτη της ροής γύρω από τυπικές διατομές μεσόβαθρων γέφυρας, που κατασκευάζονται σε ποταμούς και χειμάρρους. Πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη με ξύλινα ομοιώματα έτσι ώστε να αποδοθεί στην πραγματικότητα ποια είναι η κατάλληλη διατομή ενός βάθρου για την κατασκευή μιας γέφυρας που γεφυρώνει ένα ποταμό ή ένα χείμαρρο.

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας μελετήθηκε το πεδίο ροής και εκτιμήθηκε η μεταβολή της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη και κατόντη του βάθρου. Επιπλέον, υπολογίστηκε η δύναμη που ασκείται από τη ροή στην επιφάνεια του βάθρου.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	6
1.1 Ιστορικά στοιχεία και γενικά στοιχεία γεφυροποιίας	6
1.2 Στοιχεία γεφυρών.....	8
1.3 Τμήματα γεφυρών.....	9
1.4 Υποσκαφή γεφυρών.....	12
1.5 Μηχανισμός φαινομένου τυπικής διάβρωσης	15
Κεφάλαιο 2 ^ο	16
2.1 Ροή σε ανοιχτούς αγωγούς.....	16
2.2 Βασικοί ορισμοί από την Υδραυλική	16
2.3 Αριθμός Reynolds: Στρωτή – Τυρβώδη ροή.....	18
2.4 Ειδική ενέργεια.....	19
2.5 Αριθμός Froude: Κρίσιμη – Υποκρίσιμη – Υπερκρίσιμη ροή.....	19
2.6 Υδραυλικό άλμα.....	20
Κεφάλαιο 3 ^ο	24
3.1 Κατασκευή φυσικού μοντέλου στο εργαστήριο.....	24
3.2 Λεπτομέρειες κατασκευής ξύλινων ομοιωμάτων (μοντέλων) εργαστηρίου.....	28
3.3 Λεπτομέρειες κατασκευής και διαμόρφωσης ομοιωμάτων.....	29
3.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση ξύλινων ομοιωμάτων εργαστηρίου.....	33
Κεφάλαιο 4 ^ο	37
4.1 Πειραματική διαδικασία.....	37
4.1.1 Στοιχεία υπολογισμού χαρακτηριστικών της ροής γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας με εφαρμογή μονοδιάστατης ανάλυσης της ροής.....	38
4.1.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων.....	42
4.1.3 Πρώτο πείραμα.....	42
4.1.4 Δεύτερο πείραμα.....	44
4.1.5 Τρίτο πείραμα.....	46
4.1.6 Τέταρτο πείραμα.....	48
4.1.7 Επεξεργασία αποτελεσμάτων – υπολογισμός δύναμης στα βάθρα.....	50
Κεφάλαιο 5 ^ο	54
5.1 Συμπεράσματα.....	54
Κεφάλαιο 6 ^ο	55
6.1 Βιβλιογραφία.....	55
6.2 Ιστοσελίδες.....	56

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Καλωδιωτή γέφυρα Millau στη Γαλλία (Διαδίκτυο 1).....	7
Εικόνα 2: Τοξωτή γέφυρα Τσακώνας (Διαδίκτυο 2).....	7
Εικόνα 3: Κινητή γέφυρα Tower Bridge στο Λονδίνο (Διαδίκτυο 3).....	8
Εικόνα 4: Γενικό πλάνο σύνδεσης ανωδομής και υποδομή (Σημειώσεις κ .Μπισκίνη από το μάθημα της γεφυροποιίας 2016-2017).....	9
Εικόνα 5: Μεσόβαθρο κυκλικής διατομής (Διαδίκτυο 4).....	10
Εικόνα 6: Μεσόβαθρο τετραγωνικής διατομής (Διαδίκτυο 5).....	11
Εικόνα 7: Τυπική μορφή εφέδρανου (Διαδίκτυο 6).....	12
Εικόνα 8: Απεικόνιση στροβιλισμού γύρω από μεσόβαθρο.(Διαδίκτυο 7).....	13
Εικόνα 9: Κατάρρευση της γέφυρας της Διάβας στη Θράκη (Διαδίκτυο 8).....	14
Εικόνα 10: Κατάρρευση της γέφυρας του ποταμού Λουτάνη (Διαδίκτυο 9).....	14
Εικόνα 11: Μόνιμη ομοίμορφη ροή (Διαδίκτυο 10).....	17
Εικόνα 12: Απεικόνιση στρωτής και τυρβώδης ροής (Διαδίκτυο 11).....	18
Εικόνα 13: Διάγραμμα Ειδικής Ενέργειας (Διαδίκτυο 12).....	20
Εικόνα 14: Απλό υδραυλικό άλμα (Διαδίκτυο 13).....	21
Εικόνα 15: Υδραυλικό άλμα μετά τον αναβαθμό (Διαδίκτυο 14).....	22
Εικόνα 16: Παρεμβολή θυροφράγματος για υδραυλικό άλμα (Διαδίκτυο 15).....	23
Εικόνα 17: Απεικόνιση ξύλινων ομοιωμάτων πριν το βερνίκι.....	28
Εικόνα 18: Απεικόνιση ξύλινων ομοιωμάτων με βερνίκι.....	29
Εικόνα 19: Διαμόρφωση κυκλικής διατομής μετά το βερνίκι.....	30
Εικόνα 20: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα μετά το βερνίκι.....	30
Εικόνα 21: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο μετά το βερνίκι.....	31
Εικόνα 22: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής μετά το βερνίκι.....	31
Εικόνα 23: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με μικρότερη ακτίνα μετά το βερνίκι.....	32
Εικόνα 24: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα ημικυκλικό άκρο με μικρότερη ακτίνα μετά το βερνίκι.....	32
Εικόνα 25: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με μικρότερη ακτίνα μετά το βερνίκι.....	33
Εικόνα 26: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα ημικυκλικό άκρο.....	33
Εικόνα 27: Τρισδιάστατη απεικόνιση κυκλικής διατομής.....	34
Εικόνα 28: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής.....	34
Εικόνα 29: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με δύο ημικυκλικά άκρα.....	35
Εικόνα 30: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής και μικρότερο μήκος.....	35
Εικόνα 31: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο και μικρότερο μήκος.....	36
Εικόνα 32: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα και μικρότερο μήκος.....	36
Εικόνα 33: Απεικόνιση οριζοντίωσης καναλιού.....	37
Εικόνα 34: Απεικόνιση της ελεύθερης ροής.....	38
Εικόνα 35: Κυκλικό βάθρο.....	42
Εικόνα 36: Κάτοψη ροής με κυκλικό βάθρο.....	43
Εικόνα 37: Ορθογωνική διατομή με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο.....	44
Εικόνα 38: Κάτοψη ροής με βάθρο ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο.....	45
Εικόνα 39: Ορθογωνική διατομή με δύο ημικυκλικά άκρα.....	46
Εικόνα 40: Κάτοψη ροής από βάθρο ορθογωνικής διατομής με δύο ημικυκλικά άκρα.....	47

Εικόνα 41: Ορθογωνική διατομή.....	48
Εικόνα 42: Κάτοψη ροής με βάθρο ορθογωνικής διατομής.....	48
Εικόνα 43: Κάθετη τοποθέτηση του σωλήνα Pitot στη ροή.....	49
Εικόνα 44: Παράλληλη τοποθέτηση του σωλήνα Pitot στη ροή.....	50
Εικόνα 45: Σκαρίφημα δυνάμεων.....	51

Ευρετήριο πινάκων

Πίνακας 1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά βάθρου κυκλικής διατομής, διαμέτρου D και χαρακτηριστικά της ροής.....	39
Πίνακας 2: Συγκεντρωτικές δυνάμεις που υπολογίστηκαν πειραματικά για τα βάθρα.....	53

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1⁰

1.1 Ιστορικά στοιχεία και γενικά στοιχεία γεφυροποιίας

Η γέφυρα είναι μία τεχνική ή αρχιτεκτονική κατασκευή όπου με βάση αυτήν επιτυγχάνεται η ένωση δύο ή περισσότερων σημείων ανεξαρτήτως αν μεσολαβεί κάποιο εμπόδιο είτε αυτό μπορεί να είναι φυσικό είτε τεχνικό. Οι γέφυρες χρησιμοποιούνται για την γεφύρωση τόσο ξηρών όσο και υδάτινων επιφανειών καθώς επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για σιδηροδρομικές γραμμές. Γενικά οι γέφυρες θεωρούνται από τις πιο εντυπωσιακές κατασκευές παρόλο που παρουσιάζουν πολλές ιδιομορφίες και λεπτά σημεία στην ανάλυση, τη διαστασιολόγηση και την ανέγερσή τους. (Βικιπαίδεια 2017)

Στην αρχαία εποχή μέχρι τον 19^ο αιώνα τα υλικά δόμησης που χρησιμοποιούνταν ήταν ξύλο και πέτρες. Οι πρώτες γέφυρες ήταν φυσικές είτε από κάποιο δέντρο που είχε πέσει και με αυτό τον τρόπο είχε δημιουργήσει μια διάβαση είτε μπορεί να είχε διαμορφωθεί με το πέρασμα των χρόνων λόγω διάβρωσης. Από την άλλη οι πρώτες τεχνικές γέφυρες κατασκευάστηκαν από τον άνθρωπο με δύο διαφορετικούς τρόπους: α) με μεγάλους κορμούς δέντρων όπου γεφύρωναν μικρά ρέματα, β) με μεγάλους επίπεδους λίθους πάνω από φυσικές ροές. (Βικιπαίδεια 2017)

Αυτοί που κατείχαν την μεγαλύτερη εμπειρία στις γέφυρες ήταν οι Ρωμαίοι, οι οποίοι κατασκεύαζαν συνήθως κυρτές γέφυρες με τη βοήθεια λίθων και σκυροδέματος με σκοπό την γεφύρωση μεγάλων ποταμών. Αρκετές από αυτές σώζονται μέχρι και σήμερα και είναι ιδιαίτερα καλαίσθητες αφού στο κατάστρωμά τους υπήρχαν πεζοδρόμια, διακοσμητικά αγάλματα και αψίδες. (Βικιπαίδεια 2017)

Η πρώτη γέφυρα από χυτοσίδηρο κατασκευάστηκε το 1779 στην Αγγλία πάνω από τον ποταμό Βερν και είναι γνωστή και ως Ironbridge. Στη συνέχεια η επόμενη εξέλιξη ήταν η αλυσόδετη κρεμαστή γέφυρα. Το 1826 λοιπόν κατασκευάστηκε στην Ουαλία η πρώτη γέφυρα αυτού του τύπου όπου η απόσταση των στηριγμάτων ήταν 177 μ. και το συνολικό της μήκος 521 μ. Τέλος στις αρχές του 20ού αιώνα όπου το μπετόν εξελίχθηκε δημιουργήθηκαν νέες δυνατότητες για την κατασκευή γεφυρών.

Οι γέφυρες λοιπόν με βάση τα παραπάνω στοιχεία μπαίνουν σε κάποιες κατηγορίες όπου διακρίνονται: (Βικιπαίδεια 2017)

- α) Ανάλογα με τον τύπο του φορέα ή την χρήση της σε «οδικές», «σιδηροδρομικές», «υδατογέφυρες», «πεζών» κ.τ.λ.
- β) Ανάλογα το υλικό κατασκευής σε «ξύλινες», «λίθινες», «μεταλλικές», «τσιμεντένιες» ή και «μεικτές»
- γ) Ανάλογα τον τρόπο έδρασής τους σε «κινητές», «σταθερές» ή «σταθερώς εδραζόμενες»

Από την άλλη οι «κινητές» διακρίνονται σε: (Βικιπαίδεια 2017)

- Αναρτώμενες
- Περιστροφικές
- Πτυσσόμενες

Στις κινητές ωστόσο υπάγονται και οι «πλωτές»

Οι «σταθερές» από την άλλη διαχωρίζονται σε: (Βικιπαίδεια 2017)

- Ορθές, ορθογώνιες και λοξές
- Δοκογέφυρες
- Κρεμαστές

Στην εικόνα 1 που ακολουθεί απεικονίζεται η καλωδιωτή γέφυρα του Millau στη Γαλλία.



Εικόνα 1: Καλωδιωτή γέφυρα Millau στη Γαλλία (Διαδίκτυο 1)

Στην εικόνα 2 που παρουσιάζεται παρακάτω απεικονίζεται η τοξοτή γέφυρα της Τσακώνας στην Καλαμάτα.



Εικόνα 2: Τοξοτή γέφυρα Τσακώνας (Διαδίκτυο 2)

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η κινητή γέφυρα του Tower Bridge στο Λονδίνο.



Εικόνα 3: Κινητή γέφυρα Tower Bridge στο Λονδίνο (Διαδίκτυο 3)

1.2 Στοιχεία γεφυρών

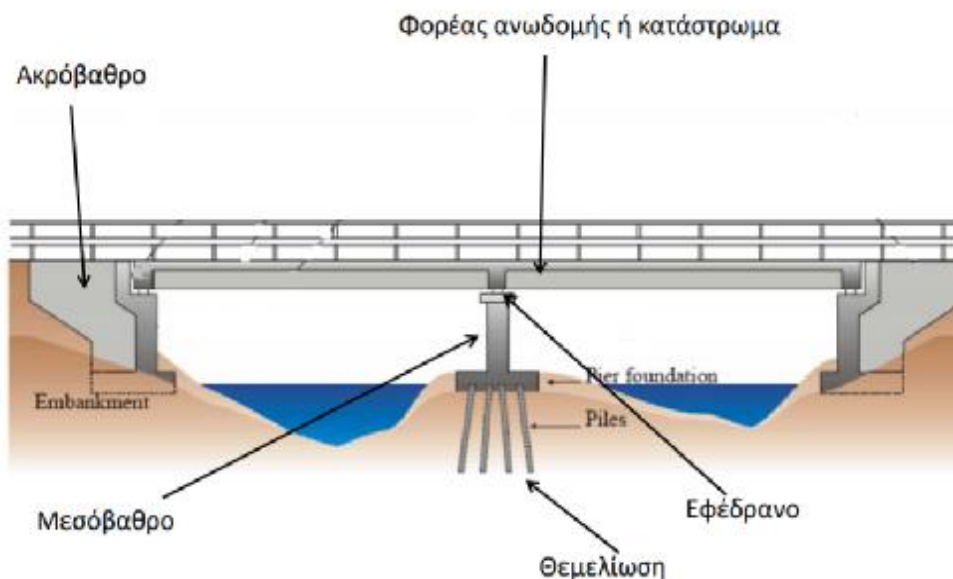
Τα τμήματα που αποτελούν τη γέφυρα είναι:

- Το σύστημα θεμελίωσης
- Τα ακρόβαθρα
- Τα μεσόβαθρα
- Το κατάστρωμα της ανωδομής
- Πτερότοιχοι
- Επίχωμα

Επιπρόσθετα στην γέφυρα υπάρχουν και κάποια εξαρτήματα για την ομαλή λειτουργία της κατασκευής τα οποία είναι:

- Τα εφέδρανα
- Οι αρμοί
- Στηθαία ασφαλείας
- Συσκευές δυναμικής εμπλοκής
- Πυλώνες ηλεκτροφωτισμού
- Σύστημα αποχέτευσης και αποστράγγισης

Στην εικόνα 4 απεικονίζεται ένα γενικό πλάνο σύνδεσης ανωδομής και υποδομής μιας γέφυρας.



Εικόνα 4: Γενικό πλάνο σύνδεσης ανωδομής και υποδομής (Σημειώσεις κ .Μπισκίνη από το μάθημα της Γεφυροποιίας 2016-2017)

1.3 Τμήματα γεφυρών

Τα παραπάνω μέλη εντάσσονται σε τμήματα της «ανωδομής» και της «υποδομής». Η υποδομή περιλαμβάνει τα βάθρα, τους τυχόν τοίχους αντιστήριξης στα ακρόβαθρα, την θεμελίωση και τέλος τα έργα μετάβασης στην οδό.

α) Ακρόβαθρα

Τα ακρόβαθρα τοποθετούνται στην αρχή και στο τέλος της γέφυρας, αναλαμβάνοντας με τη μορφή οριζόντιων και κατακόρυφων αντιδράσεων μέρος των φορτίσεών του. Επιπλέον τα ακρόβαθρα μπορούν να λειτουργούν και σαν τοίχοι αντιστήριξης, όπου με αυτόν τον τρόπο αναλαμβάνουν τις ωθήσεις που προέρχονται από το επίχωμα και εξασφαλίζουν την ασφαλή μεταφορά τους στο έδαφος. Επάνω τους λοιπόν στηρίζονται οι πτερυγότοιχοι και οι πλάκες πρόσβασης όπου εγκιβωτίζουν τα επίχωμα. Η μορφολογία των ακροβάθρων είναι τέτοια έτσι ώστε να εξασφαλίζουν τον απαιτούμενο χώρο για την ανάπτυξη των οριζόντιων μετακινήσεων και στροφών γύρω από οριζόντιο ή και κατακόρυφο άξονα του φορέα της γέφυρας.

Συνήθως κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα και ο ρόλος τους είναι να μεταφέρουν μέσω των εφεδράνων στο έδαφος τα φορτία της ανωδομής.

β) Μεσόβαθρα

Τα μεσόβαθρα τοποθετούνται στη μέση της γέφυρας με σκοπό την μεταφορά τόσο των οριζόντιων όσο και των κατακόρυφων φορτίων της γέφυρας στη θεμελίωση. Ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζονται είναι τέτοιος ούτως ώστε να υπάρχει η ελάχιστη δυνατή παρεμπόδιση της ροής των εγκάρσιων υδάτων, ή της κυκλοφορίας των διασταυρωνόμενων οδών. Επίσης η μορφή της διατομής που μπορεί να έχει ένα μεσόβαθρο μπορεί να είναι κυκλική, τετραγωνική, ελλειπτική, ορθογωνική, εξαγωνική και οκταγωνική. Η διαφορά που έχουν από τα ακρόβαθρα είναι ότι δεν καταπονούνται σε ωθήσεις γαιών. Έχουν λοιπόν την δυνατότητα να κατασκευαστούν από άοπλο σκυρόδεμα ή κοίλα από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Επιπρόσθετα ανάλογα με το είδος και το ύψος της γέφυρας οι τύποι των μεσοβάθρων μπορεί να είναι:

- Μεμονωμένα υποστυλώματα
- Κολωνοπάσσαλοι
- Τοιχία
- Πλαίσια , δίστηλα ή πολύστηλα

Τα κύρια δομικά στοιχεία των μεσόβαθρων είναι:

- Τοιχίο ή υποστύλωμα
- Πέδιλο ή πασσαλόδεσμος
- Κεφαλή ή κεφαλόδεσμος ή δοκός έδρασης
- Πάσσαλοι ή φρέαρ θεμελίωσης

Στην εικόνα 5 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα μεσόβαθρο κυκλικής διατομής.



Εικόνα 5: Μεσόβαθρο κυκλικής διατομής (Διαδίκτυο 4)

Στην εικόνα 6 απεικονίζεται μια τετραγωνική διατομή ενός μεσόβαθρου.



Εικόνα 6: Μεσόβαθρο τετραγωνικής διατομής (Διαδίκτυο 5)

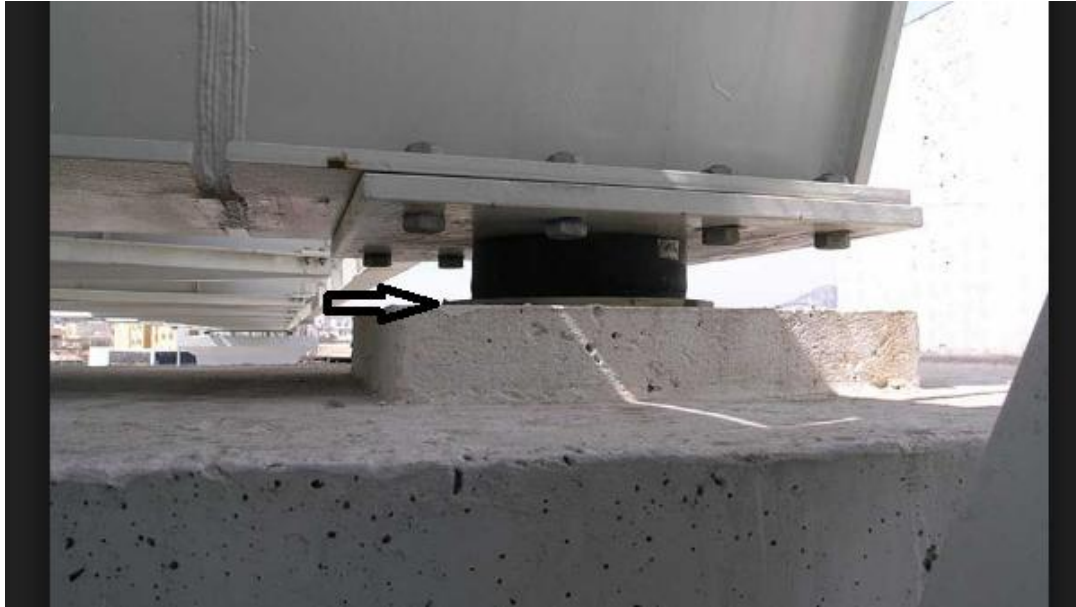
γ) Εφέδρανα

Τα εφέδρανα σε μια γέφυρα αποτελούν τα ειδικά δομικά στοιχεία που συνδέουν την ανωδομή με την υποδομή. Οι κύριες λειτουργίες τους είναι να μεταφέρουν δυνάμεις ορισμένου τύπου και ορισμένης διεύθυνσης από την ανωδομή στην υποδομή και να εξασφαλίζουν μετακινήσεις και στροφές μεταξύ της ανωδομής και της υποδομής. Εφέδρανα τα οποία δεν επιτρέπουν μετατοπίσεις της ανωδομής ή οριζόντιες μετακινήσεις αναφέρονται ως σταθερά εφέδρανα ενώ αυτά που τις επιτρέπουν ονομάζονται κινητά εφέδρανα. Τέλος τόσο τα κινητά όσο και τα σταθερά εφέδρανα επιτρέπουν περιστροφή γύρω από κατακόρυφο ή οριζόντιο άξονα.

Τύποι εφεδράνων:

- Ελαστομερή εφέδρανα
- Εφέδρανα εγκιβωτισμένου ελαστικού
- Εφέδρανα συγκράτησης ανύψωσης

Στην εικόνα 7 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τυπική μορφή ενός εφεδράνου.



Εικόνα 7: Τυπική μορφή εφέδρανου (Διαδίκτυο 6)

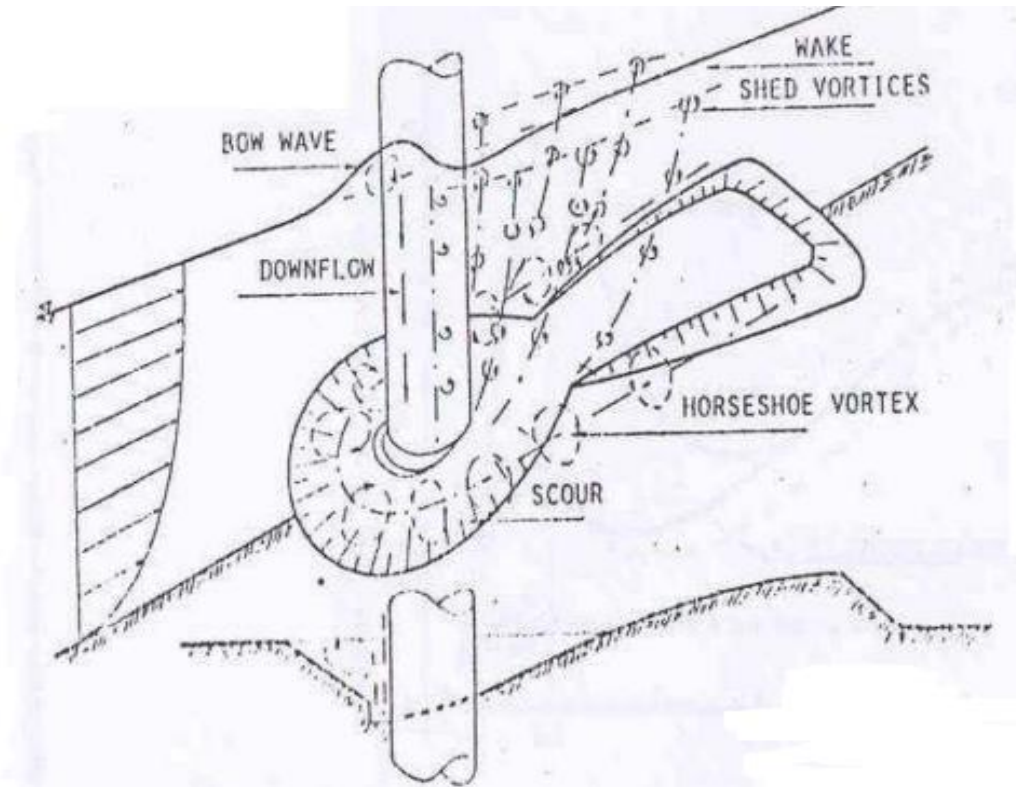
1.4 Υποσκαφή γεφυρών

Υπάρχουν αρκετές μορφές υποσκαφής. Αρχικά μπορεί να δημιουργηθεί γενική διάβρωση η οποία θα πραγματοποιηθεί ανεξάρτητα από την παρουσίαση της γέφυρας στη συγκεκριμένη διατομή. Στη συνέχεια έχουμε τη διάβρωση λόγω στένωσης η οποία υλοποιείται εξαιτίας της αλλαγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καναλιού λόγω της παρουσίας της γέφυρας. Τέλος υπάρχει η τοπική διάβρωση η οποία οφείλεται στην παρεμπόδιση της ροής από το βάθρο. (Μ. Βαφειάδης & Ν. Ευθυμίου, 2009)

Από την άλλη η τοπική διάβρωση χωρίζεται σε δύο τύπους: (Μ. Βαφειάδης & Ν. Ευθυμίου, 2009)

- Διάβρωση καθαρού νερού όπου δεν πραγματοποιείται μεταφορά φερτών ή αν πραγματοποιείται είναι σε αιώρηση.
- Διάβρωση ενεργού πυθμένα όπου υπάρχει μεταφορά φερτών στα ανάντη. Η διάκριση γίνεται συγκρίνοντας την ταχύτητα ροής στα ανάντη με την κρίσιμη ταχύτητα έναρξης κίνησης των κόκκων.

Στην εικόνα 8 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τυπική μορφή στροβιλισμού (πεδίο ροής) γύρω από ένα μεσόβαθρο γέφυρας.



Εικόνα 8: Απεικόνιση στροβιλισμού γύρω από μεσόβαθρο. (Διαδίκτυο 7)

Οι πιθανές συνέπειες υποσκαφής είναι (υποχώρηση στήριξης): (Μ. Βαφειάδης & Ν. Ευθυμίου, 2009)

- Νέα εντατική κατάσταση
- Απώλεια λειτουργικότητας
- Μείωση φέρουσας ικανότητας

Στην εικόνα 9 που ακολουθεί παρουσιάζεται μια τυπική κατάρρευση γέφυρας λόγω υποσκαφής που έχει δημιουργηθεί στο βάθρο της γέφυρας από τη ροή του ποταμού. Παρατηρούμε ότι η υποχώρηση του βάθρου λόγω σημαντικής υποσκαφής οδήγησε στην κατάρρευσή του με επακόλουθο την ολική κατάρρευση του εσωτερικού τμήματος της γέφυρας. Η εικόνα αυτή παρουσιάζει τη γέφυρα στον ποταμό Κομπάτο στην περιοχή της Θράκης.



Εικόνα 9: Κατάρρευση της γέφυρας της Διάβας στη Θράκη (Διαδίκτυο 8)

Στην εικόνα 10 παρουσιάζεται η κατάρρευση της γέφυρας εξαιτίας μιας μεγάλης νεροποντής. Στην παρούσα γέφυρα γινόταν εκτεταμένες και σε μεγάλο βάθος αμμοληψίες από τον ποταμό με αποτέλεσμα να έχουν αποκαλυφθεί τα θεμέλια της γέφυρας και να έχουν διαβρωθεί σταδιακά τα υποστρώματα. Έχουν κυκλωθεί με κόκκινο χρώμα οι αστοχίες που υπέστη η γέφυρα.



Εικόνα 10: Κατάρρευση της γέφυρας του ποταμού Λουτάνη (Διαδίκτυο 9)

1.5 Μηχανισμός φαινομένου τυπικής διάβρωσης

Το βάθρο αποτελεί εμπόδιο στην κίνηση του νερού το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ροής στην περιοχή του βάρου καθώς και την δημιουργία στροβίλων. Στη συνέχεια δημιουργείται κίνηση των κόκκων στη βάση του βάρου τα οποία απομακρύνονται με τη βοήθεια των στροβίλων. Όταν λοιπόν ο ρυθμός μεταφοράς των φερτών είναι μικρότερος από τον ρυθμό απομάκρυνσης τότε έχουμε το φαινόμενο της τυπικής διάβρωσης. (Μ. Βαφειάδης & Ν. Ευθυμίου, 2009)

Στρόβιλοι σε μεσόβαθρα

- Πεταλοειδής στρόβιλος
- Οριζόντιος στρόβιλος
- Επιφανειακός στρόβιλος

Καθοριστικοί παράγοντες για το βάθος τοπικής διάβρωσης

- Ταχύτητα ροής
- Βάθος ροής (Αν το βάθος ροής είναι μικρό, το βάθος διάβρωσης μειώνεται λόγω αλληλεπίδρασης επιφανειακού με πεταλοειδή στρόβιλο. Αν το βάθος ροής είναι μεγάλο, το βάθος διάβρωσης είναι ανεξάρτητο)
- Κοκκομετρική διαβάθμιση
- Μέγεθος κόκκων

2 Κεφάλαιο 2^ο

2.1 Ροή σε ανοικτούς αγωγούς

Η κατασκευή μιας γέφυρας πάνω από ένα ποταμό απαιτεί αρκετές προϋποθέσεις οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψιν πριν την κατασκευή της. Αρχικά βασικός παράγοντας είναι να γίνει σωστά η επιλογή του τύπου της γέφυρας έτσι ώστε να εξυπηρετεί όσο το δυνατόν καλύτερα. Στη συνέχεια θα πρέπει να μελετηθεί η ροή του ποταμού και να γίνουν οι απαραίτητες μετρήσεις της παροχής του νερού. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την ορθή επιλογή των βάθρων που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της.

2.2 Βασικοί ορισμοί από την Υδραυλική Μηχανική

Υδροστατική είναι η πίεση που ασκείται όταν το ρευστό δεν κινείται. Η υδροστατική περιλαμβάνει κατανομή πιέσεων σε υγρό που ηρεμεί και τις δυνάμεις που προκαλούν οι πιέσεις αυτές. (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

$$P_{υδρ} = \rho \cdot h \cdot g$$

Όπου : $P_{υδρ}$ = η υδροστατική πίεση

ρ = η πυκνότητα

h = το βάθος

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας

Ανοικτός αγωγός ή αγωγός ελεύθερης ροής ονομάζεται ένας αγωγός μέσα στον οποίο το νερό ρέει με ελεύθερη επιφάνεια. Η κατανομή της πίεσης κατά το βάθος στην επιφάνεια του νερού είναι σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική. Επιπλέον, η κατανομή της πίεσης στην κατακόρυφη διεύθυνση μπορεί να θεωρείται υδροστατική. Αυτό συμβαίνει διότι η κλίση που χρησιμοποιούμε για το έργο μας είναι μικρότερη από το 10% έτσι ώστε η πίεση να παραμένει υδροστατική. Οι δυνάμεις που προκαλούν τη ροή στους ανοικτούς αγωγούς οφείλονται στη βαρύτητα, ενώ οι δυνάμεις που επιβραδύνουν τη ροή οφείλονται στην ιξώδη διάτμηση και στις τριβές κατά μήκος των τοιχωμάτων του αγωγού συμπεριλαμβανομένου και του πυθμένα, στον οποίο πρόκειται να τοποθετηθούν τα βάθρα της γέφυρας.

Η ροή μέσα σε αγωγούς έχει δύο μορφές:

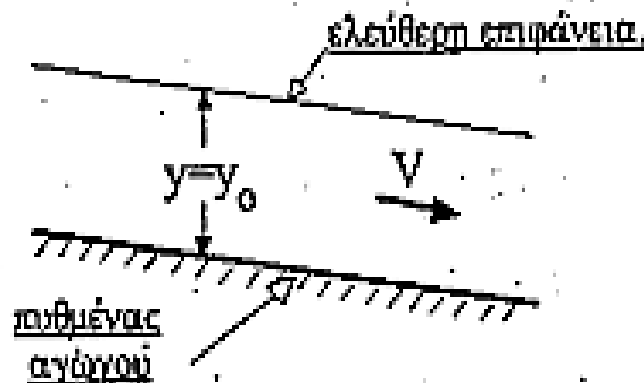
- Ομαλή ή στρωτή ή παράλληλη ροή
- Τυρβώδης ή στροβιλώδης ροή

Η διαφορά μεταξύ μόνιμης και ομοιόμορφης ροής είναι:

- Μόνιμη ροή (όπου όλες οι συνιστώσες της επιτάχυνσης ισούνται με το μηδέν, δηλαδή $du/dt=0$)
- Ομοιόμορφη ροή (όπου εκεί δεν έχω μεταβολή της ταχύτητας στον άξονα των x , δηλαδή $du/dx=0$)

Στην εικόνα 10 που ακολουθεί δίδεται η κατά μήκος τομή ενός ανοικτού αγωγού στην οποία έχουν σημειωθεί τα βασικά μεγέθη για τη μελέτη της ροής ανοικτού αγωγού.

Μόνιμη ομοιόμορφη ροή



Εικόνα 11: Μόνιμη ομοιόμορφη ροή (Διαδίκτυο 10)

Όγκος ελέγχου είναι ο χώρος στον οποίο βρίσκονται όλες οι δυνάμεις. (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

Εξίσωση ορμής είναι η εξίσωση με την οποία υπολογίζουμε δυνάμεις. Ο 2^{ος} νόμος του Νεύτωνα για ένα σύστημα χρησιμοποιείται σα βάση για τον καθορισμό της εξίσωσης της ορμής σε όγκο ελέγχου: (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

$$\Sigma F = d / dt (m \cdot \bar{u})$$

Όπου: m = μάζα συστήματος
 \bar{u} = ταχύτητα συστήματος
 $B = m \cdot \bar{u}$ η ορμή του συστήματος

Για ασυμπίεστα ρευστά η παραπάνω εξίσωση διαμορφώνεται ως εξής:

$$\Sigma F_i = \rho \cdot Q \cdot (U_{εκρ} - U_{εισρ})$$

Οι δυνάμεις που περιλαμβάνονται στη ΣF_i είναι:

- Δυνάμεις μάζας όπου ισούνται με το βάρος του υγρού
- Δυνάμεις επιφάνειας
 - Δυνάμεις πίεσης
 - Εφαπτομενικές δυνάμεις (τριβή)

2.3 Αριθμός Reynolds: Στρωτή – Τυρβώδης Ροή

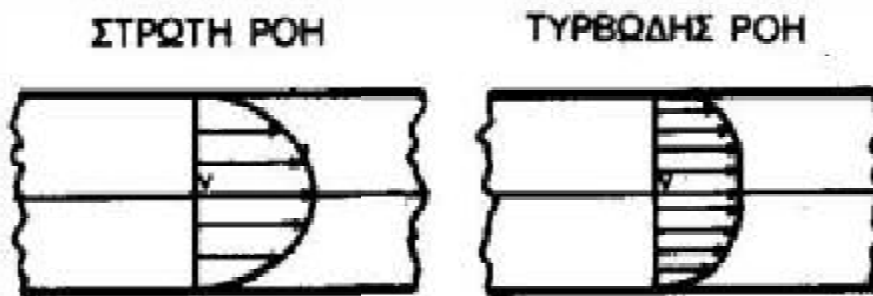
Στρωτή ροή

Ονομάζεται η ροή που μπορεί να περιγραφεί με την παραδοχή ότι το ρευστό αποτελείται από πολλά λεπτά στρώματα που ολισθαίνουν το ένα πάνω στο άλλο. Κατά την στρωτή ροή το ρευστό ρέει σε παράλληλες προς τον άξονα του αγωγού γραμμές δίνοντας έτσι την εικόνα της ομαλής ή στρωτής ροής επιπλέον όλα τα σωματίδια που διέρχονται από ένα σημείο έχουν την ίδια ταχύτητα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στρωτής ροής είναι η ροή του νερού από τη βρύση. (Βικιπαίδεια 2017)

Τυρβώδης ροή

Κατά τη τυρβώδη ροή οι γραμμές ροής του ρευστού λαμβάνουν μορφή ακανόνιστων καμπυλών οι οποίες τέμνουν συνεχώς η μία την άλλη, δίνοντας έτσι την εικόνα ροής με στροβιλισμούς. Τυρβώδη ροή έχουμε στους ποταμούς όταν παρουσιάζουν στροβίλους που μπορεί να οφείλονται σε υποκείμενα ρεύματα, σε τριβές σε βραχώδεις όχθες ή σε πετρώματα του βυθού ή σε απότομη στένωση του πλάτους τους. (Βικιπαίδεια 2017)

Στην εικόνα 11 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα σκίτσο με τη μορφή της ροής όταν είναι στρωτή και όταν είναι τυρβώδης σε ένα ανοιχτό αγωγό.



Εικόνα 12: Απεικόνιση στρωτής και τυρβώδης ροής (Διαδίκτυο 11)

Ο αριθμός Reynolds (Re) ορίζεται ως, ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις ιξώδους και συνεπώς ποσοτικοποιεί την μεταξύ τους σημαντικότητα για μια συγκεκριμένη κατάσταση ροής. Ορίζεται λοιπόν από τον τύπο: (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

$$Re = (U * D) / \nu$$

Όπου: $\nu = (\mu/\rho)$ κινηματικό ιξώδες του νερού
 U = ταχύτητα ροής

Επίσης χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό του είδους μια ροής, όπως είναι η στρωτή και η τυρβώδης ροή.

- Η στρωτή ροή προκύπτει για χαμηλούς αριθμούς Reynolds ($Re < 2000$).
- Η τυρβώδης ροή προκύπτει για υψηλούς αριθμούς Reynolds ($Re > 2000$).

2.4 Ειδική ενέργεια

Η επίλυση πολλών προβλημάτων ροής μέσα σε ανοικτούς αγωγούς υποβοηθείται από τον όρο της ειδικής ενέργειας E . Η διαθέσιμη ενέργεια του ρέοντος ρευστού σε ένα ορισμένο σημείο της διατομής ανοικτού αγωγού ως προς τον πυθμένα του αγωγού ονομάζεται **Ειδική ενέργεια** ή ειδικό φορτίο και υπολογίζεται από τον τύπο: (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

$$E = y + (U^2/2 \cdot g)$$

Όπου: y = βάθος ροής
 U = ταχύτητα ροής
 g = επιτάχυνση της βαρύτητας

2.5 Αριθμός Froude : Κρίσιμη – Υποκρίσιμη –Υπερκρίσιμη Ροή

Ο αριθμός Froude είναι ένα μέγεθος που έχει ιδιαίτερη σημασία σε όλα τα είδη ροής με ελεύθερη επιφάνεια. Ορίζεται ως το πηλίκο των δυνάμεων αδράνειας στη ροή προς τις δυνάμεις βαρύτητας στη ροή. Στους ανοικτούς αγωγούς ο αριθμός Froude ορίζεται από τη σχέση: (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

$$Fr = U / (\sqrt{g \cdot y_0})$$

Όπου: g = η επιτάχυνση της βαρύτητας
 y_0 = υδραυλικό βάθος

Ανάλογα με το μέγεθος του αριθμού Froude η ροή διακρίνεται σε κρίσιμη, υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη. (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

- Όταν $dE/dy=0 \Leftrightarrow 1 - Fr^2 = 0 \Leftrightarrow Fr=1$ τότε η ροή ονομάζεται κρίσιμη. Στην περίπτωση αυτή κρίσιμα ονομάζονται και τα μεγέθη της ροής όπως βάθος και μέση ταχύτητα τα οποία συμβολίζονται αντίστοιχα με y_c και U_c .
- Όταν $dE/dy > 0 \Leftrightarrow 1 - Fr^2 > 0 \Leftrightarrow Fr < 1$ τότε η ροή ονομάζεται υποκρίσιμη. Στην περίπτωση αυτή η ροή διαθέτει σχετικά μικρή ταχύτητα και μεγάλο βάθος και περιγράφεται ως ήρεμη ή ποτάμια.

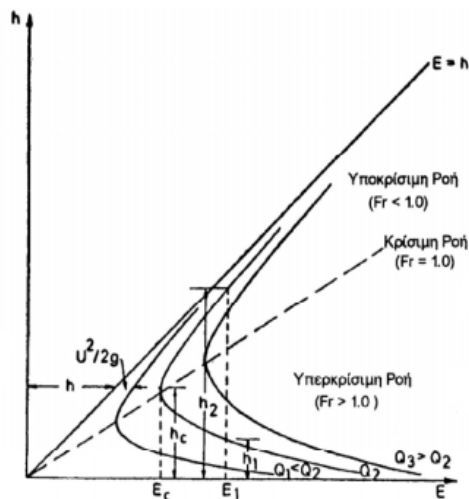
- Όταν $dE/dy < 0$ $\Leftrightarrow 1 - Fr^2 < 0 \Leftrightarrow Fr > 1$ τότε η ροή ονομάζεται υπερκρίσιμη στην περίπτωση αυτή η ροή εμφανίζεται με μεγάλη ταχύτητα και σχετικά μικρό βάθος και περιγράφεται ως ταχεία ή χειμαρρώδης.

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς η διάκριση της ροής σε αυτές τις τρεις περιπτώσεις γίνεται με βάση τη σύγκριση της ταχύτητας της ροής (U) και την ταχύτητα διάδοσης του κύματος (U_c). (Προσωπικές σημειώσεις από Υδραυλική 1)

- Όταν η ροή είναι υποκρίσιμη δηλαδή $U_c > U$ τότε η διαταραχή του κύματος θα μεταδοθεί.
- Όταν η ροή είναι υπερκρίσιμη δηλαδή $U_c < U$ τότε η ροή παρασύρει τα κύματα με αποτέλεσμα να μην βλέπω τη διάδοσή τους.
- Όταν η ροή είναι κρίσιμη δηλαδή $U_c = U$ τότε το ανάντη μέτωπο της διαταραχής φαίνεται ακίνητο ως προς έναν ακίνητο παρατηρητή και ονομάζεται στάσιμο κύμα.

Επιπρόσθετα με την τελευταία κουκίδα θα μπορούσε να αποδοθεί και ο ορισμός του κρίσιμου βάθους. Έτσι λοιπόν για ροή με συγκεκριμένη παροχή ως κρίσιμο ορίζεται το μέγιστο βάθος που δεν επιτρέπει σε μία διαταραχή να κινηθεί προς τα ανάντη.

Στο γράφημα που ακολουθεί (Εικόνα 13) παρουσιάζεται η μεταβολή της ειδικής ενέργειας στον ανοικτό αγωγό σε συνάρτηση με το βάθος ροής.



Εικόνα 13: Διάγραμμα Ειδικής Ενέργειας (Διαδίκτυο 12)

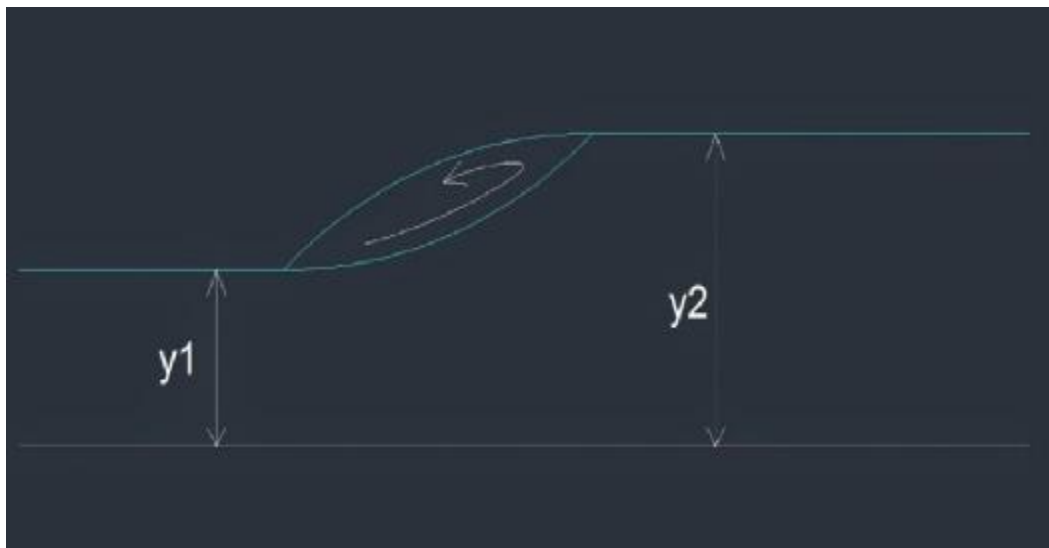
2.6 Υδραυλικό άλμα

Το υδραυλικό άλμα είναι ένα φαινόμενο το οποίο εμφανίζεται όταν η ροή σε έναν ανοικτό αγωγό μεταβαίνει από υπερκρίσιμη ροή σε υποκρίσιμη ροή. Σε αυτή την περίπτωση η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας του νερού αυξάνεται απότομα προς την κατεύθυνση της ροής. Πρακτικά όταν υπάρχει υποκρίσιμη ροή στη περιοχή του αναβαθμού οδηγούμαστε σε ταπείνωση του βάθους ροής που είχα.

Ενώ όταν έχω υπερκρίσιμη ροή οδηγούμαι σε έξαρση του βάθους της ροής που είχα. Η διαδικασία του υδραυλικού άλματος λοιπόν γίνεται διότι η ροή μέσα σε ένα ποτάμι δεν μπορεί να είναι υπερκρίσιμη. Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις υδραυλικού άλματος.

- Η πρώτη περίπτωση ανήκει το απλό υδραυλικό άλμα. Ως απλό χαρακτηρίζεται ένα υδραυλικό άλμα όταν στην θέση του και συνεπώς στον όγκο που το περικλείει δεν υπάρχει κάποιο τεχνικό έργο τέτοιο ώστε να ασκεί δύναμη στο ρευστό.

Στην εικόνα 14 που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα διάγραμμα ενός απλού υδραυλικού άλματος.



Εικόνα 14: Απλό υδραυλικό άλμα (Διαδίκτυο 13)

Όπου: y_1 και y_2 συζυγή βάθη ροής

Το υδραυλικό άλμα περιγράφεται από την εξίσωση συνέχειας η οποία είναι:

$$Q_1 = Q_2$$

Όπου: Q_1 = η παροχή στη διατομή 1
 Q_2 = η παροχή στη διατομή 2

Επιπρόσθετα το υδραυλικό άλμα εκτός από τα βάθη έχει και ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος, το μήκος του. Αυτό καθορίζεται αρχικά εμπειρικά και η σχέση που προκύπτει εξαρτάται από τον αριθμό Froude (Fr).

$$y_1 / y_2 = (1 / 2) * (\sqrt{1 + 8 * Fr_2^2} - 1)$$

Αξίζει να σημειωθεί πως στο υδραυλικό άλμα λόγω του υψηλού τυρβώδους της ροής προκαλούνται απώλειες ενέργειας και επομένως έχουμε ότι:

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

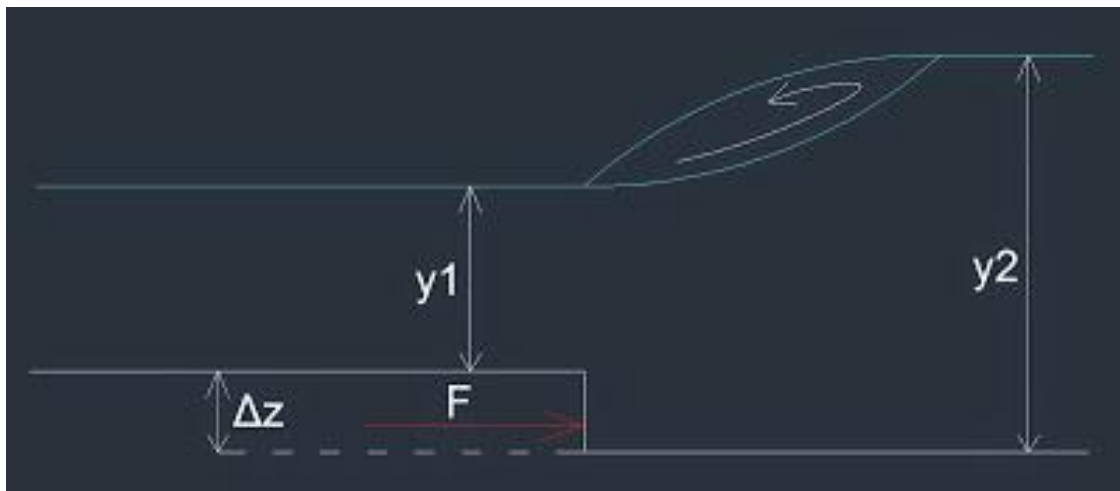
Όπου: E_1 = η ειδική ενέργεια στη διατομή 1
 E_2 = η ειδική ενέργεια στη διατομή 2

Ωστόσο δεν υπάρχει δύναμη αντίστασης λόγω του ότι δεν υπάρχει εμπόδιο επομένως:

$$F_1 = F_2$$

- Η δεύτερη περίπτωση υδραυλικού άλματος είναι σε απότομο καταβαθμό. Το υδραυλικό άλμα μπορεί να σχηματιστεί σε δύο θέσεις, πριν και μετά τον καταβαθμό.

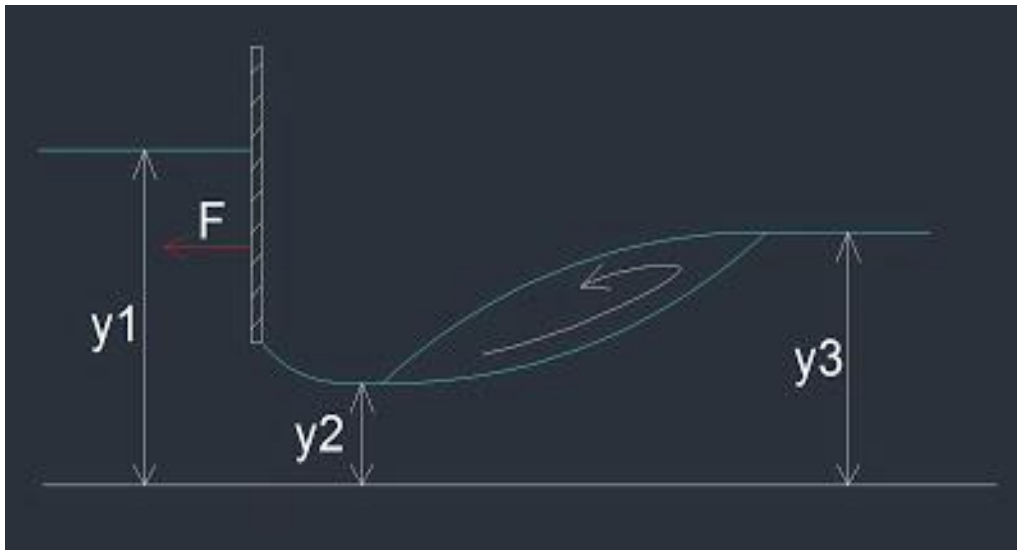
Στην εικόνα 15 που ακολουθεί παρουσιάζεται το υδραυλικό άλμα πριν τον καταβαθμό.



Εικόνα 15: Υδραυλικό άλμα μετά τον αναβαθμό (Διαδίκτυο 14)

- Η τρίτη περίπτωση είναι η παρεμβολή του θυροφράγματος. Σε αυτή την περίπτωση το βάθος του νερού κατά την έξοδό του από την θυρίδα γίνεται υπερκρίσιμο ενώ στα κατάντη οι υπάρχουσες συνθήκες υποχρεώνουν τη ροή να επανέρθει σε υποκρίσιμο βάθος. Έτσι λοιπόν προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός σχηματίζεται υδραυλικό άλμα.

Στην εικόνα 16 παρουσιάζεται ένα υδραυλικό άλμα με την παρεμβολή ενός θυροφράγματος.



Εικόνα 16: Παρεμβολή θυροφράγματος για υδραυλικό άλμα (Διαδίκτυο 15)

Μεταξύ των διατομών 1 και 2 θεωρούμε πως δεν υπάρχουν απώλειες ενέργειας δηλαδή:

$$E_1 = E_2$$

Τα βάθη y_1 και y_2 ονομάζονται εναλλακτικά βάθη. Στη ροής μας όμως παρεμβάλλεται εμπόδιο από την παρούσα δύναμη F οπότε:

$$F_1 - F_2 = (F / \gamma)$$

Τα βάθη y_2 και y_3 είναι συζυγή. Οι απώλειες ενέργειας ΔE λόγω του υδραυλικού άλματος μπορούν να υπολογιστούν από την εξίσωση:

$$\Delta E = E_2 - E_3$$

3 Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Κατασκευή φυσικού μοντέλου στο εργαστήριο

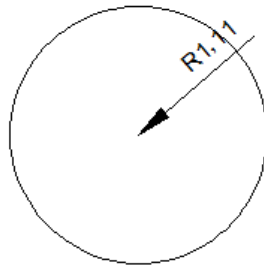
Για την εκπόνηση της παρούσας πτυχιακής αναπτύχθηκαν δύο πειραματικές προσεγγίσεις. Σύμφωνα με την πρώτη προσέγγιση, αρχικά προτείνονταν να γίνουν τέσσερις δοκιμές με διαφορετικές διατομές. Η αρχική αυτή προσέγγιση για την πρώτη κατηγορία είναι ότι διατηρείται σταθερό το εμβαδόν από την δεύτερη περίπτωση και από εκεί και πέρα βρίσκω τα διαφορετικά πλάτη που χρειάζονται για την κατασκευή των φυσικών ξύλινων μοντέλων. Με βάση τη δεύτερη προσέγγιση, η οποία και εφαρμόστηκε, για την δεύτερη κατηγορία βασίζεται με την ίδια ακτίνα r_1 και το ίδιο αρχικό εμβαδόν ($E=3,8688\text{cm}^2$) βρίσκω μια καινούρια ακτίνα την r_2 και με αυτήν συνεχίζω για να υπολογίσω τα καινούρια πλάτη των βάρων μου.

ΠΡΩΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ – ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ

Με ακτίνα $r_1=1,11$:

Για την 1^η περίπτωση με κυκλική διατομή έχω:

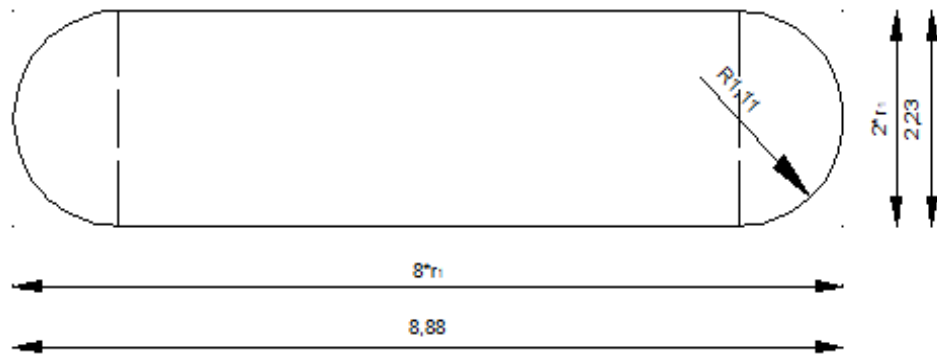
· Για $r_1=1,11$ το $E=\pi*r_1^2=3,14*(1,11)^2 \Rightarrow E=3,8688\text{cm}^2$



ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

Για την 2^η περίπτωση έχω ορθογωνική διατομή με ημικυκλικά άκρα:

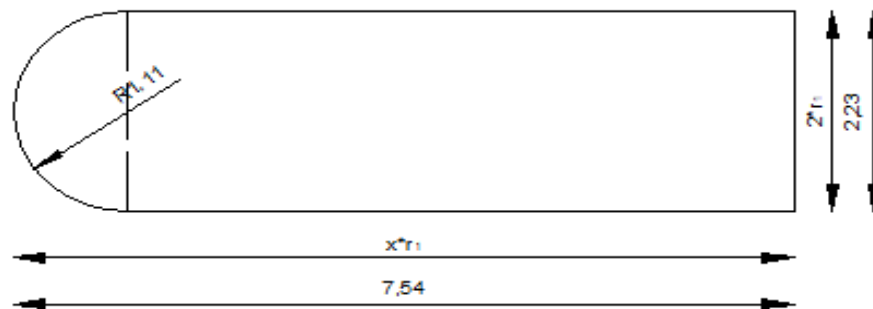
· Για $r_1=1,11$ το $E=12*r_1^2 + \pi*r_1^2=12*(1,11)^2+3,14*(1,11)^2 \Rightarrow E=18,653\text{cm}^2$



ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ ΗΜΙΚΥΚΛΙΚΑ ΑΚΡΑ

Για την 3^η περίπτωση έχω ορθογωνική διατομή με ένα αριστερό άκρο:

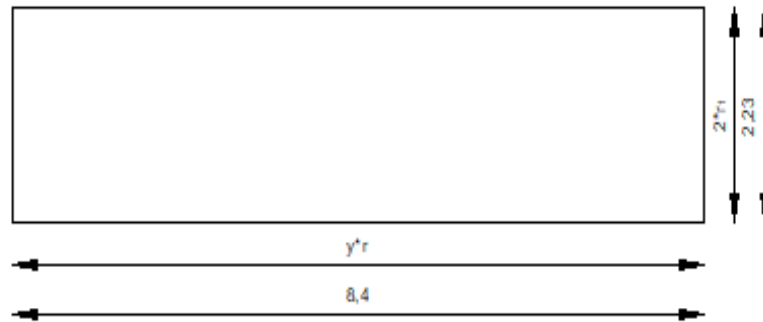
- Για $r_1=1,11$ το $E=(\pi*r_1^2)/2 + 2*x*r_1^2$
 $\text{Ø}18,653=[3,14*(1,11)^2]/2 + 2*(1,11)^2\text{Ø}x=6,79\text{cm}$



ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ ΕΝΑ ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΗΜΙΚΥΚΛΙΚΟ ΑΚΡΟ

Για την 4^η περίπτωση έχω ορθογωνική διατομή

- Για $r_1=1,11$ το $E=2*y*r_1^2\text{Ø}18,653=2*y*(1,11)^2\text{Ø}y=7,5696\text{cm}$



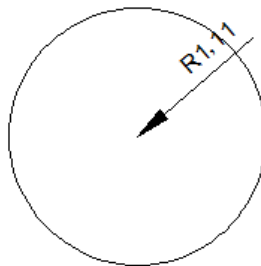
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ - ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ

Με ακτίνα $r_1=1,11$:

Για την 1^η περίπτωση με κυκλική διατομή έχω:

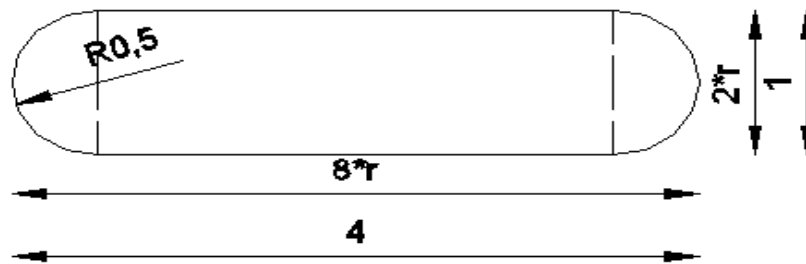
- Για $r_1=1,11$ το $E=\pi \cdot r_1^2=3,14 \cdot (1,11)^2 \Rightarrow E=3,8688 \text{cm}^2$



ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

Για την 2^η περίπτωση με εμβαδόν $E=3,8688 \text{cm}^2$ έχω για ορθογωνική διατομή με ημικυκλικά άκρα ακτίνα:

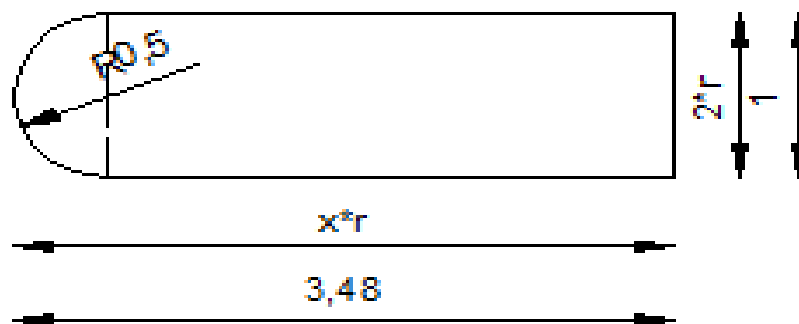
- $E=12 \cdot r^2 + \pi \cdot r^2 \Rightarrow 3,8688=12 \cdot r^2 + 3,14 \cdot r^2 \Rightarrow 0,25 \Rightarrow r=0,5$



ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ ΗΜΙΚΥΚΛΙΚΑ ΑΚΡΑ

Για την 3^η περίπτωση έχω ορθογωνική διατομή με ένα αριστερό άκρο:

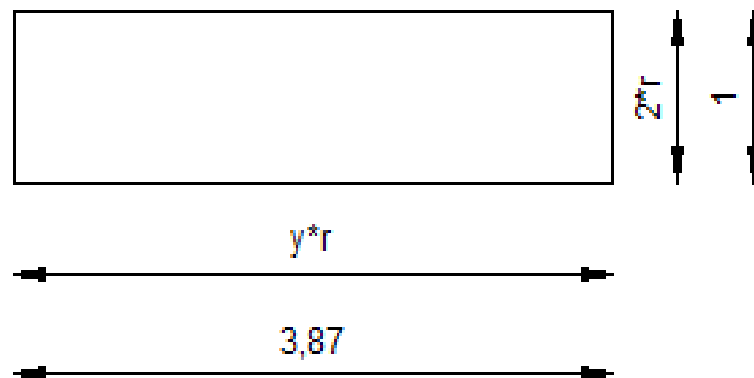
- Για ακτίνα $r = 0,5$ έχω $E = (\pi \cdot r^2)/2 + 2 \cdot x \cdot r^2 \approx 3,8688 = [3,14 \cdot (0,5)^2]/2 + 2 \cdot x \cdot (0,5)^2$
 $\Rightarrow x = 6,9526 \text{ cm}$



ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ ΜΕ ΕΝΑ ΑΡΙΣΤΕΡΟ ΗΜΙΚΥΚΛΙΚΟ ΑΚΡΟ

Για την 4^η περίπτωση έχω ορθογωνική διατομή:

- Για $r=0,5$ έχω $E = 2 \cdot y \cdot r^2 \approx 3,8688 = 2 \cdot y \cdot (0,5)^2 \Rightarrow y = 7,7376 \text{ cm}$

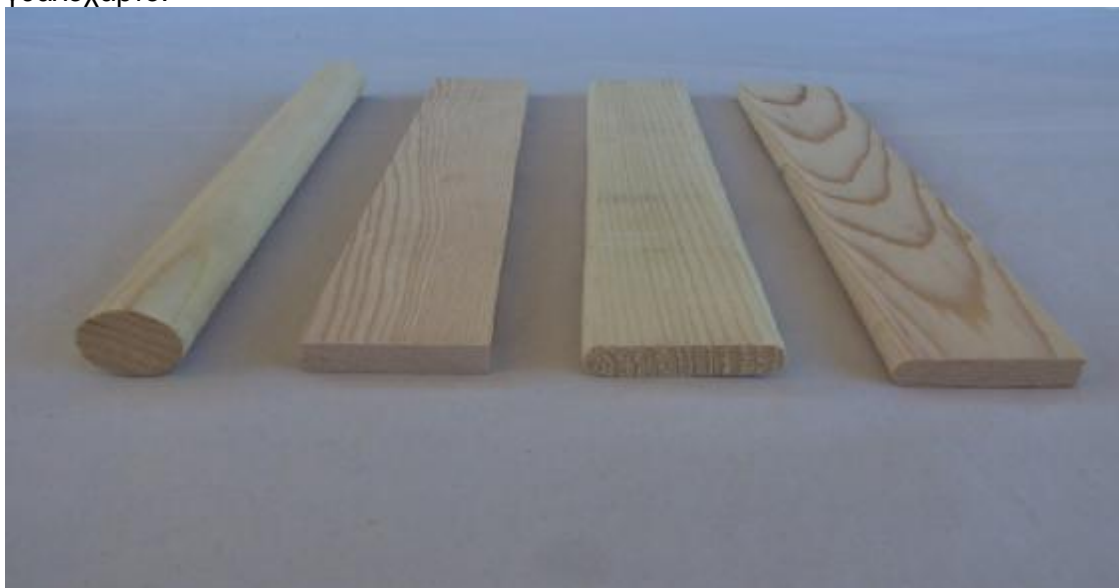


ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

3.2 Λεπτομέρειες κατασκευής ξύλινων ομοιωμάτων (μοντέλων) εργαστηρίου

Για την κατασκευή των ξύλινων μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν για το πείραμά μας χρησιμοποιήσαμε ξύλο οξιάς. Αρχικά κόψαμε τα ξύλα στις διαστάσεις που θέλαμε, στη συνέχεια τα έτριψα με λεπτό γυαλόχαρτο νούμερο 600 και 800 έτσι ώστε να μειώσουμε το συντελεστή τριβής. Τέλος για να μην υπάρχουν προβλήματα με την τοποθέτησή τους μέσα στο νερό τα έβαψα με ειδικό βερνίκι θαλάσσης.

Στην εικόνα 17 απεικονίζονται τα ξύλινα ομοιώματα αφού έχουν τριφτεί με το λεπτό γυαλόχαρτο.



Εικόνα 17: Απεικόνιση ξύλινων ομοιωμάτων πριν το βερνίκι

Στην εικόνα 18 παρουσιάζονται τα ξύλινα ομοιώματα ενώ έχουν περαστεί με το ειδικό βερνίκι θαλάσσης.



Εικόνα 18: Απεικόνιση ξύλινων ομοιωμάτων με βερνίκι

3.3 Λεπτομέρειες κατασκευής και διαμόρφωσης ομοιωμάτων

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται στοιχεία λεπτομερειών διαμόρφωσης των επιμέρους τεσσάρων διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του πειράματος όσο αφορά την πρώτη κατηγορία. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 19 παρουσιάζεται η διαμόρφωση της κυκλικής διατομής που χρησιμοποιήθηκε κατά την έναρξη του πειράματος με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_1 = 35\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς



Εικόνα 19: Διαμόρφωση κυκλικής διατομής μετά το βερνίκι

Στην εικόνα 20 που ακολουθεί παρουσιάζεται η διαμόρφωση της ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_2 = 8,88\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς



Εικόνα 20: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα μετά το βερνίκι

Στην εικόνα 21 παρουσιάζεται η διαμόρφωση της ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_3 = 7,54\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς



Εικόνα 21: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο μετά το βερνίκι

Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται η διαμόρφωση της ορθογωνικής διατομής με χαρακτηριστικά:

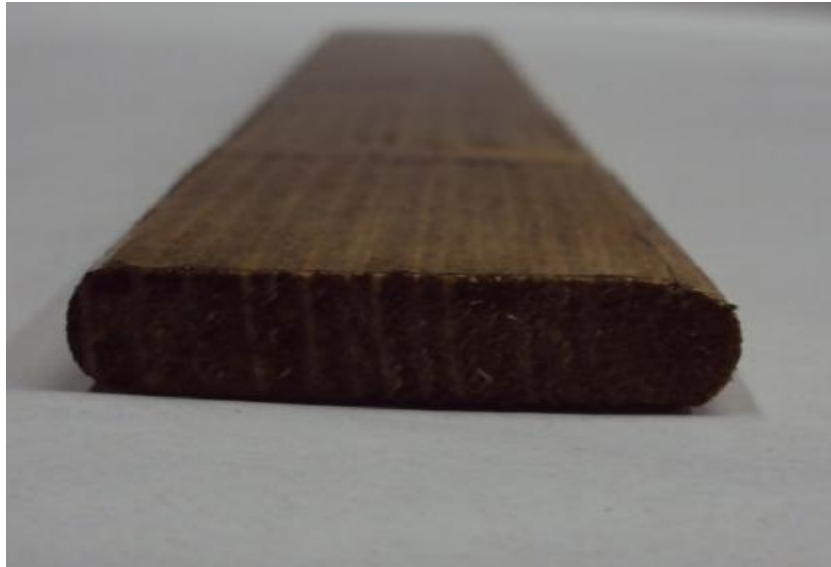
1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_4 = 8,4\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς



Εικόνα 22: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής μετά το βερνίκι

Στη συνέχεια ακολουθούν εικόνες όπου παρουσιάζονται στοιχεία λεπτομερειών διαμόρφωσης των επιμέρους τεσσάρων διατομών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση του πειράματος όσο αφορά την δεύτερη κατηγορία. Ιδιαίτερα στην εικόνα 23 παρουσιάζεται η διαμόρφωση της ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 0,5\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_5 = 4\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς



Εικόνα 23: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με μικρότερη ακτίνα μετά το βερνίκι

Στην εικόνα 24 παρουσιάζεται η ορθογωνική διατομή με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 0,5\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_6 = 3,48\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς



Εικόνα 24: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα ημικυκλικό άκρο με μικρότερη ακτίνα μετά το βερνίκι

Στην εικόνα 25 απεικονίζεται η ορθογωνική διατομή με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 0,5\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_7 = 3,87\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς

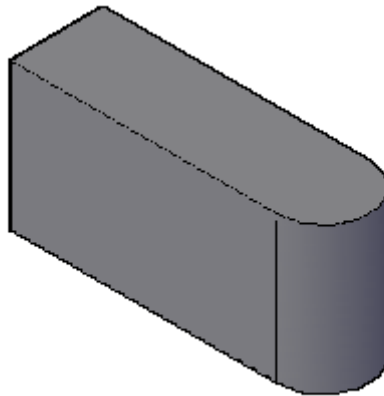


Εικόνα 25: Απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με μικρότερη ακτίνα μετά το βερνίκι

3.4 Τρισδιάστατη απεικόνιση ξύλινων ομοιωμάτων εργαστηρίου

- Πρώτη περίπτωση του πειράματός μου

Στην εικόνα 26 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση του βάρους με ένα ημικυκλικό άκρο. Η διάστασή του είναι $L_3 = 7,54\text{cm}$



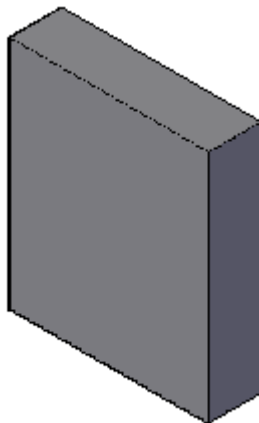
Εικόνα 26: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα ημικυκλικό άκρο.

Στην εικόνα 27 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη κυκλική διατομή με ακτίνα $R = 1,11\text{cm}$ και μήκος $L_1 = 30\text{cm}$



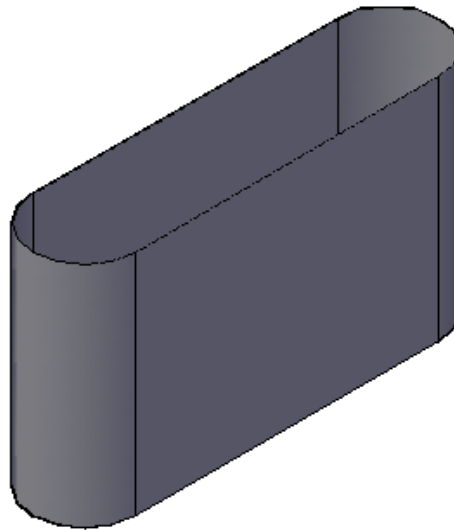
Εικόνα 27: Τρισδιάστατη απεικόνιση κυκλικής διατομής.

Στην εικόνα 28 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της ορθογωνικής διατομής με μήκος $L_4 = 8,4\text{cm}$.



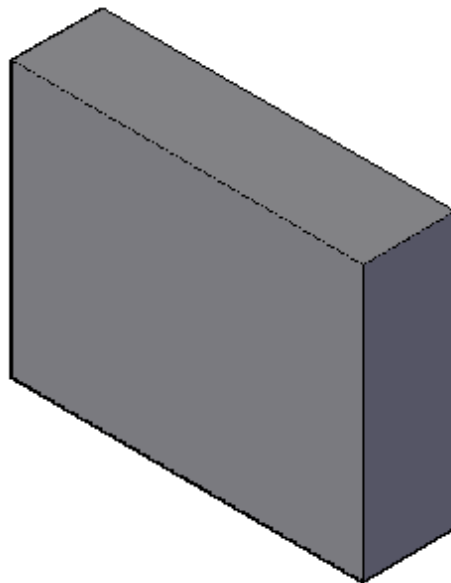
Εικόνα 28: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής.

Στην εικόνα 29 απεικονίζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της ορθογωνικής διατομής με δύο ημικυκλικά άκρα όπου έχει μήκος $L_2 = 8,8\text{cm}$



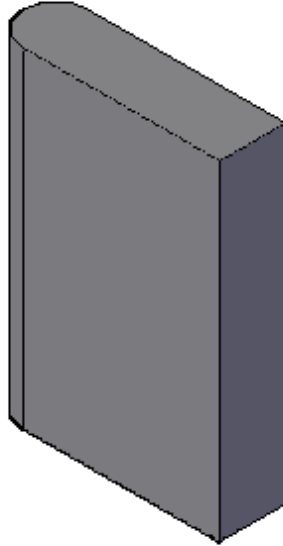
Εικόνα 29: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με δύο ημικυκλικά άκρα.

· Δεύτερη περίπτωση του πειράματός μου
Στην εικόνα 30 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση της ορθογωνικής διατομής με μήκος $L_7 = 3,87\text{cm}$.



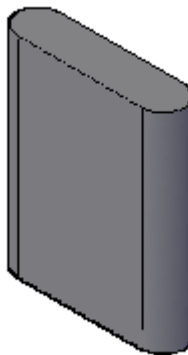
Εικόνα 30: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής και μικρότερο μήκος.

Στην εικόνα 31 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση μιας ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο το οποίο έχει μήκος $L_6 = 3,48\text{cm}$.



Εικόνα 31: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο και μικρότερο μήκος.

Στην εικόνα 32 παρουσιάζεται η τρισδιάστατη απεικόνιση μιας ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα τα οποία έχουν μήκος $L_5 = 4\text{cm}$.



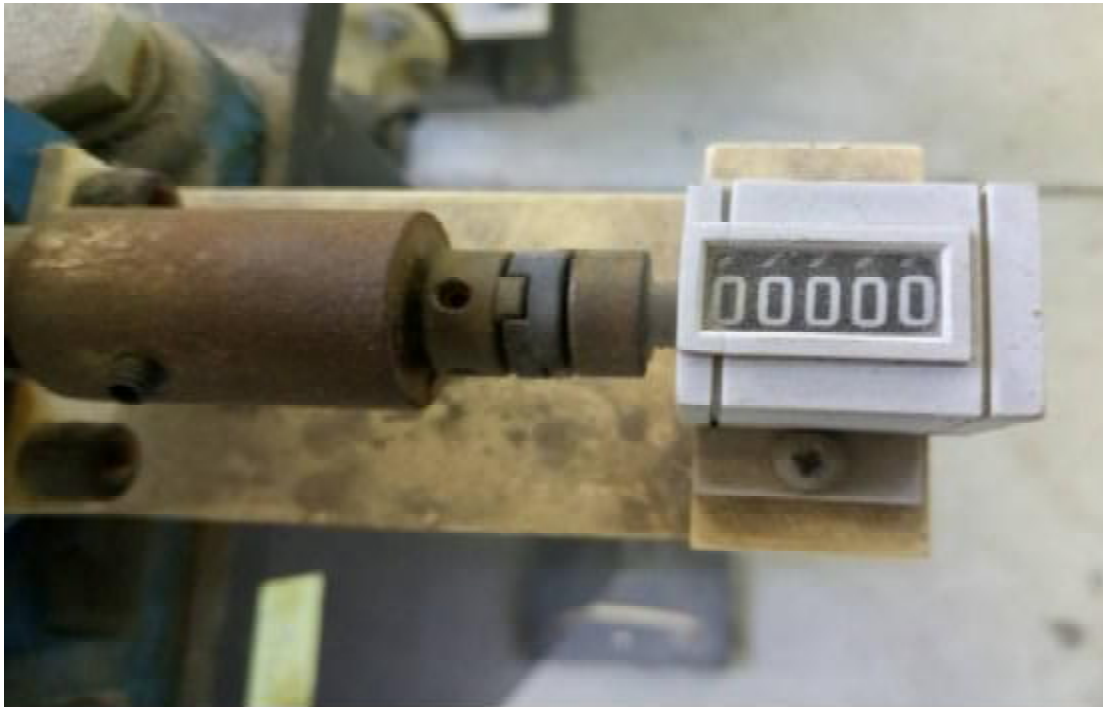
Εικόνα 32: Τρισδιάστατη απεικόνιση ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα και μικρότερο μήκος.

4 Κεφάλαιο 4^ο

4.1 Πειραματική διαδικασία

Αρχικά πριν ξεκινήσουμε το πείραμά μας οριζοντιώσαμε το κανάλι έτσι ώστε να έχουμε μηδενική κλίση (Εικόνα 33). Αν και στην πραγματικότητα, εφαρμόζοντας μονοδιάστατη ανάλυση προκύπτει κλίση για τον ανοικτό αγωγό, αλλά πολύ μικρή.

Στην Εικόνα 34 δίδεται η πλάγια όψη του καναλιού του Εργαστηρίου στο οποίο έχει αναπτυχθεί περίπου ομοιόμορφη ροή στην οποία το βάθος ροής παραμένει σχεδόν σταθερό και ίσο με εκείνο που υπολογίστηκε από τη μονοδιάστατη ανάλυση της ροής για το πρόβλημα που πρόκειται να μελετήσουμε. Το επίπεδο (στάθμη) της ελεύθερης επιφάνειας δεικνύεται με μαύρη διακεκομμένη γραμμή.



Εικόνα 33: Απεικόνιση οριζοντίωσης καναλιού



Εικόνα 34: Απεικόνιση της ελεύθερης επιφάνειας

4.1.1 Στοιχεία υπολογισμού χαρακτηριστικών της ροής γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας, με εφαρμογή μονοδιάστατης ανάλυσης της ροής

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί μελετάται η ροή γύρω από τυπικό μεσόβαθρο γέφυρας και πραγματοποιείται μονοδιάστατη ανάλυση για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ροής πριν την πειραματική μελέτη (Φουρνιώτης, 2017). Εξετάζονται 4 διαφορετικές διατομές βάθρων που συναντώνται στην πράξη κατά τη διαμόρφωση της διατομής μεσόβαθρου γέφυρας. Οι διαστάσεις έχουν επιλεγεί με βάση τυπικές τιμές ανοίγματος γέφυρας (B), διαμέτρου βάθρου γέφυρας κυκλικής διατομής (D), ύψους βάθρου (L), για την περίπτωση γεφύρωσης διατομής ποταμού ή χειμάρρου.

Επιπλέον, για την πειραματική διερεύνηση των 4 διαφορετικών διατομών, ως βάση θεωρήθηκε η κυκλική διατομή βάθρου διαμέτρου D και οι συνθήκες ροής που αναφέρονται στην πειραματική εργασία των Melville and Raudkivi, 1977. "Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers". Journal of Hydraulic Research, Vol. 15(4), pp. 373-380. Τα πειραματικά αυτά δεδομένα αξιοποιήθηκαν και από τους Nagata et al. (2005). [Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131(12), pp. 1074-1087], για την πιστοποίηση αριθμητικού ομοιώματος μελέτης ροής και μεταφοράς φερτών υλών. Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί, δίδονται γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στοιχεία ροής με βάση τις προαναφερθείσες εργασίες, καθώς και τα αντίστοιχα που προέκυψαν για την περίπτωση της μελέτης της ροής στον ανοικτό αγωγό του Εργαστηρίου στο Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας. Τα στοιχεία του Πίνακα 1 αναφέρονται στην περίπτωση βάθρου γέφυρας κυκλικής διατομής, διαμέτρου D .

Επιπλέον, μελετήθηκαν πειραματικά και άλλες τρεις περιπτώσεις διαμόρφωσης βάθρων, ήτοι ορθογωνική διατομή, ορθογωνική διατομή με ημικυκλικά άκρα, ορθογωνική διατομή που διαμορφώνεται με 1 ημικυκλικό άκρο (αρχή) και ορθογωνικό πέρασ.

Η πειραματική διάταξη ανοικτού αγωγού που χρησιμοποιήθηκε για την διενέργεια του πειράματος βρίσκεται στο Εργαστήριο Ρευστομηχανικής «Ν. Νανούσης», του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας. Ειδικότερα, το Εργαστήριο Ρευστομηχανικής «Ν. Νανούσης», του Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, διαθέτει πειραματική διάταξη ανοικτού αγωγού ορθογωνικής διατομής μήκους 8 m, πλάτους πυθμένα 0,20 m με δυνατότητα βάθους ροής έως 0,25 m. Ο αγωγός αυτός είναι κατάλληλος για την πειραματική διερεύνηση ροών με ελεύθερη επιφάνεια, με σκοπό την ερευνητική και εφαρμοσμένη πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών της ροής. Στόχο αποτελεί η αξιοποίηση της πειραματικής διάταξης του Εργαστηρίου για την πειραματική μελέτη πρακτικών προβλημάτων ροής με ελεύθερη επιφάνεια που βρίσκουν εφαρμογή στην επιστήμη του Πολιτικού Μηχανικού.

Πίνακας 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά βάθρου κυκλικής διατομής, διαμέτρου D και χαρακτηριστικά της ροής.

Περίπτωση βάθρου κυλινδρικής διατομής (Cylindrical pier)	Παροχή ύδατος, Q (Water Discharge , m ³ /s)	Πλάτος καναλιού, B (Channel width , m)	Κλίση πυθμένα αγωγού, S (Bed slope , m/m)	Βάθος ροής, y _n (Flow depth , m)	Μέση ταχύτητα ροής, U (Mean approach flow velocity , m/s)	Αριθμός Froude της ροής (Froude number , Fr)	Αριθμός Reynolds της ροής με βάση το βάθος ροής y (Re(y) [Re(Ry)])	Αριθμός Reynolds της ροής με βάση τη διάμετρο του βάθρου D (R(D))
Melville and Raudkivi, 1977) and Case 3 from (Nagata et al., 2005) (D = 5,08 cm)	0,01712	0,456	1/10.000	0,15	0,250	0,21	37.544 [...]	12.715
Εργαστήριο Ρευστομηχανικής «Ν.Νανούσης» Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας (Πειραματική διάταξη, PLINT) (D = 1,11 cm)	0,0022 4 m ³ /s 2,224lt /s	0,2	0,12	0,066	0,169	0,21	11.131 [7.443]	3.755

Μονοδιάστατη Ανάλυση της Ροής - Υπολογισμοί

Θεωρούμε ότι ο αγωγός έχει ήπια κλίση πυθμένα (M) και η ροή στον αγωγό είναι υποκρίσιμη (χαρακτηριστική για την περίπτωση ποτάμιας ροής). Για τον υπολογισμό της κλίσης του καναλιού (PLINT) εφαρμόζεται η εξίσωση Manning (εξ. 1), θεωρώντας ότι στον αγωγό αναπτύσσεται ομοιόμορφη ροή, με κανονικό βάθος, $y_n = 0,0658 \text{ m}$, εφεξής: $y_n \equiv y$.

$$U = (1/n) * Rh^{2/3} * So^{1/2} \quad (1)$$

Όπου: n= ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning

So= η κατά μήκος κλίση του αγωγού

Rh= ορίζεται η υδραυλική ακτίνα, η οποία για την περίπτωση αγωγού ορθογωνικής διατομής καθορίζεται ως εξής:

$$Rh = A * P = (b * y) / (b + 2*y) \quad (2)$$

Όπου: A = εμβαδόν υγρής διατομής (b * y)

P = βρεχόμενη περίμετρος (b + 2y), για ορθογωνική διατομή

Άρα: $Rh = (0,20 * 0,0658) / (0,20 + 2*0,0658) \Rightarrow Rh = 0,039\text{m}$

Με βάση το βάθος ροής (ομοιόμορφο) που έχουμε επιλέξει, $y_n = 0,0658\text{m}$ και την έκφραση του αριθμού Froude, επιλύοντας ως προς τη μέση ταχύτητα ροής, U_n , έχουμε:

$$U_n = Fr * \sqrt{g*y} = 0,21 * \sqrt{9,81*0,0658} \Rightarrow U_n = 0,169 \text{ m/s} \quad (3)$$

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή του αριθμού Reynold, με βάση το βάθος ροής, y, την διάμετρο του βάρους, D, ή την υδραυλική ακτίνα, Ry.

- **Reynolds number (based on flow depth, y):** $R(y) = (U*y_n) / \nu = (0,169*0,0658) / 0,999*10^{-6} \Rightarrow R(y) = 11.131$
- **Reynolds number (based on pier diameter, D):** $R(D) = (U*D) / \nu = (0,169*0,0222) / 0,999*10^{-6} \Rightarrow R(D) = 3.755$
- **Reynolds number (based on hydraulic Radius, Ry):** $R(Ry) = [U*(4*Ry)] / \nu = [0,169*(4*0,011)] / 0,999*10^{-6} \Rightarrow R(Ry) = 7.443$

Γνωρίζοντας την τιμή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning και του αριθμού Froude, μπορούμε να υπολογίσουμε την κλίση του καναλιού, So, έτσι ώστε η ροή να διατηρείται υποκρίσιμη. Συνδυασμός των εξ. (1, 3), δίδει:

$$Fr*\sqrt{g*y} = 1/n* Rh^{2/3}*So^{1/2} \quad (4)$$

$$0,21*\sqrt{9,81*0,0658} = (1/0,01)*0,039^{2/3}*So^{1/2}$$

$$0,21*0,8034 = 100*0,1150*So^{1/2}$$

$$0,1687 = 11,50*So^{1/2}$$

$$0,0146 = So^{1/2} \Rightarrow So = 0,12$$

Με βάση τα πειράματα των Melville and Raudkivi (1977), όπως αναφέρεται και από τους Nagata et al. (2005), χρησιμοποιήθηκε στον πυθμένα του καναλιού υλικό με μέση διάμετρο κόκκων $d_{50} = 0.385 \text{ mm}$ (median grain size). Ωστόσο, ο επίπεδος πυθμένας πάνω από το λεπτόκοκκο υλικό θεωρήθηκε υδραυλικά λείος (hydraulically smooth). Με βάση τη θεώρηση αυτή (Melville and Raudkivi, 1977) και δεδομένης της εφαρμογής της εξίσωσης Manning για τον υπολογισμό της κλίσης του καναλιού, συσχετίστηκε ο συντελεστής τραχύτητας κατά Manning, n , με την μέση διάμετρο κόκκων, $d = d_{50}$, του πυθμένα (median size of the bed material). Εφαρμόζεται η εμπειρική εξίσωση που προτάθηκε από τον Strickler (1923) και αναφέρεται από τον Henderson (1966), σύμφωνα με την οποία:

$$n = 0,034 \cdot d^{1/6} \quad (5)$$

Με βάση την εξ. (5), προκύπτει τιμή του συντελεστή τραχύτητας κατά Manning, $n = 0,034 \cdot (0,385 \cdot 10^{-3})^{1/6} = 9,17 \cdot 10^{-3} \approx 0,010 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ ή σε ft $\delta n = 0.011 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$

Η τιμή που προέκυψε για τον συντελεστή n αντιστοιχεί στην περίπτωση γυάλινου τοιχώματος αγωγού (glass, plastic, machined metal) όπου $n = 0.010 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ (Henderson, 1966). Το αποτέλεσμα που προέκυψε για τον συντελεστή n βρίσκεται σε καλή συμφωνία με την πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου στην οποία ο πυθμένας και τα τοιχώματα του αγωγού είναι κατασκευασμένα από γυαλί.

Υπολογισμός μήκους εισόδου

Με βάση την θεώρηση της πλήρως ανεπτυγμένης ροής στην περιοχή του βάρους, εκτιμάται το μήκος εισόδου (entrance length) που απαιτείται. Εφαρμόζεται η εξ. (6) η οποία μας δίνει την απόσταση από την είσοδο του αγωγού, x , συναρτήσει του πάχους του τυρβώδους οριακού στρώματος, δ (Henderson, 1966). Η ταχύτητα στην είσοδο του αγωγού υποθέτουμε ότι παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή.

$$\delta/x = 0,38 \cdot (U_o \cdot x / \nu)^{-1/5} \quad (6)$$

Όπου: U_o = η ταχύτητα του ελευθέρου ρεύματος και
 ν = το κινηματικό ιξώδες του ρευστού.

Κάνοντας χρήση της παραπάνω εξίσωσης και θεωρώντας ως τελικό πάχος του οριακού στρώματος στην κατάσταση της πλήρους ανάπτυξης της ροής, $\delta = y_n = 0,0658 \text{ m}$ (δηλαδή το συνολικό βάθος ροής που υπολογίσαμε, y_n), εκτιμάται το μήκος εισόδου που απαιτείται από την είσοδο του αγωγού, $x = 1,68 \text{ m}$. Μετά το μήκος αυτό επιλέγουμε μια θέση ώστε να τοποθετήσουμε τα ομοιώματα για την πειραματική μελέτη της ροής γύρω από το μεσόβαθρο (Φουρνιώτης, 2017).

4.1.2 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων

4.1.3 Πρώτο πείραμα

Αρχικά τοποθετήσαμε το πρώτο μας ξύλινο ομοίωμα (το οποίο ήταν το κυκλικό) στα 5,5m από την είσοδο του καναλιού μας, έτσι ώστε να εξασφαλίζονται όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες ανάπτυξης ομοιόμορφης ροής με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_1 = 35\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς

Στην εικόνα 35 παρουσιάζεται το κυκλικό βάθρο μέσα στο κανάλι, όπου διακρίνεται η διαμόρφωση της ελεύθερης επιφάνειας της ροής γύρω από το μεσόβαθρο.



Εικόνα 35: Κυκλικό βάθρο

Στην εικόνα 36 παρουσιάζεται η κάτοψη του βάρους μέσα στο κανάλι μας. Μπορούμε να διακρίνουμε τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται η ροή μας.



Εικόνα 36: Κάτοψη ροής με κυκλικό βάρους

Αφού το τοποθετήσαμε μετρήσαμε το βάθος ροής στα ανάντη και παρατηρήσαμε πως ενώ είχαμε ένα σταθερό βάθος ροής $y_m = 6,6\text{cm}$ (η τιμή του βάθους ροής είχε προκύψει από τη μονοδιάστατη ανάλυση και διατηρήθηκε σταθερό στον ανοικτό αγωγό) αυτό μετατράπηκε σε ένα $y_{av.} = 6,8\text{cm}$ (προέκυψε αύξηση του βάθους ροής). Αυτό έγινε διότι η παρουσίαση του εμποδίου (ξύλινο κυκλικό ομοίωμα) επηρεάζει τη ροή μας με αποτέλεσμα το βάθος ροής να αυξάνεται λίγο πριν το εμπόδιό μας. Επιπρόσθετα μετρήσαμε και το βάθος ροής στα κατάντη το οποίο ήταν $y_{κατ.} = 6,4\text{cm}$.

Τέλος μετρήσαμε στα κατάντη την μέγιστη πτώση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή πλησίον του βάρους η οποία προκύπτει σε απόσταση 9cm από τον κατακόρυφο άξονα του βάρους και σε βάθος $y_{max} = 6,2\text{cm}$.

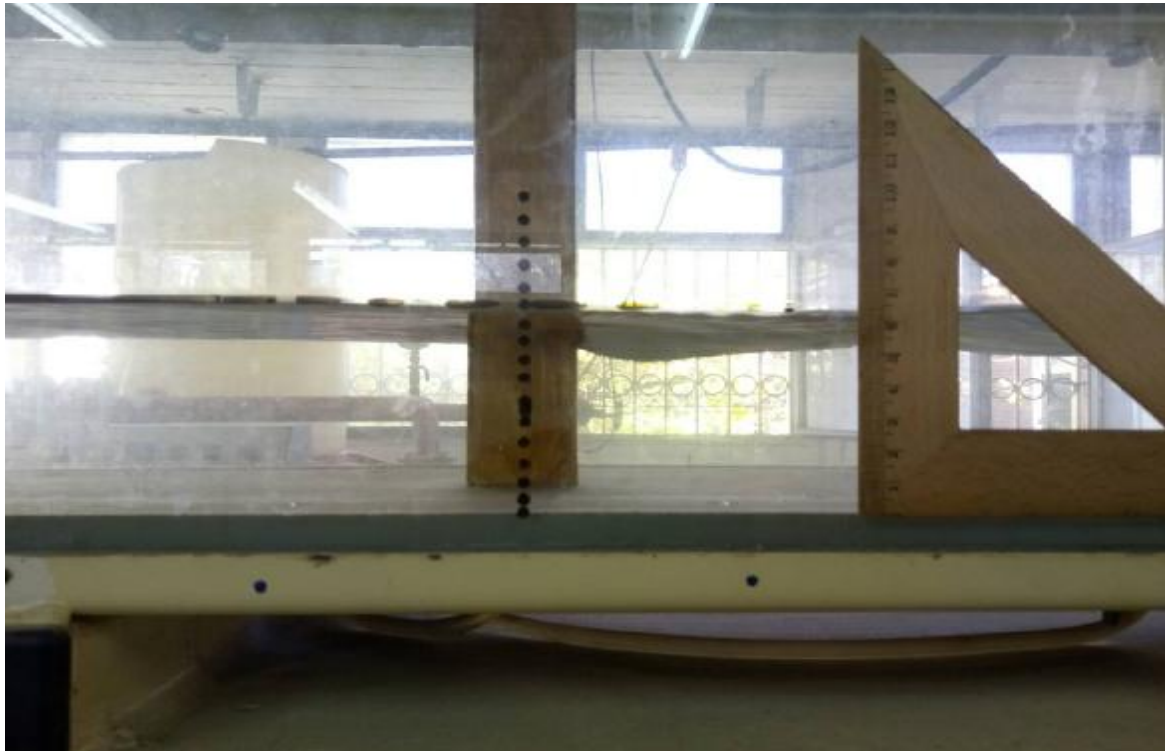
Αξίζει να σημειωθεί πως με την τοποθέτηση του βάρους προκλήθηκε ένας κυματισμός ο οποίος συνεχίστηκε για τα επόμενα 14cm από τον άξονά του.

4.1.4 Δεύτερο πείραμα

Τοποθετήσαμε το δεύτερο ξύλινο ομοίωμα το οποίο ήταν το ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο στα 5,5m από την είσοδο του καναλιού έτσι ώστε να εξασφαλίζονται όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες ανάπτυξης ομοιόμορφης ροής με τα εξής χαρακτηριστικά

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_3 = 7,54\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς

Στην εικόνα 37 παρουσιάζεται το ορθογωνικής διατομής βάθρο με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο όπου με τη βοήθεια του χάρακα βλέπουμε τη μέγιστη πτώση της ροής.



Εικόνα 37: Ορθογωνική διατομή με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο

Στην παρακάτω εικόνα 38 παρουσιάζεται η κάτοψη της ροής. Μπορούμε και εδώ να διακρίνουμε τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται η ροή μας.



Εικόνα 38: Κάτοψη ροής με βάθρο ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο

Στην περίπτωση αυτή παρατηρήσαμε πάλι πως το βάθος ροής στα ανάντη λίγο πριν το βάθρο είναι μεγαλύτερο από το βάθος ροής που έχω επιλέξει , (η τιμή του βάθους ροής είχε προκύψει από τη μονοδιάστατη ανάλυση και διατηρήθηκε σταθερό στον ανοικτό αγωγό) έτσι το $y_{αν.} = 6,7\text{cm}$. (προέκυψε αύξηση του βάθους ροής).

Το βάθος ροής στα κατόντη ήταν $y_{κατ.} = 6,3\text{cm}$. Τέλος μετρήσαμε στα κατόντη την μέγιστη πτώση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή πλησίον του βάθρου η οποία προκύπτει σε απόσταση 7cm από τον κατακόρυφο άξονα του βάθρου και σε βάθος $y_{max} = 6,1\text{cm}$. Επίσης σε αυτό το πείραμα παρατηρήσαμε ότι η διαταραχή του κύματος διαδίδεται για τα επόμενα 70cm από τον άξονα του βάθρου μας.

4.1.5 Τρίτο πείραμα

Τοποθετήσαμε το τρίτο μας βάθρο ορθογωνικής διατομής με δύο ημικυκλικά άκρα στα 5,5cm από την είσοδο του καναλιού έτσι ώστε να εξασφαλίζονται όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες ανάπτυξης ομοιόμορφης ροής με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_2 = 8,88\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς

Στην εικόνα 39 παρουσιάζεται το βάθρο με ορθογωνική διατομή και δύο ημικυκλικά άκρα.



Εικόνα 39: Ορθογωνική διατομή με δύο ημικυκλικά άκρα

Στην εικόνα 40 παρουσιάζεται η κάτοψη της ροής. Μπορούμε και εδώ να διακρίνουμε τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται η ροή μας.



Εικόνα 40: Κάτοψη ροής από βάθρο ορθογωνικής διατομής με δύο ημικυκλικά άκρα

Στην περίπτωση αυτή παρατηρήσαμε πάλι πως το βάθος ροής στα ανάντη λίγο πριν το βάθρο είναι μεγαλύτερο από το βάθος ροής που έχω επιλέξει, (η τιμή του βάθους ροής είχε προκύψει από τη μονοδιάστατη ανάλυση και διατηρήθηκε σταθερό στον ανοικτό αγωγό) έτσι το $y_{av} = 6,8\text{cm}$. (προέκυψε αύξηση του βάθους ροής).

Το βάθος ροής στα κατόντη ήταν $y_{κατ.} = 6,7\text{cm}$. Τέλος μετρήσαμε στα κατόντη την μέγιστη πτώση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή πλησίον του βάθρου η οποία προκύπτει σε απόσταση 3cm από τον κατακόρυφο άξονα του βάθρου και σε βάθος $y_{max} = 5,6\text{cm}$. Επίσης σε αυτό το πείραμα παρατηρήσαμε ότι η διαταραχή του κύματος διαδίδεται για τα επόμενα 80cm από τον άξονα του βάθρου μας.

4.1.6 Τέταρτο πείραμα

Τοποθετήσαμε το τέταρτό μας βάθρο ορθογωνικής διατομής στα 5,5cm από την είσοδο του καναλιού έτσι ώστε να εξασφαλίζονται όσο το δυνατόν καλύτερες συνθήκες ανάπτυξης ομοιόμορφης ροής με τα εξής χαρακτηριστικά:

1. Ακτίνα ομοιώματος $R = 1,11\text{cm}$
2. Μήκος ομοιώματος $L_4 = 8,4\text{cm}$
3. Υλικό κατασκευής ξύλο οξιάς

Στην εικόνα 41 παρουσιάζεται το βάθρο με ορθογωνική διατομή.



Εικόνα 41: Ορθογωνική διατομή

Στην εικόνα 42 παρουσιάζεται η κάτοψη της ροής. Μπορούμε και εδώ να διακρίνουμε τον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται η ροή μας.



Εικόνα 42: Κάτοψη ροής με βάθρο ορθογωνικής διατομής

Στην περίπτωση αυτή παρατηρήσαμε πάλι πως το βάθος ροής στα ανάντη λίγο πριν 7ο βάθρο είναι μεγαλύτερο από το βάθος ροής που έχω επιλέξει, (η τιμή του βάθους ροής είχε προκύψει από τη μονοδιάστατη ανάλυση και διατηρήθηκε σταθερό στον ανοικτό αγωγό) έτσι το $y_{av} = 6,9\text{cm}$. (προέκυψε αύξηση του βάθους ροής).

Το βάθος ροής στα κατόντη ήταν $y_{κατ.} = 6,7\text{cm}$. Τέλος μετρήσαμε στα κατόντη την μέγιστη πτώση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή πλησίον του βάθρου η οποία προκύπτει σε απόσταση 2,7cm από τον κατακόρυφο άξονα του βάθρου και σε βάθος $y_{max} = 5,8\text{cm}$. Επίσης σε αυτό το πείραμα παρατηρήσαμε ότι η διαταραχή του κύματος διαδίδεται για τα επόμενα 70cm από τον άξονα του βάθρου μας.

Στη συνέχεια τοποθετήσαμε το σωλήνα Pitot σε βάθος 5cm από τον πυθμένα του καναλιού μας χωρίς το εμπόδιο κάποιου βάθρου έτσι ώστε να μετρήσουμε την ειδική ενέργεια σε διάφορα σημεία. Παρατηρήσαμε όμως πως ο σωλήνας Pitot δεν μας έδινε σωστά αποτελέσματα διότι η ροής μας ήταν υποκρίσιμη και ο σωλήνας δεν μετράει σε τέτοιου είδους ροή (συγκεκριμένα με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα φαίνεται ότι για μικρές ταχύτητες ροής εντός του αγωγού η ανύψωση του νερού στο σωλήνα Pitot είναι πολύ μικρή).

Στις εικόνες 43 και 44 παρουσιάζονται οι διαφορετικές τοποθετήσεις του σωλήνα Pitot.



Εικόνα 43: Κάθετη τοποθέτηση του σωλήνα Pitot στη ροή



Εικόνα 44: Παράλληλη τοποθέτηση του σωλήνα Pitot στη ροή

4.1.7 Επεξεργασία αποτελεσμάτων – υπολογισμός δύναμης στα βάθρα

Αρχικά θεωρούμε πως έχουμε κλίμακα 1/100 δηλαδή $L_R = L_m / L_P \Leftrightarrow LR = 1 / 100$

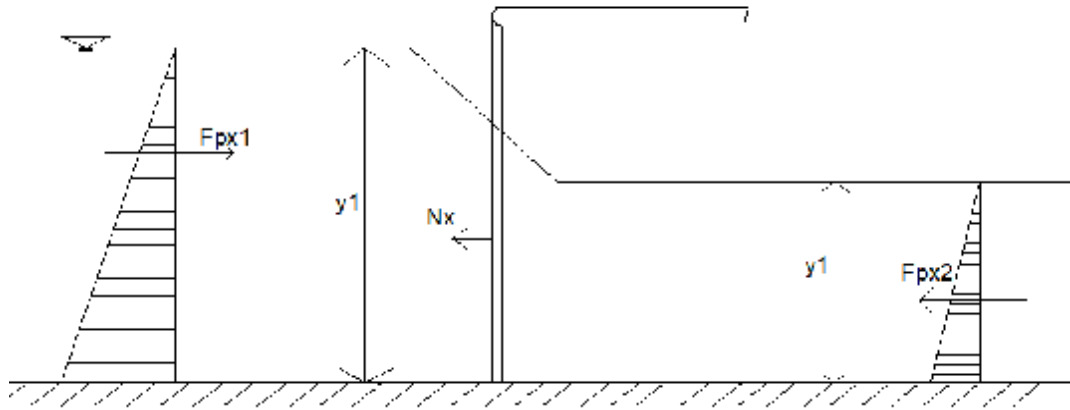
Για τον υπολογισμό της δύναμης στο μεσόβαθρο έχουμε τον ακόλουθο τύπο: (Δημητρίου Ι. & Δημητρίου Δ., 2004)

$$F_R = F_m / F_P = L_R^3 = (1/100)^3 = (1/10^2)^3 = 1/10^6$$

Αρα για να βρούμε τη πραγματική δύναμη σε σχέση με την δύναμη του μοντέλου μας θα εφαρμόζουμε τον εξής τύπο: (Δημητρίου Ι. & Δημητρίου Δ., 2004)

$$N_R = (L_R)^3 = 10^{-6} = N_m / N_P \Leftrightarrow 1 / 10^6 = N_m / N_P \Leftrightarrow N_P = 10^6 * N_m \quad (7)$$

Στην εικόνα 45 παρουσιάζεται ένα τυπικό σκαρίφημα με την απεικόνιση των δυνάμεων που ασκούνται τόσο στη ροή του νερού όσο και στο βάθρο μας.



Εικόνα 45: Σκαρίφημα δυνάμεων

Με βάση το παραπάνω σκαρίφημα εφαρμόζω το Θεώρημα Ορμής για το νερό σε κάθε διατομή που έχω για το πείραμά μου.

Βάθρο κυκλικής διατομής

$$\Sigma F = \rho \cdot Q \cdot (U_{εξ.} - U_{εις.})$$

$$\Sigma F_{ρx} - N_x = \rho \cdot Q \cdot (U_{2x} - U_{1x})$$

$$F_{ρx1} - F_{ρx2} - N_x = \rho \cdot Q \cdot (U_{2x} - U_{1x})$$

$$\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - N_x = \rho \cdot Q \cdot (Q/A_2 - Q/A_1)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - N_x = \rho \cdot Q \cdot [1/(b \cdot y_2) - 1/(b \cdot y_1)]$$

$$\frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - N_x = \rho \cdot Q \cdot [(y_1 - y_2) / (b \cdot y_1 \cdot y_2)]$$

$$\mathbf{N_x = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - \rho \cdot Q \cdot [(y_1 - y_2) / (b \cdot y_1 \cdot y_2)]} \quad \mathbf{(8)}$$

$$N_x = \frac{1}{2} \cdot 9810 \cdot 0,068^2 \cdot 0,2 - \frac{1}{2} \cdot 9810 \cdot 0,064^2 \cdot 0,2 - 1000 \cdot 0,0022404^2 \cdot \{(0,068 - 0,064) / (0,2 \cdot 0,068 \cdot 0,064)\}$$

$$N_x = 4,536144 - 4,018176 - 0,023 \quad \mathbf{\text{Ο} N_x = 0,494968N}$$

Βάθρο ορθογωνικής διατομής με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο

Εφαρμόζω την εξ.8 δηλαδή έχω:

$$N_x = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - \rho \cdot Q \cdot [(y_1 - y_2) / (b \cdot y_1 \cdot y_2)]$$

$$N_x = \frac{1}{2} \cdot 9810 \cdot 0,067^2 \cdot 0,2 - \frac{1}{2} \cdot 9810 \cdot 0,063^2 \cdot 0,2 - 1000 \cdot 0,0022404^2 \cdot [(0,067 - 0,063) / (0,2 \cdot 0,067 \cdot 0,063)]$$

$$N_x = 4,403709 - 3,893589 - 0,027383 \Rightarrow N_x = \mathbf{0,482737N}$$

Βάθρο ορθογωνικής διατομής με δύο ημικυκλικά άκρα

Εφαρμόζω την εξ.8 δηλαδή έχω:

$$N_x = 1/2 \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - 1/2 \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - \rho \cdot Q \cdot [(y_1 - y_2) / (b \cdot y_1 \cdot y_2)]$$

$$N_x = 1/2 \cdot 9810 \cdot 0,068^2 \cdot 0,2 - 1/2 \cdot 9810 \cdot 0,067^2 \cdot 0,2 - 1000 \cdot 0,0022404^2 \cdot [(0,068 - 0,067) / (0,2 \cdot 0,068 \cdot 0,067)]$$

$$N_x = 4,536144 - 4,403709 - 0,006342 \Rightarrow N_x = \mathbf{0,126093N}$$

Βάθρο ορθογωνικής διατομής

Εφαρμόζω την εξ.8 δηλαδή έχω:

$$N_x = 1/2 \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - 1/2 \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - \rho \cdot Q \cdot [(y_1 - y_2) / (b \cdot y_1 \cdot y_2)]$$

$$N_x = 1/2 \cdot 9810 \cdot 0,069^2 \cdot 0,2 - 1/2 \cdot 9810 \cdot 0,067^2 \cdot 0,2 - 1000 \cdot 0,0022404^2 \cdot [(0,069 - 0,067) / (0,2 \cdot 0,069 \cdot 0,067)]$$

$$N_x = 4,670541 - 4,403709 - 0,0125 \Rightarrow N_x = \mathbf{0,254332N}$$

Εφαρμόζοντας την εξ.7 θα βρούμε την πραγματική δύναμη που ασκείται στα πειραματικά μοντέλα, θεωρώντας γεωμετρική κλίμακα 1/100:(Όπου $N_m \equiv N_x$)

- Κυκλική διατομή : $N_p = 10^6 \cdot N_m \Rightarrow N_p = 10^6 \cdot 0,494968 \Rightarrow N_p = \mathbf{494968N}$
- Ορθογωνική με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο : $N_p = 10^6 \cdot N_m \Rightarrow N_p = 10^6 \cdot 0,482737 \Rightarrow N_p = \mathbf{482737N}$
- Ορθογωνική με δύο ημικυκλικά άκρα : $N_p = 10^6 \cdot N_m \Rightarrow N_p = 10^6 \cdot 0,126093 \Rightarrow N_p = \mathbf{126093N}$
- Ορθογωνική διατομή : $N_p = 10^6 \cdot N_m \Rightarrow N_p = 10^6 \cdot 0,254332 \Rightarrow N_p = \mathbf{254332N}$

Στον Πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα τόσο για τις δυνάμεις που δέχεται το νερό όσο και για τις δυνάμεις που δέχονται τα βάθρα μας. Συγκεκριμένα, δίδεται ο πειραματικός υπολογισμός της δύναμης που ασκείται σε κάθε βάθρο που μελετήθηκε πειραματικά και η αντίστοιχη τιμή για τις πραγματικές διαστάσεις του βάθρου, θεωρώντας κλίμακα 1:100.

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικές δυνάμεις που υπολογίστηκαν πειραματικά για τα βάρη.

Είδος διατομής	$N_x = \frac{1/2 \cdot \gamma \cdot y_1^2 \cdot b - 1/2 \cdot \gamma \cdot y_2^2 \cdot b - \rho \cdot Q \cdot (y_1 - y_2)}{b \cdot y_1 \cdot y_2}$ (N)	Πραγματική φόρτιση θεωρώντας γεωμετρική κλίμακα μοντέλου/ομοιώματος, L_R , $L_R = L_m/L_p = 1/100$ $N_p = 10^6 \cdot N_x$ (N)
Κυκλική	0,494968	494968
Ορθογωνική με ένα αριστερό ημικυκλικό άκρο	0,482737	482737
Ορθογωνική με δύο ημικυκλικά άκρα	0,126093	126093
Ορθογωνική	0,254332	254332

5 Κεφάλαιο 5^ο

5.1 Συμπεράσματα

Μελετήθηκε η ροή γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας και αποκτήθηκε γενικότερη εμπειρία για την πειραματική μελέτη της ροής γύρω από τυπικές διατομές μεσόβαθρων γέφυρας.

Κατανοήθηκαν βασικές έννοιες της Υδραυλικής των ανοικτών αγωγών, για την περίπτωση υποκρίσιμης ροής και προσομοιώθηκε μια πραγματική ροή στον ανοικτό αγωγό του Εργαστηρίου.

Μελετήθηκαν χαρακτηριστικά της ροής όπως η πτώση της ελεύθερης επιφάνειας γύρω από το μεσόβαθρο για την περίπτωση υποκρίσιμης ροής.

Υπολογίστηκαν οι δυνάμεις που ασκούνται από το πεδίο ροής σε κάθε βάθρο γέφυρας για τις συνθήκες των μοντέλων μας. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προκύπτει μέγιστη δύναμη στο βάθρο κυκλικής διατομής (Κυκλική = 0,494968 N).

Θεωρώντας μια τυπική κλίμακα 1/100 (ή 1/50) για τον σχεδιασμό των μοντέλων υπολογίστηκε η πραγματική δύναμη που ασκείται στο βάθρο της γέφυρας από την δράση του νερού.

6 Κεφάλαιο 6^ο

Βιβλιογραφία

Ελληνική

- 1.Βικιπαίδεια 2017. Ιστορικά στοιχεία και στοιχεία γεφυρών, Στρωτή και Τυρβώδη Ροή.
- 2.Μ. Βαφειάδης Ν. Ευθυμίου 2009. Υποσκαφή γεφυρών, Συνέπειες υποσκαφής, Μηχανισμός φαινομένου τυπικής διάβρωσης.
- 3.Προσωπικές σημειώσεις από τις παραδόσεις του μαθήματος «Υδραυλική Ι» και «Υδραυλική ΙΙ», Υδροστατική πίεση, Όγκος ελέγχου, Ανοιχτός αγωγός ή αγωγός ελεύθερης ροής, Εξίσωση ορμής, Αριθμός Reynolds, Ειδική ενέργεια, Αριθμός Froude., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε., Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Πάτρα.
- 4.Μηχανική των ρευστών και υδραυλική, Ranald V. Giles, Σημειώσεις υδραυλικής ανοιχτών αγωγών, Α.Δαμασκηνίδου-Γεωργιάδου, Ε.Σιδηρόπουλος. Υδραυλικό άλμα
- 5.Μπισκίνης, Δ. (2016). Σημειώσεις για το μάθημα «Γεφυροποιία» 2016-2017.
- 6.Φουρνιώτης et al., 2017. Πειραματική διερεύνηση της ροής γύρω από τυπικές, χαρακτηριστικές διατομές μεσόβαθρου γέφυρας, στοιχεία από δημοσίευτη εργασία.
- 7.Δημητρακόπουλος, Α.Κ. (2017). “Στοιχεία Υδραυλικής Κλειστών και Ανοικτών Αγωγών”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- 8.Δημητρίου, Ι και Δημητρίου, Δ. (2004). “Πειραματική Υδραυλική και Υδραυλικές Μετρήσεις”, Δεύτερη Έκδοση, Τομέας Υδατικών Πόρων – Υδραυλικών & Θαλασσίων Έργων, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα, 255 σ.

Ξενόγλωσση

- 1.Henderson, F. M. (1966). “Open Channel Flow”, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 522 p.
2. Melville and Raudkivi (1977). “Flow Characteristics in Local Scour at Bridge Piers”. Journal of Hydraulic Research, Vol. 15(4), pp. 373-380.
- 3.Nagata, N., Hosoda, T., Nakato, T. and Muramoto, Y. (2005). “Three-Dimensional Numerical Model for Flow and Bed Deformation around River Hydraulic Structures”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131(12), pp. 1074-1087

Διαδίκτυο - Ιστοσελίδες

Διαδίκτυο 1:

[.https://www.google.gr/search?q=%CE%BA%CE%B1%CE%BB%CF%89%CE%B4%CE%B9%CF%89%CF%84%CE%B7+%CE%B3%CE%B5%CF%86%CF%85%CF%81%CE%B1+%CE%BC%CE%B9%CE%BB%CE%B1%CE%BF%CF%85+%CF%83%CF%84%CE%B7+%CE%B3%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B9%CE%B1&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjLieinyOPWAhWKfhoKHRYcBZMQ_AUIDCqD&biw=1366&bih=662#imgrc=xwWAt6CelrXEmM:](https://www.google.gr/search?q=%CE%BA%CE%B1%CE%BB%CF%89%CE%B4%CE%B9%CF%89%CF%84%CE%B7+%CE%B3%CE%B5%CF%86%CF%85%CF%81%CE%B1+%CE%BC%CE%B9%CE%BB%CE%B1%CE%BF%CF%85+%CF%83%CF%84%CE%B7+%CE%B3%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%B9%CE%B1&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjLieinyOPWAhWKfhoKHRYcBZMQ_AUIDCqD&biw=1366&bih=662#imgrc=xwWAt6CelrXEmM:)

Διαδίκτυο 2:

[.https://www.google.gr/search?biw=1366&bih=662&tbn=isch&sa=1&q=gefyra+tsakwnas&oq=gefyra+tsakwnas&gs_l=psy-ab.3..0i13k1.945071.948704.0.949015.15.15.0.0.0.0.290.2293.0j6j5.11.0....0...1.1.64.psy-ab..4.10.2109...0j0i10k1j0i10i30k1j0i10i24k1j0i8i13i30k1.0.4nL7oPLfSDo#imgrc=K9HsNpP1YTk0KM:](https://www.google.gr/search?biw=1366&bih=662&tbn=isch&sa=1&q=gefyra+tsakwnas&oq=gefyra+tsakwnas&gs_l=psy-ab.3..0i13k1.945071.948704.0.949015.15.15.0.0.0.0.290.2293.0j6j5.11.0....0...1.1.64.psy-ab..4.10.2109...0j0i10k1j0i10i30k1j0i10i24k1j0i8i13i30k1.0.4nL7oPLfSDo#imgrc=K9HsNpP1YTk0KM:)

Διαδίκτυο 3:

https://www.google.gr/search?biw=1366&bih=662&tbn=isch&sa=1&q=tower+bridge&oq=tower+bridge&gs_l=psy-ab.3..0i4.177468.183457.0.183965.27.18.0.0.0.0.435.2592.0j10j2j0j1.14.0....0...1.1.64.psy-ab..13.13.2582.0..0i13k1j0i8i13i30k1j0i67k1.252.oLlUV7FoEuk#imgrc=K0tqot4S_i1g1M:

Διαδίκτυο 4:

https://www.google.gr/search?biw=1366&bih=662&tbn=isch&sa=1&q=%CE%BC%CE%B5%CF%83%CE%BF%CE%B2%CE%B1%CF%85%CF%81%CE%B1+%CE%B3%CE%B5%CF%86%CF%85%CF%81%CF%89%CE%BD&oq=%CE%BC%CE%B5%CF%83%CE%BF%CE%B2%CE%B1%CF%85%CF%81%CE%B1+%CE%B3%CE%B5%CF%86%CF%85%CF%81%CF%89%CE%BD&gs_l=psy-ab.3...17777.19993.0.20292.10.10.0.0.0.0.158.1168.0j8.8.0....0...1.1.64.psy-ab..2.0.0....0.zvzCoOtbFU#imgrc=OM9bVx8Lyma39M:

Διαδίκτυο 5:

https://www.google.gr/search?q=%CE%BC%CE%B5%CF%83%CE%BF%CE%B2%CE%B1%CE%B8%CF%81%CE%BF+%CE%B3%CE%B5%CF%86%CF%85%CF%81%CE%B1%CF%82&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjFjuat4uPWAhXMuBoKHROIAJwQ_AUICiqB&biw=1366&bih=662#imgrc=hL-r4d_Y_IYP0M:

Διαδίκτυο 6:

https://www.google.gr/search?q=%CE%B5%CF%86%CE%B5%CE%B4%CF%81%CE%B1%CE%BD%CE%B1&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjV6_f94-PWAhWzZpoKHVPeAqcQ_AUICiqB&biw=1366&bih=662#imgrc=Ch4gkXBoG4BAZM:

Διαδίκτυο 7: <http://users.auth.gr/vmarios/courses/TEXN%20POT%20II-DERMISSIS.pdf>

Διαδίκτυο 8:

https://www.google.gr/search?q=%CE%BA%CE%B1%CF%84%CE%B1%CF%81%CF%81%CE%B5%CF%85%CF%83%CE%B7+%CF%84%CE%B7%CF%82+%CE%B3%CE%B5%CF%86%CF%85%CF%81%CE%B1%CF%83+%CE%B4%CE%B9%CE%B1%CE%B2%CE%B1%CF%82&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiY9-K81ePWAhVGtBoKHapQApwQ_AUICyqC&biw=1366&bih=662#imgrc=Cj-4_L8fEGccuM:

Διαδίκτυο 9:

<https://oikologicarodiaka.wordpress.com/2012/06/06/%CF%80%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%B2%CE%B1%CE%BB%CE%BB%CE%BF%CE%BD-%CF%80%CE%BF%CF%85-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%B2%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CE%B9%CE%B6%CE%B5%CF%84%CE%B1%CE%B9-%CE%B3%CE%B5%CF%86%CF%85%CF%81/>

Διαδίκτυο 10:

<http://users.auth.gr/evan/sye/%CE%B1%CE%BD%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CF%84%CE%BF%CE%B9%20%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%BF%CE%B9/%CE%962%CE%91%CE%BD%CE%BF%CE%B9%CE%BA%CF%84%CE%BF%CE%AF%20%CE%91%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%BF%CE%AF.pdf>

Διαδίκτυο 11:

https://www.google.gr/search?q=%CF%83%CF%84%CF%81%CF%89%CF%84%CE%B7+%CF%84%CF%85%CF%81%CE%B2%CF%89%CE%B4%CE%B7%CF%83+%CF%81%CE%BF%CE%B7&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwi43sON2uPWAhUKPVAKHaqOAPkQ_AUICygC&biw=1366&bih=662#imgrc=iWUEJRg4mrMOyM:

Διαδίκτυο 12: <http://users.auth.gr/~prinosp/downloads/AQWG%20TGS%20EMEQCEIAS.pdf>

Διαδίκτυο 13 , 14 , 15:

http://fromsciencetoengineering.blogspot.gr/2014/11/blog-post_12.html