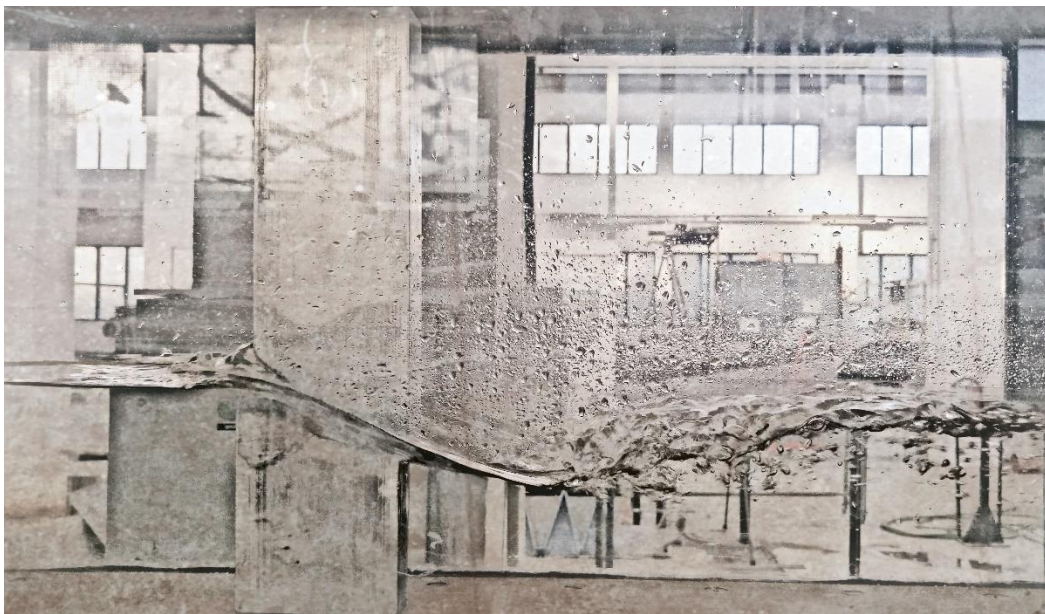




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ ΣΤΗ ΡΟΗ ΣΕ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ



Διπλωματική Εργασία
Μαρία Χαλακατεβάκη

Επιβλέπων καθηγητής: Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟΥ ΣΤΗ ΡΟΗ ΣΕ
ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΩΡΥΓΑ**

Διπλωματική Εργασία
Μαρία Ε. Χαλακατεβάκη

Επιβλέπων καθηγητής: Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2018

Το Περιεχόμενο της ανά χείρας διπλωματικής εργασίας αποτελεί προϊόν δικής μου πνευματικής προσπάθειας. Η ενσωμάτωση σε αυτήν υλικού τρίτων, δημοσιευμένου ή μη, γίνεται με δόκιμη αναφορά στις πηγές, που δεν επιτρέπει ασάφειες ή παρερμηνείες.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF
ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE
EFFECT OF THE BRIDGE PIER SHAPE ON THE
FLOW IN A RECTANGULAR CHANNEL**

Diploma Thesis
Maria E. Chalakatevaki

Thesis supervisor: Panos N. Papanicolaou
Associate Professor

ATHENS, JULY 2018

Η κόλαση είναι άδεια και όλοι οι διάβολοι είναι εδώ.

Γουίλιαμ Σαίξπηρ, 1564-1616, Τρικομιά

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας σηματοδοτεί και το τέλος αυτού του κύκλου σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Κλείνοντας (ή και ανοίγοντας) ένα από τα σημαντικότερα κεφάλαια της ζωής μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου και όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Παναγιώτη Παπανικολάου για την ανάθεση και την επίβλεψη της εργασίας μου. Η καθοδήγηση, οι γνώσεις και η εμπειρία του, τόσο κατά τη διάρκεια των μαθημάτων, όσο και κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας ήταν ιδιαίτερα σημαντικές.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω το Γιάννη Πατσέλη για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε και για τον χρόνο που αφιέρωσε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων μου στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής. Ιδιαίτερα, είμαι ευγνώμων για τη βοήθεια του κατά την προσπάθεια υλοποίησης ενός πρωτότυπου πειράματος σε συνεργασία με το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ. Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δύο υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, Άρη Μαυρομάτη και Ευγένιο Ρετσίνη, για την υποστήριξη τους.

Ιδιαίτερα πολύτιμη ήταν, επίσης, η συνεισφορά και βοήθεια του κ. Χαράλαμπου Ιωαννίδη, καθηγητή του Εργαστηρίου Φωτογραμμετρίας της Σχολής Τοπογράφων Μηχανικών ΕΜΠ, καθώς και της κ. Σοφίας Σοϊλέ και της κ. Ρεγγίνας Χλιβέρου, κατά τη σύλληψη της ιδέας και την προσπάθεια υλοποίησης της πειραματικής διαδικασίας με στόχο τη φωτογραμμετρική απεικόνιση των υδραυλικών θεμάτων με τα οποία ασχολούμαστε σε αυτή την εργασία.

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για το μεταδιδακτορικό συνεργάτη Παναγιώτη Δημητριάδη που αφιέρωσε πολύτιμο χρόνο, τον οποίο θα μπορούσε να περάσει με τη μικρή του κόρη, και κατέβαλε μεγάλη προσπάθεια για να στηθεί η πειραματική μας διάταξη σε υπολογιστικό μοντέλο. Παρόλο που η προσπάθεια μας δεν έχει δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα μέχρι τώρα, ευελπιστώ ότι στο άμεσο μέλλον θα καταφέρουμε να ολοκληρώσουμε αυτό που ξεκινήσαμε.

Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθώ στους καθηγητές Δημήτρη Κουτσογιάννη και Νίκο Μαμάση, που μου προσέφεραν ανεκτίμητες συμβουλές, ωραίες στιγμές και ένα σημαντικό στήριγμα αυτά τα χρόνια και με μύησαν στον κόσμο της έρευνας και των επιστημονικών εργασιών.

Βέβαια, όλα τα παραπάνω θα ήταν δύσκολα έως ακατόρθωτα χωρίς την ανεκτίμητη υποστήριξη και βοήθεια φίλων και συμφοιτητών μου. Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ευθύμη και την Εμμανουέλα για την ιδιαίτερη συντροφιά και τη στήριξη τους κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και ειδικά την αδερφή μου Φλώρα για τη συμπαράσταση, τη κατανόηση, την υπομονή τους και υλική και ηθική στήριξη τους αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	1
1.1	Γενικά.....	1
1.1.1	Οι γέφυρες ως εμπόδια στη ροή.....	1
1.1.2	Συνέπειες και αντιμετώπιση των προβλημάτων	3
1.1.3	Οι γέφυρες στη σύγχρονη εποχή.....	3
1.2	Αντικείμενο της εργασίας	4
1.3	Διάρθρωση της εργασίας.....	4
2.	Βιβλιογραφική επισκόπηση	6
2.1	Γενικά.....	6
2.2	Συνοπτική αναφορά σε εργασίες.....	7
2.2.1	Ερευνητές που μελέτησαν την υπερύψωση	7
2.2.2	Ερευνητές που μελέτησαν την αντίσταση.....	10
2.2.3	Ερευνητές που ανέπτυξαν υπολογιστικά μοντέλα	11
2.3	Βασικές εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της υπερύψωσης.....	16
2.3.1	Εμπειρική σχέση Yarnell	17
2.3.2	Παλαιότεροι ερευνητές	19
2.3.3	Ορισμός ροής Τύπου I.....	22
3.	Θεωρητική Ανάλυση.....	24
3.1	Ανοικτοί αγωγοί	24
3.1.1	Γενικά.....	24
3.1.2	Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Ανοιχτών Αγωγών.....	25
3.2	Κατηγορίες ροής σε ανοικτούς αγωγούς.....	25
3.2.1	Χαρακτηρισμός ροής με βάση κινηματικά κριτήρια	25
3.2.2	Χαρακτηρισμός ροής με βάση δυναμικά κριτήρια	28
3.3	Εξισώσεις μόνιμης ροής.....	30
3.3.1	Εξίσωση Συνέχειας.....	30
3.3.2	Εξίσωση Ορμής.....	31
3.3.3	Εξίσωση Ενέργειας	32
3.3.4	Ειδική ενέργεια και ειδική δύναμη	33
3.4	Δύναμη αντίστασης σε σώμα μέσα σε κινούμενο ρευστό	34
3.4.1	Δυνάμεις μέσα σε κινούμενο ρευστό	34
3.4.2	Δύναμη αντίστασης.....	35
3.4.3	Δύναμη αντίστασης σε βάθρο	36
4.	Πειραματική διαδικασία.....	40
4.1	Εισαγωγή.....	40
4.1.1	Διώρυγα για την προσομοίωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια.....	40
4.1.2	Μετρητικά όργανα	44

4.1.3	Μεσόβαθρα	49
4.2	Πειραματική διαδικασία με τη χρήση συμβατικών μεθόδων μέτρησης	50
4.2.1	Μετρήσεις βάθους ροής	50
4.2.2	Μετρήσεις ταχύτητας	52
4.2.3	Μετρήσεις παροχής.....	53
4.2.4	Μετρήσεις θερμοκρασίας.....	53
5.	Ανάλυση και αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας	54
5.1	Μελέτη υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας	54
5.1.1	Αδιατάρακτο βάθος ροής	54
5.1.2	Υπερύψωση σε σχέση με αδιατάρακτο και διαταραγμένο βάθος ροής	57
5.2	Υπολογισμός απωλειών ενέργειας με βάση τις μετρήσεις από σταθμήμετρο	64
5.3	Υπολογισμός μεταβολής ειδικής δύναμης με βάση τις μετρήσεις από σταθμήμετρο .	68
5.4	Υπολογισμός κατανομής ταχυτήτων, παροχής, συντελεστών συνόρθωσης και αντίστασης.....	71
5.4.1	Κατανομές ταχυτήτων.....	71
5.4.2	Υπολογισμός παροχής και συντελεστών συνόρθωσης	82
5.4.3	Υπολογισμός δύναμης και συντελεστή αντίστασης.....	84
5.5	Υπολογισμός απωλειών ενέργειας και ειδικής δύναμης με δεδομένα μετρήσεων ταχυτήτων.....	88
5.6	Άλλοι υπολογισμοί.....	90
6.	Εναλλακτική πειραματική διαδικασία	95
6.1	Εισαγωγή.....	95
6.2	Θεωρητικό υπόβαθρο – Φωτογραμμετρική διαδικασία.....	96
6.3	Προετοιμασία πειραματικής διαδικασίας.....	98
6.4	Πειραματική διαδικασία.....	101
6.5	Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	103
6.6	Τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων και βελτίωσης της πειραματικής διαδικασίας	106
7.	Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	107
7.1	Συμπεράσματα.....	107
7.2	Παρατηρήσεις σχετικά με τα πειράματα.....	109
7.3	Προτάσεις για το μέλλον.....	110
	Αναφορές.....	112
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	117

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 (α) Καταστροφή γέφυρας χειμάρρου Ζηλιάνα (Εθνική Οδός Αθηνών – Θεσσαλονίκης, 1998) λόγω υποσκαφής του εδάφους μετά από μακρά περίοδο έντονων βροχοπτώσεων (Πηγή: Τσότσος 1988) (β) Καταστροφική πλημμύρα στον ποταμό Savitri στην Ινδία, 2016 (Πηγή: XinhuaNet).	3
Σχήμα 2.1 Απεικόνιση προφίλ ποταμού σε περιοχή κοντά σε μεσόβαθρο (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).	7
Σχήμα 2.2 Ροή νερού στη σε περιοχή στένωσης λόγω παρουσίας βάθρου (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).	19
Σχήμα 2.3 Εμπειρικές σχέσεις για την υπερύψωση (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).	21
Σχήμα 2.4 Τιμές του Fr_{3c} για διάφορες τιμές του α και K_L .	23
Σχήμα 3.1 Βασικά γεωμετρικά μεγέθη ανοικτού αγωγού.	25
Σχήμα 3.2 Βαθμιαία και ταχέως μεταβαλλόμενη ροή σε ορθογωνική διώρυγα με βυθισμένο αναβαθμό και υδραυλικό άλμα (Πηγή: Παπανικολάου 2016).	26
Σχήμα 3.3 Περιοχές όπου μπορεί να βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια (Πηγή: Παπανικολάου 2016).	27
Σχήμα 3.4 Καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας τύπου Η (Πηγή: Παπανικολάου 2016).	28
Σχήμα 3.5 Όγκος αναφοράς για την επίλυση μονοδιάστατων εξισώσεων σε ανοικτό αγωγό.	30
Σχήμα 3.6 Εξίσωση ενέργειας σε ανοικτό αγωγό (Πηγή: Παπανικολάου 2016).	32
Σχήμα 3.7 Διάγραμμα ειδικής ενέργειας (Πηγή: Παπανικολάου 2016).	33
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ειδικής δύναμης (Πηγή: Παπανικολάου 2016).	33
Σχήμα 3.9 Δυνάμεις σε βάθρο για εξιδανικευμένες συνθήκες (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).	36
Σχήμα 4.1 Πανοραμική άποψη της διώρυγας.	40
Σχήμα 4.2 (α) Ανάντη άκρο διώρυγας με διάταξη για τη μείωση των αναταράξεων (β) Λεπτομέρεια διάταξης (γ) Λεπτομέρεια διάταξης.	41
Σχήμα 4.3 (α) Κατάντη άκρο της διώρυγας με υπερχειλιστή λεπτής στέψης (9 cm στην παρούσα εικόνα) (β) Δεξαμενή νερού.	42
Σχήμα 4.4 Σχέδιο της διώρυγας με τη δεξαμενή, την αντλία, τον αγωγό και τον υπερχειλιστή.	43
Σχήμα 4.5 Αντλία για την τροφοδοσία της διώρυγας.	43
Σχήμα 4.6 (α) Ηλεκτρονικό παροχόμετρο (β) Μορφοτροπείς παροχόμετρο.	45
Σχήμα 4.7 Σταθμήμετρο ακίδας.	45
Σχήμα 4.8 Λειτουργία σωλήνα Pitot (Πηγή: Παπανικολάου 2017).	46

Σχήμα 4.9 Μέτρηση με σωλήνα Pitot.	48
Σχήμα 4.10 Θερμόμετρο.	48
Σχήμα 4.11 Διατομές βάθρων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική μελέτη (α) τετραγωνική (β) ρομβοειδής (γ) κυλινδρική (δ) ορθογωνική με λόγο 2:1 (ε) ορθογωνική με λόγο 2.5:1.	49
Σχήμα 4.12 Θέση βάθρου και μετρήσεων στη διώρυγα.	51
Σχήμα 4.13 Διαταραχή στη θέση μέτρησης $x=30$ cm σε ροή γύρω από ρομβοειδή διατομή ($Q=25\text{L/s}$, $w=3$ cm).	51
Σχήμα 5.1 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=-30$ cm (30 cm ανάντη βάθρου).	55
Σχήμα 5.2 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=0$ cm (θέση του βάθρου).	56
Σχήμα 5.3 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=30$ cm (30 cm κατάντη βάθρου).	56
Σχήμα 5.4 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=60$ cm (60 cm κατάντη βάθρου).	57
Σχήμα 5.5 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για όλες τις διατομές.	58
Σχήμα 5.6 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για όλες τις διατομές.	58
Σχήμα 5.7 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude αδιατάρακτης ροής για όλες τις διατομές.	59
Σχήμα 5.8 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0$.	60
Σχήμα 5.9 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=3,6,9$ cm.	60
Σχήμα 5.10 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατάντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0$ cm.	61
Σχήμα 5.11 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατάντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=3, 6, 9$ cm.	62
Σχήμα 5.12 Αναταραχή της ροής στα κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0$ cm, όπου εμφανίζεται υπερκρίσιμη ροή (στην εικόνα φαίνεται η κυλινδρική διατομή, αλλά η αναταραχή εμφανίζεται σε όλες τις διατομές).	62
Σχήμα 5.13 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατάντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0, 3, 6, 9$ cm.	63
Σχήμα 5.14 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατάντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w= 3, 6, 9$ cm.	63
Σχήμα 5.15 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατάντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0$ cm.	64

- Σχήμα 5.16** Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη ($w=0, 3, 6, 9$ cm). 65
- Σχήμα 5.17** Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm (δηλαδή υποκρίσιμη ροή στα κατάντη). 65
- Σχήμα 5.18** Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm (δηλαδή υπερκρίσιμη, υποκρίσιμη ροή στα κατάντη). 66
- Σχήμα 5.19** Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη ($w=0, 3, 6, 9$ cm). 66
- Σχήμα 5.20** Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm (δηλαδή υποκρίσιμη ροή στα κατάντη). 67
- Σχήμα 5.21** Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm (δηλαδή υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη ροή στα κατάντη). 67
- Σχήμα 5.22** Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη ($w=0, 3, 6, 9$ cm). 68
- Σχήμα 5.23** Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για $w=3, 6, 9$ cm (υποκρίσιμη ροή στα κατάντη). 69
- Σχήμα 5.24** Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για $w=0$ cm (υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη ροή στα κατάντη). 69
- Σχήμα 5.25** Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για $w=0, 3, 6, 9$ cm. 70
- Σχήμα 5.26** Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για $w=3, 6, 9$ cm (υποκρίσιμη ροή στα κατάντη). 70
- Σχήμα 5.27** Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για $w=0$ cm (υπερκρίσιμη, υποκρίσιμη ροή). 71
- Σχήμα 5.28** Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 30 cm ανάντη τετραγωνικού βάρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή). 72
- Σχήμα 5.29** Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 30 cm ανάντη τετραγωνικού βάρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή). 72
- Σχήμα 5.30** Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 60 cm κατάντη τετραγωνικού βάρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή). 73

Σχήμα 5.48 Συντελεστής συνόρθωσης β στα ανάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη.	83
Σχήμα 5.49 Συντελεστής συνόρθωσης α στα ανάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη.	83
Σχήμα 5.50 Συντελεστής συνόρθωσης β στα κατάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατάντη.	84
Σχήμα 5.51 Συντελεστής συνόρθωσης α στα κατάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατάντη.	84
Σχήμα 5.52 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη (χρήση Q παροχόμετρου).	86
Σχήμα 5.53 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατάντη (χρήση Q παροχόμετρου).	86
Σχήμα 5.54 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη (χρήση Q υπολογισμών).	87
Σχήμα 5.55 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατάντη (χρήση Q υπολογισμών).	87
Σχήμα 5.56 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.	88
Σχήμα 5.57 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.	89
Σχήμα 5.58 Λόγος διαφοράς ειδικής ενέργειας ανάντη και κατάντη προς ειδική ενέργεια αδιατάρακτης ροής συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.	89
Σχήμα 5.59 Λόγος διαφοράς ειδικής ενέργειας ανάντη και κατάντη προς ειδική ενέργεια αδιατάρακτης ροής συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.	90
Σχήμα 5.60 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στην τιμή του συντελεστή αντίστασης.	91
Σχήμα 5.61 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στις απώλειες ενέργειας.	91
Σχήμα 5.62 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στην υπερύψωση.	92
Σχήμα 5.63 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στη διαφορά στάθμης ανάντη και κατάντη.	92
Σχήμα 5.64 Σχέση μεταξύ συντελεστή αντίστασης και υπερύψωσης.	94
Σχήμα 5.65 Σχέση μεταξύ συντελεστή αντίστασης και διαφοράς στάθμης.	94
Σχήμα 6.1 Βάση στήριξης φωτογραφικών μηχανών.	100
Σχήμα 6.2 Τοποθέτηση των φωτομηχανών πάνω από τη διώρυγα.	101
Σχήμα 6.3 Τοποθέτηση γυάλινης πλάκας μέσα στη διώρυγα.	102
Σχήμα 6.4 Λήψη βίντεο κατά τη διάρκεια του πειράματος.	102

Σχήμα 6.5	Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές στο στάδιο με τη γυάλινη πλάκα χωρίς παρουσία νερού.	103
Σχήμα 6.6	Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: ανάντη του βάθρου στο δεξί τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής.	104
Σχήμα 6.7	Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: ανάντη του βάθρου στο αριστερό τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής.	105
Σχήμα 6.8	Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: κατάντη του βάθρου στο δεξί τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής.	105
Σχήμα 6.9	Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: κατάντη του βάθρου στο αριστερό τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής.	106

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1	Συνοπτική παρουσίαση εργασιών.	12
Πίνακας 2.2	Συντελεστές σχήματος K για την εμπειρική σχέση του Yarnell.	17
Πίνακας 2.3	Συντελεστές σχήματος K για την εμπειρική σχέση του D'Aubuisson.	19
Πίνακας 2.4	Συντελεστές σχήματος K_N για την εμπειρική σχέση του Nagler.	20
Πίνακας 2.5	Συντελεστές σχήματος do για την εμπειρική σχέση του Rehbock.	20
Πίνακας 3.1	Δυνάμεις που επηρεάζουν τη ροή.	28
Πίνακας 5.1	Καμπύλες $y_a=f(Q)= aQ^2+bQ+c$.	54
Πίνακας 5.2	Λόγος πλάτους διατομής προς πλάτος διώρυγας.	90
Πίνακας 5.3	Τιμές της κινηματικής συνεκτικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας.	93
Πίνακας 5.4	Μέση τιμή και τυπική απόκλιση αριθμού Re ανά διατομή και θέση υπολογισμού.	93
Πίνακας 6.1	Συνθήκες ροής για τη φωτογραμμετρική πειραματική διαδικασία.	96

Πίνακας Συμβόλων

ρ	: Πυκνότητα του ρευστού
γ	: Ειδικό βάρος
p	: Πίεση

$Q_{\text{ονομ}}$: Ονομαστική παροχή
$Q_{\text{παροχ}}$: Ένδειξη παροχόμετρου
$Q_{\text{υπολ}}$: Υπολογισμένη παροχή
w	: ύψος υπερχειλιστή λεπτής στέψης
Δy	: Υπερύψωση της ανάντη ελεύθερης επιφάνειας λόγω παρουσίας μεσόβαθρου
y_1	: Βάθος ροής ανάντη του μεσόβαθρου
y_2	: Βάθος ροής στο μεσόβαθρο
y_3	: Βάθος ροής κατόντη του μεσόβαθρου
y, y_a	: Αδιατάρακτο βάθος ροής
y_c	: Κρίσιμο βάθος ροής
y_0	: Ομοιόμορφο βάθος ροής
V	: Μέση ταχύτητα της ροής
V_1	: Μέση ταχύτητα ανάντη του μεσόβαθρου
V_2	: Μέση ταχύτητα στη θέση του μεσόβαθρου
V_3	: Μέση ταχύτητα κατόντη του μεσόβαθρου
J_0	: Κλίση πυθμένα διώρυγας
J_E	: Κλίση γραμμής ενέργειας
H_2	: Καμπύλη κατάπτωσης
H_3	: Καμπύλη υπερύψωσης
R	: Υδραυλική ακτίνα
A	: Εμβαδόν υγρής διατομής
P	: Βρεχόμενη περίμετρος
B, b_{canal}	: Πλάτος διώρυγας
L	: Μήκος του μεσόβαθρου
D	: Υδραυλικό βάθος
v	: Κινηματικό ιξώδες
g	: Επιτάχυνση της βαρύτητας
Re	: Αριθμός Reynolds
Re_p	: Αριθμός Reynolds για το μεσόβαθρο
Fr_{up}	: Αριθμός Froude ανάντη
Fr_{β}	: Αριθμός Froude στο μεσόβαθρο
Fr_{down}	: Αριθμός Froude κατόντη

Fr_α	: Αριθμός Froude στην αδιατάρακτη ροή
Fr_3	: Αριθμός Froude κατάντη σύμφωνα με εμπειρικές σχέσεις υπερύψωσης
Fr_{3c}	: Αριθμός Froude κατάντη για κρίσιμη ή «πνιγμένη» ροή στην θέση του βάρου
K	: Συντελεστής σχήματος Yarnell
K_{DA}	: Συντελεστής σχήματος D' Aubuisson
K_N	: Συντελεστής σχήματος Nagler
δ_0	: Συντελεστής σχήματος Rehbock
φ	: Συντελεστής σχήματος Al-Nassri
α	: Ποσοστό συστολής του καναλιού κατά Yarnell
K_L	: Συντελεστής απωλειών διαστολής
β_{up}, β_{down}	: Συντελεστής συνόρθωσης εξίσωσης ορμής
$\alpha_{up}, \alpha_{down}$: Συντελεστής συνόρθωσης εξίσωσης ενέργειας
Δh	: Διαφορά βάθους ροής στα ανάντη και στα κατάντη του μεσόβαθρου
ΔH	: Απώλειες ενέργειας
F_D	: Δύναμη αντίστασης
C_D	: Συντελεστής αντίστασης
E	: Ειδική ενέργεια
M	: Ειδική δύναμη
A_p	: Εμβαδό της προβολής του βυθισμένου τμήματος ενός βάρου σε επίπεδο κάθετο στην κύρια διεύθυνση της ροής
B_p	: Πλάτος του μεσόβαθρου που είναι κάθετο στη ροή
k_p	: Τραχύτητα της επιφάνειας του μεσόβαθρου
I_T	: Ένταση της τύρβης στην περιοχή κοντά στο μεσόβαθρο
F_p	: Δυνάμεις λόγω πιέσεων
F_t	: Δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων
W	: Δυνάμεις λόγω βαρύτητας
τ_0	: Διατμητική τάση στο όριο
f	: Συντελεστής τριβών των Darcy Weisbach
V_x	: Μέση ταχύτητα σε επίπεδο κάθετο στη κατεύθυνση της ροής
V_y	: Μέση ταχύτητα στην κατεύθυνση της ροής
T	: Θερμοκρασία

Περίληψη

Η σημασία των ανοικτών αγωγών είναι μεγάλη για τον άνθρωπο και τις κατασκευές του, όπως αποδεικνύεται τόσο από την ανάπτυξη των πρώτων μεγάλων αστικών δομών δίπλα στο υδάτινο στοιχείο, όσο και από τα ποικίλα έργα που κατασκευάζονται στη σημερινή εποχή γύρω ή και μέσα σε υδατορέματα. Η κατασκευή των έργων αυτών απαιτεί συχνά την τοποθέτηση εμποδίων μέσα στην κοίτη με αποτέλεσμα τη μεταβολή των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ροής και την ενίσχυση των αβεβαιοτήτων που διέπουν τη συμπεριφορά των υδάτινων σωμάτων. Ιδιαίτερα στις μέρες μας, οι μεταβολές στην ισορροπία του φυσικού περιβάλλοντος και η επέκταση της ανθρώπινης δραστηριότητας και των τεχνικών έργων επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά και την απόκριση των υδάτινων σωμάτων. Η μελέτη της συμπεριφοράς των φυσικών συστημάτων που βρίσκονται μέσα στην ανθρώπινη σφαίρα επιρροής, όπως τα υδατορέματα, είναι σημαντική όχι μόνο για τη διατήρηση της ισορροπίας τους, αλλά και για την πρόληψη φυσικών καταστροφών και την προστασία της ανθρώπινης ζωής και των κατασκευών. Η τοποθέτηση εμποδίων στη ροή ποταμών, όπως για παράδειγμα βάθρων γεφυρών, μελετάται από ποικίλους ερευνητές εδώ και τρεις αιώνες, γεγονός που αποδεικνύει τόσο τη σπουδαιότητα των κατασκευών αυτών, όσο και τις μεγάλες αβεβαιότητες της ροής αυτής.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια πειραματική διερεύνηση της ροής γύρω από μεσόβαθρο με στόχο τη διερεύνηση της επιρροής του σχήματος του βάθρου στα χαρακτηριστικά της ροής. Για το σκοπό αυτό προσομοιώθηκε πειραματικά η ροή γύρω από πέντε διατομές μεσοβάθρων διαφορετικού σχήματος και λήφθηκαν πειραματικές μετρήσεις βάθους ροής και σημειακής ταχύτητας σε επιλεγμένες διατομές για διάφορες συνθήκες ροής. Οι διαφορετικές συνθήκες ροής αφορούν πέντε διαφορετικές παροχές και τέσσερα διαφορετικά ύψη υπερχειλιστή, ο οποίος χρησιμοποιείται για να επιτευχθούν υποκρίσιμες συνθήκες ροής κατάντη του εμποδίου. Η μελέτη της ροής έγκειται στον υπολογισμό της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του μεσόβαθρου (backwater effect), της διαφοράς στάθμης στην περιοχή ανάντη και κατάντη του βάθρου, της ειδικής δύναμης, των ενεργειακών απωλειών, της δύναμης και του συντελεστή αντίστασης και της κατανομής ταχυτήτων στον άξονα και σε ένα οριζόντιο επίπεδο ανάντη και κατάντη του εμποδίου. Τα χαρακτηριστικά αυτά παρουσιάζονται με διαγράμματα σε αδιάστατη μορφή για να είναι εφικτή η σύγκριση τους, η εξαγωγή συμπερασμάτων και η πιθανή χρήση τους ως εμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση της ροής. Τέλος, επιχειρήθηκε η αποτύπωση της ελεύθερης επιφάνειας και συγκεκριμένα της διαφοράς στάθμης μεταξύ των σημείων και των επιφανειακών ταχυτήτων με χρήση φωτογραμμετρίας.

Abstract

Open channel flow is of high importance for human beings and infrastructure as can be deduced from the fact that the first urban centres were developed near water bodies. Nowadays many important structures are constructed next to or within the channel or floodplain of natural waterways. The development of many hydraulic structures requires the placement of obstacles within rivers resulting in alteration of the hydrodynamic flow characteristics and magnification of the uncertainties that regulate the behaviour of river systems. More specifically, the changes in the equilibrium of the natural environment as well as the expansion of human activity and infrastructure, affect the characteristics and the response of water bodies in recent years. The study of the behaviour of natural systems that are under human influence, such as rivers, is important not only for the preservation of nature equilibrium, but also for the prevention of natural disasters and the protection of human life and infrastructure. The placement of obstacles in river flow such as bridge piers has been the subject of study for many researches over the last three centuries. This proves not only the significance of these structures, but also the high uncertainties that propagate through this type of flow.

This thesis presents an experimental study of the flow around bridge piers, aiming the influence of pier shape in the flow pattern. For the study purposes, the flow around bridge piers with five different shapes was investigated. The depth of flow as well as the velocity were measured at selected cross-sections, for various flow conditions via point gauge and Pitot tube. The flow was controlled with a sharp crested weir placed at the end of the channel to achieve subcritical flow conditions downstream. Besides the free flow, the weir was set at three more elevations, and for each weir setting experiments were performed for five different channel flow rates, for each pier. The study regards the investigation of the free surface backwater effect (water level increase caused by the presence of bridge piers), including measurement of the difference of flow depth upstream and downstream of the bridge pier, estimation of the specific momentum, the energy losses, the drag force and coefficient, and measurement of the vertical velocity distribution at the axis of the channel and the horizontal velocity distribution at planes perpendicular to the flow direction both upstream and downstream of the pier. The findings are presented through a series of graphs in dimensionless form for comparison, in order to come to conclusions and use them as empirical relationships for the flow estimation. Finally, an attempt was made to measure the three dimensional shape of the free surface via photogrammetric methods upstream and downstream of the pier, that was not successful.

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι γέφυρες είναι κατασκευές που έχουν σκοπό την αποκατάσταση της συνέχειας γραμμών επικοινωνίας πάνω από εμπόδια, όπως μιας οδού με τη δημιουργία οδικής γέφυρας, ενός σιδηροδρόμου με τη διαμόρφωση σιδηροδρομικής σύνδεσης, μιας ροής πεζών με την ανέγερση πεζογέφυρας ή ενός αγωγού με την οικοδόμηση γεφυρών ειδικής λειτουργίας, όπως οι υδατογέφυρες. Συμβολίζουν ένα μέσο που επιτρέπει την επικοινωνία και την επαφή των ανθρώπων και την κοινωνική, πολιτιστική και οικονομική ανάπτυξη των περιοχών σε επαφή. Αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής και ευημερίας των ανθρώπων, ιδιαίτερα στη σύγχρονη εποχή όπου οι μετακινήσεις και οι επαφές είναι πιο εκτεταμένες και σημαντικές από ποτέ.

Οι γέφυρες χρησιμοποιούνται για τη γεφύρωση τόσο χερσαίων, όσο και υδάτινων επιφανειών. Η λειτουργικότητα και ευστάθεια των κατασκευών αυτών έγκειται στο σχεδιασμό των επιμέρους στοιχείων τους, δηλαδή του κύριου φορέα που εξασφαλίζει ισορροπία, του καταστρώματος το οποίο επιτρέπει τη σύνδεση και τη μεταφορά ανθρώπων, οχημάτων, εμπορευμάτων και των βάθρων που στηρίζουν την κατασκευή υπεράνω του εμποδίου. Όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των βάθρων και εμποδίου, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου τα εμπόδια είναι ποτάμια ή άλλες υδάτινες επιφάνειες.

Στις κοίτες ποταμών έχουν κατασκευαστεί πολλά έργα με στόχο την εξυπηρέτηση αναγκών του ανθρώπου και τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης του, δεδομένου ότι τα ποτάμια συστήματα αποτελούν εδώ και αιώνες πηγή νερού, τροφής και ενέργειας και παρέχουν στους ανθρώπους δυνατότητες ύδρευσης, άρδευσης, μεταφοράς, εμπορίου και αναψυχής.

1.1.1 Οι γέφυρες ως εμπόδια στη ροή

Οι γέφυρες που κατασκευάζονται πάνω από ποτάμια συστήματα λειτουργούν συχνά ως εμπόδια στη ροή συντελώντας στη μεταβολή των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της ροής και της γεωμετρίας της διατομής και του πυθμένα στην περιοχή επιρροής της κατασκευής. Η παρεμπόδιση της ροής σε ένα υδατόρευμα έχει ως αποτέλεσμα μεταβολές στην ορμή και ενέργεια και κατά επέκταση στο βάθος ροής στη περιοχή γύρω από το εμπόδιο. Η παρεμπόδιση της ροής λόγω παρουσίας βάθρων στην κοίτη του ποταμού είναι αναπόφευκτη, όποια και να είναι η μορφή και οι διαστάσεις του βάθρου που χρησιμοποιείται για τη στήριξη της γέφυρας.

Η παρουσία βάθρων στη διατομή ενός ποταμού περιστέλλει τη ροή που διέρχεται από τα ελεύθερα τμήματα του αγωγού λόγω της μείωσης του ενεργού πλάτους. Από υδραυλική σκοπιά, η επίδραση του βάθρου στη ροή μπορεί να προκαλέσει δύο σημαντικά προβλήματα.

Το πρώτο πρόβλημα είναι η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του βάθρου λόγω των απωλειών ενέργειας από τριβές, συστολή και επιτάχυνση της ροής που αυτό προκαλεί. Σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής, οι οποίες παρουσιάζονται στα περισσότερα ποτάμια, ένα χαρακτηριστικό της μεταβολής της ροής είναι το λεγόμενο «backwater effect», το οποίο συντελεί στην άνοδο της στάθμης της επιφάνειας του νερού στην περιοχή αμέσως ανάντη του

βάθρου και στη μείωση της στάθμης στην περιοχή αμέσως κατάντη. Η αλληλεπίδραση του εμποδίου με τη ροή αυξάνει τον κίνδυνο πλημμύρας και κατά επέκταση την πιθανότητα εμφάνισης πλημμυρικών γεγονότων στις περιοχές γύρω από το υδατόρευμα, πρόκλησης βλάβης στη γέφυρα, παρεμπόδισης της κυκλοφορίας οχημάτων και πεζών, απώλειας ανθρώπινων ζώων και οικονομικής ζημιάς. Είναι αδιαμφισβήτητο ότι η διερεύνηση της επιρροής των γεφυρών στον έλεγχο πλημμύρας έχει πολύ μεγάλη σημασία.

Το δεύτερο πρόβλημα είναι ο κίνδυνος εμφάνισης τοπικής υποσκαφής γύρω από το βάθρο και διάβρωσης του πυθμένα του ποταμού με καταστροφικές συχνά συνέπειες τόσο για την κατασκευή και την ασφάλεια των ανθρώπων, όσο και για το τοπικό οικοσύστημα. Υποσκαφή σε βάθρο γέφυρας είναι το φαινόμενο κατά το οποίο απομακρύνονται φερτά υλικά, όπως άμμος και χαλίκια, από την περιοχή γύρω από το μεσόβαθρο ή ακρόβαθρο, λόγω της μεγάλης ταχύτητας της ροής και της δημιουργίας στροβίλων, με αποτέλεσμα να προκαλείται τοπική διάβρωση που θέτει σε κίνδυνο την ακεραιότητα, τη φέρουσα ικανότητα και τη λειτουργικότητα της κατασκευής.

Η διάβρωση σε ένα ποτάμι μπορεί να διακριθεί σε τρεις μορφές, τη γενική διάβρωση που προκαλείται από πλημμυρικά γεγονότα και είναι ανεξάρτητη της παρουσίας εμποδίων στη ροή, τη διάβρωση λόγω στένωσης που εμφανίζεται εξαιτίας της αλλαγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του καναλιού λόγω της παρουσίας βάθρου ή γέφυρας και την τοπική διάβρωση (καθαρού νερού, ενεργού πυθμένα) που οφείλεται στην παρεμπόδιση και επιτάχυνση της ροής από το βάθρο. Στην τοπική υποσκαφή αναπτύσσεται έντονος στροβιλισμός της ροής με την εμφάνιση πεταλοειδών (horseshoe vortex), οριζόντιων (wake vortex) και επιφανειακών (bow wave) συστημάτων στροβίλων. Το πρόβλημα της υποσκαφής είναι πιο σύνθετο και έντονο σε ποταμούς με πυθμένα από προσχωσιγενή διαβρώσιμα υλικά, αλλά εμφανίζεται και σε συνεκτικά εδάφη με την πάροδο του χρόνου.

Η παρουσία υποσκαφής είναι πιθανό να συμβάλλει στην εμβάθυνση της διατομής του ανοικτού αγωγού στην περιοχή του βάθρου και να επηρεάσει το φαινόμενο της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη του βάθρου.



(α)



(β)

Σχήμα 1.1 (α) Καταστροφή γέφυρας χειμάρρου Ζηλιάνα (Εθνική Οδός Αθηνών – Θεσσαλονίκης, 1998) λόγω υποσκαφής του εδάφους μετά από μακρά περίοδο έντονων βροχοπτώσεων (Πηγή: Τσότσος 1988) (β) Καταστροφική πλημμύρα στον ποταμό Savitri στην Ινδία, 2016 (Πηγή: XinhuaNet).

1.1.2 Συνέπειες και αντιμετώπιση των προβλημάτων

Το κόστος αστοχιών γεφυρών αγγίζει εκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο τόσο λόγω του άμεσου κόστους της αποκατάστασης ή αντικατάστασης της ίδιας της κατασκευής, όσο και λόγω του έμμεσου κόστους που σχετίζεται με τη διατάραξη της ομαλής λειτουργίας του συστήματος μεταφορών. Ακόμη πιο σημαντικός είναι ο κίνδυνος απώλειας ανθρώπινων ζωών ως αποτέλεσμα της κατάρρευσης της κατασκευής.

Το κόστος των επιχειρήσεων διάσωσης ανθρώπινων ζωών και περιουσιών κατά τη διάρκεια πλημμύρας, καθώς και της μετέπειτα αποκατάστασης περιοχών που πλήττονται από πλημμυρικά γεγονότα είναι εξίσου σημαντικό. Στην περίπτωση αυτή, ο κίνδυνος ανθρώπινων απωλειών είναι ακόμη μεγαλύτερος.

Σε όλο τον κόσμο, η υποσκαφή αποτελεί, μαζί με την πρόσκρουση οχημάτων και την υπέρβαση του ωφέλιμου φορτίου σχεδιασμού, μία από τις τρεις πιο σημαντικές αιτίες αστοχίας γεφυρών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής εκτιμάται ότι το ποσοστό αστοχίας γεφυρών λόγω υποσκαφής ή άλλων φαινομένων υδραυλικής φύσης αγγίζει το 60%. Ενδεικτικό είναι το γεγονός ότι σύμφωνα με μελέτες αμερικανικών υπηρεσιών, η υποσκαφή σε βάθρα αποτέλεσε την αιτία αστοχίας για τουλάχιστον 46 από τους 86 κύριους αυτοκινητόδρομους πάνω σε γέφυρες κατά την περίοδο 1961 - 1976.

Η επιρροή της παρουσίας των βάθρων σε πλημμύρες και αστοχίες γεφυρών έχει απασχολήσει αρκετά, από τον 20^ο αιώνα και μετά, χώρες με μεγάλο δίκτυο γεφυρών πάνω από ποτάμια. Συγκεκριμένα, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και η Κίνα έχουν εκπονήσει πλήθος προγραμμάτων τόσο για την μελέτη της κατάστασης και των προβλημάτων ήδη κατασκευασμένων γεφυρών, όσο και για τη διεξαγωγή πειραμάτων με στόχο την ενίσχυση της γνώσης των προβλημάτων και την ελαχιστοποίηση τους σε μελλοντικές κατασκευές.

Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι το γραφείο της Ομοσπονδιακής Διοίκησης Αυτοκινητοδρόμων (Federal Highway Administration, FHWA) του Υπουργείου Μεταφορών των Ηνωμένων Πολιτειών ξεκίνησε το 1988 ένα πρόγραμμα αποτίμησης των φαινομένων υποσκαφής σε γέφυρες ύστερα από τη θανατηφόρα αστοχία της γέφυρας στον ποταμό Schoharie Creek στην Νέα Υόρκη. Η αποτίμηση της ευαισθησίας των γεφυρών σε υποσκαφή πραγματοποιήθηκε από διεπιστημονικές ομάδες αποτελούμενες τόσο από υδραυλικούς, όσο και από γεωτεχνικούς και δομοστατικούς μηχανικούς. Μέχρι το 2001, οι περισσότερες γέφυρες του Εθνικού Καταλόγου Απογραφής Γεφυρών είχαν ελεγχθεί ως προς τον κίνδυνο υποσκαφής. Παράλληλα, στις γέφυρες όπου εντοπίστηκε κίνδυνος ή εμφάνιση υποσκαφής πραγματοποιήθηκαν και συνεχίζουν να πραγματοποιούνται έργα προστασίας και συντήρησης.

1.1.3 Οι γέφυρες στη σύγχρονη εποχή

Στις περισσότερες χώρες, η ραγδαία οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κυκλοφοριακού φόρτου και την αναγκαιότητα κατασκευής νέων αυτοκινητόδρομων, ένα μεγάλο ποσοστό των οποίων διέρχεται πάνω από την κοίτη ποταμών και καναλιών. Οι κατασκευές αυτές είναι πιθανό να αλληλεπιδράσουν με άλλες ήδη υπάρχουσες γέφυρες και να επηρεάσουν σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό τα χαρακτηριστικά της ροής και την κίνηση φερτών (Wang et al., 2016). Παράλληλα, η ολοένα εντεινόμενη αστικοποίηση και υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος οδηγεί σε πλημμυρικά γεγονότα

μεγαλύτερης έντασης και μικρότερου χρόνου συρροής με αποτέλεσμα να εμφανίζονται μεγαλύτερες παροχές και ταχύτητες ροής σε ποταμούς, μεγαλύτερη επίδραση των γεφυρών στη ροή και εντεταμένη διάβρωση.

Η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για ασφαλείς και οικονομικές κατασκευές που διευκολύνουν την καθημερινότητα του ανθρώπου χωρίς να επεμβαίνουν καταστροφικά στο περιβάλλον βασίζεται στη μελέτη και επίλυση των προβλημάτων που δημιουργεί η συνύπαρξη τεχνικών έργων με τη φύση. Η μελέτη αλληλεπίδρασης της ροής ποταμών με διάφορες κατασκευές και γέφυρες είναι απαραίτητη για να εκτιμηθούν οι πιθανές επιπτώσεις της παρουσίας εμποδίων στη ροή τόσο για την προστασία του περιβάλλοντος και την ασφάλεια των ανθρώπων, όσο και για την κατασκευή ενός βιώσιμου έργου. Σημαντικό στοιχείο στη μελέτη αυτή αποτελεί η μελέτη του ίδιου του βάρους, δεδομένου ότι το μέγεθος της παρεμπόδισης της ροής εξαρτάται κυρίως από το γεωμετρικό του σχήμα, τη θέση του στη ροή, την ταχύτητα ροής και το ποσοστό της συστολής. Ωστόσο, η βιωσιμότητα ενός τέτοιου έργου δεν υποδηλώνει απαραίτητα τη συνθήκη της περίπου «μηδενικής υπερύψωσης» της ελεύθερης επιφάνειας λόγω της παρουσίας βάρων, διότι αυτή η συνθήκη όχι μόνο δεν εφικτή σε μεγάλο πλήθος περιπτώσεων, αλλά επίσης αυξάνει το κόστος της κατασκευής κατά ένα μέσο ποσοστό ίσο με 40% σύμφωνα με έρευνες για γέφυρες στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής (Wood et al., 1997). Πέρα από τις αλλαγές στα χαρακτηριστικά κατασκευής γεφυρών, έργα βελτίωσης ανοικτών αγωγών είναι δυνατόν να αλλάξουν τη στάθμη του νερού, την ταχύτητα ροής, την κλίση του πυθμένα και τα χαρακτηριστικά μετακίνησης των φερτών υλικών μειώνοντας το φαινόμενο της υπερύψωσης και της υποσκαφής.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της επιρροής του σχήματος του βάρους στη ροή σε ορθογωνική διώρυγα σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Με στόχο τη μελέτη της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στην ανάντη παρειά του βάρους και των χαρακτηριστικών αντίστασής του, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σε πέντε διαφορετικές διατομές βάρους για πέντε διαφορετικές παροχές και τέσσερις θέσεις υπερχειλιστή λεπτής στέψης για τον έλεγχο της ροής.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1) όπου παρουσιάζονται γενικά στοιχεία για την επίδραση εμποδίου στη ροή υδατορεύματος, περιλαμβάνει πέντε ακόμα κεφάλαια, βιβλιογραφικές αναφορές και παράρτημα.

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται μια σύντομη επισκόπηση της βιβλιογραφίας και των εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί και αφορούν τη μελέτη της ροής και της ελεύθερης επιφάνειας γύρω από κάποιο εμπόδιο, όπως το μεσόβαθρο που εξετάζεται σε αυτή την εργασία. Αναφέρονται εργασίες που αφορούν τόσο πειραματικές, όσο και υπολογιστικές μελέτες.

Στο Κεφάλαιο 3, αναφέρονται γενικότερα θεωρητικά στοιχεία σχετικά με τη ροή στους ανοικτούς αγωγούς, τα οποία χρησιμοποιούνται στην ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων και είναι απαραίτητα για την περαιτέρω κατανόηση του φαινομένου που μελετάται.

Στο Κεφάλαιο 4, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, τα όργανα μέτρησης και τα μοντέλα του βάρους που χρησιμοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, καθώς επίσης και λεπτομέρειες των πειραμάτων.

Στο Κεφάλαιο 5, παρατίθενται η ανάλυση των εργαστηριακών μετρήσεων, τα αποτελέσματα και η σύγκριση μεταξύ τους.

Στο Κεφάλαιο 6, περιγράφεται μια εναλλακτική πειραματική διαδικασία με στόχο την απεικόνιση της ελεύθερης επιφάνειας με στερεοσκοπικές, φωτογραμμετρικές μεθόδους.

Στο Κεφάλαιο 7, συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο παράρτημα παρουσιάζονται επιπρόσθετα διαγράμματα και πίνακες για την εκτενέστερη ανάλυση του προβλήματος.

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

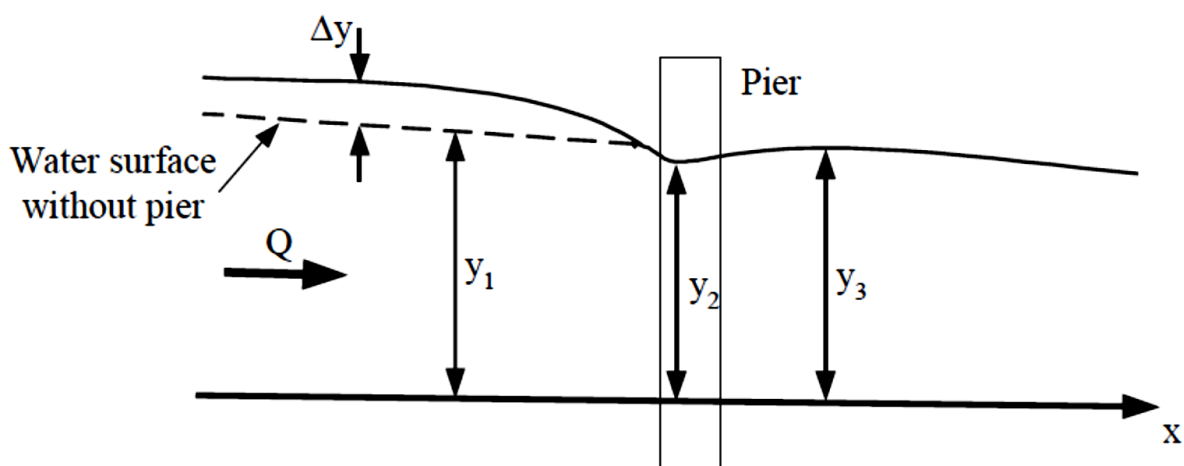
2.1 Γενικά

Η κατασκευή ενός ή περισσότερων βάθρων στη ροή ενός ποταμού εξαναγκάζει τη ροή να περάσει μέσα από διατομή μειωμένου πλάτους. Για να συμβεί αυτό, το νερό πρέπει να αποκτήσει μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή που εμφανίζει σε συνθήκες αδιατάρακτης ροής. Η αύξηση της ταχύτητας μπορεί να επιτευχθεί με άνοδο της επιφάνειας του νερού στην περιοχή ανάντη του βάθρου που δημιουργεί τη στένωση. Επομένως, καθώς η ροή πλησιάζει την περιοχή στένωσης εμφανίζεται πτώση στην επιφάνεια του νερού συνοδευόμενη από αύξηση της ταχύτητας. Όταν η ροή συναντάει το αδιατάρακτο τμήμα του ποταμού κατάντη του βάθρου, η ελεύθερη επιφάνεια δεν υπερυψώνεται μέχρι το επίπεδο της ανάντη στάθμης, αλλά μέχρι τη στάθμη που θα είχε το ποτάμι χωρίς την παρουσία του βάθρου. Αυτή η μόνιμη διαφορά στάθμης είναι ενδεικτική των απωλειών ενεργειών ενέργειας που προκαλούνται από την τριβή λόγω της επαφής του νερού με τα τοιχώματα του βάθρου, από τη στένωση της ροής στο ανάντη άκρο και από τη διεύρυνση της ροής στο κατάντη άκρο του βάθρου. Η υπερύψωση αυτή δίνει τόσο τη δύναμη που χρειάζεται το νερό για να ξεπεράσει την αντίσταση του εμποδίου, όσο και μεγαλύτερη ενέργεια για να αντισταθμιστεί η απώλεια λόγω του μεσοβάθρου.

Οι μεταβολές στη διατομή και στις ταχύτητες στο πέρασμα από την περιοχή των βάθρων προκαλούν μεγάλη αναταραχή στη ροή, ιδιαίτερα όταν το σχήμα και ο προσανατολισμός του βάθρου δεν συνάδει με την κατεύθυνση της ροής. Η καμπύλωση των γραμμών ροής γύρω από το ανάντη άκρο του βάθρου προκαλεί υψηλές ταχύτητες διάβρωσης με αποτέλεσμα τη δημιουργία στροβίλων στις πλευρές και στη βάση του βάθρου που είναι δυνατό να προκαλέσουν τοπική διάβρωση.

Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της υπερύψωσης της ανάντη επιφάνειας του νερού είναι το τμήμα του ποταμού στο οποίο κατασκευάζεται η γέφυρα, η γεωμετρία των βάθρων και του καταστρώματος της και τα χαρακτηριστικά της ροής και της πλημμυρικής κοίτης του ποταμού. Η διερεύνηση της επιρροής του σχήματος του βάθρου στην παρεμπόδιση της ροής και στην υδραυλική απόδοση του ποταμού αποτελεί σημαντικό στοιχείο στην σχεδίαση γεφυρών (Charbeneau and Holley, 2001). Για υποκρίσιμες συνθήκες ροής, που είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος ροής σε ποτάμια, η υπερύψωση της στάθμης λόγω παρουσίας εμποδίων εμφανίζεται θεωρητικά στην περιοχή ανάντη της κατασκευής όπου ξεκινάει η παρεμπόδιση της ροής (flow contraction). Οι δυνάμεις αντίστασης στα βάθρα προκαλούν απώλειες ενέργειας στη ροή και κατά επέκταση υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του βάθρου σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Η δύναμη αντίστασης που ασκείται στο νερό είναι ίση και αντίθετη με αυτή που ασκείται στο βάθρο. Η συνολική δύναμη αντίστασης είναι συνδυασμός της αντίστασης λόγω τριβής και αντίστασης λόγω πίεσης και μπορεί να υπολογιστεί μέσω της εξίσωσης ορμής. Αύξηση της δύναμης αντίστασης οδηγεί σε αύξηση του φαινομένου της υποσκαφής γύρω από το βάθρο και στην περίπτωση που η ανάντη υπερύψωση είναι μεγαλύτερη του ύψους του βάθρου μπορεί να προκαλέσει πλημμυρικές καταστροφές στο κατάστρωμα της γέφυρας. Η δύναμη αντίστασης εξαρτάται από την παροχή, την ταχύτητα ροής και την πίεση στα ανάντη και στα κατάντη της γέφυρας. Το μεγαλύτερο μέρος των μελετών που έχουν γίνει σχετικά με τη ροή γύρω από βάθρα αφορά την υπερύψωση της ανάντη

ελεύθερης επιφάνειας, ενώ είναι λίγες οι μελέτες για την αντίσταση που ασκείται στο βάθρο και στη ροή.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση προφίλ ποταμού σε περιοχή κοντά σε μεσόβαθρο (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).

2.2 Συνοπτική αναφορά σε εργασίες

2.2.1 Ερευνητές που μελέτησαν την υπερύψωση

Η διακύμανση στη στάθμη της επιφάνειας του νερού και η έκταση του ποταμού που επηρεάζεται από την ανάντη ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (backwater effect) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το τμήμα του ποταμού στο οποίο κατασκευάζεται η γέφυρα, από τη γεωμετρία των βάθρων και του καταστρώματος της και από τα χαρακτηριστικά της ροής και της πλημμυρικής κοίτης (Luigia and Kebede, 2013).

Η διερεύνηση, ανάλυση και πειραματική έρευνα για την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας λόγω παρουσίας βάθρου γέφυρας ξεκίνησε από τα μέσα σχεδόν του 19^{ου} αιώνα με τον υπολογισμό της πρώτης σχέσης από τον D'Aubuisson (1840). Ωστόσο, εκτιμάται, σύμφωνα με τον Yarnell (1934), ότι ο πρώτος μελετητής που συνειδητοποίησε και μελέτησε την επιρροή των βάθρων στη ροή ήταν ο Dubuat (1768), ο οποίος υποστήριξε ότι τα άκρα μορφής κυρτής καμπύλης προκαλούν την ελάχιστη παρεμπόδιση στη ροή, προσπάθησε να υπολογίσει την υπερύψωση σε διαφορετικές ταχύτητες και για διάφορες τιμές του ποσοστού συστολής του καναλιού και έκανε πειράματα για τον προσδιορισμό των απωλειών ενέργειας.

Λίγο αργότερα, οι Weisbach et al. (1848) και Ruhlmann et al. (1880) πρότειναν τον υπολογισμό της υπερύψωσης με τη χρήση των σχέσεων υπερχειλίσης για τον έλεγχο της ροής. Ο Chezy (1865) πραγματοποίησε οχτώ πειράματα με βάθρα διάφορων σχημάτων σε κανάλι όπου το βάθος ροής ρυθμιζόταν από θυροφράγματα. Ο Naglar (1918) και ο Lane (1920) χρησιμοποίησαν πειραματικά δεδομένα για να αναθεωρήσουν τις σχέσεις των D'Aubuisson και Weisbach και εντόπισαν κάποιες συνθήκες που δεν επιτρέπουν την χρήση της εμπειρικής σχέσης του d'Aubuisson.

Ο Rehbock (1921) υλοποίησε επίσης ένα μεγάλο πειραματικό ερευνητικό πρόγραμμα με ποικιλία διατομών βάθρων και συνθηκών ροής σε ποτάμια και δημοσίευσε τα αποτελέσματα

μεταξύ 1917 και 1921. Επεσήμανε ότι δεν είναι δυνατό να βρεθεί μια ακριβής θεωρητική λύση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης και επομένως είναι απαραίτητες οι εμπειρικές σχέσεις. Παράλληλα, κατέληξε σε συμπεράσματα ως προς το ποιες παράμετροι της ροής και του βάθρου επηρεάζουν την υπερύψωση.

Ο Yarnell (1934) ανέπτυξε την πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω της παρουσίας βάθρου. Κατά τη μελέτη του πραγματοποίησε 2600 πειράματα λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή διαφόρων παραμέτρων, όπως το σχήμα, το πλάτος και το μήκος των βάθρων, τη γωνία στροφής τους ως προς την κατεύθυνση της ροής και την ταχύτητα ροής. Ωστόσο, ο Yarnell δεν συνέκρινε την εμπειρική του σχέση με όλα τα αποτελέσματα που συνέλεξε από τα πειράματα του. Επίσης, τα πειράματα του περιλάμβαναν ένα μικρό ποσοστό κυλινδρικών βάθρων, τα οποία στη σύγχρονη εποχή χρησιμοποιούνται ευρέως σε γέφυρες.

Ο Escande (1939) ανέπτυξε μια ενεργειακή θεωρία βασισμένη σε ορθογωνική διατομή καναλιού με εμπόδια τοποθετημένα εγκάρσια, η οποία αποτέλεσε μια πιο λογική προσέγγιση στη μηχανική του προβλήματος, παρά το γεγονός ότι κάποια στοιχεία της ήταν αυθαίρετα.

Ο Liu et al. (1957) σε συνεργασία με το «US Department of Public Roads» πραγματοποίησε την πρώτη μεγάλη έρευνα για την υπερύψωση της επιφάνειας ανάντη βάθρων με την πραγματοποίηση 1400 πειραμάτων στο «Colorado State University». Τα αποτελέσματα της έρευνας του αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της μέγιστης υπερύψωσης (maximum backwater) και της διαφοράς στάθμης του νερού (Liu, Bradley & Plate, 1957).

Οι Biery και Delleur (1962) ανέπτυξαν μία μέθοδο για την πρόβλεψη της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας βασισμένη σε πειραματικές μελέτες σε ορθογωνικά κανάλια. Διαπιστώθηκε ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις αν εφαρμοστεί σε σύνθετες διατομές καναλιών (Atabay et al., 2008a, 2008b). Υπήρξαν οι πρώτοι μελετητές που διερεύνησαν επίσης τη ροή γύρω από βάθρα μεσαιωνικών τοξωτών γεφυρών.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1960 και στις αρχές της δεκαετίας του 1970, διάφορα ερευνητικά κέντρα στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, όπως το «Geological Engineering Center of United States» και το «Army Corps of Engineers», ξεκίνησαν να χρησιμοποιούν ηλεκτρονικούς υπολογιστές για τον υπολογισμό των παραμέτρων που αφορούσαν τη ροή σε γέφυρες και οχετούς. Το 1974, οι Franques and Yannitell δημιούργησαν το πρώτο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη της γέφυρας σε δισδιάστατη ροή.

Πλήθος μελετών και μετρήσεων σε εργαστήρια και στο πεδίο (Kaatz and James, 1997; Seckin, 2004; Seckin et al., 1998) αποδεικνύουν ότι η εξίσωση ενέργειας που χρησιμοποιείται κατά την επίλυση ροής παρουσία γέφυρας από το λογισμικό HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) (HEC, 2002) είναι δυνατόν να αποδώσει επαρκώς ακριβείς εκτιμήσεις για τη στάθμη του νερού σε διατομές που περιορίζονται από βάθρα. Ωστόσο, και πάλι είναι πιθανό να εμφανιστούν ανακρίβειες στην εφαρμογή της εξίσωσης αυτής, οι οποίες εξαρτώνται από την επιλογή των παραμέτρων του χρήστη του προγράμματος (Seckin et al., 2007).

Ο Henderson (1966) περιέγραψε πως θα μπορούσε κάποιος να υπολογίσει την υπερύψωση χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Escande. Σύμφωνα με την εργασία του, η μεταβολή της ορμής μεταξύ των διατομών ανάντη και κατάντη του εμποδίου μπορεί να εκφραστεί με όρους

της δύναμης αντίστασης στο βάθρο και αυτό αποτελεί μια «χρήσιμη θεωρητική άσκηση» δεδομένης της έλλειψης λεπτομερούς γνώσης για το συντελεστή αντίστασης.

Οι Sethuraman και Vasudevan (1971) πραγματοποίησαν μια διαφορετική μελέτη για τον προσδιορισμό των εγκάρσιων συντελεστών φορτίου για διάφορες μορφές μεσόβαθρων. Μελετήθηκαν πέντε διαφορετικά σχήματα μεσόβαθρων τα οποία ήταν τοποθετημένα σε διάφορες γωνίες σε σχέση με την διεύθυνση της ροής από 0° έως 50°. Τα πειράματα τους πραγματοποιήθηκαν σε υποκρίσιμη ροή και τα αποτελέσματα τους συγκρίθηκαν με στόχο την επιλογή του καταλληλότερου σχήματος μεσόβαθρου με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του εγκάρσιου φορτίου.

Ο Bradley (1978) συγκέντρωσε πειραματικά αποτελέσματα και εμπειρικές γνώσεις από ερευνητές, καθώς και μετρήσεις πεδίου από το ίδρυμα ερευνών «United States Geological Survey (USGS)» και δημιούργησε διαγράμματα, τυποποιημένες διαδικασίες και παραδείγματα στο βιβλίο «Hydraulics of Bridge Waterway», το οποίο αποτέλεσε βασικό εγχειρίδιο υπολογισμών για σχεδιαστές και κατασκευαστές.

Ερευνητές στο εργαστήριο Hydraulic Research Wallingford (Brown 1985, 1987, 1988) μελέτησαν την υπερύψωση της ανάντη ελεύθερης επιφάνειας για διάφορους τύπους μεσαιωνικών τοξωτών γεφυρών.

Οι Charbeneau and Holley (2001) έκαναν εκτεταμένη εργαστηριακή έρευνα για να μελετήσουν την υπερύψωση λόγω βάθρων, ανέπτυξαν μοντέλα που συσχετίζουν την αύξηση της στάθμης με τον αριθμό Froude και ανέπτυξαν μια νέα σχέση βασισμένη σε μεγάλα φυσικά μοντέλα και πρότειναν την προσθήκη δύο επιπρόσθετων παραμέτρων ως παραλλαγή της εξίσωσης που πρότεινε ο Yarnell (1934). Οι Suribabu et al. (2011) πρότειναν επίσης μια παραλλαγή της εμπειρικής σχέσης προσθέτοντας ακόμη μία παράμετρο. Δυστυχώς, σε καμία από τις δύο αυτές παραλλαγές δεν δόθηκε κάποια ξεκάθαρη φυσική επεξήγηση των επιπρόσθετων παραμέτρων. Οι Charbeneau and Holley (2001) κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι το μήκος της δισδιάστατης υπερύψωσης του νερού αμέσως ανάντη του βάθρου δεν είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του ποταμού.

Οι Martin-Vide et al. (2005) μελέτησαν το φαινόμενο της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας σε τοξωτές γέφυρες με ημικυκλικά ανοίγματα με στόχο την αναστύλωση και προστασία παλαιών γεφυρών από τη ρωμαϊκή εποχή και το μεσαίωνα που αποτελούν μέχρι σήμερα λειτουργικές διαβάσεις πάνω από ποτάμια. Συνέκρινε, επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα με τις εμπειρικές σχέσεις των Yarnell (1934) και Bradley (1978), καθώς και με το υπολογιστικό μοντέλο HEC-RAS.

Ο El-Alfy (2006) πραγματοποίησε πειράματα τόσο σε υποκρίσιμη, όσο και σε υπερκρίσιμη ροή για διάφορες μορφές βάθρων και παρουσίασε σχέσεις μεταξύ της υπερύψωσης της επιφάνειας του νερού, το βάθος ροής στα κατάντη, το συντελεστή συστολής και τον αριθμό Froude στα κατάντη. Επίσης, πραγματοποίησε πειράματα σε υποκρίσιμη, και υπερκρίσιμη ροή για διάφορους λόγους πάχους βάθρων προς το πλάτος του καναλιού. Συνέκρινε όλα τα αποτελέσματα με την εμπειρική σχέση του Yarnell.

Οι Seckin et al. (2009a, 2009b) εφάρμοσαν μεθόδους τεχνητών νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιώντας δεδομένα πειραμάτων και πεδίου με στόχο την ανάπτυξη μιας μεθόδου βασισμένης στην παλινδρόμηση για την εκτίμηση της υπερύψωσης της ανάντη ελεύθερης επιφάνειας.

Οι Pinar et al. (2011) εφάρμοσαν επίσης μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης με βάση τα νευρωνικά δίκτυα και τα μη γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης, όπως MLP, RBNN, GRNN, MLR και MNLR, για τη μελέτη ροής σε τοξωτές γέφυρες μεσαιωνικού τύπου και συνέκριναν τα αποτελέσματα τόσο με δικά του πειράματα και μετρήσεις πεδίου από Brown et al. (1985, 1987, 1988), όσο και με τις πειραματικές μετρήσεις των Biery and Delleur (1962). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι παραπάνω υπολογιστικές μέθοδοι οδηγούν σε μεγαλύτερη ακρίβεια από εμπειρικές και πειραματικές σχέσεις.

Οι Zhenjun et al. (2015) διερεύνησαν το βέλτιστο τύπο και σχήμα βάθρου με την προοπτική της μείωσης της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη του βάθρου.

Οι περισσότερες από τις παραπάνω μελέτες αφορούν την επίδραση στη ροή ενός μόνο βάθρου ή μίας γέφυρας και η έρευνα που αφορά την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας λόγω της επιρροής ομάδας βάθρων ή γεφυρών είναι σχετικά περιορισμένη.

Ο Wang et al. (2016), λαμβάνοντας υπόψη ότι οι μελέτες επικεντρώνονται κυρίως στη μελέτη ενός βάθρου ή γέφυρας, δημιούργησε ένα μεγάλο φυσικό μοντέλο του ποταμού Huaihe στην Κίνα με στόχο να διερευνήσει την επίδραση μιας ομάδας οκτώ γεφυρών στην υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη και τη σύγκριση της επιρροής μιας μόνο γέφυρας και της συνδυασμένης επιρροής μιας ομάδας γεφυρών.

Δεδομένου ότι σχεδόν σε όλες τις παραπάνω μελέτες υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας δεν λαμβάνεται υπόψη η κίνηση των ιζημάτων του πυθμένα, οι Eid και Mohammed (2016) μελέτησαν την επιρροή πυθμένα από χαλαρό, διαβρώσιμο υλικό στην υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υποσκαφή στη βάση του βάθρου μπορεί να μειώσει την υπερύψωση αυτή.

2.2.2 Ερευνητές που μελέτησαν την αντίσταση

Σε ό,τι αφορά τη δύναμη αντίστασης που ασκείται στο βάθρο από τη ροή και αντίστροφα, το μεγαλύτερο μέρος των μελετών που έχουν γίνει σχετικά με τη ροή γύρω από βάθρα αφορά την υπερύψωση της ανάντη ελεύθερης επιφάνειας, ενώ είναι λίγες οι μελέτες για την αντίσταση.

Οι Owen et al. (1959) πραγματοποίησαν πειράματα για τη ροή γύρω από τοξωτές γέφυρες και υπολόγισαν τόσο την υπερύψωση της ανάντη στάθμης του νερού, όσο και το συντελεστή αντίστασης στα βάθρα.

Η επίδραση της παρεμπόδισης της ροής στην τιμή του συντελεστή αντίστασης σε κυλινδρικές διατομές μελετήθηκε από τους Ramamurthy και Ng (1973) και Farrell et al. (1977). Η επιρροή της κλίσης της ταχύτητας στο συντελεστή αντίστασης μελετήθηκε από τους Masch & Moore (1973) και Hsieh (1964). Ο Hsieh (1964) μέτρησε τον συντελεστή αντίστασης κατακόρυφων κυλινδρικών βάθρων σε ορθογωνικό κανάλι, αλλά δεν έλαβε υπόψη του τη διαφορά στάθμης που προκαλούσαν οι κύλινδροι και δεν παρουσίασε κάποια γενικευμένη μέθοδο για την εκτίμηση του συντελεστή αντίστασης για δεδομένες διαστάσεις.

Οι Raju et al. (1983) διεξήγαγαν πειράματα σε κυλινδρικά βάθρα για διάφορες συνθήκες ροής και αναλογίες παρεμπόδισης της, για να διερευνήσουν την επίδραση των εμποδίων στο

συντελεστή αντίστασης και κατέληξαν σε μια σχέση που συνδέει τις απώλειες ενέργειας, την υψομετρική διαφορά της στάθμης ανάντη και κατόντη και τη δύναμη αντίστασης.

Ο Montes (1998) περιέγραψε τους εμπειρικούς τύπους των Rehbock και Yarnell και ανέπτυξε μια πιο λογική προσέγγιση χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης της ορμής και τη δύναμη αντίστασης στη διατομή του μεσόβαθρου σε ένα ορθογωνικό κανάλι και για βάθρα που εκτείνονται σε όλο το βάθος της ροής.

Οι Charbeneau and Holley (2001) εκτός από την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, μελέτησαν επίσης τη δύναμη αντίστασης και τις μεταβολές της στάθμης στα ανάντη και στα κατόντη των βάθρων σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Υπολόγισαν τον συντελεστή αντίστασης και διερεύνησαν το φαινόμενο της κλίμακας μεταξύ των εργαστηριακών μοντέλων και πρωτοτύπων.

Ο Fenton (2008) χρησιμοποίησε την αρχή διατήρησης της ενέργειας για να αναπτύξει μία προσεγγιστική μέθοδο σαν αυτή του Montes (1998) αλλά για γενικότερα προβλήματα με αυθαίρετα σώματα και διατομές. Γραμμικοποίησε την εξίσωση της ορμής σε όρους αντίστασης δίνοντας μια πρώτη λύση για την αλλαγή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας εξαιτίας της δύναμης αντίστασης και διερεύνησε τους παράγοντες που επηρεάζουν το πρόβλημα χωρίς ωστόσο να δώσει αποτελέσματα για το συντελεστή αντίστασης.

Οι Shreelash και Mudgal (2010) πραγματοποίησαν πειράματα για να υπολογίσουν τα χαρακτηριστικά αντίστασης κυλινδρικών μοντέλων βάθρων, ενώ οι Suribabu et al. (2011) πραγματοποίησαν πειράματα σε βάθρα διαφόρων σχημάτων με την ίδια επιφάνεια προβολής και υπολόγισαν τόσο την ανάντη υπερύψωση, όσο και τα χαρακτηριστικά της αντίστασης. Οι Agarwal et al. (2014) υπολόγισαν τον συντελεστή σχήματος και τον συντελεστή αντίστασης σε βάθρα ορθογωνικής διατομής με πρόσθετα τριγωνικά στοιχεία στα δύο άκρα τους σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής.

2.2.3 Ερευνητές που ανέπτυξαν υπολογιστικά μοντέλα

Στη σύγχρονη εποχή, η βελτίωση της ακρίβειας των υπολογιστικών μεθόδων και των μοντέλων διακριτών στοιχείων, δίνει τη δυνατότητα σε πολλούς ερευνητές να αναπτύσσουν δικά τους μοντέλα ή να χρησιμοποιούν έτοιμα υπολογιστικά πακέτα για τον προσδιορισμό παραμέτρων στη ροή γύρω από βάθρα. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας της ροής και της μοναδικότητας της κάθε περίπτωσης, είναι σημαντικό ακόμη και σήμερα να επιβεβαιώνονται τα υπολογιστικά αποτελέσματα με πειραματικές μετρήσεις.

Πολλοί ερευνητές που έχουν αναπτύξει μονοδιάστατα υπολογιστικά μοντέλα για τη μελέτη της ροής σε γέφυρες είναι, μεταξύ άλλων, οι Seckin, Yurtal, & Haktanir (1998), οι Crowder, Pepper, Whitlow, Sleigh, Wright, & Tomlin (2004), οι Seckin & Atabay (2005), ο Sowinski (2006), οι Cuiling Sun, Xiaohui Xu, et al. (2006), οι Seckin, Haktanir, & Knight (2007), οι Seckin, Knight, Atabay, & Seckin (2008a,b), οι Linchun Xu, Dong Huang, et al. (2008), οι Fei Wu, Meng Gan (2009), οι Qin Zhou, Chongqing Yin, et al. (2011), οι Wei Ding, Hongwu Tang, et al. (2011) και οι Atabay et al. (2017).

Το ενδιαφέρον για την αναπαράσταση της ροής γύρω από βάθρο με δισδιάστατα μοντέλα είναι ιδιαίτερα εμφανές τα τελευταία χρόνια, τόσο σε ερευνητικό επίπεδο όσο και σε κατασκευαστικό. Ωστόσο, το πρόβλημα της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων με

πειραματικές μετρήσεις, οι αβεβαιότητες στην εκτίμηση των παραμέτρων και η δυσκολία υπολογιστικής αποτύπωσης των ενεργειακών απωλειών τυρβώδους ροής γύρω από βάθρο, δείχνουν την αναγκαιότητα περαιτέρω διερεύνησης δισδιάστατων μοντέλων (Leister 2010). Παράλληλα, δεδομένου ότι ακόμη και τα δισδιάστατα μοντέλα δεν είναι δυνατό να λάβουν υπόψη τους κάποιες παραμέτρους, όπως η επιρροή σύνθετων διατομών στη ροή γύρω από βάθρο, είναι σημαντική η ανάπτυξη μοντέλων για τη μελέτη του προβλήματος στις τρεις διαστάσεις (Kocaman 2014).

Πινάκας 2.1 Συνοπτική παρουσίαση εργασιών.

Ερευνητές	Έτος	Αντικείμενο μελέτης	Θεωρητική ανάλυση	Πειραματική μελέτη	Υπολογιστική μελέτη	Μοντέλο	Σύγκριση
Dubuat	1768	Υπερύψωση, απώλειες ενέργειας	Μαθηματικά μοντέλα υπερύψωσης	Για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας	-	-	-
D'Aubuisson	1840	Υπερύψωση	Εμπειρικός τύπος		-	-	-
Weisbach	1848	Υπερύψωση	Εμπειρικός τύπος	Λίγα πειράματα, δυσανάλογο μέγεθος σε σχέση με κανάλι	-	Κυλινδρικό βάθρο	-
Chezy	1865	Υπερύψωση	-	8 πειράματα	-	Βάθρα διαφόρων σχημάτων	-
Naglar	1918	Υπερύψωση	Από την εμπειρική σχέση των D'Aubuisson και Weisbach	Πειράματα	-	-	-
Lane	1920	Υπερύψωση	Από την εμπειρική σχέση των D'Aubuisson και Weisbach	Πειράματα	-	-	-
Rehbock	1921	Υπερύψωση	Εμπειρική σχέση	Μεγάλο πειραματικό πρόγραμμα	-	Βάθρα διαφόρων σχημάτων	-

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

Yarnell	1934	Υπερύψωση	Εμπειρική σχέση	2600 πειράματα	-	Βάθρα διαφόρων σχημάτων	-
Escande	1939	Υπερύψωση	Ενεργειακή θεωρία	-	-	-	-
Liu et al.	1957	Υπερύψωση	-	1400 πειράματα	-	-	-
Owen et al.	1959	Υπερύψωση, αντίσταση	-	Πειράματα	-	Τοξωτές γέφυρες	-
Biery & Delleur	1962	Υπερύψωση	Εμπειρική σχέση	Πειράματα σε ορθογωνικά κανάλια	-	Βάθρα μεσαιωνικών τοξωτών γεφυρών	-
Hsieh	1964	Αντίσταση	-	Πειράματα σε ορθογωνικό κανάλι	-	Κατακόρυφοι κύλινδροι	-
Henderson	1966	Υπερύψωση, αντίσταση	Από τις εμπειρικές σχέσεις των Escande	-	-	-	-
Sethuraman & Vasudevan	1971	Εγκάρσιοι συντελεστές φορτίου	-	Πειράματα σε υποκρίσιμη ροή	-	5 μοντέλα σε γωνίες από 0° έως 50°	-
Ramamurthy & Ng	1973	Αντίσταση	-	-	-	Κυλινδρικές διατομές	-
Farell et al.	1977	Αντίσταση	-	-	-	Κυλινδρικές διατομές	-
Bradley	1978	Υπερύψωση, αντίσταση	Συγκέντρωσε πειραματικά αποτελέσματα και σχέσεις	-	-	-	Με βιβλιογραφία
Raju et al.	1983	Αντίσταση	Εμπειρική σχέση	Διάφορες συνθήκες ροής	-	Κυλινδρικές διατομές	-
Brown & HR Wallingford	1985 , 1987	Υπερύψωση	-	Πειράματα και μετρήσεις πεδίου	-	Διάφοροι τύποι μεσαιωνικών	-

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

						τοξωτών γεφυρών	
	, 1988						
Montes	1998	Υπερύψωση, αντίσταση	Από τις εμπειρικές σχέσεις των Rehbock και Yarnell	-	-	-	-
Seckin, Yurtal, & Haktanir	1998	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
Charbeneau and Holley	2001	Υπερύψωση, αντίσταση	Από την εμπειρική σχέση του Yarnell	Εκτεταμένη εργαστηριακ ή έρευνα	-	3 κυλινδρικά και 1 όμοιο με αυτό του Yarnell	Με βιβλιογρ αφία
Crowder, Pepper, Whitlow, Sleigh, Wright, & Tomlin	2004	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
Martin-Vide et al.	2005	Υπερύψωση	-	-	-	Τοξωτές γέφυρες με ημικυκλικά ανοίγματα	Με σχέσεις Yarnell, Bradley και μοντέλο HEC- RAS
Seckin & Atabay	2005	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
Sowinski	2006	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
Cuiling Sun, Xiaohui Xu, et al.	2006	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-

2. Βιβλιογραφική επισκόπηση

El-Alfy	2006	Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας	Εμπειρική σχέση	Υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή για 5 διαφορετικές παροχές	-	6 μοντέλα με ορθογωνικ ά, τριγωνικά και κυκλικά άκρα	Με σχέση Yarnell
Seckin, Haktanir, & Knight	2007	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
Seckin, Knight, Atabay, & Seckin	2008	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
Linchun Xu, Dong Huang, et al.	2008	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
Fenton	2008	Υπερύψωση, αντίσταση	Προσεγγιστική ρητή λύση	-	-	-	Με Charbene au & Holley
Fei Wu, Meng Gan	2009	-	-	-	Μονοδιάσ τατο μοντέλο	-	-
El-Alfy	2009	Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας	Εμπειρική σχέση	Υποκρίσιμη, και υπερκρίσιμη ροή για 5 διαφορετικές παροχές	-	6 διαφορετικ ά μοντέλα με ορθογωνικ ά, τριγωνικά και κυκλικά άκρα	Με σχέση Yarnell
Seckin et al.	2009	Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας	Μεθόδους νευρωνικών δικτύων	-	Ανάπτυξη υπολογιστ ικής μεθόδου	-	Δεδομέν α πειραμάτ ων και πεδίου
Shreelash & Mudgal	2010	Αντίσταση	-	Πειράματα	-	Κυλινδρικά βάθρα	-

Pinar et al.	2011	Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας	Μεθόδους νευρωνικών δικτύων	-	Ανάπτυξη υπολογισ- τικής μεθόδου	-	-
Suribabu et al.	2011	Υπερύψωση, αντίσταση	-	Πειράματα	-	Διάφορα μοντέλα	-
Qin Zhou, Chongqing Yin, et al.	2011	-	-	-	Μονοδιάσ- τατο μοντέλο	-	-
Wei Ding, Hongwu Tang, et al.	2011	-	-	-	Μονοδιάσ- τατο μοντέλο	-	-
Agarwal et al	2014	Αντίσταση	-	Πειράματα σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής	-	Ορθογωνικ- ά μοντέλα με πρόσθετα τριγωνικά στοιχεία	-
Zhenjun et al.	2015	Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας	-	Πειράματα	-	Διαφορετικ- ά μοντέλα	-
Wang et al.	2016	Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας	-	Πειράματα σε ομάδα από γέφυρες στο ίδιο κανάλι	-	8 γέφυρες	-
Eid & Mohammed	2016	Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας	-	Πειράματα λαμβάνοντας υπόψη διαβρώσιμο τυθμένα	-	-	-
Atabay et al.	2017	-	-	-	Μονοδιάσ- τατο μοντέλο	-	-

2.3 Βασικές εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της υπερύψωσης

Οι περισσότεροι ερευνητές μελέτησαν το μέγεθος της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας Δy (backwater effect). Μεταξύ των μελετητών που ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο πρόβλημα και παρουσίασαν αναλυτικές εμπειρικές σχέσεις ήταν οι d' Aubuisson (1852), Nagler (1918), Rehbock (1919), Yarnell (1934), και Al-Nassri (1994).

2.3.1 Εμπειρική σχέση Yarnell

Η πλέον διαδεδομένη εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης της στάθμης είναι η εξίσωση του Yarnell (Yarnell 1934):

$$\Delta y = 2K(K + 5Fr_3^2 - 0.6)(\alpha + 15\alpha^4) \frac{V_3^2}{2g} \quad (2.1)$$

Η εξίσωση (2.1) μπορεί να γραφεί επίσης στην παρακάτω μορφή:

$$\frac{\Delta y}{y} = K(K + 5Fr_3^2 - 0.6)(\alpha + 15\alpha^4)Fr_3^2 \quad (2.2)$$

Στις εξισώσεις (2.1) και (2.2) Δy είναι η υπερύψωση που προκαλείται από το εμπόδιο, y είναι το τοπικό αδιατάρακτο βάθος ροής, δηλαδή το βάθος που εμφανίζεται χωρίς την παρουσία του βάθρου, Fr_3 ο αριθμός Froude στην διατομή 3 (Σχήμα 2.1) κατάντη του εμποδίου, α είναι το ποσοστό συστολής του καναλιού που ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους της περιοχής της ροής που περιορίζεται λόγω του εμποδίου προς το συνολικό πλάτος του καναλιού κατάντη του μεσόβαθρου και K ο συντελεστής σχήματος όπως έχει προκύψει από τις πειραματικές διαδικασίες του Yarnell (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2 Συντελεστές σχήματος K για την εμπειρική σχέση του Yarnell.

Σχήμα βάθρου	K
Ημικυκλικά άκρα μπροστά και πίσω	0.90
Φακοειδές (Lens-shaped) μπροστά και πίσω	0.90
Δύο κυλινδρικά με διάφραγμα (L/D=4)	0.95
Δύο κυλινδρικά χωρίς διάφραγμα (L/D=4)	1.05
90° τριγωνικό μπροστά και πίσω	1.05
Τετράγωνο μπροστά και πίσω	1.25

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις (2.1) και (2.2) αφορούν μόνο τις συνθήκες ροής τύπου A σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση κατά Yarnell και τύπου I σύμφωνα με TxDOT. Οι κατηγορίες αυτές αναφέρονται σε αργές ροές που δεν πλήττουν την ανωδομή της γέφυρας και παραμένουν υποκρίσιμες σε όλη την περιοχή στένωσης ώστε να μην εμφανιστούν κρίσιμες συνθήκες ροής στη θέση αυτή.

Ο Yarnell χρησιμοποίησε στα πειράματά του τιμές για το ποσοστό συστολής α ίσε με 11.7%, 23.3%, 35%, και 50%. Παρά το γεγονός ότι οι τιμές του α που χρησιμοποίησε είναι σχετικά μεγάλες συγκρινόμενες με τα σημερινά σχέδια βάθρων, η εξίσωση του Yarnell χρησιμοποιείται ακόμη και σήμερα σε αξιόλογα υπολογιστικά προγράμματα, όπως το HEC-2 και το HERC-RAS. Από την πρώτη στιγμή που δημοσιεύθηκε η εμπειρική σχέση του Yarnell, θεωρήθηκε συμβατή με την εκτίμηση της υπερύψωσης δεδομένου ότι τα αποτελέσματα της ήταν σε

συμφωνία με μετρήσεις σε πρότυπες διατομές σύμφωνα με ανώνυμη μελέτη (Anon, 1939). Ωστόσο, με τη χρήση του υπολογιστικού μοντέλου HEC-2 έχουν παρατηρηθεί κάποιοι περιορισμοί στην καθολική εφαρμογή της σχέσης του Yarnell (Wisner et al. 1989, Charbeneau & Holley, 2001).

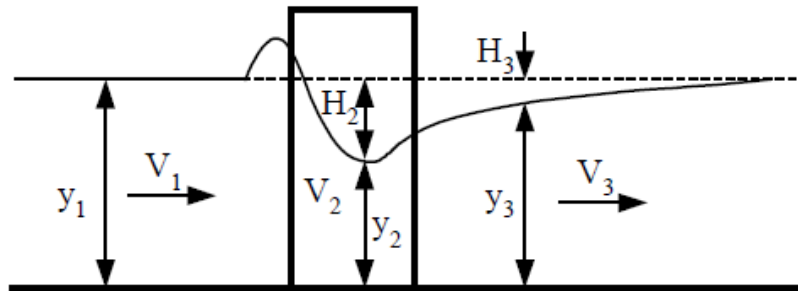
Ένας λόγος για τον οποίον η εμπειρική σχέση του Yarnell (1934) έχει τόσο ευρεία αποδοχή είναι πιθανώς ο μεγάλος αριθμός πειραμάτων που ο ίδιος πραγματοποίησε. Συγκεκριμένα, ο Yarnell διεξήγαγε 2600 πειράματα σε μεγάλη διώρυγα με πλάτος 3.05 m και παροχές που έφταναν τα 4.5 m³/s. Τα περισσότερα μεσόβαθρα που χρησιμοποίησε ο Yarnell ήταν ορθογωνικά με πλάτος 35.6 cm και μήκος 1.07 m και παρουσίαζαν αναλογία (μήκος προς πλάτος) 3:1. Άλλα σχήματα, όπως ημικύκλια και ορθογώνια τρίγωνα, τοποθετούνταν στην μπροστά και πίσω πλευρά του βάρου αυξάνοντας την αναλογία σε 4:1 ή μεγαλύτερη. Αποκαλούσε αυτά τα βάθρα «κανονικά (regular)» ή «τυπικά (standard)». Για αυτά τα βάθρα χρησιμοποίησε έντεκα διαφορετικούς συνδυασμούς για το σχήμα των άκρων τους στην πρώτη σειρά πειραμάτων και δεκατέσσερις στη δεύτερη σειρά. Στις επόμενες δύο σειρές πειραμάτων δεν χρησιμοποίησε τόσες εναλλαγές γεωμετρίας. Τα πειράματά του περιλάμβαναν και κάποιες δοκιμές με δύο κυλίνδρους σε σειρά. Για να διερευνήσει την επιρροή του λόγου των διαστάσεων, πραγματοποίησε επίσης πειράματα με ορθογώνια δύο ή τρεις φορές μεγαλύτερα από τα πρότυπα με λόγο από 7:1 έως 13:1. Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ η εμπειρική σχέση έχει προκύψει για τύπο ροής I, δεν πραγματοποιήθηκαν όλα τα πειράματά του για αυτόν τον τύπο ροής.

Παρά την ευρεία αποδοχή των εξισώσεων του Yarnell, υπάρχουν περιορισμοί ως προς την εφαρμογή του, όπως αποδεικνύεται από τη σύγκριση αποτελεσμάτων του μοντέλου HEC-2, το οποίο χρησιμοποιεί την εμπειρική σχέση του Yarnell σε περίπτωση συνθηκών τύπου 1, με τα αποτελέσματα φυσικού μοντέλου (Wisner et al., 1989). Συγκεκριμένα οι περιορισμοί αφορούν κυρίως τη διατομή του καναλιού, την ασυμμετρία και το σχήμα του βάρου. Επιπρόσθετες αδυναμίες της εμπειρικής αυτής σχέσης αφορούν το γεγονός ότι τα πειράματα του Yarnell πραγματοποιήθηκαν σε κανάλι σταθερής ορθογωνικής διατομής στην ευρύτερη περιοχή τόσο ανάντη όσο και κατάντη του εμποδίου. Αυτή η γεωμετρία δεν είναι εν γένει ευφικτή σε φυσικά υδατορέμματα όπου η διατομή στην περιοχή κοντά σε γέφυρα εμφανίζει ανομοιομορφία. Επιπλέον, ο Yarnell υποστήριξε πως η μέθοδός του εφαρμόζεται για ασυμμετρία (γωνία μεταξύ του άξονα του καναλιού και της καθέτου στον άξονα της γέφυρας) μέχρι 10° μόνο που είναι αρκετά μικρή γωνία για τις πραγματικές κατασκευές. Επιπρόσθετα, για τον προσδιορισμό της σταθεράς K , είναι προφανές ότι ο Yarnell δεν κάλυψε όλα τα πιθανά σχήματα βάρων στα πειράματά του κάτι που υποχρεώνει το μελετητή να εκτιμήσει την τιμή του συντελεστή όταν το βάθρο του διαφέρει γεωμετρικά από τα μελετημένα από τον Yarnell.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από το HEC-2 και από το φυσικό μοντέλο έδειξαν ότι οι διαφορές στη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας καταμήκος μιας συγκεκριμένης τομής μεταβάλλονται με την παροχή (Wisner et al., 1989). Οι διαφορές αυτές φάνηκαν να είναι αποδεκτές για κάθε πλυμμήρα εκτός από αυτή με περίοδο επαναφοράς 500 ετών. Για την τελευταία αυτή περίπτωση, η διαφορά της στάθμης που υπολογίστηκε από το μοντέλο τη μετρημένη από το πείραμα ήταν σημαντική, και ο Wisner et al. (1989) συμπέραναν ότι το HEC-2 με τις εξισώσεις του Yarnell δεν μπορεί να προσομοιώσει όλες τις συνθήκες ροής.

2.3.2 Παλαιότεροι ερευνητές

Έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον D'Aubuisson (1852) είχε επίσης ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό εμπειρικής σχέσης για την εκτίμηση της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφανείας.



Σχήμα 2.2 Ροή νερού στη σε περιοχή στένωσης λόγω παρουσίας βάθρου (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).

Η εξίσωση του D'Aubuisson βασίζεται στη θεωρία ότι η πτώση H_2 στην επιφάνεια του νερού ορίζεται ως η διαφορά των μέγιστων ή επιφανειακών ταχυτήτων μεταξύ των διατομών (1) και (2). Συμπεράνε λοιπόν ότι:

$$\frac{\Delta y}{y} = \left[\frac{8}{27K_{DA}^2} \frac{(1 + 0.5Fr_{3c}^2)^3}{Fr_{3c}^2} - \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta y}{y}} \right)^2 \right] \frac{Fr_3^2}{2} \quad (2.3)$$

όπου Fr_{3c} είναι ο αριθμός Froude στην θέση (3) κατάντη του βάθρου για κρίσιμη ή «πνιγμένη(choked)» ροή στην θέση (2) και K_{DA} είναι η σταθερά του D'Aubuisson που λαμβάνει υπόψιν το σχήμα του βάθρου. Ο πίνακας 2.2 δίνει τις τιμές του K_{DA} για ροή τύπου 1 για τα διάφορα σχήματα βάθρων.

Πίνακας 2.2 Συντελεστές σχήματος K για την εμπειρική σχέση του D'Aubuisson.

Σχήμα βάθρου	K_{DA}
Ημικυκλικά άκρα μπροστά και πίσω	1.079
Φακοειδές (Lens-shaped) μπροστά και πίσω	1.051
Δύο κυλινδρικά με διάφραγμα (L/D=4)	0.966
Δύο κυλινδρικά χωρίς διάφραγμα (L/D=4)	0.991
90° τριγωνικό μπροστά και πίσω	1.05
Ορθογώνιο μπροστά και πίσω	1.065

Ο Nagler (1918) πρότεινε τη σχέση

$$\frac{\Delta y}{y} = \left[\frac{8}{27K_N^2} \frac{(1 + 0.5Fr_{3c}^2)^3}{Fr_{3c}^2 \left(1 - 0.3 \frac{Fr_3^2}{2}\right)} - \beta \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta y}{y}} \right)^2 \right] \frac{Fr_3^2}{2} \quad (2.4)$$

όπου β είναι διορθωτικός συντελεστής που εξαρτάται από τις συνθήκες στην τοποθεσία του μεσόβαθρου (ποικίλει με το ποσοστό στένωσης) και K_N είναι ο συντελεστής σχήματος του Nagler. Ο πίνακας 2.3 δίνει τις τιμές του K_N για ροή τύπου 1 για τα διάφορα σχήματα βάθρων.

Πίνακας 2.3 Συντελεστές σχήματος K_N για την εμπειρική σχέση του Nagler.

Σχήμα βάθρου	K_N
Ημικυκλικά άκρα μπροστά και πίσω	0.934
Φακοειδές (Lens-shaped) μπροστά και πίσω	0.952
Δύο κυλινδρικά με διάφραγμα (L/D=4)	0.907
Δύο κυλινδρικά χωρίς διάφραγμα (L/D=4)	0.892
90° τριγωνικό μπροστά και πίσω	0.887
Τετράγωνο μπροστά και πίσω	0.871

Σύμφωνα με τον Rehbock (1919), η εξίσωση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης για όλα τα σχήματα βάθρων σε ορθογωνικό κανάλι με συνηθισμένη ροή είναι:

$$\frac{\Delta y}{y} = [\delta_0 - \alpha(\delta_0 - 1)][9\alpha^4 + \alpha^2 + 0.4\alpha]Fr_3^2(1 + Fr_3^2) \quad (2.5)$$

όπου δ_0 είναι ο συντελεστής σχήματος του Rehbock. Ο Rehbock δήλωσε ότι η εξίσωσή του είναι για συνηθισμένη ή στρωτή ροή δηλαδή για ροή όπου το νερό περνά το εμπόδιο με ελάχιστη ή και καθόλου την ύπαρξη τύρβης. Ο πίνακας 2.4 δίνει τις τιμές του δ_0 για τα διάφορα σχήματα βάθρων.

Πίνακας 2.4 Συντελεστές σχήματος δ_0 για την εμπειρική σχέση του Rehbock.

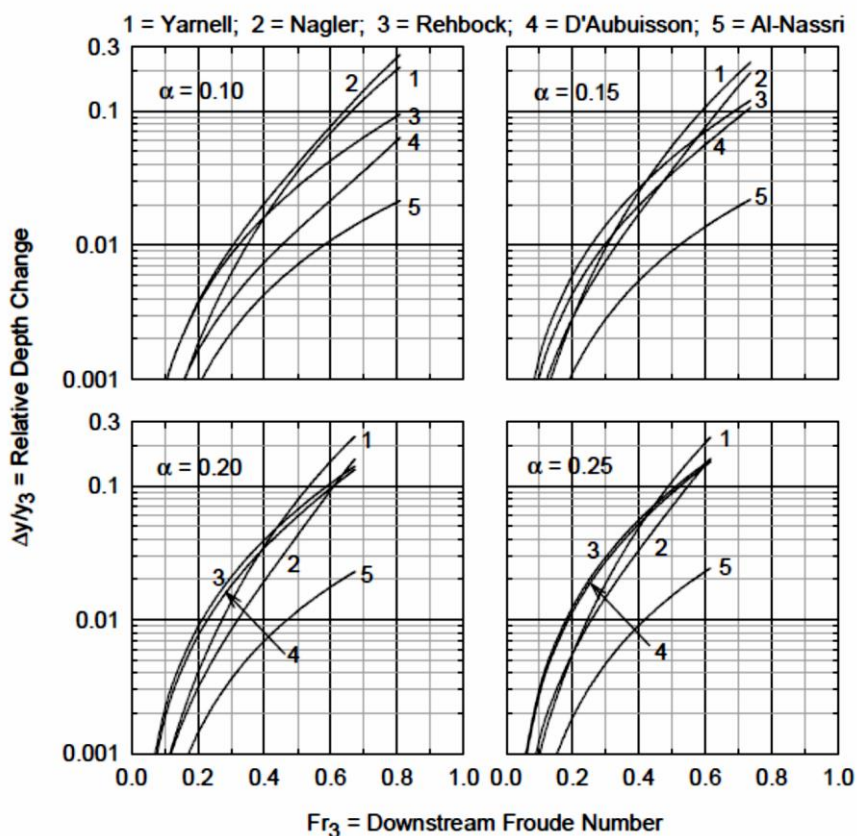
Σχήμα βάθρου	δ_0
Ημικυκλικά άκρα μπροστά και πίσω	3.35
Φακοειδές (Lens-shaped) μπροστά και πίσω	3.55
Δύο κυλινδρικά με διάφραγμα (L/D=4)	5.99
Δύο κυλινδρικά χωρίς διάφραγμα (L/D=4)	6.13
90° τριγωνικό μπροστά και πίσω	3.54
Ορθογώνιο μπροστά και πίσω	2.64

Τα αποτελέσματα της πειραματικής του μελέτης του Al-Nassri (1994) μπορούν να περιγραφούν από τη σχέση

$$\frac{\Delta y}{y_3} = \frac{0.0678}{\varphi^{0.95}} \left[\frac{Fr_3}{(1-a)^{1.8}} \right]^{2.29} \quad (2.6)$$

όπου φ είναι συντελεστής σχήματος ο οποίος ορίστηκε ως το ποσοστό του εγκάρσιου στη ροή γεωμετρικού εμβαδού του βάρθρου προς το εμβαδό της ζώνης αποκόλλησης κατάντη των βάρθρων. Η εξίσωση αυτή βασίζεται σε πειράματα που περιλάμβαναν ένα πλήθος της σταθεράς α από 7% έως 47%. Ο Al-Nassri έδωσε $\varphi=2.36$ για τετραγωνικής διατομής βάρθρα, $\varphi=3.19$ για κυκλικής διατομής βάρθρα και $\varphi=5.85$ για βάρθρα με ημικυκλικά άκρα ανάντη και κατάντη χωρίς να καθορίζει το λόγο των πλευρών στην περίπτωση αυτή.

Οι Charbeneau and Holley (2001) συγκέντρωσαν τις παραπάνω εμπειρικές σχέσεις σε ένα διάγραμμα για να είναι δυνατή η σύγκριση όλων των παραπάνω εξισώσεων για βάρθρο ορθογωνικής διατομής με ημικυκλικά άκρα τόσο ανάντη όσο και κατάντη. Κάθε καμπύλη σταματά σε ένα όριο περίπου ίσο με τη ροή τύπου I κατά TxDOT (ροή τύπου A κατά Yarnell) όπου τα βάρθρα «πνίγουν» το κανάλι, δηλαδή όταν επικρατούν συνθήκες που δημιουργούν κρίσιμο βάθος ροής κοντά στα βάρθρα. Για τον υπολογισμό του αριθμού Froude στον οποίο εμφανίζεται η παρεμπόδιση της ροής χρησιμοποιήθηκε η ενιαία σταθερά απωλειών ίση με 0.5. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3, υπάρχει διαφορά τάξης μεγέθους μεταξύ των εξισώσεων. Ο λόγος για το μέγεθος αυτό της διαφοράς δεν είναι γνωστός ακόμη οπότε πρέπει τα πειράματα που αφορούν την επίδραση των βάρθρων στην ροή να διενεργούνται με προσοχή και ακρίβεια (Charbeneau and Holley, 2001).



Σχήμα 2.3 Εμπειρικές σχέσεις για την υπερύψωση (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).

2.3.3 Ορισμός ροής Τύπου I

Η ροή τύπου I ορίζεται ως η χαμηλή ροή που δεν πλήττει την ανωδομή και παραμένει υποκρίσιμη στην περιοχή συστολής (Charbeneau & Holley, 2000). Τα όρια μέσα στα οποία εμφανίζεται αυτή η ροή δίνονται παρακάτω.

Έστω ότι η θέση 2 (Σχήμα 2.1) είναι στο σημείο στο οποίο η ροή περιορίζεται περισσότερο, και υποθέτοντας ορθογωνικό κανάλι, η κρίσιμη ροή δίνει βάθος ροής ίσο με

$$y_2 = y_{crit} = \frac{V^2}{g} \quad (2.7)$$

όπου y_{crit} είναι το κρίσιμο βάθος ροής.

Από εξίσωση ενέργειας μεταξύ των διατομών 2 και 3 (Σχήμα 2.1) για οριζόντιο κανάλι προκύπτει

$$\left(y + \frac{V^2}{2g}\right)_2 - K_L \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} = \left(y + \frac{V^2}{2g}\right)_3 \quad (2.8)$$

όπου K_L είναι ο συντελεστής απωλειών διαστολής.

Απαλείφοντας την ταχύτητα V_2 με την παραπάνω σχέση και αναδιατάσσοντας προκύπτει

$$\frac{y_2}{y_3} = \frac{2 + (1 - K_L)Fr_3^2}{3 - K_L} \quad (2.9)$$

Θεωρώντας ότι το πλάτος της ζώνης αποκόλλησης κατάντη του βάθρου είναι ίσο με το πλάτος του βάθρου, τότε από εξίσωση συνέχειας προκύπτει

$$V_2 y_2 (1 - a) B = V_3 y_3 B \quad (2.10)$$

Απαλείφοντας πάλι την ταχύτητα V_2 χρησιμοποιώντας την σχέση του κρίσιμου βάθους προκύπτει

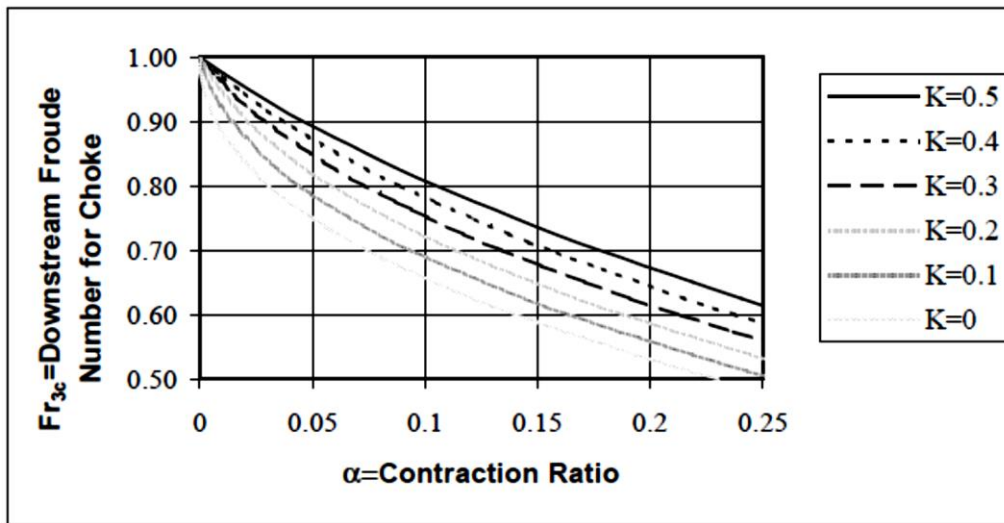
$$\alpha = 1 - \frac{Fr_{3c}}{\left(\frac{y_2}{y_3}\right)^{3/2}} = 1 - \frac{Fr_{3c}}{\left(\frac{y_c}{y_3}\right)^{3/2}} \quad (2.11)$$

όπου Fr_{3c} είναι ο αριθμός Froude κατάντη για τον οποίο εμφανίζονται συνθήκες παρεμπόδισης της ροής (choked flow).

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.9) στην τελευταία προκύπτει

$$\alpha = 1 - \frac{Fr_{3c}}{\left(\frac{2 + (1 - K_L)Fr_{3c}^2}{3 - K_L}\right)^{3/2}} = 1 - \left(\frac{3 - K_L}{2 + (1 - K_L)Fr_{3c}^2}\right)^{3/2} Fr_{3c} \quad (2.12)$$

Η σχέση αυτή συνδέει τις παραμέτρους α και Fr_{3c} . Τιμές του Fr_{3c} για διάφορες τιμές του α και K_L δίνονται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4 Τιμές του Fr_{3c} για διάφορες τιμές του α και K_L .

Αν το πλάτος της ζώνης αποκόλλησης κατάντη του βάρθρου είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του βάρθρου, τότε κάθε τιμή της παραμέτρου α για δεδομένη τιμή Fr_{3c} πρέπει να απομειώνεται κατά τρόπο ανάλογο της αύξησης του πλάτους της ζώνης χωρισμού προς το πλάτος του βάρθρου. Για παράδειγμα, αν η ζώνη χωρισμού είναι 10% πλατύτερη, τότε η παράμετρος α πρέπει να διαιρείται με 1.1. Με όμοιο τρόπο, πλατύτερη ζώνη χωρισμού για δεδομένο α έχει ως αποτέλεσμα μείωση της τιμής του Fr_{3c} αλλά δεν υπάρχει σχέση που να καθορίζει τη μείωση αυτή. Η αριθμητική τιμή του μειωμένου αριθμού Froude μπορεί να προκύψει από την εξίσωση πολλαπλασιάζοντας το α κατά 1 συν την αύξηση της ζώνης χωρισμού (οπότε για το ίδιο παράδειγμα με 1.1) και λύνοντας κατόπιν ως προς Fr_{3c} .

3. Θεωρητική ανάλυση

3.1 Ανοικτοί αγωγοί

3.1.1 Γενικά

Ανοικτοί αγωγοί ονομάζονται αυτοί στους οποίους το ρευστό (νερό) ρέει με ελεύθερη επιφάνεια, καταλαμβάνει δηλαδή τμήμα μόνο της διατομής. Ροή με ελεύθερη επιφάνεια εμφανίζεται στους αγωγούς ομβρίων και ακαθάρτων, σε οχετούς, διώρυγες, κανάλια ναυσιπλοΐας και υδατορεύματα (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007).

Οι ανοικτοί αγωγοί διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, τους φυσικούς και τους τεχνητούς. Οι φυσικοί ανοικτοί αγωγοί χαρακτηρίζονται από ακανόνιστη οριζοντιογραφική διάταξη και από έλλειψη κανονικότητας σχήματος της διατομής από θέση σε θέση, ενώ επειδή τα στερεά τους όρια είναι γαίες κατά περιόδους είναι δυνατό να διαβρώνονται ή να προσχώνονται με αποτέλεσμα η διατομή τους να μεταβάλλεται με το χρόνο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ρυάκια, ρέματα, χείμαρροι και ποταμοί. Οι τεχνητοί ανοικτοί αγωγοί οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τεταμένη και ευθειογενή οριζοντιογραφική χάραξη σε μεγάλα μήκη και από την κανονικότητα της διατομής. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν διώρυγες ναυσιπλοΐας και άρδευσης, αποχέτευσης και στράγγισης και αγωγοί υπονόμων.

Η βασική οριακή συνθήκη είναι ότι πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια είναι ατμοσφαιρική. Σε αυτό τον τύπο ροής η οι δυνάμεις συνεκτικότητας και βαρύτητας έχουν καθοριστικό ρόλο γιατί από αυτές εξαρτάται κυρίως η κίνηση του ρευστού. Η εμφάνιση δευτερεύουσας ροής στο επίπεδο της διατομής δυσκολεύει την ανάλυση της ροής αγωγών με ελεύθερη επιφάνεια.

Σε αντίθεση με τη ροή υπό πίεση σε κλειστούς αγωγούς, η γεωμετρία της ροής εξαρτάται ουσιαστικά από την θέση της ελεύθερης επιφάνειας και δεν ορίζεται απόλυτα από τη γεωμετρία του αγωγού γεγονός που δημιουργεί δυσχέρεια στην ανάλυση προβλημάτων ροής σε ανοιχτούς αγωγούς καθώς προστίθεται άλλος ένας άγνωστος.

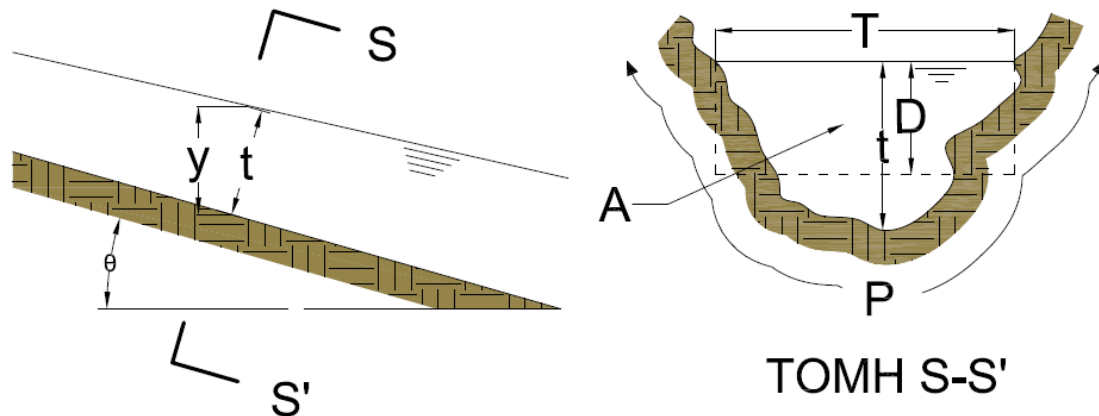
Το εύρος των προβλημάτων ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι μεγάλο και είναι απαραίτητη η συστηματική μελέτη και η περαιτέρω διερεύνηση φαινομένων που συναντώνται σε αυτές τις συνθήκες ώστε τόσο οι κατασκευές όσο και τα υδατορέματα να είναι βιώσιμα και ασφαλή.

Η διερχόμενη παροχή Q από μία διατομή αγωγού δίνεται από τη σχέση (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007)

$$Q = A \cdot V \quad (3.1)$$

όπου A το εμβαδό της υγρής διατομής και V η μέση ταχύτητα ροής νοούμενη κάθετα στη διατομή. Είναι προφανές ότι το εμβαδό A της διατομής εξαρτάται από τη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας.

3.1.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Ανοιχτών Αγωγών



Σχήμα 3.1 Βασικά γεωμετρικά μεγέθη ανοικτού αγωγού.

Διατομή ενός ανοικτού αγωγού ορίζεται ως η εγκάρσια τομή του στην κύρια διεύθυνση ροής, ενώ κατακόρυφη διατομή ονομάζουμε αυτή που προκύπτει από ένα κατακόρυφο επίπεδο, κάθετο οριζοντιογραφικά στον άξονα του αγωγού.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά γεωμετρικά μεγέθη της διατομής ενός ανοικτού αγωγού είναι (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007):

- (α) το εγκάρσιο βάθος ροής t από την ελεύθερη επιφάνεια ως το χαμηλότερο σημείο (πόδι) της διατομής,
- (β) το κατακόρυφο βάθος ροής y ,
- (γ) το εμβαδόν της υγρής διατομής A ως το εμβαδό της διατομής σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση της ροής,
- (δ) το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας T ,
- (ε) η βρεχόμενη περίμετρος P που είναι το πραγματικό μήκος του βρεχόμενου στερεού περιγράμματος της διατομής του αγωγού,
- (στ) η υδραυλική ακτίνα R ως το πηλίκο του εμβαδού προς τη βρεχόμενη περίμετρο της διατομής $R=A/P$ και
- (ζ) το υδραυλικό βάθος D της διατομής που ορίζεται ως το βάθος της ισοδύναμης ορθογωνικής διατομής πλάτους T οπότε $D=A/T$.

3.2 Κατηγορίες ροής σε ανοικτούς αγωγούς

Η ροή με ελεύθερη επιφάνεια κατηγοριοποιείται με κινηματικά και δυναμικά κριτήρια.

3.2.1 Χαρακτηρισμός ροής με βάση κινηματικά κριτήρια

Από κινηματική άποψη, η ροή χαρακτηρίζεται μόνιμη ή μη μόνιμη (ή χρονικά μεταβαλλόμενη) και ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη. Στη φύση οι ροές που παρουσιάζονται είναι μη μόνιμες με χωρική και χρονική μεταβλητότητα αλλά στις συνθήκες του εργαστηρίου η ροή μεταβάλλεται συνήθως μόνο χωρικά και όχι χρονικά, είναι λοιπόν μόνιμη και ανομοιόμορφη (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007).

Μόνιμη ονομάζεται η ροή όταν το βάθος t , η παροχή Q και η μέση ταχύτητα της ροής V δεν μεταβάλλονται με το χρόνο σε κάθε θέση κατά μήκος του αγωγού επομένως:

$$\frac{\partial t}{\partial t} = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

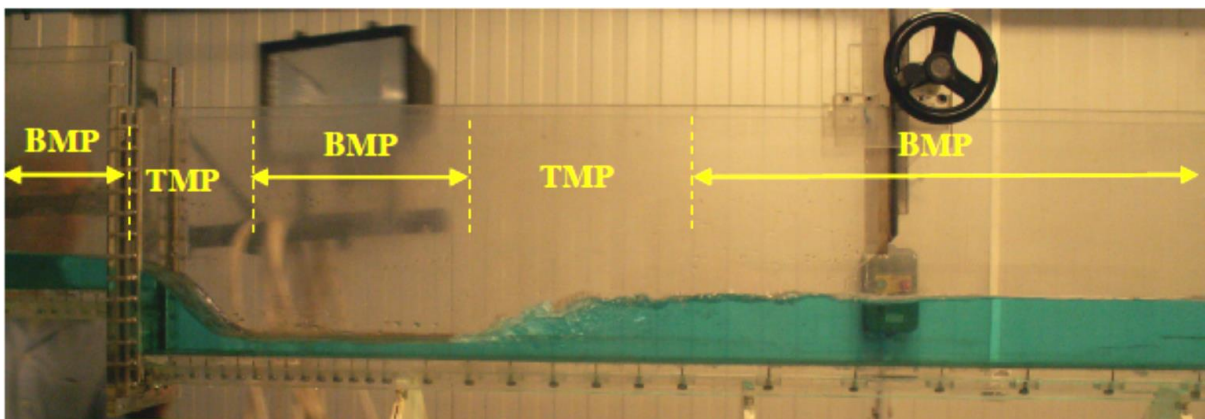
Σε κάθε άλλη περίπτωση η ροή ονομάζεται μη μόνιμη.

Ομοιόμορφη ονομάζεται η ροή όταν το βάθος t , η παροχή Q και η μέση ταχύτητα της ροής V δεν μεταβάλλονται κατά μήκος του αγωγού επομένως:

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (3.3)$$

Σε κάθε άλλη περίπτωση η ροή ονομάζεται ανομοιόμορφη.

Η ανομοιόμορφη ροή χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, την ταχέως μεταβαλλόμενη ροή (TMP) (rapidly varied flow, RVF) και τη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή (BMP) (gradually varied flow, GVF). Στην ταχέως μεταβαλλόμενη ροή το βάθος t μεταβάλλεται σημαντικά σε μικρό μήκος, ενώ οι γραμμές ροής παρουσιάζουν έντονη καμπύλωση. Τέτοιος τύπος ροής εμφανίζεται σε μικρά τμήματα κατά μήκος του αγωγού ή και σε περιοχές ασυνέχειας αυτού. Στη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή η ελεύθερη επιφάνεια παρουσιάζει μικρή καμπύλωση και οι γραμμές ροής είναι περίπου παράλληλες (Παπανικολάου, 2016).

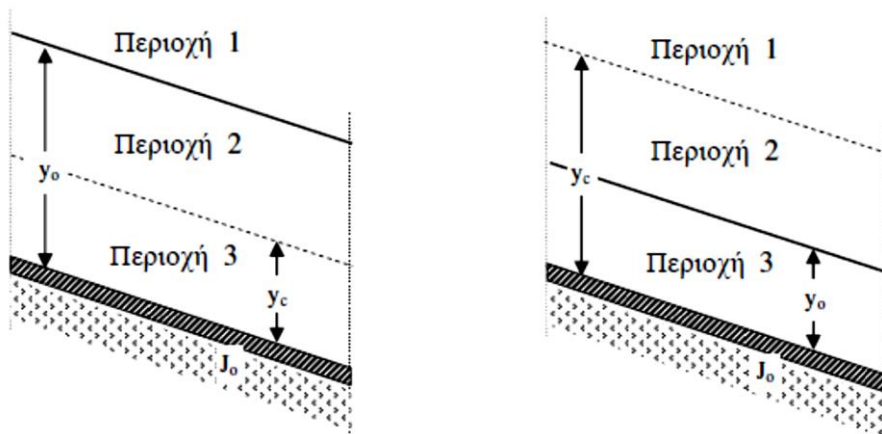


Σχήμα 3.1 Βαθμιαία και ταχέως μεταβαλλόμενη ροή σε ορθογωνική διώρυγα με βυθισμένο αναβαθμό και υδραυλικό άλμα (Πηγή: Παπανικολάου 2016).

Συνδυάζοντας τα παραπάνω, από κινηματική άποψη η ροή χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες:

- (α) Μόνιμη ομοιόμορφη ροή, όπου το βάθος είναι σταθερό στο χρόνο και καθ' όλο το μήκος του αγωγού.
- (β) Μόνιμη ανομοιόμορφη ροή, όπου οποία το βάθος ροής μεταβάλλεται χωρικά αλλά όχι και χρονικά. Είναι και το περισσότερο συνηθισμένο είδος ροής που παρουσιάζεται κυρίως στους πρισματικούς αγωγούς. Η ροή αυτή όπως προαναφέραμε έχει δύο υποκατηγορίες, τη βαθμιαία και την ταχέως μεταβαλλόμενη ροή.
- (γ) Μη μόνιμη ομοιόμορφη ροή, κατάσταση η οποία είναι πρακτικά αδύνατη, και
- (δ) Μη μόνιμη ανομοιόμορφη ροή είναι η ροή όπου το βάθος μεταβάλλεται στο χώρο και το χρόνο, ενώ αποτελείται από δύο υποκατηγορίες, τη βαθμιαία μεταβαλλόμενη και την ταχέως μεταβαλλόμενη μη μόνιμη ανομοιόμορφη ροή.

Η βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή είναι δυνατό να παρουσιαστεί μέσα από τις καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας. Για δεδομένη κλίση, παροχή και γεωμετρία της διατομής ενός ανοικτού αγωγού, είναι δυνατό να υπολογιστεί το κρίσιμο και το ομοιόμορφο βάθος ή κλίση και να επιλεγεί η κατάλληλη καμπύλη (Παπανικολάου, 2016).



Σχήμα 3.2 Περιοχές όπου μπορεί να βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια (Πηγή: Παπανικολάου 2016).

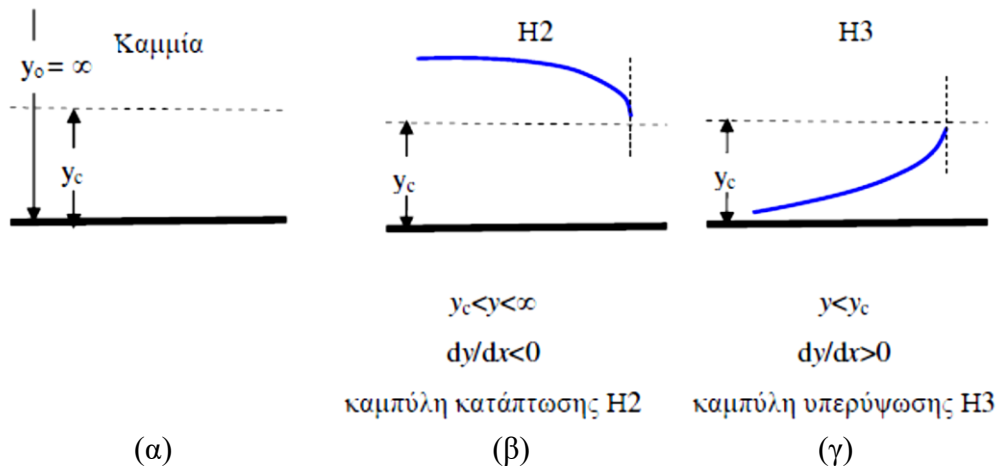
Στη συγκεκριμένη εργασία μας ενδιαφέρουν οι καμπύλες που αντιστοιχούν στις συνθήκες ροής που μελετήθηκαν. Δεδομένου ότι η διώρυγα που χρησιμοποιείται στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής έχει μηδενική κλίση πυθμένα, δηλαδή $J_0=0$, το ομοιόμορφο βάθος τείνει στο άπειρο, $y_0 \rightarrow \infty$ και δεν είναι δυνατό να υπολογιστεί. Στην περίπτωση αυτή δεν υπάρχει ο υποχώρος 1 και οι καμπύλες είναι τύπου H (horizontal).

Με βάση τη διαφορική εξίσωση της BMP και για κλίση πυθμένα ίση με J_0 λαμβάνουμε την εξίσωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περίπτωση αυτή:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{-J_E}{1 - \frac{Q^2 B}{g A^3}} = \frac{-J_E}{1 - Fr^2} \quad (3.4)$$

Διακρίνουμε τις εξής υποπεριπτώσεις (Παπανικολάου, 2016):

- (α) Εάν $J_0=J_E=0$, τότε $dy/dx=0$ δηλαδή y =σταθερό και δεν υπάρχει κίνηση (Σχήμα 3.3α).
- (β) Εάν $J_E \neq 0$ και $y > y_c$ (υποκρίσιμη ροή) τότε $Fr < 1$ και επομένως $dy/dx < 0$ δηλαδή η καμπύλη της ελεύθερης επιφάνειας είναι καμπύλη κατάπτωσης H2 (Σχήμα 3.3β).
- (γ) Εάν $J_E \neq 0$ και $y < y_c$ (υπερκρίσιμη ροή) τότε $Fr > 1$ και επομένως $dy/dx > 0$ δηλαδή η καμπύλη της ελεύθερης επιφάνειας είναι καμπύλη υπερύψωσης H3 (Σχήμα 3.3γ).



Σχήμα 3.3 Καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας τύπου H (Πηγή: Παπανικολάου 2016).

3.2.2 Χαρακτηρισμός ροής με βάση δυναμικά κριτήρια

Από δυναμική άποψη η ροή χωρίζεται σε κατηγορίες με βάση τη σχέση των δυνάμεων αδρανείας και βαρύτητας που την επηρεάζουν. Συγκεκριμένα, θεωρώντας μια χαρακτηριστική ταχύτητα V (π.χ. τη μέση ταχύτητα της διατομής) και ένα χαρακτηριστικό μήκος L του πεδίου ροής (π.χ. το βάθος ροής ή την υδραυλική ακτίνα), οι δυνάμεις που εμφανίζονται μπορούν να γραφτούν διαστατικά στον Πίνακα 3.1, όπου a είναι η επιτάχυνση του ρευστού, Δp κάποια διαφορά πιέσεων, M η μάζα, ρ η πυκνότητα του υγρού, A το εμβαδόν της διατομής και μ το (δυναμικό) ιξώδες του υγρού. Αδιαστατοποιώντας τις εξισώσεις Navier-Stokes σε ένα ανοικτό αγωγό με βάθη και διαστάσεις τέτοιες που η επιφανειακή τάση και άλλοι παράγοντες δεν επηρεάζουν τη ροή, προκύπτουν δύο αδιάστατα μονώνυμα (Παπανικολάου, 2016).

Πίνακας 3.1 Δυνάμεις που επηρεάζουν τη ροή (Παπανικολάου, 2016).

Δυνάμεις	Σχέση δυνάμεων	Διαστατική σχέση
Αδράνειας	$F_I = Ma$	$F_I \rightarrow \rho L^3 \frac{V^2}{L} = \rho L^2 V^2$
Βαρύτητας	$F_g = Mg$	$F_g \rightarrow \rho L^3 g$
Διαφοράς πιέσεων	$F_p = \Delta p A$	$F_g \rightarrow \Delta p L^2$
Ιξώδους	$F_\mu = \mu \frac{du}{dy} A$	$F_g \rightarrow \mu VL$

Το πρώτο μονώνυμο, με βάση τον παραπάνω πίνακα, είναι ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις τριβής (λόγω μη μηδενικού ιξώδους) και ονομάζεται αριθμός Reynolds, Re , της ροής και υπολογίζεται ως

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (3.5)$$

όπου V είναι η μέση ταχύτητα ροής, $\nu = \mu/\rho$ είναι το κινηματικό ιξώδες και L κάποιο χαρακτηριστικό μήκος (όπως π.χ. η υδραυλική ακτίνα της διατομής).

Εάν ο αριθμός Reynolds της ροής υπερβεί κάποια κρίσιμη τιμή Re_c , η ροή από στρωτή γίνεται τυρβώδης. Συγκεκριμένα εάν $Re < 500$ ($L=R=A/P$ η υδραυλική ακτίνα της διατομής), η ροή θεωρούμε ότι είναι στρωτή, εάν $Re > 4000$ (ο French, 1985, προτείνει 12500) είναι τυρβώδης και εάν $500 < Re < 4000$ (ή 12500) βρίσκεται σε μια μεταβατική κατάσταση. Στην πλειονότητα των εφαρμογών του πολιτικού μηχανικού η ροή είναι τυρβώδης.

Το δεύτερο αδιάστατο μονώνυμο που προκύπτει είναι ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας και ονομάζεται αριθμός Froude, Fr , της ροής

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (3.6)$$

όπου V είναι η μέση ταχύτητα ροής, ενώ το χαρακτηριστικό μήκος L είναι το υδραυλικό βάθος της διατομής $L=D=A/T$.

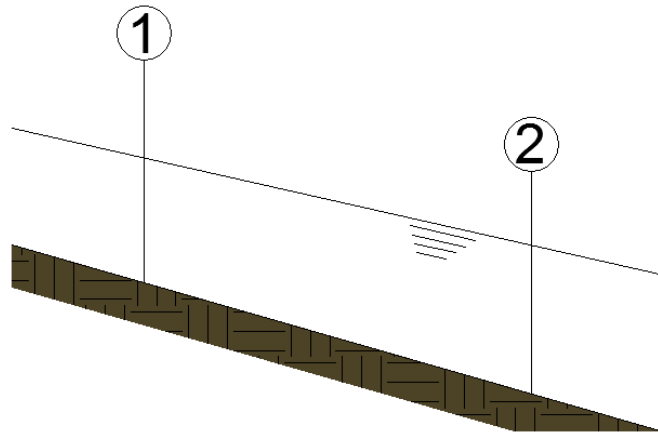
Εάν ο αριθμός Froude είναι μικρότερος της μονάδας, $Fr < 1$, η ροή ονομάζεται υποκρίσιμη και στην περίπτωση αυτή οποιαδήποτε μικροδιαταραχή στην ελεύθερη επιφάνεια μεταδίδεται και προς τα ανάντη. Αυτό συμβαίνει γιατί ένα κύμα με ταχύτητα $c = \sqrt{gy}$ κινείται ταχύτερα από την μέση ροή ($V < c$). Τέτοιο είδος ροής εμφανίζεται συχνά στα ποτάμια.

Εάν $Fr > 1$ η ροή ονομάζεται υπερκρίσιμη και χαρακτηρίζεται ως χειμαρρώδης. Πιθανές μικροδιαταραχές της ροής παρασύρονται προς τα κατόντη γιατί ένα κύμα με ταχύτητα $c = \sqrt{gy}$ κινείται βραδύτερα από τη μέση ροή ($V > c$).

Τέλος, εάν $Fr=1$ η ροή ονομάζεται κρίσιμη και οι δυνάμεις αδράνειας είναι ισοδύναμες με τις δυνάμεις βαρύτητας (Παπανικολάου, 2016).

3.3 Εξισώσεις μόνιμης ροής

Η ροή σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια είναι κατά κανόνα τρισδιάστατη με μια κύρια συνιστώσα τη διεύθυνση του αγωγού. Η ανάλυση γίνεται προσεγγιστικά σε μια διάσταση, επιλέγοντας κάποιο διαφορικό ή πεπερασμένο όγκο αναφοράς και εφαρμόζοντας τους νόμους της ρευστομηχανικής. Ο όγκος αναφοράς που επιλέγεται ορίζεται από δύο διατομές, (1) ανάντη και (2) κατόντη σε περιοχές παράλληλης ή περίπου παράλληλης ροής, από την εσωτερική βρεχόμενη επιφάνεια του αγωγού μεταξύ των διατομών και από την ελεύθερη επιφάνεια μεταξύ των δύο διατομών (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007).



Σχήμα 3.4 Όγκος αναφοράς για την επίλυση μονοδιάστατων εξισώσεων σε ανοικτό αγωγό.

3.3.1 Εξίσωση Συνέχειας

Εξετάζοντας τον όγκο ελέγχου μήκους Δx ενός ανοικτού αγωγού, θεωρούμε ότι η παροχή στη διατομή είναι Q , το βάθος ροής h σε κάθε χρονική στιγμή t , το εμβαδό της διατομής A και το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας T . Η τελική εισροή στον όγκο ελέγχου σε χρόνο Δt γράφεται (Παπαϊωάννου, 2002)

$$\left[\left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) - \left(Q - \frac{\partial Q}{\partial x} \frac{\Delta x}{2} \right) \right] \Delta t = - \frac{\partial Q}{\partial x} \Delta x \Delta t \quad (3.7)$$

Η αύξηση του όγκου σε χρόνο Δt είναι

$$\frac{\partial}{\partial t} (A \Delta x) \Delta t \quad (3.8)$$

Εξισώνοντας τις παραπάνω εξισώσεις και διαιρώντας με $\Delta x \Delta t$ παίρνουμε την εξίσωση συνέχειας

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.9)$$

Εκφράζοντας την παροχή σαν γινόμενο της μέσης ταχύτητας V και του εμβαδού της διατομής A (υπό την προϋπόθεση ομογενούς υγρού σταθερής πυκνότητας), η εξίσωση (3.9) γίνεται

$$\frac{\partial}{\partial x} (VA) + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.10)$$

Αν η ροή είναι μόνιμη τότε από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει

$$\frac{\partial}{\partial x}(VA) = 0 \quad (3.11)$$

$$\int_A \vec{V} d\vec{A} = 0 \quad (3.12)$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (3.13)$$

Εφόσον δεν υπάρχει άλλη εισροή ή εκροή από τον όγκο αναφοράς, η παροχή Q είναι σταθερή σε όλο το μήκος του.

3.3.2 Εξίσωση Ορμής

Από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα μπορούμε να εξάγουμε την εξίσωση ορμής που δηλώνει ότι το άθροισμα των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται σε ένα όγκο ελέγχου του ρευστού είναι και σε μία δεδομένη διεύθυνση είναι ίσο με τη μεταβολή της παροχής ορμής στη διεύθυνση αυτή. Εφαρμόζοντας στον όγκο αναφοράς U που έχει επιλεγεί (Νουτσόπουλος κ.α., 2007)

$$\sum \vec{F} = (\vec{F}_p + \vec{F}_\tau)_A + (\vec{F}_g)_U = - \int_A \rho \vec{V} (\vec{V} d\vec{A}) = (\beta \rho Q V)_{A_2} - (\beta \rho Q V)_{A_1} \quad (3.14)$$

Όπου \vec{V} το διάνυσμα της ταχύτητας θεωρούμενο κάθετο στη διατομή με μέτρο την τιμή της μέσης ταχύτητας της ροής και οι δυνάμεις ορίζονται ως

$(\vec{F}_p)_A$ η συνολική δύναμη που οφείλεται σε πιέσεις και ασκείται στην επιφάνεια του υγρού που καταλαμβάνει τον όγκο αναφοράς και η οποία των ορίζει

$(\vec{F}_\tau)_A$ η ολική δύναμη που οφείλεται σε διατμητικές τάσεις και ασκείται στην επιφάνεια του υγρού που καταλαμβάνει τον όγκο αναφοράς και η οποία των ορίζει

$(\vec{F}_g)_U$ το βάρος του υγρού που καταλαμβάνει τον όγκο αναφοράς U .

Ο συντελεστής συνόρθωσης της ορμής, β εξαρτάται από την κατανομή των ταχυτήτων στη διατομή και υπολογίζεται ως

$$\beta = \frac{\int_A u^2 dA}{V^2 A} = \frac{\int_A u^2 dA}{V Q} \quad (3.15)$$

Για απλές γεωμετρικές διατομές και τυρβώδη ροή, ο συντελεστής β είναι κατά προσέγγιση ίσος με τη μονάδα, ενώ για σύνθετες διατομές πρέπει να εκτιμηθεί από την πραγματική κατανομή των ταχυτήτων και είναι μεγαλύτερος της μονάδας.

3.3.3 Εξίσωση Ενέργειας

Η εξίσωση ενέργειας μεταξύ δύο εγκάρσιων στον πυθμένα διατομών γράφεται ως εξής (Παπανικολάου, 2016)

$$H_1 = H_2 + \Delta H_{(1-2)} \quad (3.16)$$

Όπου $\Delta H_{(1-2)}$ είναι οι απώλειες ενέργειας ανάμεσα στις δύο διατομές.

Το ύψος ενέργειας ορίζεται ως

$$H = \frac{p}{\rho g} + z + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3.17)$$

Για ανοικτό αγωγό με μικρή σχετικά κλίση πυθμένα η εξίσωση (3.17) γράφεται σαν το άθροισμα τριών μηκών (ενέργειας ανά μονάδα βάρους του ρεόντος ρευστού):

- (α) τη δυναμική (λόγω θέσης) ενέργεια, δηλαδή το υψόμετρο του πυθμένα της διατομής z ,
- (β) το έργο πίεσης που είναι το βάθος ροής y (ή t)
- (γ) το ύψος της κινητικής ενέργειας $\alpha V^2/2g$

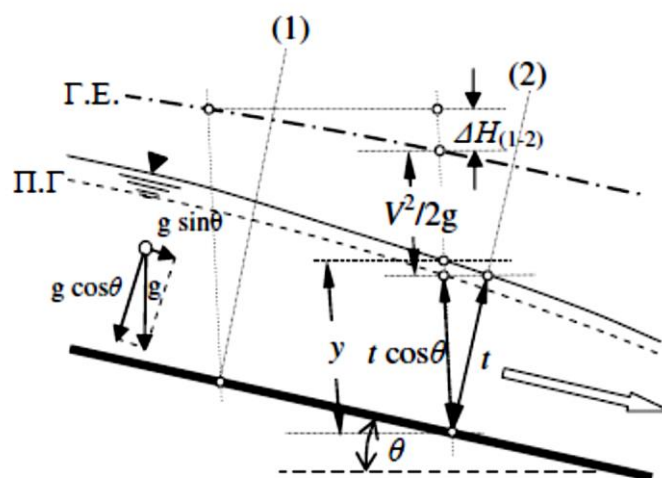
$$H = z + y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3.18)$$

όπου H είναι το ύψος ενέργειας, z το υψόμετρο πυθμένα από το επίπεδο αναφοράς, y το κατακόρυφο βάθος ροής, V η μέση ταχύτητα του νερού στη διατομή, α ο διορθωτικός συντελεστής λόγω ανομοιομορφίας της κατανομής ταχύτητας και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο συντελεστής συνόρθωσης της κινητικής ενέργειας, α εξαρτάται από την κατανομή των ταχυτήτων στη διατομή και υπολογίζεται ως

$$\alpha = \frac{\int_A u^3 dA}{V^3 A} = \frac{\int_A u^3 dA}{V^2 Q} \quad (3.19)$$

Για απλές γεωμετρικές διατομές και τυρβώδη ροή, ο συντελεστής α είναι κατά προσέγγιση ίσος με τη μονάδα, ενώ για σύνθετες διατομές πρέπει να εκτιμηθεί από την πραγματική κατανομή των ταχυτήτων και είναι μεγαλύτερος της μονάδας.



Σχήμα 3.5 Εξίσωση ενέργειας σε ανοικτό αγωγό (Πηγή: Παπανικολάου 2016).

3.3.4 Ειδική ενέργεια και ειδική δύναμη

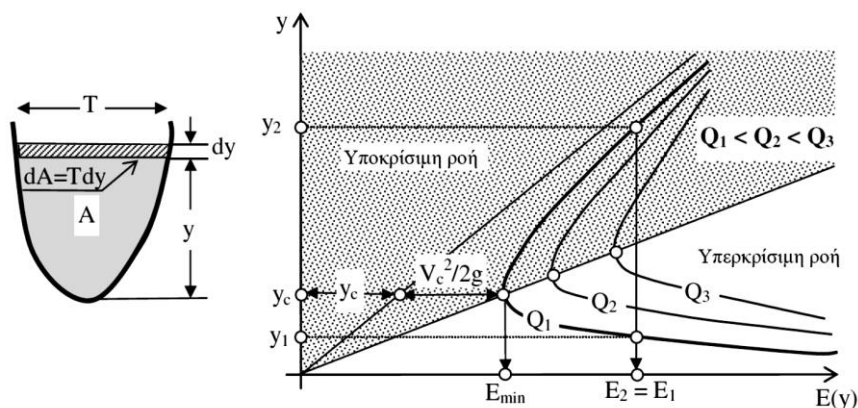
Ορίζουμε σαν ειδική ενέργεια E μιας διατομής, το ύψος της ενέργειας στη διατομή πάνω από το υψόμετρο του πυθμένα z , δηλαδή το άθροισμα των έργου πίεσης και κινητικής ενέργειας (Παπανικολάου, 2016)

$$E = y + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (3.20)$$

Η εξίσωση της ειδικής ενέργειας $E(y)$ σαν συνάρτηση του βάθους ροής για σταθερή δεδομένη παροχή Q και πρισματικό ανοικτό αγωγό με δεδομένη διατομή δίδεται από τη σχέση

$$E = E(y) = y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2(y)} = y + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2(y)} \quad (3.21)$$

Κατασκευάζοντας το διάγραμμα $(y-E)$ για τη συγκεκριμένη παροχή Q μεταβάλλοντας το βάθος ροής y , δημιουργείται το διάγραμμα ειδικής ενέργειας (Σχήμα 3.6). Παρατηρούμε ότι για $y \rightarrow 0$ τότε $A(y) \rightarrow 0$ και επομένως $E \rightarrow \infty$, ενώ για $y \rightarrow \infty$, τότε $E \rightarrow y$.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ειδικής ενέργειας (Πηγή: Παπανικολάου 2016).

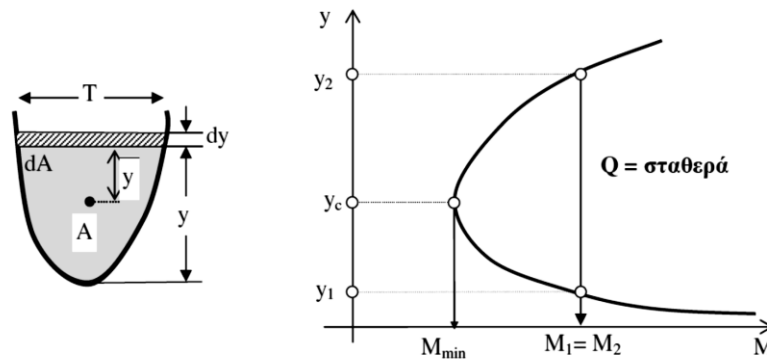
Η ειδική ενέργεια γίνεται ελάχιστη E_{min} για την τιμή του κρίσιμου βάθους ροής y_c . Για κάθε παροχή Q και $E > E_{min}$ υπάρχουν δύο πιθανά βάθη ροής τα y_1 και y_2 που ονομάζονται εναλλακτά. Όταν $y > y_c$ (βάθος y_2) η ροή είναι υποκρίσιμη, ενώ όταν $y < y_c$ (βάθος y_1) η ροή είναι υπερκρίσιμη.

Ορίζουμε σαν ειδική δύναμη M την ποσότητα (ορμή ανά μονάδα βάρους του ρευστού)

$$M = \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A \quad (3.22)$$

όπου \bar{y} η απόσταση του κέντρου βάρους της διατομής από την ελεύθερη επιφάνεια.

Για δεδομένη παροχή Q , μεταβάλλοντας το βάθος ροής y η ειδική δύναμη $M(y)$ παίρνει τη μορφή του παρακάτω σχήματος.



Σχήμα 3.7 Διάγραμμα ειδικής δύναμης (Πηγή: Παπανικολάου 2016).

Η ειδική δύναμη έχει μια ελάχιστη τιμή M_{min} , για βάθος ροής ίσο με το κρίσιμο βάθος, κάτω από την οποία η ροή δεν είναι πραγματοποιήσιμη. Όταν $M > M_{min}$ για τη δεδομένη παροχή Q , υπάρχουν δύο βάθη ροής y_1 και y_2 , για τα οποία $y_1 > y_2$ αλλά $M_1 = M_2$. Τα βάθη αυτά ονομάζονται συζυγή.

3.4 Δύναμη αντίστασης σε σώμα μέσα σε κινούμενο ρευστό

3.4.1 Δυνάμεις μέσα σε κινούμενο ρευστό

Σώματα που βρίσκονται σε σχετική κίνηση ως προς ρευστό δέχονται δυνάμεις οφειλόμενες σε ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται στην επιφάνειά τους. Αν θεωρήσουμε τυχόν στερεό σώμα βυθισμένο σε ρευστό που κινείται με ομοιόμορφη ταχύτητα V_0 ως προς το στερεό, σε κάθε στοιχειώδη επιφάνεια του στερεού dA ασκείται δύναμη dF που αποτελείται από κάθετη συνιστώσα λόγω πίεσης $p dA$ και εφαπτόμενη διατμητική δύναμη τdA . Η συνολική δύναμη F στο στερεό σώμα μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες όπου η μία είναι παράλληλη στη V_0 , F_D και η άλλη είναι κάθετη F_L . Οι δύο αυτές συνιστώσες προκύπτουν με ολοκλήρωση των επιμέρους δυνάμεων ως εξής (Νουτσόπουλος κ.ά, 2007):

$$F_D = \int_A p \cos \varphi dA + \int_A \tau \sin \varphi dA = F_{D,p} + F_{D,\tau} \quad (3.23)$$

$$F_L = \int_A p \sin \varphi dA - \int_A \tau \cos \varphi dA = F_{L,p} + F_{L,\tau} \quad (3.24)$$

όπου φ η προσημασμένη γωνία μεταξύ άξονα παράλληλου στη V_0 και του ανύσματος dA (κάθετου στην επιφάνεια με φορά προς τα μέσα).

Η δύναμη F_D , η παράλληλη προς τη διεύθυνση της ταχύτητας V_0 , λέγεται δύναμη αντίστασης ενώ η δύναμη F_L , η κάθετη προς τη διεύθυνση της ταχύτητας V_0 λέγεται υδροδυναμική άνωση. Και οι δύο αυτές δυνάμεις μπορούν να αναλυθούν σε όρους που εκφράζουν τη συμβολή των πιέσεων και των διατμητικών τάσεων, όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις.

3.4.2 Δύναμη αντίστασης

Η μεγάλη πρακτική σημασία του υπολογισμού των δυνάμεων αντίστασης είναι προφανής. Εν (τούτοις, η εύρεση των κατανομών πιέσεων και διατμητικών τάσεων σε βυθισμένο σώμα τυχόντος σχήματος, λαμβανομένου μάλιστα υπόψιν του φαινομένου της αποκόλλησης της ροής είναι πρακτικά δυσχερέστατη. Έτσι ο προσδιορισμός της αντίστασης σωμάτων αποτελεί συνήθως αντικείμενο πειραματικής έρευνας. Η ολική αντίσταση εκφράζεται από τη σχέση (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007)

$$F_D = C_D \rho \frac{V_0^2}{2} A \quad (3.25)$$

όπου ρ η πυκνότητα του ρέοντος ρευστού, C_D ο συντελεστής αντίστασης προσδιοριζόμενος πειραματικά για κάθε μορφή σώματος, και A το εμβαδό της προβολής του σώματος σε επίπεδο κάθετο στην ταχύτητα V_0 .

Με ανάλογο τρόπο μπορούν να εκφραστούν οι δύο επιμέρους συνιστώσες της F_D που προέρχονται από τις πιέσεις και τις διατμητικές τάσεις και λέγονται αντίστοιχα αντίσταση σχήματος και αντίσταση τριβών.

$$F_{D,p} = C_{D,p} \rho \frac{V_0^2}{2} A \quad (3.26)$$

$$F_{D,\tau} = C_{D,f} \rho \frac{V_0^2}{2} A \quad (3.27)$$

όπου $C_{D,p}$ και $C_{D,f}$ οι συντελεστής αντίστασης σχήματος και συντελεστής αντίστασης τριβών αντίστοιχα.

Ως επιφάνεια αναφοράς για την αντίσταση σχήματος χρησιμοποιείται και πάλι η προβολή σε επίπεδο κάθετο στη V_0 ενώ για την αντίσταση τριβών συνήθως χρησιμοποιείται το εμβαδό της προβολής σε επίπεδο παράλληλο στη V_0 ή ενίοτε το εμβαδό της επιφάνειας ολόκληρου του σώματος.

Η αντίσταση σχήματος είναι συνέπεια της διαφοράς πιέσεων μεταξύ του εμπρός και του πίσω μέρους του σώματος που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο φαινόμενο της αποκόλλησης. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιοχή των υποπιέσεων, τόσο μεγαλύτερη αναμένεται να είναι η δύναμη αντίστασης σχήματος. Η μείωση του $C_{D,p}$ επιτυγχάνεται με κατάλληλη διαμόρφωση κυρίως του πίσω μέρους του σώματος ώστε να περιοριστεί η ζώνη αποκόλλησης. Η τιμή του $C_{D,p}$ ελαχιστοποιείται στα λεγόμενα αεροδυναμικά σχήματα όπου η ζώνη αποκόλλησης έχει το ελάχιστο δυνατό εύρος. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η αντίσταση λόγω σχήματος δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το σχήμα του σώματος καθαυτό αλλά και από τον προσανατολισμό που έχει το σχήμα ως προς τη ροή (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007).

Η αντίσταση τριβών εξαρτάται από την έκταση της επιφάνειας του σώματος όπου ασκούνται οι διατμητικές τάσεις καθώς επίσης και από τον προσανατολισμό ως προς τη ροή. Το μέγεθος του συντελεστή $C_{D,f}$ εξαρτάται επίσης από την τραχύτητα της επιφάνειας του σώματος καθώς και από τον αριθμό Reynolds. Ο συντελεστής αντίστασης τριβών είναι γενικά σημαντικός για πολύ μικρούς αριθμούς Reynolds όπου κυριαρχεί η επίδραση της συνεκτικότητας ενώ για μεγάλους αριθμούς Reynolds βασικός παράγοντας της ολικής αντίστασης είναι η αντίσταση σχήματος (Νουτσόπουλος κ.ά., 2007).

Στην περίπτωση ενός αεροδυναμικά σχεδιασμένου σώματος (είτε αυτό είναι πτερύγιο αεροπλάνου, ή άτρακτος ενός υποβρυχίου), η αντίσταση τριβής έχει καθοριστική σημασία στην συνολική αντίσταση. Όταν, όμως, η αντίσταση λόγω της δημιουργίας «απόνερων» (wake resistance) γίνεται σημαντική, τότε ο μελετητής ενδιαφέρεται για τη συνολική δύναμη αντίστασης, όπως γίνεται και στην περίπτωση των βάθρων γέφυρας σε ποτάμι.

3.4.3 Δύναμη αντίστασης σε βάθρο

Για ροή με ελεύθερη επιφάνεια, η αντίσταση αποτελείται από τρεις συνιστώσες (Charbeneau & Holley, 2001):

- (α) Επιφανειακή αντίσταση, η οποία οφείλεται στις διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια του βάθρου
- (β) Αντίσταση σχήματος, η οποία οφείλεται στην διαφορά μεταξύ της υψηλότερης πίεσης στα ανάντη του βάθρου όπου το βάθος ροής είναι υψηλότερο και της χαμηλότερης πίεσης στα κατόντη του βάθρου στη ζώνη αποκόλλησης
- (γ) Αντίσταση κύματος, η οποία απαιτείται για το σχηματισμό στάσιμων επιφανειακών κυμάτων γύρω από ένα βάθρο.

Επομένως, η δύναμη αντίστασης στα βάθρα γεφυρών μπορεί να εκφραστεί ως

$$F_D = C_D \rho \frac{V^2}{2} A_p \quad (3.28)$$

Όπου C_D ο συντελεστής αντίστασης σώματος το οποίο δεν είναι πλήρως βυθισμένο στο ρευστό, ρ η πυκνότητα του ρευστού, A_p το εμβαδό της προβολής του βυθισμένου τμήματος ενός βάθρου σε επίπεδο κάθετο στην κύρια διεύθυνση της ροής και V η μέση ταχύτητα ροής του ρευστού.

Η εξάρτηση του συντελεστή αντίστασης ενός βάθρου σε ορθογωνικό κανάλι σε μορφή συνάρτησης μπορεί να γραφεί ως (Charbeneau & Holley, 2001)

$$C_D = f \left(\text{σχήμα βάθρου}, Re_p, \frac{k_p}{B_p}, I_t, Fr, \frac{B_p}{B}, \frac{B_p}{y} \right) \quad (3.29)$$

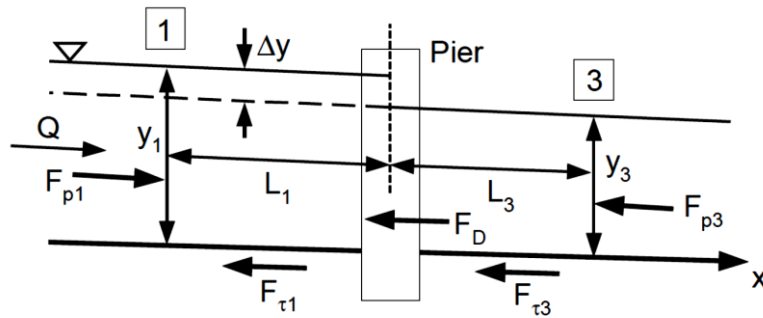
Όπου Re_p είναι ο αριθμός Reynolds της ροής στο βάθρο που δίνεται από τη σχέση

$$Re_p = \frac{B_p V}{\nu} \quad (3.30)$$

Όπου B_p το πλάτος του βάθρου κάθετα στην κύρια διεύθυνση της ροής, ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρέοντος ρευστού, k_p είναι η τραχύτητα της επιφάνειας του βάθρου, I_t είναι η ένταση της τύρβης στην προσπίπτουσα ροή και Fr ο αριθμός Froude.

Στην εξίσωση για τον συντελεστή σχήματος, οι όροι $\left\{ \text{σχήμα βάθρου}, \frac{k_p}{B_p}, \frac{B_p}{B}, \frac{B_p}{y} \right\}$ είναι βασικά γεωμετρικές παράμετροι. Ο όρος B_p/B είναι ενδεικτικός της στένωσης που δημιουργείται από την παρουσία του βάθρου και είναι ίδιος με τον συντελεστή α των εξισώσεων παραπάνω. Ο B_p/y είναι ένας λόγος πλευρών και κατά πάσα πιθανότητα δεν είναι πολύ σημαντικός για βάθρα αφού δεν υπάρχει ροή πάνω ή κάτω από το βάθρο. Ο Re_p παριστά την επιρροή τις συνεκτικότητας και είναι σημαντικός κυρίως για βάθρα με καμπύλη διατομή (Charbeneau & Holley, 2001).

Μια θεωρητική προσέγγιση βασισμένη στην εξίσωση ορμής μπορεί να ποσοτικοποιήσει τη συσχέτιση της υπερύψωσης Δy με την δύναμη αντίστασης στο βάθρο. Για να είναι η ανάλυση διαχειρίσιμη, οι συνθήκες ροής εξιδανικεύονται όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 3.8, όπου όλες οι δυνάμεις είναι σχεδιασμένες με τη φορά που επιδρούν στη ροή. Συγκεκριμένα, η δύναμη αντίστασης είναι ίση και αντίθετη από τη δύναμη στο βάθρο (Charbeneau & Holley, 2001).



Σχήμα 3.8 Δυνάμεις σε βάθρο για εξιδανικευμένες συνθήκες (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).

Στην ανάλυση που ακολουθεί θεωρείται ότι η κατανομή των ταχυτήτων είναι σχετικά ομοιόμορφη σε κάθε διατομή και η κλίση του καναλιού είναι αρκούντως μικρή ούτως ώστε η διαφορά μεταξύ της διεύθυνσης της ροής και του οριζόντιου άξονα καθώς και η διαφορά της κατακόρυφης στάθμης του νερού με τη στάθμη μετρημένη κάθετα στη διατομή, να είναι αμελητέες (Charbeneau & Holley, 2001).

Η μονοδιάστατη έκφραση της εξίσωσης της ορμής για τον όγκο ελέγχου μεταξύ των θέσεων 1 και 3 (Σχήμα 3.8) δίνει

$$F_p|_1 - F_p|_3 - F_\tau|_1 - F_\tau|_3 + W_x|_1 + W_x|_3 - F_D = \rho Q(\beta V_3 - \beta V_1) \quad (3.31)$$

Όπου F_p οι δυνάμεις λόγω πίεσης, F_τ οι δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων στα όρια της ροής και W_x οι συνιστώσες κατά την κύρια διεύθυνση της ροής των βαρυτικών δυνάμεων (οι οποίες δεν απεικονίζονται στο σχήμα).

Οι δυνάμεις λόγω πίεσης για οποιαδήποτε γεωμετρίας διατομή είναι $\bar{p}A$ όπου \bar{p} είναι η πίεση στο κέντρο βάρους της βρεχόμενης διατομής εμβαδού A . Για ορθογωνικό κανάλι πλάτους B , η δύναμη λόγω πίεσης γράφεται

$$F_p = F_p|_1 - F_p|_3 = \bar{p}A|_1 - \bar{p}A|_3 = \gamma B \left(\frac{y_1^2}{2} - \frac{y_3^2}{2} \right) = \gamma B y_3^2 \left(\frac{\Delta y}{y_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta y}{y_3} \right)^2 \right) \quad (3.32)$$

Όπου $\bar{p} = \gamma y/2$ λόγω υδροστατικής κατανομής των πιέσεων και γ το ειδικό βάρος του ρευστού.

Η διατμητική τάση στο όριο για οποιαδήποτε διατομή δίνεται από το σχέση

$$\tau_0 = \frac{f}{8} \rho V^2 \quad (3.33)$$

Όπου f ο συντελεστής τριβών των Darcy Weisbach. Η σχέση μεταξύ του f και του συντελεστή n του Manning είναι

$$f = \frac{8g}{R_H^{1/3}} \left(\frac{n}{\varphi}\right)^2 \quad (3.34)$$

Όπου $\varphi=1$ για μονάδες στο SI, R_H η υδραυλική ακτίνα και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η συνολική διατμητική δύναμη, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (3.33) προκύπτει (Charbeneau & Holley, 2001)

$$\begin{aligned} F_\tau &= F_\tau|_1 + F_\tau|_3 = \tau_0 PL|_1 + \tau_0 PL|_3 \\ &= \frac{f}{8} \rho [V^2 (B + 2y)L] \Big|_1 + \frac{f}{8} \rho [V^2 (B + 2y)L] \Big|_3 \\ F_\tau &= \frac{f}{8} \rho V_3^2 BL \Phi_\tau \end{aligned} \quad (3.35)$$

Όπου ο όρος Φ_τ δίνεται από τη σχέση

$$\Phi_\tau = \left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta y}{y_3}} \right)^2 \left[1 + 2 \frac{y_3}{B} \left(1 + \frac{\Delta y}{y_3} \right) \right] \frac{L_1}{L} + \left[1 + 2 \frac{y_3}{B} \right] \frac{L_3}{L} \quad (3.36)$$

Όπου $L=L_1+L_3$ και η βρεχόμενη περίμετρος είναι $P= B+2y$.

Θεωρώντας ότι η διατομή A είναι σταθερή σε κάθε επιμέρους L_i τότε η συνιστώσα κατά την κύρια διεύθυνση της ροής των βαρυτικών δυνάμεων είναι (Charbeneau & Holley, 2001)

$$W_x = W_x|_1 + W_x|_3 = \gamma ALJ_0|_1 + \gamma ALJ_0|_3 = \gamma y_3 B J_0 \left[\left(1 + \frac{\Delta y}{y_3} \right) L_1 + L_3 \right] \quad (3.37)$$

Όπου J_0 η κλίση του καναλιού που ικανοποιεί τους περιορισμούς που θέσαμε από την αρχή.

Οι όροι ορμής του β' μέλους δίνουν

$$\rho Q (\beta V_3 - \beta V_1) = \rho V_3^2 y_3 B \left(\frac{\frac{\Delta y}{y_3}}{1 + \frac{\Delta y}{y_3}} \right) \quad (3.38)$$

Συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω εξισώσεις και εφαρμόζοντας σε πολλά σημεία τις εξισώσεις $Q=VB_y$ και $y_1=y_3+\Delta y$ προκύπτει (Charbeneau & Holley, 2001)

$$F_D = \gamma B y_3^2 \left(\frac{\Delta y}{y_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta y}{y_3} \right)^2 \right) - \frac{f}{8} \rho V_3^2 B L \Phi_\tau + \gamma y_3 B J_0 \left[\left(1 + \frac{\Delta y}{y_3} \right) L_1 + L_3 \right] - \rho V_3^2 y_3 B \left(\frac{\frac{\Delta y}{y_3}}{1 + \frac{\Delta y}{y_3}} \right) \quad (3.39)$$

Και ενώνοντας τις εξισώσεις (3.28) και (3.39), η σχέση μεταξύ της υπερύψωσης και του συντελεστή αντίστασης είναι

$$C_D = \frac{1}{a Fr_3^2} \left(2 \frac{\Delta y}{y_3} + \left(\frac{\Delta y}{y_3} \right)^2 \right) - \frac{f}{16} \frac{L}{y_3} \frac{\Phi_\tau}{a} + \frac{2}{a Fr_3^2} \frac{L}{y_3} J_0 \left[\left(1 + \frac{\Delta y}{y_3} \right) \frac{L_1}{L} + \frac{L_3}{L} \right] - \frac{2}{a} \left(\frac{\frac{\Delta y}{y_3}}{1 + \frac{\Delta y}{y_3}} \right) \quad (3.40)$$

Επομένως, πέρα από τις κλασικές μεθόδους ολοκλήρωσης της ταχύτητας σε μια διατομή, έχουμε και μια έκφραση που δίνει το συντελεστή αντίστασης εφόσον είναι γνωστή η υπερύψωση.

Για οριζόντιο κανάλι ($J_0=0$) και με μικρή απόσταση μεταξύ των διατομών 1, 3 ώστε να αμελούνται οι τριβές, ο συντελεστής σχήματος δίνεται από τη σχέση (Charbeneau & Holley, 2001)

$$C_D = \frac{1}{a Fr_3^2} \left(2 \frac{\Delta y}{y_3} + \left(\frac{\Delta y}{y_3} \right)^2 \right) - \frac{2}{a} \left(\frac{\frac{\Delta y}{y_3}}{1 + \frac{\Delta y}{y_3}} \right) \quad (3.41)$$

4. Πειραματική διαδικασία

4.1 Εισαγωγή

Ο κύριος σκοπός αυτής της πειραματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της ροής γύρω από μεσόβαθρο και συγκεκριμένα της επιρροής του σχήματος του βάθρου στα χαρακτηριστικά αυτού του είδους της ροής. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της ροής, η μεταβολή της σε σχέση με τα αδιατάρακτα βάθη ροής και το πεδίο ταχυτήτων ανάντη και κατάντη του βάθρου. Σε ό,τι αφορά τις γεωμετρικές ιδιότητες των εμποδίων, επιλέγονται πέντε διαφορετικές διατομές που περιλαμβάνουν κυλινδρικό, τετραγωνικό, ρομβοειδές και ορθγωνικό σχήμα. Οι συνθήκες ροής που μελετώνται αφορούν πέντε διαφορετικές παροχές που καθορίζονται με τη χρήση αντλίας και παροχόμετρου και τέσσερις διαφορετικές θέσεις-ύψη υπερχειλιστή λεπτής στέψης στο κατάντη άκρο της διώρυγας ώστε να επιτυγχάνονται τιμές αριθμού Froude μέσα στο επιθυμητό εύρος (υποκρίσιμη ροή στα κατάντη του βάθρου).

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής (Αίθουσα «Γεώργιος Νουτσόπουλος») του Ε.Μ.Π. στο κτήριο Υδραυλικής στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, υπό την εποπτεία της σχολής Πολιτικών Μηχανικών.

Στα παρακάτω εδάφια περιγράφονται οι διατάξεις του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του πειράματος και τη λήψη των μετρήσεων.

4.1.1 Διώρυγα για την προσομοίωση ροής με ελεύθερη επιφάνεια

Η διώρυγα που χρησιμοποιήθηκε έχει μήκος 11.00 m και σταθερή κατά μήκος ορθγωνική διατομή πλάτους 0.255 m και ύψους 0,50 m. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και γυαλί και στηρίζεται ως συνεχής δοκός σε ύψος 1.30 m από το δάπεδο. Ο πυθμένας είναι μεταλλικός ενώ τα πλευρικά τοιχώματα είναι από γυαλί χωνευτό σε χαλύβδινες εσοχές, έτσι ώστε μήκος 10 cm από χάλυβα να διαδέχεται μήκος 1.30 m γυαλιού εναλλάξ. Ο πυθμένας είναι οριζόντιος και τα πλευρικά τοιχώματα κάθετα στο επίπεδο του πυθμένα.



Σχήμα 4.1 Πανοραμική άποψη της διώρυγας

Στο ανάντη άκρο της διώρυγας, αμέσως μετά την είσοδο του νερού, είναι τοποθετημένη ειδική ξύλινη διάταξη (Σχήμα 4.2) με σκοπό τη μείωση των αναταράξεων και των κυματισμών στη ροή εξαιτίας της τροφοδοσία της διώρυγας με νερό.



(α)

(β)



(γ)

Σχήμα 4.2 (α) Ανάντη άκρο διώρυγας με διάταξη για τη μείωση των αναταράξεων (β) Λεπτομέρεια διάταξης (γ) Λεπτομέρεια διάταξης

Στο κατόντη άκρο είναι τοποθετημένος ένας υπερχειλιστής λεπτής στέψης (Σχήμα 4.3) από plexiglass για τον έλεγχο του βάθους και των συνθηκών ροής κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Η αρχική του θέση είναι σε υψόμετρο 0 cm και υπάρχει η δυνατότητα αύξησης του ύψους του μέσω μιας χειρολαβής ώστε να επιτυγχάνεται ο επιθυμητός έλεγχος στη ροή. Στα πειράματα που έγιναν για τη συγκεκριμένη εργασία, επιλέχθηκε ύψος υπερχειλιστή ίσο με 0, 3, 6 και 9 cm.

4. Πειραματική διαδικασία

Η εκροή του καναλιού καταλήγει σε μια δεξαμενή συλλογής του νερού (Σχήμα 4.3), διαστάσεων 2.00x1.00x1.50 m. Το κανάλι αυτό έχει σχεδιαστεί ώστε να πραγματοποιείται ανακυκλοφορία του νερού μέσω της αντλίας και του αγωγού.

Από τη δεξαμενή αντλείται νερό το οποίο εισάγεται στο ανάντη άκρο του καναλιού και στη συνέχεια αυτό υπερχειλίζει είτε ελεύθερα, είτε μέσω υπερχειλιστή λεπτής στέψης πάλι πίσω στη δεξαμενή. Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 4.4.

Η αντλία (Σχήμα 4.5) έχει εμπορική ονομασία Grundfos και είναι απευθείας συνδεδεμένη με το δίκτυο (χωρίς να μεσολαβεί κάποιος σταθεροποιητής τάσης) και ως εκ τούτου η λειτουργία της και επομένως η ένδειξη στο παροχόμετρο εμφανίζει στιγμιαίες μεταβολές. Η λειτουργία της αντλίας είναι τέτοια ώστε μόλις αποκαθίστανται συνθήκες μόνιμης ροής, η διαφορά του ύψους ενέργειας της δεξαμενής με το ανάντη τμήμα του αγωγού να είναι σταθερή.

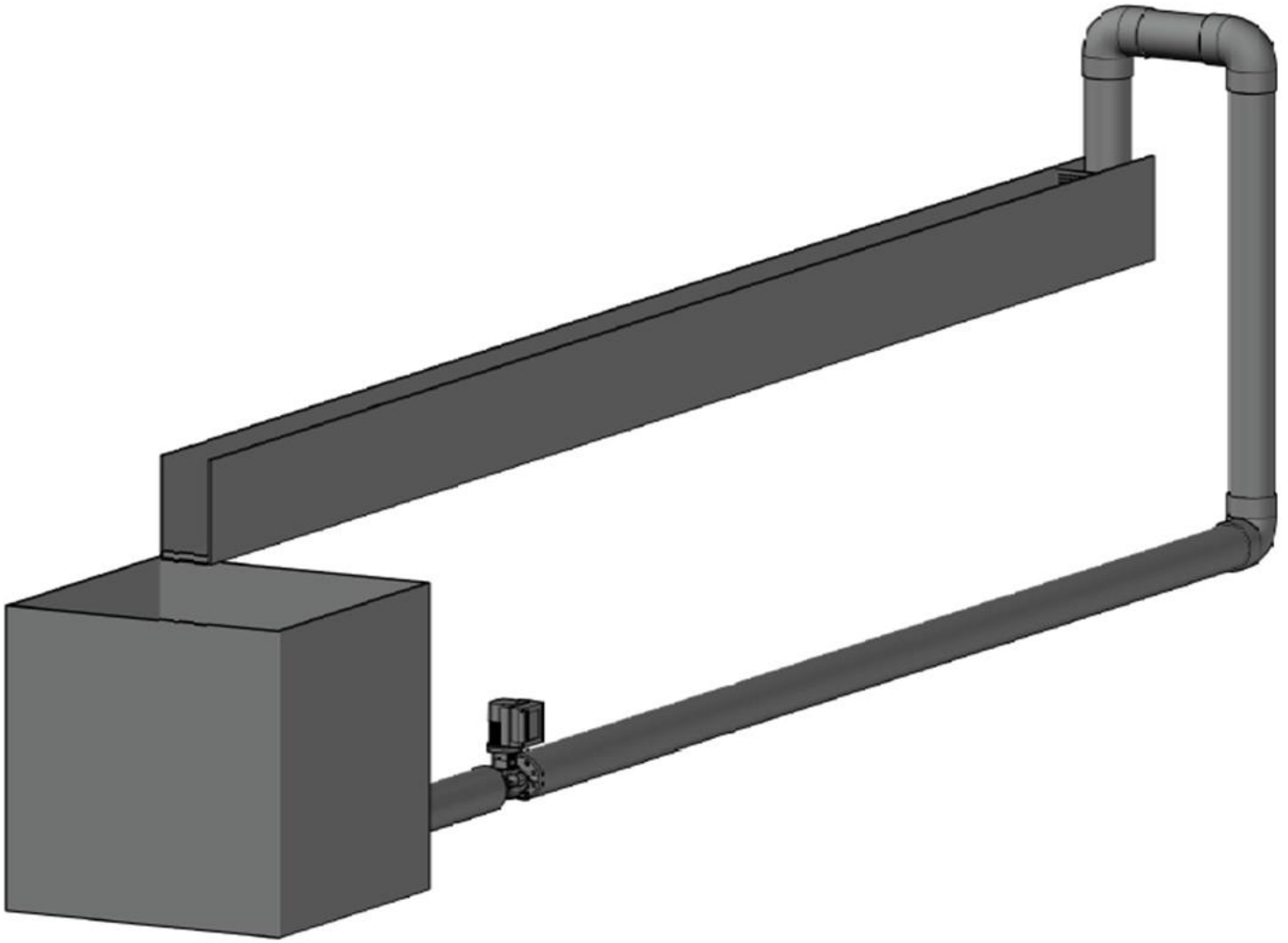


(α)



(β)

Σχήμα 4.3 (α) Κατάντη άκρο της διώρυγας με υπερχειλιστή λεπτής στέψης (9 cm στην παρούσα εικόνα) (β) Δεξαμενή νερού



Σχήμα 4.4 Σχέδιο της διώρυγας με τη δεξαμενή, την αντλία, τον αγωγό και τον υπερχειλιστή



Σχήμα 4.5 Αντλία για την τροφοδοσία της διώρυγας

4.1.2 Μετρητικά όργανα

Μέτρηση παροχής

Για τη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό παροχόμετρο (Σχήμα 4.6) με εμπορική ονομασία TransPort™ PT868 Portable Liquid Flowmeter της GE Panametrics.

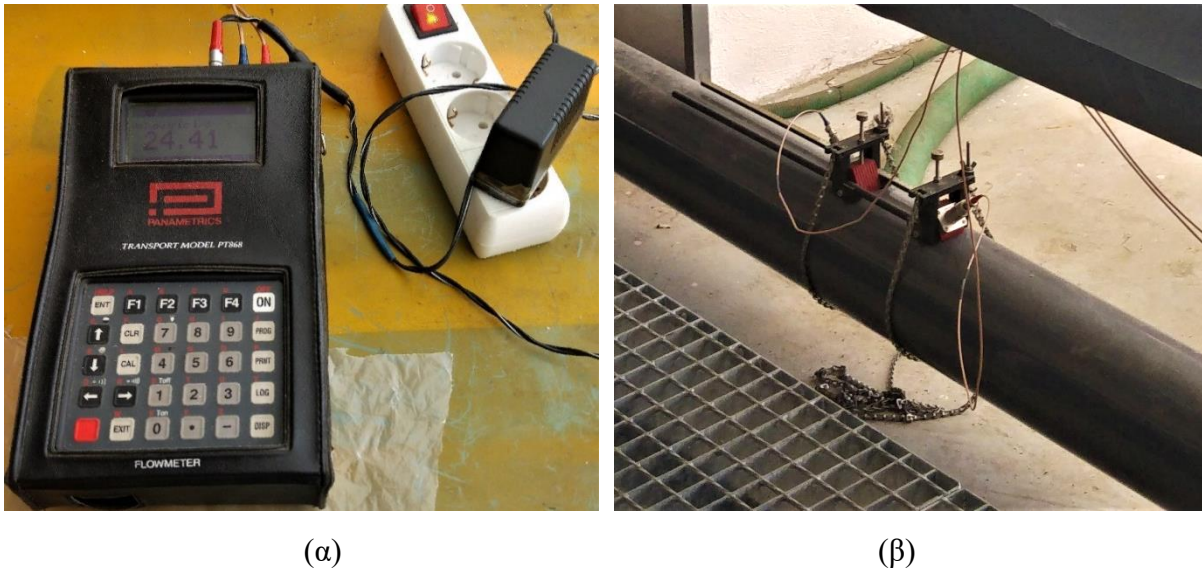
Το συγκεκριμένο παροχόμετρο μετράει μέσω ακουστικών παλμών αγωγή μονοφασικά ρευστά ή τουλάχιστο με μια δεύτερη φάση που να μην είναι σε μεγάλη ποσότητα. Η λειτουργία στηρίζεται στη μέτρηση του χρόνου άφιξης ενός υπερηχητικού παλμού. Καθώς το ρευστό κινείται και εκπέμπει παλμούς στην συχνότητα των υπερήχων, οι παλμοί αυτοί κινούνται τόσο στην ίδια κατεύθυνση με τη ροή όσο και αντίθετα. Οι παλμοί που κινούνται στην κατεύθυνση της ροής δηλαδή προς τα κατάντη κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε σχέση με τους παλμούς που κινούνται προς τα ανάντη (GE Panametrics, 2003).

Το TransPort χρησιμοποιεί πληθώρα τεχνικών επεξεργασίας των ψηφιακών σημάτων, περιλαμβανομένης και της ετεροσυσχέτισης, για να καθορίσει τους χρόνους άφιξης των παλμών και μέσω αυτών να υπολογίσει τη ταχύτητα ροής. Κατά τη λειτουργία του, δύο μορφοτροπείς, δηλαδή δύο ειδικά τεμάχια που τοποθετούνται περιμετρικά του αγωγού σε δύο κοντινές θέσεις, λειτουργούν τόσο ως πηγές όσο και ως δέκτες υπερηχητικών παλμών ανταλλάσσοντας έτσι υπερηχητικά σήματα μεταξύ τους (GE Panametrics, 2003).

Το παροχόμετρο μετράει τη χρονική καθυστέρηση μεταξύ της αποστολής και της λήψης ενός ακουστικού κύματος και από τις δύο κατευθύνσεις. Όταν το ρευστό στο σωλήνα δεν κινείται, ο χρόνος άφιξης στα κατάντη ισούται με τον αντίστοιχο χρόνο στα ανάντη. Αντίθετα όταν το ρευστό κινείται, ο χρόνος άφιξης στα κατάντη είναι μικρότερος σε σχέση με τον αντίστοιχο στα ανάντη. Η διαφορά μεταξύ των δύο χρόνων είναι ανάλογη της ταχύτητας ροής του ρευστού και το πρόσημο δείχνει την κατεύθυνση της ροής (GE Panametrics, 2003).

Η στιγμιαία τιμή της παροχής απεικονίζεται στην οθόνη του παροχόμετρου σε μονάδες L/s με ακρίβεια δύο δεκαδικών.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι λόγω του εναλλασσόμενου ρεύματος λειτουργίας της αντλίας, καθώς και του τρόπου υπολογισμού της παροχής από το παροχόμετρο, η ένδειξη του παροχόμετρου μεταβάλλεται στιγμιαία και η μεταβολή αυτή για σταθερές συνθήκες ροής (σταθερή παροχή από αντλία, σταθερό ύψος υπερχειλιστή) είναι δυνατό να φτάσει μέχρι και το 1 L/s.



Σχήμα 4.6 (α) Ηλεκτρονικό παροχόμετρο (β) Μορφοτροπείς παροχόμετρον

Μέτρηση στάθμης

Για τη μέτρηση της ελεύθερης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε σταθμήμετρο τύπου ακίδας (Σχήμα 4.7) με ακρίβεια 0.1 mm. Το σταθμήμετρο αυτό έχει προσαρμοσμένο διαστημόμετρο με βερνιέρο που επιτρέπει την κίνηση τόσο σε κατακόρυφο επίπεδο, όσο και σε εγκάρσιες στη διατομές της διώρυγας. Η μέτρηση λαμβάνεται όταν η ακίδα προσεγγίζει την ελεύθερη επιφάνεια από την πλευρά του αέρα. Επίσης, το όργανο έχει τη δυνατότητα να κινείται πάνω σε ράβδους προσαρμοσμένες στο κανάλι ώστε να είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων της ελεύθερης επιφάνειας τόσο στα ανάντη όσο και στα κατόντη του μεσόβαθρου.

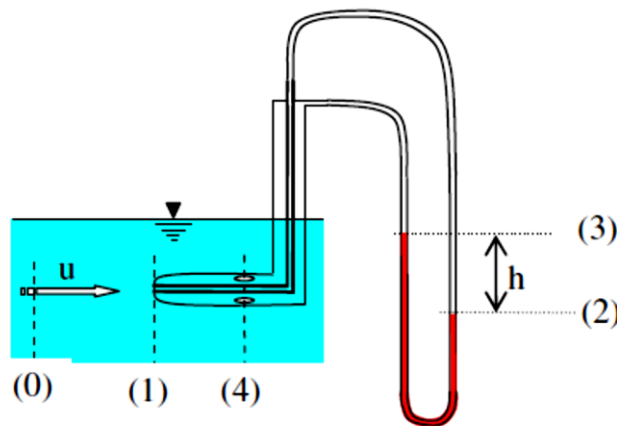


Σχήμα 4.7 Σταθμήμετρο ακίδας

Μέτρηση ταχύτητας

Για τη μέτρηση της μέσης ταχύτητας σε συγκεκριμένες θέσεις της ροής χρησιμοποιήθηκε σωλήνας Pitot, ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί σε οποιοδήποτε σημείο της υγρής διατομής. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μέτρηση της δυναμικής και στατικής πίεσης σε κάποιο σημείο του ρέοντος ρευστού.

Θεωρούμε ένα σωλήνα Pitot που έχει τοποθετηθεί παράλληλα με την κύρια διεύθυνση της ροής όπως φαίνεται διαγραμματικά παρακάτω.



Σχήμα 4.8 Λειτουργία σωλήνα Pitot (Πηγή: Παπανικολάου 2017)

Από την εξίσωση ενέργειας ανάμεσα στις διατομές (1) που είναι το σημείο μηδενισμού της ταχύτητας (stagnation point) στον εσωτερικό σωλήνα και (4) όπου η ταχύτητα u είναι παράλληλη στο σωλήνα έχουμε

$$\frac{p_1}{\rho_1 g} = \frac{p_4}{\rho_1 g} + \frac{u^2}{2g} \Rightarrow u = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_4)}{\rho_1}} \quad (4.1)$$

Εφαρμόζοντας Υδροστατική από τις διατομές (1) έως (2)

$$\frac{p_1}{\rho_1 g} + z_1 = \frac{p_3}{\rho_1 g} + z_1 \Rightarrow p_1 - p_3 = \rho_1 g (z_3 - z_1) \quad (4.2)$$

Εφαρμόζοντας Υδροστατική από τις διατομές (2) έως (3)

$$\frac{p_3}{\rho_2 g} + z_3 = \frac{p_2}{\rho_2 g} + z_2 \Rightarrow p_3 - p_2 = \rho_2 g (z_2 - z_3) \quad (4.3)$$

Εφαρμόζοντας Υδροστατική από τις διατομές (3) έως (4)

$$\frac{p_2}{\rho_1 g} + z_2 = \frac{p_4}{\rho_1 g} + z_4 \Rightarrow p_2 - p_4 = \rho_1 g (z_4 - z_2) \quad (4.4)$$

Προσθέτοντας κατά μέλη

$$\begin{aligned} p_1 - p_3 + p_3 - p_2 + p_2 - p_4 &= \rho_1 g (z_3 - z_1) + \rho_2 g (z_2 - z_3) + \rho_1 g (z_4 - z_2) \Rightarrow \\ p_1 - p_4 &= \rho_1 g (z_3 - z_1 + z_4 - z_2) + \rho_2 g (z_2 - z_3) \xrightarrow{z_1=z_4} \\ p_1 - p_4 &= \rho_1 g (z_3 - z_2) + \rho_2 g (z_2 - z_3) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_1 - p_4 &= \rho_1 g(z_3 - z_2) - \rho_2 g(z_3 - z_2) \Rightarrow \\
 p_1 - p_4 &= (\rho_1 - \rho_2)g(z_3 - z_2) \Rightarrow \\
 p_1 - p_4 &= \Delta\rho gh
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Αντικαθιστώντας στην αρχική σχέση

$$u = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_4)}{\rho_1}} = \sqrt{\frac{2\Delta\rho gh}{\rho_1}} \tag{4.6}$$

Η μέτρηση της κατακόρυφης σχετικής θέσης προσδιορίζεται με τη βοήθεια κλίμακας πάνω στην οποία ολισθαίνει ο κανόνας όπου στερεώνεται ο σωλήνας Pitot με ακρίβεια 0.1mm. Οι εύκαμπτοι σωλήνες από τον μετρητή Pitot συνδέονται στα άκρα γυάλινου κυλινδρικού σωλήνα σχήματος αντεστραμμένου U, τοποθετημένου κατακόρυφα. Έτσι η ταχύτητα που μετράται προκύπτει από τη διαφορά στάθμης του νερού h στους δύο σωλήνες από τη σχέση

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta\rho gh}{\rho_1}} \tag{4.7}$$

Στα συγκεκριμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκε πετρέλαιο θέρμανσης και νερό για τη λειτουργία του Pitot. Το ελαφρύτερο υγρό είναι το πετρέλαιο που δεν αναμειγνύεται με το νερό. Θεωρώντας τις πυκνότητες νερού και πετρελαίου θέρμανσης ίσες με $\rho_1=998 \text{ Kg/m}^3$ και $\rho_2=832 \text{ Kg/m}^3$ αντίστοιχα, η παραπάνω σχέση γράφεται $u = 1.8065\sqrt{h}$, όπου h σε m και u σε m/s.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το μανόμετρο δεν είναι κατακόρυφο αλλά σχηματίζει γωνία θ με την οριζόντια με στόχο να εμφανίζεται μεγαλύτερη υψομετρική διαφορά, η οποία είναι πιο ευανάγνωστη στον παρατηρητή. Η ένδειξη (μήκος) της διαφοράς στάθμης h πρέπει να πολλαπλασιαστεί με $\sin\theta$, όπου θ είναι η κλίση του μανόμετρου ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Στην προκειμένη περίπτωση, $\theta=25^\circ$ και επομένως η υψομετρική διαφορά h που παρατηρείται πρέπει να πολλαπλασιαστεί με την τιμή $\sin 25^\circ=0.4226$.

Η μέτρηση της κατακόρυφης σχετικής θέσης προσδιορίζεται με τη βοήθεια κλίμακας πάνω στην οποία ολισθαίνει ο κανόνας όπου στερεώνεται ο σωλήνας Pitot (Σχήμα 4.9) με ακρίβεια 0.1 mm. Οι εύκαμπτοι σωλήνες από τον μετρητή Pitot συνδέονται στα άκρα γυάλινου κυλινδρικού σωλήνα σχήματος U, τοποθετημένου κατακόρυφα ή κεκλιμένου με γωνία θ ως προς την οριζόντια. Έτσι η ταχύτητα που μετράται προκύπτει από τη διαφορά στάθμης του νερού h στους δύο σωλήνες. Η μέτρηση του βάθους ροής γίνεται με σταθμήμετρο ακίδας που κινείται κατακόρυφα με ακρίβεια μέτρησης 0.1 mm.



Σχήμα 4.9 Μέτρηση με σωλήνα Pitot

Μέτρηση θερμοκρασίας

Ο προσδιορισμός της θερμοκρασίας του νερού μέσα στη δώρυγα και τη δεξαμενή είναι σημαντικός για την επιλογή της κατάλληλης τιμής του ν , δηλαδή του κινηματικού ιξώδους και κατά επέκταση τον υπολογισμό άλλων σημαντικών παραμέτρων της ροής, όπως ο αριθμός Reynolds, Re . Η μέτρηση της θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε με χρήση ειδικού θερμομέτρου (Σχήμα 4.10) που υπολογίζει άμεσα τη θερμοκρασία και την παρουσιάζει σε μονάδες $^{\circ}C$.



Σχήμα 4.10 Θερμόμετρο

4.1.3 Μεσόβαθρα

Δεδομένου ότι στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επιρροή του σχήματος του βάθρου, επιλέχθηκαν και μελετήθηκαν πέντε διαφορετικές διατομές βάθρων (Σχήμα 4.11) με τα εξής χαρακτηριστικά:

- (α) τετραγωνική διατομή με διαστάσεις 4.00 cm x 4.00 cm
- (β) ρομβοειδής διατομή με διαγώνιο ίση με 5.66 cm (ουσιαστικά είναι η τετραγωνική στραμμένη κατά 45°)
- (γ) κυλινδρική διατομή διαμέτρου 5.00 cm
- (δ) ορθογωνική διατομή διαστάσεων 6.00 cm x 3.00 cm (λόγος πλευρών 2:1)
- (ε) ορθογωνική διατομή διαστάσεων 10.00x4.00 cm (λόγος πλευρών 2.5:1)

Τα μεσόβαθρα τοποθετήθηκαν ένα-ένα στη δώρυγα στον άξονα της εγκάρσιας διατομής, σε απόσταση 192 cm από το κατάντη άκρο όπου πραγματοποιείται η υπερχείλιση. Η βάση στην οποία στερεώθηκαν επιλέχθηκε ύστερα από δοκιμές με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η αλλαγή της διατομής, να επιτρέπεται η κίνηση του σταθμίμετρου και εν μέρει του σωλήνα Ρίτοτ πάνω στις κατάλληλα διαμορφωμένες κυλινδρικές διατομές και να παρέχονται συνθήκες ανάρτησης και στήριξης.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, τα δύο ορθογωνικά βάθρα τοποθετήθηκαν με τη μικρότερη πλευρά στην κατεύθυνση της ροής ώστε να είναι μικρότερη η περιοχή συστολής λόγω του βάθρου και κατά επέκταση η αναταραχή (υπερύψωση της επιφάνειας, ανάπτυξη μεγάλης δύναμης αντίστασης).



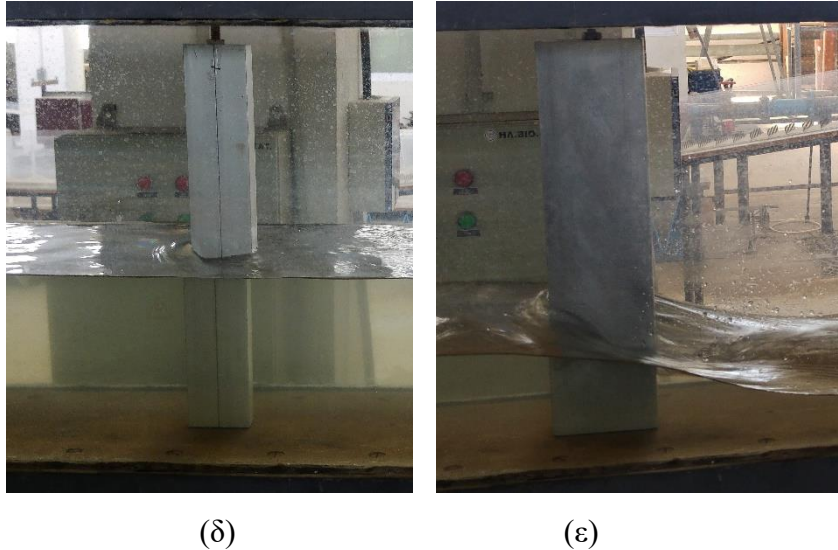
(α)



(β)



(γ)



Σχήμα 4.11 Διατομές βάθρων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική μελέτη (α) τετραγωνική (β) ρομβοειδής (γ) κυλινδρική (δ) ορθογωνική με λόγο 2:1 (ε) ορθογωνική με λόγο 2.5:1

4.2 Πειραματική διαδικασία με τη χρήση συμβατικών μεθόδων μέτρησης

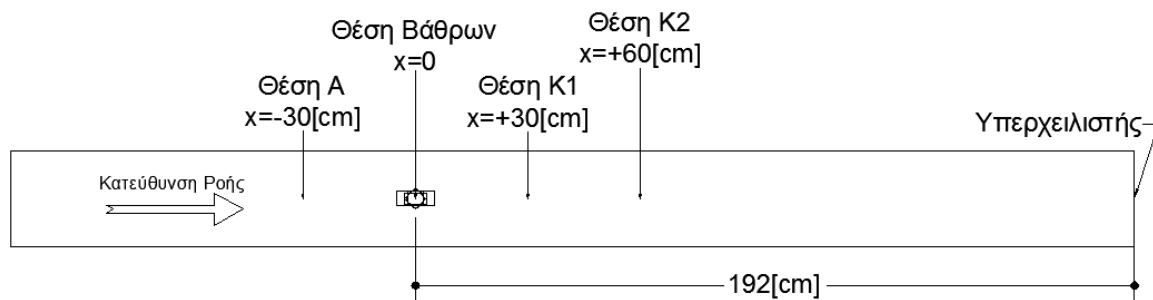
Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τη μέτρηση του βάθους ροής και της ταχύτητας σε δύο διατομές, μία ανάντη του βάρους και μία κατάντη του βάρους. Οι μετρήσεις αφορούν ονομαστικές παροχές Q ίσες με 5, 10, 15, 20, 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή w ίσο με 0, 3, 6, 9 cm. Οι επιθυμητές παροχές προσεγγίζονται με τη βοήθεια του διακόπτη της αντλίας και τις ενδείξεις του παροχόμετρου. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πραγματικές τιμές των παροχών, όπως αυτές εμφανίζονται στο παροχόμετρο, προσεγγίζουν είτε προς τα «πάνω», είτε προς τα «κάτω» τις αντίστοιχες ονομαστικές παροχές, αλλά δεν είναι δυνατό και δεν επιδιώκεται να επιτευχθεί παροχή ακριβώς ίση με την ονομαστική. Ιδιαίτερα για μικρές παροχές, δηλαδή για 5 ή 10 L/s, παρουσιάζεται μεγαλύτερη δυσκολία στην προσέγγιση της επιθυμητής παροχής (πιθανότατα λόγω των λίγων στροφών της αντλίας).

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν φωτογραφικές λήψεις με στόχο την οπτικοποίηση των πειραμάτων και την παρατήρηση των διαφορών μεταξύ των διαφορετικών παροχών και θέσεων υπερχειλιστή. Οι λήψεις αυτές παρατίθενται στο Παράρτημα. Από τις λήψεις είναι εμφανής η παρουσία υπερκρίσιμης ροής στα κατάντη του βάρους σε συνθήκες ελεύθερης υπερχειλίσης (μηδενικό ύψος υπερχειλιστή). Επίσης, όπως είναι αναμενόμενο, μεγαλύτερη διαταραχή εμφανίζεται σε μεγάλες παροχές και μικρά ύψη υπερχειλιστή για όλα τα σχήματα διατομών.

4.2.1 Μετρήσεις βάθους ροής

Η θέση μέτρησης του βάθους ροής (Σχήμα 4.12) επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην υπάρχει μεγάλη αναταραχή στην περιοχή και να είναι δυνατή η λήψη αξιόπιστων μετρήσεων. Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με το Σχήμα 2.1, μας ενδιαφέρει το βάθος ροής στις διατομές 1 και 3 στις οποίες η ροή θεωρείται μόνιμη και όχι στη διατομή 2 όπου εμφανίζεται μεγάλη

αναταραχή και φυσαλίδες. Στο πλαίσιο αυτό, οι μετρήσεις στην περιοχή ανάντη του βάθρου λαμβάνονται στη θέση $x=-30$ cm, δηλαδή σε 30 cm ανάντη του βάθρου. Σε ό,τι αφορά την περιοχή κατάντη του βάθρου, αποφασίστηκε αρχικά να γίνουν μετρήσεις στη θέση $x=30$ cm, δηλαδή σε 30 cm κατάντη του βάθρου και σε αυτή τη θέση μετρήθηκε το βάθος ροής για τετραγωνική και ρομβοειδή διατομή. Παρατηρήθηκε ότι ενώ για την τετραγωνική διατομή δεν εμφανίζονται προβλήματα στη λήψη των μετρήσεων, για τη ρομβοειδή διατομή δεν είναι εύκολη η λήψη μετρήσεων δεδομένου ότι στη θέση των 30 cm κατάντη του βάθρου η ροή εμφανίζει μεγάλη αναταραχή (Σχήμα 4.13). Αποφασίστηκε, επομένως, να γίνουν οι μετρήσεις στα κατάντη σε νέα θέση και επιλέχθηκε η θέση $x=60$ cm ώστε να υπάρχει περιθώριο για διατομές που δημιουργούν μεγαλύτερη διαταραχή στη ροή.



Σχήμα 4.12 Θέση βάθρου και μετρήσεων στη διώρυγα



Σχήμα 4.13 Διαταραχή στη θέση μέτρησης $x=30$ cm σε ροή γύρω από ρομβοειδή διατομή ($Q=25$ L/s, $w=3$ cm)

Τα πειράματα εκτελούνται για κάθε ένα βάθρο ξεχωριστά. Για κάθε τιμή υπερχειλιστή και παροχής μετράται η στάθμη ανάντη και κατάντη. Πρέπει να σημειωθεί ότι για κάθε θέση λαμβάνονται δύο τιμές βάθους ροής με στόχο να εξαλειφθεί το σφάλμα λόγω μικροκυματισμών της ροής και στο τέλος εξάγεται η μέση τιμή τους ως το βάθος ροής στη θέση αυτή.

Επιπρόσθετα, για λόγους σύγκρισης της ροής με μεσόβαθρο (διαταραγμένη ροή) και της ροής χωρίς μεσόβαθρο (αδιατάρακτη ροή) γίνονται μετρήσεις στάθμης στις συγκεκριμένες θέσεις μέτρησης ($x=-30, 0, 30, 60$ cm) από τις οποίες προκύπτουν καμπύλες στάθμης-παροχής, όπως αναλύεται περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2.2 Μετρήσεις ταχύτητας

Η ταχύτητα μετράται σημειακά με τη χρήση του σωλήνα Pitot. Αυτό σημαίνει ότι με τη χρήση του Pitot λαμβάνονται μετρήσεις σε συγκεκριμένες θέσεις και αυτές μετατρέπονται μετά σε ταχύτητα ροής στην αντίστοιχη θέση. Για τη συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε η λήψη μετρήσεων σε δύο διατομές ανάντη και κατόντη, εκ των οποίων η μία είναι η κατακόρυφη διατομή που διέρχεται από τον άξονα της διώρυγας και η άλλη η εγκάρσια διατομή σε ύψος περίπου ίσο με το 50% του βάθους ροής. Οι μετρήσεις λήφθηκαν ανά 1 cm στην κατακόρυφη διατομή και ανά 2 cm στην οριζόντια διατομή. Οι θέσεις κατά μήκος της διώρυγας στις οποίες μετρήθηκε ταχύτητα είναι ίδιες με τις θέσεις όπου μετρήθηκαν τα βάθη ροής. Για κάθε σειρά μετρήσεων με Pitot μετρήθηκαν εκ νέου τα βάθη ροής με τη χρήση χάρακα (εφόσον δεν χωράει το σταθμήμετρο μαζί με το Pitot στην ίδια διατομή) ώστε να είναι γνωστό το βάθος μέχρι το οποίο θα γίνει η ολοκλήρωση των ταχυτήτων κατά την επεξεργασία.

Στις μετρήσεις ταχύτητας λήφθηκαν υπόψη οι ονομαστικές παροχές 15, 20, 25 L/s δεδομένου ότι παρατηρήθηκαν προβλήματα σε μικρότερες παροχές κατά τη διάρκεια των μετρήσεων στάθμης και υπήρχε κίνδυνος εισροής φυσαλίδων αέρα στο σωλήνα Pitot.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέτρηση ταχυτήτων στη διατομή είναι πιο αξιόπιστος τρόπος από τη μέτρηση βάθους ροής για τον υπολογισμό της δύναμης και του συντελεστή αντίστασης. Οι ταχύτητες στη συγκεκριμένη εργασία μετρήθηκαν και με το στόχο της εξαγωγής μεγεθών αντίστασης. Ωστόσο, αυτό δεν ήταν εν τέλει εφικτό εξαιτίας κατασκευαστικών και τεχνικών περιορισμών. Συγκεκριμένα, ενώ το σταθμήμετρο μπορεί να κυλιέται πάνω από το κανάλι χωρίς η διαδρομή του να εμποδίζεται από το βάθος, ο σωλήνας Pitot δεν μπορεί ούτε να κυλιέται, ούτε να έρχεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα (πρέπει να είναι πάντα σε επαφή με νερό). Επομένως, για να μεταφερθεί ο σωλήνας Pitot από τα ανάντη στα κατόντη και αντίστροφα πρέπει να τον σηκώσουν προσεκτικά δύο άτομα, όπου ο ένας θα κρατάει το ίδιο το όργανο και ο άλλος θα κρατάει το δοχείο με το νερό για να μην «πάρει» αέρα και γεμίσει φυσαλίδες το Pitot. Δεδομένου ότι οι μετρήσεις ταχύτητας είναι σχετικά χρονοβόρα διαδικασία και ο προγραμματισμός των πειραμάτων δεν επέτρεπε πάντα την παρουσία δύο ατόμων στο εργαστήριο, επιλέχθηκε να πραγματοποιούνται πρώτα οι μετρήσεις ταχύτητας για όλες τις παροχές και θέσεις υπερχειλιστή στα ανάντη και μετά στα κατόντη. Δυστυχώς, η επιλογή αυτή δεν επιτρέπει τη λήψη μετρήσεων με ακριβώς τις ίδιες συνθήκες για ανάντη και κατόντη με αποτέλεσμα, όσο και να έγινε προσπάθεια να προσομοιωθούν οι ίδιες συνθήκες, οι υπολογισμοί της δύναμης αντίστασης μέσω ολοκλήρωσης αυτών των ταχυτήτων να μη είναι αξιόπιστοι. Ωστόσο, τα αποτελέσματα για το πεδίο ταχυτήτων και τους συντελεστές συνόρθωσης είναι αποδεκτά.

Σε μια προσπάθεια διερεύνησης των δυνατοτήτων που θα προσέφερε ένας ορθότερος τρόπος διεξαγωγής πειραμάτων, οι μετρήσεις ταχύτητας για την ορθογωνική διατομή με λόγο 2.5:1 πραγματοποιήθηκαν όπως ακριβώς θα έπρεπε, δηλαδή με συνεχόμενη εναλλαγή του Pitot ανάντη και κατόντη. Τα αποτελέσματα και οι υπολογισμοί αυτής της προσπάθειας παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.2.3 Μετρήσεις παροχής

Σε κάθε ένα πείραμα επιλέχθηκε με τη βοήθεια του παροχόμετρου μια παροχή «κοντά» στην ονομαστική. Στη συνέχεια, για να προσδιοριστεί η μετρημένη παροχή του πειράματος, λήφθηκε μια μέση τιμή των στιγμιαίων ενδείξεων του παροχόμετρου. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε τόσο για τις μετρήσεις στάθμης, όσο και για τις μετρήσεις ταχύτητας. Εξαίρεση αποτελεί το τελευταίο σετ μετρήσεων ταχύτητας, δηλαδή για ορθογωνική διατομή με λόγο 2.5:1. Λόγω βλάβης του παροχόμετρου, η παροχή σε αυτά τα πειράματα προσδιορίστηκε με βάση καμπύλες παροχής-βάθους ροής που καταρτίστηκαν βάσει των μετρήσεων στάθμης που είχαν ήδη γίνει με λειτουργικό παροχόμετρο.

4.2.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας

Επειδή τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τόσο κατά τη χειμερινή, όσο και κατά τη θερινή περίοδο, υπήρχαν μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας. Δυστυχώς, δεν λήφθηκε μέριμνα ώστε να μετράται η θερμοκρασία σε κάθε ένα πείραμα για να προσδιοριστούν με ακρίβεια τα όρια μέσα στα οποία κυμαίνεται. Επομένως, ιδιαίτερα για μέρες με πολύ υψηλή θερμοκρασία, πρέπει να γίνει εκτίμηση των τιμών και των ορίων.

Οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα αυτής της πειραματικής διαδικασίας παρατίθενται στο Κεφάλαιο 5.

5. Ανάλυση και αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

5.1 Μελέτη υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

5.1.1 Αδιατάρακτο βάθος ροής

Θεωρούμε ότι αδιατάρακτο είναι το βάθος ροής που εμφανίζεται σε ποταμό, κανάλι ή διώρυγα όπου δεν υπάρχει κάποιο εμπόδιο στη ροή. Στα συγκεκριμένα πειράματα, για κάθε μία από τις θέσεις ενδιαφέροντος κατά μήκος της διώρυγας και για όλες τις διαφορετικές παροχές και ύψη υπερχειλιστή λαμβάνουμε μετρήσεις του αδιατάρακτου βάθους. Με βάση τις μετρήσεις αυτές είναι δυνατό να μελετηθεί η μεταβολή του αδιατάρακτου βάθους ροής σε σχέση με το διαταραγμένο. Επειδή δεν ήταν τεχνικά δυνατή η λήψη μετρήσεων αδιατάρακτου βάθους ροής στην ίδια ακριβώς παροχή (ίδιες συνθήκες ροής) με τις υπόλοιπες μετρήσεις διαταραγμένου βάθους, δηλαδή αφαίρεση του μεσόβαθρου και επανατοποθέτηση του σε κάθε πείραμα με ταυτόχρονη ροή μέσα στη διώρυγα, οι μετρήσεις χωρίς το εμπόδιο έγιναν σε επόμενο στάδιο με σχετικά διαφορετικές παροχές που πρακτικά ήταν ανόμοιες μεταξύ των πειραμάτων με και χωρίς μεσόβαθρο.

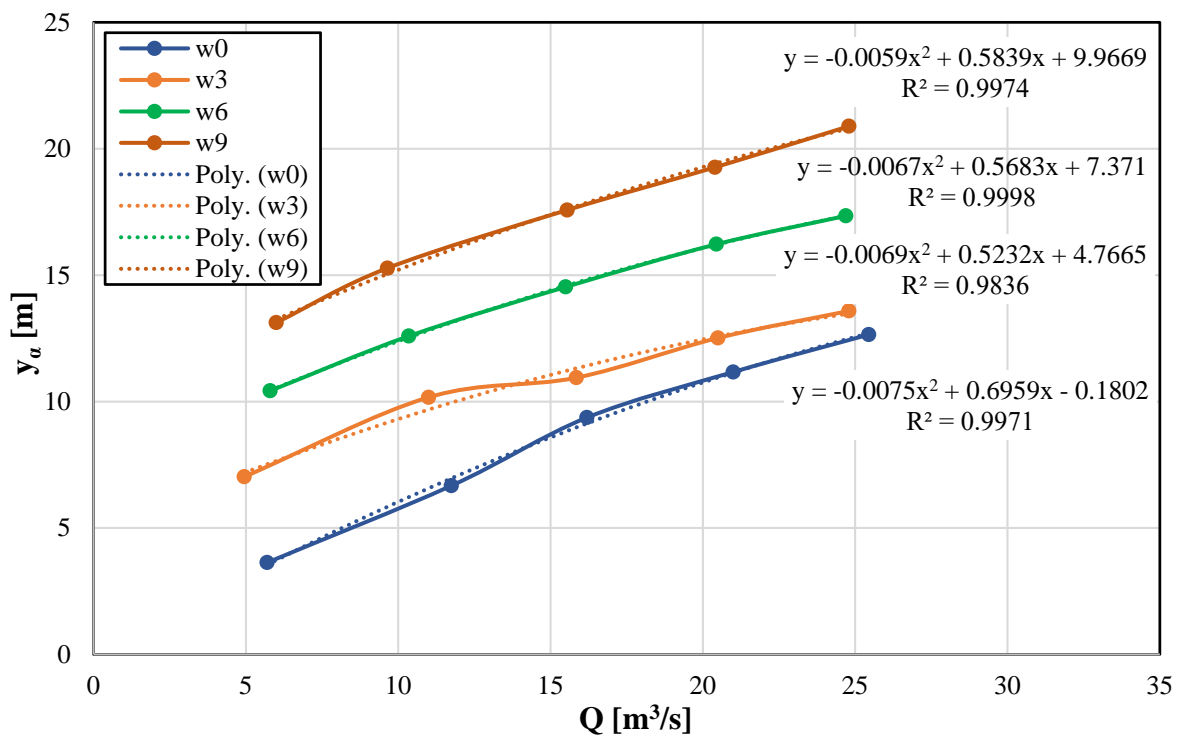
Ο υπολογισμός των αντίστοιχων αδιατάρακτων βαθών ροής που θα εμφανίζονταν υπό τις συνθήκες του κάθε πειράματος διαταραγμένης ροής έγινε δυνατός με την κατάρτιση καμπυλών παροχής-βάθους ροής για κάθε μία από τις τέσσερις θέσεις ενδιαφέροντος και κάθε ένα από τα ύψη υπερχειλιστή λεπτής στέψης. Για τη δημιουργία των καμπυλών αυτών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων πάνω στις καμπύλες που προέκυψαν από μετρήσεις και επιλέχθηκαν πολυωνμικές εξισώσεις 2^{ου} βαθμού για να υπάρχει μονή καμπυλότητα που προσομοιάζει αυτή των πειραματικών μετρήσεων. Ουσιαστικά, αντικαθιστώντας την αντίστοιχη τιμή της παροχής έχουμε αμέσως την τιμή του αδιατάρακτου βάθους.

Θεωρώντας ότι οι καμπύλες αυτές είναι της μορφής $y_a = aQ^2 + bQ + c$, όπου y_a το αδιατάρακτο βάθος, οι συντελεστές a, b, c για κάθε θέση x και ύψος υπερχειλιστή w δίνονται από τον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Καμπύλες $y_a=f(Q)= aQ^2+bQ+c$.

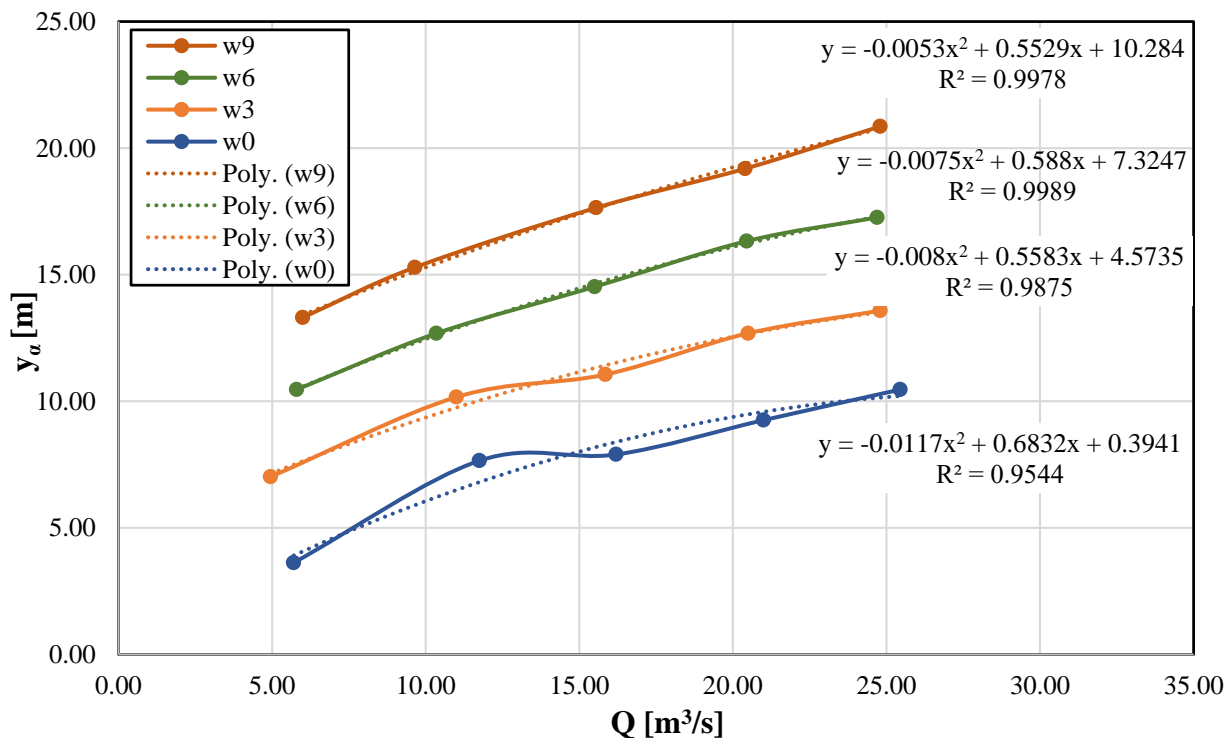
x	w	a	b	c
-30	0	-0.0075	0.6959	-0.1802
	3	-0.0069	0.5232	4.7665
	6	-0.0067	0.5683	7.371
	9	-0.0059	0.5839	9.9669
0	0	-0.0117	0.6832	0.3941
	3	-0.008	0.5583	4.5735
	6	-0.0075	0.588	7.3247
	9	-0.0053	0.5529	10.284
30	0	-0.0038	0.4962	1.6655
	3	-0.0091	0.5857	4.5123
	6	-0.0066	0.571	7.4083
	9	0.00006	0.3573	12.028
60	0	-0.0053	0.4862	1.543
	3	-0.0084	0.5521	4.7337
	6	-0.0085	0.6324	6.9844
	9	-0.0027	0.4518	11.377

Τα διαγράμματα από τα οποία προέκυψαν αυτές οι καμπύλες παρατίθενται παρακάτω.

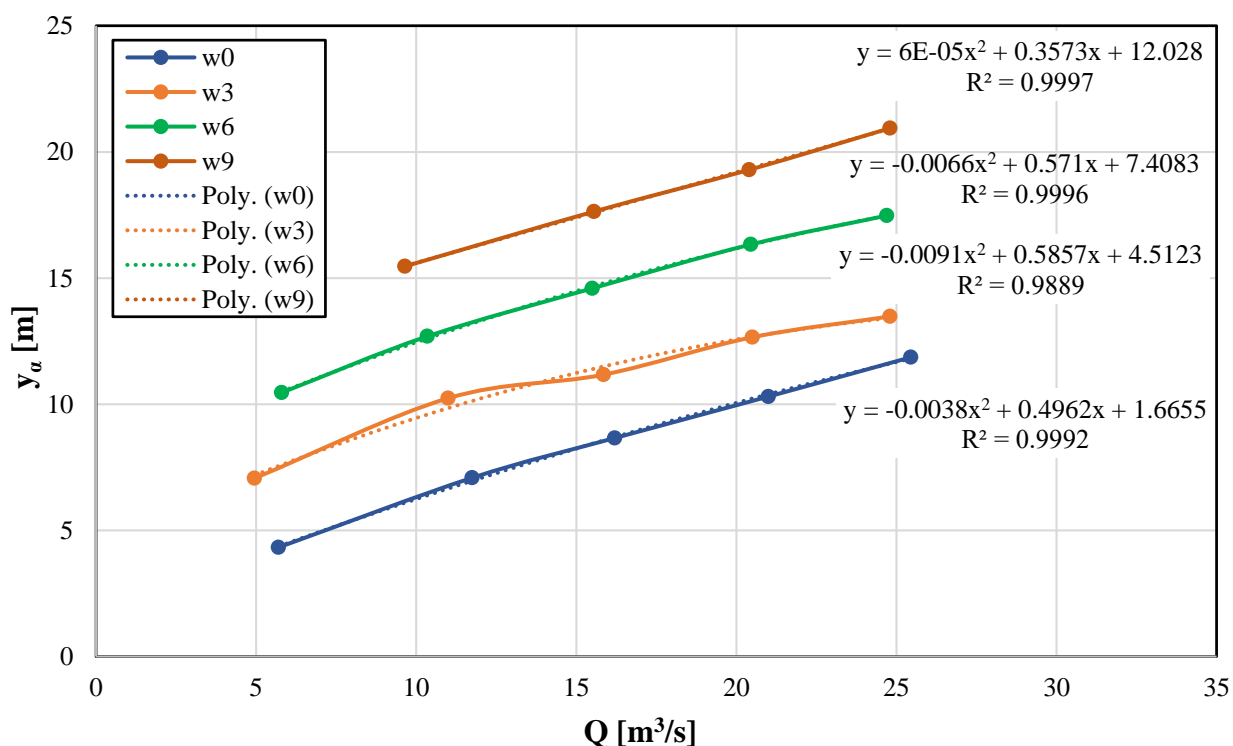


Σχήμα 5.1 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=-30$ cm (30 cm ανάντη του βάθρου).

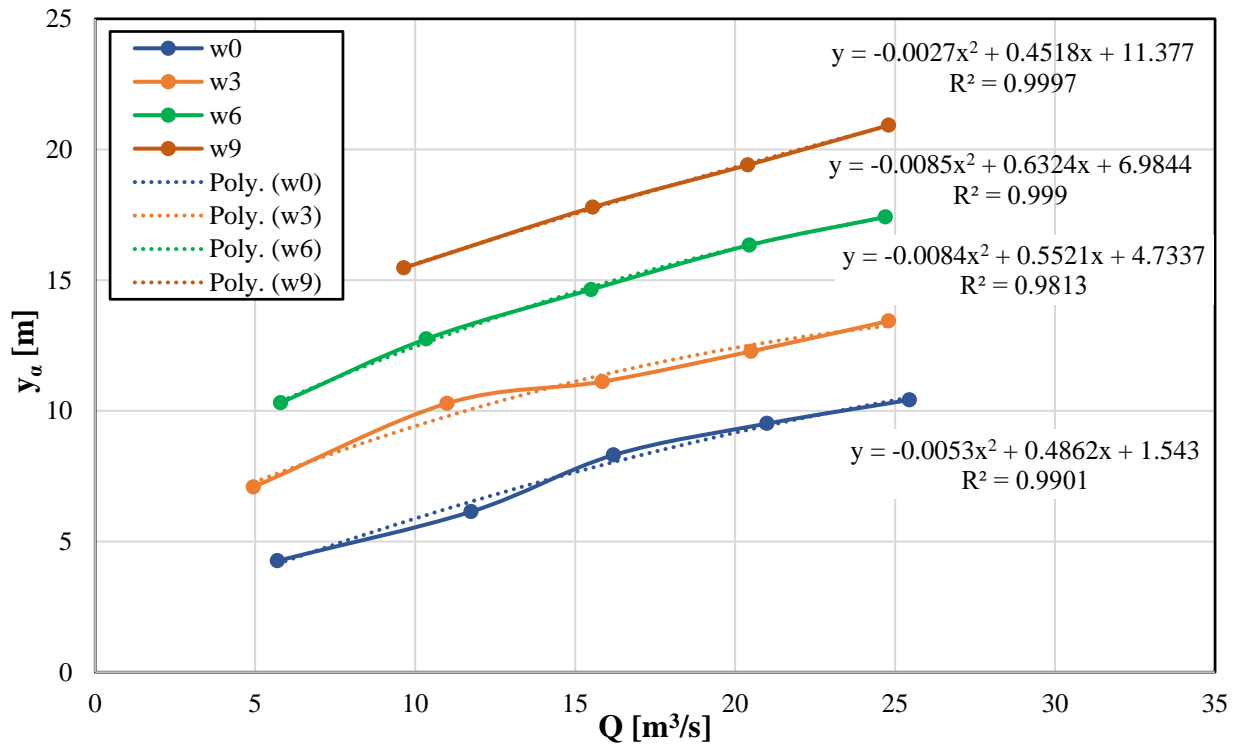
5. Ανάλυση και αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας



Σχήμα 5.2 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=0$ cm (θέση του βάθρου).



Σχήμα 5.3 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=30$ cm (30 cm κατάντη του βάθρου).

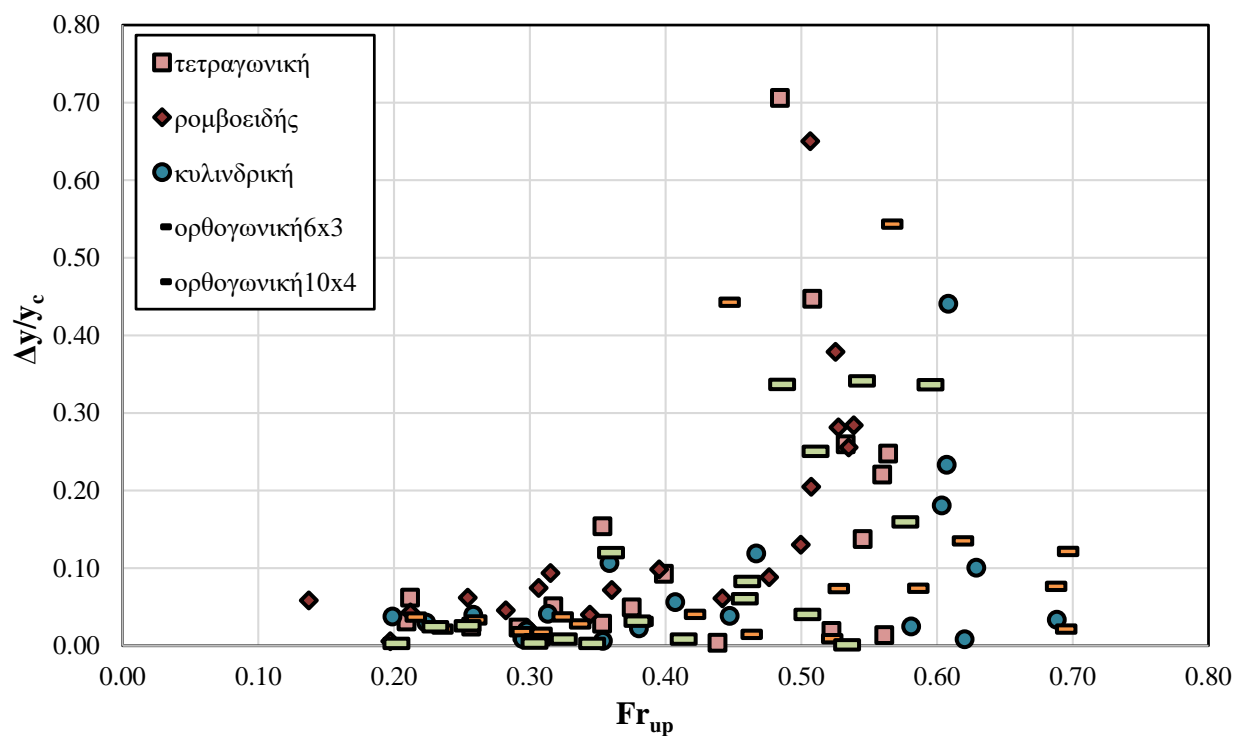


Σχήμα 5.4 Καμπύλη βάθους ροής-παροχής στη θέση $x=60$ cm (60 cm κατάντη του βάρου).

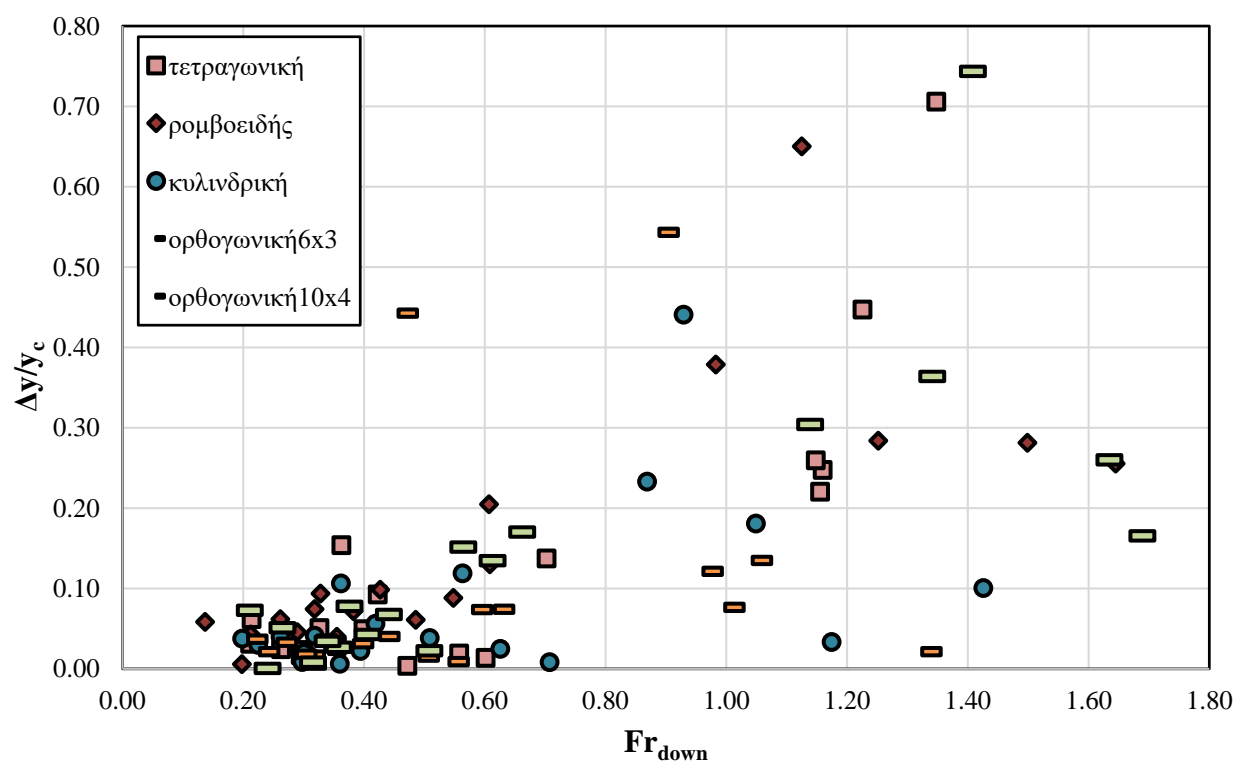
5.1.2 Υπερύψωση σε σχέση με αδιατάρακτο και διαταραγμένο βάθος ροής

Για κάθε μία διατομή βάρου και για όλες τις μετρήσεις διαταραγμένου βάθους ροής που αντιστοιχούν στις πέντε διαφορετικές παροχές και στα τέσσερα διαφορετικά ύψη υπερχειλιστή, υπολογίζεται το κρίσιμο βάθος y_c , ο αριθμός Froude ανάντη, Fr_{up} και κατάντη, Fr_{down} του βάρου και ο αριθμός Reynolds, Re_{up} και Re_{down} για το εύρος θερμοκρασιών που εκτιμήθηκε. Παράλληλα, υπολογίζεται και το αδιατάρακτο βάθος ροής y_a βάσει των σχέσεων της ενότητας 5.1.1. και ο αντίστοιχος αριθμός Fr_a .

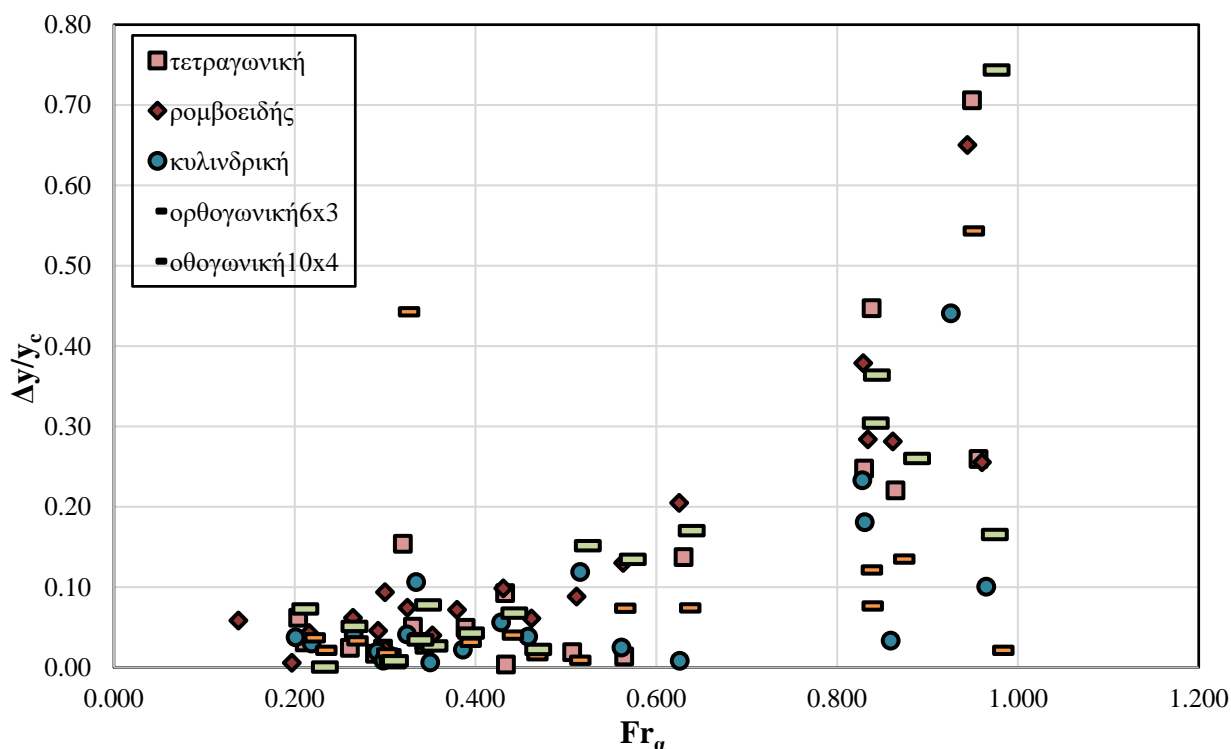
Θεωρούμε ότι Δy είναι η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας σε σχέση με το αδιατάρακτο βάθος ροής στην περιοχή ανάντη του βάρου (Σχήμα 2.1). Η υπερύψωση αυτή μπορεί να ποσοτικοποιησει το λεγόμενο «backwater effect». Για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων από τις διάφορες διατομές βάρων και από πιθανές μετρήσεις πεδίου, τα αποτελέσματα παρατίθενται με μορφή αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων.



Σχήμα 5.5 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για όλες τις διατομές.



Σχήμα 5.6 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατόντη για όλες τις διατομές.

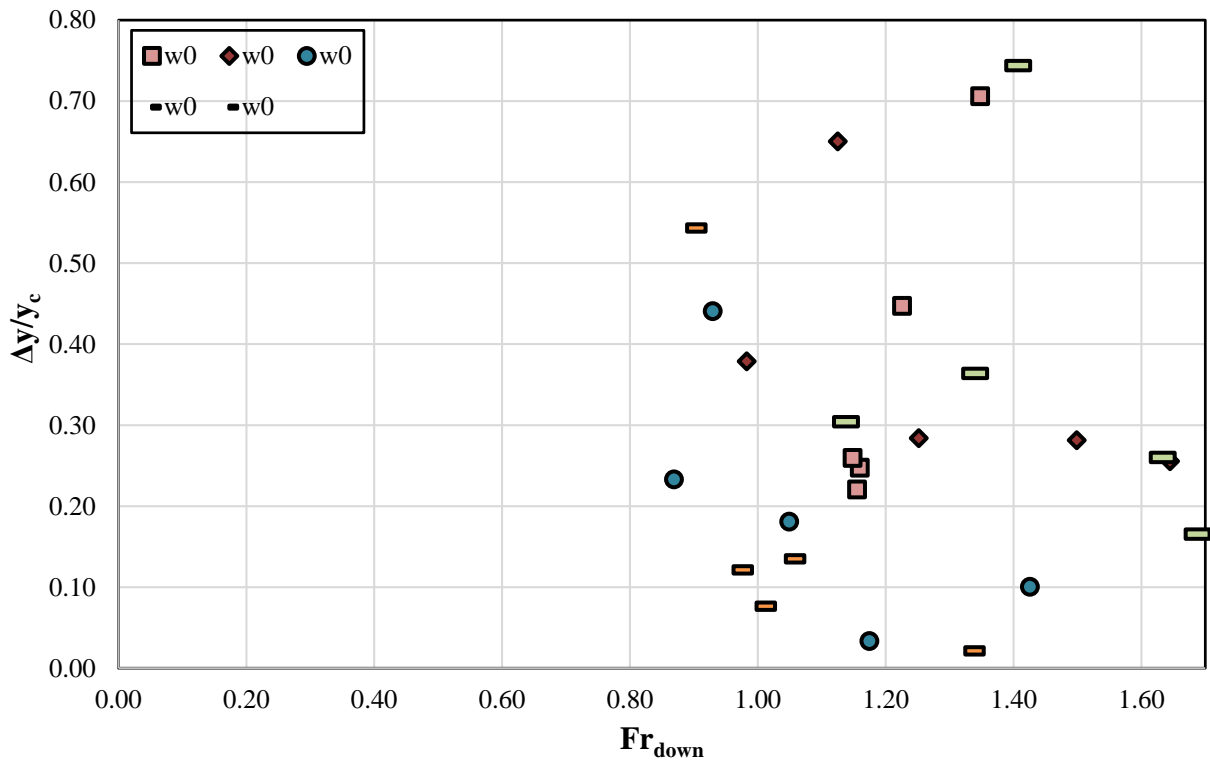


Σχήμα 5.7 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude αδιατάρακτης ροής για όλες τις διατομές.

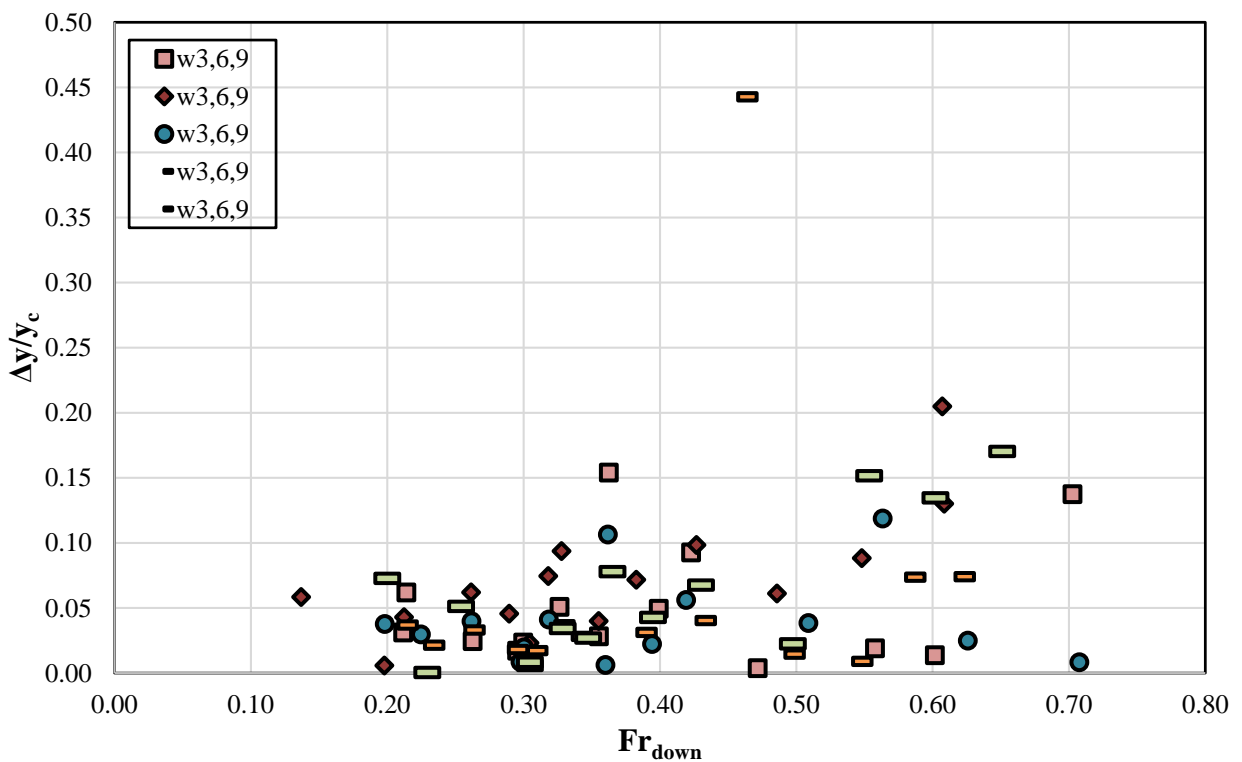
Παρατηρούμε ότι στο τμήμα ανάντη του βάθρου καθώς και στην αδιατάρακτη ροή εμφανίζονται συνθήκες υποκρίσιμης ροής μόνο. Ωστόσο, στο τμήμα κατάντη του βάθρου ανάλογα με την παροχή και το ύψος του υπερχειλιστή μπορεί να εμφανιστεί τόσο υπερκρίσιμη όσο και υποκρίσιμη ροή. Συγκεκριμένα, για ελεύθερη υπερχειλίση ($w=0$) εμφανίζονται τιμές του Fr_{down} στο διάστημα $[0.80, 1.70]$, δηλαδή η ροή μπορεί να είναι ανάλογα με παροχή και σχήμα βάθρου και υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη στα κατάντη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Η κυλινδρική, η ρομβοειδής και η ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών 2:1 εμφανίζουν τιμές και στην υποκρίσιμη περιοχή, ενώ όλες οι υπόλοιπες στην υπερκρίσιμη μόνο. Για τα υπόλοιπα ύψη υπερχειλιστή, δεν εμφανίζεται υπερκρίσιμη ροή (Σχήμα 5.9) και επομένως ο υπερχειλιστής λεπτής στέψης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο της ροής.

Παρατηρούμε επίσης ότι για μικρές τιμές του Froude, $Fr < 0.50$, τόσο στα ανάντη και στα κατάντη, όσο και στη αδιατάρακτη ροή, η υπερύψωση δεν ξεπερνάει το 20% του κρίσιμου βάθους. Για μεγαλύτερες τιμές, κοντά στην κρίσιμη ροή, η υπερύψωση μπορεί να φτάσει και το 75% του κρίσιμου βάθους. Γενικά, οι μεγαλύτερες τιμές της υπερύψωσης για όλες τις διατομές εμφανίζονται κοντά σε τιμή $Fr_{up}=0.5-0.6$ και $Fr_{\alpha}=0.92-0.96$.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι μεταξύ των διαφορετικών βάθρων για την ίδια περίπου τιμή του αριθμού Froude, η τετραγωνική και η ρομβοειδής διατομή προκαλούν γενικά μεγαλύτερη υπερύψωση.

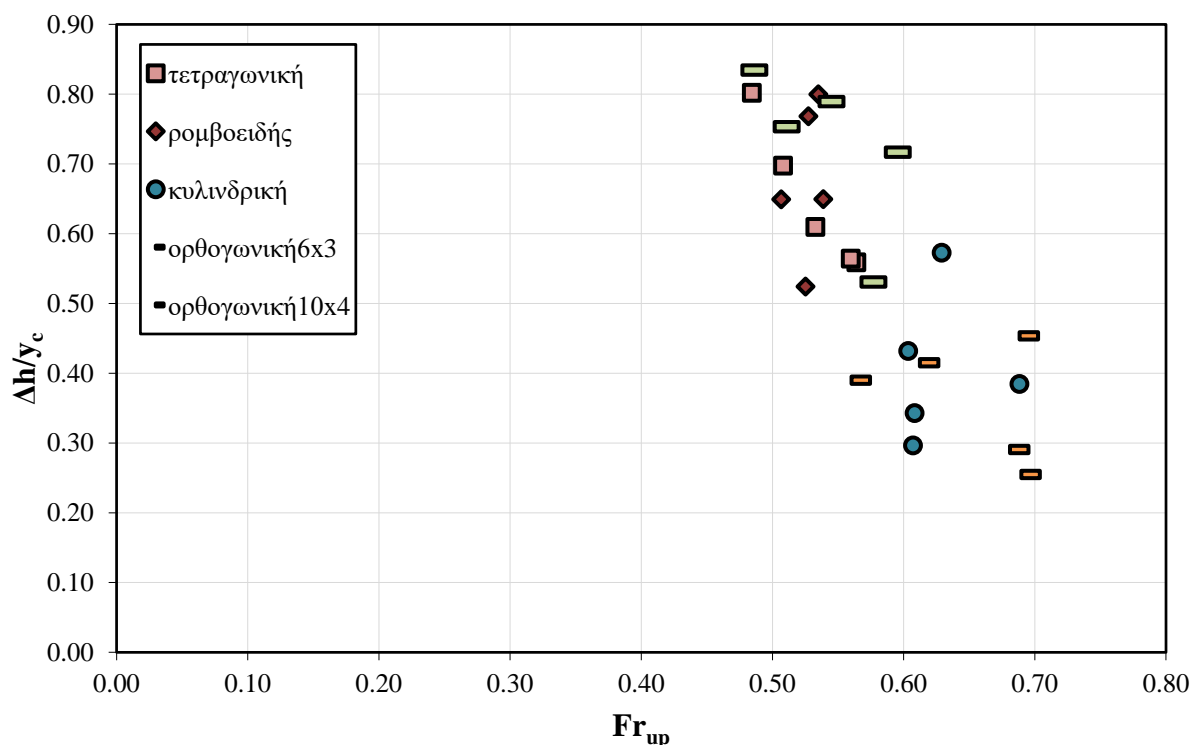


Σχήμα 5.8 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0$.

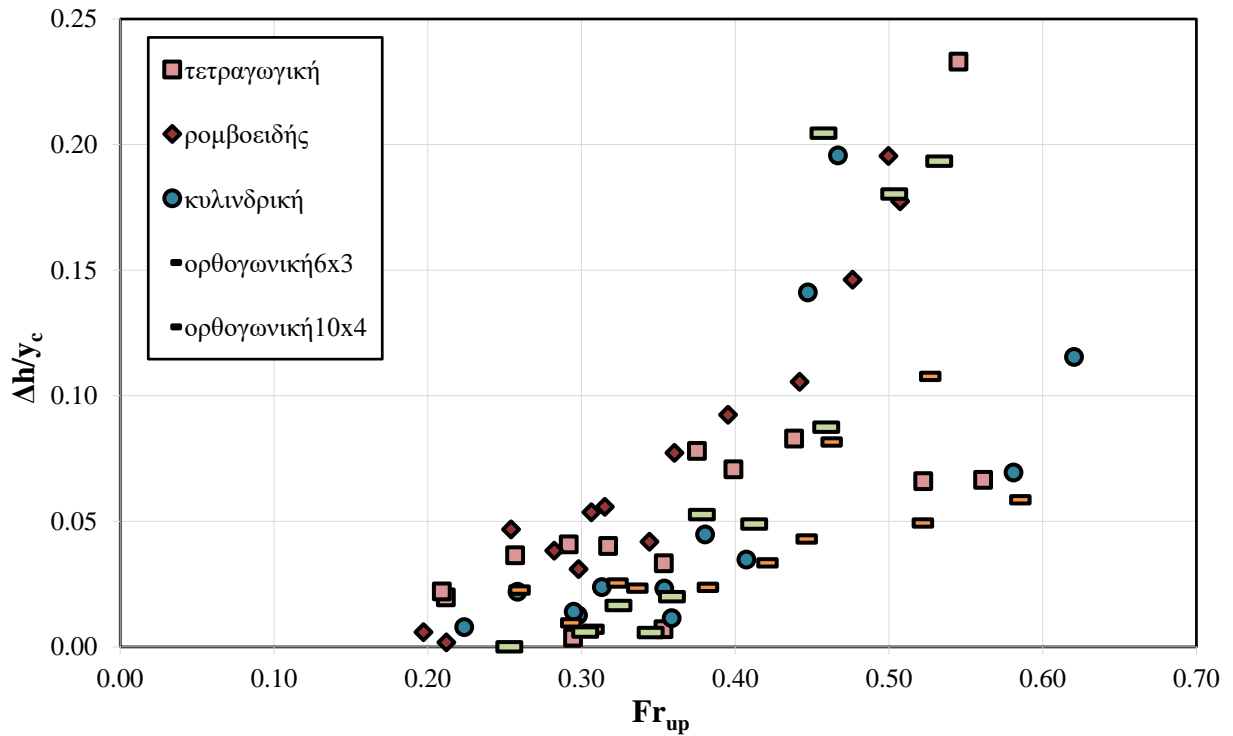


Σχήμα 5.9 Λόγος υπερύψωσης προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=3,6,9$ cm.

Συμβολίζουμε με Δh τη διαφορά βάθους ροής στα ανάντη και κατόντη του βάθρου. Η διαφορά αυτή παρουσιάζεται και πάλι συναρτήσει των αριθμών Froude με μορφή αδιαστατοποιημένων διαγραμμάτων. Το διάγραμμα για υπερχειλιστή $w=0$ (Σχήμα 5.10) παρατίθεται ξεχωριστά από το διάγραμμα με τις άλλες τρεις τιμές ύψους υπερχειλιστή (Σχήμα 5.11), επειδή για ελεύθερη υπερχείλιση η ροή στα κατόντη είναι υπερκρίσιμη και δημιουργούνται τοπικές αναταραχές που δίνουν μη αξιόπιστες μετρήσεις βάθους ροής (Σχήμα 5.12) και κατά επέκταση διαγράμματα που δεν είναι δυνατό να ερμηνευθούν και να χρησιμοποιηθούν για εξαγωγή συμπερασμάτων.



Σχήμα 5.10 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατόντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχείλισης ίσο με $w=0$ cm.

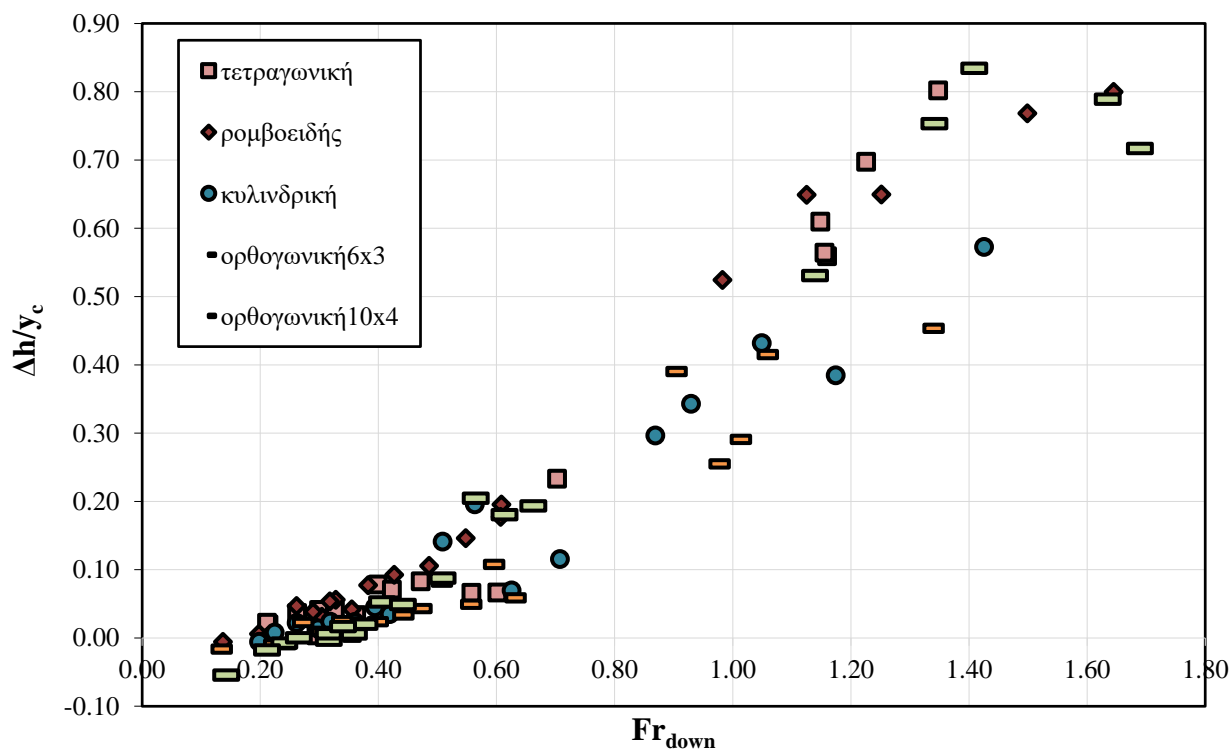


Σχήμα 5.11 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατόντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχείλισης ίσο με $w=3, 6, 9$ cm.

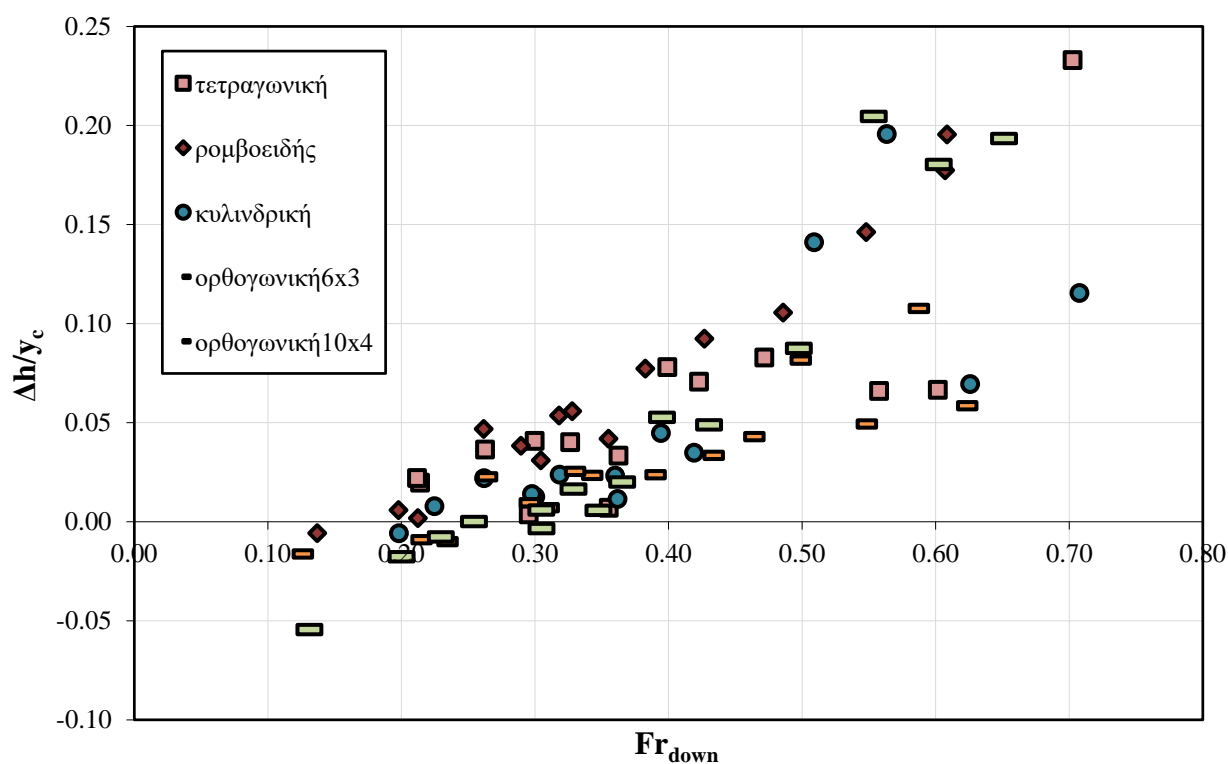


Σχήμα 5.12 Αναταραχή της ροής στα κατόντη για ύψος υπερχείλισης ίσο με $w=0$ cm, όπου εμφανίζεται υπερκρίσιμη ροή (στην εικόνα φαίνεται η κυλινδρική διατομή, αλλά η αναταραχή εμφανίζεται σε όλες τις διατομές).

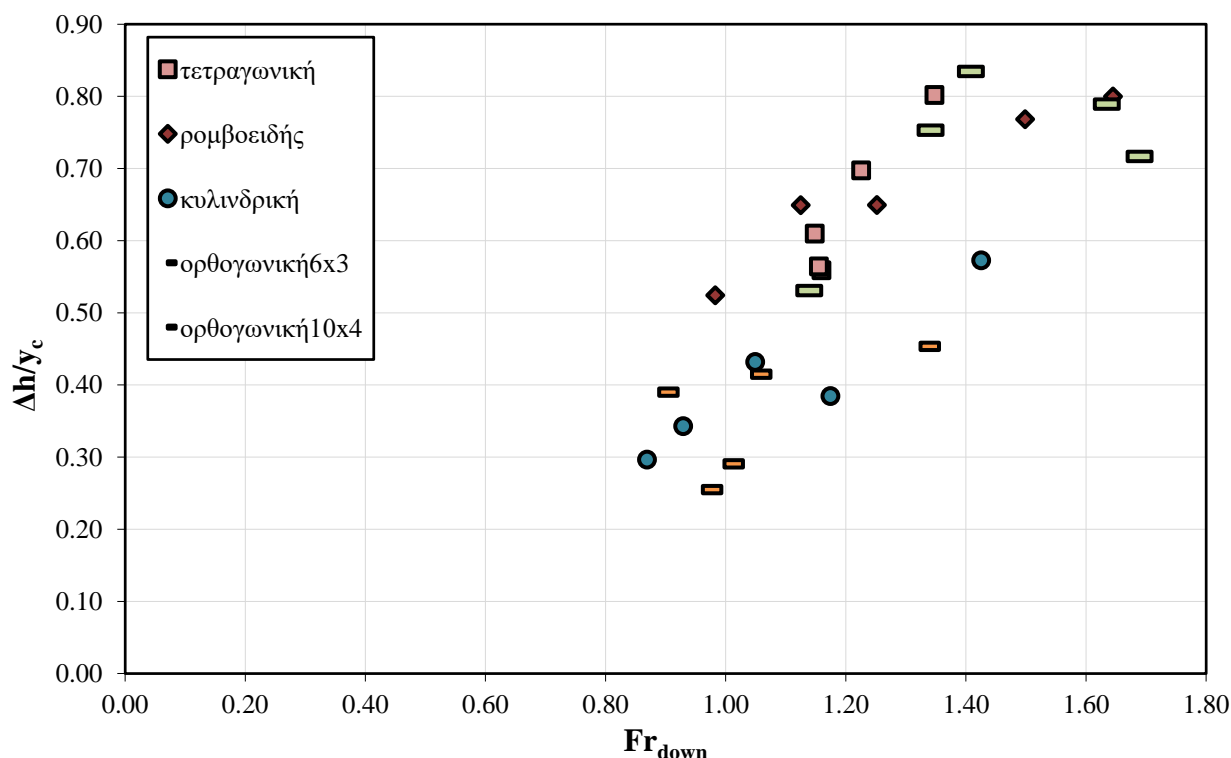
Παρακάτω παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα με τον αριθμό Froude κατόντη, τόσο συγκεντρωτικά όσο και ξεχωριστά για $w=0$ και $w=3, 6, 9$ cm.



Σχήμα 5.13 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατόντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατόντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0, 3, 6, 9$ cm.



Σχήμα 5.14 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατόντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατόντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w= 3, 6, 9$ cm.



Σχήμα 5.15 Λόγος διαφοράς βάθους ροής ανάντη και κατάντη προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλίσης ίσο με $w=0$ cm.

Παρατηρούμε ότι σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής στα κατάντη ($w=3, 6, 9$), η μεταβολή Δh πλησιάζει το 25% του κρίσιμου βάθους, ενώ σε υπερκρίσιμη ροή ($w=0$) η μεταβολή αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι το 85% του κρίσιμου βάθους. Επίσης, για υποκρίσιμη ροή φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του Fr (δηλαδή όσο μειώνεται το ύψος υπερχειλιστή), τόσο αυξάνεται και ο λόγος $\Delta h/y_c$ αν και η σχέση τους δεν είναι γραμμική.

Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών βάθρων για την ίδια περίπου τιμή του αριθμού Froude, παρατηρούμε ότι η ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών 2:1 προκαλεί τη μικρότερη διαφορά στάθμης ανάντη και κατάντη, η οποία σε όλες τις περιπτώσεις δεν είναι μεγαλύτερη από το 15% του κρίσιμου βάθους σε υποκρίσιμη ροή και το 50% σε υπερκρίσιμη.

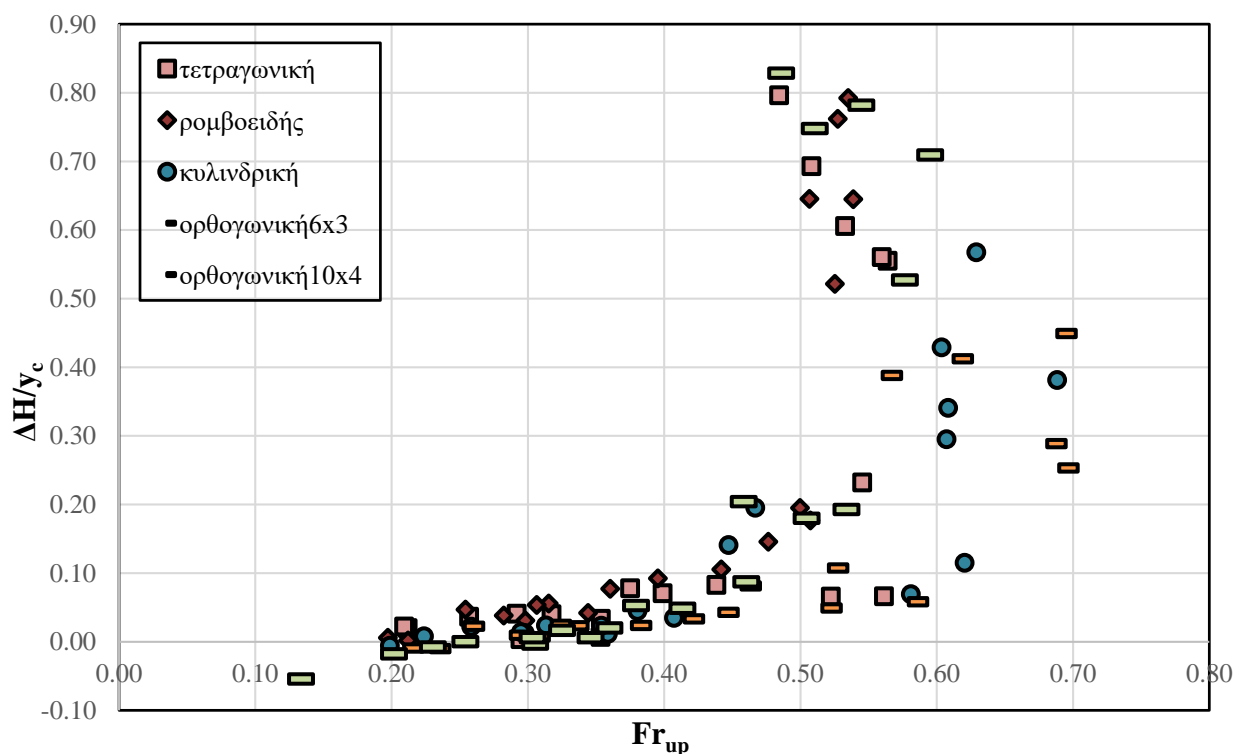
5.2 Υπολογισμός απωλειών ενέργειας με βάση τις μετρήσεις από σταθμήμετρο

Με βάση τη σχέση (3.16) και θεωρώντας συντελεστή συνόρθωσης α ίσο με τη μονάδα, εφόσον στο στάδιο αυτό δεν έχει γίνει κάποιος άλλος υπολογισμός για το α , υπολογίζονται οι απώλειες ενέργειας σε κάθε πείραμα και τα αποτελέσματα παρατίθενται αδιαστατοποιημένα συναρτήσει του αριθμού Froude.

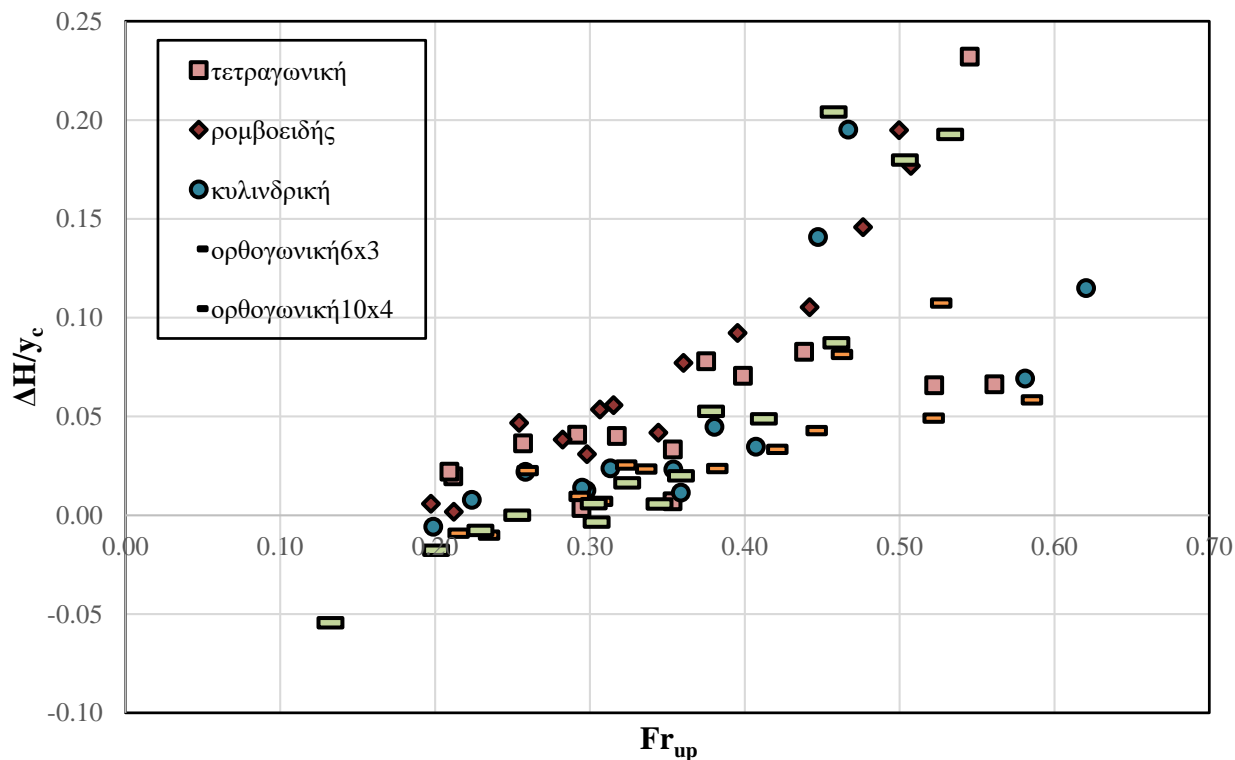
Συγκεκριμένα, από την εξίσωση ενέργειας προκύπτει

$$\Delta H_{(1-3)} = H_1 - H_3 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g} - y_3 - \frac{V_3^2}{2g} = y_1 + \frac{\left(\frac{Q}{b * y_1}\right)^2}{2g} - y_3 - \frac{\left(\frac{Q}{b * y_3}\right)^2}{2g} \quad (5.1)$$

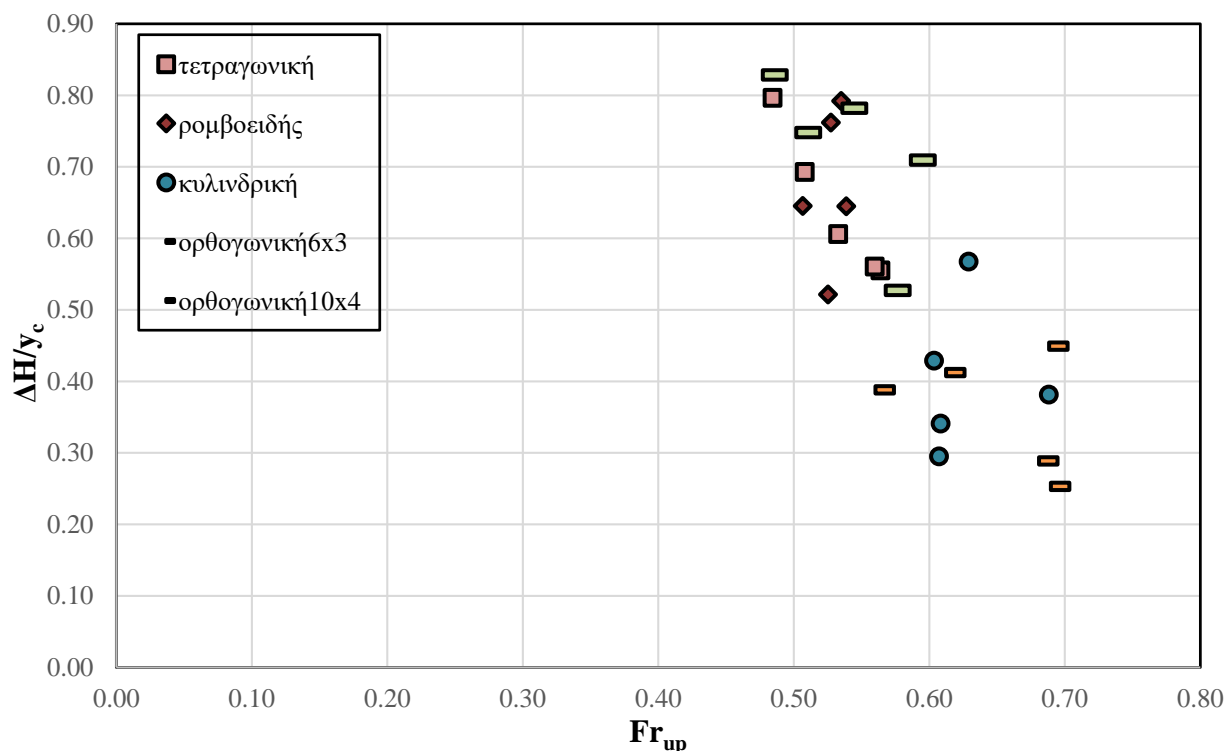
Όπου y_1 θεωρούμε το μετρημένο βάθος ροής στα ανάντη και y_3 στα κατόντη.



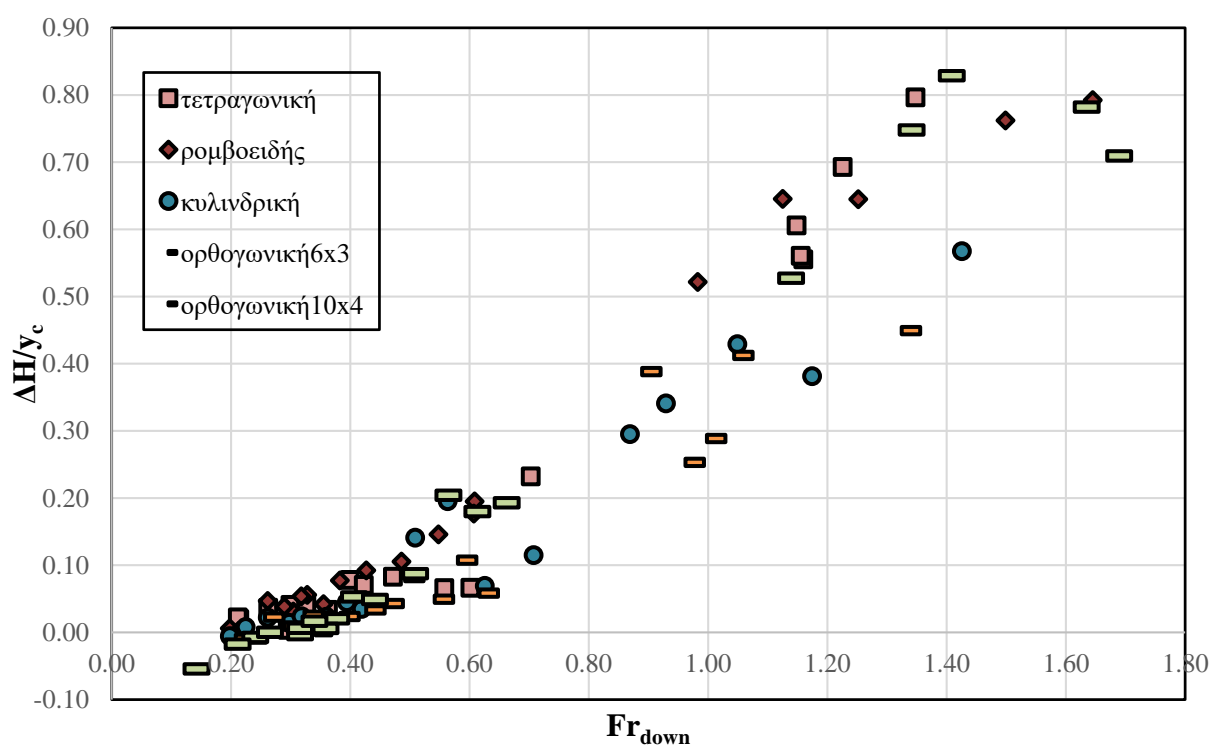
Σχήμα 5.16 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη ($w=0, 3, 6, 9$ cm).



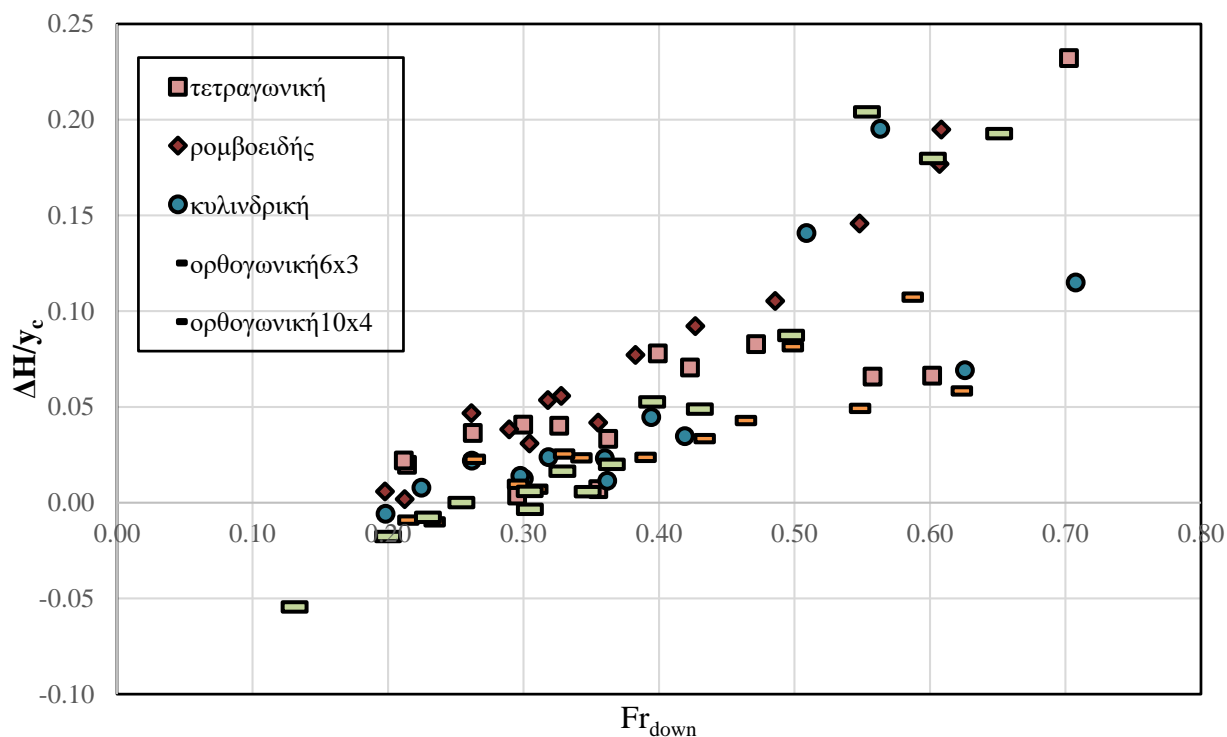
Σχήμα 5.17 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm (δηλαδή υποκρίσιμη ροή στα κατόντη).



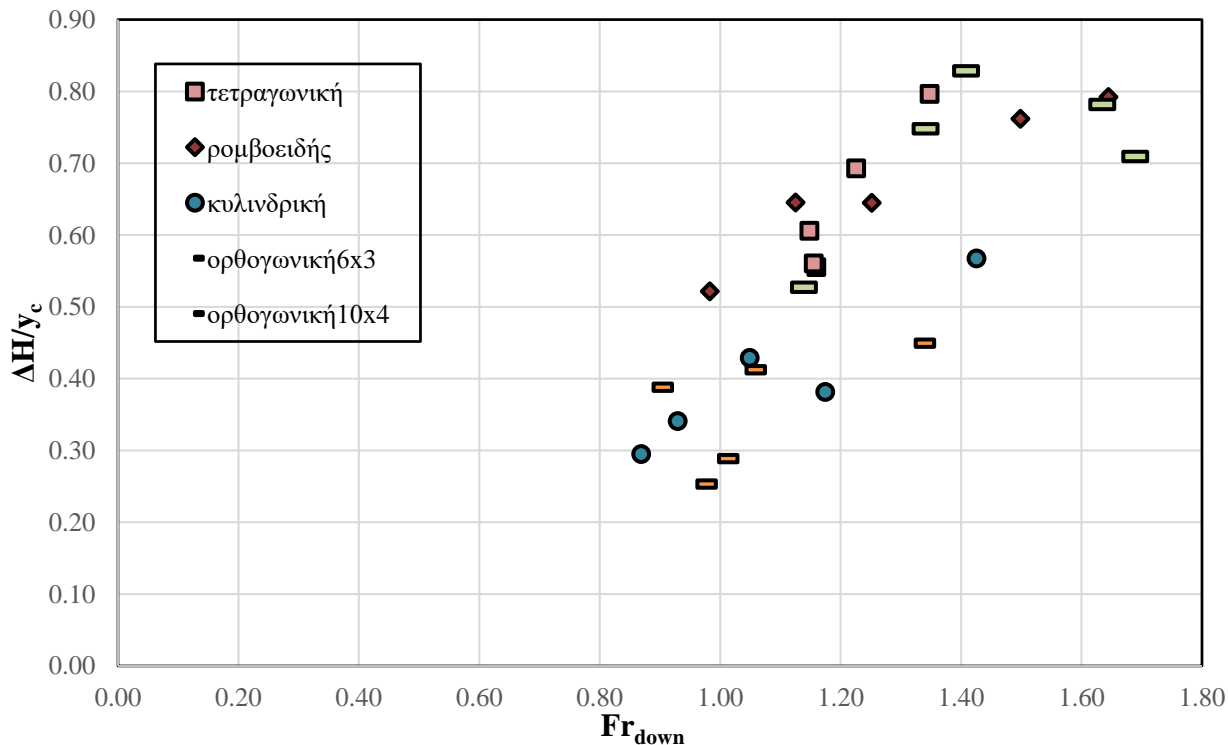
Σχήμα 5.18 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm (δηλαδή υπερκρίσιμη, υποκρίσιμη ροή στα κατάντη).



Σχήμα 5.19 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη ($w=0, 3, 6, 9$ cm).



Σχήμα 5.20 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm (δηλαδή υποκρίσιμη ροή στα κατάντη).



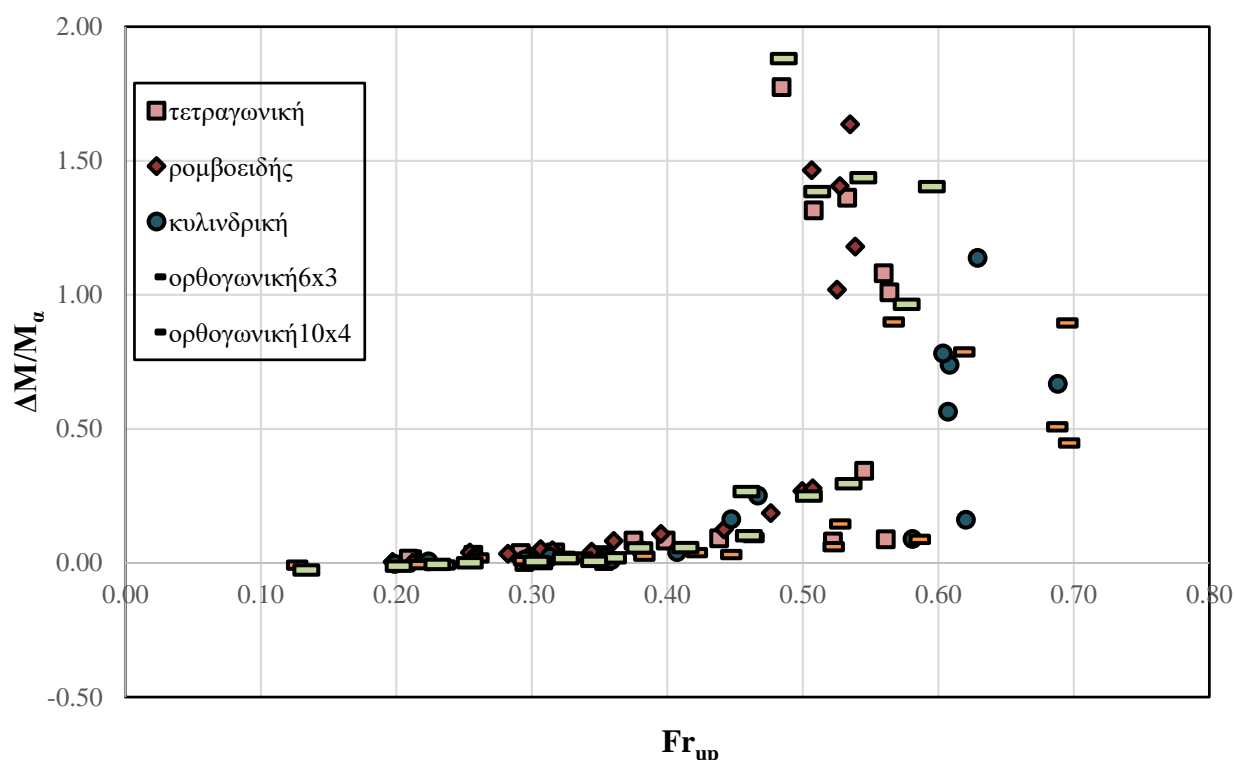
Σχήμα 5.21 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm (δηλαδή υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη ροή στα κατάντη).

Παρατηρούμε ότι οι απώλειες ενέργειας αυξάνονται όσο αυξάνεται η τιμή του Froude ανάντη για $w=3, 6, 9$ cm, δηλαδή για υποκρίσιμη ροή στα κατάντη του βάθρου. Για υπερκρίσιμη ροή στα κατάντη, οι απώλειες ενέργειας αυξάνονται όσο μειώνεται ο αριθμός Fr_{up} . Σε ό,τι αφορά τον Fr_{down} , οι απώλειες ενέργειας αυξάνονται όσο αυξάνεται η τιμή του για όλα τα ύψη υπερχειλιστή.

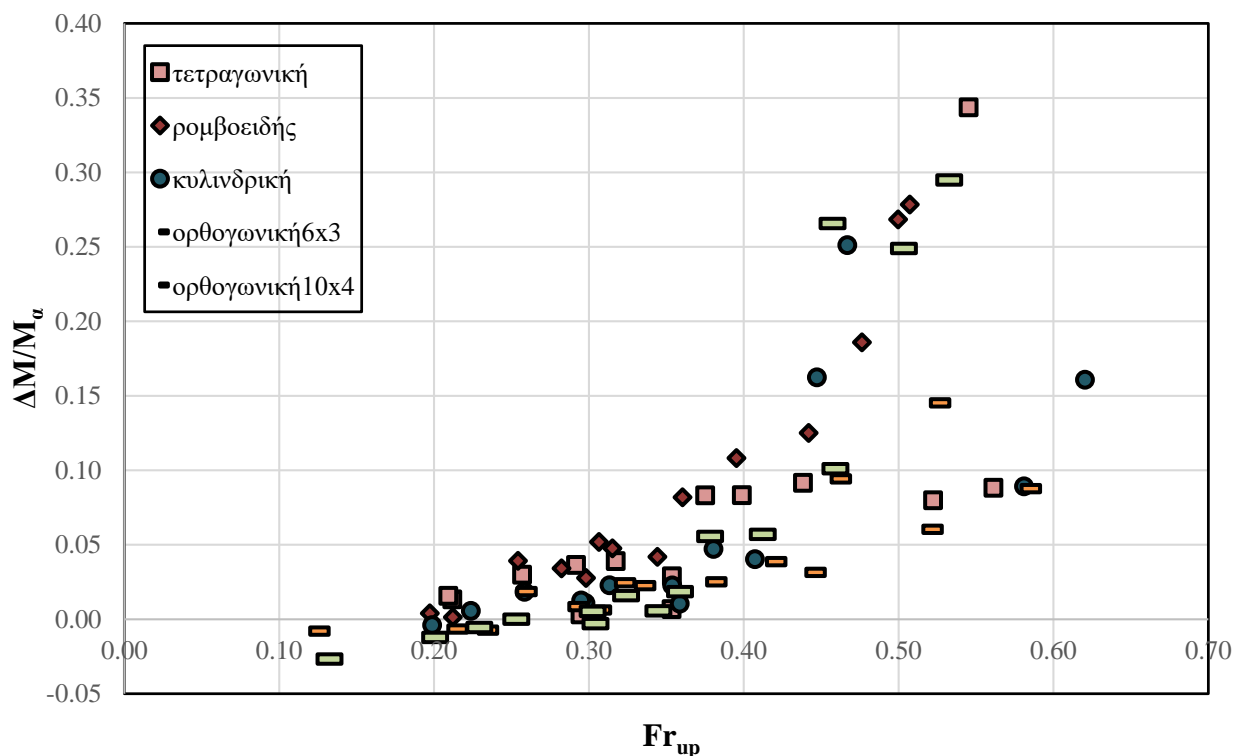
Επιπλέον, παρατηρούμε ότι για την ίδια τιμή του αριθμού Froude, η τετραγωνική διατομή και η ρομβοειδής διατομή προκαλούν τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας, ενώ η ορθογωνική διατομή με λόγο 2:1 προκαλεί και πάλι τις μικρότερες απώλειες σε σχέση με τα υπόλοιπα σχήματα.

5.3 Υπολογισμός μεταβολής ειδικής δύναμης με βάση τις μετρήσεις από σταθμήμετρο

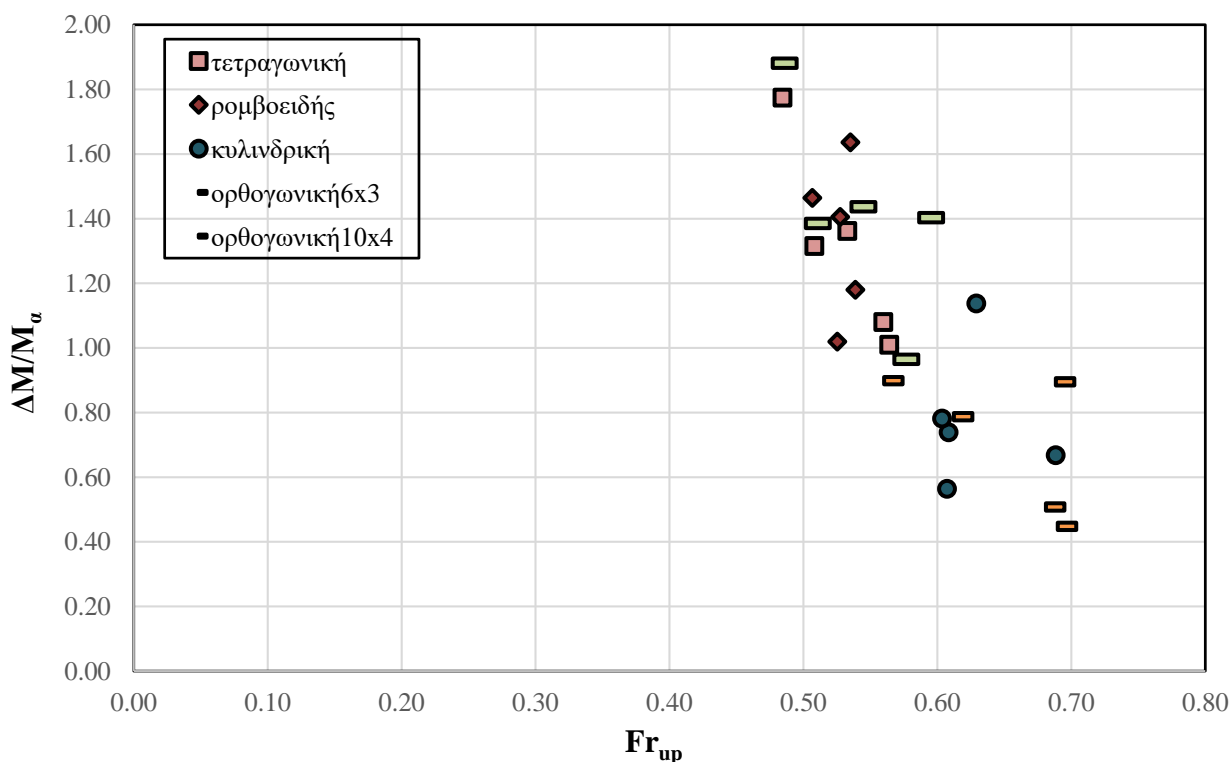
Η ειδική δύναμη υπολογίζεται με βάση τη σχέση (3.22) για κάθε μία από τις δύο διατομές στις οποίες έχουν γίνει μετρήσεις με το σταθμήμετρο. Παράλληλα, υπολογίζεται και η ειδική δύναμη με βάση τα χαρακτηριστικά της αδιατάρακτης ροής. Οι υπολογισμοί αυτοί παρουσιάζονται αδιαστατοποιημένοι ως ο λόγος της διαφοράς των ειδικών δυνάμεων στις δύο διατομές (ΔM) προς την ειδική δύναμη της αδιατάρακτης ροής (M_a) συναρτήσει του αριθμού Froude.



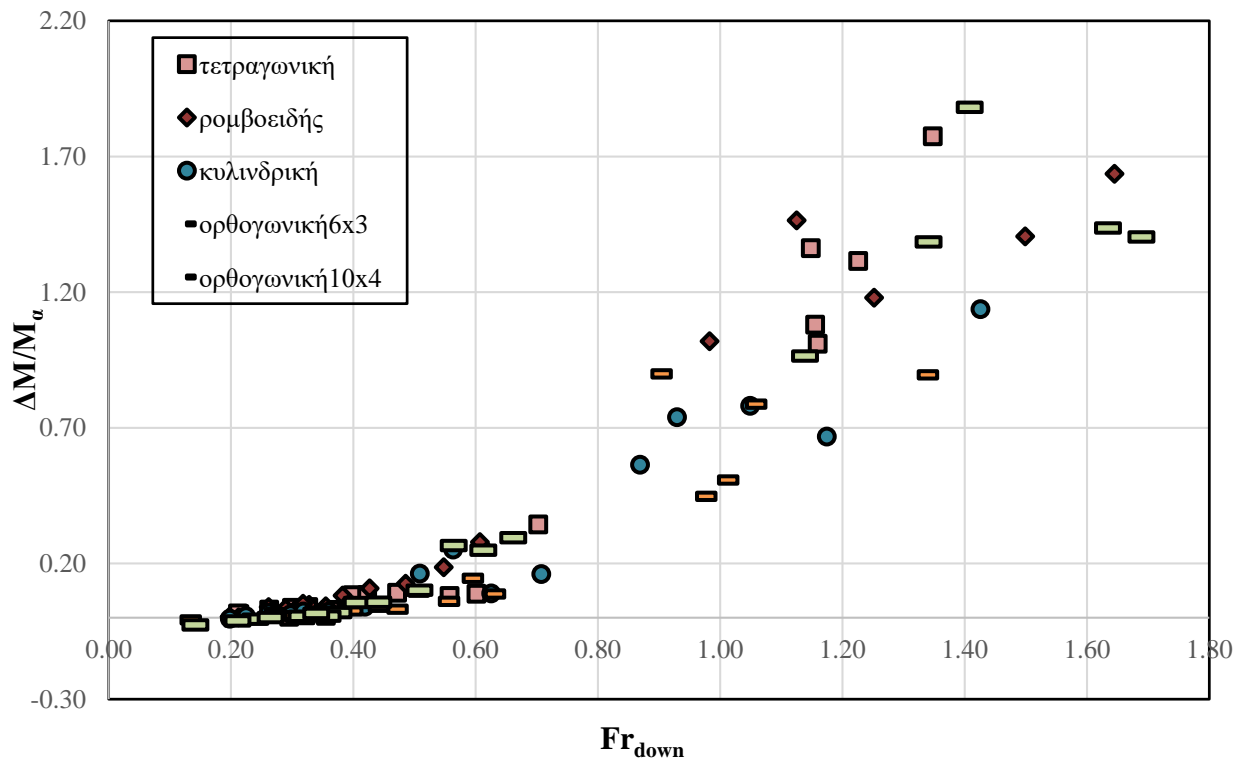
Σχήμα 5.22 Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη ($w=0, 3, 6, 9$ cm).



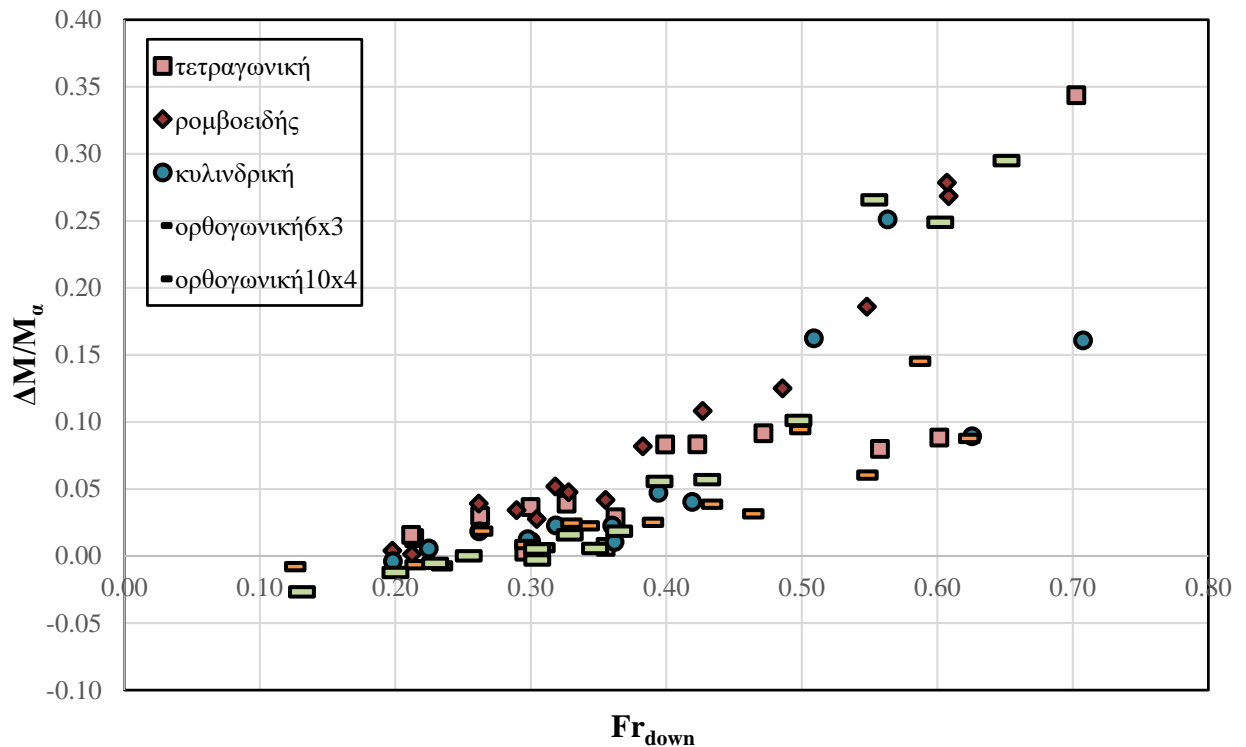
Σχήμα 5.23 Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για $w=3, 6, 9$ cm (υποκρίσιμη ροή στα κατόντη).



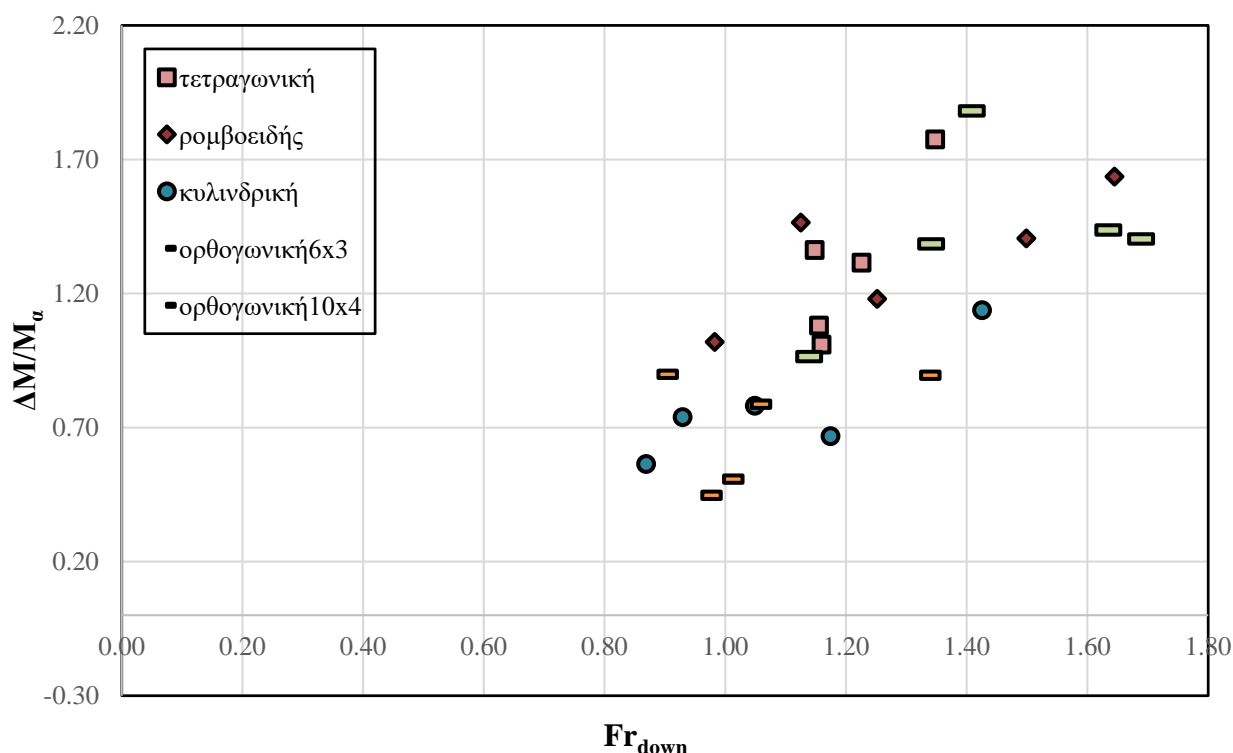
Σχήμα 5.24 Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για $w=0$ cm (υποκρίσιμη, υπερκρίσιμη ροή στα κατόντη).



Σχήμα 5.25 Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για $w=0, 3, 6, 9$ cm.



Σχήμα 5.26 Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για $w=3, 6, 9$ cm (υποκρίσιμη ροή στα κατάντη).



Σχήμα 5.27 Λόγος διαφοράς ειδικών δυνάμεων προς ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για $w=0$ cm (υπερκρίσιμη, υποκρίσιμη ροή στα κατάντη).

Παρατηρούμε ότι για υποκρίσιμη ροή, η διαφορά των ειδικών δυνάμεων δεν ξεπερνάει το 35% της ειδική δύναμης σε αδιατάρακτη ροή. Ωστόσο, σε συνθήκες ελεύθερης υπερχείλισης ($w=0$), η διαφορά των ειδικών δυνάμεων είναι πιθανό να γίνει διπλάσια της ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή αν εμφανιστούν υπερκρίσιμες συνθήκες ροής. Ο λόγος $\Delta M/M_u$ αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Froude ανάντη και κατάντη για υποκρίσιμες συνθήκες ροής (Σχήμα 5.23, Σχήμα 5.26).

5.4 Υπολογισμός κατανομής ταχυτήτων, παροχής, συντελεστών συνόρθωσης και αντίστασης

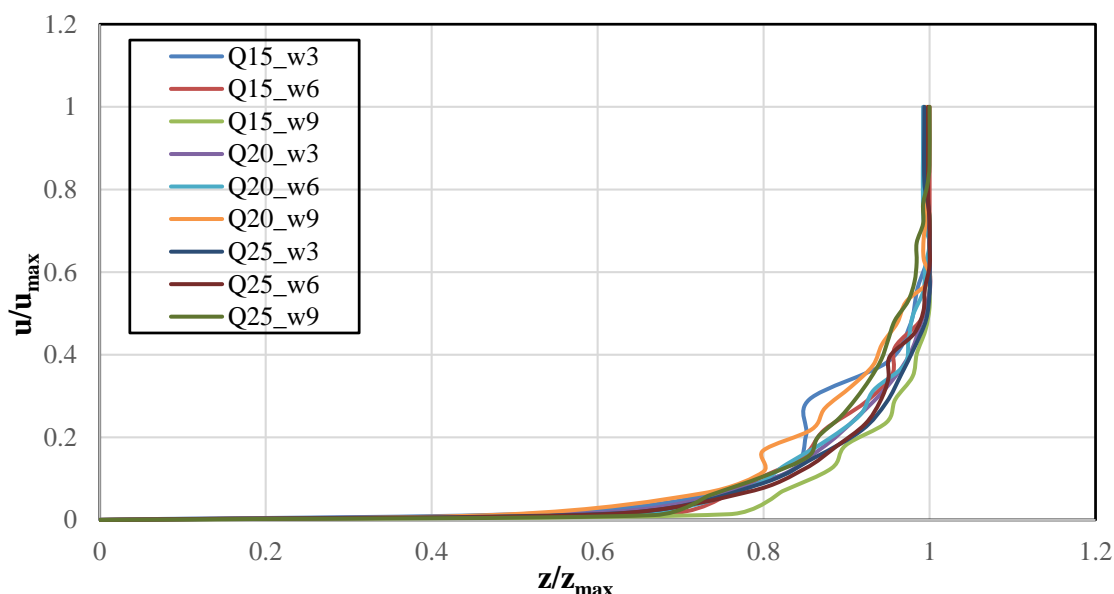
Από τις μετρήσεις με σωλήνα Pitot υπολογίζεται η σημειακή ταχύτητα ανά 1 cm στον κατακόρυφο άξονα μιας εγκάρσιας διατομής στα ανάντη και μιας στα κατάντη. Επίσης, υπολογίζεται και η οριζόντια σημειακή ταχύτητα στη διατομή αυτή ανά 2 cm.

5.4.1 Κατανομές ταχυτήτων

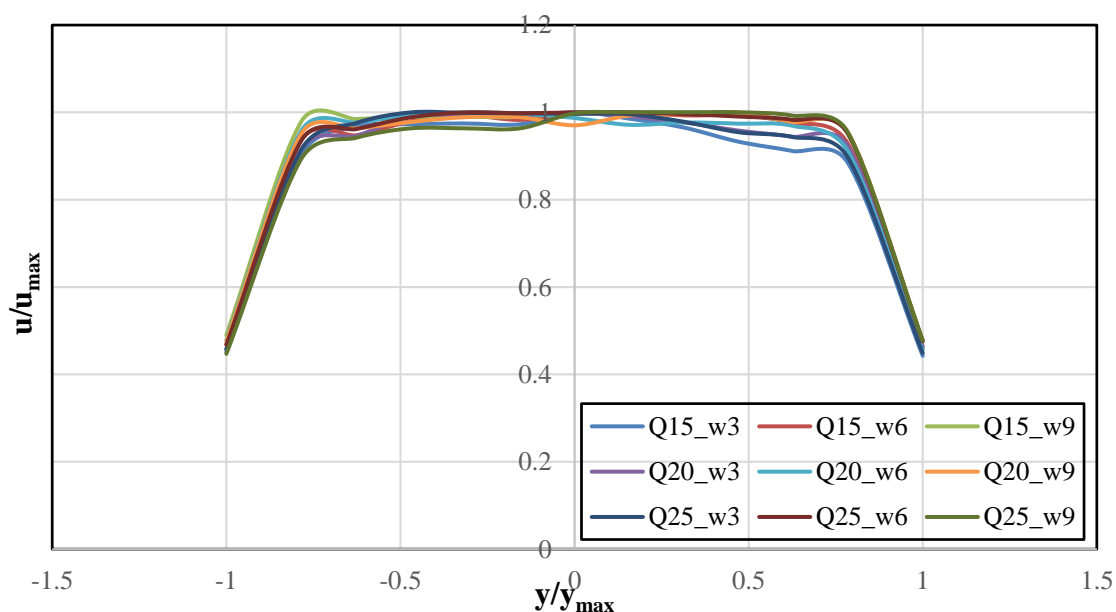
Στα άκρα της διατομής, δηλαδή στην επιφάνεια, στον πυθμένα και στα δύο πλευρικά τοιχώματα, όπου δεν είναι δυνατό να ληφθεί μέτρηση, γίνονται παραδοχές ως προς την τιμή της ταχύτητας. Συγκεκριμένα, στην επιφάνεια θεωρείται σημειακή ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του σημείου που μετρήθηκε ακριβώς πριν την επιφάνεια, ενώ στον πυθμένα η

ταχύτητα θεωρείται μηδενική. Σε ό,τι αφορά την οριζόντια ταχύτητα, θεωρούμε ότι στα τοιχώματα η ταχύτητα είναι ίση με το $\frac{1}{2}$ της ταχύτητας που μετράται στο αμέσως προηγούμενο σημείο. Οι παραδοχές αυτές χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία της κατανομής ταχυτήτων και την ολοκλήρωσή της για την εξαγωγή σημαντικών μεγεθών. Οι κατανομές ταχυτήτων αδιαστατοποιούνται ως προς τη μέγιστη ταχύτητα και κατακόρυφη ή οριζόντια απόσταση και τα διαγράμματα τους δίνονται παρακάτω.

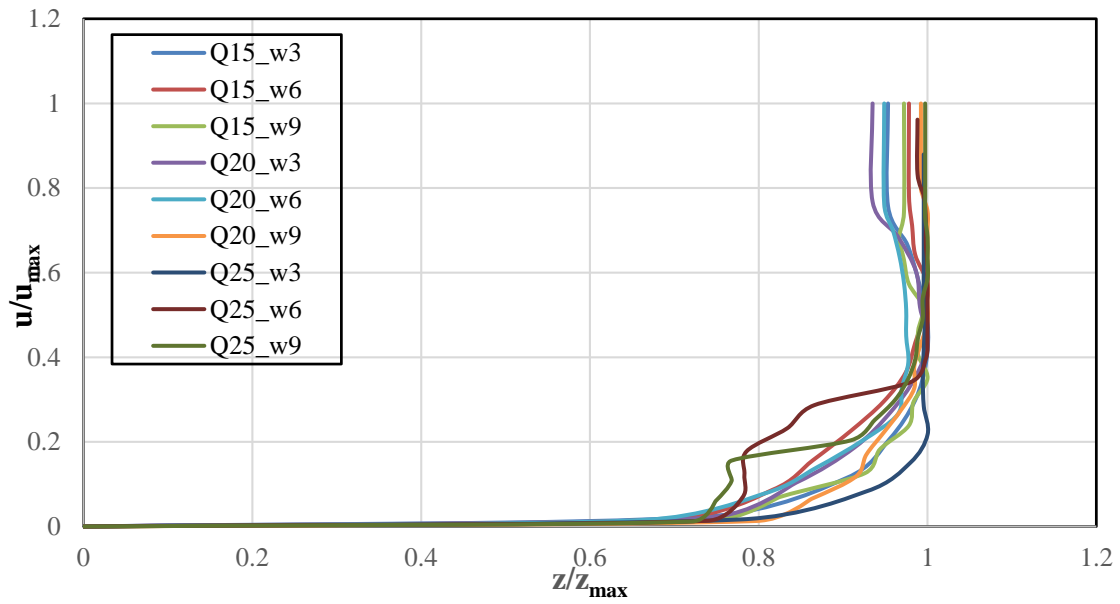
(α) Τετραγωνική διατομή



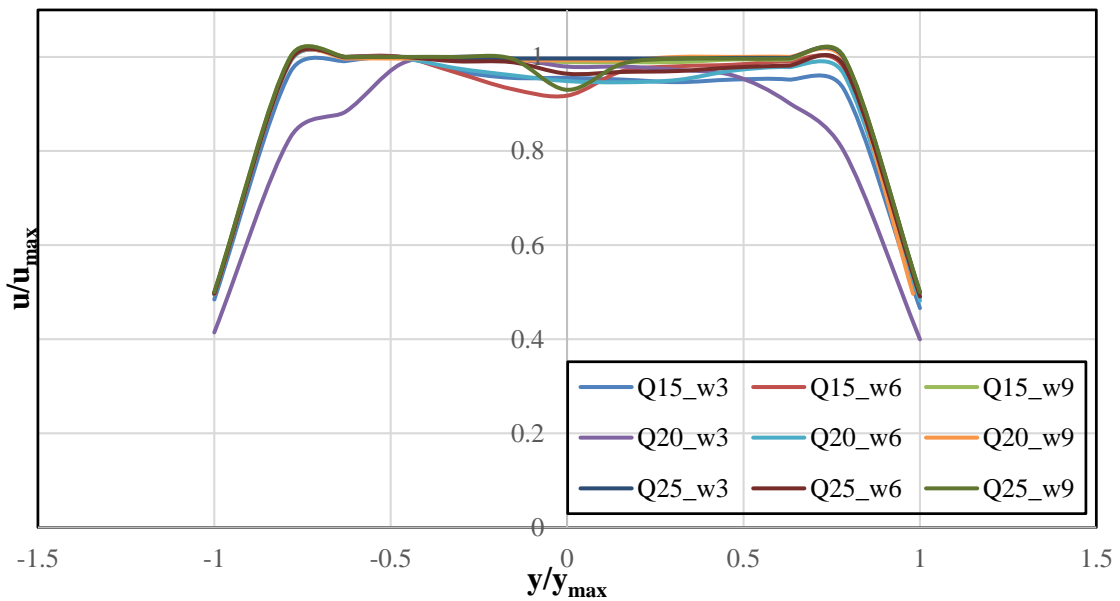
Σχήμα 5.28 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 30 cm ανάντη τετραγωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).



Σχήμα 5.29 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 30 cm ανάντη τετραγωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

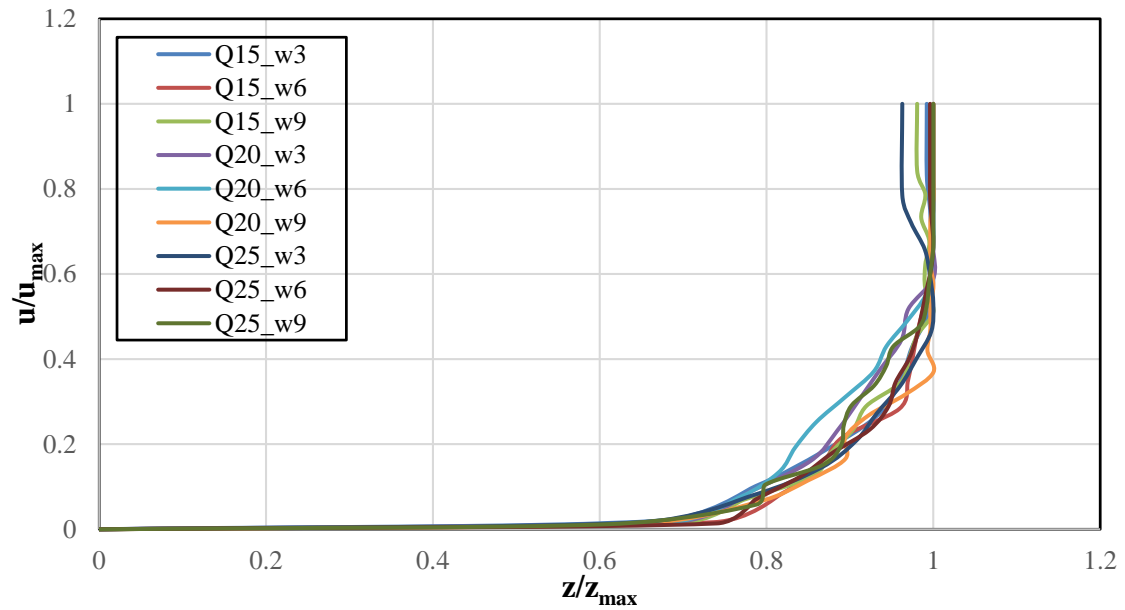


Σχήμα 5.30 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 60 cm κατάντη τετραγωνικού βάρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

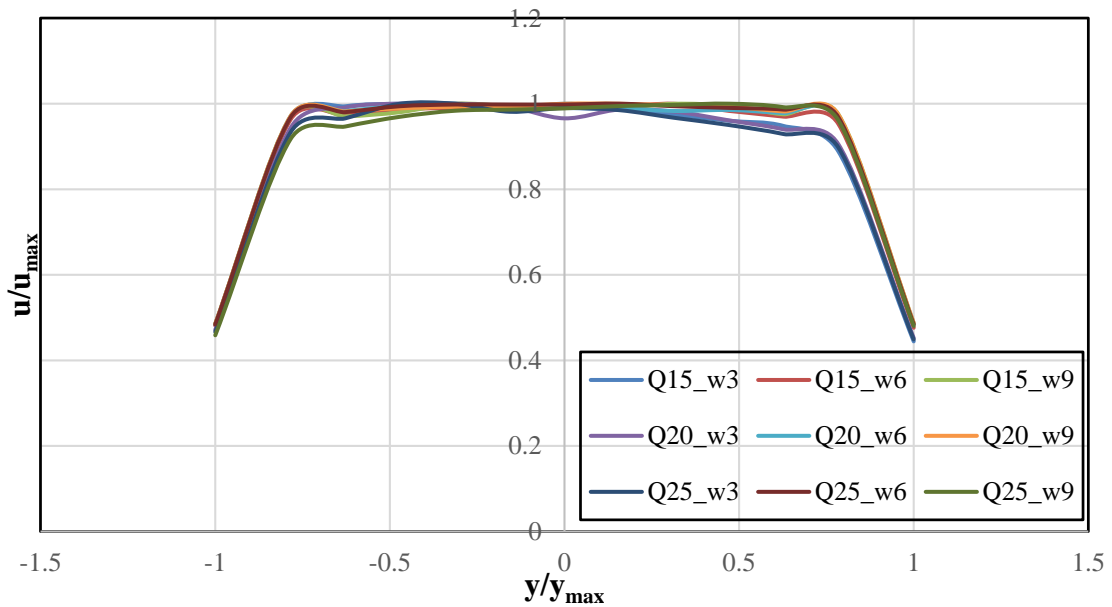


Σχήμα 5.31 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 60 cm κατάντη τετραγωνικού βάρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

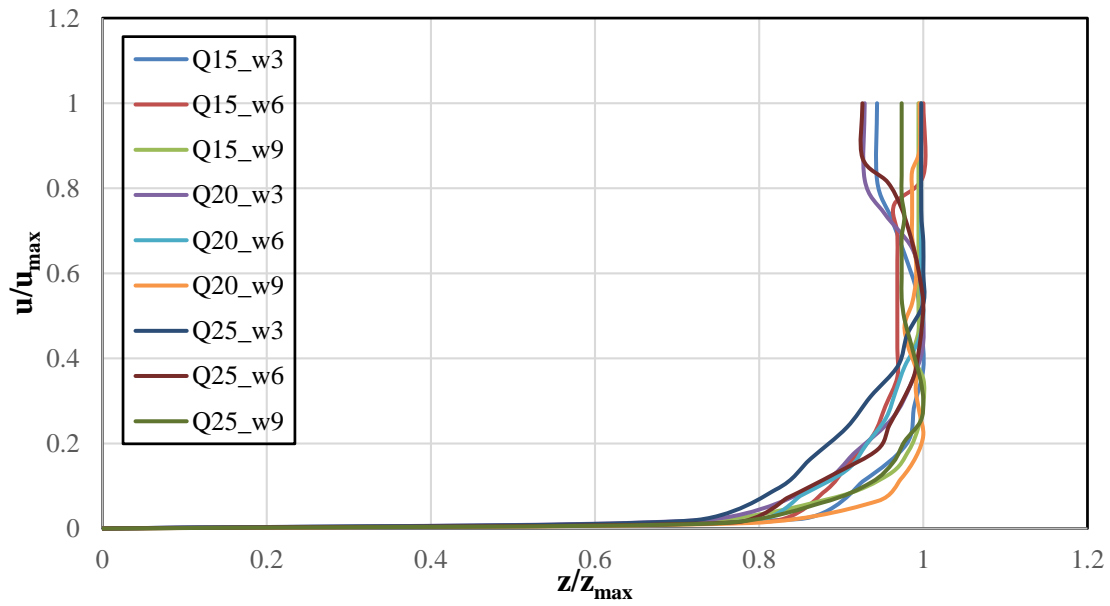
(β) Ρομβοειδής διατομή



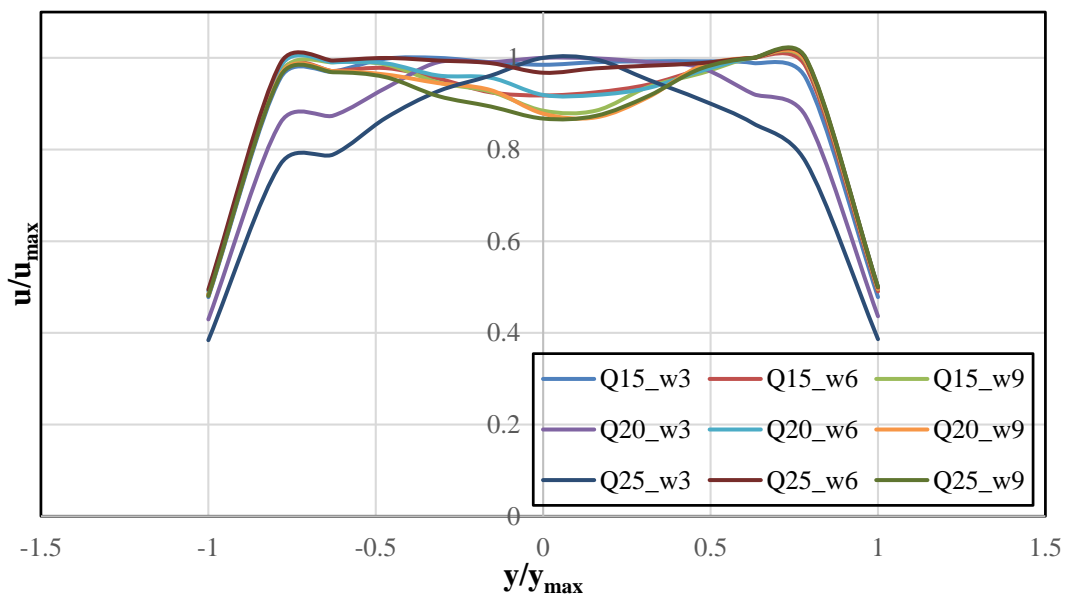
Σχήμα 5.32 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 30 cm ανάντη ρομβοειδούς βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).



Σχήμα 5.33 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 30 cm ανάντη ρομβοειδούς βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

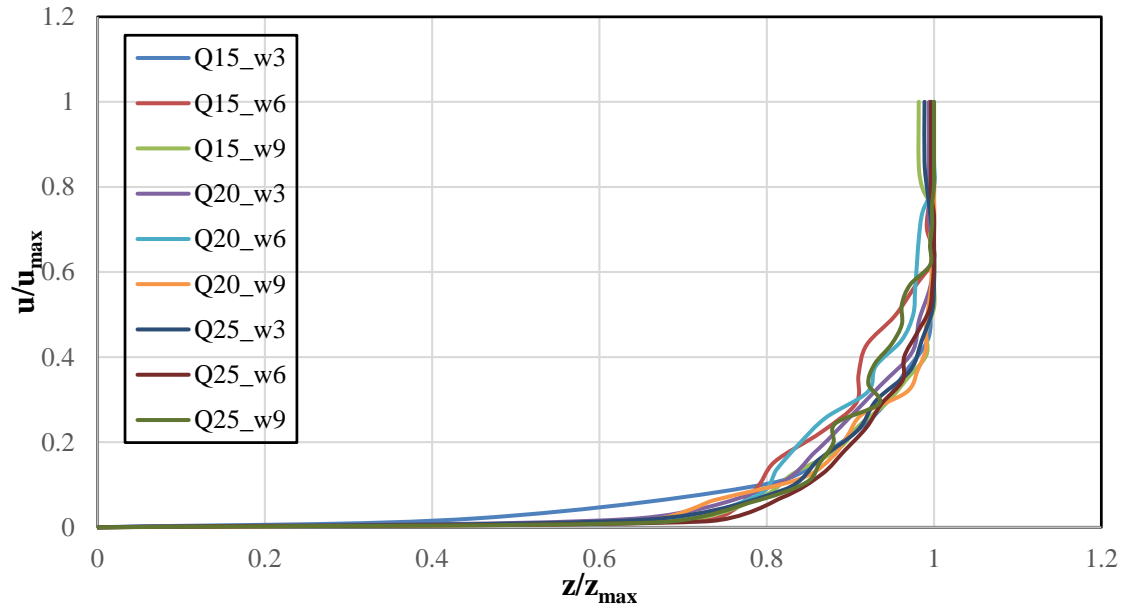


Σχήμα 5.34 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 60 cm κατάντη ρομβοειδούς βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

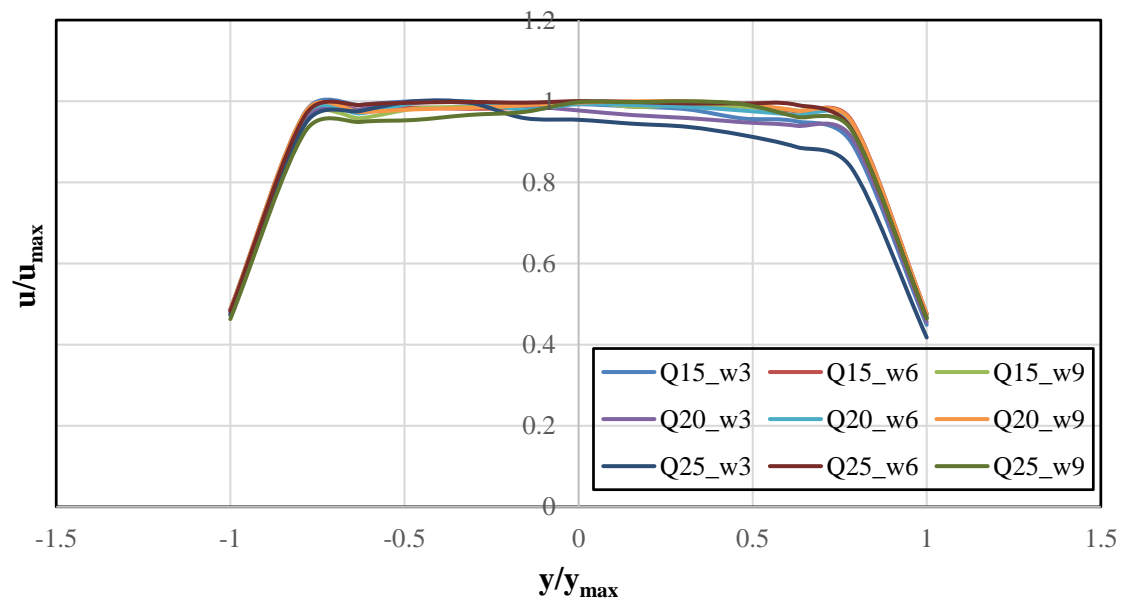


Σχήμα 5.35 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 60 cm κατάντη ρομβοειδούς βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

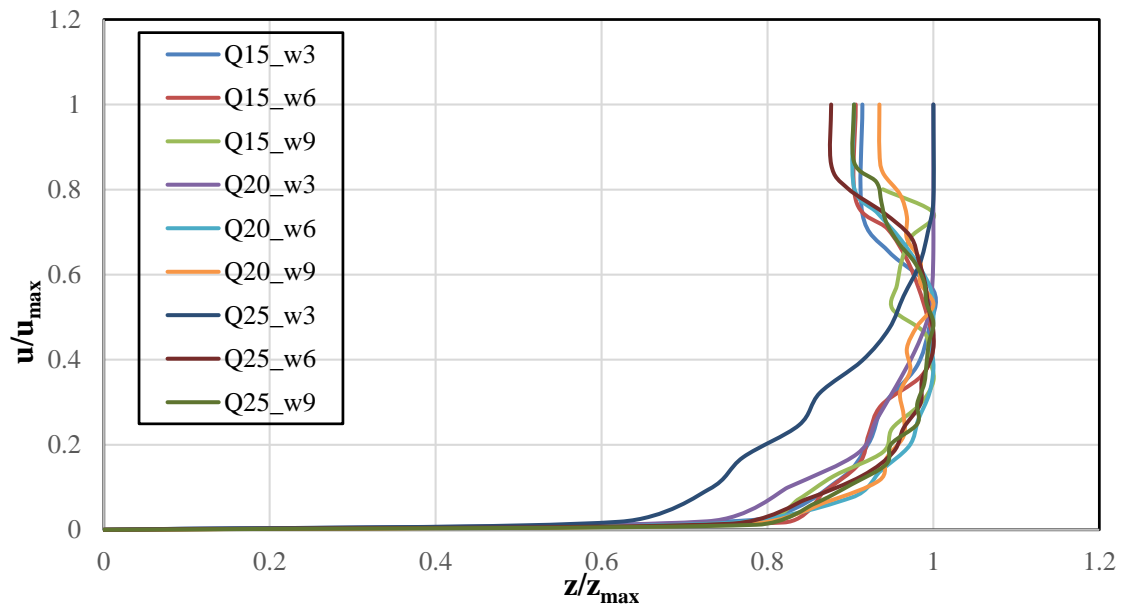
(γ) Κυλινδρική διατομή



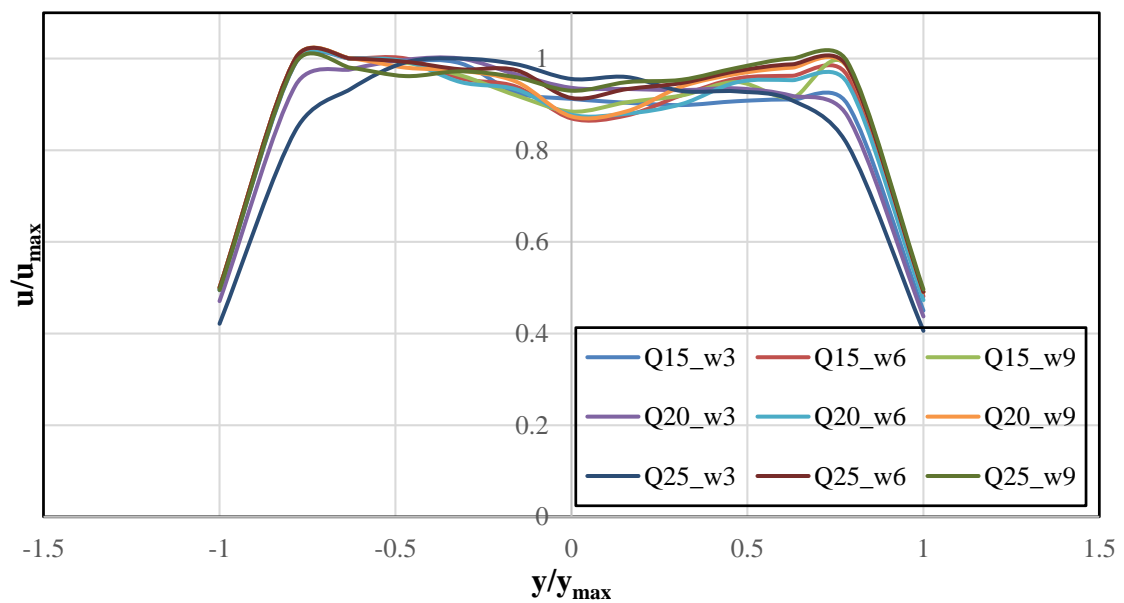
Σχήμα 5.36 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 30 cm ανάντη κυλινδρικού βάρους (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).



Σχήμα 5.37 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 30 cm ανάντη κυλινδρικού βάρους (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

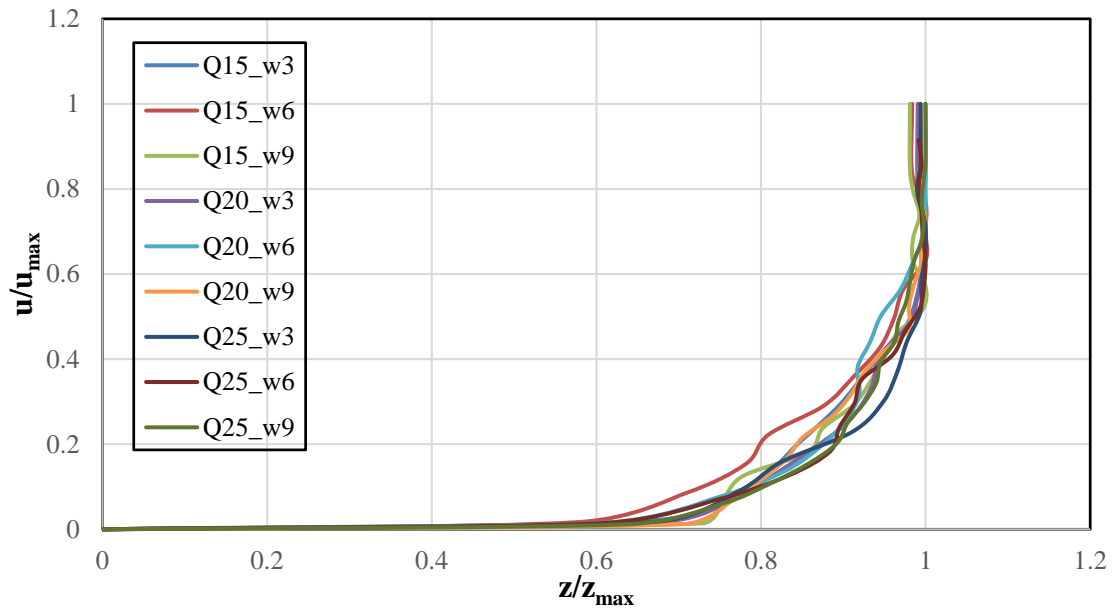


Σχήμα 5.38 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 60 cm κατάντη κυλινδρικού βάρους (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

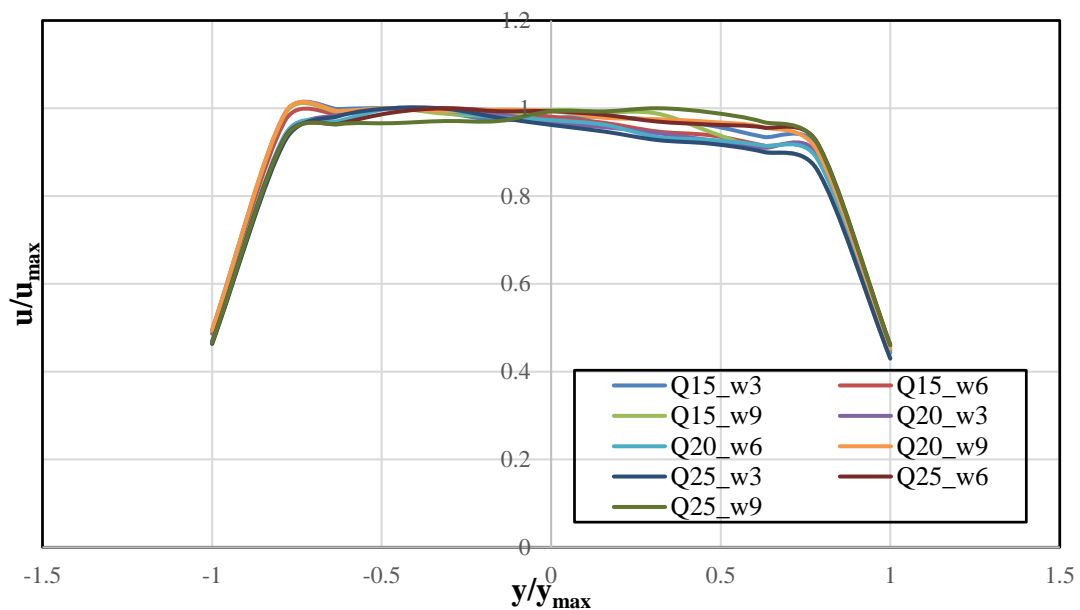


Σχήμα 5.39 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 60 cm κατάντη κυλινδρικού βάρους (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

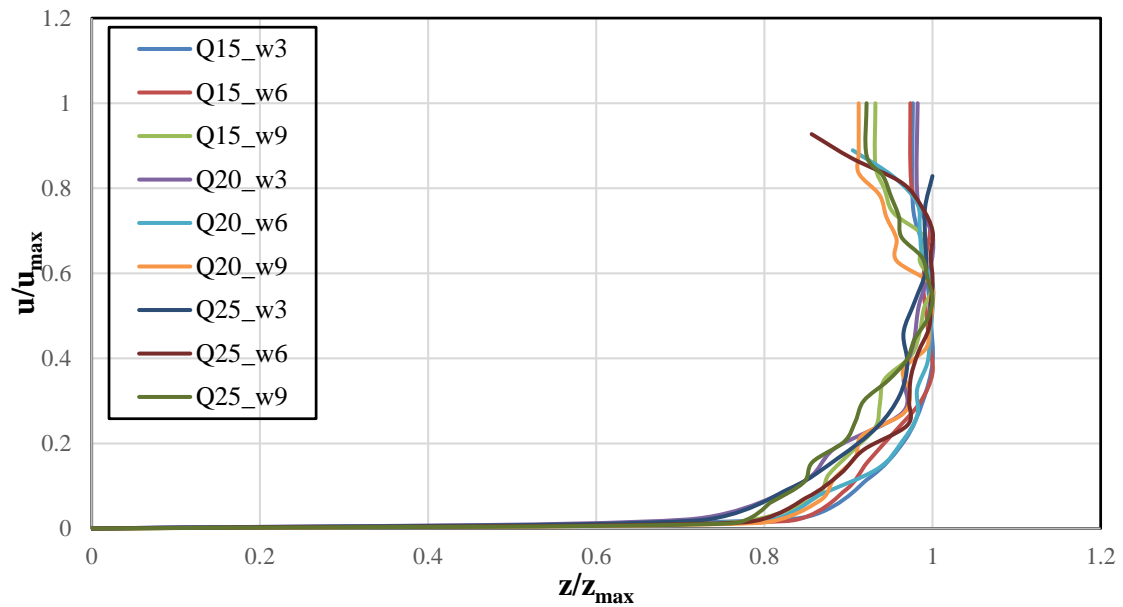
(δ) Ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών 2:1



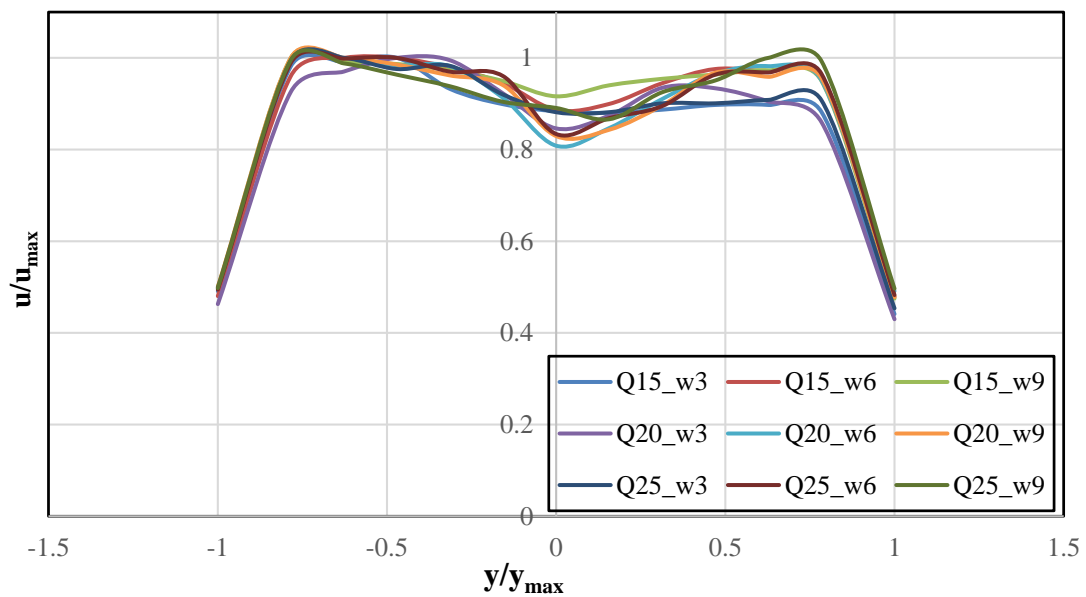
Σχήμα 5.40 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 30 cm ανάντη ορθογωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).



Σχήμα 5.41 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 30 cm ανάντη ορθογωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

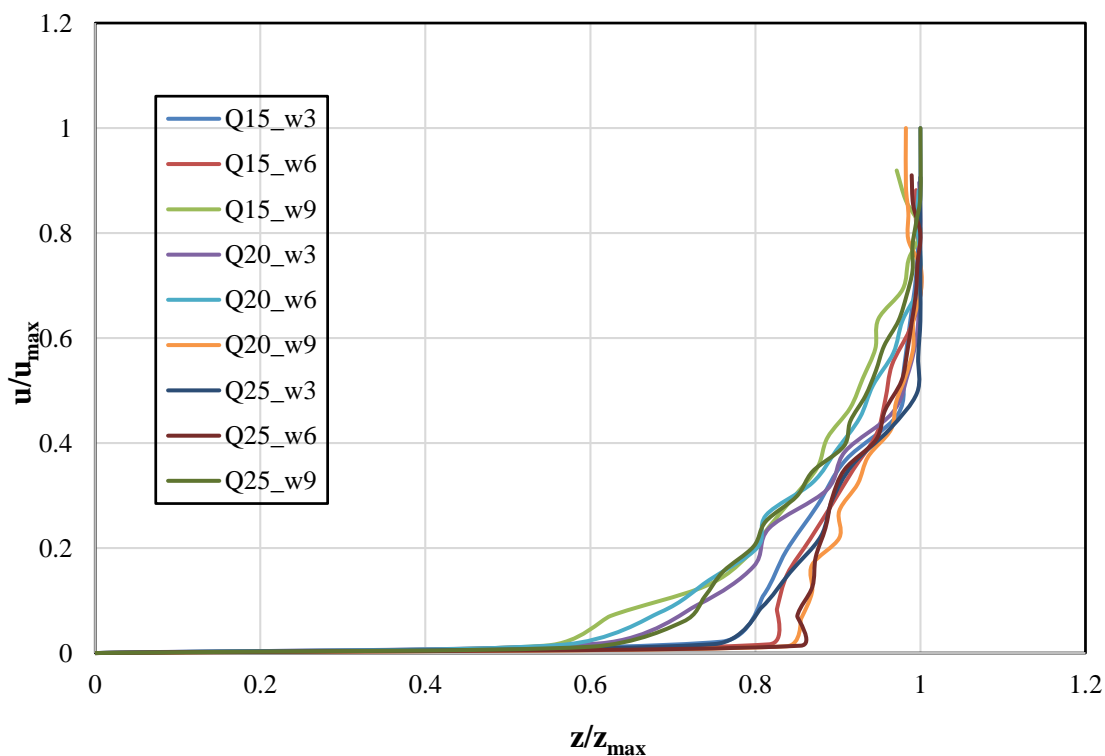


Σχήμα 5.42 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 60 cm κατάντη ορθογωνικού βάρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

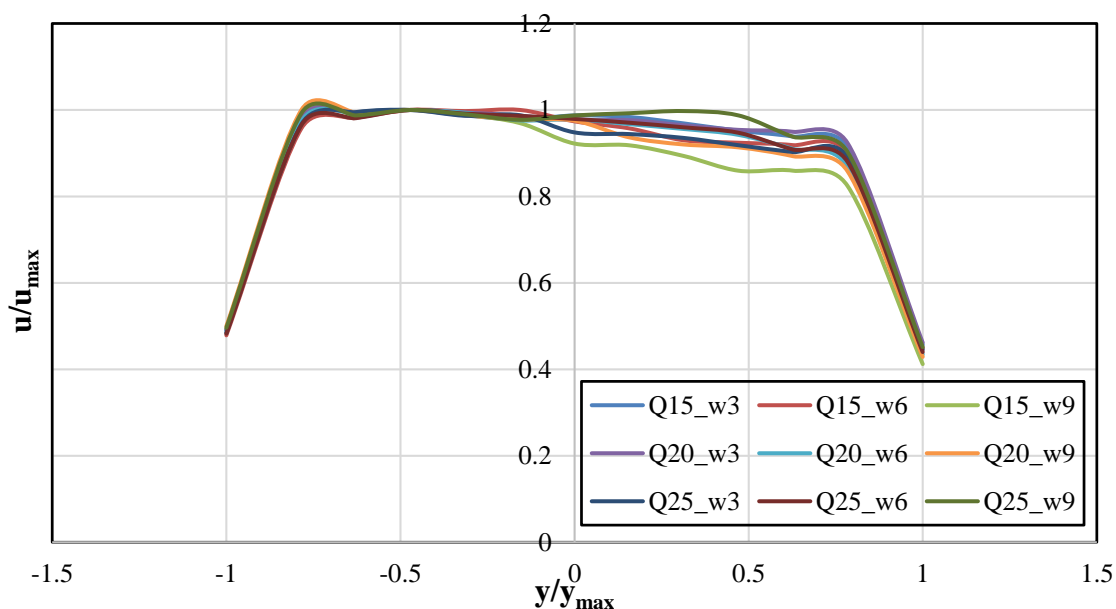


Σχήμα 5.43 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 60 cm κατάντη ορθογωνικού βάρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

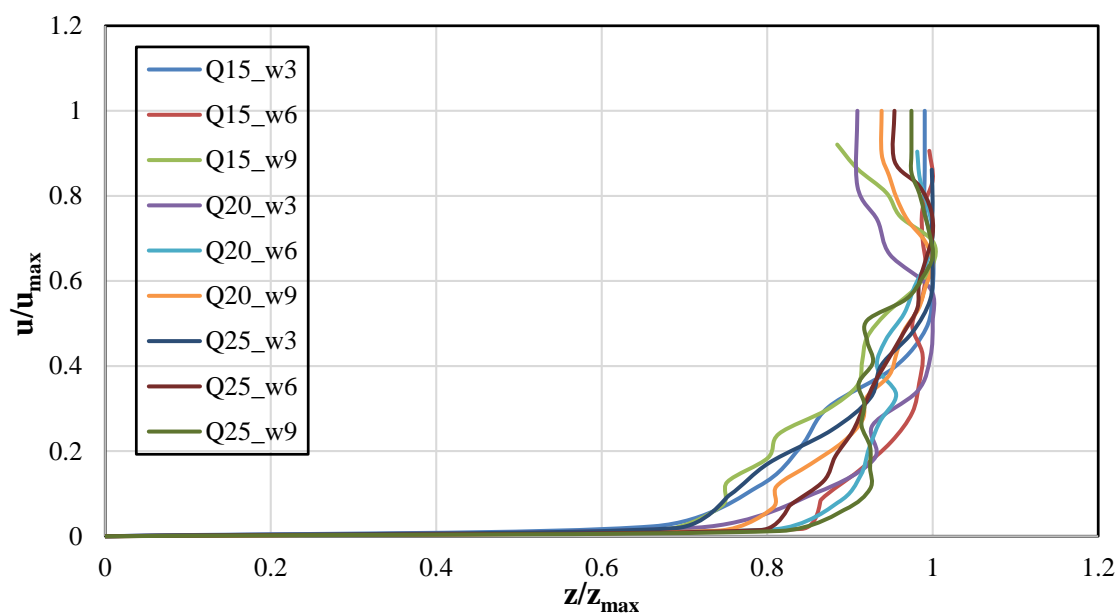
(ε) Ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών 2.5:1



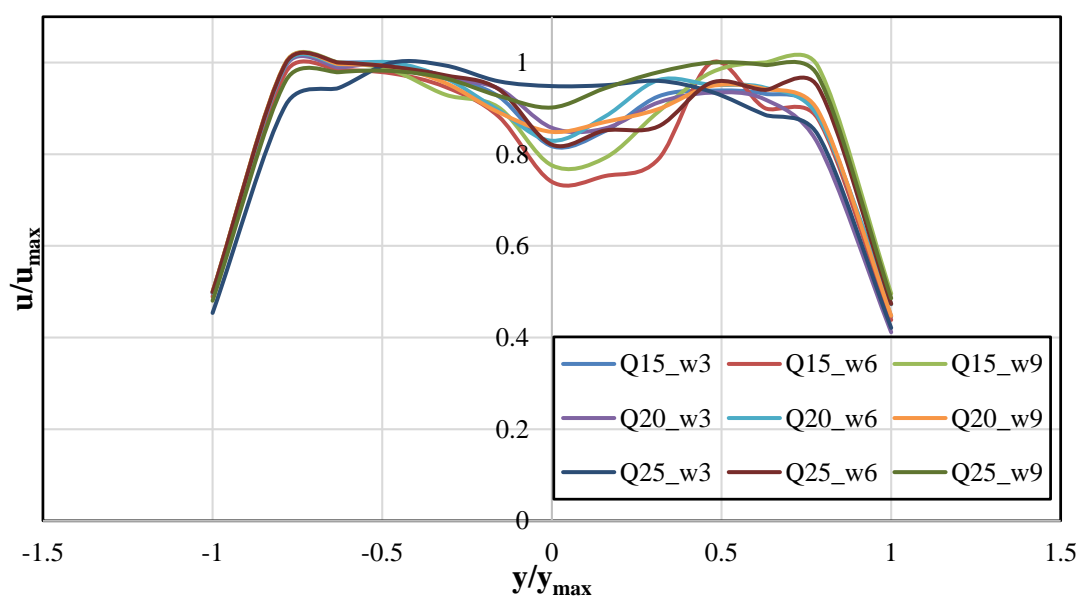
Σχήμα 5.44 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 30 cm ανάντη ορθογωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).



Σχήμα 5.45 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένη σε 30 cm ανάντη ορθογωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).



Σχήμα 5.46 Αδιαστατοποιημένη κατανομή κατακόρυφης ταχύτητας (u_x) μετρημένη σε 60 cm κατάντη ορθογωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).



Σχήμα 5.47 Αδιαστατοποιημένη κατανομή οριζόντιας ταχύτητας (u_y) μετρημένης σε 60 cm κατάντη ορθογωνικού βάθρου (Q η ονομαστική παροχή, w ύψος υπερχειλιστή).

Παρατηρούμε ότι η οριζόντια ταχύτητα στα κατάντη του βάθρου εμφανίζει ένα συγκεκριμένο μοτίβο «δύο κορυφών» αριστερά και δεξιά του άξονα της εγκάρσιας διατομής. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στις περιοχές εμφάνισης των κορυφών και όχι στον άξονα. Αντίθετα, το οριζόντιο προφίλ ταχυτήτων στα ανάντη εμφανίζει τη μέγιστη τιμή στον άξονα με μικρή μείωση στις περιοχές γύρω από αυτόν.

Το κατακόρυφο προφίλ ταχύτητας, αν και με κάποιες ατέλειες, προσεγγίζει αυτό της τυρβώδους ροής.

Με βάση τις κατανομές αυτές υπολογίστηκαν οι μέσες ταχύτητες ροής, κατακόρυφες και οριζόντιες, οι τιμές των οποίων αναφέρονται στο Παράρτημα.

5.4.2 Υπολογισμός παροχής και συντελεστών συνόρθωσης

Από τις κατακόρυφες κατανομές ταχυτήτων, η παροχή μπορεί να υπολογιστεί ως

$$Q = \int_A u dA = b \int_y u dy \quad (5.2)$$

Για σταθερό πλάτος b σε όλο το μήκος του αγωγού.

Ο υπολογισμός της παροχής γίνεται με αριθμητική ολοκλήρωση με τη μέθοδο των τραπεζίων. Παρατηρούμε ότι σε όλες τις περιπτώσεις η παροχή υπερεκτιμάται, δηλαδή προκύπτει υπολογισμένη παροχή μεγαλύτερη της μετρημένης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η παροχή προκύπτει μόνο από την ολοκλήρωση των κατανομών ταχύτητας στον άξονα του αγωγού και με την παραδοχή ότι αυτή η κατανομή ισχύει για όλες τις θέσεις στη διατομή. Αυτό πρακτικά δεν ισχύει γιατί στα τοιχώματα οι ταχύτητες είναι μειωμένες και αν γνωρίζαμε την πραγματική τους κατανομή θα προέκυπταν μικρότερες τιμές παροχής. Οι πίνακες σύγκρισης παροχών παρατίθενται στο Παράρτημα.

Ο υπολογισμός των διορθωτικών συντελεστών α και β των εξισώσεων της ενέργειας και ορμής αντίστοιχα γίνεται με αριθμητική ολοκλήρωση των κατακόρυφων κατανομών από τις σχέσεις

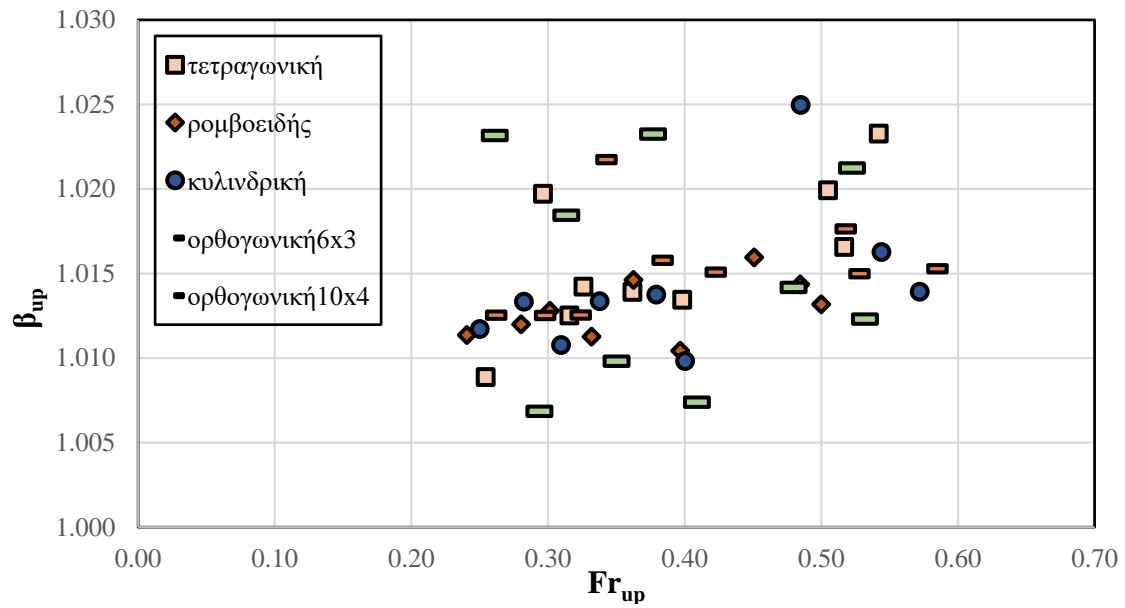
$$\alpha = \frac{\int_A u^3 dA}{V^3 A} \quad (5.3)$$

$$\beta = \frac{\int_A u^2 dA}{V^2 A} \quad (5.4)$$

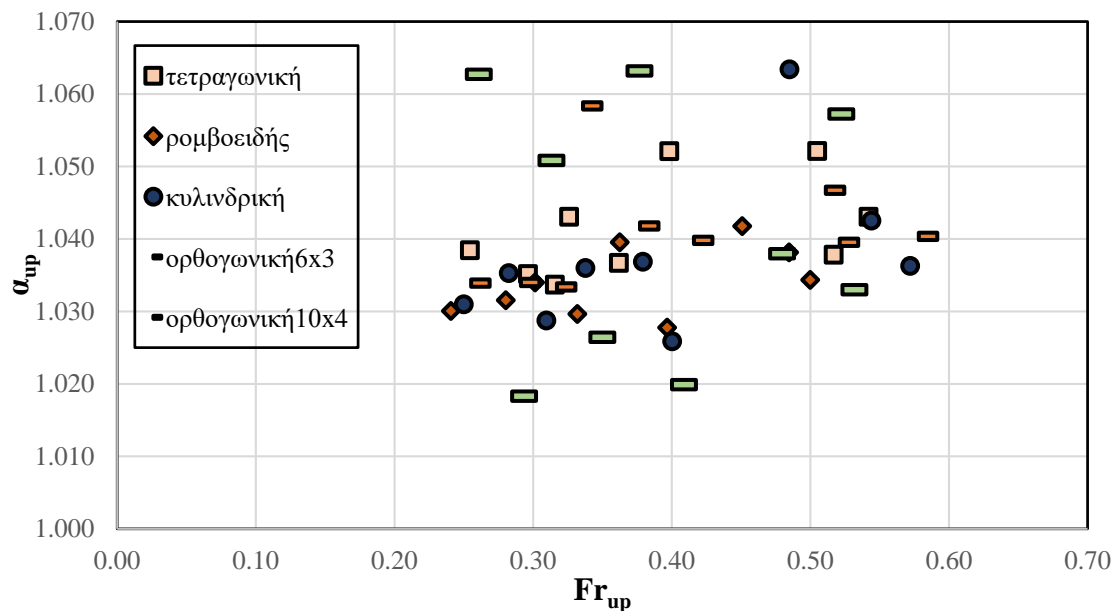
όπου V είναι η μέση ταχύτητα που προέκυψε από την εκτίμηση της παροχής.

Σημειώνεται ότι στη συγκεκριμένη εργασία υπολογίζονται διαφορετικές τιμές των α , β στα ανάντη και διαφορετική στα κατάντη, η οποίες υπολογίζονται από τις διαφορετικές κατανομές.

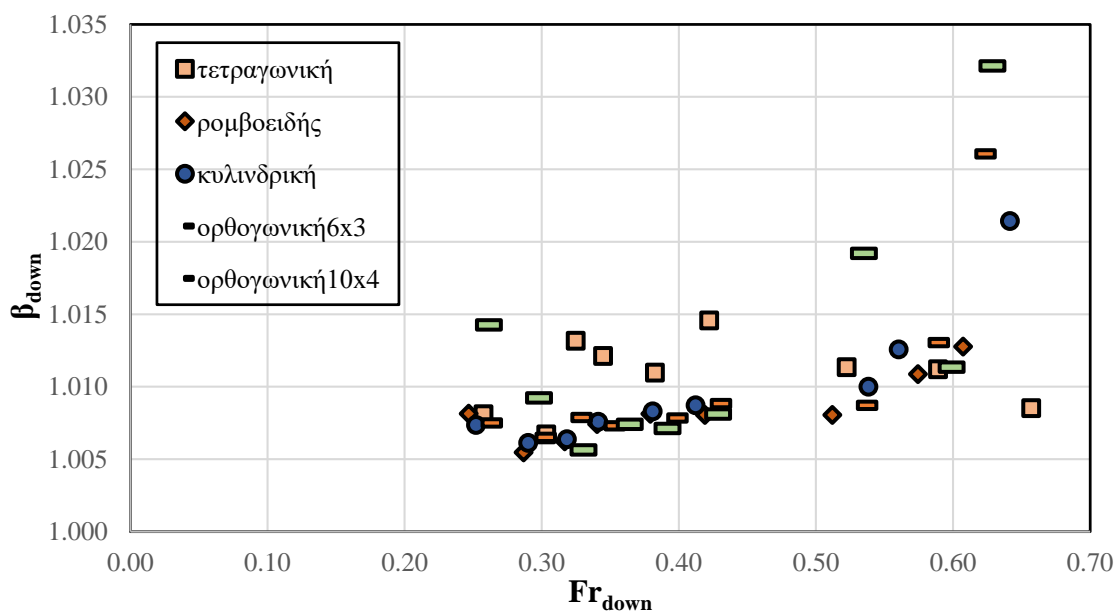
Παρατηρούμε ότι οι τιμές των α και β που προκύπτουν είναι πολύ κοντά στη μονάδα και επομένως ικανοποιούν τις συνθήκες τυρβώδους ροής.



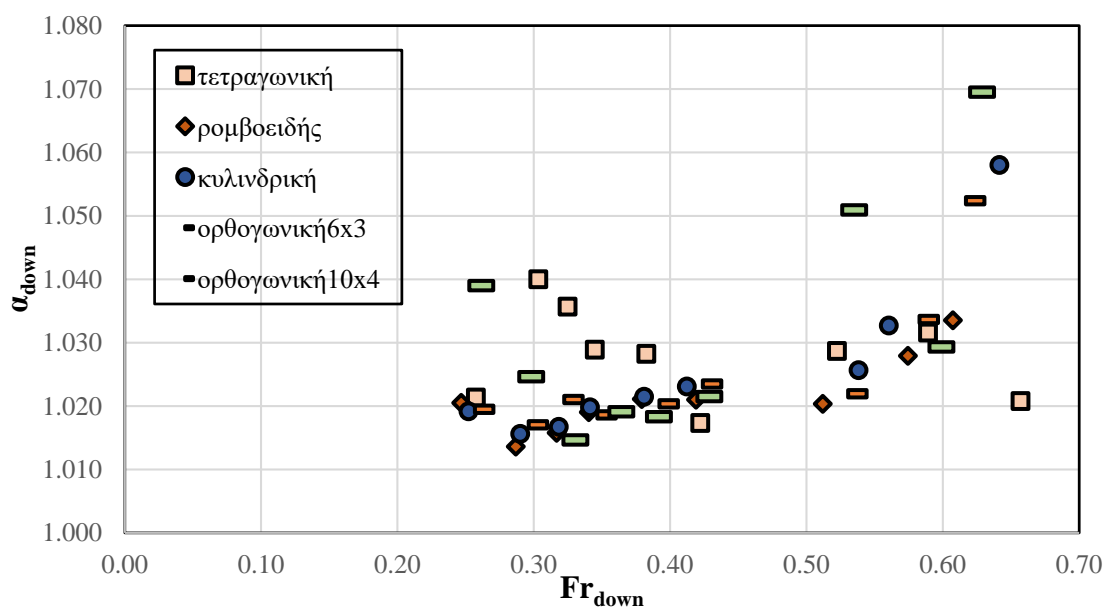
Σχήμα 5.48 Συντελεστής συνόρθωσης β στα ανάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη



Σχήμα 5.49 Συντελεστής συνόρθωσης α στα ανάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη



Σχήμα 5.50 Συντελεστής συνόρθωσης β στα κατάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατάντη



Σχήμα 5.51 Συντελεστής συνόρθωσης α στα κατάντη συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατάντη

5.4.3 Υπολογισμός δύναμης και συντελεστή αντίστασης

Ο υπολογισμός της δύναμης οπισθέλκουσας γίνεται με εφαρμογή της μονοδιάστατης εξίσωσης ποσότητας κίνησης (3.31) κατά την κύρια κατεύθυνση της ροής αμελώντας την δύναμη λόγω διατμητικών τάσεων ορίου από την σχέση (F_D η δύναμη που ασκείται στο σώμα)

$$F_p|_1 - F_p|_3 - \beta_{down} \int_{A_3} \rho u^2 dA + \beta_{up} \int_{A_1} \rho u^2 dA = F_D \quad (5.5)$$

$$F_p|_1 - F_p|_3 - \rho Q(\beta_{down} V_3 - \beta_{up} V_1) = F_D \quad (5.6)$$

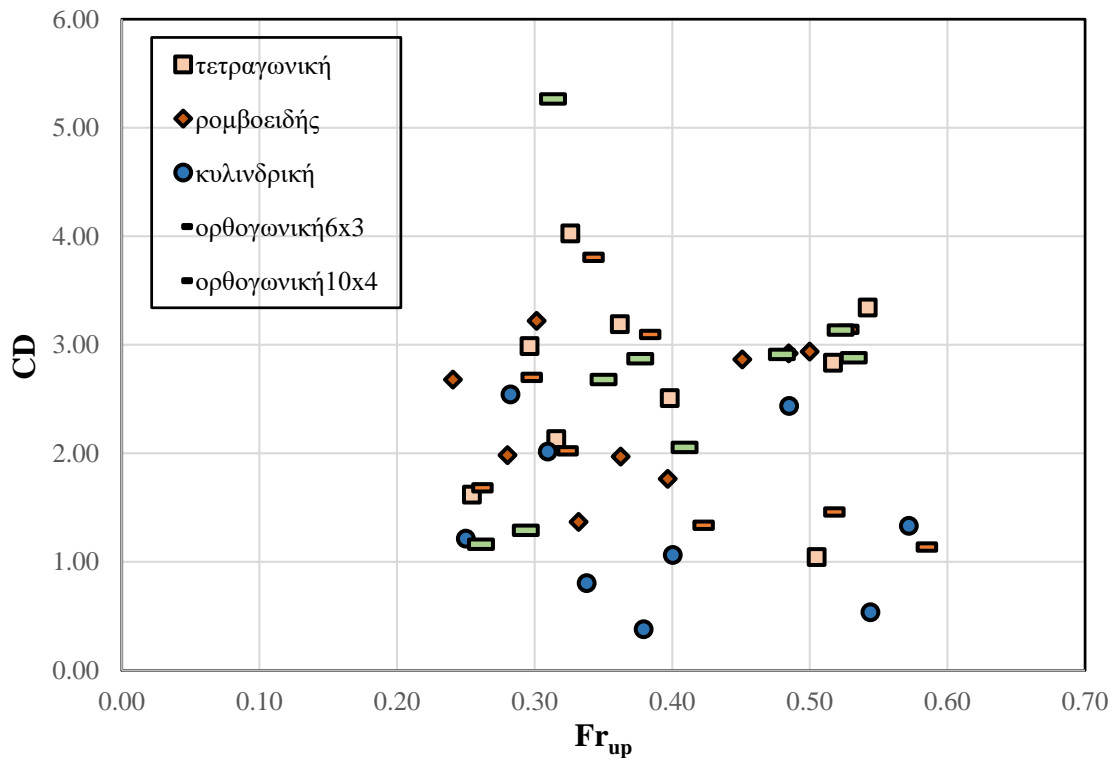
Όπου F_p οι δυνάμεις λόγω πίεσης οι οποίες υπολογίζονται ως

$$F_p = F_p|_1 - F_p|_3 = \bar{p}A|_1 - \bar{p}A|_3 = \gamma B \left(\frac{y_1^2}{2} - \frac{y_3^2}{2} \right) \quad (5.7)$$

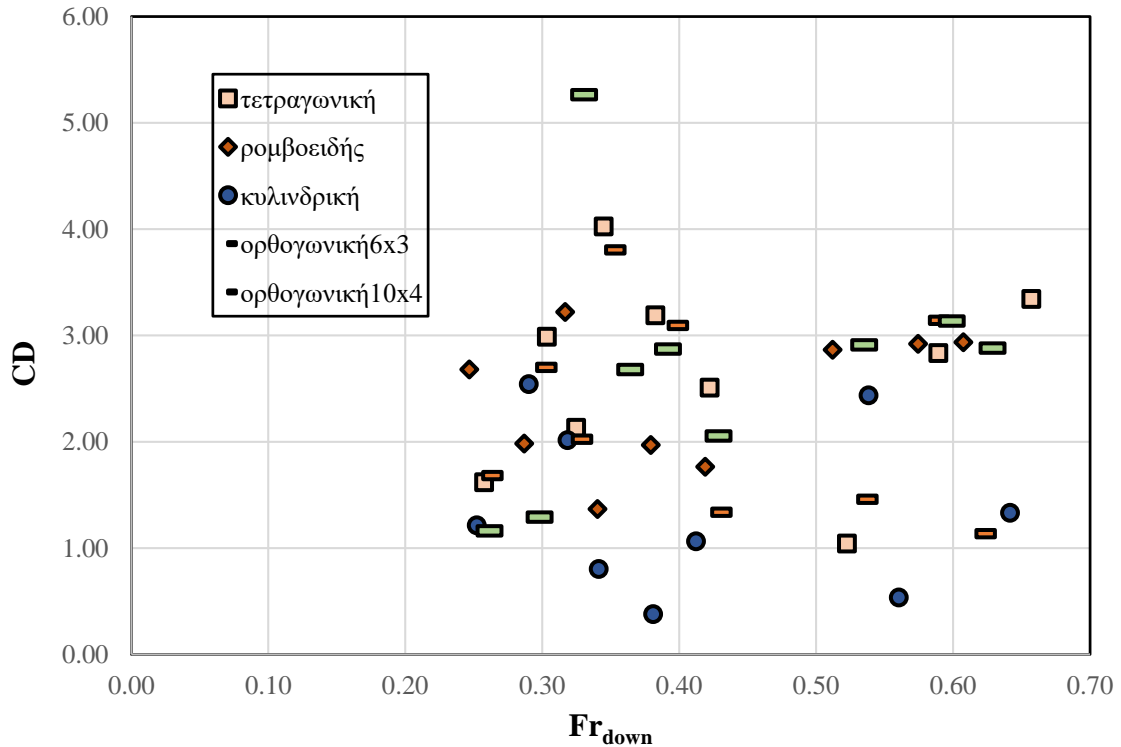
Η σχέση (5.5) μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν είναι γνωστή η κατανομή της ταχύτητας και είναι δυνατό να γίνει ολοκλήρωση καθ' ύψος των σημειακών ταχυτήτων. Η σχέση (5.6) χρησιμοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις όπου είναι γνωστή η μέση ταχύτητα V . Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε προσπάθεια να υπολογιστεί η δύναμη αντίστασης και με τις δύο σχέσεις. Ωστόσο, μόνο η σχέση (5.6) έδωσε εύλογα αποτελέσματα. Η σχέση (5.5) δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί γιατί, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι μετρήσεις για τις κατανομές ταχυτήτων δεν λήφθηκαν ακριβώς κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Παράλληλα, εικάζουμε ότι και άλλες αβεβαιότητες και ατέλειες δεν επιτρέπουν τη χρήση της συγκεκριμένης σχέσης, διότι ακόμη και στις πειραματικές μετρήσεις που λήφθηκαν την τελευταία εβδομάδα με συνεχόμενη εναλλαγή θέσης σωλήνα Pitot, δηλαδή με ίδιες συνθήκες λήψης μετρήσεων ανάντη και κατόντη, το σφάλμα κατά την επίλυση ήταν μεγάλο και οδήγησε σε παράλογα αποτελέσματα. Επομένως, οι δυνάμεις αντίστασης υπολογίστηκαν με βάση τις μέσες ταχύτητες που προκύπτουν από την παροχή και το βάθος ροής. Για λόγους σύγκρισης, χρησιμοποιήθηκαν τόσο οι μετρημένες, όσο και οι υπολογισμένες παροχές. Τα αποτελέσματα αυτά παρατίθενται στο Παράρτημα.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι συντελεστές αντίστασης με βάση τη σχέση (3.28). Το εμβαδό A_p της προβολής του βυθισμένου τμήματος ενός βάρους σε επίπεδο κάθετο στην κύρια διεύθυνση της ροής, υπολογίστηκε ως το πλάτος της προβολής (σε κάθετο επίπεδο) του κάθε βάρους επί το αντίστοιχο ανάντη βάθος ροής.

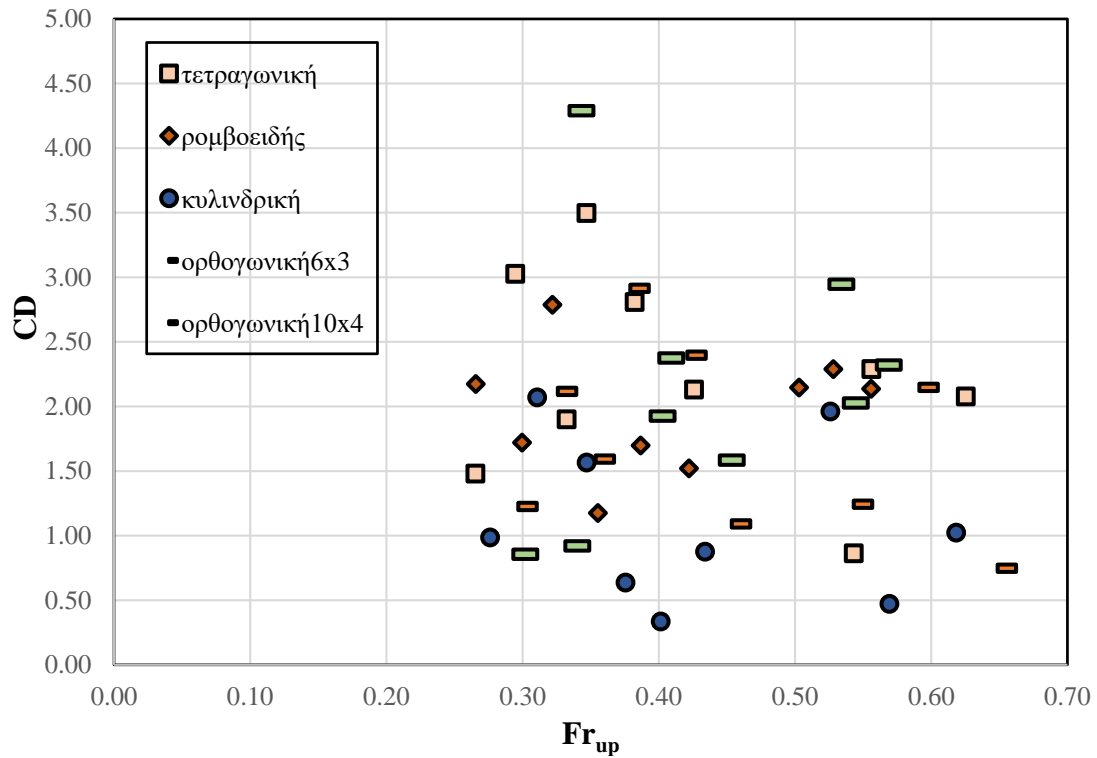
Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη και κατόντη για μετρημένες και υπολογισμένες παροχές. Παρατηρούμε ότι οι συντελεστές αντίστασης λαμβάνουν τιμές από 0.3 μέχρι 5.5. Μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης εμφανίζει η τετραγωνική διατομή και η ορθογωνική με λόγο 2.5:1, ενώ μικρότερη αντίσταση εμφανίζει η κυλινδρική διατομή.



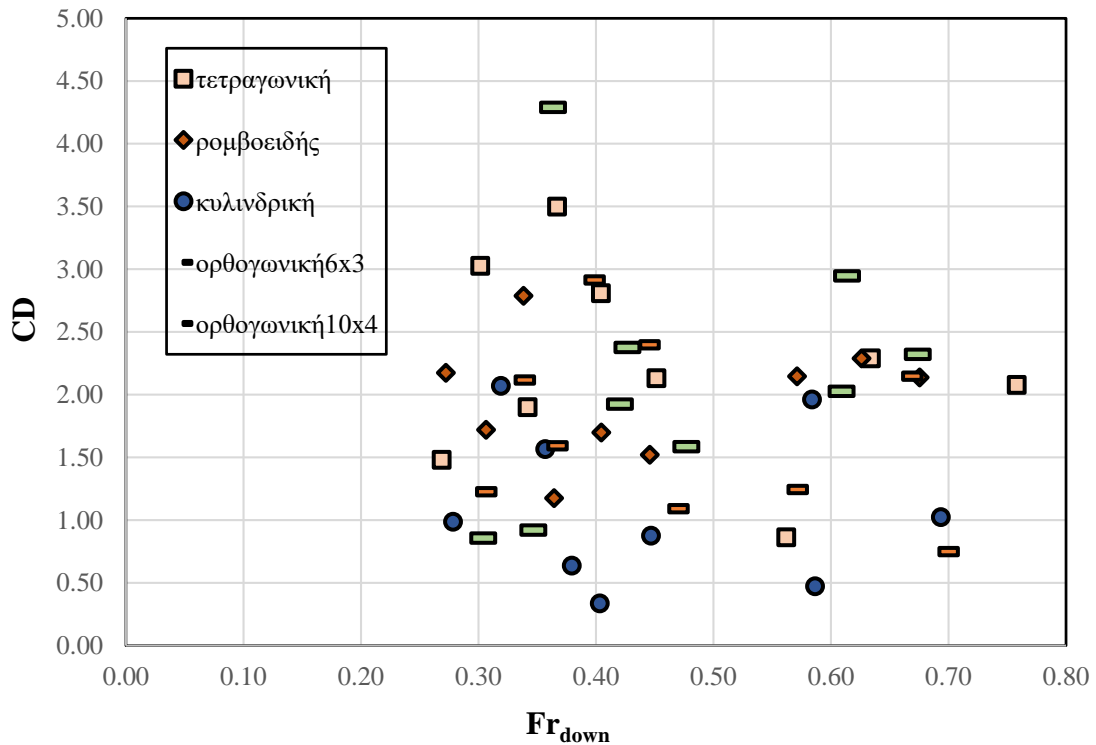
Σχήμα 5.52 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη (χρήση Q παροχόμετρου)



Σχήμα 5.53 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατόντη (χρήση Q παροχόμετρου)



Σχήμα 5.54 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα ανάντη (χρήση Q υπολογισμών)



Σχήμα 5.55 Συντελεστής αντίστασης συναρτήσει του αριθμού Froude στα κατόντη (χρήση Q υπολογισμών)

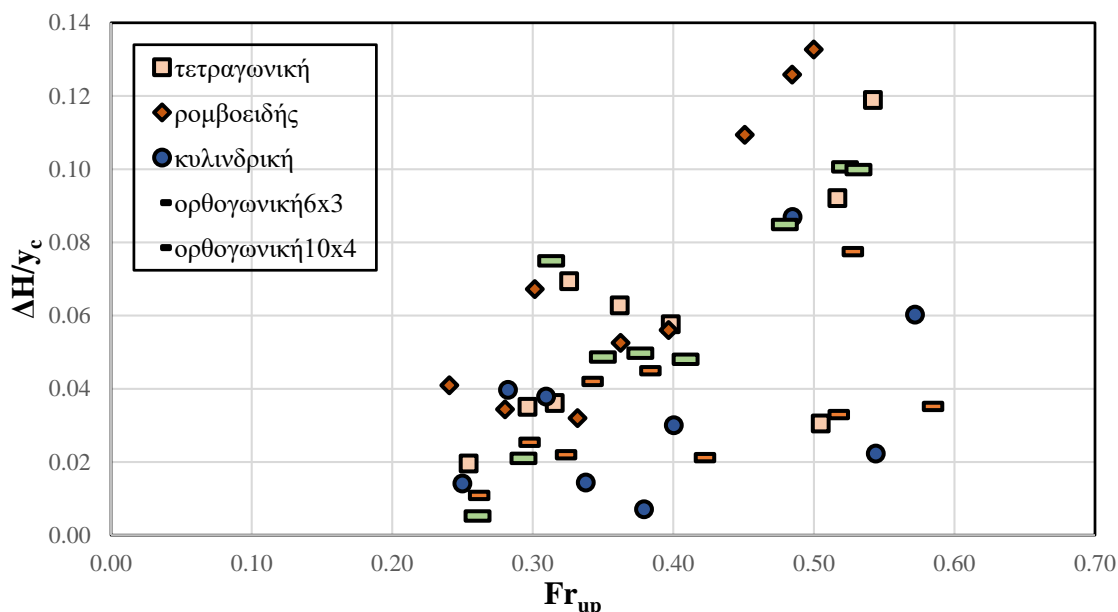
5.5 Υπολογισμός απωλειών ενέργειας και ειδικής δύναμης με δεδομένα μετρήσεων ταχυτήτων

Εφόσον έχουν υπολογιστεί οι συντελεστές συνόρθωσης α και β , υπολογίζονται και πάλι οι απώλειες ενέργειας και οι ειδικές δυνάμεις με τα βάθη ροής και τις παροχές από τις μετρήσεις Pitot, λαμβάνοντας τους υπόψη αυτούς τους συντελεστές. Όπως είναι αναμενόμενο, επειδή η υπολογισμένες τιμές των α και β προσεγγίζουν τη μονάδα, δεν παρατηρείται κάποια μεγάλη διαφορά με τα μεγέθη που υπολογίστηκαν στις ενότητες 5.2 και 5.3. Η μόνη διαφορά είναι ότι επειδή οι ταχύτητες μετρήθηκαν μόνο για μεγάλες παροχές (15, 20, 25 L/s) και μη μηδενικά ύψη υπερχειλιστή λεπτής στέψης (3, 6, 9 cm), εμφανίζονται μόνο συνθήκες υποκρίσιμης ροής, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.56, 5.57, 5.58 και 5.59.

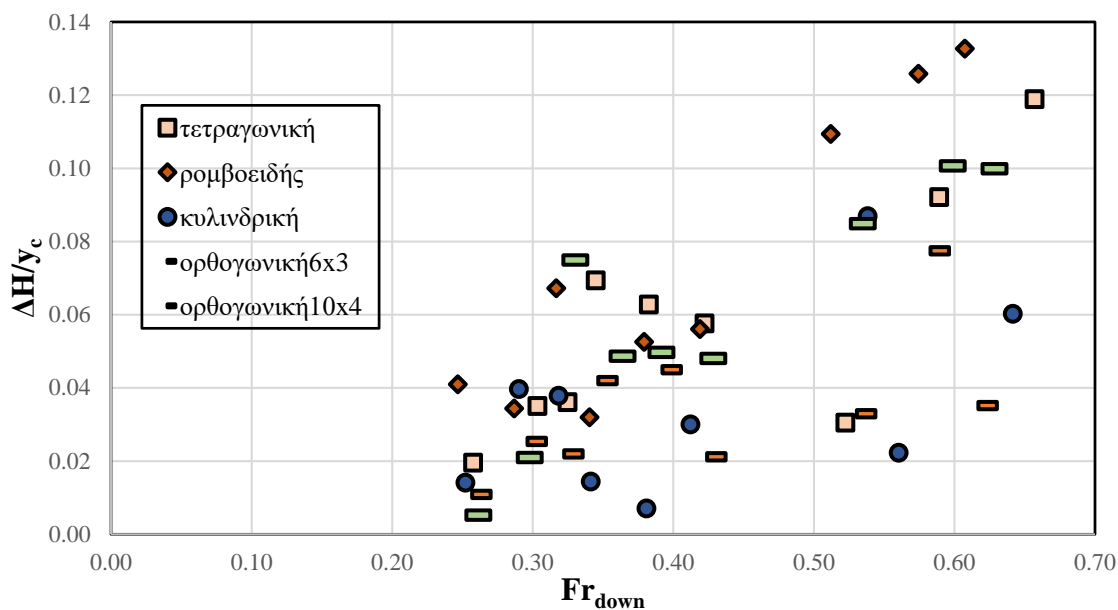
Υπενθυμίζεται ότι οι συντελεστές υπεισέρχονται στους υπολογισμούς σύμφωνα με τις εξής σχέσεις

$$\Delta H_{(1-3)} = H_1 - H_3 = y_1 + \alpha_{up} \frac{V_1^2}{2g} - y_3 - \alpha_{down} \frac{V_3^2}{2g} \quad (5.8)$$

$$M = \beta \frac{Q^2}{gA} + \bar{y}A \quad (5.9)$$

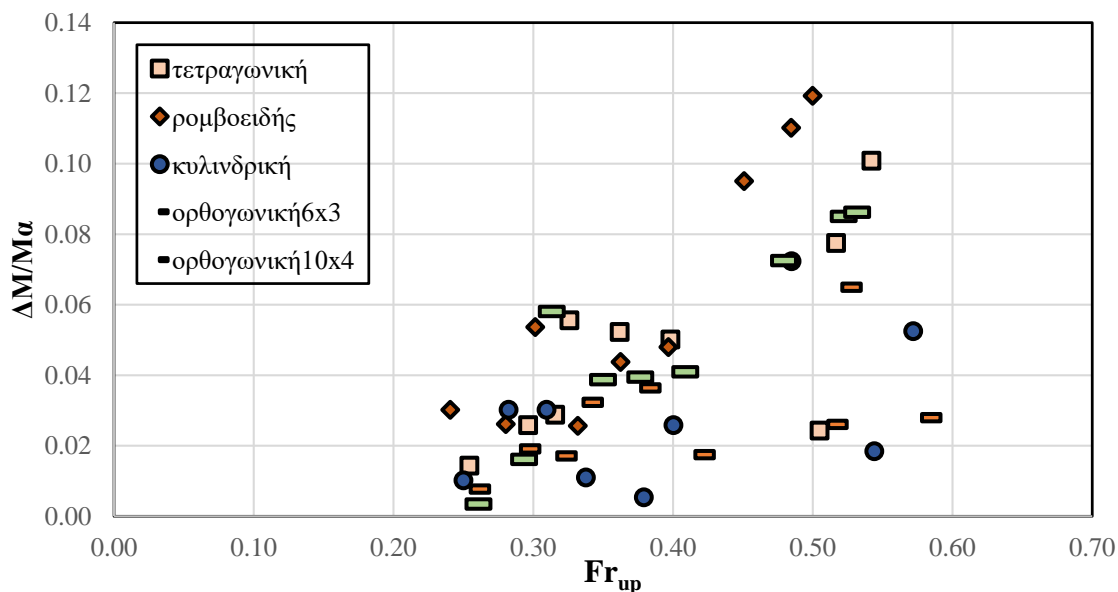


Σχήμα 5.56 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.

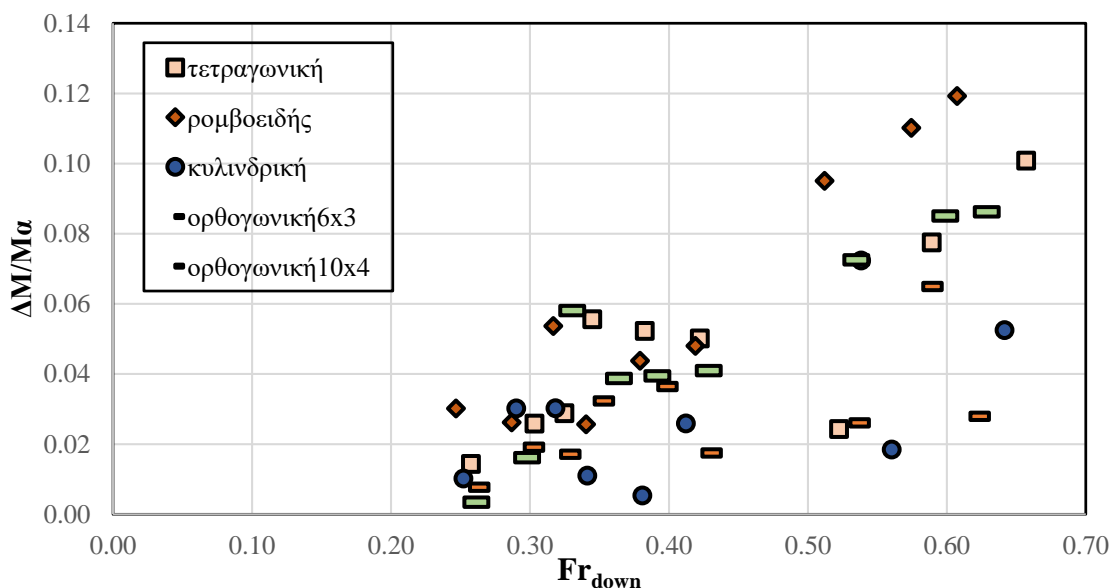


Σχήμα 5.57 Λόγος απωλειών ενέργειας προς κρίσιμο βάθος συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.

Με τη χρήση των συντελεστών συνόρθωσης φαίνεται ότι η ρομβοειδής διατομή προκαλεί τις μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας.



Σχήμα 5.58 Λόγος διαφοράς ειδικής ενέργειας ανάντη και κατάντη προς ειδική ενέργεια αδιατάρακτης ροής συναρτήσει του αριθμού Froude ανάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.



Σχήμα 5.59 Λόγος διαφοράς ειδικής ενέργειας ανάντη και κατάντη προς ειδική ενέργεια αδιατάρακτης ροής συναρτήσει του αριθμού Froude κατάντη για παροχές 15, 20 και 25 L/s και ύψος υπερχειλιστή $w=3, 6, 9$ cm.

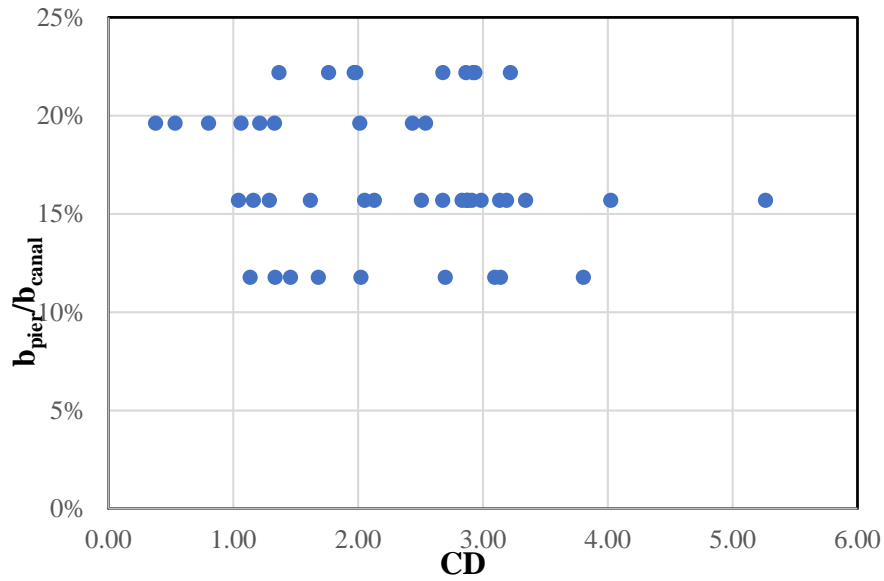
5.6 Άλλοι υπολογισμοί

Το μπλοκάρισμα (blockage) της ροής που προκαλεί το κάθε σχήμα βάρου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

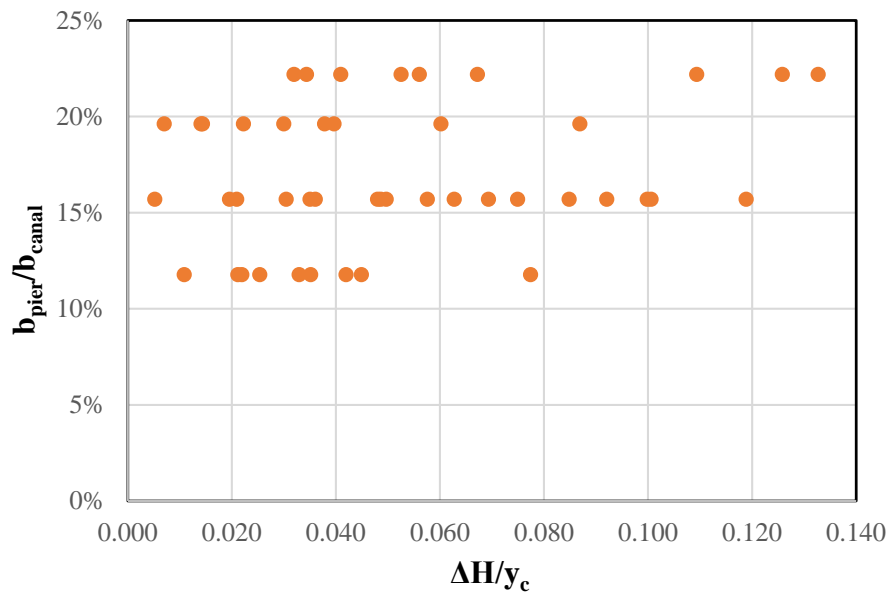
Πίνακας 5.2 Λόγος πλάτους διατομής προς πλάτος διώρυγας

Διατομή	Τετράγωνο	Ρόμβος	Κύλινδρος	Ορθογώνιο 6x3	Ορθογώνιο 10x4
Περιορισμός πλάτους [%]	15.69%	22.18%	19.61%	11.76%	15.69%
Ενεργό πλάτος [%]	84.31%	77.82%	80.39%	88.24%	84.31%

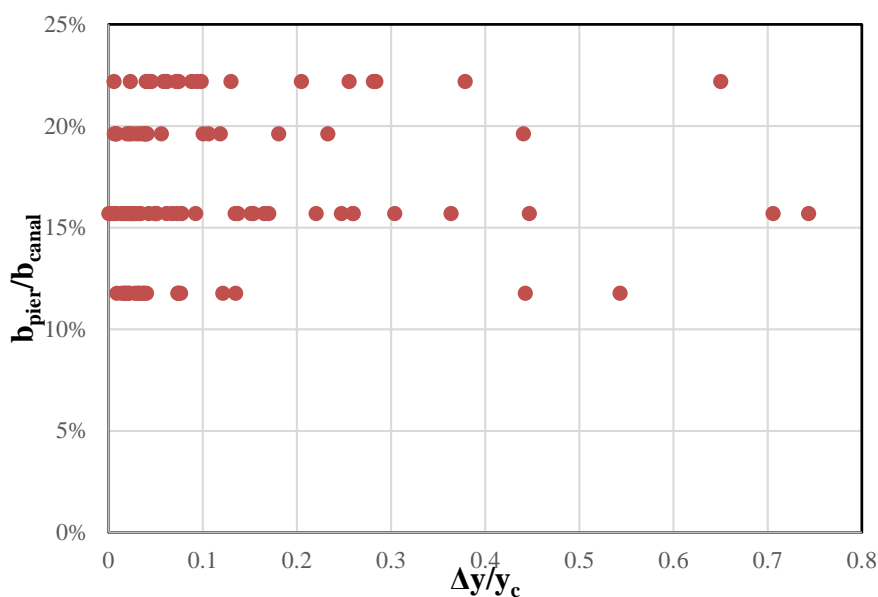
Παρατηρούμε ότι ο ρόμβος περιορίζει περισσότερο από τις υπόλοιπες διατομές το πλάτος της διώρυγας από το οποίο μπορεί να περάσει το νερό. Σε αυτή την παρεμπόδιση της ροής οφείλονται πιθανότατα η αυξημένη υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, οι μεγάλες απώλειες ενέργειας και οι υψηλοί συντελεστές αντίστασης που παρουσιάζονται σε ροή γύρω από βάρη ρομβοειδούς διατομής. Παρατηρούμε, επίσης, ότι ενώ ο κύλινδρος παρεμποδίζει αρκετά τη ροή, η επιρροή του δεν είναι τόσο έντονη, όπως είναι άλλων διατομών που περιορίζουν λιγότερο τη ροή, π.χ. της τετραγωνικής. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο σχήμα του που δεν έχει γωνίες και στο γεγονός ότι ο κύλινδρος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι λείος με αποτέλεσμα να μειώνονται οι τριβές. Το ορθογώνιο με λόγο πλευρών 2:1 εμποδίζει τη ροή λιγότερο από όλες τις άλλες διατομές και σε αυτό οφείλεται πιθανότατα η σχετικά μικρή επιρροή του στη ροή (απώλειες ενέργειας, αντίσταση, υπερύψωση).



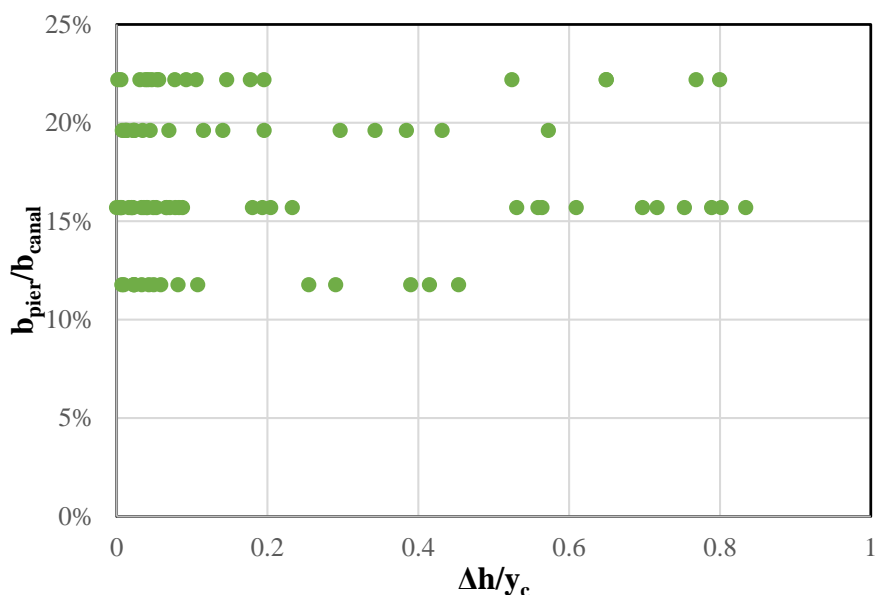
Σχήμα 5.60 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στην τιμή του συντελεστή αντίστασης



Σχήμα 5.61 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στις απώλειες ενέργειας



Σχήμα 5.62 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στην υπερύψωση



Σχήμα 5.63 Επιρροή μείωσης ενεργού πλάτους στη διαφορά στάθμης ανάντη και κατόντη

Από το Σχήμα 5.60 παρατηρούμε ότι αύξηση του πλάτους του βάθρου που παρεμποδίζει τη ροή δεν συνεπάγεται απαραίτητα αύξηση της αντίστασης και του συντελεστή C_D . Ωστόσο, το ποσοστό περιορισμού της ροής επηρεάζει τις απώλειες ενέργειας και ουσιαστικά μεγαλύτερη μείωση του ενεργού πλάτους οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες. Σε ό,τι αφορά την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (Σχήμα 5.62), παρατηρούμε ότι πέρα από κάποιες ακραίες τιμές, η υπερύψωση δεν αυξάνεται απαραίτητα με την αύξηση του πλάτους του εμποδίου. Ασαφής είναι και τα συμπεράσματα για την επιρροή της στένωσης στη μεταβολή της στάθμης ανάντη και κατόντη του εμποδίου.

Οι τιμές του αριθμού Reynolds υπολογίστηκαν με βάση τα όρια της θερμοκρασίας μέσα στα οποία εκτιμήθηκε ότι έγιναν οι μετρήσεις, δηλαδή 18 – 30 °C. Επιλέγοντας ως μέση θερμοκρασία τους 26 °C, υπολογίζεται ο αριθμός Re για θερμοκρασία 26 °C και μετά υπολογίζονται τα όρια στα οποία αυτός κυμαίνεται.

Πίνακας 5.3 Τιμές της κινηματικής συνεκτικότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας

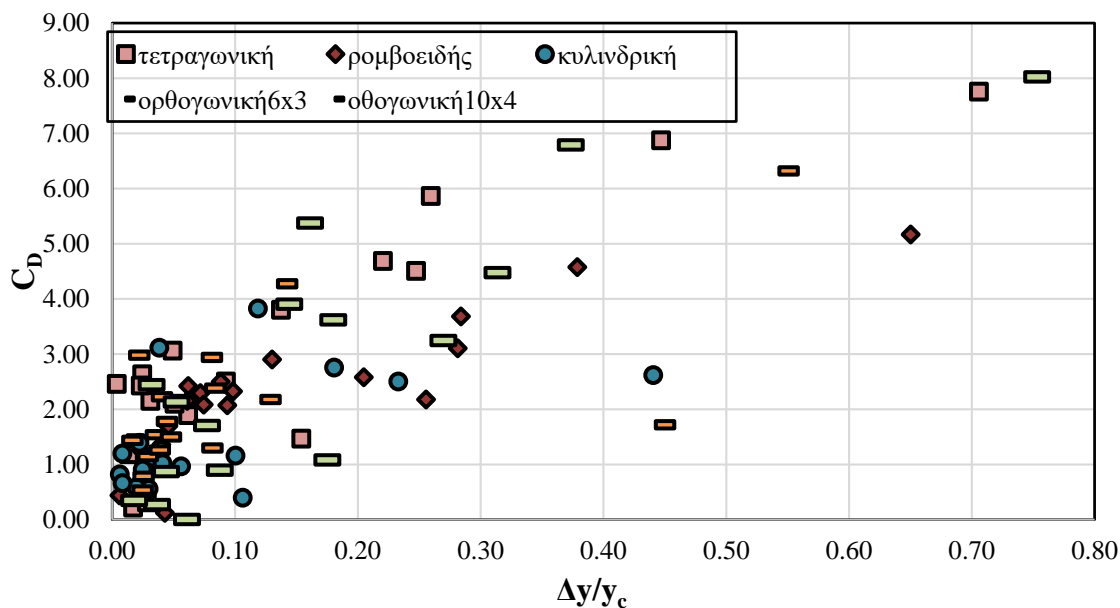
T [°C]	ν [m ² /s]
0	1.79E-06
10	1.31E-06
18	1.07E-06
20	1.01E-06
26	8.83E-07
30	8.02E-07

Για κάθε μία παροχή, ύψος υπερχειλιστή, διατομή μετρήσεων και σχήμα βάρους υπολογίζεται ο αριθμός Re, καθώς και τα όρια στα οποία κυμαίνεται. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται η μέση τιμή και τυπική του απόκλιση για κάθε διαφορετικό σχήμα βάρους.

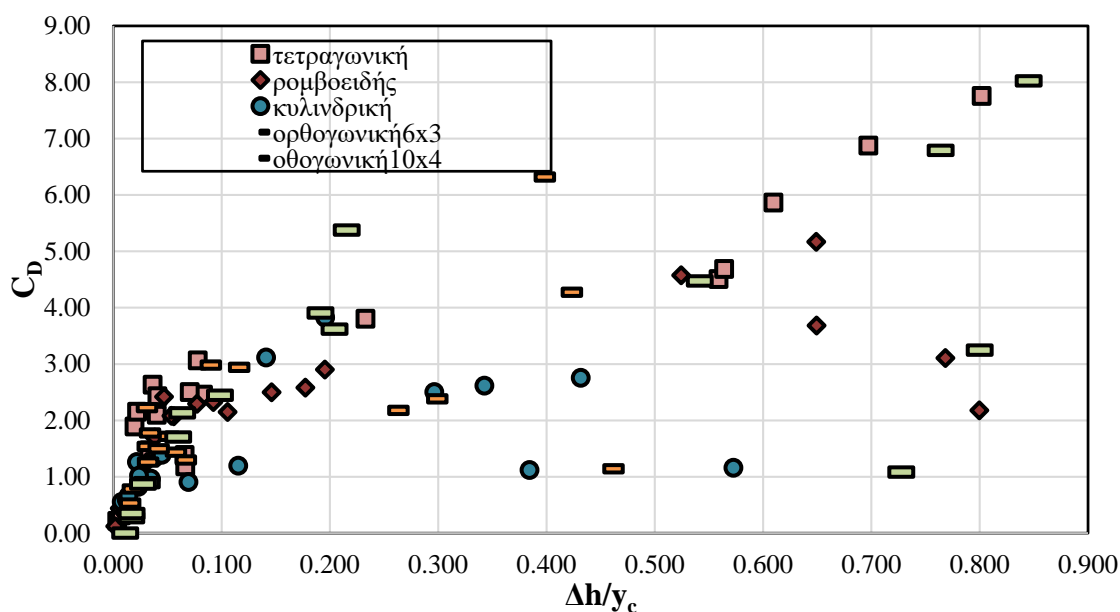
Πίνακας 5.4 Μέση τιμή και τυπική απόκλιση αριθμού Re ανά διατομή και θέση υπολογισμού

Διατομή	Τετράγωνο	Ρόμβος	Κύλινδρος	Ορθογώνιο 6x3	Ορθογώνιο 10x4
Μέσο Re _{up}	3.88E+04	3.81E+04	3.90E+04	3.90E+04	3.81E+04
Διακύμανση Re _{up}	6.96E+03	6.69E+03	7.01E+03	7.06E+03	6.58E+03
Μέσο Re _{down}	3.98E+04	3.93E+04	3.96E+04	3.96E+04	3.91E+04
Διακύμανση Re _{down}	7.45E+03	7.17E+03	7.30E+03	7.22E+03	6.98E+03

Τέλος, με βάση τις μετρήσεις από το σταθμήμετρο παρουσιάζεται η σχέση μεταξύ του συντελεστή αντίστασης, της υπερύψωσης και της διαφοράς στάθμης ανάντη και κατόντη.



Σχήμα 5.64 Σχέση μεταξύ συντελεστή αντίστασης και υπερύψωσης



Σχήμα 5.65 Σχέση μεταξύ συντελεστή αντίστασης και διαφοράς στάθμης

Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής αντίστασης, τόσο αυξάνεται και η υπερύψωση, καθώς και η διαφορά στάθμης. Οι μεγάλοι συντελεστές αντίστασης αφορούν υπερκρίσιμες συνθήκες ροής και για αυτό το λόγο δεν εμφανίζονται στην ανάλυση ταχυτήτων, όπου μελετώνται μόνο υποκρίσιμες συνθήκες. Επίσης, παρατηρούμε ότι για ίδια υπερύψωση ή διαφορά στάθμης, η τετραγωνική διατομή και η ορθογωνική με λόγο πλευρών 2.5/1 εμφανίζουν το μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης.

6. Εναλλακτική πειραματική διαδικασία

6.1 Εισαγωγή

Με στόχο την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων, προτάθηκε η δοκιμή μιας εναλλακτικής πειραματικής διαδικασίας με τη χρήση φωτογραμμετρικής μεθόδου.

Φωτογραμμετρία ονομάζεται μια ιδιαίτερη μέθοδος που αποσκοπεί στην εξαγωγή αξιόπιστης μετρικής πληροφορίας φυσικών αντικειμένων και του περιβάλλοντος μέσω των διαδικασιών της καταγραφής, μέτρησης και ερμηνείας φωτογραφικών εικόνων που λαμβάνονται με ειδικούς τρόπους φωτογράφισης. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου είναι δυνατός ο προσδιορισμός των διαστάσεων και της μορφολογίας αντικειμένων του τρισδιάστατου χώρου.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε αρχικά για τη χαρτογράφηση περιοχών και την απόδοση μνημείων πολιτιστικής κληρονομιάς. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας, της τεχνικής της φωτογραφίας και της ίδιας της μεθόδου, καθώς και με τη συνεργασία με άλλες επιστήμες, όπως η τοπογραφία, η γεωδαισία, η χαρτογραφία και η αρχιτεκτονική, η χρήση της φωτογραμμετρίας επεκτάθηκε στη δημιουργία χαρτών της γήινης επιφάνειας, σχεδιαγραμμάτων των όψεων των κτιρίων και αρχαιολογικών ανασκαφών και γενικά στην αποτύπωση αντικειμένων στην επιφάνεια της γης. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις το προς μελέτη αντικείμενο είναι θεωρητικά ακίνητο.

Τα τελευταία χρόνια πραγματοποιούνται προσπάθειες και μελέτες για την εφαρμογή της μεθόδου σε μικρότερες κλίμακες και σε δυναμικά φαινόμενα δεδομένου ότι πλέον εφαρμόζονται πιο εξελιγμένες τεχνικές, αυτοματοποιημένες διαδικασίες και νέοι αλγόριθμοι, τα οποία παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα ότι το προς παρατήρηση αντικείμενο κινείται. Μια από τις εφαρμογές αυτές είναι η μελέτη φαινομένων υδραυλικής φύσεως και συγκεκριμένα η αποτύπωση της μορφής της ελεύθερης επιφάνειας, των υψομετρικών διαφορών και της ταχύτητας ροής από σημείο σε σημείο της επιφάνειας αυτής, τόσο σε ποτάμια όσο και σε θαλάσσια υδάτινα σώματα.

Σε κλασικές εφαρμογές της φωτογραμμετρίας, όπως η αποτύπωση αρχαιολογικών χώρων, η βασική αρχή λειτουργίας περιλαμβάνει την κίνηση των μέσων φωτογράφισης γύρω από ένα ακίνητο αντικείμενο. Για τις εφαρμογές αυτές έχουν διεξαχθεί πλήθος μελετών ως προς τον τρόπο λήψης και ανάλυσης των φωτογραφιών με αποτέλεσμα η διαδικασία αυτή να είναι σχεδόν αυτοματοποιημένη. Αντίθετα, η φωτογραμμετρική αποτύπωση της ροής σε υδάτινα σώματα αποτελεί μια εφαρμογή σε πρώιμο στάδιο και οι μελέτες που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί αφορούν μεμονωμένες περιπτώσεις. Επομένως, όχι μόνο η τεχνογνωσία ως προς τη λήψη και την επεξεργασία φωτογραφιών σε εφαρμογές αυτού το είδους είναι περιορισμένη, αλλά και η κάθε περίπτωση απαιτεί την ανάπτυξη ειδικών μεθόδων λήψης και λογισμικού επεξεργασίας. Παρά τις δυσκολίες, οι δυνατότητες που προσφέρει η φωτογραμμετρική αποτύπωση στην μελέτη υδάτινων σωμάτων είναι πολύτιμες και είναι σημαντικό να πραγματοποιούνται προσπάθειες για την εδραίωση της σε υδραυλικές εφαρμογές.

Στο πλαίσιο των πειραμάτων για τη διερεύνηση της ροής γύρω από βάθρο στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, πραγματοποιήθηκε προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου αυτής σε

συνεργασία με το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας της Σχολής Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για την αποτύπωση της ελεύθερης επιφάνειας επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές συνθήκες ροής γύρω από τετραγωνική διατομή βάρθρου.

Πίνακας 6.1 Συνθήκες ροής για τη φωτογραμμετρική πειραματική διαδικασία

Περίπτωση μελέτης	$Q_{\text{ονομαστική}}$ [L/s]	$Q_{\text{παροχόμετρου}}$ [L/s]	$W_{\text{υπερχείλισης}}$ [m]
α	15	16.00	6
β	20	20.20	9

6.2 Θεωρητικό υπόβαθρο – Φωτογραμμετρική διαδικασία

Τα βασικά στάδια της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης περιλαμβάνουν τον σχεδιασμό και την επιλογή του κατάλληλου τρόπου λήψης φωτογραφιών, τη λήψη των εικόνων, τον εντοπισμό και τη μέτρηση των σημείων που μας ενδιαφέρουν σε κάθε εικόνα, τον υπολογισμό των συντεταγμένων των σημείων αυτών στην εικόνα και την επεξεργασία των δεδομένων με στόχο την τελική αποτύπωση.

Σημαντικό στοιχείο για τη βασική επεξεργασία της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρίας αποτελεί η διάκριση μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων συντεταγμένων και της σχέσης που τα συνδέει.

Το σύστημα της φωτογραφίας ή αλλιώς του φωτογραφικού επιπέδου αποτελεί το σύστημα όπου γίνεται η μέτρηση των συντεταγμένων των εικονιζόμενων σημείων σε μια εικόνα. Αποτελεί ένα διδιάστατο σύστημα συντεταγμένων με αρχή την προβολή του σημείου λήψης της εικόνας (προβολικό κέντρο) (x_0, y_0) στο επίπεδο του αρνητικού ή του ψηφιακού αισθητήρα. Από το κέντρο προβολής διέρχονται όλες οι οπτικές γραμμές που αποτυπώνουν τα αντικείμενα του τρισδιάστατου χώρου στον διδιάστατο του φωτογραφικού (εστιακού) επιπέδου. Οι μετρήσεις στο φωτογραφικό επίπεδο ανάγονται μετά από κατάλληλη επεξεργασία στον υπολογισμό των συντεταγμένων των τρισδιάστατων αντικειμένων, που απεικονίζονται στη φωτογραφία.

Το σύστημα συντεταγμένων της φωτομηχανής αποτελεί ένα τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων που έχει σαν αρχή το σημείο λήψης με τον άξονα του βάθους W κάθετο προς το φωτογραφικό επίπεδο και τους άξονες U, V παραλλήλους προς τους άξονες x, y του συστήματος συντεταγμένων του φωτογραφικού επιπέδου.

Το σύστημα συντεταγμένων του τρισδιάστατου χώρου είναι ένα σύστημα συντεταγμένων (X, Y, Z) που υλοποιείται από το τοπογραφικό όργανο μετρήσεων των φωτοσταθερών που εικονίζονται στις φωτογραμμετρικές εικόνες. Η σύνδεση μεταξύ του επίγειου συστήματος συντεταγμένων και του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής προκύπτει αν υποθέσουμε ότι για τη μετάβαση από το ένα σύστημα στο άλλο αρκεί να γίνουν τρεις μεταθέσεις (παράλληλα προς τους τρεις άξονες X_0, Y_0, Z_0 που ορίζουν στο επίγειο σύστημα τις συντεταγμένες του κέντρου των φακών και αρχή του τρισδιάστατου συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής) τρεις στροφές (ω, φ, κ γύρω από κάθε άξονα) και μεταβολές της κλίμακας των μετρήσεων από σημείο σε σημείο. Η σχέση αυτή μπορεί να περιγραφεί ως

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

όπου $R(\omega, \varphi, \kappa)$ είναι ένα μητρώο 3×3 που αποτελείται από αθροίσματα τριγωνομετρικών συναρτήσεων των γωνιών στροφής ω , φ και κ των αξόνων X, Y, Z ώστε να γίνουν παράλληλοι με τους άξονες U, V, W και λ είναι ο συντελεστής σημειακής κλίμακας. Κάθε σημείο που μετράται στην εικόνα στο σύστημα συντεταγμένων της φωτογραφικής μηχανής (U, V, W) έχει σταθερή συντεταγμένη βάθους ίση με

$$W = -c \quad (6.2)$$

όπου c είναι η σταθερά της φωτογραφικής μηχανής, δηλαδή η απόσταση του κέντρου των φακών της από το φωτογραφικό επίπεδο και (x_0, y_0) η προβολή του κέντρου των φακών στο φωτογραφικό επίπεδο.

Οι παράμετροι (c, x_0, y_0) μαζί με τις διαστάσεις του αρνητικού ή του ψηφιακού αισθητήρα ορίζουν τις παραμέτρους της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής. Η διαδικασία αποκατάστασης της δέσμης των οπτικών ακτίνων στο εσωτερικό της φωτομηχανής ονομάζεται εσωτερικός προσανατολισμός. Αντίθετα η θέση (X_0, Y_0, Z_0) του σημείου λήψης και οι στροφές $(\omega, \varphi, \kappa)$ των αξόνων του επίγειου συστήματος ώστε να γίνουν παράλληλοι με τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων της φωτομηχανής, αποτελούν στοιχεία της θέσης και προσανατολισμού της φωτογραφικής λήψης στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και ο προσδιορισμός των 6 αυτών παραμέτρων ονομάζεται εξωτερικός προσανατολισμός. Η σχέση (6.1) μπορεί να γραφεί στη μορφή

$$\begin{bmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z \end{bmatrix} = \lambda \cdot R(\omega, \varphi, \kappa) \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

λόγω της παραλληλίας με των αξόνων U, V του συστήματος της φωτογραφικής μηχανής με τους x, y του φωτογραφικού επιπέδου.

Από τις τρεις εξισώσεις που προκύπτουν μπορούμε να οδηγηθούμε με διαίρεση των δύο πρώτων με την τρίτη, σε ένα σύστημα δύο εξισώσεων απαλείφοντας με τον τρόπο αυτό το συντελεστή κλίμακας λ , που χαρακτηρίζονται ως εξισώσεις συγγραμμικότητας και είναι η βάση της στερεοσκοπικής φωτογραμμετρικής επεξεργασίας.

$$x = x_0 - c \cdot \frac{(X - X_0) \cdot R_{11} + (Y - Y_0) \cdot R_{12} + (Z - Z_0) \cdot R_{13}}{(X - X_0) \cdot R_{31} + (Y - Y_0) \cdot R_{32} + (Z - Z_0) \cdot R_{33}} \quad (6.4)$$

$$y = y_0 - c \cdot \frac{(X - X_0) \cdot R_{21} + (Y - Y_0) \cdot R_{22} + (Z - Z_0) \cdot R_{23}}{(X - X_0) \cdot R_{31} + (Y - Y_0) \cdot R_{32} + (Z - Z_0) \cdot R_{33}} \quad (6.5)$$

Οι σχέσεις αυτές συνδέουν τις εικονοσυντεταγμένες (x, y) της εικόνας ενός σημείου στο φωτογραφικό επίπεδο, με τις επίγειες συντεταγμένες του (X, Y, Z) μέσω των στοιχείων της εσωτερικής γεωμετρίας της φωτομηχανής (c, x_0, y_0) και άλλων παραμέτρων και των

συντεταγμένων στάσης (X_0, Y_0, Z_0) της φωτογραφικής μηχανής στο επίγειο σύστημα συντεταγμένων και των γωνιών στροφής ανάμεσα στα δύο τρισδιάστατα συστήματα συντεταγμένων (στοιχεία εξωτερικού προσανατολισμού).

Με χρήση δύο εικόνων δηλαδή μέτρηση των εικονοσυντεταγμένων x, y του ίδιου σημείου σε δύο εικόνες (που ονομάζονται ομόλογα σημεία), προκύπτουν δύο ζεύγη εξισώσεων της παραπάνω μορφής (...), που μπορούν να λυθούν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και να εξάγουν τη θέση του σημείου στο χώρο, δηλαδή τις συντεταγμένες X, Y, Z . Η τεχνική αυτή ονομάζεται φωτογραμμετρική εμπροσθοτομία.

Βασική προϋπόθεση για την επίλυση της φωτογραμμετρικής εμπροσθοτομίας είναι να έχει προσδιοριστεί προηγουμένως η θέση και στροφή της φωτομηχανής (δηλαδή η σχέση των αξόνων της φωτομηχανής με τους άξονες του επίγειου συστήματος συντεταγμένων) με τη διαδικασία του σχετικού και απόλυτου προσανατολισμού του στερεοζεύγους των εικόνων. Η διαδικασία της εμπροσθοτομίας πραγματοποιείται για πλήθος σημείων με αποτέλεσμα την αποτύπωση του ζητούμενου αντικειμένου.

6.3 Προετοιμασία πειραματικής διαδικασίας

Ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να εξασφαλίζει τη λήψη εικόνων κατάλληλων για τον σκοπό της απόδοσης. Είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη η φύση του προς αποτύπωση στοιχείου, ακίνητο ή κινούμενο, καθώς και η ζητούμενη ακρίβεια αποτύπωσης του. Παράλληλα, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η δυνατότητα των διατιθέμενων μέσων, όπως ο τύπος της μηχανής λήψης, ο τρόπος υλοποίησης των σημείων στην επιφάνεια του προς αποτύπωση σώματος, ο εσωτερικός προσανατολισμός και η συγχρονισμένη λήψη φωτογραφιών.

Στην προκειμένη περίπτωση, η πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται σε ορθογωνικό κανάλι και η περιοχή λήψης των φωτογραφιών περιλαμβάνει μια μικρή περιοχή ανάντη και κατάντη του βάρου, στην οποία έχουν πραγματοποιηθεί και μετρήσεις με συμβατικές μεθόδους.

Η ιδιαιτερότητα εφαρμογής της φωτογραμμετρικής αποτύπωσης στο συγκεκριμένο πείραμα έγκειται σε τρεις παραμέτρους. Η πρώτη παράμετρος αφορά τη δυναμική φύση του προς αποτύπωση σώματος, δηλαδή τη ροή του νερού, γεγονός που απαιτεί τη χρήση σταθερών φωτομηχανών σε αντίθεση με τις συνήθεις περιπτώσεις όπου οι φωτομηχανές κινούνται γύρω από το ακίνητο σώμα. Η δεύτερη παράμετρος αφορά την υλοποίηση ευδιάκριτων σημείων, υπαρχόντων ή πρόσθετων, στην επιφάνεια του νερού για να είναι δυνατή η επεξεργασία των εικόνων. Η τρίτη παράμετρος σχετίζεται με την τάξη μεγέθους του προβλήματος. Δεδομένου ότι σε κλίμακα εργαστηρίου τα προς μέτρηση μεγέθη είναι σχετικά μικρά, για παράδειγμα η μέτρηση της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας πραγματοποιείται σε εκατοστά (cm) με ακρίβεια χιλιοστού (mm), απαιτείται πολύ μεγάλη ακρίβεια στην λήψη και επεξεργασία φωτογραφιών και επομένως ειδικός εξοπλισμός που δεν είναι απαραίτητος σε συνήθεις φωτογραμμετρικές εφαρμογές.

Η φωτογραμμετρική απεικόνιση στο συγκεκριμένο πείραμα μπορεί να υλοποιηθεί με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος περιλαμβάνει τη χρήση δύο φωτομηχανών και τη λήψη επικαλυπτόμενων φωτογραφιών, τις οποίες στη συνέχεια μπορούμε να επεξεργαστούμε, να αντιστοιχίσουμε κοινά σημεία και να υπολογίσουμε τις συντεταγμένες τους με βάση τη

στερεοσκοπική παρατήρηση. Ο δεύτερος τρόπος βασίζεται στη χρήση πολλών φωτομηχανών και στην πολυεικονική όραση υπολογιστών από την οποία παράγεται τρισδιάστατο μοντέλο του σώματος και είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι υψομετρικές διαφορές μεταξύ σημείων.

Το πρώτο βήμα στην προετοιμασία του πειράματος αποτελεί η τοποθέτηση των φωτομηχανών και ο προσδιορισμός του εσωτερικού και του εξωτερικού προσανατολισμού τους. Ο εσωτερικός προσανατολισμός αφορά στα χαρακτηριστικά της κάθε μηχανής και επομένως κατά τη διάρκεια του πειράματος παραμένει ίδιος σε κάθε μηχανή. Ωστόσο, είναι διαφορετικός για κάθε φωτομηχανή. Επομένως, τα χαρακτηριστικά του εσωτερικού προσανατολισμού υπολογίζονται μία φορά για κάθε κάμερα. Ο εξωτερικός προσανατολισμός αφορά στη θέση της κάθε φωτομηχανής και συγκεκριμένα τη θέση του θεωρητικού σημείου λήψης και τις γωνίες στροφής του σε σχέση με το σύστημα αναφοράς, στο οποίο παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα. Ο προσανατολισμός αυτός είναι διαφορετικός για κάθε φωτογραφία όταν κινείται η φωτομηχανή. Ωστόσο, στην περίπτωση μας παραμένει σταθερός.

Αρχικά, είναι σημαντικό να υπολογισθεί ο εσωτερικός προσανατολισμός κάθε φωτομηχανής με πολύ μεγάλη ακρίβεια, ώστε η τελική επεξεργασία να οδηγεί σε αποτελέσματα επιθυμητής ακρίβειας απαλλαγμένα όσο είναι δυνατόν από μεταφερόμενα σφάλματα. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος υλοποίησης του εσωτερικού προσανατολισμού έγκειται στην τοποθέτηση φωτοσταθερών σημείων εντός του καναλιού, οι συντεταγμένες των οποίων προσδιορίζονται με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Η ακρίβεια αυτή μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη χρήση σύγχρονων τοπογραφικών μηχανημάτων υψηλής ακρίβειας, τα οποία δεν ήταν διαθέσιμα κατά τη διεξαγωγή του πειράματος. Ενδεικτικά, η μέγιστη ακρίβεια που μπορεί να υλοποιηθεί με κλασικά τοπογραφικά όργανα υψηλής ακρίβειας είναι 1 - 2 χιλιοστά (mm). Εναλλακτικά, προτάθηκε η χρήση γυάλινης πλάκας με υψηλής ακρίβειας χαραγμένο κানাβο, οι συντεταγμένες του οποίου είναι γνωστές.

Σε ό,τι αφορά το μέσο φωτογράφισης, επιλέχθηκαν φωτογραφικές μηχανές του εμπορίου τύπου GOPRO, λόγω του σχετικά χαμηλού τους κόστους (σε σχέση με ειδικές μηχανές για φωτογραμμετρικές εφαρμογές) και της διαθεσιμότητάς τους στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας. Η λήψη των απαραίτητων φωτογραφιών απαιτούσε τη χρήση τουλάχιστον δύο μηχανών, με την τοποθέτηση της πρώτης στα ανάντη του βάρους και της δεύτερης στα κατόντη. Ωστόσο, διαπιστώθηκε αδυναμία λήψης ολόκληρης της περιοχής ενδιαφέροντος, καθώς το βάθος έκρυβε από την κάθε μηχανή τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας του νερού. Παράλληλα, ήταν σημαντικό να υπάρχει επαρκές επικαλυπτόμενο τμήμα σε όλες τις φωτογραφίες για να είναι δυνατή η στερεοσκοπική επεξεργασία τους. Επιλέχθηκε, τελικά, να χρησιμοποιηθούν τέσσερις μηχανές, δύο στα ανάντη και δύο στα κατόντη του βάρους και να τοποθετηθεί η κάθε μία στο αριστερό και δεξί τοίχωμα του καναλιού. Ο σχεδιασμός αυτός ήταν απαραίτητος ώστε να καταγραφεί η ελεύθερη επιφάνεια στα ανάντη από τις δύο ανάντη μηχανές και στα κατόντη από τις δύο κατόντη μηχανές. Για τη στήριξη τους, υλοποιήθηκε από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής μια ειδική βάση που επιτρέπει την στήριξη και κατακόρυφη κίνηση των μηχανών πάνω από το κανάλι με τη βοήθεια ειδικών εξαρτημάτων τους.



Σχήμα 6.1 Βάση στήριξης φωτογραφικών μηχανών

Το ζήτημα του συγχρονισμού των φωτογραφικών μηχανών δοκιμάστηκε αρχικά να επιλυθεί με τη χρήση ειδικού τηλεχειριστηρίου για μηχανές τέτοιου είδους. Ωστόσο, σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας παρατηρήθηκε αδυναμία συγχρονισμού υψηλής ακρίβειας και των τεσσάρων μηχανών, καθώς παρουσιάστηκε χρονική υστέρηση της τάξης του 0.10 - 0.15 s μεταξύ των λήψεων των εικόνων. Η υστέρηση αυτή δεν είναι συστηματική και επομένως δεν είναι δυνατή η απαλοιφή της. Προτάθηκε αντί της λήψης ασυγχρόνιστων φωτογραφιών, να λαμβάνεται video από κάθε μηχανή και να συγχρονίζονται τα ζητούμενα προς μελέτη στιγμιότυπα με τη χρήση ενός χρονομέτρου ή ενός άλλου δείκτη, όπως ένα στιγμιαίο φλας. Δεδομένου ότι δεν υπήρχε διαθέσιμο αδιάβροχο χρονόμετρο, επιλέχθηκε η χρήση του φλας.

Για την υλοποίηση της επιφάνειας του νερού δοκιμάστηκε αρχικά η χρήση σωματιδίων μεγέθους 10 μm υπό τη μορφή σκόνης ώστε να είναι επαρκώς μικρά και να μην επηρεάζουν τη λειτουργία της αντλίας. Ωστόσο, τα σωματίδια αυτά δεν είναι ευδιάκριτα στο φακό των συγκεκριμένων φωτογραφικών μηχανών. Δεδομένου ότι η χρήση οποιονδήποτε άλλων σωματιδίων μεγαλύτερου μεγέθους απαιτεί την δύσκολη και χρονοβόρα κατασκευή ενός συστήματος μορφής απόχης ώστε τα σωματίδια αυτά να απομακρύνονται πριν φτάσουν στην αντλία, επιλέχθηκε τελικά να μην χρησιμοποιηθεί άλλος τρόπος υλοποίησης της ελεύθερης επιφάνειας και να γίνει προσπάθεια επεξεργασίας των αυτούσιων σημείων της επιφάνειας του νερού.

6.4 Πειραματική διαδικασία

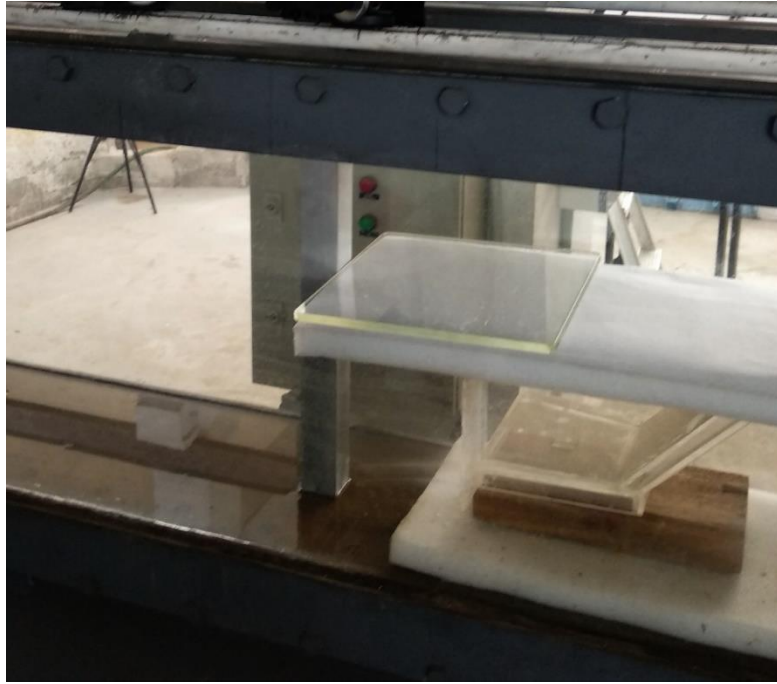
Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε με την τοποθέτηση των τεσσάρων φωτομηχανών στην ειδική βάση και τον προσδιορισμό της κατάλληλης γωνίας λήψης (Σχήμα 6.2). Το στάδιο αυτό μας έδωσε τη δυνατότητα να καθορίσουμε τον εξωτερικό προσανατολισμό, ο οποίος παρέμεινε σταθερός σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Η διεξαγωγή του πειράματος πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις.



Σχήμα 6.2 Τοποθέτηση των φωτομηχανών πάνω από τη διώρυγα

Στην πρώτη φάση, η γυάλινη πλάκα (Σχήμα 6.3) τοποθετήθηκε μέσα στη διώρυγα στα κατάντη του βάρους πάνω σε βάση που επιτρέπει την τοποθέτησή της σε μεγαλύτερο ύψος πάνω από τον πυθμένα και υπό γωνία, χωρίς να υπάρχει ροή στο κανάλι. Λήφθηκαν video και από τις τέσσερις κάμερες με σκοπό να υλοποιηθεί ο εσωτερικός προσανατολισμός και ένα τοπικό σύστημα αναφοράς για τον μετέπειτα προσδιορισμό των συντεταγμένων των σημείων της ελεύθερης επιφάνειας του νερού.

Στη δεύτερη φάση, η γυάλινη πλάκα απομακρύνθηκε και υλοποιήθηκαν οι συνθήκες ροής (παροχή και ύψος υπερχειλιστή) για τις οποίες πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Λήφθηκαν και πάλι βίντεο από τις κάμερες σε συνδυασμό με τη ρίψη τριών φλας, ένα δοκιμαστικό και άλλα δύο για τον καθορισμό των απαραίτητων στιγμιότυπων του καθενός από τα δύο πειράματα (Σχήμα 6.4).



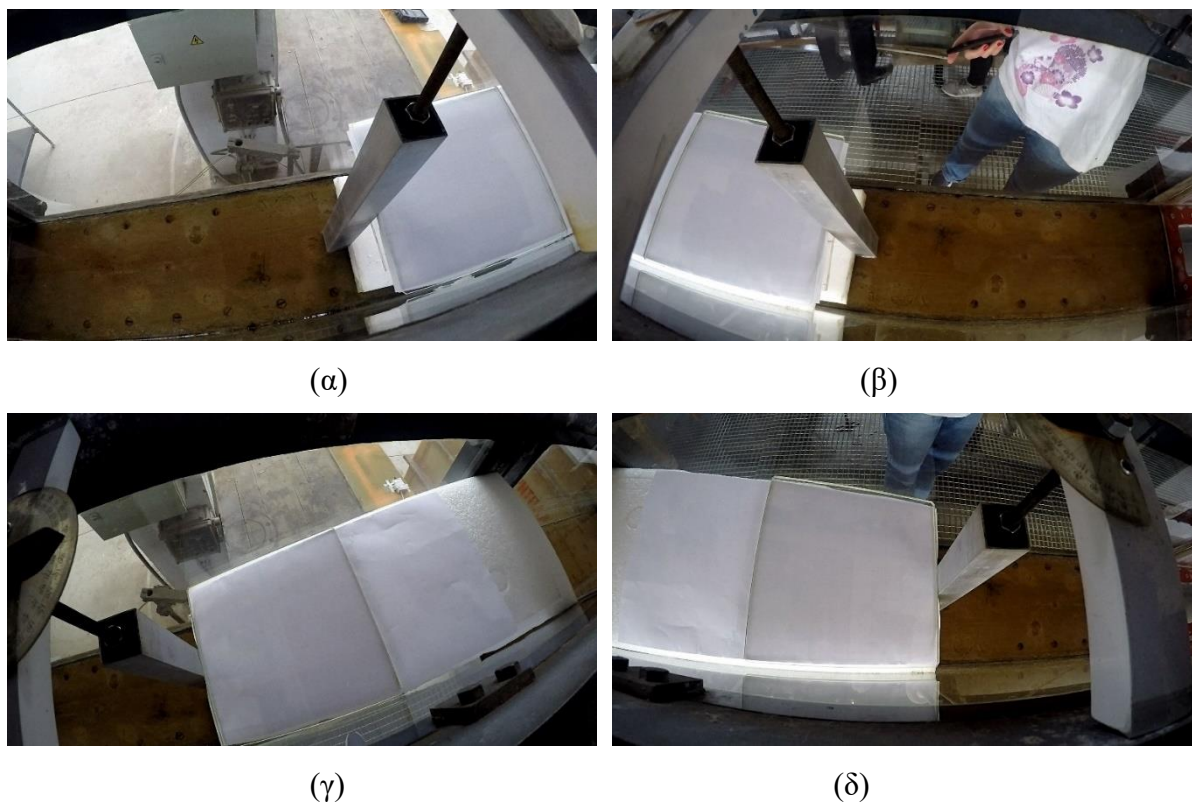
Σχήμα 6.3 Τοποθέτηση γυάλινης πλάκας μέσα στη διώρυγα



Σχήμα 6.4 Λήψη βίντεο κατά τη διάρκεια του πειράματος

6.5 Επεξεργασία αποτελεσμάτων

Το πρώτο βήμα για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων είναι η δημιουργία κώδικα σε υπολογιστικό περιβάλλον Matlab για το διαχωρισμό των βίντεο σε στιγμιότυπα (frames). Από τη διαδικασία αυτή επιλέχθηκαν τα στιγμιότυπα αμέσως μετά τη λήψη των δύο φλας.



Σχήμα 6.5 Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές στο στάδιο με τη γυάλινη πλάκα χωρίς παρουσία νερού

Παρατηρήθηκε μειωμένη ποιότητα των στιγμιότυπων προς επεξεργασία σε σχέση με τις αντίστοιχες εικόνες που μπορούν να ληφθούν από τις μηχανές. Παράλληλα, έγινε αντιληπτό ότι η συχνότητα λήψης στιγμιότυπων των καμερών δεν είναι η ίδια με συνέπεια τα στιγμιότυπα αμέσως μετά το φλας να μην είναι ακριβώς τα ίδια σε όλες τις μηχανές. Εκτιμήθηκε, επίσης, εκτεταμένη ακτινική διαστροφή των φωτογραφιών λόγω της χρήσης μη επαγγελματικών φωτομηχανών ακριβείας.

Σε ό,τι αφορά την εύρεση των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού με τη βοήθεια της πλάκας, παρατηρήθηκαν προβλήματα στην αποτύπωση του με υψηλή ακρίβεια. Συγκεκριμένα, για να είναι ακριβής ο προσδιορισμός του εσωτερικού προσανατολισμού είναι σημαντικό τα σταθερά σημεία να είναι ομοιόμορφα κατανομημένα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ωστόσο, στην περίπτωση της πλάκας τα σημεία γνωστών συντεταγμένων περιορίζονται μόνο στην περιοχή της πλάκας με συνέπεια να εμφανίζονται παραμορφώσεις στις περιοχές που απέχουν αρκετά από τα σημεία αυτά. Οι παραμορφώσεις αυτές όχι μόνο επηρεάζουν την τελική ακρίβεια των αποτελεσμάτων, αλλά δημιουργούν δυσκολίες και στο αρχικό βήμα προσδιορισμού του εσωτερικού προσανατολισμού. Συγκεκριμένα, τα στοιχεία των φωτομηχανών, όπως η σταθερά της μηχανής, υπολογίζονται σε κλίμακα λίγων μm και

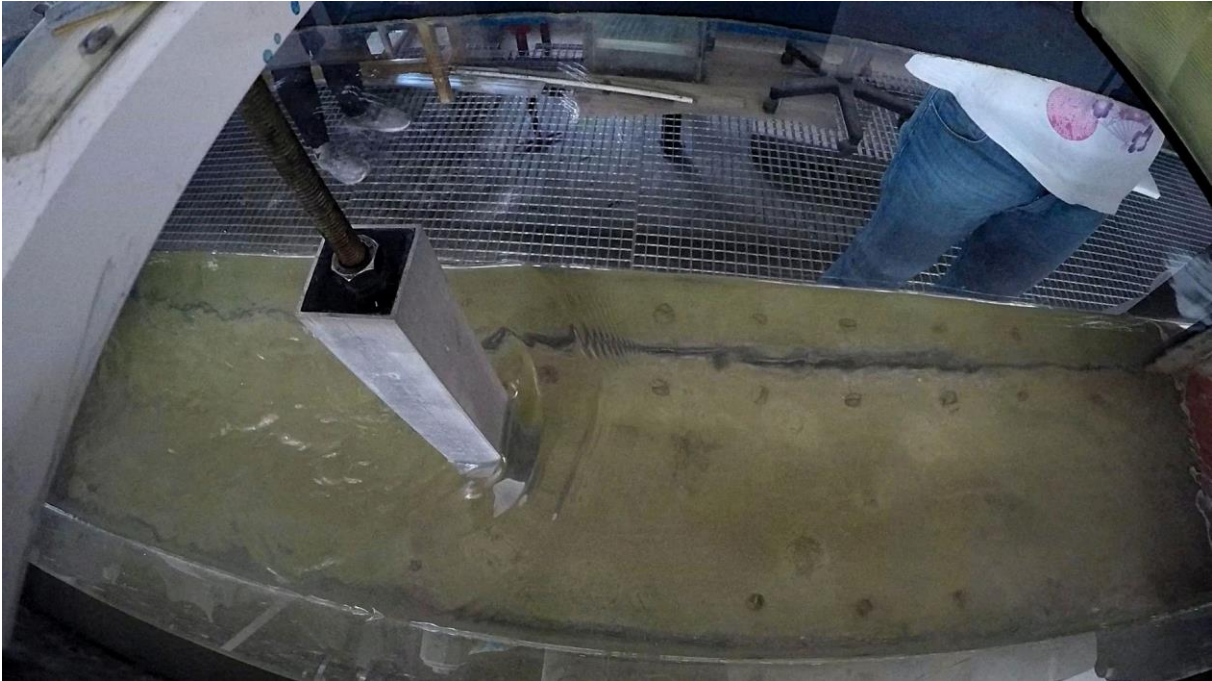
στην περίπτωση που το σφάλμα είναι επίσης της ίδιας τάξης μεγέθους δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά της μηχανής.

Τέλος, η χρήση τεσσάρων φωτομηχανών συνεπάγεται τη διαμόρφωση ενός συστήματος συντεταγμένων στα ανάντη και ενός άλλου στα κατόντη με συνέπεια την αύξηση των σφαλμάτων στο τελικό αποτέλεσμα, καθώς το τελικό σφάλμα είναι η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους σφαλμάτων σύμφωνα με το νόμο μετάδοσης σφαλμάτων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω προβλήματα και αστοχίες του πειράματος, θεωρήσαμε ότι τα αποτελέσματα δεν είναι αξιοποιήσιμα για να μας δώσουν πληροφορίες για τη μορφή της ελεύθερης επιφάνειας, την υψομετρική διαφορά της στάθμης ανάντη και κατόντη και τις επιφανειακές ταχύτητες. Επομένως, είναι απαραίτητη η μελέτη των προβλημάτων αυτών και η επίλυση τους για την εκ νέου διεξαγωγή του πειράματος με καλύτερες προοπτικές.



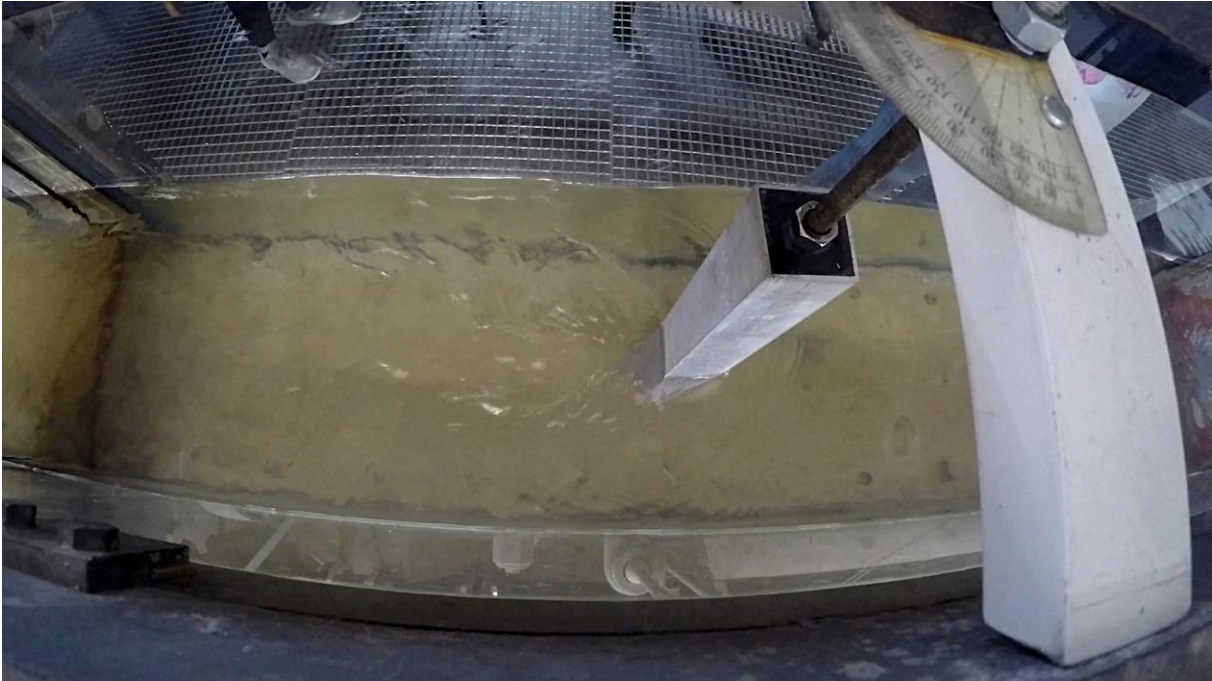
Σχήμα 6.6 Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: ανάντη του βάρους στο δεξί τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής



Σχήμα 6.7 Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: ανάντη του βάθρου στο αριστερό τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής



Σχήμα 6.8 Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: κατάντη του βάθρου στο δεξί τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής



Σχήμα 6.9 Στιγμιότυπα από τις φωτομηχανές κατά τη διάρκεια του πειράματος – θέση φωτομηχανής: κατάντη του βάθρου στο αριστερό τοίχωμα ως προς την κατεύθυνση της ροής

6.6 Τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων και βελτίωσης της πειραματικής διαδικασίας

Η υλοποίηση του πειράματος με καλύτερες προοπτικές απαιτεί την εύρεση ενός τρόπου υπολογισμού των παραμέτρων του εσωτερικού προσανατολισμού με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια και τα ελάχιστα δυνατά σφάλματα. Αυτό θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είτε με τη χρήση μηχανημάτων σάρωσης με ακτίνες laser υψηλής ακρίβειας (laser scanner), είτε με την τοποθέτηση σημειών-στόχων, οι συντεταγμένες των οποίων προσδιορίζονται με σύγχρονα τοπογραφικά μηχανήματα πολύ υψηλής ακρίβειας. Οι δύο αυτοί τρόποι απαιτούν τόσο την απόκτηση απαραίτητων κονδυλίων για την προμήθεια των μηχανημάτων, όσο και την εκπαίδευση και εξοικείωση των ερευνητών στη χρήση τους.

Σε ό,τι αφορά τα μέσα φωτογράφισης, η βέλτιστη λύση έγκειται στην προμήθεια ειδικού εξοπλισμού και φωτομηχανών υψηλής ακρίβειας. Ο συντονισμός των φωτομηχανών με μεγάλη ακρίβεια πρέπει να γίνει με τη δημιουργία κατάλληλου λογισμικού ή με την κατασκευή μιας πλακέτας (hardware).

Τέλος, η άρτια οργάνωση και εκτέλεση ενός πειράματος τέτοιου είδους απαιτεί τη διεπιστημονική συνεργασία και ανταλλαγή γνώσεων και ιδεών μεταξύ Πολιτικών, Τοπογράφων και Ηλεκτρολόγων Μηχανικών.

7. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε πειραματικά η ροή γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν διατομές διαφορετικής γεωμετρίας και μετρήθηκαν τα βάθη ροής ανάντη και κατάντη του βάθρου, καθώς και οι σημειακές ταχύτητες σε δύο άξονες. Σκοπός της εργασίας ήταν η εκτίμηση της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, της διαφοράς στάθμης ανάντη και κατάντη του βάθρου και ο υπολογισμός της ειδικής δύναμης, των ενεργειακών απωλειών, της δύναμης και του συντελεστή αντίστασης και των χαρακτηριστικών του πεδίου των ταχυτήτων. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε αδιάστατη μορφή χρησιμοποιήθηκε ο αριθμός Froude στα ανάντη και κατάντη της διαταραγμένης ροής και στην αδιατάρακτη ροή. Για να εξαχθούν συμπεράσματα για διαφορετικές συνθήκες ροής, χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές παροχές και τέσσερις θέσεις υπερχειλιστή, καθώς και πέντε διατομές διαφορετικής γεωμετρίας.

Τα βασικά συμπεράσματα από την παραπάνω μελέτη είναι:

(α) Σε ό,τι αφορά την υπερύψωση Δy :

- i. Παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές του Froude, $Fr < 0.50$, τόσο στα ανάντη και στα κατάντη, όσο και στη αδιατάρακτη ροή, η υπερύψωση δεν ξεπερνάει το 20% του κρίσιμου βάθους.
- ii. Για μεγαλύτερες τιμές, κοντά στην κρίσιμη ροή, η υπερύψωση μπορεί να φτάσει και το 75% του κρίσιμου βάθους. Γενικά, οι μεγαλύτερες τιμές της υπερύψωσης για όλες τις διατομές εμφανίζονται κοντά σε τιμή $Fr_{up}=0.5-0.6$ και $Fr_a= 0.92-0.96$.
- iii. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι μεταξύ των διαφορετικών βάθρων για την ίδια περίπου τιμή του αριθμού Froude, η τετραγωνική και η ρομβοειδής διατομή προκαλούν γενικά μεγαλύτερη υπερύψωση.

(β) Σε ό,τι αφορά τη μεταβολή της στάθμης ανάντη και κατάντη, Δh :

- i. Παρατηρούμε ότι σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής στα κατάντη ($w=3, 6, 9$), η μεταβολή Δh πλησιάζει το 25% του κρίσιμου βάθους, ενώ σε υπερκρίσιμη ροή ($w=0$) η μεταβολή αυτή μπορεί να φτάσει μέχρι το 85% του κρίσιμου βάθους.
- ii. Επίσης, για υποκρίσιμη ροή φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η τιμή του Fr (δηλαδή όσο μειώνεται το ύψος υπερχειλιστή), τόσο αύξανεται και ο λόγος $\Delta h/y_c$ αν και η σχέση τους δεν είναι γραμμική.
- iii. Σε ό,τι αφορά τη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών βάθρων για την ίδια περίπου τιμή του αριθμού Froude, παρατηρούμε ότι η ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών 2:1 προκαλεί τη μικρότερη διαφορά στάθμης ανάντη και κατάντη, η οποία σε όλες τις περιπτώσεις δεν είναι μεγαλύτερη από το 15% του κρίσιμου βάθους σε υποκρίσιμη ροή και το 50% σε υπερκρίσιμη.

(γ) Σε ό,τι αφορά τον υπολογισμό της ειδικής δύναμης:

- i. Παρατηρούμε ότι για υποκρίσιμη ροή, η διαφορά των ειδικών δυνάμεων δεν ξεπερνάει το 35% της ειδικής δύναμης σε αδιατάρακτη ροή.

- ii. Ωστόσο, σε συνθήκες ελεύθερης υπερχειλίσης ($w=0$), η διαφορά των ειδικών δυνάμεων είναι πιθανό να γίνει διπλάσια της ειδικής δύναμη σε αδιατάρακτη ροή αν εμφανιστούν υπερκρίσιμες συνθήκες ροής. Ο λόγος $\Delta M/Ma$ αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Froude ανάντη και κατόντη για υποκρίσιμες συνθήκες ροής (Σχήμα 5.23, Σχήμα 5.26).
- (δ) Σε ό,τι αφορά την κατανομή της ταχύτητας:
- i. Παρατηρούμε ότι η οριζόντια ταχύτητα στα κατόντη του βάρους εμφανίζει ένα συγκεκριμένο μοτίβο «δύο κορυφών» αριστερά και δεξιά του άξονα της εγκάρσιας διατομής. Αυτό σημαίνει ότι η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στις περιοχές εμφάνισης των κορυφών και όχι στον άξονα.
 - ii. Αντίθετα, το οριζόντιο προφίλ ταχυτήτων στα ανάντη εμφανίζει τη μέγιστη τιμή στον άξονα με μικρή μείωση στις περιοχές γύρω από αυτόν.
- (ε) Σε ό,τι αφορά το συντελεστή αντίστασης:
- i. Παρατηρούμε ότι οι συντελεστές αντίστασης λαμβάνουν τιμές από 0.3 μέχρι 5.5.
 - ii. Μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης εμφανίζει η τετραγωνική διατομή και η ορθογωνική με λόγο 2.5:1, ενώ μικρότερη αντίσταση εμφανίζει η κυλινδρική διατομή.
 - iii. Οι υπολογισμένες τιμές των α και β προσεγγίζουν τη μονάδα και δεν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα της ειδικής δύναμης των απωλειών ενέργειας αν λάβουμε τα α , β υπόψη
- (στ) Σε ό,τι αφορά την παρεμπόδιση της ροής:
- i. Παρατηρούμε ότι ο ρόμβος περιορίζει περισσότερο από τις υπόλοιπες διατομές το πλάτος της διώρυγας από το οποίο μπορεί να περάσει το νερό. Σε αυτή την παρεμπόδιση της ροής οφείλονται πιθανότατα η αυξημένη υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, οι μεγάλες απώλειες ενέργειας και οι υψηλοί συντελεστές αντίστασης που παρουσιάζονται σε ροή γύρω από βάθρο ρομβοειδούς διατομής.
 - ii. Παρατηρούμε, επίσης, ότι ενώ ο κύλινδρος παρεμποδίζει αρκετά τη ροή, η επιρροή του δεν είναι τόσο έντονη, όπως είναι άλλων διατομών που περιορίζουν λιγότερο τη ροή, π.χ. της τετραγωνικής. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο σχήμα του που δεν έχει γωνίες και στο γεγονός ότι ο κύλινδρος που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα είναι λείος με αποτέλεσμα να μειώνονται οι τριβές.
 - iii. Το ορθογώνιο με λόγο πλευρών 2:1 εμποδίζει τη ροή λιγότερο από όλες τις άλλες διατομές και σε αυτό οφείλεται πιθανότατα η σχετικά μικρή επιρροή του στη ροή (απώλειες ενέργειας, αντίσταση, υπερύψωση).
 - iv. Παρατηρούμε ότι αύξηση του πλάτους του βάρους που παρεμποδίζει τη ροή δεν συνεπάγεται απαραίτητα αύξηση της αντίστασης και του συντελεστή CD.
 - v. Το ποσοστό περιορισμού της ροής επηρεάζει τις απώλειες ενέργειας και ουσιαστικά μεγαλύτερη μείωση του ενεργού πλάτους οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες.
 - vi. Παρατηρούμε ότι πέρα από κάποιες ακραίες τιμές, η υπερύψωση δεν αυξάνεται απαραίτητα με την αύξηση του πλάτους του εμποδίου.
 - vii. Ασαφής είναι και τα συμπεράσματα για την επιρροή της στένωσης στη μεταβολή της στάθμης ανάντη και κατόντη του εμποδίου.

- viii. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται ο συντελεστής αντίστασης, τόσο αυξάνεται και η υπερύψωση, καθώς και η διαφορά στάθμης. Οι μεγάλοι συντελεστές αντίστασης αφορούν υπερκρίσιμες συνθήκες ροής και για αυτό το λόγο δεν εμφανίζονται στην ανάλυση ταχυτήτων, όπου μελετώνται μόνο υποκρίσιμες συνθήκες. Επίσης, παρατηρούμε ότι για ίδια υπερύψωση ή διαφορά στάθμης, η τετραγωνική διατομή και η ορθογωνική με λόγο πλευρών 2.5/1 εμφανίζουν το μεγαλύτερο συντελεστή αντίστασης.
- (ζ) Σε ό,τι αφορά την πειραματική δοκιμή με φωτογραμμετρικές μεθόδους, παρατηρούμε ότι αποτελεί μια μέθοδο που θα μπορούσε να φανεί πολύ χρήσιμη και να δώσει πολύ σημαντικά αποτελέσματα. Απαιτείται, ωστόσο, προσεκτικός σχεδιασμός των πειραμάτων και πολλές δοκιμές για να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

7.2 Παρατηρήσεις σχετικά με τα πειράματα

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, παρατηρήθηκαν ασυνήθιστες τιμές ή και σφάλματα σε ορισμένες μετρήσεις.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο υπολογισμός μέσω ολοκλήρωσης των μέσων ταχυτήτων ανάντη και κατάντη του εμποδίου, όπου διαπιστώθηκε ότι υπολογιζόταν μικρότερη τιμή της ταχύτητας στα κατάντη. Αρχικά, θεωρήθηκε ως σφάλμα η λήψη των μετρήσεων σε διαφορετικές χρονικές στιγμές χωρίς να είναι δυνατό να επαναληφθούν τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά της ροής. Ωστόσο, το σφάλμα εντοπίστηκε και σε μετρήσεις που έγιναν ακριβώς στις ίδιες συνθήκες.

Επιπλέον, σφάλμα εντοπίστηκε και στις μετρήσεις του αδιατάρακτου βάθους ροής για ύψος υπερχειλιστή ίσο με 3 cm, όπου η καμπυλότητα της σχέσης βάθους ροής-παροχής δεν ήταν η αναμενόμενη και δεν ταίριαζε με αυτές των υπόλοιπων σχέσεων. Παρά το γεγονός ότι οι μετρήσεις έγιναν και δεύτερη φορά, το σφάλμα δεν ήταν δυνατό να εξαλειφθεί, αν και βελτιώθηκε η μορφή της καμπύλης.

Σε ό,τι αφορά τις συνθήκες ροής, πρέπει να επισημάνουμε ότι σε υπερκρίσιμες συνθήκες ροής η μέτρηση του βάθους ροής ήταν αμφισβητήσιμη λόγω των κυματισμών που δημιουργούνται.

Σε μικρές παροχές, της τάξης των 5 και 10 L/s, παρατηρήθηκε δυσκολία της αντλίας να προσεγγίσει τις παροχές και να διατηρήσει σταθερή τη λειτουργία της.

Στα πιθανά σφάλματα πρέπει να ληφθεί υπόψη η παλαιότητα της διώρυγας και των μετρητικών συσκευών με τα οποία διεξάχθηκαν τα πειράματα. Ο πυθμένας της διώρυγας είναι μεταλλικός και όχι λείος όπως είναι τα πλευρικά τοιχώματα με αποτέλεσμα να παρουσιάζει ανωμαλίες και αλλοιώσεις λόγω της διάβρωσης και της φθοράς του χρόνου, ενώ δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο να παρουσιάζει και αρχικές ατέλειες. Οι μικροκυματισμοί από τις ατέλειες αυτές είναι πιθανότατα η αιτία αποτελεσμάτων που δεν είναι αναμενόμενα, όπως για παράδειγμα κάποιες αρνητικές τιμές του Δy και του ΔH .

7.3 Προτάσεις για το μέλλον

Δεδομένου ότι η έρευνα πάνω σε αυτό το αντικείμενο είναι σημαντική για την ασφάλεια των ανθρώπων, των κατασκευών και του φυσικού περιβάλλοντος παρατίθενται κάποιες προτάσεις για τη βελτίωση μελλοντικών ερευνών και των αποτελεσμάτων τους.

Αρχικά, για την αντιμετώπιση του προβλήματος ολοκλήρωσης των ταχυτήτων και ορθού υπολογισμού των συντελεστών αντίστασης, συνίσταται η ταυτόχρονη χρήση δύο σωλήνων Pitot, ένας ανάντη και ένας κατάντη. Τα Pitot θα μπορούσαν ίσως να αντικατασταθούν από ηλεκτρονικά όργανα στα οποία εξαλείφεται το σφάλμα του παρατηρητή.

Για καλύτερη σύγκριση διατομών με διαφορετικό σχήμα, προτείνεται η χρήση διατομών με ίδιο πλάτος παρεμπόδισης της ροής ώστε τα αποτελέσματα να είναι ανεξάρτητα αυτής της παραμέτρου και να επικεντρώνονται στο σχήμα. Παράλληλα, καλό θα ήταν να διεξαχθούν επιπρόσθετα πειράματα για να ληφθούν συμπεράσματα βασισμένα σε μεγαλύτερο δείγμα.

Επιπλέον, με την προσθήκη μιας αντλίας φερτών θα μπορούσε να μελετηθεί το πρόβλημα και υπό την οπτική της υποσκαφής στη βάση του βάρους και να εξαχθούν συνδυαστικά συμπεράσματα για υποσκαφή και υπερύψωση.

Τα πειράματα θα μπορούσαν να επεκταθούν και σε μετρήσεις πεδίου και να συνδυαστούν με υδραυλικά ομοιώματα.

Επιπρόσθετα, συνίσταται η εισαγωγή μεθόδων οπτικοποίησης της ροής, όπως είναι η φωτογραμμετρία, οι οποίες όχι μόνο λύνουν το πρόβλημα των σημειακών μετρήσεων, αλλά δίνουν και τη δυνατότητα για καλύτερη αναπαράσταση και παρατήρηση των φαινομένων σε ροή γύρω από βάρους.

Τέλος, δεδομένου ότι οι υπολογιστές μας δίνουν τη δυνατότητα να επιλύσουμε προβλήματα που δεν είναι εύκολα υλοποιήσιμα σε εργαστήριο, να κάνουμε δοκιμές και να αναπαραστήσουμε το πρόβλημα αλλά τα αποτελέσματα τους δεν επιβεβαιώνονται συχνά στην πράξη, συνίσταται η υλοποίηση ενός πειραματικού μοντέλου σε υπολογιστικό πρόγραμμα για να γίνει σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Αυτό όχι μόνο επιτρέπει τον έλεγχο και τη βελτίωση των υπολογιστικών προγραμμάτων, αλλά μας δίνει πολλές υπολογιστικές δυνατότητες που δεν έχουμε σε ένα εργαστήριο. Στην παρούσα μελέτη έγινε προσπάθεια μοντελοποίησης του πειράματος, αλλά δυστυχώς απαιτούσε μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα για να επιλυθούν τα προβλήματα και να «τρέξει» το υπολογιστικό προσομοίωμα.

Αναφορές

Ελληνικές βιβλιογραφικές αναφορές

- Kraus K., 2003, *Φωτογραμμετρία, Τόμος 1: Βασικές έννοιες και μέθοδοι*, Β' Βελτιωμένη Έκδοση. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.
- Νουτσόπουλος Γ., Γ. Χριστοδούλου, 1996, *Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών για Πολιτικούς Μηχανικούς*. Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα.
- Νουτσόπουλος, Γ., Γ. Χριστοδούλου, Τ. Παπαθανασιάδης, 2007, *Υδραυλική ανοιχτών αγωγών*. Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα.
- Παπαϊωάννου Α.Θ., 2002, *Μηχανική των ρευστών – Τόμοι I & II.*, Εκδόσεις Κοράλι, Αθήνα.
- Παπανικολάου Π. Ν., 2016, *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 4.
- Παπανικολάου Π. Ν., 2017, *Πειραματική Υδραυλική*, Διδακτικές σημειώσεις.
- Τσότσος Σ., Ι. Τέγος , Μ. Βαφειάδης, 1998, *Καταστροφή γέφυρας χειμάρρου Ζηλιάνα της Εθνικής Οδού Αθηνών – Θεσσαλονίκης κατά την 28η Νοεμβρίου 1998 - Αποτελέσματα πραγματογνωμοσύνης*.

Διεθνείς βιβλιογραφικές αναφορές

- Agarwal N., S. Sree Ram, C.R. Suribabu, 2014, *Determination of Shape Co-efficient and Drag Co-efficient of Triangular Piers under Sub-Critical Flow Conditions.*, Asian Journal of Applied Sciences, 7: 441-447. DOI: 10.3923/ajaps.2014.441.447.
- S. Al-Nassri, 1994, *Effect of bridge pier shape and contraction ratios on backwater profile*. Hydraulic Engineering 1994, (ed. G. Controneo and R. R. Rumer), American Society of Civil Engineers, Buffalo, NY, p. 563-568.
- Anonymous (1939): *Report of the engineering aspects of the flood of 1938: Appendix 1 - Theoretical and observed bridge pier losses.*, U. S. Engineer Office, Los Angeles, CA, p. 61, May.
- Atabay S, D. Knight, N. Seckin, G. Seckin, 2008a, *Improving bridge afflux prediction for overbank flows.*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management 161(5): 253–260, <http://dx.doi.org/10.1680/wama.2008.161.5.253>.
- Atabay S, G. Seckin, N. Seckin, D. Knight, 2008b, *Effect of the Froude number on assessment of the bridge afflux.*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management 161(2): 97–104, <http://dx.doi.org/10.1680/wama.2008.161.2.97>.
- Atabay S., K.H.A. Assar, M. Hashemi, M. Dib, 2017, *Prediction of the backwater level due to bridge constriction in waterways.*, Water and Environment Journal, Volume 32, Issue 1: 94-103.

- Biery P.F., J.W. Delleur, 1962, *Hydraulics of single span arch bridge constrictions.*, ASCE Journal of Hydraulics 88(2): 75–108.
- Bradley J., 1978, *Hydraulics of Bridge Waterways.*, Washington D.C.: Bridge Division, Federal Highways Administration (FHWA).
- Brown P.M., 1985, *Hydraulics of bridge waterways: Interium report.*, Wallingford, UK: Hydraulic Research Wallingford, Report SR 60.
- Brown P.M., 1987, *Afflux at arch bridges: Second interium report.*, Wallingford, UK: Hydraulic Research Wallingford, Report SR 115.
- Brown P.M., 1988, *Afflux at arch bridges.*, Wallingford, UK: Hydraulic Research Wallingford, Report SR 182.
- Charbeneau R.J., E.R. Holley, 2001, *Backwater Effects of Piers in Subcritical Flow.*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA, Report FHWA/TX-0-1805-1.
- Chow V.T., 1959, *Open channel hydraulics.*, McGraw-Hill, Inc.
- Cuiling S., X. Xiaohui, W. Di, W. Xianfeng, L. Xuewen, 2006, *Analysis of mathematical model of water resistance of Foshan Bridge Group.*, Anhui Agricultural Sciences, 34 (1): 186-188.
- D'Aubuisson De Voisins J. F., 1840, *Traité d'hydraulique à l'usage des ingénieurs.*, Paris, Pitois-Levrault et c.e; Strasbourg, F.G. Levrault.
- Ding W., H. Tang, W. Dai, Y. Xiao, 2011, *Research of resistance influence factors of river bridges.*, Hydro-Science and Engineering, (4): 52-56.
- Eid M.A.A.H., M.I.I. Mohammed, 2016, *Effect of Erodible Bed on Backwater Rise Due to Bridge Piers Only in Case of Subcritical Flow.*, American Journal of Water Science and Engineering. Vol. 2, No. 2, 2016 pp. 6-13. doi: 10.11648/j.ajwse.20160202.11.
- El-Alfy K.S., 2006, *Experimental study of backwater rise due to flow constriction by bridge piers as flow obstructions.*, Tenth International Water Technology Conference, IWTC10 2006, Alexandria, Egypt.
- El-Alfy K.S., 2009, *Backwater rise due to bridge piers.*, Thirteenth International Water Technology Conference, IWTC 13 2009, Hurghada, Egypt.
- Escande L., 1939, *Recherches sur l'écoulement de l'eau entre les piles de ponts.*, Le Génie Civil 115(6 & 7), 5 August & 12 August and 23 September.
- Farell C., S. Carrasquel, O. Guven, V.C. Patel, 1977, *Effect of wind tunnel walls on the flow past circular cylinders and cooling tower models.*, Journal of Fluids Engineering, Vol. 90, 1977, p. 470.
- Fenton J.D., 2008, *Keynote Lecture*, p. 15-22 of Hydraulic Structures – Proc. 2nd International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures, 30.7-1.8.2008, Pisa, Italy, ed. Stefano Pagliara, Edizioni Plus, University of Pisa.
- He Z., J. Zhang, Y. He, S. Mu, 2015, *Research of Optimal Experiment on Bridge Pier Types for Reducing Backwater.*, International Conference on Energy, Materials and

- Manufacturing Engineering - MATEC Web of Conferences Volume 25, 04001
<https://doi.org/10.1051/matecconf/20152504001>.
- HEC (Hydrologic Engineering Center), 2002, *HEC-RAS River Analysis System.*, HEC, US Army Corps of Engineers, Davis, CA, USA, Version 3.1, Beta.
- Henderson F.M., 1966, *Open Channel Flow.*, Macmillan, New York.
- Hsieh T., 1964, *Resistance of Cylindrical Piers in Open-Channel Flow.*, Journal of the Hydraulics Division, 1964, Vol. 90, Issue 1, Pg. 161-173.
- Kaatz K.J., W.P. James, 1997, *Analysis of alternatives for computing backwater at bridges.*, Journal of Hydraulic Engineering 123(9): 784–792.
- Kocaman S., 2014, *Prediction of Backwater Profiles due to Bridges in a Compound Channel Using CFD.*, Advances in Mechanical Engineering, Volume 2014, Article ID 905217
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/905217>.
- Lane E.W., 1920, *Experiments on the flow of water through contractions in an open channel.*, Trans. ASCE Vol. 83, 1910-20. p. 1149-219.
- Leister J.G., 2010, *Backwater Effects of Piers and Abutments in 2D - Replication of Physical Model Tests in a 2D Hydrodynamic Computer Model.*, Department of Civil and Environmental Engineering, Melbourne School of Engineering, University of Melbourne.
- Liu H., J. Bradley, E. Plate, 1957, *Backwater Effects of Piers and Abutments.*, Fort Collins, Colorado: Civil Engineering Section, Colorado State University.
- Luigia B., W.M. Kebede, 2013, *Uncertainty in the estimation of backwater effects at bridge crossings.*, Hydrological Processes 27(9): 1292–1300.
- Martin-Vide J.P., J.M. Prio, 2005, *Backwater of arch bridges under free and submerged conditions.*, Journal of Hydraulic Research, 43:5, 515-521, DOI: 10.1080/00221680509500149.
- Masch F.D., W.L. Moore, 1973, *Effect of Blockage on Steady Force Coefficients.*, Journal of the Engineering Mechanics Division, 1973, Vol. 99, Issue 4, Pg. 755-772.
- Montes S., 1998, *Hydraulics of open channel flow.*, Reston, VA: ASCE Press.
- Nagler F.A., 1818, *Obstruction of bridge piers to the flow of water.*, Trans. ASCE, Vol. 82, 1918. p. 334-95.
- Owen H. J., A. Sooky, S.T. Husain, 1959, *Hydraulics of River Flow under Arch Bridges—A Progress Report.No. 12*, Joint Highway Research Project, Purdue University, Lafayette, Indiana.
- Pinar E., G. Seckin, B. Sahin, H. Akilli, M. Cobaner, C. Canpolat, S. Atabay, S. Kocaman, 2011, *ANN approaches for the prediction of bridge backwater using both field and experimental data.*, Intl. J. River Basin Management, 9:1, 53-62, DOI: 10.1080/15715124.2011.553833.
- Zhou Q., C. Yin, Z. Zhang, 2011, *Numerical simulation research of water resistance properties for the skew bridge pier group.*, Hydro-Science and Engineering, 30 (2): 29-31.

- Raju K.G.R., O.P.S. Rana, G.L. Asawa, A.S.N. Pillai, 1983, *Rational assessment of blockage effect in channel flow past smooth circular cylinders.*, Journal of Hydraulic Research 21(4): 289–302.
- Ramamurthy A.S., C.P. NG, 1973, *Effect of blockage on steady force coefficients.*, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol. 99, Issue 4, Pg. 755-772.
- Rehbock Th., 1921, *Verfahren zur bestimmung des bruckenstraues bei rein stromendern wasserdurchfluss.*, Technical University of Karlsruhe, *A method for determining the backwater due to bridge piers in streaming flow.*, Translated by E. F. Wisely, Bureau of Reclamation.
- Seckin G, 2004, *A simple formula for estimating backwater at bridge constrictions.*, Canadian Journal of Civil Engineering 31(3): 561–568.
- Seckin G., R.Yurtal, T. Haktanir, 1998, *Contraction and expansion losses through bridge constrictions.*, Journal of Hydraulic Engineering 124(5): 546–549.
- Seckin G, T. Haktanir, D.W. Knight, 2007, *A simple method for estimating flood flow around bridges.*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management 160(4): 195–202, <http://dx.doi.org/10.1680/wama.2007.160.4.195>.
- Seckin G, M.S. Akoz, M. Cobaner, T. Haktanir, 2009a, *Application of ANN techniques for estimating backwater through bridge constrictions in Mississippi River basin.*, Advances in Engineering Software 40(10): 1039–1046.
- Seckin G, H. Tefaruk, C. Murat, S. Zeliha, 2009b, *Forecasting backwater through bridge constrictions in Mississippi River basin.*, River Research & Applications 25(3): 315–328.
- Sethuraman V., O. Vasudevan, 1971, *Transverse load coefficients for some bridge pier shapes.*, Monash University, Melbourne, Australia.
- Sreelash K., B.V. Mudgal, 2012, *Drag characteristics of cylindrical piers with slots and/or collars in subcritical flow.*, ISH Journal of Hydraulic Engineering 16(2) DOI: 10.1080/09715010.2010.10515003.
- Suribabu C.R., R.M. Sabarish, R. Narasimhan, A.R. Chandhru, 2011, *Backwater rise and drag characteristics of bridge piers under sub-critical flow conditions.*, European Water 36: 27–35.
- Wang H., H. Tang, X. Xu, J.F. Xiao, D. Liang, 2016, *Backwater effect of multiple bridges along Huaihe River.*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Water Management: 1600003 <http://dx.doi.org/10.1680/jwama.16.00003>.
- Weisbach J.L., R.J. Walter, 1848, *Principles of the mechanics of machinery and engineering.*
- Wisner P., R. Townsend, J. Sabourin, D. Leitch, 1989, *Joint use of the HEC-2 model and a physical model for floodplain delineation upstream of a bridge.*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 16, no. 1, p. 1-7, February.
- Wood A., Palmer R., Petroff C., 1997, *Comparison and assessment of zero-rise floodplain ordinances.*, Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 123, no. 4, American Society of Civil Engineers, New York, NY, July-August.

- Wu F., M. Gan, 2009, *Numerical simulation research of the influence on the river flow field by bigger angle between the axis of the pier group and the river flow direction.*, Journal of North China Institute of Water Resources and Hydropower, (2): 11-14.
- Xu L., D. Huang, G. Zheng, B. Huang, 2008, *Numerical simulation of the flood influence on Beijiang Baimiao.*, Extra Large Bridge Engineering, Guangdong Water Resources and Hydropower, (1): 36-44.
- Yarnell D.L., 1934, *Bridge Piers as Channel Obstructions.*, US Department of Agriculture, Washington, DC, USA.

Ιστοσελίδες

- «DIGITECH-III-2: Επικαιροποίηση Μελέτης DIGITECH-III και Διαδικτυακή Εφαρμογή Επίδειξης και Εκπαίδευσης σε Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Ψηφιοποίησης», Ινστιτούτο Πολιτιστικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας/Ερευνητικό Κέντρο Καινοτομίας στις Τεχνολογίες της Πληροφορίας, των Επικοινωνιών και της Γνώσης (Ι.Π.Ε.Τ.-Ε.Κ./Αθηνά), Ξάνθη
http://www.ipet.gr/digitech2/index.php?option=com_content&task=view&id=73&Itemid=2

Εγχειρίδια

- GE Panametrics, 2003, *TransPort™ PT868 Portable Liquid Flowmeter*, User's Manual 910-122C.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π1. Φωτογραφικές λήψεις από την πειραματική διαδικασία

Παρουσιάζονται φωτογραφίες με στόχο την καλύτερη κατανόηση των πειραμάτων.



Σχήμα Π1.1 Ελεύθερη επιφάνεια σε κατάντη υπερκρίσιμες συνθήκες ροής (ρομβοειδής διατομή, $Q=15$ L/s, $w=0$)

(α) Κυλινδρικό βάθρο



(α)



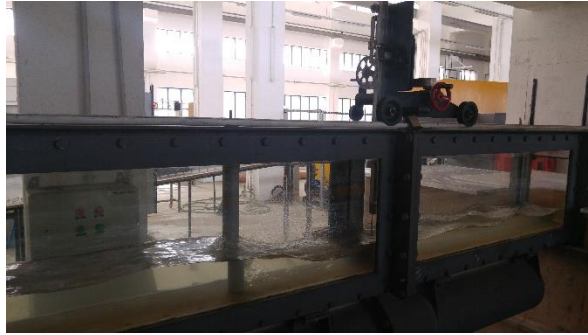
(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.2 Ροή γύρω από βάθρο κυλινδρικής διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)

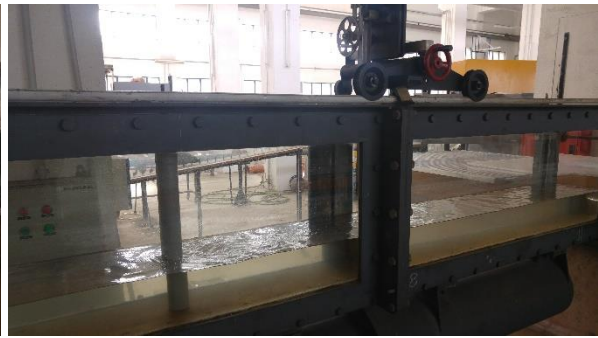


(ε)

Σχήμα Π1.3 Ροή γύρω από βάθρο κυλινδρικής διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=3$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.4 Ροή γύρω από βάθρο κυλινδρικής διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=6$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.5 Ροή γύρω από βάθρο κυλινδρικής διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=9$ cm και παροχές α) $Q=5$ L/s, β) $Q=10$ L/s, γ) $Q=15$ L/s, δ) $Q=20$ L/s, ε) $Q=25$ L/s

(β) Ορθογωνικό βάθρο (10x4 cm)



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.6 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 10x4 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.7 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 10x4 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=3$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.8 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 10x4 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=6$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.9 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 10x4 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=9$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s

(γ) Ορθογωνικό βάθρο (6x3 cm)



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.10 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 6x3 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm και παροχές α) $Q=5$ L/s, β) $Q=10$ L/s, γ) $Q=15$ L/s, δ) $Q=20$ L/s, ε) $Q=25$ L/s



(α)



(β)



(γ)

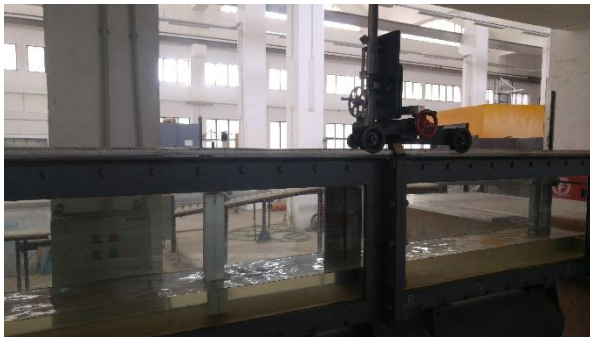


(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.11 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 6x3 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=3$ cm και παροχές α) $Q=5$ L/s, β) $Q=10$ L/s, γ) $Q=15$ L/s, δ) $Q=20$ L/s, ε) $Q=25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.12 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 6x3 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=6$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)

(β)



(γ)

(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.13 Ροή γύρω από βάθρο ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 6x3 cm με ύψος υπερχειλιστή $w=9$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s

(δ) Ρομβοειδές βάθρο



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.14 Ροή γύρω από βάθρο ρομβοειδούς διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=0$ cm και παροχές α) $Q= 5$ L/s, β) $Q= 10$ L/s, γ) $Q= 15$ L/s, δ) $Q= 20$ L/s, ε) $Q= 25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.15 Ροή γύρω από βάθρο ρομβοειδούς διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=3$ cm και παροχές α) $Q=5$ L/s, β) $Q=10$ L/s, γ) $Q=15$ L/s, δ) $Q=20$ L/s, ε) $Q=25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

Σχήμα Π1.16 Ροή γύρω από βάθρο ρομβοειδούς διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=6$ cm και παροχές α) $Q=5$ L/s, β) $Q=10$ L/s, γ) $Q=15$ L/s, δ) $Q=20$ L/s, ε) $Q=25$ L/s



(α)



(β)



(γ)



(δ)



(ε)

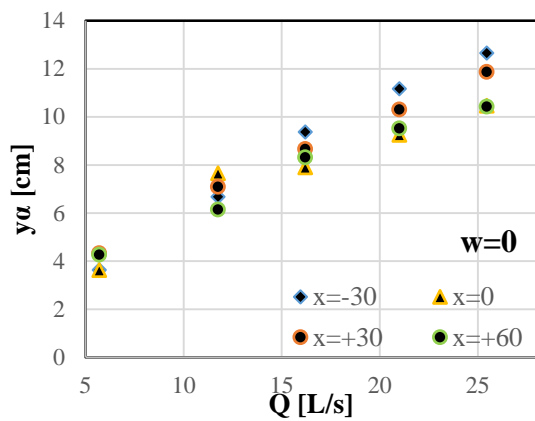
Σχήμα Π1.17 Ροή γύρω από βάθρο ρομβοειδούς διατομής με ύψος υπερχειλιστή $w=9$ cm και παροχές α) $Q=5$ L/s, β) $Q=10$ L/s, γ) $Q=15$ L/s, δ) $Q=20$ L/s, ε) $Q=25$ L/s

(ε) Τετραγωνικό βάθρο

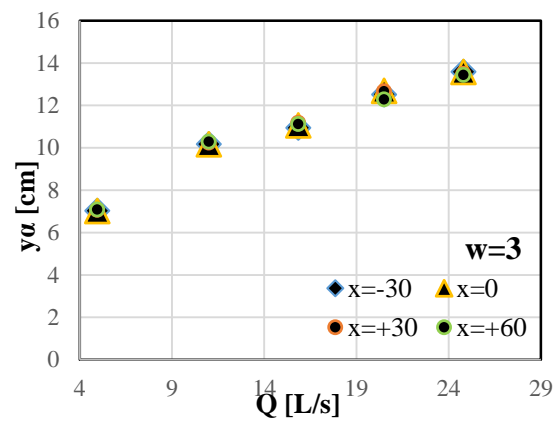


Σχήμα Π1.18 Ροή γύρω από βάθρο τετραγωνικής διατομής

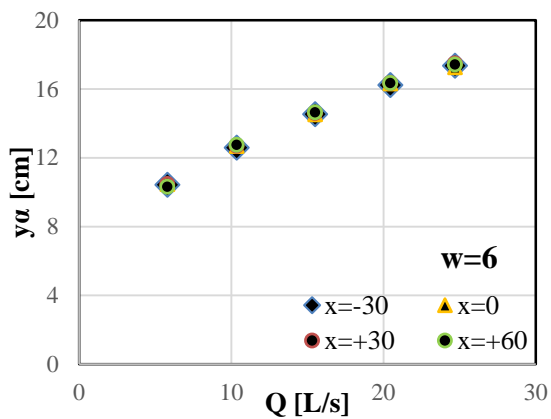
Π.2 Διαγράμματα αδιατάρακτης ροής ανά ύψος υπερχειλιστή



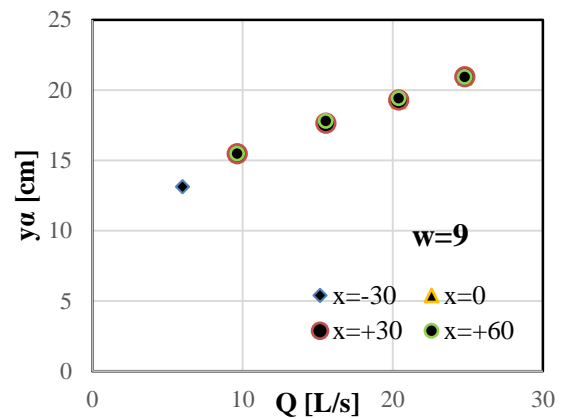
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα Π2.1 Μετρήσεις αδιατάρακτου βάθους σε τέσσερις θέσεις κατά μήκος της διώρυγας για υπερχειλιστή ίσο με (α) 0 cm, (β) 3 cm, (γ) 6 cm, (δ) 9 cm.

Από το παραπάνω σχήμα παρατηρούμε ότι η ελεύθερη επιφάνεια σε κάθε θέση έχει σχεδόν το ίδιο βάθος ροής για δεδομένη παροχή και ύψος υπερχειλιστή. Επιβεβαιώνουμε έτσι ότι οι μετρήσεις των πειραμάτων είναι επαρκώς αξιόπιστες για τη διενέργεια υπολογισμών και συμπερασμάτων.

Π3. Μετρήσεις και υπολογισμοί βάθους ροής, απωλειών ενέργειας και ειδικής δύναμης

Πίνακας Π3.1 Υπολογισμοί για τετραγωνική διατομή

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	y ₁ [cm]	Fr _{up}	Re _{up}	y ₃ [cm]	Fr _{down}	Re _{down}	Δh [cm]	y _c [cm]	Δh/y _c	y _{1,α} [cm]	y _{3,α} [cm]	Δy/y _c	y _{β,α} [cm]	Fr _α	ΔH/y _c [m]	ΔM/M _α
0	5	4.99	5.50	0.484	15479.2	2.78	1.348	18190.3	2.72	3.39	0.80	3.11	4.05	0.71	3.51	0.949	0.80	1.77
	10	10.20	8.58	0.508	27072.0	4.77	1.226	32959.2	3.81	5.46	0.70	6.14	6.33	0.45	6.15	0.838	0.69	1.31
	15	15.35	10.51	0.564	37360.2	6.50	1.160	45142.8	4.01	7.18	0.56	8.73	8.39	0.25	8.12	0.830	0.56	1.01
	20	19.45	12.37	0.560	43834.0	7.63	1.155	54028.9	4.74	8.40	0.56	10.52	9.88	0.22	9.26	0.865	0.56	1.08
	25	24.60	14.95	0.533	50276.6	8.96	1.148	64148.5	5.99	9.83	0.61	12.40	11.57	0.26	10.12	0.957	0.61	1.36
3	5	4.80	6.61	0.354	14036.1	6.50	0.363	14116.3	0.11	3.31	0.03	7.12	7.11	0.15	7.07	0.320	0.03	0.03
	10	9.77	9.20	0.438	25198.3	8.76	0.472	25713.7	0.44	5.31	0.08	9.22	9.37	0.00	9.26	0.434	0.08	0.09
	15	15.20	10.99	0.522	36247.1	10.52	0.558	36979.3	0.47	7.13	0.07	11.12	11.31	0.02	11.21	0.507	0.07	0.08
	20	20.05	12.60	0.561	44776.2	12.03	0.602	45806.2	0.57	8.57	0.07	12.48	12.60	0.01	12.55	0.565	0.07	0.09
	25	25.10	14.92	0.545	51354.1	12.60	0.703	56054.0	2.32	9.96	0.23	13.55	13.48	0.14	13.55	0.630	0.23	0.34
6	5	5.35	10.00	0.212	13313.2	9.93	0.214	13354.3	0.07	3.55	0.02	10.22	10.27	0.06	10.26	0.204	0.02	0.01
	10	10.30	12.42	0.295	23166.7	12.40	0.295	23185.2	0.02	5.50	0.00	12.51	12.59	0.02	12.59	0.289	0.00	0.00
	15	15.20	14.26	0.353	31858.8	14.21	0.355	31917.9	0.05	7.13	0.01	14.46	14.56	0.03	14.53	0.344	0.01	0.01
	20	20.10	16.51	0.375	38889.5	15.84	0.399	39800.9	0.67	8.59	0.08	16.09	16.22	0.05	16.11	0.389	0.08	0.08
	25	24.92	18.29	0.399	45450.4	17.59	0.423	46499.0	0.70	9.91	0.07	17.37	17.54	0.09	17.32	0.433	0.07	0.08
9	5																	
	10	10.16	15.46	0.209	20389.3	15.34	0.212	20476.4	0.12	5.45	0.02	15.29	15.66	0.03	15.35	0.211	0.02	0.02
	15	15.24	17.67	0.257	28362.0	17.41	0.263	28606.5	0.26	7.14	0.04	17.50	17.49	0.02	17.48	0.261	0.04	0.03
	20	20.10	19.52	0.292	35262.1	19.17	0.300	35648.7	0.35	8.59	0.04	19.32	19.23	0.02	19.26	0.298	0.04	0.04
	25	25.13	21.42	0.317	41635.0	21.02	0.326	42128.1	0.40	9.97	0.04	20.91	21.04	0.05	20.83	0.331	0.04	0.04

Πίνακας Π3.2 Υπολογισμοί για ρομβοειδή διατομή

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	y ₁ [cm]	Fr _{up}	Re _{up}	y ₃ [cm]	Fr _{down}	Re _{down}	Δh [cm]	y _c [cm]	Δh/y _c	y _{1,α} [cm]	y _{3,α} [cm]	Δy/y _c	y _{β,α} [cm]	Fr _α	ΔH/y _c [m]	ΔM/M _α
0	5	5.12	5.43	0.507	13311.8	3.19	1.125	15182.4	2.24	3.45	0.65	3.19	3.89	0.65	3.59	0.944	0.65	1.46
	10	11.65	9.17	0.525	25121.5	6.04	0.983	29306.2	3.13	5.97	0.52	6.91	6.49	0.38	6.77	0.829	0.52	1.02
	15	16.15	11.21	0.539	31860.0	6.39	1.252	39883.3	4.82	7.42	0.65	9.10	8.01	0.28	8.38	0.834	0.64	1.18
	20	19.20	12.76	0.527	35575.5	6.36	1.499	47489.8	6.40	8.33	0.77	10.42	8.92	0.28	9.20	0.862	0.76	1.41
	25	24.75	14.97	0.535	42202.9	7.08	1.645	58994.6	7.89	9.87	0.80	12.45	10.33	0.26	10.14	0.960	0.79	1.64
3	5	4.25	6.58	0.315	10392.4	6.41	0.328	10484.6	0.17	3.05	0.06	6.87	6.93	0.09	6.80	0.300	0.06	0.05
	10	11.65	10.29	0.442	23900.3	9.66	0.486	24572.2	0.63	5.97	0.11	9.93	10.03	0.06	9.99	0.462	0.11	0.13
	15	15.60	11.89	0.476	29925.7	10.83	0.548	31270.9	1.06	7.25	0.15	11.25	11.30	0.09	11.34	0.512	0.15	0.19
	20	19.95	13.57	0.500	35827.5	11.90	0.608	38254.8	1.67	8.55	0.20	12.46	12.40	0.13	12.53	0.563	0.19	0.27
	25	24.75	15.51	0.507	41396.4	13.76	0.607	44129.1	1.75	9.87	0.18	13.49	13.25	0.20	13.49	0.625	0.18	0.28
6	5	5.05	10.09	0.197	10450.9	10.07	0.198	10460.1	0.02	3.42	0.01	10.07	9.96	0.01	10.10	0.197	0.01	0.00
	10	11.20	13.03	0.298	20535.0	12.85	0.304	20679.4	0.18	5.82	0.03	12.90	13.00	0.02	12.97	0.300	0.03	0.03
	15	16.10	15.08	0.344	27344.7	14.77	0.355	27652.7	0.31	7.41	0.04	14.78	14.96	0.04	14.85	0.352	0.04	0.04
	20	19.05	16.36	0.360	30932.3	15.72	0.383	31627.7	0.64	8.29	0.08	15.77	15.95	0.07	15.80	0.380	0.08	0.08
	25	24.70	18.29	0.395	37612.8	17.38	0.427	38748.8	0.91	9.85	0.09	17.32	17.42	0.10	17.27	0.431	0.09	0.11
9	5	5.15	13.02	0.137	9446.1	13.04	0.137	9438.8	-0.02	3.46	-0.01	12.82	13.63	0.06	12.99	0.138	-0.01	0.00
	10	10.55	15.71	0.212	17521.8	15.70	0.212	17527.9	0.01	5.59	0.00	15.47	15.84	0.04	15.53	0.216	0.00	0.00
	15	15.65	18.11	0.254	23970.6	17.77	0.262	24237.6	0.34	7.27	0.05	17.66	17.79	0.06	17.64	0.265	0.05	0.04
	20	19.30	19.42	0.282	28357.4	19.10	0.289	28642.3	0.32	8.36	0.04	19.04	19.09	0.05	18.98	0.292	0.04	0.03
	25	24.15	21.35	0.307	33475.2	20.83	0.318	33993.5	0.52	9.71	0.05	20.63	20.71	0.07	20.55	0.325	0.05	0.05

Πίνακας Π3.3 Υπολογισμοί για κυλινδρική διατομή

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	y ₁ [cm]	Fr _{up}	Re _{up}	y ₃ [cm]	Fr _{down}	Re _{down}	Δh [cm]	y _c [cm]	Δh/y _c	y _{1,α} [cm]	y _{3,α} [cm]	Δy/y _c	y _{β,α} [cm]	Fr _α	ΔH/y _c [m]	ΔM/M _α
0	5.00	5.63	5.12	0.608	17835.9	3.86	0.930	19188.9	1.26	3.68	0.34	3.50	4.11	0.44	3.87	0.926	0.34	0.74
	10.00	11.85	8.42	0.607	31689.0	6.63	0.869	34615.9	1.79	6.04	0.30	7.01	6.56	0.23	6.85	0.828	0.29	0.56
	15.00	15.52	10.12	0.604	38418.2	7.00	1.049	44487.3	3.12	7.23	0.43	8.81	7.81	0.18	8.18	0.831	0.43	0.78
	20.00	19.00	10.61	0.688	46046.0	7.43	1.175	53302.0	3.18	8.27	0.38	10.33	8.87	0.03	9.15	0.859	0.38	0.67
	25.00	24.95	13.51	0.629	53788.2	7.83	1.426	68633.5	5.68	9.92	0.57	12.51	10.37	0.10	10.16	0.965	0.57	1.14
3	5.00	5.25	6.95	0.359	15087.0	6.91	0.362	15117.7	0.04	3.51	0.01	7.32	7.40	0.11	7.28	0.334	0.01	0.01
	10.00	11.40	10.06	0.447	28293.7	9.23	0.509	29362.2	0.83	5.88	0.14	9.83	9.94	0.04	9.90	0.458	0.14	0.16
	15.00	15.95	12.23	0.467	36147.6	10.79	0.563	38358.8	1.44	7.36	0.20	11.36	11.40	0.12	11.44	0.516	0.20	0.25
	20.00	19.80	12.21	0.581	44908.8	11.62	0.626	45996.1	0.59	8.50	0.07	12.42	12.37	0.02	12.49	0.562	0.07	0.09
	25.00	24.80	13.58	0.620	53322.7	12.44	0.708	55735.8	1.14	9.88	0.12	13.50	13.26	0.01	13.50	0.626	0.11	0.16
6	5.00	6.03	10.44	0.224	14720.7	10.41	0.225	14739.7	0.03	3.85	0.01	10.55	10.49	0.03	10.60	0.219	0.01	0.01
	10.00	10.50	12.49	0.298	23551.1	12.42	0.300	23616.6	0.07	5.57	0.01	12.60	12.69	0.02	12.67	0.291	0.01	0.01
	15.00	15.85	14.65	0.354	32748.4	14.48	0.360	32952.8	0.17	7.33	0.02	14.70	14.87	0.01	14.76	0.350	0.02	0.02
	20.00	19.78	16.18	0.381	38706.9	15.80	0.394	39222.1	0.38	8.50	0.04	15.99	16.17	0.02	16.02	0.386	0.04	0.05
	25.00	24.45	17.81	0.407	45293.6	17.47	0.419	45803.2	0.34	9.79	0.03	17.26	17.37	0.06	17.22	0.428	0.03	0.04
9	5.00																	
	10.00	9.30	15.08	0.199	18918.2	15.11	0.198	18897.9	-0.03	5.14	-0.01	14.89	15.35	0.04	14.97	0.201	-0.01	0.00
	15.00	15.75	17.99	0.258	29006.0	17.83	0.262	29157.8	0.16	7.30	0.02	17.70	17.82	0.04	17.68	0.265	0.02	0.02
	20.00	20.15	19.41	0.295	35470.7	19.29	0.298	35603.6	0.12	8.60	0.01	19.34	19.38	0.01	19.27	0.298	0.01	0.01
	25.00	24.10	21.01	0.313	40413.4	20.78	0.319	40690.6	0.23	9.69	0.02	20.61	20.70	0.04	20.53	0.324	0.02	0.02

Πίνακας Π3.4 Υπολογισμοί για ορθογωνική διατομή (6x3 cm)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	y ₁ [cm]	Fr _{up}	Re _{up}	y ₃ [cm]	Fr _{down}	Re _{down}	Δh [cm]	y _c [cm]	Δh/y _c	y _{1,α} [cm]	y _{3,α} [cm]	Δy/y _c	y _{β,α} [cm]	Fr _α	ΔH/y _c [m]	ΔM/M _α
0	5.00	5.20	5.13	0.560	16464.4	3.77	0.889	17819.9	1.36	3.49	0.39	3.24	3.93	0.54	3.63	0.941	0.39	0.90
	10.00	11.75	7.69	0.690	32543.8	6.16	0.962	35176.9	1.53	6.00	0.25	6.96	6.52	0.12	6.81	0.828	0.25	0.45
	15.00	15.18	9.20	0.681	39151.5	7.13	0.998	43228.1	2.07	7.12	0.29	8.66	7.70	0.08	8.07	0.829	0.29	0.51
	20.00	19.40	11.63	0.612	45048.4	8.15	1.044	52549.2	3.48	8.39	0.41	10.50	8.98	0.14	9.24	0.864	0.41	0.79
	25.00	25.30	12.84	0.688	55970.8	8.30	1.325	68042.4	4.54	10.01	0.45	12.63	10.45	0.02	10.19	0.974	0.45	0.90
3	5.00	4.70	5.63	0.441	14476.5	5.49	0.457	14587.6	0.14	3.26	0.04	7.07	7.14	0.44	7.02	0.316	0.04	0.03
	10.00	11.40	9.92	0.457	28468.5	9.44	0.492	29084.3	0.48	5.88	0.08	9.83	9.94	0.01	9.90	0.458	0.08	0.09
	15.00	15.10	11.03	0.516	35948.1	10.68	0.542	36485.1	0.35	7.10	0.05	11.09	11.16	0.01	11.18	0.506	0.05	0.06
	20.00	19.30	12.91	0.521	42580.6	12.01	0.581	44128.3	0.90	8.36	0.11	12.29	12.26	0.07	12.37	0.556	0.11	0.15
	25.00	24.90	14.25	0.580	52209.1	13.67	0.617	53355.3	0.58	9.91	0.06	13.52	13.27	0.07	13.52	0.627	0.06	0.09
6	5.00	6.32	10.61	0.229	15316.3	10.65	0.228	15290.2	-0.04	3.97	-0.01	10.70	10.64	0.02	10.74	0.225	-0.01	-0.01
	10.00	10.85	12.65	0.302	24182.8	12.61	0.303	24221.0	0.04	5.69	0.01	12.75	12.85	0.02	12.82	0.296	0.01	0.01
	15.00	14.30	14.32	0.330	29906.0	14.16	0.336	30083.8	0.16	6.84	0.02	14.13	14.29	0.03	14.20	0.335	0.02	0.02
	20.00	19.60	16.20	0.376	38328.2	16.00	0.383	38594.8	0.20	8.44	0.02	15.94	16.11	0.03	15.97	0.385	0.02	0.03
	25.00	24.75	17.73	0.415	45969.6	17.40	0.427	46472.8	0.33	9.87	0.03	17.33	17.43	0.04	17.28	0.431	0.03	0.04
9	5.00	4.30	12.62	0.120	9595.3	12.67	0.119	9576.4	-0.05	3.07	-0.02	12.37	13.27	0.08	12.56	0.121	-0.02	-0.01
	10.00	10.22	15.52	0.209	20466.1	15.57	0.208	20430.0	-0.05	5.47	-0.01	15.32	15.71	0.04	15.38	0.212	-0.01	-0.01
	15.00	15.02	17.64	0.254	27980.2	17.48	0.257	28128.3	0.16	7.07	0.02	17.41	17.55	0.03	17.39	0.259	0.02	0.02
	20.00	19.30	19.19	0.287	34208.4	19.11	0.289	34294.3	0.08	8.36	0.01	19.04	19.09	0.02	18.98	0.292	0.01	0.01
	25.00	24.65	21.14	0.318	41177.2	20.89	0.323	41483.2	0.25	9.84	0.03	20.78	20.87	0.04	20.69	0.328	0.03	0.02

Πίνακας Π3.5 Υπολογισμοί για ορθογωνική διατομή (10x4 cm)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	y ₁ [cm]	Fr _{up}	Re _{up}	y ₃ [cm]	Fr _{down}	Re _{down}	Δh [cm]	y _c [cm]	Δh/y _c	y _{1,α} [cm]	y _{3,α} [cm]	Δy/y _c	y _{β,α} [cm]	Fr _α	ΔH/y _c [m]	ΔM/M _α
0	5	4.65	5.30	0.477	14584.3	2.60	1.389	17149.7	2.70	3.24	0.83	2.89	3.69	0.74	3.32	0.963	0.83	1.88
	10	11.50	8.63	0.568	30451.0	5.49	1.119	35693.1	3.14	5.92	0.53	6.83	6.43	0.30	6.70	0.830	0.53	0.96
	15	15.55	11.46	0.502	36361.9	6.01	1.321	46925.5	5.45	7.24	0.75	8.83	7.82	0.36	8.19	0.831	0.75	1.38
	20	20.25	13.08	0.536	44382.5	6.27	1.615	60273.4	6.81	8.63	0.79	10.84	9.22	0.26	9.43	0.875	0.78	1.44
	25	24.80	14.10	0.586	52290.0	7.02	1.669	71016.0	7.08	9.88	0.72	12.47	10.34	0.17	10.14	0.961	0.71	1.40
3	5	5.25	7.05	0.351	15010.8	6.98	0.356	15064.1	0.07	3.51	0.02	7.32	7.40	0.08	7.28	0.334	0.02	0.02
	10	11.25	9.91	0.452	28106.3	9.40	0.489	28753.4	0.51	5.83	0.09	9.78	9.88	0.02	9.84	0.456	0.09	0.10
	15	15.55	12.33	0.450	35100.5	10.85	0.545	37301.8	1.48	7.24	0.20	11.23	11.29	0.15	11.32	0.511	0.20	0.27
	20	19.75	13.55	0.496	42513.1	12.02	0.593	45139.0	1.53	8.49	0.18	12.41	12.36	0.13	12.48	0.561	0.18	0.25
	25	24.80	15.18	0.525	50268.0	13.27	0.642	53957.9	1.91	9.88	0.19	13.50	13.26	0.17	13.50	0.626	0.19	0.29
6	5	6.10	10.59	0.222	14795.9	10.62	0.221	14776.9	-0.03	3.88	-0.01	10.59	10.53	0.00	10.63	0.220	-0.01	-0.01
	10	10.80	12.76	0.297	23967.6	12.78	0.296	23948.8	-0.02	5.68	0.00	12.73	12.82	0.01	12.80	0.295	0.00	0.00
	15	14.98	14.57	0.337	31041.5	14.53	0.339	31087.0	0.04	7.06	0.01	14.38	14.55	0.03	14.45	0.341	0.01	0.01
	20	19.30	16.20	0.371	37741.5	15.76	0.386	38324.0	0.44	8.36	0.05	15.84	16.02	0.04	15.88	0.382	0.05	0.06
	25	24.60	17.96	0.405	45348.8	17.48	0.421	46068.9	0.48	9.83	0.05	17.30	17.40	0.07	17.25	0.430	0.05	0.06
9	5	4.40	12.49	0.125	9869.0	12.66	0.122	9803.0	-0.17	3.12	-0.05	12.42	13.31	0.02	12.61	0.123	-0.05	-0.03
	10	9.10	15.16	0.193	18458.3	15.25	0.191	18399.0	-0.09	5.06	-0.02	14.79	15.26	0.07	14.88	0.199	-0.02	-0.01
	15	14.30	17.46	0.245	26797.6	17.46	0.245	26797.6	0.00	6.84	0.00	17.11	17.29	0.05	17.11	0.253	0.00	0.00
	20	20.10	19.39	0.295	35404.7	19.34	0.296	35459.9	0.05	8.59	0.01	19.32	19.37	0.01	19.26	0.298	0.01	0.01
	25	24.35	21.02	0.316	40820.5	20.86	0.320	41014.9	0.16	9.76	0.02	20.69	20.78	0.03	20.60	0.326	0.02	0.02

Π4. Μετρήσεις και υπολογισμοί ταχυτήτων, συντελεστών αντίστασης, απωλειών ενέργειας και ειδικής δύναμης

Πίνακας Π4.1 Υπολογισμοί για τετραγωνική διατομή

(α) Μετρημένη παροχή (παροχόμετρο)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y ₁ [m]	y ₃ [m]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,down} [m/s]	FD [N]	CD	ΔH/y _c	ΔM/ M _α
3	15	15.02	16.15	0.112	0.109	0.07	0.505	0.522	29698.6	30012.5	0.11	0.505	0.53	0.54	0.65	1.04	0.03	0.02
	20	19.68	21.18	0.132	0.121	0.08	0.517	0.589	35921.9	37515.2	0.12	0.560	0.59	0.64	2.57	2.83	0.09	0.08
	25	25.03	28.87	0.150	0.132	0.10	0.542	0.657	42702.6	45670.4	0.14	0.629	0.66	0.75	4.31	3.34	0.12	0.10
6	15	15.05	16.01	0.150	0.144	0.07	0.326	0.345	25681.3	26201.5	0.14	0.342	0.39	0.41	1.88	4.02	0.07	0.06
	20	19.73	20.84	0.167	0.161	0.08	0.362	0.383	31658.6	32328.2	0.16	0.386	0.46	0.48	2.29	3.19	0.06	0.05
	25	24.90	26.62	0.183	0.176	0.10	0.398	0.422	37905.1	38779.4	0.17	0.433	0.53	0.55	2.61	2.51	0.06	0.05
9	15	15.52	16.18	0.180	0.179	0.07	0.254	0.258	23851.4	23968.3	0.18	0.263	0.34	0.34	0.67	1.62	0.02	0.01
	20	20.23	20.10	0.194	0.191	0.09	0.296	0.303	29735.0	30015.1	0.19	0.299	0.41	0.42	1.94	2.99	0.04	0.03
	25	24.70	26.00	0.213	0.209	0.10	0.316	0.325	34338.2	34747.0	0.21	0.328	0.46	0.46	1.88	2.13	0.04	0.03

(β) Υπολογισμένη παροχή (ολοκλήρωση μετρήσεων Pitot)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,dow} n [m/s]	V _{y,up} [m/s]	V _{y,down} [m/s]	β _{up}	α _{up}	β _{down}	α _{down}	FD	CD	ΔH/ y _c	ΔM/ M _α
3	15	16.15	0.07	0.543	0.562	31940.8	32278.4	0.12	0.518	0.57	0.61	0.55	0.57	1.020	1.052	1.011	1.029	0.62	0.86	0.03	0.02
	20	21.18	0.09	0.556	0.634	38651.0	40365.4	0.13	0.578	0.63	0.73	0.62	0.68	1.017	1.038	1.011	1.032	2.40	2.29	0.08	0.07
	25	28.87	0.11	0.625	0.758	49269.7	52693.8	0.14	0.688	0.76	0.76	0.74	0.74	1.023	1.043	1.009	1.021	3.56	2.08	0.09	0.07
6	15	16.01	0.07	0.347	0.367	27327.7	27881.3	0.15	0.352	0.42	0.41	0.41	0.42	1.014	1.043	1.012	1.029	1.85	3.50	0.07	0.05
	20	20.84	0.09	0.382	0.404	33444.5	34151.9	0.16	0.396	0.49	0.49	0.48	0.49	1.014	1.037	1.011	1.028	2.25	2.81	0.06	0.05
	25	26.62	0.10	0.426	0.451	40528.5	41463.3	0.18	0.449	0.57	0.55	0.56	0.57	1.013	1.052	1.015	1.017	2.54	2.13	0.05	0.05
9	15	16.18	0.09	0.265	0.269	24872.3	24994.2	0.18	0.269	0.35	0.34	0.34	0.34	1.009	1.038	1.008	1.021	0.66	1.48	0.02	0.01
	20	20.10	0.09	0.295	0.302	29555.3	29833.7	0.19	0.298	0.41	0.41	0.40	0.41	1.020	1.035	1.007	1.040	1.94	3.03	0.04	0.03
	25	26.00	0.10	0.332	0.342	36141.4	36571.7	0.21	0.336	0.48	0.46	0.47	0.41	1.013	1.034	1.013	1.036	1.86	1.90	0.03	0.03

Πίνακας Π4.2 Υπολογισμοί για ρομβοειδή διατομή

(α) Μετρημένη παροχή (παροχόμετρο)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y ₁ [m]	y ₃ [m]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,down} [m/s]	FD [N]	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	15.53	17.33	0.123	0.113	0.07	0.451	0.512	29310.1	30528.8	0.11	0.511	0.50	0.54	2.44	2.86	0.11	0.10
	20	20.28	22.09	0.140	0.125	0.09	0.485	0.574	35825.9	37954.2	0.13	0.567	0.57	0.64	3.73	2.92	0.13	0.11
	25	24.60	27.35	0.156	0.137	0.10	0.500	0.607	41014.9	43961.2	0.13	0.623	0.62	0.70	4.95	2.94	0.13	0.12
6	15	15.40	16.48	0.150	0.148	0.07	0.332	0.340	26231.2	26469.6	0.15	0.346	0.40	0.41	0.94	1.37	0.03	0.03
	20	20.03	21.35	0.169	0.164	0.09	0.362	0.379	31977.2	32526.7	0.16	0.388	0.47	0.48	2.04	1.97	0.05	0.04
	25	24.50	26.06	0.182	0.175	0.10	0.397	0.419	37477.2	38282.5	0.17	0.429	0.53	0.55	2.54	1.76	0.06	0.05
9	15	14.80	16.33	0.181	0.178	0.07	0.241	0.247	22676.0	22898.7	0.17	0.257	0.32	0.33	1.41	2.68	0.04	0.03
	20	19.50	20.83	0.197	0.194	0.08	0.280	0.287	28447.9	28713.7	0.19	0.294	0.39	0.40	1.67	1.98	0.03	0.03
	25	24.00	25.63	0.215	0.208	0.10	0.301	0.317	33121.6	33812.6	0.21	0.324	0.44	0.45	3.75	3.22	0.07	0.05

(β) Υπολογισμένη παροχή (ολοκλήρωση μετρήσεων Pitot)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,dow} _n [m/s]	V _{y,up} [m/s]	V _{y,dow} _n [m/s]	β _{up}	α _{up}	β _{down}	α _{down}	FD	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	17.33	0.08	0.503	0.571	32694.7	34054.1	0.12	0.532	0.55	0.59	0.55	0.57	1.016	1.042	1.008	1.020	2.28	2.15	0.10	0.08
	20	22.09	0.09	0.528	0.626	39039.3	41358.5	0.13	0.590	0.62	0.72	0.61	0.68	1.014	1.038	1.011	1.028	3.47	2.29	0.11	0.09
	25	27.35	0.11	0.556	0.675	45604.3	48880.3	0.14	0.664	0.69	0.85	0.68	0.75	1.013	1.034	1.013	1.034	4.46	2.14	0.11	0.10
6	15	16.48	0.08	0.355	0.364	28075.3	28330.5	0.15	0.356	0.43	0.42	0.42	0.43	1.011	1.030	1.007	1.019	0.93	1.17	0.03	0.02
	20	21.35	0.09	0.387	0.404	34100.6	34686.5	0.16	0.400	0.50	0.48	0.50	0.50	1.015	1.040	1.008	1.021	2.00	1.70	0.05	0.04
	25	26.06	0.10	0.422	0.446	39869.7	40726.4	0.18	0.444	0.56	0.56	0.55	0.57	1.010	1.028	1.008	1.021	2.47	1.52	0.05	0.04
9	15	16.33	0.07	0.266	0.272	25021.7	25267.4	0.18	0.270	0.35	0.33	0.35	0.35	1.011	1.030	1.008	1.020	1.39	2.17	0.04	0.03
	20	20.83	0.09	0.299	0.306	30393.6	30677.6	0.20	0.303	0.42	0.38	0.41	0.39	1.012	1.032	1.005	1.014	1.65	1.72	0.03	0.02
	25	25.63	0.10	0.322	0.338	35365.5	36103.4	0.21	0.334	0.47	0.44	0.46	0.46	1.013	1.034	1.006	1.016	3.70	2.79	0.06	0.05

Πίνακας Π4.3 Υπολογισμοί για κυλινδρική διατομή

(α) Μετρημένη παροχή (παροχόμετρο)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y ₁ [m]	y ₃ [m]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,down} [m/s]	FD [N]	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	15.90	17.25	0.119	0.111	0.07	0.485	0.538	30488.8	31511.5	0.11	0.515	0.52	0.56	1.99	2.44	0.09	0.07
	20	19.90	20.82	0.128	0.126	0.09	0.544	0.560	36814.8	37178.6	0.13	0.563	0.61	0.62	0.64	0.54	0.02	0.02
	25	24.58	26.57	0.143	0.132	0.10	0.572	0.642	43021.9	44762.7	0.13	0.623	0.68	0.73	2.17	1.33	0.06	0.05
6	15	15.05	16.73	0.146	0.145	0.07	0.338	0.341	26009.9	26105.4	0.14	0.342	0.40	0.41	0.48	0.80	0.01	0.01
	20	20.30	21.49	0.165	0.165	0.09	0.379	0.381	32804.3	32860.4	0.16	0.391	0.48	0.48	0.36	0.38	0.01	0.01
	25	24.63	26.69	0.181	0.178	0.10	0.400	0.412	37729.5	38162.5	0.17	0.430	0.53	0.54	1.37	1.06	0.03	0.03
9	15	15.13	16.70	0.179	0.178	0.07	0.250	0.252	23325.2	23401.5	0.17	0.260	0.33	0.33	0.60	1.21	0.01	0.01
	20	19.73	21.69	0.197	0.194	0.08	0.282	0.290	28731.8	29045.0	0.19	0.295	0.39	0.40	1.93	2.54	0.04	0.03
	25	24.65	27.62	0.215	0.211	0.10	0.310	0.318	34018.6	34420.6	0.21	0.328	0.45	0.46	2.19	2.01	0.04	0.03

(β) Υπολογισμένη παροχή (ολοκλήρωση μετρήσεων Pitot)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,dow} [m/s]	V _{y,up} [m/s]	V _{y,dow} [m/s]	β _{up}	α _{up}	β _{down}	α _{down}	FD	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	17.25	0.08	0.526	0.584	33068.3	34177.5	0.12	0.53	0.57	0.59	0.57	0.60	1.025	1.063	1.010	1.026	1.88	1.96	0.08	0.06
	20	20.82	0.09	0.569	0.586	38524.1	38904.7	0.13	0.57	0.64	0.68	0.64	0.69	1.016	1.043	1.013	1.033	0.61	0.47	0.02	0.02
	25	26.57	0.10	0.618	0.694	46505.8	48387.6	0.14	0.65	0.73	0.82	0.72	0.80	1.014	1.036	1.021	1.058	1.95	1.02	0.05	0.04
6	15	16.73	0.08	0.376	0.379	28921.9	29028.0	0.15	0.36	0.45	0.41	0.44	0.44	1.013	1.036	1.008	1.020	0.47	0.64	0.01	0.01
	20	21.49	0.09	0.401	0.403	34722.5	34782.0	0.16	0.40	0.51	0.48	0.51	0.51	1.014	1.037	1.008	1.021	0.36	0.33	0.01	0.01
	25	26.69	0.10	0.434	0.447	40889.4	41358.7	0.18	0.45	0.58	0.55	0.57	0.57	1.010	1.026	1.009	1.023	1.32	0.88	0.03	0.02
9	15	16.70	0.08	0.276	0.278	25754.1	25838.4	0.18	0.27	0.37	0.34	0.36	0.35	1.012	1.031	1.007	1.019	0.59	0.99	0.01	0.01
	20	21.69	0.09	0.311	0.319	31597.2	31941.7	0.20	0.31	0.43	0.40	0.43	0.42	1.013	1.035	1.006	1.016	1.90	2.07	0.04	0.03
	25	27.62	0.11	0.347	0.357	38123.5	38574.0	0.22	0.35	0.50	0.47	0.49	0.48	1.011	1.029	1.006	1.017	2.14	1.56	0.03	0.03

Πίνακας Π4.4 Υπολογισμοί για ορθογωνική διατομή (6x3 cm)

(α) Μετρημένη παροχή (παροχόμετρο)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y ₁ [m]	y ₃ [m]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,down} [m/s]	FD [N]	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	15.20	16.15	0.112	0.109	0.07	0.511	0.531	30061.2	30411.1	0.11	0.507	0.53	0.55	0.67	1.24	0.03	0.02
	20	19.18	21.75	0.129	0.119	0.08	0.521	0.583	35404.3	36731.5	0.12	0.554	0.59	0.63	1.82	2.15	0.06	0.05
	25	24.65	27.66	0.142	0.136	0.10	0.578	0.617	43273.4	44259.7	0.13	0.624	0.68	0.71	0.93	0.75	0.03	0.02
6	15	15.05	16.98	0.147	0.144	0.07	0.336	0.347	25962.5	26249.9	0.14	0.342	0.40	0.41	1.32	2.91	0.04	0.03
	20	20.10	22.43	0.165	0.160	0.09	0.377	0.392	32536.7	33017.2	0.16	0.389	0.48	0.49	1.69	2.40	0.04	0.03
	25	24.85	27.09	0.178	0.175	0.10	0.416	0.424	38511.2	38797.4	0.17	0.432	0.55	0.56	1.04	1.09	0.02	0.02
9	15	15.48	17.99	0.179	0.179	0.07	0.255	0.257	23845.5	23903.9	0.18	0.263	0.34	0.34	0.51	1.23	0.01	0.01
	20	20.30	22.71	0.197	0.195	0.09	0.291	0.296	29592.1	29798.9	0.19	0.299	0.40	0.41	1.28	2.12	0.02	0.02
	25	24.43	27.23	0.210	0.208	0.10	0.317	0.322	34182.1	34411.4	0.21	0.326	0.46	0.46	1.30	1.59	0.02	0.02

(β) Υπολογισμένη παροχή (ολοκλήρωση μετρήσεων Pitot)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,down} [m/s]	V _{y,up} [m/s]	V _{y,down} [m/s]	β _{up}	α _{up}	β _{down}	α _{down}	FD	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	16.15	0.07	0.543	0.564	31942.2	32314.0	0.12	0.518	0.57	0.57	0.58	0.59	1.018	1.047	1.009	1.022	0.67	1.24	0.03	0.02
	20	21.75	0.09	0.591	0.661	40164.9	41670.6	0.13	0.586	0.66	0.64	0.66	0.71	1.015	1.040	1.013	1.034	1.82	2.15	0.06	0.05
	25	27.66	0.11	0.649	0.692	48549.4	49655.9	0.14	0.669	0.77	0.74	0.76	0.75	1.015	1.040	1.026	1.052	0.93	0.75	0.03	0.02
6	15	16.98	0.08	0.379	0.391	29287.6	29611.8	0.15	0.361	0.45	0.41	0.46	0.44	1.022	1.058	1.007	1.019	1.32	2.91	0.04	0.03
	20	22.43	0.09	0.421	0.438	36305.3	36841.5	0.17	0.410	0.53	0.45	0.52	0.53	1.016	1.042	1.008	1.020	1.69	2.40	0.04	0.03
	25	27.09	0.10	0.454	0.462	41985.6	42297.6	0.18	0.454	0.60	0.53	0.59	0.60	1.015	1.040	1.009	1.023	1.04	1.09	0.02	0.02
9	15	17.99	0.08	0.297	0.299	27725.9	27793.8	0.19	0.283	0.39	0.34	0.38	0.36	1.013	1.034	1.007	1.019	0.51	1.23	0.01	0.01
	20	22.71	0.09	0.326	0.332	33111.7	33343.0	0.20	0.315	0.45	0.40	0.44	0.44	1.013	1.034	1.007	1.017	1.28	2.12	0.02	0.02
	25	27.23	0.11	0.354	0.359	38103.2	38358.7	0.21	0.344	0.51	0.44	0.49	0.48	1.013	1.033	1.008	1.021	1.30	1.59	0.02	0.02

Πίνακας Π4.5 Υπολογισμοί για ορθογωνική διατομή (10x4 cm)

(α) Υπολογισμένη παροχή (καμπύλες στάθμης-παροχής που έχουν καταρτιστεί βάσει παροχόμετρου)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{παροχ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y ₁ [m]	y ₃ [m]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,down} [m/s]	FD [N]	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	14.76	16.80	0.116	0.107	0.070	0.471	0.526	28719.8	29729.1	0.11	0.502	0.50	0.54	1.69	2.91	0.08	0.07
	20	20.74	21.20	0.137	0.125	0.088	0.514	0.590	37100.4	38881.1	0.13	0.573	0.59	0.65	3.03	3.13	0.10	0.09
	25	23.36	25.00	0.146	0.131	0.095	0.523	0.620	40344.9	42791.8	0.13	0.606	0.63	0.70	3.31	2.88	0.10	0.09
6	15	15.88	18.33	0.150	0.146	0.073	0.341	0.355	27024.6	27419.5	0.15	0.350	0.41	0.43	1.38	2.68	0.05	0.04
	20	19.14	20.82	0.162	0.158	0.083	0.368	0.383	31272.7	31738.9	0.16	0.380	0.46	0.48	2.00	2.87	0.05	0.04
	25	24.12	26.80	0.179	0.173	0.097	0.400	0.420	37250.2	37950.8	0.17	0.425	0.53	0.55	2.06	2.05	0.05	0.04
9	15	14.97	17.40	0.177	0.177	0.071	0.252	0.253	23261.7	23280.8	0.17	0.259	0.33	0.33	0.45	1.16	0.01	0.00
	20	19.41	22.57	0.194	0.192	0.084	0.285	0.289	28554.6	28731.2	0.19	0.293	0.39	0.40	0.77	1.29	0.02	0.02
	25	23.32	25.60	0.209	0.202	0.095	0.305	0.322	32716.6	33461.5	0.20	0.319	0.44	0.45	4.20	5.26	0.07	0.06

(β) Υπολογισμένη παροχή (ολοκλήρωση μετρήσεων Pitot)

w [cm]	Q _{ονομ} [L/s]	Q _{υπολ} [L/s]	y _c [m]	Fr _{up}	Fr _{down}	Re _{up}	Re _{down}	y _{β,α} [m]	Fr _{β,α}	V _{x,up} [m/s]	V _{x,dow} n [m/s]	V _{y,up} [m/s]	V _{y,down} [m/s]	β _{up}	α _{up}	β _{down}	α _{down}	FD	CD	ΔH/y _c	ΔM/M _α
3	15	16.80	0.08	0.536	0.599	32674.4	33822.7	0.12	0.526	0.57	0.55	0.57	0.64	1.014	1.038	1.019	1.051	1.52	2.03	0.07	0.06
	20	21.20	0.09	0.525	0.604	37930.0	39750.5	0.13	0.579	0.61	0.65	0.63	0.71	1.021	1.057	1.011	1.029	2.98	2.95	0.10	0.08
	25	25.00	0.10	0.560	0.664	43181.4	45800.2	0.14	0.629	0.67	0.75	0.68	0.77	1.012	1.033	1.032	1.069	3.05	2.32	0.09	0.07
6	15	18.33	0.08	0.394	0.410	31188.4	31644.1	0.16	0.373	0.48	0.39	0.47	0.46	1.010	1.026	1.007	1.019	1.32	1.92	0.04	0.03
	20	20.82	0.09	0.400	0.417	34006.1	34513.1	0.16	0.396	0.50	0.45	0.51	0.52	1.023	1.063	1.007	1.018	1.96	2.37	0.05	0.04
	25	26.80	0.10	0.445	0.467	41387.0	42165.4	0.18	0.451	0.59	0.54	0.57	0.60	1.007	1.020	1.008	1.021	1.96	1.58	0.04	0.04
9	15	17.40	0.08	0.293	0.294	27035.2	27057.4	0.18	0.278	0.39	0.31	0.38	0.36	1.023	1.063	1.014	1.039	0.45	0.86	0.01	0.00
	20	22.57	0.09	0.331	0.337	33210.6	33416.1	0.20	0.314	0.46	0.37	0.43	0.42	1.007	1.018	1.009	1.025	0.74	0.92	0.02	0.01
	25	25.60	0.10	0.334	0.353	35910.4	36728.1	0.21	0.334	0.48	0.44	0.48	0.47	1.018	1.051	1.006	1.015	4.13	4.29	0.07	0.05

Π5. Υπολογισμός αριθμού Reynolds

Πίνακας Π5.1 Όρια διακύμανσης αριθμού Reynolds στα πειράματα

	w [cm]	Q _{παροχ} [L/s]	Re _{up} (26 °C)	Re _{up} (18 °C)	Re _{up} (30 °C)	Re _{up} (26)- Re _{up} (18)	Re _{up} (30)- Re _{up} (26)	+/-	Re _{down} (26 °C)	Re _{down} (18 °C)	Re _{down} (30 °C)	Re _{up} (26)- Re _{up} (18)	Re _{up} (30)- Re _{up} (26)	+/-
Τετραγωνική	3	15.02	3.56E+04	2.95E+04	3.92E+04	6.08E+03	3.60E+03	4.84E+03	3.59E+04	2.98E+04	3.96E+04	6.15E+03	3.64E+03	4.89E+03
		19.68	4.30E+04	3.57E+04	4.74E+04	7.36E+03	4.36E+03	5.86E+03	4.49E+04	3.72E+04	4.95E+04	7.68E+03	4.55E+03	6.12E+03
		25.03	5.11E+04	4.24E+04	5.63E+04	8.75E+03	5.18E+03	6.96E+03	5.47E+04	4.53E+04	6.02E+04	9.35E+03	5.54E+03	7.45E+03
	6	15.05	3.08E+04	2.55E+04	3.39E+04	5.26E+03	3.11E+03	4.19E+03	3.14E+04	2.60E+04	3.46E+04	5.37E+03	3.18E+03	4.27E+03
		19.73	3.79E+04	3.14E+04	4.18E+04	6.48E+03	3.84E+03	5.16E+03	3.87E+04	3.21E+04	4.26E+04	6.62E+03	3.92E+03	5.27E+03
		24.90	4.54E+04	3.76E+04	5.00E+04	7.76E+03	4.60E+03	6.18E+03	4.64E+04	3.85E+04	5.11E+04	7.94E+03	4.70E+03	6.32E+03
	9	15.52	2.86E+04	2.37E+04	3.15E+04	4.89E+03	2.89E+03	3.89E+03	2.87E+04	2.38E+04	3.16E+04	4.91E+03	2.91E+03	3.91E+03
		20.23	3.56E+04	2.95E+04	3.92E+04	6.09E+03	3.61E+03	4.85E+03	3.59E+04	2.98E+04	3.96E+04	6.15E+03	3.64E+03	4.89E+03
		24.70	4.11E+04	3.41E+04	4.53E+04	7.03E+03	4.16E+03	5.60E+03	4.16E+04	3.45E+04	4.58E+04	7.12E+03	4.21E+03	5.67E+03
Ρομβοειδής	3	15.53	3.51E+04	2.91E+04	3.87E+04	6.00E+03	3.55E+03	4.78E+03	3.66E+04	3.03E+04	4.03E+04	6.25E+03	3.70E+03	4.98E+03
		20.28	4.29E+04	3.56E+04	4.73E+04	7.34E+03	4.34E+03	5.84E+03	4.55E+04	3.77E+04	5.01E+04	7.77E+03	4.60E+03	6.19E+03
		24.60	4.91E+04	4.07E+04	5.41E+04	8.40E+03	4.97E+03	6.69E+03	5.27E+04	4.36E+04	5.80E+04	9.00E+03	5.33E+03	7.17E+03
	6	15.40	3.14E+04	2.60E+04	3.46E+04	5.37E+03	3.18E+03	4.28E+03	3.17E+04	2.63E+04	3.49E+04	5.42E+03	3.21E+03	4.32E+03
		20.03	3.83E+04	3.17E+04	4.22E+04	6.55E+03	3.88E+03	5.21E+03	3.90E+04	3.23E+04	4.29E+04	6.66E+03	3.94E+03	5.30E+03
		24.50	4.49E+04	3.72E+04	4.94E+04	7.68E+03	4.54E+03	6.11E+03	4.59E+04	3.80E+04	5.05E+04	7.84E+03	4.64E+03	6.24E+03
	9	14.80	2.72E+04	2.25E+04	2.99E+04	4.64E+03	2.75E+03	3.70E+03	2.74E+04	2.27E+04	3.02E+04	4.69E+03	2.78E+03	3.73E+03
		19.50	3.41E+04	2.82E+04	3.75E+04	5.83E+03	3.45E+03	4.64E+03	3.44E+04	2.85E+04	3.79E+04	5.88E+03	3.48E+03	4.68E+03
		24.00	3.97E+04	3.29E+04	4.37E+04	6.78E+03	4.02E+03	5.40E+03	4.05E+04	3.36E+04	4.46E+04	6.93E+03	4.10E+03	5.51E+03

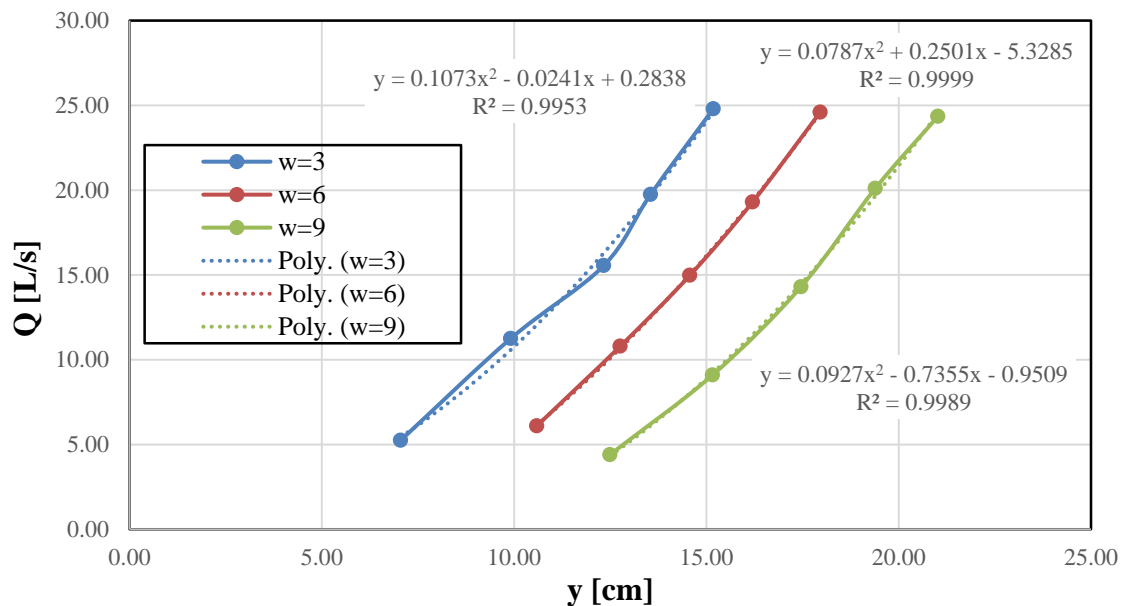
Πίνακας Π5.2 Όρια διακύμανσης αριθμού Reynolds στα πειράματα (συνέχεια)

	w [cm]	Q _{παροχ} [L/s]	Re _{up} (26 °C)	Re _{up} (18 °C)	Re _{up} (30 °C)	Re _{up} (26)-Re _{up} (18)	Re _{up} (30)-Re _{up} (26)	+/-	Re _{down} (26 °C)	Re _{down} (18 °C)	Re _{down} (30 °C)	Re _{up} (26)-Re _{up} (18)	Re _{up} (30)-Re _{up} (26)	+/-
Κυλινδρική	3	15.90	3.65E+04	3.03E+04	4.02E+04	6.24E+03	3.70E+03	4.97E+03	3.77E+04	3.13E+04	4.16E+04	6.45E+03	3.82E+03	5.14E+03
		19.90	4.41E+04	3.66E+04	4.86E+04	7.54E+03	4.46E+03	6.00E+03	4.45E+04	3.69E+04	4.90E+04	7.62E+03	4.51E+03	6.06E+03
		24.58	5.15E+04	4.27E+04	5.67E+04	8.81E+03	5.22E+03	7.01E+03	5.36E+04	4.44E+04	5.90E+04	9.17E+03	5.43E+03	7.30E+03
	6	15.05	3.12E+04	2.58E+04	3.43E+04	5.33E+03	3.15E+03	4.24E+03	3.13E+04	2.59E+04	3.44E+04	5.35E+03	3.17E+03	4.26E+03
		20.30	3.93E+04	3.26E+04	4.33E+04	6.72E+03	3.98E+03	5.35E+03	3.94E+04	3.26E+04	4.33E+04	6.73E+03	3.98E+03	5.36E+03
		24.63	4.52E+04	3.75E+04	4.98E+04	7.73E+03	4.58E+03	6.15E+03	4.57E+04	3.79E+04	5.03E+04	7.82E+03	4.63E+03	6.22E+03
	9	15.13	2.79E+04	2.32E+04	3.08E+04	4.78E+03	2.83E+03	3.80E+03	2.80E+04	2.32E+04	3.09E+04	4.79E+03	2.84E+03	3.82E+03
		19.73	3.44E+04	2.85E+04	3.79E+04	5.89E+03	3.48E+03	4.68E+03	3.48E+04	2.88E+04	3.83E+04	5.95E+03	3.52E+03	4.74E+03
		24.65	4.07E+04	3.38E+04	4.49E+04	6.97E+03	4.13E+03	5.55E+03	4.12E+04	3.42E+04	4.54E+04	7.05E+03	4.17E+03	5.61E+03
Ορθογωνική 6x3	3	15.20	3.60E+04	2.98E+04	3.96E+04	6.16E+03	3.65E+03	4.90E+03	3.64E+04	3.02E+04	4.01E+04	6.23E+03	3.69E+03	4.96E+03
		19.18	4.24E+04	3.52E+04	4.67E+04	7.25E+03	4.29E+03	5.77E+03	4.40E+04	3.65E+04	4.84E+04	7.52E+03	4.45E+03	5.99E+03
		24.65	5.18E+04	4.30E+04	5.71E+04	8.86E+03	5.25E+03	7.06E+03	5.30E+04	4.39E+04	5.84E+04	9.07E+03	5.37E+03	7.22E+03
	6	15.05	3.11E+04	2.58E+04	3.42E+04	5.32E+03	3.15E+03	4.23E+03	3.14E+04	2.61E+04	3.46E+04	5.38E+03	3.18E+03	4.28E+03
		20.10	3.90E+04	3.23E+04	4.29E+04	6.66E+03	3.95E+03	5.30E+03	3.95E+04	3.28E+04	4.35E+04	6.76E+03	4.00E+03	5.38E+03
		24.85	4.61E+04	3.82E+04	5.08E+04	7.89E+03	4.67E+03	6.28E+03	4.65E+04	3.85E+04	5.12E+04	7.95E+03	4.70E+03	6.33E+03
	9	15.48	2.86E+04	2.37E+04	3.15E+04	4.88E+03	2.89E+03	3.89E+03	2.86E+04	2.37E+04	3.15E+04	4.90E+03	2.90E+03	3.90E+03
		20.30	3.54E+04	2.94E+04	3.90E+04	6.06E+03	3.59E+03	4.82E+03	3.57E+04	2.96E+04	3.93E+04	6.10E+03	3.61E+03	4.86E+03
		24.43	4.09E+04	3.39E+04	4.51E+04	7.00E+03	4.15E+03	5.57E+03	4.12E+04	3.42E+04	4.54E+04	7.05E+03	4.17E+03	5.61E+03
Ορθογωνική 10x4	3	14.765	3.44E+04	2.85E+04	3.79E+04	5.88E+03	3.48E+03	4.68E+03	3.56E+04	2.95E+04	3.92E+04	6.09E+03	3.61E+03	4.85E+03
		20.737	4.44E+04	3.68E+04	4.89E+04	7.60E+03	4.50E+03	6.05E+03	4.66E+04	3.86E+04	5.13E+04	7.96E+03	4.71E+03	6.34E+03
		23.362	4.83E+04	4.01E+04	5.32E+04	8.26E+03	4.89E+03	6.58E+03	5.13E+04	4.25E+04	5.64E+04	8.76E+03	5.19E+03	6.98E+03
	6	15.880	3.24E+04	2.68E+04	3.56E+04	5.54E+03	3.28E+03	4.41E+03	3.28E+04	2.72E+04	3.62E+04	5.62E+03	3.32E+03	4.47E+03
		19.144	3.75E+04	3.11E+04	4.12E+04	6.41E+03	3.79E+03	5.10E+03	3.80E+04	3.15E+04	4.19E+04	6.50E+03	3.85E+03	5.17E+03
		24.119	4.46E+04	3.70E+04	4.91E+04	7.63E+03	4.52E+03	6.07E+03	4.55E+04	3.77E+04	5.01E+04	7.77E+03	4.60E+03	6.19E+03
	9	14.973	2.79E+04	2.31E+04	3.07E+04	4.76E+03	2.82E+03	3.79E+03	2.79E+04	2.31E+04	3.07E+04	4.77E+03	2.82E+03	3.80E+03
		19.406	3.42E+04	2.84E+04	3.77E+04	5.85E+03	3.46E+03	4.66E+03	3.44E+04	2.85E+04	3.79E+04	5.88E+03	3.48E+03	4.68E+03
		23.319	3.92E+04	3.25E+04	4.32E+04	6.70E+03	3.97E+03	5.33E+03	4.01E+04	3.32E+04	4.41E+04	6.85E+03	4.06E+03	5.46E+03

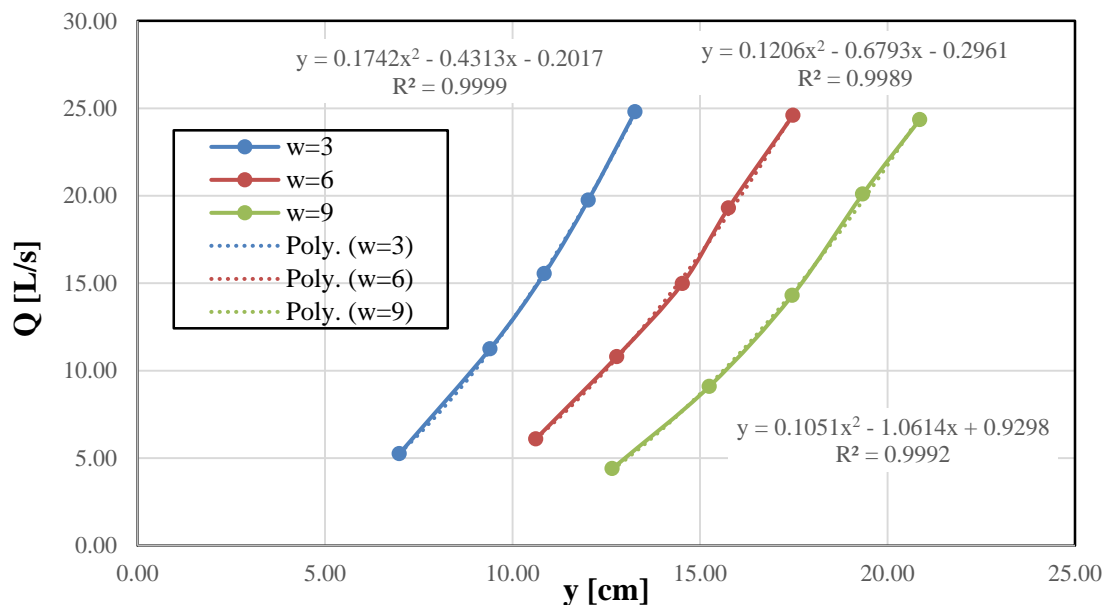
Π6. Καμπύλες βάθους ροής-παροχής για την εκτίμηση της παροχής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, κατά τις μετρήσεις με σωλήνα Pitot στη ροή γύρω από ορθογωνική διατομή με λόγο πλευρών 2.5:1, δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί απευθείας η παροχή λόγω βλάβης του παροχόμετρου.

Για την εκτίμηση της παροχής, καταρτίστηκαν καμπύλες βάθους ροής-παροχής στις θέσεις ($x = -30$ cm) και ($x = 60$ cm), με βάση τις αντίστοιχες μετρήσεις από το σταθμήμετρο. Η εκτίμηση της παροχής θα μπορούσε να γίνει και με τις σχέσεις υπερχειλιστή λεπτής στέφης.



Σχήμα Π6.1 Καμπύλες βάθους ροής-παροχής στη θέση $x = -30$ cm για τα τρία ύψη υπερχειλιστή ($w=3, 6, 9$ cm).



Σχήμα Π6.2 Καμπύλες βάθους ροής-παροχής στη θέση $x = 60$ cm για τα τρία ύψη υπερχειλιστή ($w=3, 6, 9$ cm).

Π7. Πίνακες σύγκρισης μετρημένης και υπολογισμένης παροχής για κάθε βάθρο

Στους παρακάτω πίνακες επισημαίνεται η διαφορά μεταξύ της μετρημένης με παροχόμετρο και της υπολογισμένης (με ολοκλήρωση ανάντη σημειακών ταχυτήτων από Pitot) παροχής. Όπως ήδη αναφέρθηκε, η υπολογισμένη προκύπτει μεγαλύτερη επειδή υπολογίζεται με την παραδοχή της ομοιόμορφης κατανομής του κατακόρυφου προφίλ ταχυτήτων σε όλο το πλάτος της διατομής.

Πίνακας Π7.1 Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης παροχής για τετραγωνικό βάθρο

$W_{\text{υπερχείλισης}} [\text{cm}]$	$Q_{\text{ονομαστική}} [\text{L/s}]$	$Q_{\text{παροχόμετρου}} [\text{L/s}]$	$Q_{\text{υπολογισμένη}} [\text{L/s}]$
3	15	15.02	16.15
	20	19.68	21.18
	25	25.03	28.87
6	15	15.05	16.01
	20	19.73	20.84
	25	24.90	26.62
9	15	15.52	16.18
	20	20.23	20.10
	25	24.70	26.00

Πίνακας Π7.2 Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης παροχής για ρομβοειδές βάθρο

$W_{\text{υπερχείλισης}} [\text{cm}]$	$Q_{\text{ονομαστική}} [\text{L/s}]$	$Q_{\text{παροχόμετρου}} [\text{L/s}]$	$Q_{\text{υπολογισμένη}} [\text{L/s}]$
3	15.00	15.53	17.33
	20.00	20.28	22.09
	25.00	24.60	27.35
6	15.00	15.40	16.48
	20.00	20.03	21.35
	25.00	24.50	26.06
9	15.00	14.80	16.33
	20.00	19.50	20.83
	25.00	24.00	25.63

Πίνακας Π7.3 Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης παροχής για κυλινδρικό βάθρο

$W_{\text{υπερχείλισης}} [\text{cm}]$	$Q_{\text{ονομαστική}} [\text{L/s}]$	$Q_{\text{παροχόμετρου}} [\text{L/s}]$	$Q_{\text{υπολογισμένη}} [\text{L/s}]$
3	15	15.90	17.25
	20	19.90	20.82
	25	24.58	26.57
6	15	15.05	16.73
	20	20.30	21.49
	25	24.63	26.69
9	15	15.13	16.70
	20	19.73	21.69
	25	24.65	27.62

Πίνακας Π7.4 Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης παροχής για ορθογωνικό βάθρο με λόγο πλευρών 2:1

Wυπερχείλισης [cm]	Qονομαστική [L/s]	Qπαροχόμετρου [L/s]	Qυπολογισμένη [L/s]
3	15	15.20	16.15
	20	19.18	21.75
	25	24.65	27.66
6	15	15.05	16.98
	20	20.10	22.43
	25	24.85	27.09
9	15	15.48	17.99
	20	20.30	22.71
	25	24.43	27.23

Πίνακας Π7.5 Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης παροχής για ορθογωνικό βάθρο με λόγο πλευρών 2.5:1

Wυπερχείλισης [cm]	Qονομαστική [L/s]	Qπαροχόμετρου [L/s]	Qυπολογισμένη [L/s]
3	15	14.77	16.80
	20	20.74	21.20
	25	23.36	25.00
6	15	15.88	18.33
	20	19.14	20.82
	25	24.12	26.80
9	15	14.97	17.40
	20	19.41	22.57
	25	23.32	25.56