



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ &
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Πειραματική διερεύνηση της ροής σε
ορθογωνική διώρυγα με μεσόβαθρο γέφυρας
υπό γωνία



Βλαχογιάννη Φ. Νίνα

Επιβλέπων : **Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου**

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**Πειραματική διερεύνηση της ροής σε κανάλι με
μεσόβαθρο γέφυρας υπό γωνία**

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.

Νίνα Φ. Βλαχογιάννη

nina.vlaxogianni@gmail.com

Επιβλέπων : **Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου**

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, και παράλληλα, τις σπουδές μου στο Ε.Μ.Π, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν κατά την διάρκεια της φοίτησης μου και στην εκπόνηση της εργασίας μου.

Ως εκ τούτου θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π., Παναγιώτη Παπανικολάου για την επίβλεψη της εργασίας. Η καθοδήγησή του υπήρξε καθοριστική για το αποτέλεσμα, ενώ οι επιστημονικές του γνώσεις και υποδείξεις αποτέλεσαν τη σημαντικότερη βοήθεια για την ολοκλήρωση της εργασίας. Ειδικότερα, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την προθυμία του να μου παρέχει τις συμβουλές του, το συνεχές ενδιαφέρον που επέδειξε και κυρίως για το ότι με ενθάρρυνε να συνεχίσω.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω, επιπλέον τον Πατσέλη Ιωάννη, καθώς και τον κύριο Λασηθιωτάκη Μανώλη για τον χρόνο που αφιέρωσαν και για την συνολική βοήθεια και στήριξη που μου παρείχαν σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων στο εργαστήριο.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αμέριστη συμπαράσταση, κατανόηση και υπομονή τους όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου καθώς και όλους τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου και η υποστήριξή τους υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της προσπάθειάς μου.

Νίνα Βλαχογιάννη

Αθήνα,

Οκτώβριος 2015

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	i
Περίληψη.....	xiii
Abstract	xiv
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας	3
1.3 Διάρθρωση εργασίας.....	3
2. Θεωρητική Ανάλυση – Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Ανοικτοί Αγωγοί	6
2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση	11
2.3.1 Εμπειρικές σχέσεις για την υπερύψωση.....	11
2.3.2 Άλλοι μελετητές που μελέτησαν εμπόδια στη ροή.....	19
2.3.3 Αρχή διατήρησης της ενέργειας σε ροή με μεσόβαθρο	24
2.3.4 Δύναμη αντίστασης και συντελεστής αντίστασης με την εξίσωση ορμής	26
3. Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης και Διαδικασίας.....	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.1.1 Πειραματική Διώρυγα	30
3.1.2 Τροφοδοσία διώρυγας	32
3.1.3 Μεσόβαθρο	34
3.1.4 Μέτρηση της παροχής.....	36
3.1.5 Μέτρηση Στάθμης	37
3.2 Πειραματικές μετρήσεις	37
3.2.1 Πειραματική διαδικασία.....	38
3.2.2 Χαρακτηριστικές φωτογραφίες από την εξέλιξη των πειραμάτων	40
3.3 Συντελεστής τραχύτητας του Manning	41
4. Αποτελέσματα των μετρήσεων	43
4.1 Υπερύψωση $\Delta y/y_c$ και $\Delta h/y_c$ σαν συνάρτηση της γωνίας θ και του αριθμού Froude ...	45
4.2 Μεταβολή της ειδικής δύναμης.....	55
4.3 Απώλειες ενέργειας	58

4.4 Υπολογισμός του Συντελεστή Αντίστασης.....	60
4.5 Μεταβολή του αριθμού Froude σαν συνάρτηση της γωνίας και του αδιατάρακτου βάρους	62
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη σχέση του Yarnell	64
4.7 Παρατηρήσεις σχετικές με τα πειραματικά δεδομένα	68
4.8 Έλεγχος Μείωσης Πλάτους.....	69
5. Συμπεράσματα και Προτάσεις	73
5.1 Συμπεράσματα.....	73
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	74
Βιβλιογραφία.....	77

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Ελεύθερη επιφάνεια στην περιοχή του εμποδίου (Πηγή: Randall J. Charbeneau and Edward R. Holley, 2001).

Σχήμα 2.2 Ροή σε ορθογωνική διώρυγα με βυθισμένο αναβαθμό και υδραυλικό άλμα (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

Σχήμα 2.3 Ροή σε ορθογωνική διώρυγα με μεσόβαθρο.

Σχήμα 2.4 Περιοχές όπου μπορεί να βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

Σχήμα 2.5 Καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

Σχήμα 2.6 Ροή ανάμεσα σε βάθρα (Πηγή: Kassem Salah El-Alfy, 2006).

Σχήμα 2.7 Μεσόβαθρο με ημικυκλικά άκρα (Πηγή: Yarnell, 1934).

Σχήμα 2.8 Μεσόβαθρο γέφυρας και μορφή ροής στην συγκεκριμένη περιοχή (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Σχήμα 2.9 Σχέδιο κατανόησης της θέσης του μεσόβαθρου και της επιρροής του στο βάθος ροής (Πηγή: Chow, 1973).

Σχήμα 2.10 Τιμές για το β στην εξίσωση του Nagler (Πηγή: Chow, 1973)

Σχήμα 2.11 Αποτύπωση των διάφορων εξισώσεων υπολογισμού της υπερύψωσης (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).

Σχήμα 2.12 Κριτήριο για υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή με παρουσία εμποδίου (Πηγή: Chow, 1973).

Σχήμα 2.13 Δυνάμεις λόγω της παρουσίας του μεσόβαθρου στη ροή (Πηγή: Charbeneau and Holley, 2001)

Σχήμα 3.1 Ορθογωνική διώρυγα.

Σχήμα 3.2 Αρχή και τέλος της ορθογωνικής διώρυγας.

Σχήμα 3.3 Δεξαμενή και κατάντη άκρο διώρυγας.

Σχήμα 3.4 Ανάντη άκρο διώρυγας και λεπτομέρεια φίλτρου.

Σχήμα 3.5 Θέσεις υπερχειλιστή σε 9 cm 6 cm και 3 cm.

Σχήμα 3.6 Αντλία εργαστηρίου.

Σχήμα 3.7 Δικλείδες ασφαλείας εργαστηρίου.

Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικές θέσεις για το μεσόβαθρο.

Σχήμα 3.9 Παροχόμετρο Venturi.

Σχήμα 3.10 Μανόμετρο εργαστηρίου.

Σχήμα 3.11 Σταθμήμετρο των μετρήσεων κατάντη του μεσόβαθρου.

Σχήμα 3.12 Σχηματική απεικόνιση του εργαστηρίου

Σχήμα 3.13 Χαρακτηριστικές φωτογραφίες για παροχή 15 L/s και για γωνία μεσόβαθρου στις 40° με την διεύθυνση της ρής και (α) χωρίς υπερχειλιστή, (β) υπερχειλιστής στα 3 cm, (γ) υπερχειλιστής στα 6 cm, (δ) υπερχειλιστής στα 9 cm.

Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστικές φωτογραφίες για παροχή 30 L/s και για γωνία μεσόβαθρου στις 40° με την διεύθυνση της ρής και (α) χωρίς υπερχειλιστή, (β) υπερχειλιστής στα 3 cm, (γ) υπερχειλιστής στα 6 cm, (δ) υπερχειλιστής στα 9 cm.

Σχήμα 3.15 Μετρημένα βάθη ροής κατά μήκος του καναλιού για τρεις παροχές (σκούρα σύμβολα) και υπολογισμένα (ανοικτά σύμβολα) με τον κατάλληλο συντελεστή του Manning.

Σχήμα 4.1 Αδιατάρακτα βάθη ροής στην περιοχή του μεσόβαθρου σαν συνάρτηση της παροχής για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή.

Σχήμα 4.2(α) Μεταβολή του λόγου της υπερύψωσης προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές χωρίς την παρουσία υπερχειλιστή.

Σχήμα 4.2(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 3 cm.

Σχήμα 4.2(γ) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 6 cm.

Σχήμα 4.2(δ) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 9 cm.

Σχήμα 4.3(α) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.

Σχήμα 4.3(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta h/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.

Σχήμα 4.3(γ) Μεταβολή του $\Delta h/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.

Σχήμα 4.3(δ) Μεταβολή του $\Delta h/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.

Σχήμα 4.4(α) Μεταβολή του λόγου $\Delta h/y_c$ σε σχέση με τον Fr_3 στα κατόντη για όλες τις παροχές και για $\theta=0^\circ$.

Σχήμα 4.4(β) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με τον Fr_3 στα κατόντη για όλες τις παροχές και για $\theta=30^\circ$.

Σχήμα 4.4(γ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με τον Fr_3 στα κατόντη για όλες τις παροχές και για $\theta=40^\circ$.

Σχήμα 4.4(δ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=0^\circ$.

Σχήμα 4.4(ε) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=30^\circ$.

Σχήμα 4.4(ζ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=40^\circ$.

Σχήμα 4.5(α) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.

Σχήμα 4.5(β) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.

Σχήμα 4.5(γ) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.

Σχήμα 4.5(δ) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.

Σχήμα 4.6(α) Μεταβολή του λόγου των απωλειών ενέργειας προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta H/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.

Σχήμα 4.6(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.

Σχήμα 4.6(γ) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.

Σχήμα 4.6(δ) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.

Σχήμα 4.7(α) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 20° .

Σχήμα 4.7(β) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 30° .

Σχήμα 4.7(γ) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 40° .

Σχήμα 4.8(α) Μεταβολή του αριθμού Froude (Fr), όπου Fr_{up} ο αριθμός Froude στα ανάντη και όπου Fr_d ο αριθμός Froude στα κατόντη με τον αριθμό που ακολουθεί να δείχνει το ύψος του υπερχειλιστή, σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή και για παροχή $Q = 10 \text{ L/s}$.

Σχήμα 4.8(β) Μεταβολή του αριθμού Froude (Fr), όπου Fr_{up} ο αριθμός Froude στα ανάντη και όπου Fr_d ο αριθμός Froude στα κατόντη με τον αριθμό που ακολουθεί να δείχνει το ύψος του υπερχειλιστή, σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή και για παροχή $Q = 30 \text{ L/s}$.

Σχήμα 4.9(α) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm .

Σχήμα 4.9(β) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm .

Σχήμα 4.9(γ) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm .

Σχήμα 4.10(α) Απεικόνιση του λόγου της υπερύψωσης προς το αδιατάρακτος βάθος ($\Delta y/y$), που προέκυψε από τις μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και από την εμπειρική σχέση του Yarnell συναρτήσει του αριθμού Froude (Fr_3) στα κατόντη για όλες τις παροχές και τα ύψη υπερχειλιστή και για γωνία 10° .

Σχήμα 4.10(β) Απεικόνιση του λόγου της υπερύψωσης προς το αδιατάρακτος βάθος ($\Delta y/y$), που προέκυψε από τις μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και από την εμπειρική σχέση του Yarnell συναρτήσει του αριθμού Froude (Fr_3) στα κατόντη για όλες τις παροχές και τα ύψη υπερχειλιστή και για γωνία 30° .

Σχήμα 4.11 Μεταβολή του b_{\min}/B σε ορθογωνική διάρρυγα σαν συνάρτηση του αριθμού Froude στα ανάντη, όταν η ροή είναι υποκρίσιμη (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

Σχήμα 4.12 Κάτοψη του μεσόβαθρου σε όλες τις γωνίες στροφής με όλα τα $b(\theta)$.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 Συντελεστής K του Yarnell (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Πίνακας 2.2 Τιμές του K_{DA} (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Πίνακας 2.3 Τιμές του K_N (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Πίνακας 2.4 Τιμές του δ_0 (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Πίνακας 2.5 Πηγή δεδομένων για υπερύψωση (Πηγή: Lamb *et al.*)

Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων.

Πίνακας 4.1 Πίνακας πειράματων με τα αδιατάρακτα μεγέθη.

Πίνακας Συμβόλων

Αναφορικά με τη Θεωρία, τα Πειράματα και τους Εμπειρικούς Τύπους

Q	: Παροχή
h_1	: Βάθος ροής ανάντη του μεσόβαθρου χωρίς την υπερύψωση
h_2	: Βάθος ροής στο μεσόβαθρο
h_3	: Βάθος ροής κατάντη του μεσόβαθρου
Δy	: Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας λόγω μεσόβαθρου
y	: Αδιατάρακτο βάθος ροής (υπολογισμένο)
Re	: Αριθμός Reynolds
Re_w	: Αριθμός Reynolds στην αδιατάρακτη ροή
V	: Μέση ταχύτητα της ροής
V_1	: Ταχύτητα της ροής ανάντη του μεσόβαθρου
V_2	: Ταχύτητα της ροής στη θέση του μεσόβαθρου
V_3	: Ταχύτητα της ροής κατάντη 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
B	: Πλάτος διώρυγας (παραμένει σταθερο και στα ανάντη του μεσόβαθρου B_1 και στα κατάντη B_3)

b_2	: Μειωμένο πλάτος διατοής στη θέση του μεσόβαθρου για μεσόβαθρο που δεν στρέφεται
L	: Μήκος του μεσόβαθρου
r	: Ακτίνα του ημικυκλικού άκρου του μεσόβαθρου
D	: Υδραυλικό βάθος
v	: Κινηματικό ιξώδες
g	: Επιτάχυνση της βαρύτητας
Fr_1	: Αριθμός Froude ανάντη
Fr_2	: Αριθμός Froude στο μεσόβαθρο
Fr_3	: Αριθμός Froude κατόντη
Fr_{3L}	: Αριθμός Froude κατόντη όταν ισχύει $Fr_2=1$
Fr_w	: Αριθμός Froude στην αδιατάρακτη ροή
E_1	: Ειδική ενέργεια ανάντη του μεσόβαθρου
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
λ	: Παράγοντας προσαρμογής που έχει την τάση να μειώνει το βάθος
β	: Συντελεστής συνόρθωσης

C_{Trans}	: Συντελεστής εγκάρσιου φορτίου στο μεσόβαθρο
θ	: Γωνία στροφής του μεσόβαθρου
Δh	: Διαφορά βάθους ροής ανάμεσα στα ανάντη και στα κατάντη του μεσόβαθρου
y'_2	: Διαφορά του αδιατάρακτου βάθους και του βάθους ροής στη θέση του μεσόβαθρου
y'_3	: Διαφορά του αδιατάρακτου βάθους και του βάθους ροής κατάντη του μεσόβαθρου
ε	: Ποσοστό της ενέργειας που δε χάνεται
F_D	: Δύναμη αντίστασης
F_M	: Ειδική δύναμη
M_w	: Ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή
C_D	: Συντελεστής αντίστασης
ρ	: Πυκνότητα του ρευστού
A_μ	: Η εκτεθειμένη στη ροή μετωπική επιφάνεια
Re_p	: Αριθμός Reynolds για το μεσόβαθρο
B_p	: Πλάτος του μεσόβαθρου που είναι κάθετο στη ροή
k_p	: Τραχύτητα της επιφάνειας του μεσόβαθρου
I_T	: Ένταση της τύρβης στην περιοχή κοντα στο μεσόβαθρο
F_p	: Δυνάμεις λόγω πιέσεων
F_t	: Δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων
p	: Πίεση
γ	: Ειδικό βάρος

$\Delta h'$: Ένδειξη του μανομέτρου του εργαστηρίου

θ : Θέση υπερχειλιστή

Περίληψη

Στις μέρες μας η κατασκευή πολλών υδραυλικών έργων προϋποθέτει την τοποθέτηση εμποδίων στο εσωτερικό ανοιχτών αγωγών. Για το λόγο αυτό πληθώρα πειραματικών και αριθμητικών εργασιών, για τις οποίες γίνεται αναφορά, έχουν γίνει για ροές πάνω ή ανάμεσα από εμπόδια, καθώς υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με την ακριβή συμπεριφορά της ροής. Η παρουσία λοιπόν εμποδίου εντός ενός υδατορεύματος καθιστά αναγκαία την μελέτη της ροής εφόσον επιφέρει αλλαγές στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της. Μια τέτοια είδους μελέτη αποτελεί η παρούσα διπλωματική εργασία καθώς διερευνάται πειραματικά η ροή γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας υπό γωνία. Πραγματοποιήθηκαν έξι σειρές πειραματικών μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες ανά σειρά. Σε κάθε σειρά μετρήθηκαν οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας σε δύο διατομές, μία ανάντη και μία κατάντη του μεσόβαθρου. Μετρήσεις έγιναν για έξι παροχές, για εννιά γωνίες στροφής του μεσόβαθρου και για τέσσερα ύψη υπερχειλιστή. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο υπολογισμός της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του μεσόβαθρου και η σύγκριση της με αυτή που προκύπτει από την εμπειρική σχέση του Yarnell (1934). Υπολογίστηκαν επίσης η ειδική δύναμη, οι απώλειες ενέργειας και ο συντελεστής αντίστασης και εξετάστηκε πώς αλλάζουν για τις διάφορες γωνίες στροφής του μεσόβαθρου και τις διάφορες τιμές του Froude (Fr). Ακόμη προσδιορίστηκε το ελάχιστο πλάτος για το οποίο οριακά δεν μπλοκάρεται η ροή. Μέσα από μια σειρά διαφορετικών διαγραμμάτων που απεικονίζονται οι σχέσεις αυτών των μεγεθών έγινε η προσπάθεια να εξαχθούν κάποια ασφαλή συμπεράσματα για την συμπεριφορά της ροής.

Abstract

Nowadays the development of many hydraulic constructions requires the installation of obstacles in the interior of an open channel. For this reason various experimental as well as theoretical surveys have been conducted for answering questions about flows between or above obstacles aiming to study the uncertainty regarding the exact behavior of the stream. Therefore, the existence of an obstacle within a stream of water obligates us to further examine the hydrodynamic characteristics of the stream in order to verify whether they change. This thesis is an effort aiming to aid the research made in the area described above. More specifically, we investigate the behavior of a water stream around a pier set at certain angles through a series of six experiments. During each session we recorded the water level in two cross-sectional areas one upstream and one downstream of the pier. Records were made for six different flowrates, nine angles of the pier with respect to the direction of the flow and four positions of the thin crested weir. The aim of this thesis was to calculate the height of backwater of the free surface when the flow is subcritical, and compare the experimental results against the theoretical ones, produced by the empirical equation provided by Yarnell (1934) respectively. Other findings include the calculation of the energy losses, the specific momentum as well as the coefficient of resistance along with their variance depending on the different angles of the pier and the values of the Froude (Fr) number. Finally, we tried to present our findings, regarding the behavior of water flow, in a comprehensive manner through a series of graphs, in which the relation between different characteristics of the flow is displayed.

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η βασική χρησιμότητα μιας γέφυρας είναι να εξυπηρετεί τις μεταφορές προϊόντων και τις μετακινήσεις ανθρώπων. Αποτελεί τεχνική κατασκευή με την οποία επιτυγχάνεται η ζεύξη δύο ή περισσότερων σημείων υπεράνω μεσολαβούντος εμποδίου. Έτσι, ο άνθρωπος κατάφερε να υπερκεράσει φυσικά εμπόδια και να συντομεύσει διαδρομές και αποστάσεις. Τα συνήθη ‘εμπόδια’ που γεφυρώνονται και με τα οποία θα ασχοληθούμε στην παρούσα εργασία, είναι ποτάμια ή γενικότερα υδάτινες επιφάνειες.

Κύρια στοιχεία που συνθέτουν τις γέφυρες είναι το κατάστρωμα, ο φορέας, και τα βάθρα. Τα κριτήρια σχεδιασμού τους είναι η ασφάλεια της κατασκευής σε συνηθισμένες αλλά και έκτακτες καταπονήσεις, η διατήρηση της αντοχής της στο χρόνο, η λειτουργικότητα της, η οικονομία και η εναρμόνιση της κατασκευής με το περιβάλλον.

Σε όλες τις περιπτώσεις κατασκευής γεφυρών είναι απαραίτητο να μελετηθεί η ροή καθώς οι γέφυρες κατασκευάζονται σε διαφορετικά μεγέθη και σχήματα και πολλές φορές είναι προσανατολισμένες έτσι που είναι υπό γωνία στη ροή του ποταμού. Συνεπώς περιορίζοντας την ροή με την παρουσία εμποδίων ή στενώσεων μπορεί να προκληθεί έντονη υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας, που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα εκτεταμένες καταστροφές στην περιοχή γύρω από το υδατόρευμα, υπερπήδηση του καταστρώματος της γέφυρας ή ακόμα και κατάρρευση ολόκληρης της κατασκευής λόγω διάβρωσης γύρω από τις στηρίξεις της. Είναι πολύ σημαντικό λοιπόν, να μπορούν να εκτιμηθούν και να υπολογιστούν με σχετική ακρίβεια οι επιπτώσεις της παρουσίας εμποδίων στη ροή τόσο για την προστασία του περιβάλλοντος και την ασφάλεια των ανθρώπων μακροπρόθεσμα, όσο και για την κατασκευή ενός έργου στο οποίο σχέση κόστους κατασκευής και ασφάλειας είναι η καλύτερη δυνατή.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με τα βάθρα των γεφυρών και συγκεκριμένα με βάθρο που τοποθετείται στο μέσο καναλιού, το οποίο σε πραγματικές συνθήκες θα μπορούσε να αποτελεί μεσόβαθρο για την υποστήριξη γέφυρας πάνω από την κοίτη ποταμού. Αναπόφευκτα, όπως κάθε εμπόδιο στη ροή έτσι και το μεσόβαθρο σε ένα υδατόρευμα επηρεάζει σοβαρά την ροή και επιφέρει αλλαγές στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της και συγκεκριμένα την ορμή, την ενέργεια και το βάθος ροής στην περιοχή γύρω από το εμπόδιο.

Σημαντικό λοιπόν ζητούμενο στο σχεδιασμό γέφυρας είναι ο προσδιορισμός των βέλτιστων διαστάσεων και προσανατολισμός του μεσόβαθρου με στόχο την όσο το δυνατόν μικρότερη επίδραση στη ροή. Τα σημαντικότερα προβλήματα που οφείλονται στην παρουσία του εμποδίου είναι η μεταβολή της ορμής και οι απώλειες ενέργειας της ροής, η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του εμποδίου και η πτώση της στάθμης στα κατάντη, καθώς επίσης και η διάβρωση (υποσκαφή) και πιθανά η απόθεση στην περιοχή του μεσόβαθρου. Η υποσκαφή θεωρείται βασικό πρόβλημα γιατί πιθανή συνέπεια της, είναι η υποχώρηση της στήριξης λόγω μείωσης της φέρουσας ικανότητας του θεμελίου και απώλεια λειτουργικότητας της κατασκευής με τελικό αποτέλεσμα την κατάρρευση. Όσο για το φαινόμενο της υπερύψωσης, σε αυτό οφείλονται οι πλημμύρες και απαιτείται εξαιρετική προσοχή στον σχεδιασμό των υδραυλικών κατασκευών.

Για υποκρίσιμη ροή, είδος ροής που συναντούμε στα περισσότερα ποτάμια, η ανέγερση ενός ή περισσότερων βάθρων εμποδίζει τη ροή και προκαλεί την μείωση της ορμής του νερού, με αποτέλεσμα την υπερύψωση της στάθμης των υδάτων στα ανάντη της δομής γέφυρας, πτώση της στάθμης στα κατάντη αυτής λόγω των απωλειών ενέργειας που μπορεί να προέλθουν από:

- τριβές από τα τοιχώματα του βάθρου
- συστολή και επιτάχυνση της ροής γύρω από το βάθρο και ταυτόχρονα προβλήματα και στην βάση των βάθρων.

Έτσι η συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για ασφαλείς και παράλληλα οικονομικές κατασκευές που διευκολύνουν την καθημερινότητα του ανθρώπου χωρίς την καταστροφική επέμβαση στο περιβάλλον, προϋποθέτει την βέλτιστη επίλυση κάθε προβλήματος που εμφανίζεται. Ως εκ τούτου, στο πρόβλημα της παρουσίας των βάθρων της γέφυρας στη ροή του νερού καθίσταται σημαντικό να καθοριστούν οι κατάλληλες μορφές τους ώστε σε κάθε περίπτωση να παρεμποδίζουν όσο το δυνατόν λιγότερο τη ροή του νερού. Το 'μέγεθος' παρεμπόδισης της ροής που προκαλεί ένα βάθρο γέφυρας εξαρτάται από:

- το σχήμα του βάθρου με ιδιαίτερη σημασία στη μορφή των άκρων του
- τη μείωση του εμβαδού υγρής διατομής του καναλιού που προκαλείται από το βάθρο,
- το μήκος του βάθρου,
- τη γωνία την οποία το βάθρο σχηματίζει κάνει με την διεύθυνση της ροής και
- την παροχή.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της ροής γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας υπό γωνία και πιο συγκεκριμένα η υπερύψωση που οφείλεται στην παρουσία του μεσόβαθρου σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για εννιά διαφορετικές γωνίες για έξι διαφορετικές παροχές και για τέσσερις διαφορετικές θέσεις υπερχειλιστή, σε ένα κανάλι ορθογωνικής διατομής. Στόχος αυτών, είναι η ακριβέστερη πρόγνωση των επιπτώσεων του βάθρου στη ροή.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η εργασία εκτός από την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1) όπου παρουσιάσαμε την επίδραση που προκαλείται από εμπόδιο εντός υδατορεύματος όπως το μεσόβαθρο γέφυρας στη ροή, περιλαμβάνει τέσσερα ακόμα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2, πραγματοποιείται η βιβλιογραφική αναδρομή εργασιών που έχουν προηγηθεί, και που εκτιμούν την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας η οποία οφείλεται σε κάποιο εμπόδιο στη ροή όπως το μεσόβαθρο που εξετάζουμε. Αναφέρονται επίσης κάποια γενικότερα θεωρητικά στοιχεία για τους ανοικτούς αγωγούς, που είναι απαραίτητα για την παραπέρα κατανόηση αυτών που γράφονται.

Στο Κεφάλαιο 3, περιγράφονται το μοντέλο του μεσόβαθρου και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, καθώς επίσης και η πειραματική διαδικασία κατά τη διεξαγωγή ενός τυπικού πειράματος. Τέλος αναφέρεται ο αριθμός και οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η ανάλυση των μετρήσεων που έλαβαν χώρα στο εργαστήριο, παρατίθενται τα αποτελέσματα και γίνεται η σύγκρισή τους με τους εμπειρικούς τύπους (Κεφάλαιο 2).

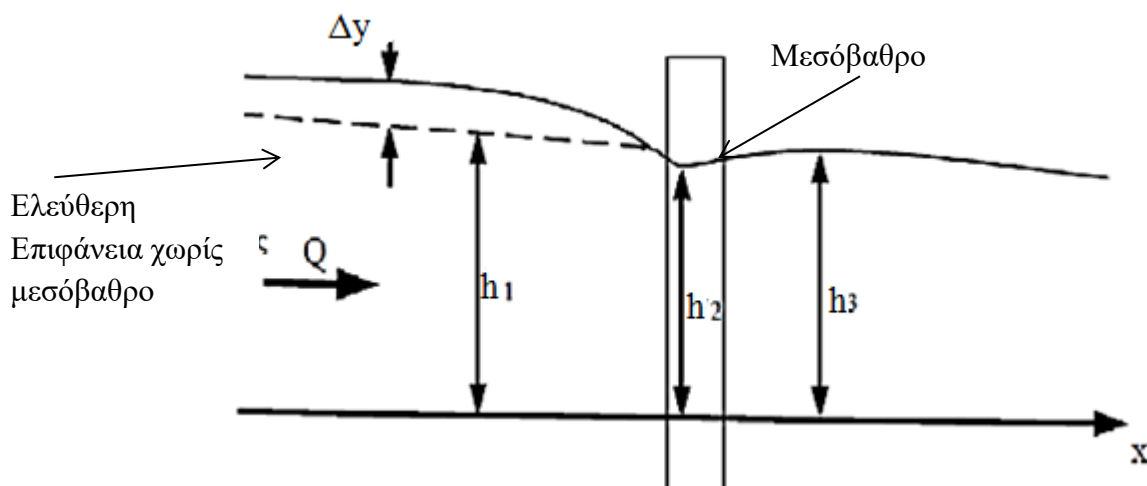
Στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία και διατυπώνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο παράρτημα παρατίθεται το σύνολο των μετρήσεων για όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.

2. Θεωρητική Ανάλυση – Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Η ύπαρξη ενός ή περισσότερων μεσόβαθρων γέφυρας εντός ενός υδατορεύματος ασκεί μεγάλη επίδραση στην ροή και κυρίως στις συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή γύρω από το εμπόδιο. Η ροή δέχεται μια δύναμη αντίστασης που υπολογίζεται από την μεταβολή της ορμής και στην περιοχή γύρω από το εμπόδιο πραγματοποιούνται μεγάλες απώλειες ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα η κατασκευή ενός ή περισσότερων βάθρων σε ένα ποτάμι το υποχρεώνει να ρέει σε μειωμένη διατομή με αποτέλεσμα το νερό που περνάει μέσα από αυτή να επιταχύνεται σε σχέση με το αν έρεε ανεμπόδιστα. Η αύξηση της ταχύτητας προκαλείται από την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή ανάντη του βάθρου σε συνδυασμό με την μείωση του αρχικού πλάτους διέλευσης του νερού στη διατομή. Έτσι, καθώς η ροή εισέρχεται στην περιοχή που επηρεάζεται από το βάθρο, παρατηρείται μείωση του βάθους ροής που συνοδεύεται με την αύξηση της ταχύτητας. Ωστόσο, κατάντη του εμποδίου όπου η ροή καταλαμβάνει όλο το πλάτος της διατομής η επιφάνεια του νερού δεν επανέρχεται στο επίπεδο της επιφάνειας της ροής στα ανάντη του βάθρου. Αυτή η μείωση της στάθμης του νερού είναι ενδεικτική των απωλειών ενέργειας στην περίπτωση υποκρίσιμης ροής και μπορεί να οφείλεται είτε στην τριβή του ρευστού στα τοιχώματα του μεσόβαθρου, είτε στη στένωση της διατομής λόγω της μορφής του άκρου του μεσόβαθρου ή τέλος στην εξάπλωση της ροής σε όλο το πλάτος της διατομής αμέσως μετά το μεσόβαθρο. Στην υποκρίσιμη ροή λοιπόν, που είναι η συνήθης ροή στα περισσότερα ποτάμια, πραγματοποιείται υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της ροής ανάντη του εμποδίου. Η υπερύψωση αυτή δίνει τόσο τη δύναμη που χρειάζεται το νερό για να ξεπεράσει τη δύναμη αντίστασης του εμποδίου, όσο και μεγαλύτερη ενέργεια για να αντισταθμιστεί η απώλεια λόγω του μεσόβαθρου (Σχήμα 2.1).



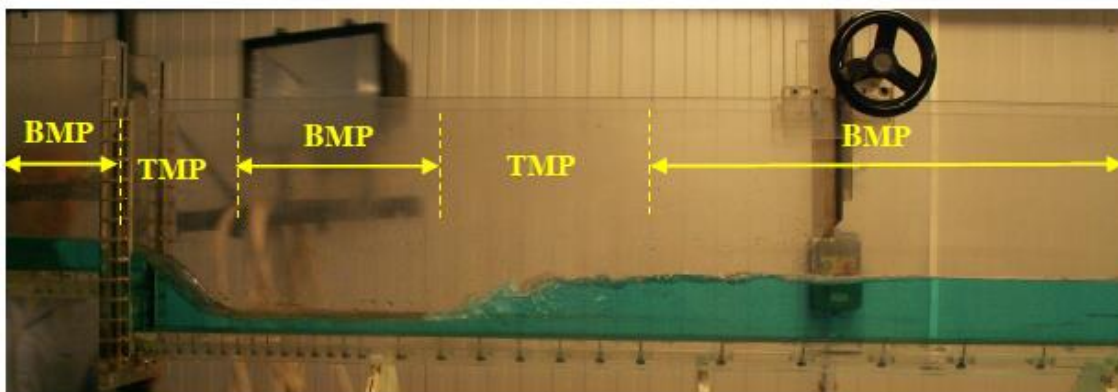
Σχήμα 2.1 Ελεύθερη επιφάνεια στην περιοχή του εμποδίου (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

2.2 Ανοικτοί Αγωγοί

Ανοικτοί αγωγοί ονομάζονται όλοι εκείνοι οι αγωγοί φυσικοί ή τεχνητοί στους οποίους η ροή πραγματοποιείται με την εμφάνιση ελεύθερης επιφάνειας. Είδη φυσικών αγωγών αποτελούν τα ρεύματα, οι χείμαρροι, οι ποταμοί ενώ είδη τεχνητών οι υπόνομοι οι διώρυγες και οι τάφροι. Η κυριότερη συνθήκη για να πραγματοποιείται ροή με ελεύθερη επιφάνεια είναι η πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια να είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Σε αυτό τον τύπο ροής η δύναμις συνεκτικότητας και βαρύτητας έχουν καθοριστικό ρόλο γιατί από αυτές εξαρτάται κυρίως η κίνηση του ρευστού. Δυστυχώς όμως στους ανοικτούς αγωγούς παρατηρείται πάντοτε δευτερεύουσα ροή στο επίπεδο της διατομής και αυτό δυσκολεύει την ανάλυση της ροής αγωγών με ελεύθερη επιφάνεια. Βασικές εφαρμογές της ροής με ελεύθερη επιφάνεια εντοπίζονται στα κανάλια και στις διώρυγες μεταφοράς νερού, στα αρδευτικά έργα και στις αποστραγγίσεις, στους αγωγούς υπόνομων σε μελέτες αποχέτευσης, σε πλωτές διώρυγες ναυσιπλοΐας και τέλος, στην ποτάμια υδραυλική και στους υπερχειλιστές φραγμάτων. Όπως παρατηρείται το εύρος των προβλημάτων ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι μεγάλο και είναι απαραίτητη η συστηματική μελέτη και η περαιτέρω διερεύνηση φαινομένων που συναντάμε σε αυτές τις συνθήκες ώστε οι κατασκευές μας να είναι ασφαλείς και σε καταστάσεις αστοχίας και λειτουργικότητας.

2.2.1 Κατηγοριοποίηση ροής με ελεύθερη επιφάνεια

Η ροή με ελεύθερη επιφάνεια κατηγοριοποιείται με κινηματικά και δυναμικά κριτήρια. Έτσι από κινηματικής άποψης χαρακτηρίζεται μόνιμη ή μη μόνιμη (ή χρονικά μεταβαλλόμενη) και ομοιόμορφη ή ανομοιόμορφη. Μόνιμη ονομάζεται η ροή της οποίας το βάθος δεν μεταβάλλεται στο χρόνο ενώ ομοιόμορφη ονομάζεται η ροή όταν το βάθος ροής είναι σταθερό καθ' όλο το μήκος του αγωγού. 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. Η βαθμιαία και η ταχέως μεταβαλλόμενη ροή είναι υποκατηγορίες της ανομοιόμορφης. Πιο αναλυτικά στη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή η ελεύθερη επιφάνεια παρουσιάζει μικρή καμπύλωση και οι γραμμές ροής είναι περίπου παράλληλες. Στην ταχέως μεταβαλλόμενη ροή το βάθος ροής 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. Κατά την εξέλιξη του πειράματος στο κανάλι εμφανίζονται και οι δύο τύποι της ανομοιόμορφης ροής.



Σχήμα 2.2 Ροή σε ορθογωνική διώρυγα με βυθτισμένο αναβαθμό και υδραυλικό άλμα (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).



Σχήμα 2.3 Ροή σε ορθογωνική διάρρυγα με μεσόβαθρο.

Από δυναμικής όμως άποψης η επίδραση της συνεκτικότητας στη ροή εκφράζεται με τον αριθμό Reynolds (Re) ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις συνεκτικότητας με τη σχέση:

$$Re = VL/\nu \quad (2.1)$$

όπου V είναι μια χαρακτηριστική ταχύτητα (συνήθως η μέση ταχύτητα της ροής στη διατομή), $\nu = \mu/\rho$ είναι το κινηματικό ιξώδες του ρεόντος νερού ($1,1 * 10^{-6} \frac{m^2}{s}$) και L κάποιο χαρακτηριστικό μήκος (π.χ 4 φορές η υδραυλική ακτίνα ($4R$) όπου $R = A/P$ με A το εμβαδόν της υγρής διατομής και P η βρεχόμενη περίμετρος).

Για κάθε αγωγό ανάλογα με την γεωμετρία του υπάρχει μια κρίσιμη τιμή (Re_c) με την οποία συγκρίνουμε τον αριθμό Reynolds και χαρακτηρίζουμε την ροή στρωτή η τυρβώδη. Τυπική κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds σε ορθογωνικό αγωγό είναι $Re_c = 12500$ (French, 1985), με $L=R$. Υπάρχει βέβαια και το ενδεχόμενο μιας ενδιάμεσης κατάστασης που ονομάζεται μεταβατική. Στην πλειονότητα όμως των πρακτικών προβλημάτων η ροή είναι τυρβώδης (υπέρβαση της κρίσιμης τιμής).

Η επίδραση της βαρύτητας εκφράζεται με τον αδιάστατο αριθμό Froude (Fr), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας, με τη σχέση:

$$Fr = V /gL \quad (2.2)$$

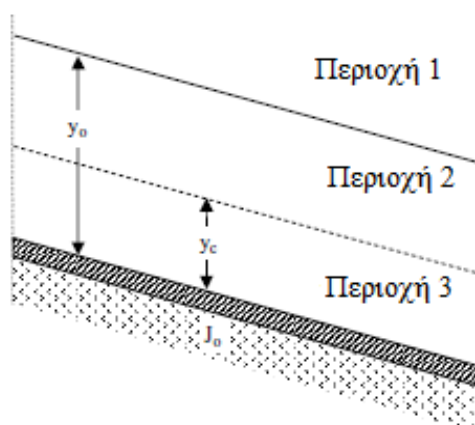
όπου V είναι η μέση ταχύτητα ροής, L χαρακτηριστικό μήκος ίσο με το υδραυλικό βάθος ($L=A/B=D$, A το εμβαδόν της υγρής διατομής και B το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας) και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

Όταν $F_r < 1$ η ροή καλείται 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 ($V < c$).

Όταν $F > 1$ η ροή καλείται υπερκρίσιμη και πιθανές μικροδιαταραχές της ροής παρασύρονται προς τα κατόντη γιατί ένα κύμα με ταχύτητα $c = \sqrt{gy}$ κινείται βραδύτερα από τη μέση ροή ($V > c$).

Για $F_r = 1$ καλείται κρίσιμη. Οι δυνάμεις αδράνειας και δυνάμεις βαρύτητας είναι ισοδύναμες.

Στη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή μπορούμε να γνωρίζουμε το προφίλ της ελεύθερης επιφάνειας καθώς από τον την κλίση του πυθμένα προσδιορίζεται ο τύπος της καμπύλης και σε ποια περιοχή του υποχώρου βρίσκεται αυτή.



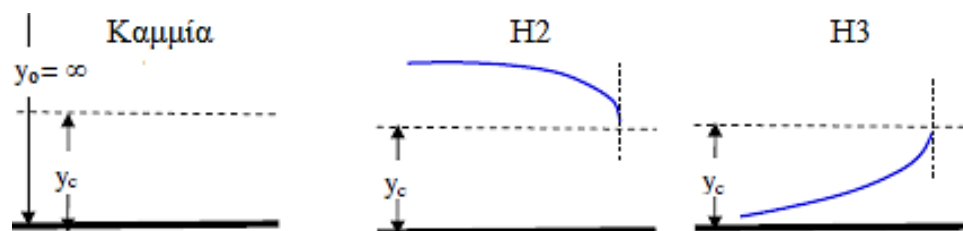
Σχήμα 2.4 Περιοχές όπου μπορεί να βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

Στα πειράματα που διεξήχθησαν στο εργαστήριο η διώρυγα που χρησιμοποιήθηκε είχε μηδενική κλίση πυθμένα $J_0 = 0$ ($y_0 \rightarrow \infty$ και δεν υπάρχει ο υποχώρος 1). Έτσι οι καμπύλες είναι τύπου H (από το horizontal) και πιο συγκεκριμένα όταν:

$J_0 = J_E = 0$ τότε $dy/dx = 0$ δηλαδή σταθερό y , δεν υπάρχει κίνηση άρα και καμπύλη.

$J_E \neq 0$ και $y > y_c$ τότε $F_r < 1$ (υποκρίσιμη ροή) και επομένως $dy/dx < 0$ δηλαδή η καμπύλη της ελεύθερης επιφάνειας είναι καμπύλη κατάπτωσης H_2 .

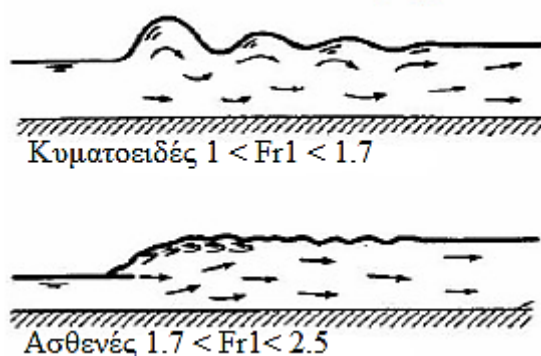
$J_E \neq 0$ και $y < y_c$ τότε $F_r > 1$ (υπερκρίσιμη ροή) και επομένως $dy/dx > 0$ δηλαδή η καμπύλη της ελεύθερης επιφάνειας είναι καμπύλη υπερύψωσης H_3 .



Σχήμα 2.5 Καμπύλες ελεύθερης επιφάνειας (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

Η επιθυμητή συνθήκη για την διεξαγωγή των πειραμάτων ήταν η ροή να είναι υποκρίσιμη ανάντη και κατάντη του μεσόβαθρου, ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν οι εμπειρικές σχέσεις μελετητών που έχουν προηγηθεί. Παρόλα αυτά όμως σε κάποιες περιπτώσεις παρατηρήθηκε υπερκρίσιμη ροή και υδραυλικό άλμα στα κατάντη του μεσόβαθρου. Πιο συγκεκριμένα η μετάβαση από υπερκρίσιμη σε υποκρίσιμη ροή, όταν ο πυθμένας της διώρυγας είναι οριζόντιος, συνοδεύεται από σημαντικές απώλειες ενέργειας, ενώ η ορμή (ειδική δύναμη) παραμένει πρακτικά αμετάβλητη. Οι απώλειες ενέργειας προκαλούνται από τη δημιουργία έντονης τύρβης στην περιοχή μεταβολής του βάθους και αυτό ορίζεται ως υδραυλικό άλμα. Το φαινόμενο αυτό έχει ερευνηθεί λεπτομερώς πειραματικά και η μορφή και οι ιδιότητες του είναι συνάρτηση του αριθμού Froude της υπερκρίσιμης ροής. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες υδραυλικού άλματος αλλά εφόσον από τις μετρήσεις στο εργαστήριο

δεν προέκυψε αριθμός Froude >2 , παρατίθενται σχηματικά μόνο αυτές που παρατηρήθηκαν κατά την εξέλιξη των πειραμάτων :



Σχήμα 2.4 Κατηγορίες υδραυλικού άλματος (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

2.3 Βιβλιογραφική επισκόπηση

2.3.1 Εμπειρικές σχέσεις για την υπερύψωση

Η παρουσία εμποδίου στη ροή και η επίδραση του σε αυτή δεν έχει διερευνηθεί απόλυτα. Το υδραυλικό άλμα για παράδειγμα έχει μελετηθεί πολύ περισσότερο ακόμη και αν έχει μικρότερη οικονομική σημασία. Τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από μελέτες για την επίλυση πρακτικών προβλημάτων δεν είναι πολλά γιατί εξαρτώνται απόλυτα από τη λεπτομερή γεωμετρία του εμποδίου σε κάθε περίπτωση. Μεταξύ των μελετητών που ασχολήθηκαν με το συγκεκριμένο πρόβλημα ήταν οι d'Aubuisson (1852), Nagler (1918), Rehbock (1919), Yarnell (1934), και Al-Nassri (1994).

Ο Yarnell διεξήγαγε έναν μεγάλο αριθμό πειραμάτων (2600) σε ένα κανάλι πλάτους 3,05 m με παροχές μεγαλύτερες από 4,5 m³/s . Τα περισσότερα από τα βάθρα είχαν ορθογωνικό σχήμα με μήκος 1,07 m και πλάτος 35,6 cm δίνοντας την εντύπωση μιας αναλογίας 3:1 (μήκος προς πλάτος). Ονόμαζε τα μεσόβαθρα αυτά πρότυπα ή κανονικά και στα άκρα αυτών προσάρμοσε πλήθος διαφορετικών συνδυασμών σχημάτων όπως ημικύκλια ή ορθογώνια τρίγωνα, με αποτέλεσμα την μεταβολή της αναλογίας σε 4:1 ή μεγαλύτερη. Πραγματοποίησε επίσης πειράματα με μεσόβαθρα που είχαν δύο και τρεις φορές μεγαλύτερο μήκος από τα

πρότυπα που χρησιμοποιούσε. Σε αυτά η αναλογία ήταν από 7:1 μέχρι 13:1. Τέλος χρησιμοποιήσε στα πειράματα του και συνδυασμό δύο μεσόβαθρων ίδιας όμως μορφής.

Ο εμπειρικός τύπος του Yarnell προέκυψε για γωνία ανάμεσα στον άξονα του καναλιού και της καθέτου στον άξονα περιστροφής μέχρι 10° , συνθήκη που σε πολλές περιπτώσεις κατασκευής γεφυρών δεν ικανοποιείται. Διαπίστωσε πως για γωνία 10° η υπερύψωση στα ανάντη του μεσόβαθρου ήταν πολύ μικρή ενώ για γωνία 20° παρατηρήθηκε αύξηση της υπερύψωσης 230% σε σχέση με την αδιατάρακτη ροή χωρίς την παρουσία μεσόβαθρου. Αυτή η εντυπωσιακή διαφορά θα μπορούσε να ερμηνευτεί από το γεγονός ότι για μεγαλύτερη γωνία στροφής μεγαλύτερη επιφάνεια του μεσόβαθρου εμποδίζει την ροή. Επίσης διαπίστωσε πως το μέγεθος της υπερύψωσης σχετίζεται άμεσα με το βάθος της αδιατάρακτης ροής, δηλαδή σε κανάλι χωρίς μεσόβαθρο.

Συνεπώς η εξίσωση του Yarnell προέκυψε από πειράματα που έγιναν σε συγκεκριμένες διατάξεις και προφανώς δεν μπόρεσε να καλύψει όλες τις πιθανές μορφές βάθρων με αποτέλεσμα αυτή η γεωμετρία να μην συναντάται σε πολλά ποτάμια και περιπτώσεις γεφυρών. Έτσι, ο αντίστοιχος κατασκευαστής κάθε φορά να πρέπει να κάνει μια εκτίμηση για την τιμή του K (συντελεστής σχήματος που προσδιορίζεται από πίνακες ανάλογα με το σχήμα του μεσόβαθρου) αν απαιτείται κάποιο ειδικό σχήμα βάθρου.

Η πιο διαδεδομένη εξίσωση για τον υπολογισμό της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας λόγω μεσόβαθρου είναι αυτή του Yarnell (Yarnell, 1934a, 1934b):

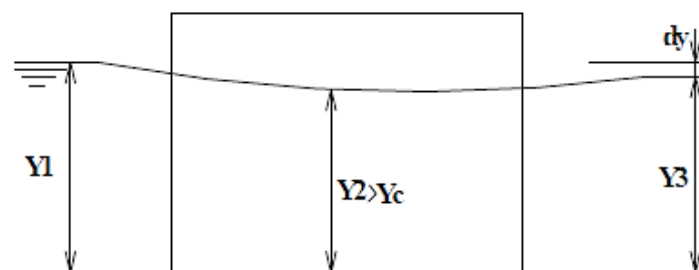
$$\Delta y = 2K(K + 5Fr_3^2 - 0,6)(a + 15a^4) \frac{V_3^2}{2g} \quad (2.3)$$

η οποία μπορεί να δοθεί και με την ακόλουθη μορφή:

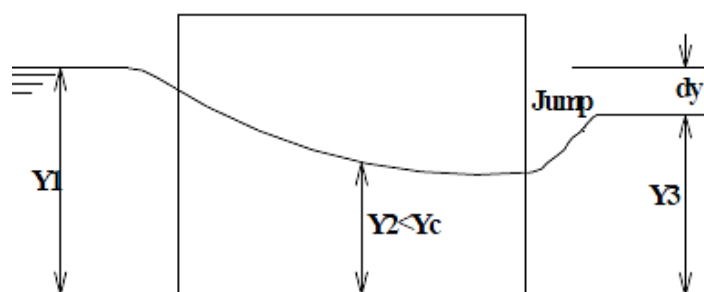
$$\frac{\Delta y}{y} = K(K + 5Fr_3^2 - 0,6)(a + 15a^4)Fr_3^2 \quad (2.4)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, Δy είναι η υπερύψωση που προκαλείται από το εμπόδιο, y είναι το μέσο (αδιατάρακτο) βάθος ροής, Fr_3 ο αριθμός Froude κατάντη του εμποδίου, a το ποσοστό συστολής του καναλιού που ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους της περιοχής της ροής που περιορίζεται λόγω του εμποδίου προς το πλάτος του καναλιού κατάντη του μεσόβαθρου και K ο συντελεστής σχήματος.

Στα πειράματα του Yarnell το ποσοστό συστολής α λάμβανε τιμές όπως 11.7%, 23.3%, 35%, και 50%. Οι τιμές που υπολόγισε πειραματικά ο Yarnell για το K για ορθογωνική και τραπεζοειδή διώρυγα φαίνονται στον Πίνακα 2.1, όπου L είναι η απόσταση μεταξύ δύο κυλινδρικών μεσόβαθρων και D η διάμετρος του κάθε μεσόβαθρου. Οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για ροή Τύπου A κατά Yarnell, για ροή δηλαδή που παραμένει υποκρίσιμη σε όλη την περιοχή επαφής με το μεσόβαθρο και της στένωσης που προκύπτει. Σύμφωνα με τους Skogerboe, Austin και Chang (1970) η υπερύψωση που παρατηρείται σε αυτό τον τύπο ροής καλείται υπερύψωση λόγω αντίστασης. Η ροή Τύπου B από την άλλη, παρατηρείται όταν στην περιοχή του μεσόβαθρου εμφανίζεται το κρίσιμο βάθος και εν συνεχεία ροή υπερκρίσιμη. Στην περίπτωση αυτή έχουμε υπερύψωση λόγω συστολής και δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες κατάντη του μεσόβαθρου (Σχήμα 2.6). Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η ομοιότητα του βάθρου που χρησιμοποίησε ο Yarnell με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

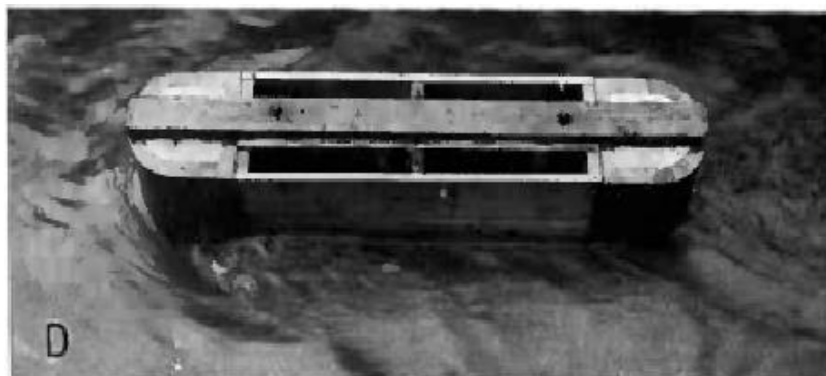


Ροή τύπου A



Ροή τύπου B

Σχήμα 2.6 Ροή ανάμεσα σε βάθρα (Πηγή: Kassem Salah El-Alfy, 2006).



Σχήμα 2.7 Μεσόβαθρο με ημικυκλικά άκρα (Πηγή: Yarnell, 1934).

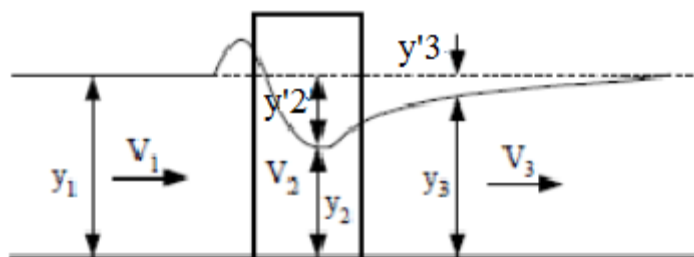
Πίνακας 2.1 Συντελεστής K του Yarnell (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Σχήμα μεσόβαθρου	K
Ημικυκλικό 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

Ο d'Aubuisson (Charbeneau και Holley, 2001) είχε καταλήξει νωρίτερα σε μία εξίσωση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης. Με το Σχήμα 2.8 να παριστάνει τη ροή γύρω από το εμπόδιο, η εξίσωση του D'Aubuisson βασίζεται στο γεγονός ότι η πτώση H_2 της ελεύθερης επιφάνειας εξαρτάται από τη διαφορά ταχυτήτων μεταξύ των θέσεων 1 και 2. Κατέληξε, έτσι, στη σχέση:

$$\frac{\Delta y}{y} = \left[\frac{8}{27K_{DA}^2} \frac{(1 + 0,5Fr_{3L}^2)^3}{Fr_{3L}^2} - \left(\frac{1}{1 + \Delta y/y} \right)^2 \right] \frac{Fr_3^3}{2} \quad (2.5)$$

όπου Fr_{3L} είναι ο αριθμός Froude στη διατομή 3 κατόπιν του μεσόβαθρου όταν προκύπτει κρίσιμη ροή στη διατομή 2 και K_{DA} είναι ο συντελεστής D'Aubuisson εξαρτώμενος από το σχήμα του μεσόβαθρου. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι διαφορετικές τιμές του για διαφορετικά σχήματα μεσόβαθρων (Charbeneau και Holley, 2001).



Σχήμα 2.8 Μεσόβαθρο γέφυρας και μορφή ροής στην συγκεκριμένη περιοχή (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Πίνακας 2.2 Τιμές του K_{DA} (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Σχήμα μεσόβαθρου	K_{DA}
Ημικυκλικό 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	1,050
Τετράγωνο μπροστά και πίσω χωρίς στένωση	1,065

Η εξίσωση που πρότεινε ο Nagler (1918) για τον υπολογισμό της υπερύψωσης είναι:

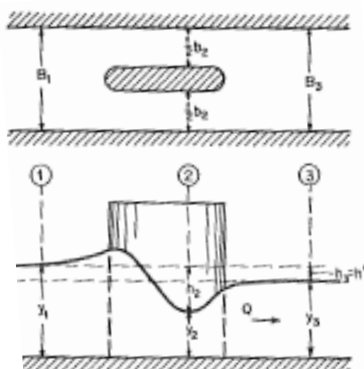
$$\frac{\Delta y}{y} = \left[\frac{8}{27K_N^2} \frac{(1 + 0,5Fr_{3c}^2)^3}{Fr_{3c}^2(1 - 0,3 Fr_{3c}^2/2)} - \beta \left(\frac{1}{1 + \Delta y/y} \right)^2 \right] \frac{Fr_3^2}{2} \quad (2.6)$$

όπου β είναι ένας συντελεστής διόρθωσης που εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν στο χώρο του μεσόβαθρου και K_N είναι ο συντελεστής σχήματος κατά Nagler και φαίνεται στον Πίνακα 2.3.

Ο Nagler έκανε 256 πειράματα με 34 διαφορετικά μοντέλα γεφυρών (Charbeneau και Holley, 2001).

Πίνακας 2.3 Τιμές του K_N (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Σχήμα μεσόβαθρου	K_N
Ημικυκλικό 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 χωρίς στένωση	0.871



Σχήμα 2.9 Σχέδιο κατανόησης της θέσης του μεσόβαθρου και της επιρροής του στο βάθος ροής (Πηγή: Chow, 1973).

Σύμφωνα με το βιβλίο του Chow (Σχήμα 2.9) ο τύπος του d' Aubuisson είναι:

$$Q = K_{DA} b_2 y_2 \sqrt{2g y_2' + V_1^2} \quad (2.7)$$

Και εφόσον θεωρεί $y_2 = y_3$ η παραπάνω σχέση ισχύει και ως:

$$Q = K_{DA} b_2 y_3 \sqrt{2g y_3' + V_1^2} \quad (2.8)$$

όπου K_A είναι συντελεστής και εξαρτάται κυρίως από τον βαθμό συστολής του πλάτους της ροής, το σχήμα και τον προσανατολισμό του μεσόβαθρου. Τα y_2', y_3' είναι η διαφορά του αδιατάρακτου βάθους και του βάθους ροής στη θέση του μεσόβαθρου και στα κατάντη αυτού, αντίστοιχα. Τα y_2 και y_3 φαίνονται στο Σχήμα 2.9 και συμβολίζουν μόνο σε αυτή την

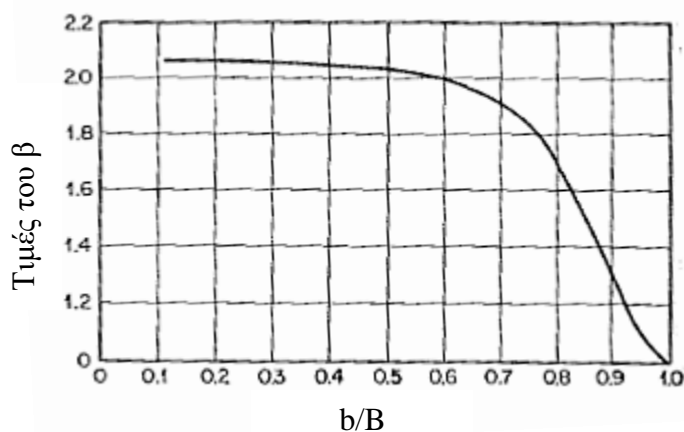
περίπτωση το βάθος ροής στη θέση του μεσόβαθρου και στα κατάντη αυτού, αντίστοιχα. Οι παραπάνω τύποι κατά τον Yarnell ταιριάζουν καλύτερα με τα δεδομένα του όταν η ροή είναι τυρβώδης.

Άλλος ένας τύπος δίνεται για τον Nagler:

$$Q = K_N b_2 \sqrt{2g} (y_3 - \lambda \frac{V_3^2}{2g}) \sqrt{y'_3 + \beta \frac{V_1^2}{2g}} \quad (2.9)$$

όπου K_N είναι συντελεστής που εξαρτάται από τον βαθμό συστολής του πλάτους της ροής και από τα χαρακτηριστικά του εμποδίου, λ είναι ένας παράγοντας προσαρμογής που έχει την τάση να μειώνει το βάθος y_3 σε y_2 και β είναι ένας διορθωτικός λογιστικός συντελεστής που καλείται συντελεστής συνόρθωσης .

Η συνήθης τιμή του λ είναι 0,3 ενώ για τις τιμές του β δίνεται το Σχήμα 2.10:



Σχήμα 2.10 Τιμές για το β στην εξίσωση του Nagler (Πηγή: Chow, 1973)

Στην περίπτωση του Nagler ο τύπος ταιριάζει περισσότερο με τα δεδομένα του Yarnell όταν η ροή δεν είναι έντονα τυρβώδης.

Ο Rehbock (Charbeneau & Holley, 2001) διεξήγαγε και αυτός έναν μεγάλο αριθμό πειραμάτων, περισσότερα από 2000, με ποικιλία βάθρων από άποψη σχήματος. Τα αποτελέσματα του δημοσιεύτηκαν μεταξύ 1917 και 1921 και από αυτά προκύπτει μία εξίσωση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του εμποδίου που ισχύει για όλα τα μεσόβαθρα σε ορθογωνικό κανάλι.

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{1}{2} [\delta_0 - \alpha(\delta_0 - 1)] [0,4\alpha + \alpha^2 + 9\alpha^4] Fr_3^2 (1 + Fr_3^2) \quad (2.10)$$

Στην παραπάνω εξίσωση το δ_0 είναι ο συντελεστής που σχετίζεται με το σχήμα του μεσόβαθρου. Η εξίσωση αυτή ισχύει για ροή στην οποία δεν εμφανίζονται έντονες αναταράξεις λόγω του εμποδίου.

Ο πίνακας που ακολουθεί δείχνει τις τιμές του δ_0 για τα διαφορετικά σχήματα βάθρων.

Πίνακας 2.4 Τιμές του δ_0 (Πηγή: Charbeneau και Holley, 2001).

Σχήμα μεσόβαθρου	δ_0
Ημικυκλικό 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
Τετράγωνο μπροστά και πίσω χωρίς στένωση	2.64

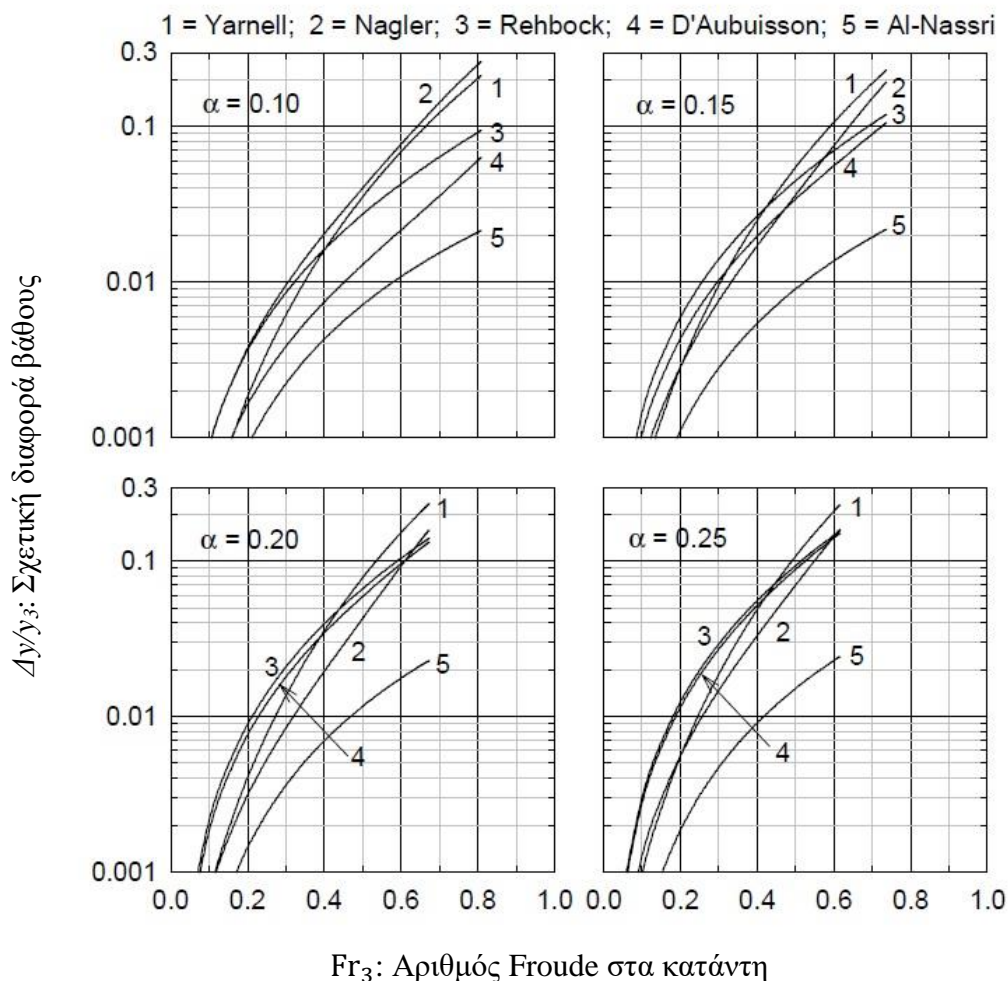
Σύμφωνα με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα του Yarnell οι εξισώσεις των Nagler, d' Aubuisson και Rehbock δίνουν σχετικά σωστά αποτελέσματα για συνηθισμένες ταχύτητες όταν χρησιμοποιούνται οι σωστοί συντελεστές, αλλά αποκλίνουν για εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες.

Τέλος, ο Al-Nassri (1994) μετά από πρόσφατη έρευνα κατέληξε την παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{\Delta y}{y_3} = \frac{0,0678}{\varphi^{0,95}} \left[\frac{Fr_3}{(1-a)^{1,8}} \right]^{2,29} \quad (2.11)$$

όπου φ είναι συντελεστής σχήματος που ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της περιοχής που οριοθετείται από το μεσόβαθρο με το τοίχωμα του καναλιού και της περιοχής αποκόλλησης στα κατάντη του μεσόβαθρου. Η εξίσωση αυτή βασίζεται σε πειράματα στα οποία οι τιμές του a κυμαίνονταν από 7% έως 47%. Ο Al-Nassri έδωσε $\varphi=2,36$ για ορθογωνικά μεσόβαθρα, 3,19 για κυκλικά και 5,85 για μεσόβαθρα με ημικυκλικά άκρα μπροστά και πίσω (Charbeneau and Holley, 2001).

Στο Σχήμα 2.11 αποτυπώνεται το σύνολο των εμπειρικών σχέσεων που αφορούν στον υπολογισμό της υπερύψωσης λόγω μεσόβαθρου.



Σχήμα 2.11 Αποτύπωση των διάφορων εξισώσεων υπολογισμού της υπερύψωσης (Πηγή: Charbeneau & Holley, 2001).

2.3.2 Άλλοι μελετητές που μελέτησαν εμπόδια στη ροή

Ερευνητές που ασχολήθηκαν γενικότερα με την παρουσία εμποδίων στη ροή και την επίδραση τους σε αυτή και είτε μελέτησαν την υπερύψωση είτε τις δυνάμεις που εμφανίζονται, ακολουθούν στη συνέχεια.

Ο Dubuat (1768), σύμφωνα με τον Yarnell (1934), ήταν πιθανότατα ήταν από του πρώτους που μελέτησαν τα βάθρα γεφυρών ως εμπόδια στη ροή του νερού. Προσπάθησε να αποδείξει με την βοήθεια των μαθηματικών ότι το πρώτο άκρο του μεσόβαθρου που συναντά η ροή θα έπρεπε να έχει μορφή κυρτής καμπύλης για να προκαλεί την ελάχιστη παρεμπόδιση στην

ροή. Επίσης χρησιμοποίησε μια σχέση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης σε διαφορετικές ταχύτητες και για διάφορες τιμές του ποσοστού συστολής του καναλιού. Επιπλέον έκανε κάποια πειράματα για τις απώλειες ενέργειας που οφείλονται στην παρουσία των μεσόβαθρων στη ροή.

Ο εμπειρικός τύπος του Weisbach (1855) , σύμφωνα με τον Chow (1973), βασίζεται στην υπόθεση ότι καθώς η ροή εισέρχεται στο στενότερο τμήμα μπορεί να υπολογιστεί σαν το άθροισμα δύο τμημάτων , του κατώτερου σαν να διέρχεται από οπή και του ανώτερου σαν περνάει από υπερχειλιστή. Αυτή η προσέγγιση όμως ήταν αυθαίρετη και χωρίς θεωρητική βάση. Σύμφωνα με τον Yarnell (1934) όμως, έκανε λίγα πειράματα με μικρό στρογγυλό μεσόβαθρο διαμέτρου 0,02 m σε κανάλι πλάτους 0,028 m. Αυτό σημαίνει πώς το μεσόβαθρο μπλόκαρε κατά πολύ την ροή, τόσο που δεν συναντάται στην πράξη αντίστοιχη αναλογία ανάμεσα σε πλάτος μεσόβαθρου και πλάτους διατομής. Το κανάλι του λοιπόν, ήταν τόσο μικρό που είναι αμφισβητήσιμα τα αποτελέσματα της έρευνας του.

Ο Chezy (1865), σύμφωνα με τον Yarnell (1934), αναφέρει οχτώ πειράματα που έκανε με μεσόβαθρα διάφορων σχημάτων πάχους 15 cm , τα οποία εξετάστηκαν σε κανάλι όπου το βάθος ροής ρυθμιζόταν από θυροφράγματα.

Ο Lane (1920), σύμφωνα με τον Yarnell (1934), διεξήγαγε μια σειρά πειραμάτων σε ροή που διέρχεται από στενώσεις σε ανοικτό κανάλι. Υπολόγισε συντελεστές για τις εμπειρικές σχέσεις των d'Aubuisson και Weisbach και εντόπισε κάποιες συνθήκες που δεν επιτρέπουν την χρήση της εμπειρικής σχέσης του d'Aubuisson.

Ο Escande (1939), σύμφωνα με τον Fenton (2008), ο οποίος ανέπτυξε μια θεωρία με βάση την ενέργεια σε κανάλι ορθογωνικής διατομής με εμπόδια κάθετα όπως τα βάθρα, που είναι μια πιο ορθολογική προσέγγιση του προβλήματος, αν και τμήμα της μεθόδου ήταν αυθαίρετο.

Ο Hsieh (1964) υπολόγισε τους συντελεστές αντίστασης κάθετων στη ροή κυλίνδρων σε ένα ορθογωνικό κανάλι, αλλά δεν έλαβε υπόψη τις διαφορές ύψους στην ελεύθερη επιφάνεια που προκαλούνται λόγω των κυλίνδρων. Επίσης δεν δόθηκε τελικά κάποια γενική μέθοδος για τον υπολογισμό του συντελεστή για κατακόρυφους κυκλικούς κυλίνδρους, παρά μόνο για συγκεκριμένες διαστάσεις.

Ο Henderson (1966, §7.5) περιέγραψε πώς μπορεί να λυθεί το πρόβλημα της υπερύψωσης χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Escande .Υποστήριξε ότι η διαφορά της ορμής ανάντη

και κατάντη του μεσόβαθρου μπορούσε να εκφραστεί σε σχέση με την δύναμη αντίστασης πάνω στο μεσόβαθρο.

Ο Bradley (1978) ασχολήθηκε με άλλου τύπου γέφυρες όχι δηλαδή με παρουσία μεσόβαθρων στην ροή συγκεκριμένα, παρόλα αυτά συσχέτισε την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας με τον αριθμό Froude και την αναλογία που εκφράζει το πόσο εμποδίζεται η ροή. Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή ως USBPR (US Bureau of Public Roads) για γέφυρες με ακρόβαθρα. Σε αυτή την δημοσίευση υπολογιστικές διαδικασίες σε συνδυασμό με εμπειρικούς συντελεστές κάνουν δυνατό τον υπολογισμό της υπερύψωσης. (Chadwick and Morfett, 1998)

Οι Ranga Raju, Rana, Asawa, & Pillai (1983), σύμφωνα με τον Fenton (2008), έκαναν πειράματα που αφορούσαν την δύναμη αντίστασης σε κυλίνδρους που ήταν τοποθετημένοι σε κανάλι. Οι μελέτες διεξήχθησαν υπό συνθήκες υποκρίσιμης ροής και σε διάφορα ποσοστά απόφραξης της ροής. Πραγματοποιήθηκε μια θεωρητική ανάλυση για να προκύψει μια σχέση μεταξύ των τριών αλληλένδετων ποσοτήτων - απώλεια ενέργειας, υπερύψωσης και δύναμη αντίστασης. Χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα και από προηγούμενες μελέτες για να ληφθεί μια εμπειρική σχέση για τον συντελεστή αντίστασης των κυλίνδρων στο κανάλι.

Ο Montes (1998), σύμφωνα με τον Fenton (2008), περιέγραψε τους εμπειρικούς τύπους των Rehbock και Yarnell και ανέπτυξε μια πιο λογική προσέγγιση. Χρησιμοποίησε την αρχή διατήρησης της ορμής και τη δύναμη αντίστασης στη διατομή του μεσόβαθρου σε ένα ορθογωνικό κανάλι για μεσόβαθρα που εκτείνονται σε όλο το βάθος της ροής. Τέλος μία τριτοβάθμια εξίσωση γραμμικοποιήθηκε για μικρή υπερύψωση δίνοντας λύση.

Οι Charbeneau & Holley (2001) έκαναν εκτεταμένη εργαστηριακή έρευνα για να μελετήσουν την υπερύψωση λόγω μεσόβαθρων, ανέπτυξαν μοντέλα που συσχετίζουν την αύξηση της στάθμης με τον αριθμό Froude και τέλος αξιολόγησαν την δύναμη αντίστασης στα μεσόβαθρα για να εκτιμήσουν τις σχέσεις κλίμακας ανάμεσα στις πραγματικές και στις εργαστηριακές.

Ο Fenton (2008) χρησιμοποίησε την αρχή διατήρησης της ενέργειας για να αναπτύξει μία προσεγγιστική μέθοδο σαν αυτή του Montes αλλά για γενικότερα προβλήματα με αυθαίρετα σώματα και διατομές. Η εξίσωση της ορμής γραμμικοποιήθηκε σε όρους αντίστασης δίνοντας μια πρώτη λύση για την αλλαγή του ύψους της ελεύθερης επιφάνειας εξαιτίας της

δύναμης αντίστασης, αποκαλύπτοντας έτσι ποιοι είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν το πρόβλημα. Παρόλα αυτά δεν προέκυψαν αποτελέσματα για το συντελεστή αντίστασης και υπάρχει περιθώριο για την ανάπτυξη μεθόδων που θα δώσουν λύση στο πρόβλημα.

Μια διαφορετική έρευνα έγινε από τους Sethuraman και Vasudevan (1971) 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. Η απλούστερη εξίσωση που κατέληξαν είναι κατάλληλη για κάθε μορφή χωρίς να υπάρχει φόβος για υποτίμηση των εγκάρσιων δυνάμεων και είναι η ακόλουθη:

$$C_{Trans} = \frac{3}{2} \sin^{1/3} \theta \quad (2.12)$$

όπου $\theta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ και 50°

Η εκτίμηση των συνεπειών της παρουσίας του μεσόβαθρου στη ροή είναι σημαντική όχι μόνο για την σωστή κατασκευή της γέφυρας αλλά και για το κόστος της κατασκευής της. Μελέτη που εξετάζει και από αυτή την σκοπιά το φαινόμενο της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας της ροής πραγματοποιήθηκε από τους Wood, Palmer, and Petroff (1997). Πιο συγκεκριμένα στην μελέτη τους αξιολόγησαν τους κανονισμούς που προϋποθέτουν ότι η υπερύψωση στα ανάντη του μεσόβαθρου για δεδομένη ροή να είναι μικρότερη από 0,3 cm και αφορούν τους κατασκευαστές γεφυρών στο King County, Washington. Από πλευρά σχεδίασης, η εφαρμογή των κανονισμών ποικίλει και εξαρτάται από την τοποθεσία της γέφυρας και την διαμόρφωση της. Όμως σε όλες τις περιπτώσεις πραγματοποιούνται σημαντικές αλλαγές στη μορφή ώστε να ικανοποιούνται οι κανονισμοί. Παρόλα αυτά, παραδείγματα έδειξαν πως το κόστος της κατασκευής αυξάνει σημαντικά λόγω των κανονισμών με το μέσο κόστος να αυξάνεται περίπου 40%. Έτσι στη μελέτη υποστηρίζεται πως τέτοιοι κανονισμοί είναι ανεφάρμοστοι και προσεγγίσεις που εξισορροπούν κόστος και οφέλη της κατασκευής είναι πιο ρεαλιστικές (Wood, Palmer and Petroff, 1997).

Ενδεικτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.5) φαίνονται διάφορα ονόματα μελετητών που ασχολήθηκαν με την εκτίμηση και τον υπολογισμό της υπερύψωσης στη ροή όταν υπάρχουν όχι μόνο για γέφυρες με μεσόβαθρα αλλά και σε άλλους τύπους γεφυρών.

Πίνακας 2.5 Πηγή δεδομένων για υπερύψωση (Πηγή: *Lamb et al.*)

Όνόματα	Έτος	Λεπτομέρειες	Διαθεσιμότητα
Rehbock	1922	Πάνω από 2000 εργαστηριακά πειράματα	Όχι
Nagler	1917	256 εργαστηριακά πειράματα σε 34 διαφορετικά μοντέλα γεφυρών	
Yarnell	1934	2600 εργαστηριακά πειράματα με μεσόβαθρα γεφυρών	
Kindsvater, Carter και Tracy	1953	Εργαστηριακά δεδομένα από το Georgia Institute of Technology	
Biery και Delleur	1962	Εργαστηριακά πειράματα σε τοξωτές γέφυρες	
Matthai	1967	Επαλήθευσε την μέθοδο των Kindsvater, Carter και Tracy με δεδομένα από 30 τοποθεσίες	
Bradley	1978	Εργαστηριακά πειράματα, Colorado State University	
USGS	1978, 1979	Υδρολογικές έρευνες. Παρατηρήθηκαν υδάτινες επιφάνειες για 35 περιστατικά πλημμύρας σε 22 τοποθεσίες	Ναι, χάρτες
HR Wallingford	1988	Εργαστηριακή μελέτη, τοξωτές γέφυρες, 203 δοκιμές	Ναι, (μερικές καταγραφές)
HR Wallingford	1988	Δεδομένα από τοποθεσίες για γέφυρες στη Μεγάλη Βρετανία, 66 ομάδες δεδομένων	
Hamill	1993	Επιτόπιες παρατηρήσεις στην Canns Mill bridge, Devon	Ναι
Atabay and Knight	2001	Εργαστηριακά πειράματα στο Πανεπιστήμιο του Birmingham,	

		σε σύνθετα κανάλια, 145 μετρήσεις, γέφυρες κανονικά τοποθετημένες στην διεύθυνση της ροής
Seckin, Knight, Atabay and Seckin	2004	Εργαστηριακά πειράματα στο Πανεπιστήμιο του Birmingham, σε συμπλήρωση των προηγούμενων, 225 μετρήσεις σε σύνθετα κανάλια και γέφυρες κατασκευασμένες υπό γωνία σε σχέση με την ροή

2.3.3 Αρχή διατήρησης της ενέργειας σε ροή με μεσόβαθρο

Η παρουσία εμποδίου στη ροή ενός ανοικτού αγωγού προκαλεί φαινόμενο όμοιο με αυτό που προκαλείται από την στένωση από την στιγμή που και τα δυο επεμβαίνουν στην αρχική διατομή της ροής και ουσιαστικά την μειώνουν. Παρόλα αυτά η στένωση μικραίνει την διατομή αλλά σε ένα άνοιγμα ενώ το εμπόδιο δημιουργεί τουλάχιστον δυο νέους διαδρόμους ροής. Η ροή με εμπόδιο μπορεί να είναι υποκρίσιμη η υπερκρίσιμη. Η αρχή διατήρησης της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της υπερύψωσης εξαιτίας της παρουσίας του μεσόβαθρου. Με την αξιοποίηση λοιπόν της εξίσωσης ενέργειας του Bernoulli και για οριζόντιο πυθμένα μεταξύ των περιοχών 2 και 3, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.9, προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\varepsilon \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) = y_3 + \frac{V_3^2}{2g} \quad (2.13)$$

ή

$$\varepsilon y_2 (2 + F_2^2) = y_3 (2 + F_3^2) \quad (2.14)$$

όπου $F_2 = V_2/\sqrt{gy_2}$, $F_3 = V_3/\sqrt{gy_3}$ και το ε είναι το ποσοστό της ενέργειας που επανέρχεται, γιατί ανάμεσα στις δύο διατομές έχουμε απώλεια ενέργειας.

Από την εξίσωση συνέχειας της ροής:

$$V_2 b_2 y_2 = V_3 B_3 y_3 \quad (2.15)$$

ή

$$F_2^2 \alpha^2 y_2^3 = F_3^2 y_3^3 \quad (2.16)$$

όπου το $\alpha = b_2/B_3$

$$\alpha^2 = \frac{\varepsilon^3 F_3^2 (2 + F_2^2)^3}{F_2^2 (2 + F_3^2)^3} \quad (2.17)$$

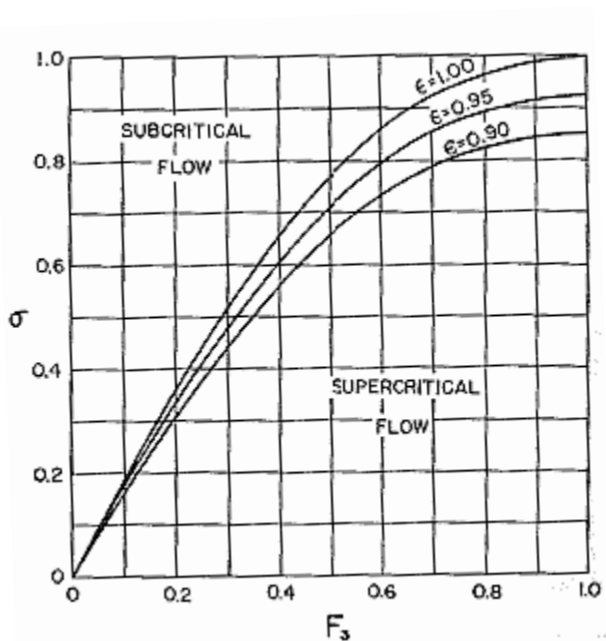
Όταν η ροή στο τμήμα 2 είναι κρίσιμη, $F_2 = 1$. Η τιμή F_3 που ικανοποιεί αυτή την κατάσταση ονομάζεται περιοριστική τιμή και γίνεται F_{3L} .

Έτσι η εξίσωση (17) γίνεται:

$$\alpha^2 = \frac{27\varepsilon^3 F_{3L}^2}{(2 + F_{3L}^2)^3} \quad (2.18)$$

Τότε η ροή που διέρχεται από το εμπόδιο είναι υποκρίσιμη όταν $F_3 < F_{3L}$ ενώ αν $F_3 > F_{3L}$ τότε είναι υπερκρίσιμη.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 2.12) το $\varepsilon=1$ ισχύει όταν δεν έχουμε ενεργειακές απώλειες, το $\varepsilon=0,95$ όταν οι απώλειες είναι της τάξεως του 5% ενώ για $\varepsilon=0,9$ για απώλειες της τάξεως του 10%.



Σχήμα 2.12 Κριτήριο για υποκρίσιμη και υπερκρίσιμη ροή με παρουσία εμποδίου (Πηγή: Chow, 1973).

2.3.4 Δύναμη αντίστασης και συντελεστής αντίστασης με την εξίσωση ορμής

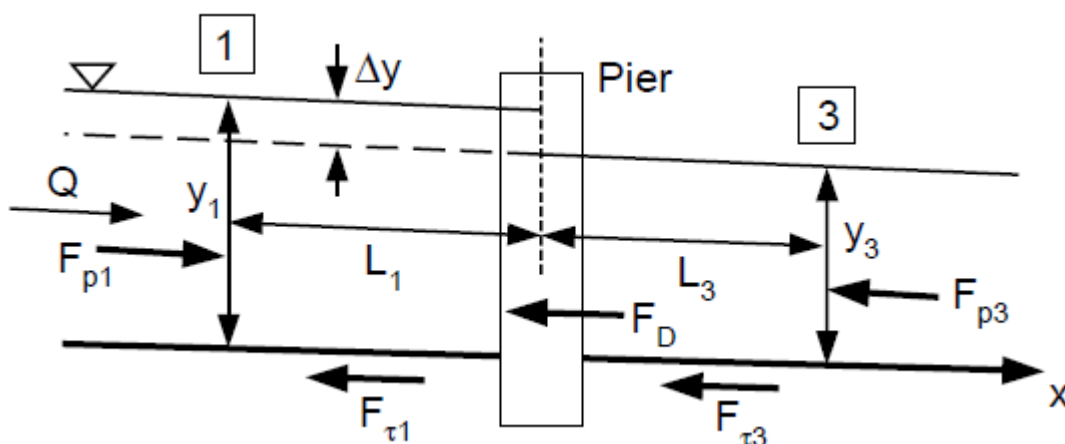
Η ροή γύρω από το εμπόδιο είναι τόσο πολύπλοκη που για πρακτικά προβλήματα δεν είναι εφικτό να υπολογιστεί με ακρίβεια η δύναμη σε αυτό σύμφωνα με τις αρχές της ρευστομηχανικής. Πάντως η δύναμη αντίστασης πάνω στο μεσόβαθρο προκαλεί απώλεια ενέργειας και υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας για υποκρίσιμη ροή και ουσιαστικά οφείλεται στη δύναμη αντίστασης λόγω τριβής στην επιφάνεια του μεσόβαθρου και λόγω διαφοράς πίεσης ανάμεσα στα ανάντη του μεσόβαθρου όπου η πίεση είναι υψηλότερη και στην χαμηλότερη πίεση στα κατόντη αυτού η οποία οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο φαινόμενο της αποκόλλησης. Έτσι η οριζόντια δύναμη στο εμπόδιο μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας την εμπειρική εξίσωση:

$$F_D = C_D \rho \frac{V^2}{2} A_\mu \quad (2.19)$$

όπου C_D είναι ο συντελεστής αντίστασης, ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, A_μ είναι η είναι η εκτεθειμένη στη ροή μετωπική επιφάνεια και V η ταχύτητα ροής. Οι αδιατάρακτες συνθήκες ροής αμέσως μετά ,στα κατόντη του μεσόβαθρου χρησιμοποιούνται για να εκτιμηθεί το A_μ και το V .

Η εξάρτηση των συντελεστών αντίστασης για ορθογωνικές διώρυγες μπορεί να γραφεί ως: $C_D = f(\text{σχήμα μεσόβαθρου}, Re_p, \frac{k_p}{B_p}, I_T, Fr, \frac{B}{B_p}, \frac{B}{y})$. Όπου Re_p είναι ο αριθμός Reynolds για το μεσόβαθρο και υπολογίζεται από $Re_p = \frac{VB_p}{\nu}$ και είναι σημαντικός κυρίως για μεσόβαθρα που έχουν καμπυλωμένες επιφάνειες, V είναι και εδώ η ταχύτητα ροής, B το πλάτος παρεμπόδισης της ροής, ν η κινηματική συνεκτικότητα, k_p η τραχύτητα της επιφάνειας του μεσόβαθρου, $\frac{k_p}{B_p}$ (σχετική τραχύτητα), $\frac{B_p}{B}, \frac{B_p}{y}$ είναι βασικά γεωμετρικές παράμετροι, I_T η ένταση της τύρβης στην περιοχή κοντα στο μεσόβαθρο και τέλος Fr ο αριθμός Froude. Ουσιαστικά ο λόγος $\frac{B_p}{B}$ είναι αντίστοιχος του α στις εξισώσεις του κεφαλαίου 2. και εκφράζει το πόσο μπλοκάρεται η ροή. Όσο για τον λόγο $\frac{B_p}{y}$ εκραζει μια αναλογία που πιθανόν να μην είναι αρκετά σημαντική για τα μεσόβαθρα εφόσον δεν υπάρχει ροή πάνω ή κάτω από αυτά. Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης είναι εξαιρετικά δυσχερής.

Η υπερύψωση (Δy) ανάντη του μεσόβαθρου φαίνεται στο Σχήμα 2.13. Μία θεωρητική προσέγγιση βασισμένη στην εξίσωση της ορμής μπορεί να δείξει την επίδραση της Δy στην δύναμη αντίστασης στο εμπόδιο. Για να γίνει η ανάλυση ευκολότερη οι συνθήκες ροής έχουν εξιδανικευτεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.13, όπου φαίνεται πως όλες οι δυνάμεις ασκούνται στο νερό. Για την ακρίβεια η δύναμη αντίστασης που ασκείται στο νερό είναι ίση και αντίθετη με τη δύναμη που ασκείται στο μεσόβαθρο. Επίσης θεωρείται πως η κατανομή της ταχύτητας είναι σχετικά ομοιόμορφη σε κάθε διατομή και ότι η κλίση είναι τόσο μικρή ώστε οι διαφορές με οριζόντιες συνθήκες ροής να είναι αμελητέες. Άλλωστε στη δική μας περίπτωση η ορθογωνική διώρυγα έχει οριζόντιο πυθμένα.



Σχήμα 2.13 Δυνάμεις λόγω της παρουσίας του μεσόβαθρου στη ροή (Πηγή: Charbeneau and Holley, 2001).

Στο παραπάνω σχήμα όπου y_1 και y_3 τα βάθη ροής ανάντη και κατάντη του μεσόβαθρου, L_1 και L_3 οι αποστάσεις που μετρήθηκαν τα βάθη ροής ανάντη και κατάντη του μεσόβαθρου αντιστοίχως και Δy η υπερύψωση.

Εφαρμόζοντας το θεώρημα διατήρησης της ορμής μεταξύ των διατομών 1 (ανάντη) και 3 (κατάντη) προκύπτει:

$$F_{p1} - F_{p3} - F_{t1} - F_{t3} - F_D = \rho Q (V_3 - V_1) \quad (2.20)$$

όπου F_p δυνάμεις λόγω πιέσεων, F_t δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων, F_D η δύναμη αντίστασης και Q η παροχή.

Αναλύοντας την παραπάνω σχέση 2.20 και αμελώντας τις δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων έχουμε:

$$F_D = F_{p1} - F_{p3} + \rho \Sigma V_1 Q_1 - \rho \Sigma V_3 Q_3 = \rho \left(g \frac{y_1^2}{2} - g \frac{y_3^2}{2} + \int_A V_1^2 dA - \int_A V_3^2 dA \right) \quad (2.21)$$

Η δύναμη της πίεσης για κάθε διατομή ροής είναι pA , όπου p είναι η πίεση στο κέντρο της διατομής ενώ A είναι η περιοχή ροής.

Για ορθογωνική διώρυγα πλάτους B η δύναμη πίεσης είναι :

$$\begin{aligned} F_p &= F_{p1} - F_{p3} = (pA)_1 - (pA) = \gamma \frac{y_1}{2} y_1 B - \gamma \frac{y_3}{2} y_3 B \\ &= \gamma y_3^2 B \left(\frac{\Delta y}{y_3} + \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta y}{y_3} \right]^2 \right) \end{aligned} \quad (2.22)$$

Όπου $p = \gamma y / 2$ και γ είναι το ειδικό βάρος.

Το δεξί μέλος της εξίσωσης ορμής μπορεί να γραφτεί :

$$\rho Q (V_3 - V_1) = \rho V_3^2 y_3 B \left(\frac{\Delta y / y_3}{1 + \Delta h / y_3} \right) \quad (2.23)$$

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει η εξίσωση που δίνει τη σχέση της δύναμης αντίστασης με την υπερύψωση είναι:

$$F_D = \gamma y_3^2 B \left(\frac{\Delta y}{y_3} + \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta y}{y_3} \right]^2 \right) - \rho V_3^2 y_3 B \left(\frac{\Delta y / y_3}{1 + \Delta y / y_3} \right) \quad (2.24)$$

Από τις εξισώσεις (23) και (24) η σχέση που προκύπτει ανάμεσα στον συντελεστή αντίστασης και στην υπερύψωση λόγω του μεσόβαθρου είναι:

$$C_D = \frac{1}{Fr_3^2} \left(2 \frac{\Delta y}{y_3} + \left[\frac{\Delta y}{y_3} \right]^2 \right) - 2 \left(\frac{\Delta y / y_3}{1 + \Delta y / y_3} \right) \quad (2.25)$$

3. Περιγραφή της Πειραματικής Διάταξης και Διαδικασίας

3.1 Εισαγωγή

Ο κύριος σκοπός αυτής της πειραματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης του μεσόβαθρου στο βάθος ροής σε μια περιοχή γύρω από αυτό. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της ροής, κρατώντας σταθερές τις γεωμετρικές διαστάσεις του εμποδίου και μεταβάλλοντας την γωνία του εμποδίου αλλά και τον τοπικό αριθμό Froude με τη χρήση υπερχειλιστή στο κατάντη άκρο της διώρυγας σε τρεις διαφορετικές θέσεις: σε ύψος 3cm, 6cm και 9cm. Επίσης έγιναν μετρήσεις και χωρίς υπερχειλιστή. Αυτό επαναλαμβάνεται για έξι διαφορετικές παροχές νερού στην πειραματική διώρυγα ούτως ώστε να προκύψουν συγκρίσιμα αποτελέσματα. Επιπλέον, σε κάθε διαφορετική παροχή και ύψος υπερχειλιστή το βάθος ροής μετρήθηκε για εννιά διαφορετικές γωνίες του μεσόβαθρου σε σχέση με τη διεύθυνση της ροής. Προτού παρουσιασθούν αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν, περιγράφονται οι διατάξεις της διώρυγας και ο τρόπος λήψης των μετρήσεων.



Σχήμα 3.1 Ορθογωνική διώρυγα.



(α) Ανάντη άκρο διώρυγας

(β) Κατάντη άκρο διώρυγας

Σχήμα 3.2 Είσοδος και εκβολή της ορθογωνικής διώρυγας.

3.1.1 Πειραματική Διώρυγα

Για τις ανάγκες διεξαγωγής των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε η ορθογωνική διώρυγα, η οποία βρίσκεται στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής (Αίθουσα «Γιώργος Νουτσόπουλος») του Ε.Μ.Π. στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, υπό την εποπτεία της σχολής Πολιτικών Μηχανικών.

Διαστάσεις- Περιγραφή

Η διώρυγα μήκους 11,00 m έχει ορθογωνική διατομή πλάτους 0,253 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. Στο ανάντη άκρο της διώρυγας μετά την είσοδο του νερού είναι τοποθετημένο ψιλό σύρμα σε ειδικά διαμορφωμένη διάταξη ώστε να μειώνει τις αναταράξεις

στη ροή κατά την τροφοδοσία της διώρυγας με νερό. Στο κατάντη άκρο είναι τοποθετημένος ένας υπερχειλιστής λεπτής στέψης από plexiglass για τον έλεγχο του βάθους ροής κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Η αρχική του θέση είναι τελείως κατεβασμένος, ενώ για τρεις ακόμη ομάδες πειραμάτων ανυψώθηκε στα 3, 6 και 9 cm. Η εκροή του καναλιού καταλήγει σε μια δεξαμενή συλλογής διαστάσεων 1,30x1,30x1,00 m (Σχήμα 3.3(α)) απ' όπου το νερό επιστρέφει στις δεξαμενές σταθερού φορτίου του εργαστηρίου.



(α) Δεξαμενή συλλογής νερού

(β) Κατάντη άκρο διώρυγας

Σχήμα 3.3 Δεξαμενή και κατάντη άκρο διώρυγας.



Σχήμα 3.4 Λεπτομέρεια ανάντη άκρο διώρυγας.



(α) Θέση υ/χ - 9 cm

(β) Θέση υ/χ - 6 cm

(γ) Θέση υ/χ - 3 cm

Σχήμα 3.5 Θέσεις υπερχειλιστή σε 9 cm 6 cm και 3 cm.

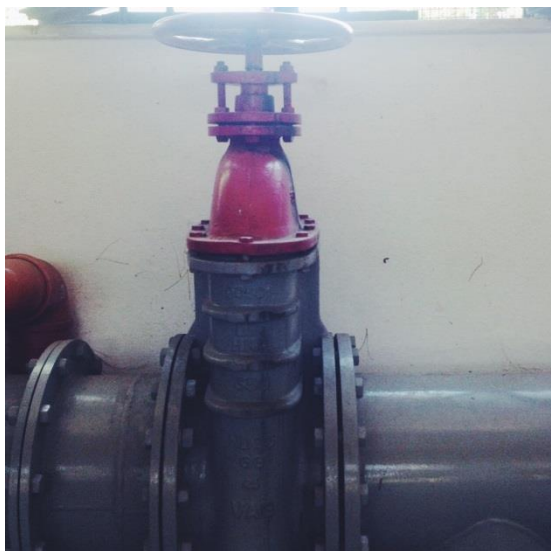
3.1.2 Τροφοδοσία διώρυγας

Η τροφοδοσία του συστήματος γίνεται από τις δεξαμενές σταθερού φορτίου του εργαστηρίου με στάθμη σε ύψος 4 m περίπου σε σχέση με τον επίπεδο πυθμένα της διώρυγας, που τροφοδοτούνται με αντλία από τη δεξαμενή αποθήκευσης νερού στο υπόγειο του εργαστηρίου. Από τις δεξαμενές σταθερού φορτίου με σωλήνα $\Phi 350$ το νερό διέρχεται από συσκευή Venturi για τον προσδιορισμό της παροχής, απ' όπου εξέρχεται σε σωλήνα $\Phi 250$ και από εκεί οδηγείται στη διώρυγα. Η τροφοδοσία της διώρυγας ελέγχεται με δύο δικλίδες.

Η πρώτη δικλείδα ανοίγεται τελείως, ενώ η δεύτερη δικλείδα βρίσκεται τοποθετημένη στην είσοδο του καναλιού χρησιμεύει για τη ρύθμιση της παροχής.



Σχήμα 3.6 Αντλία εργαστηρίου.



(α) Δικλείδα ασφαλείας για σωληνα Φ350

(β) Δικλείδα ασφαλείας για σωληνα Φ50

Σχήμα 3.7 Δικλείδες ασφαλείας εργαστηρίου.

3.1.3 Μεσόβαθρο

Το μεσόβαθρο είναι κατασκευασμένο από πλαστικό και έχει ύψος 36 cm και συνολικό μήκος 11 cm. Η οριζόντια διατομή του είναι ορθογωνική διαστάσεων 8,82 cm x 2,18 cm με ημικύκλια διαμέτρου ίσης με το πλάτος του κολλημένα στην πρόσθια και οπίσθια στενή πλευρά. Τοποθετήθηκε σε απόσταση 8,8 m από την είσοδο του καναλιού με εξασφαλισμένη την πλήρη ανάπτυξη της εισερχόμενης ροής. Κατά πλάτος, ο άξονας του τοποθετήθηκε στο μέσον της διώρυγας.

Η τοποθέτηση του εμποδίου επέτρεπε την περιστροφή του γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, στην κορυφή του οποίου είχε τοποθετηθεί μοιρογνωμόνιο για την ανάγνωση της γωνίας στροφής του. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν το μεσόβαθρο ήταν τοποθετημένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε στην αρχική του θέση η μικρή πλευρά του, η ημικυκλική, ερχόταν πρώτη σε επαφή με τη ροή, ήταν δηλαδή παράλληλα τοποθετημένο στον άξονα του καναλιού, και περιστρεφόταν ανά 10° δεξιόστροφα και αριστερόστροφα μέχρι να φτάσει στις 40° γωνία από την αρχική του θέση.



(α)



(β)



(γ)

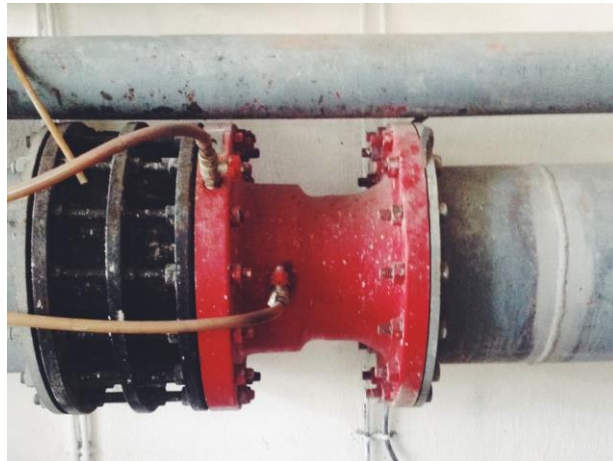
Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικές θέσεις για το μεσόβαθρο.

3.1.4 Μέτρηση της παροχής

Για τη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιήθηκε ο μετρητής Venturi τοποθετημένος οριζόντια στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας του εργαστηρίου με διαφορικό μανόμετρο τετραχλωράνθρακα (CCl₄). Η παροχή προσδιοριζόταν από τη σχέση

$$Q = 2,7166 \sqrt{\Delta h'} \quad (26)$$

όπου Q η παροχή σε L/s και Δh η διαφορά στάθμης του μανομέτρου σε mm.



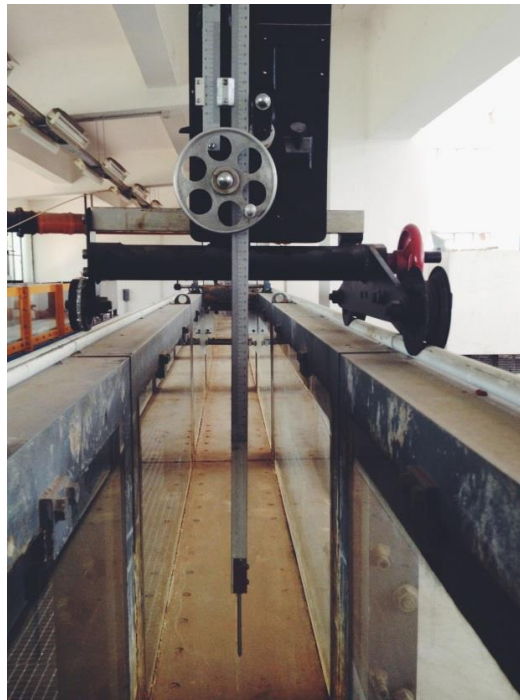
Σχήμα 3.9 Παροχόμετρο Venturi.



Σχήμα 3.10 Μανόμετρο εργαστηρίου.

3.1.5 Μέτρηση Στάθμης

Μετρήσεις της ελεύθερης επιφάνειας έγιναν τόσο στα ανάντη όσο και στα κατόντη του μεσόβαθρου. Στα ανάντη η στάθμη μετρήθηκε σε απόσταση 30,7 cm από τον άξονα του μεσόβαθρου ενώ στα κατόντη σε απόσταση 40,6 cm. Για τη μέτρηση της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη όπως και στα κατόντη χρησιμοποιήθηκε σταθμήμετρο τύπου ακίδας ακρίβειας 0,1 mm, καθώς είχε προσαρμοσμένο διαστημόμετρο με βερνιέρο που μπορεί να κινείται τόσο κατακόρυφα, όσο και εγκάρσια στη διατομή της δώρυγας. Η θέση μέτρησης στα κατόντη επιλέχθηκε σε αυτή την απόσταση από το κέντρο του μεσόβαθρου γιατί η ελεύθερη επιφάνεια της ροής ήταν έντονα διαταραγμένη σε κάποιες περιπτώσεις (μεγάλες παροχές και γωνίες) γεγονός που καθιστούσε αδύνατο να μετρηθεί με κάποια σχετική ακρίβεια η στάθμη πιο κοντά στο μεσόβαθρο.



Σχήμα 3.11 Σταθμήμετρο των μετρήσεων κατόντη του μεσόβαθρου.

3.2 Πειραματικές μετρήσεις

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται συνοπτικά το σύνολο των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο κανάλι. Στην στήλη φαίνονται οι παροχές σε L/s στρογγυλεμένες όμως στον πλησιέστερο ακέραιο, στην γραμμή τα διάφορα ύψη του υπερχειλιστή και στο εσωτερικό όλες οι γωνίες που περιστράφηκε το μεσόβαθρο.

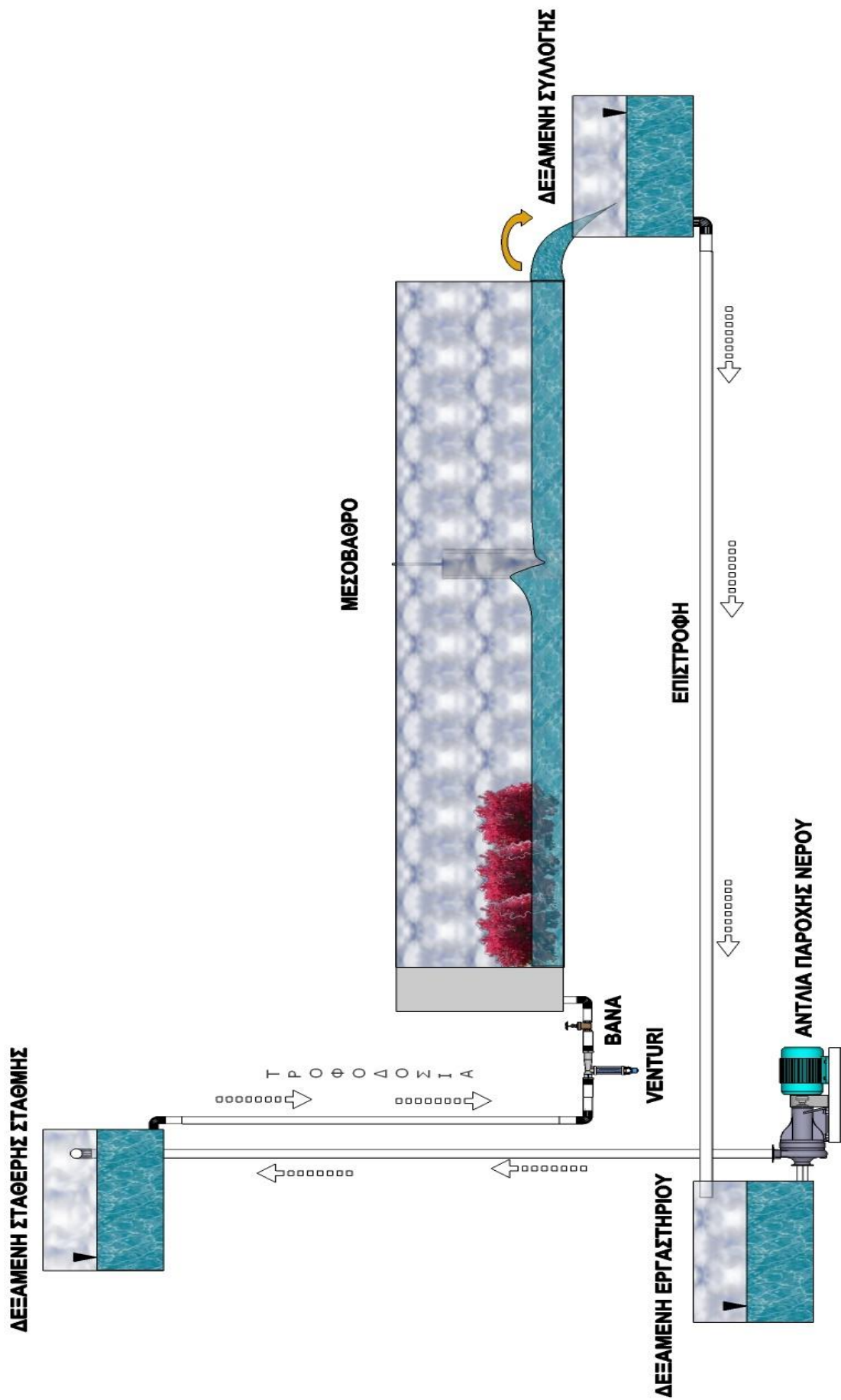
Πίνακας 3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας πειραμάτων.

Q	Υ	0 cm	3 cm	6 cm	9 cm
5	$0^\circ, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 30^\circ, \pm 40^\circ$ και χωρίς μεσόβαθρο				
10					
15					
20					
25					
30					

3.2.1 Πειραματική διαδικασία

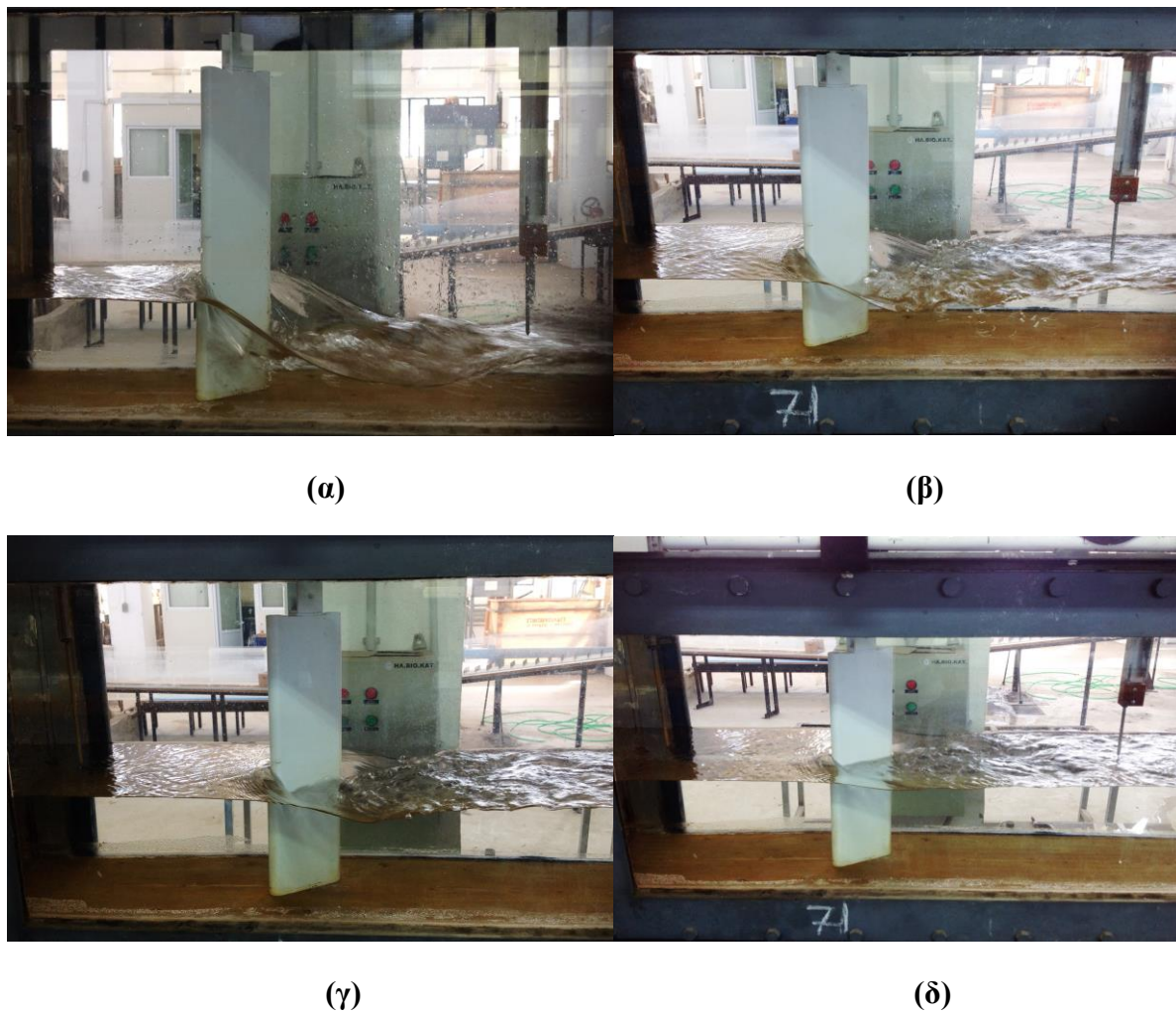
Η πειραματική διαδικασία για την καταγραφή των βαθών ροής στο εργαστήριο ξεκινά από το να μπει η αντλία σε λειτουργία και ύστερα να ανοίξουν οι δικλείδες ασφάλειας για να έχουμε ροή στο κανάλι. Με την βοήθεια των δικλίδων και την ένδειξη στο μανόμετρο προσεγγίζεται η πρώτη παροχή. Έχει προηγηθεί έλεγχος της διάταξης ώστε όλα τα όργανα να βρίσκονται στις σωστές θέσεις και κυρίως το μεσόβαθρο να εφάπτεται στον πυθμένα και να είναι ακριβώς στο μέσο του πλάτους της διώρυγας. Στη συνέχεια με τελείως κατεβασμένο τον υπερχειλιστή μετράται η στάθμη ανάντη και κατόντη για όλες τις γωνίες περιστροφής που φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή από τελείως κατεβασμένο (0 cm), στα 3 cm, στα 6 cm και τέλος στα 9 cm. και αφού ολοκληρωθούν οι μετρήσεις για αυτήν την παροχή, επαναλαμβάνεται η ίδια πορεία για την επόμενη παροχή. Αφού μετρηθούν τα βάθη ροής και για την τελευταία παροχή, το μεσόβαθρο αφαιρείται και γίνονται μετρήσεις στάθμης στο σημεία ανάντη και κατόντη του μεσόβαθρου που μετρούσαμε και πριν ώστε να εκτιμήσουμε το βάθος ροής της αδιατάρακτης ροής χωρίς την παρουσία μεσόβαθρου.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκε μια σειρά ενδεικτικών βιντεοσκοπήσεων και φωτογραφικών λήψεων, κυρίως για μια καλύτερη παρατήρηση της επίδρασης του μεσόβαθρου όταν έχω μεγάλη παροχή στο κανάλι. Ενδεικτικά, δίνεται εικόνα από στιγμιότυπο (Σχήμα 3.12). Είναι σημαντικό εδώ να αναφερθεί ότι, από την οπτική παρακολούθηση των πειραμάτων, φαίνεται ότι σε μεγάλες παροχές η επίδραση του μεσόβαθρου όταν είναι υπό γωνία στη ροή, είναι εντονότερη και ειδικά στα κατόντη εμφανίζεται εντυπωσιακή πτώση της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας και υπερκρίσιμη ροή με τιμές του αριθμού Froude μεγαλύτερες της μονάδας.

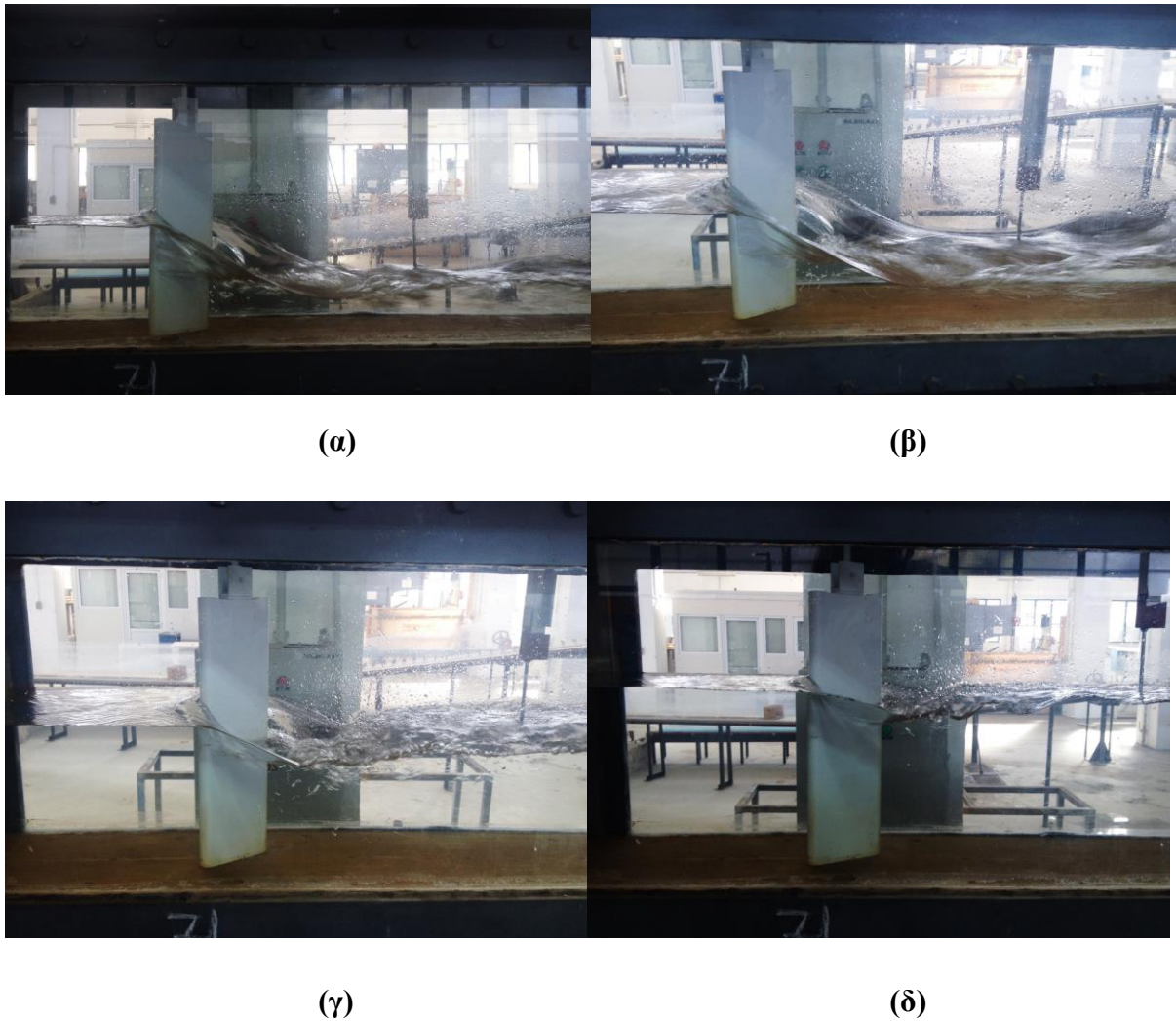


Σχήμα 3.12 Σχηματική απεικόνιση του εργαστηρίου

3.2.2 Χαρακτηριστικές φωτογραφίες από την εξέλιξη των πειραμάτων



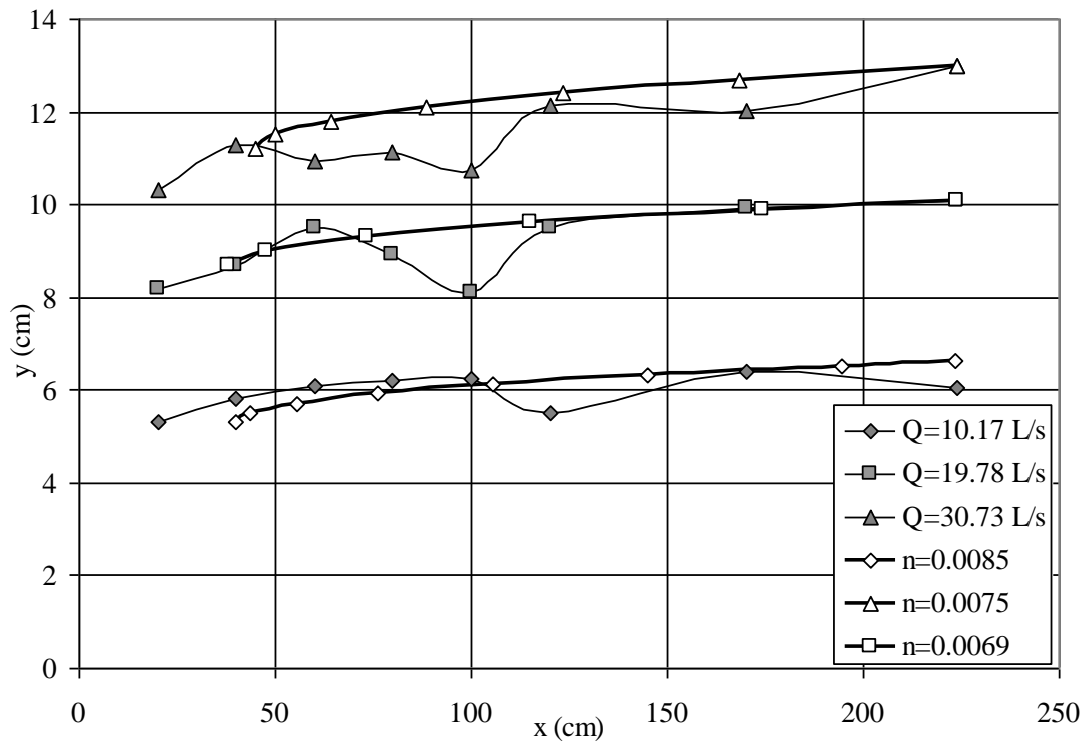
Σχήμα 3.13 Χαρακτηριστικές φωτογραφίες για παροχή 15 L/s και γωνία μεσόβαθρου στις 40° ως προς τη διεύθυνση της ρής, (α) χωρίς υπερχειλιστή, (β) υπερχειλιστής στα 3 cm, (γ) υπερχειλιστής στα 6 cm, (δ) υπερχειλιστής στα 9 cm.



Σχήμα 3.14 Χαρακτηριστικές φωτογραφίες για παροχή 30 L/s και για γωνία μεσόβαθρου στις 40° ως προς τη διεύθυνση της ρής, (α) χωρίς υπερχειλιστή, (β) υπερχειλιστής στα 3 cm, (γ) υπερχειλιστής στα 6 cm, (δ) υπερχειλιστής στα 9 cm.

3.3 Συντελεστής τραχύτητας του Manning

Ο συντελεστής Manning στο κανάλι υπολογίστηκε ως εξής. Για τρεις παροχές μετρήσαμε τα βάθη ροής από την ελεύθερη πτώση μέχρι την περιοχή του μεσοβάθρου κατά μήκος του καναλιού. Στη συνέχεια προσπαθήσαμε να τα αναπαράγουμε με αριθμητική ολοκλήρωση μεταβάλλοντας κατάλληλα το συντελεστή Manning. Από το Σχήμα 3.15 φαίνεται ότι ο συντελεστής Manning κυμαίνεται στα επίπεδα από 0.007 έως 0.0085.



Σχήμα 3.15 Μετρημένα βάθη ροής κατά μήκος του καναλιού για τρεις παροχές (σκούρα σύμβολα) και υπολογισμένα (ανοικτά σύμβολα) με τον κατάλληλο συντελεστή του Manning.

4. Αποτελέσματα των μετρήσεων

Για την μελέτη της υπερύψωσης που πραγματοποιείται στην περιοχή της ροής που επηρεάζει το μεσόβαθρο, εξετάστηκαν έξι διαφορετικές παροχές από 5 L/s έως 30 L/s (ανά 5 L/s περίπου) για εννέα διαφορετικές γωνίες και για τέσσερις διαφορετικές θέσεις του υπερχειλιστή στο κατάντη άκρο της διώρυγας. Αρχικά, επιλεγόταν η γωνία στροφής του μεσόβαθρου και εν συνεχεία ρυθμιζόταν η παροχή από βάνια με τη βοήθεια της συσκευής Venturi. Έπειτα, τοποθετούνταν τα σταθμήμετρα στα ανάντη και κατάντη του μεσόβαθρου και μετρούνταν το βάθος ροής στο μέσο της διώρυγας.

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μετρήσεων, δηλαδή ο κωδικός του πειράματος, η παροχή σε L/s, το αδιατάρακτο βάθος ροής (y) στην περιοχή του μεσοβάθρου σε cm, ο αριθμός Froude (Fr_w) και ο αριθμός Reynolds (Re_w) στην περιοχή του μεσοβάθρου σε αδιατάρακτη ροή.

Πρώτο βήμα της ανάλυσης των μετρήσεων είναι ο υπολογισμός όλων εκείνων των μεγεθών από την θεωρία των ανοικτών αγωγών που είναι απαραίτητα για να σχηματίσουμε άποψη για το πως τελικά επηρεάζεται η ροή από το μεσόβαθρο. Τέτοια μεγέθη είναι ο αριθμός Froude, η ταχύτητα, το κρίσιμο βάθος, η ειδική ενέργεια. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η υπερύψωση εφόσον έχουν προκύψει οι εξισώσεις προσδιορισμού του βάθους σε αδιατάρακτη ροή. Ακολουθεί εφαρμογή των εξισώσεων μελετητών που έχουν προηγηθεί και σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν στο εργαστήριο, ενώ παρατίθενται διαγράμματα που εκφράζουν ποιοτικά τις αλλαγές που επιφέρει το μεσόβαθρο στα διάφορα μεγέθη της ροής, όταν είναι υπό γωνία ως προς τη διεύθυνση της ροής για διάφορες θέσεις του υπερχειλιστή. Επιπλέον πραγματοποιείται έλεγχος μείωσης του πλάτους από το οποίο διέρχεται η ροή λόγω της παρουσίας του μεσόβαθρου και εντοπίζεται πότε η ροή μπλοκάρεται.

Πίνακας 4.1 Πίνακας πειράματων με τα αδιατάρακτα μεγέθη.

Πείραμα	Παροχή Q (L/s)	y (cm)	Fr_w	Re_w
5.1	4,75	3,96	0,75	51496
5.2	4,75	6,88	0,33	43807
5.3	4,75	10,05	0,19	37696
5.4	4,75	13,00	0,13	33355
10.1	10,52	6,36	0,83	100632
10.2	10,52	9,17	0,48	87660
10.3	10,52	12,69	0,29	75487
10.4	10,52	15,82	0,21	67189
15.1	14,63	7,90	0,83	129459
15.2	14,63	10,63	0,53	114279
15.3	14,63	14,34	0,34	98550
15.4	14,63	17,59	0,25	87959
20.1	19,78	9,64	0,83	161326
20.2	19,78	12,25	0,59	144411
20.3	19,78	16,15	0,38	124868
20.4	19,78	19,54	0,29	111698
25.1	25,05	11,21	0,84	190826
25.2	25,05	13,69	0,62	172900
25.3	25,05	17,70	0,42	150049
25.4	25,05	21,24	0,32	134381
30.1	29,88	12,47	0,86	216276
30.2	29,88	14,81	0,66	197883
30.3	29,88	18,86	0,46	172441
30.4	29,88	22,52	0,35	154475

4.1 Υπερύψωση $\Delta y/y_c$ και $\Delta h/y_c$ σαν συνάρτηση της γωνίας θ και του αριθμού Froude

Στο εργαστήριο εκτός από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το μεσόβαθρο στο κανάλι, μετρήθηκαν και τα αδιατάρακτα βάθη ροής για όλες τις παροχές και για τις τέσσερις θέσεις του υπερχειλιστή στα πέρασ της διώρυγας. Αυτό έγινε με απώτερο σκοπό να υπολογιστεί η υπερύψωση σε σχέση με το αδιατάρακτο βάθος ροής που οφείλεται στην παρουσία του μεσόβαθρου. Στόχος ήταν σε κάθε παροχή να ολοκληρώνονται οι μετρήσεις με το μεσόβαθρο σε όλες τις γωνίες και τον υπερχειλιστή αντίστοιχα σε όλες τις θέσεις. Επειδή όμως δεν ήταν δυνατή η αφαίρεση του μεσόβαθρου και η επανατοποθέτηση του σε κάθε πείραμα, οι μετρήσεις χωρίς το εμπόδιο έγιναν σε επόμενο στάδιο με διαφορετικές παροχές που πρακτικά ήταν ανόμοιες στα πειράματα με ή χωρίς το μεσόβαθρο. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος από τις μετρημένες παροχές για τις τέσσερις θέσεις του υπερχειλιστή στα κατάντη, υπολογίσαμε τις σχέσεις βάθους στην περιοχή του μεσόβαθρου – παροχής με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (βλ. Εξισώσεις 4.1 – 4.8 και Σχήμα 4.1). Από αυτές υπολογίσαμε τα αδιατάρακτα βάθη ροής στα ανάντη και κατάντη του μεσόβαθρου για τις παροχές που είχαν καταγραφεί κατά τη διάρκεια των πειραμάτων με το μεσόβαθρο τοποθετημένο στη θέση του. Οι εξισώσεις που προέκυψαν είναι 2^{οο} βαθμού και είναι οι ακόλουθες :

Ανάντη με τελείως κατεβασμένο υπερχειλιστή

$$y = -39,979x^2 + 4,8301x + 0,017 \quad (4.1)$$

Κατάντη με τελείως κατεβασμένο υπερχειλιστή

$$y = -36,554x^2 + 4,5758x + 0,0197 \quad (4.2)$$

Ανάντη με υπερχειλιστή ανεβασμένο στα 3 cm

$$y = -43,626x^2 + 4,6588x + 0,0484 \quad (4.3)$$

Κατάντη με υπερχειλιστή ανεβασμένο στα 3 cm

$$y = -38,501x^2 + 4,4793x + 0,048 \quad (4.4)$$

Ανάντη με υπερχειλιστή ανεβασμένο στα 6 cm

$$y = -54,725x^2 + 5,3845x + 0,0757 \quad (4.5)$$

Κατάντη με υπερχειλιστή ανεβασμένο στα 6 cm

$$y = -53,814x^2 + 5,3701x + 0,077 \quad (4.6)$$

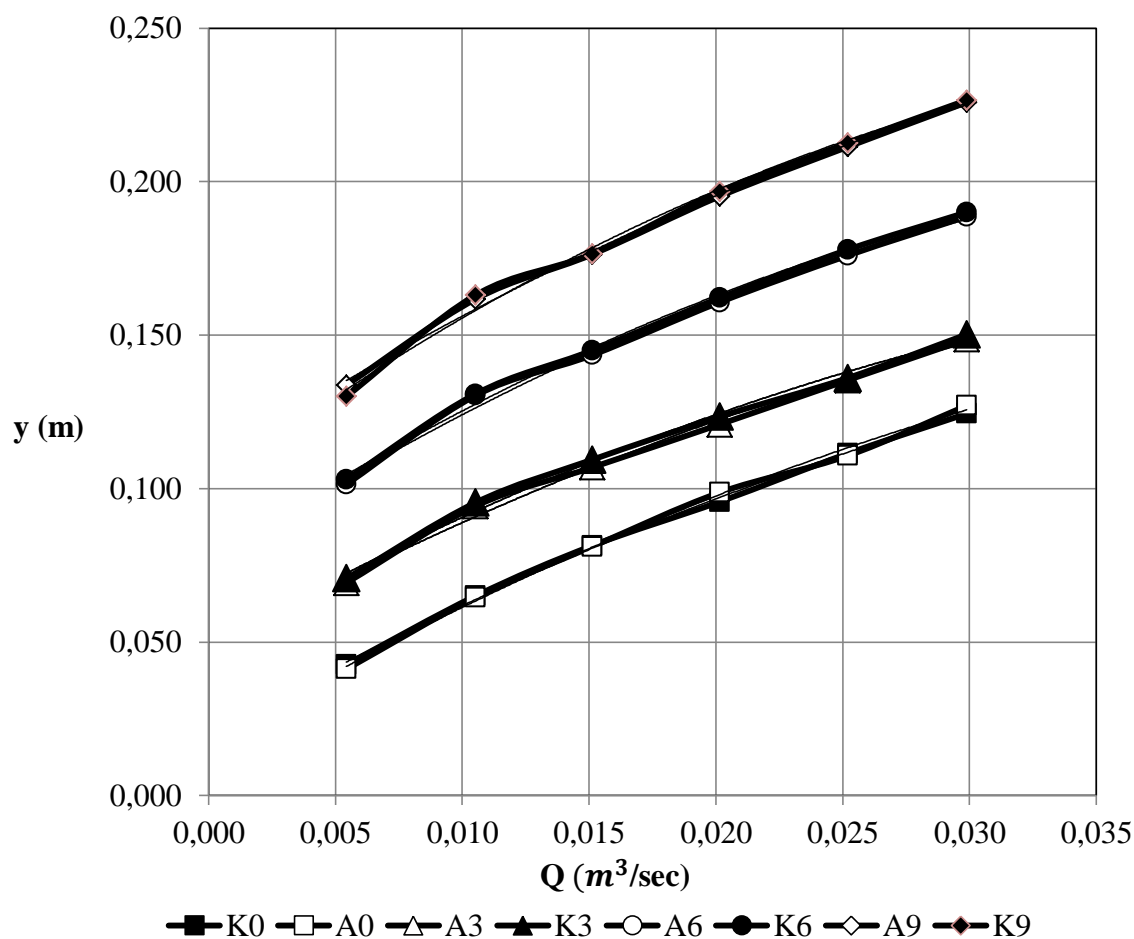
Ανάντη με υπερχειλιστή ανεβασμένο στα 9 cm

$$y = -45,982x^2 + 5,2975x + 0,1078 \quad (4.7)$$

Κατάντη με υπερχειλιστή ανεβασμένο στα 9 cm

$$y = -64,734x^2 + 6,0973x + 0,101 \quad (4.8)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις λοιπόν x είναι οι παροχές σε m^3/s και y τα βάθη ροής σε m.

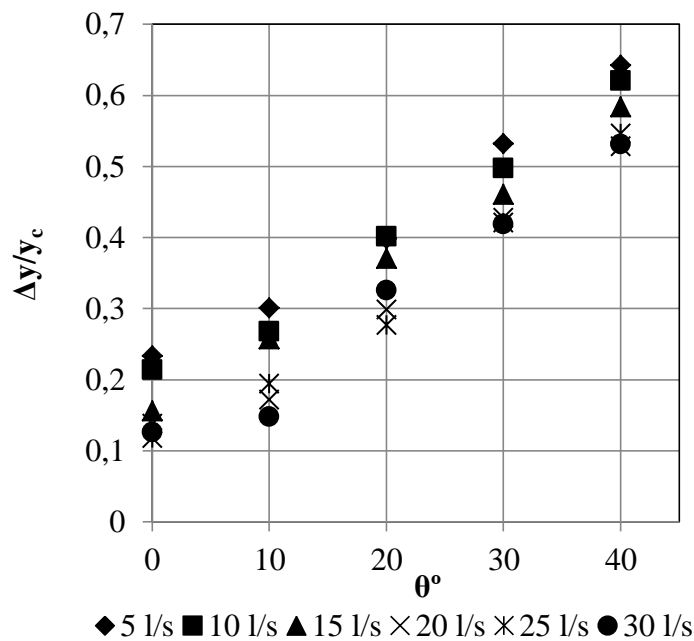


Σχήμα 4.1 Αδιατάρακτα βάθη ροής στην περιοχή του μεσόβαθρου σαν συνάρτηση της παροχής για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή.

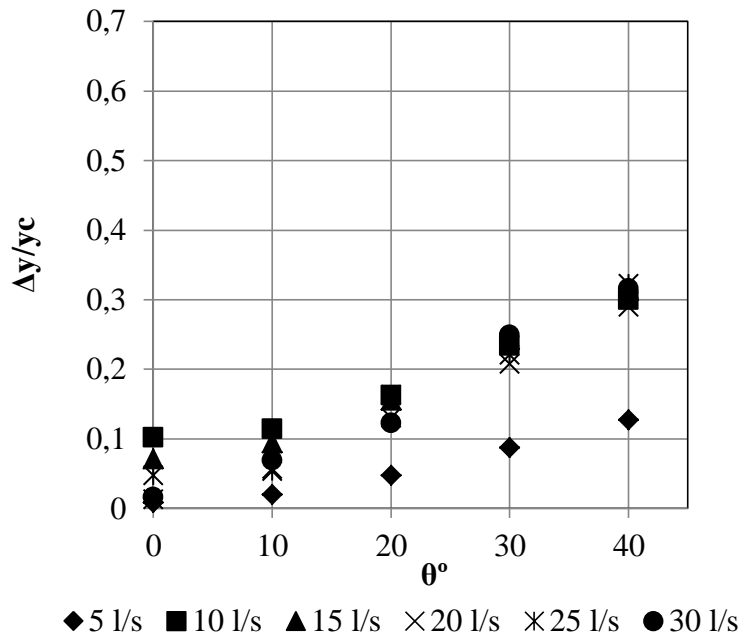
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες υπερυψώσεις $\Delta y/y_c$ και $\Delta h/y_c$ σε συνάρτηση με τις γωνίες στροφής θ° του μεσόβαθρου, για όλες τις παροχές, για κάθε θέση του υπερχειλιστή χωριστά. Σημειώνουμε ότι Δy είναι η υπερύψωση σε σχέση με το αδιατάρακτο βάθος ροής ενώ το Δh συμβολίζει τη διαφορά βάθους ροής στα

ανάτη και κατάντη του μεσοβάθρου και y_c το κρίσιμο βάθος. Παρατηρώντας τα διαγράμματα 4.2(α) – 4.2(δ) μπορούμε να πούμε ότι: (1) όσο αυξάνεται η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του μεσοβάθρου με τη διεύθυνση τη ροής τόσο αυξάνεται η υπερύψωση, επίσης (2) όσο αυξάνεται το ύψος του υπερχειλιστή δηλαδή όσο μειώνεται ο αριθμός Froude τόσο μειώνεται η υπερύψωση καθώς επίσης και οι διαφορές στην υπερύψωση μεταξύ διαφορετικών παροχών στο ίδιο διάγραμμα.

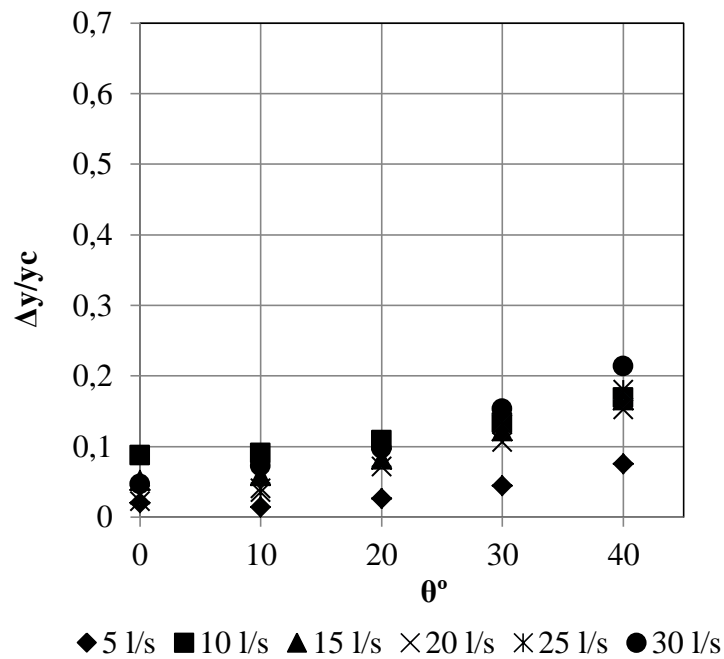
Για γωνίες μεγαλύτερες των 20° τα δεδομένα συγκλίνουν αναξάρτητα από την παροχή (Σχήμα 4.2(γ) και 4.2(δ)). Στο Σχήμα 4.2(α) όπου $Fr > 1$ δηλαδή υπερκρίσιμη ροή στα κατάντη του μεσοβάθρου, παρατηρείται γραμμική συσχέτιση της αδιάστατης υπερύψωσης με την γωνία. Βέβαια, και στα επόμενα διαγράμματα η υπερύψωση φαίνεται να μεταβάλλεται γραμμικά για τις μεγαλύτερες γωνίες.



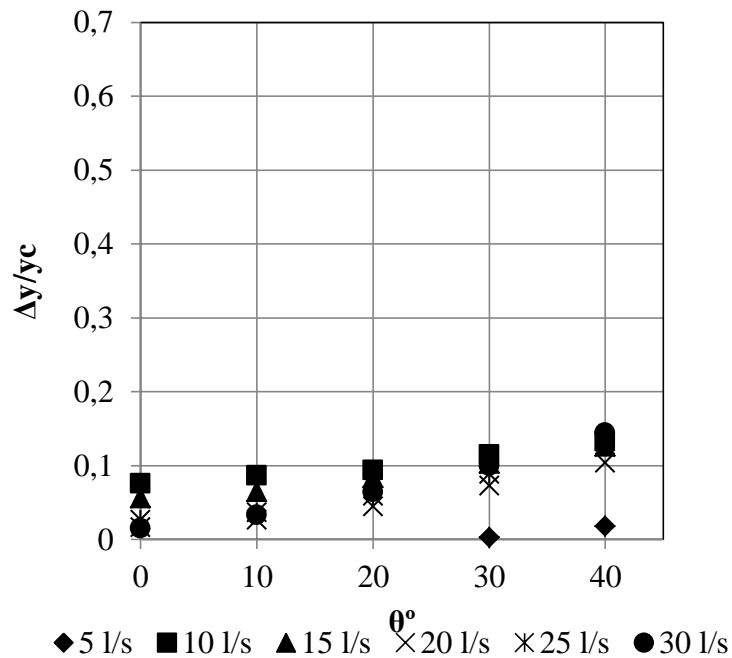
Σχήμα 4.2(α) Μεταβολή του λόγου της υπερύψωσης προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσοβάθρου (θ) για όλες τις παροχές χωρίς την παρουσία υπερχειλιστή.



Σχήμα 4.2(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 3 cm.

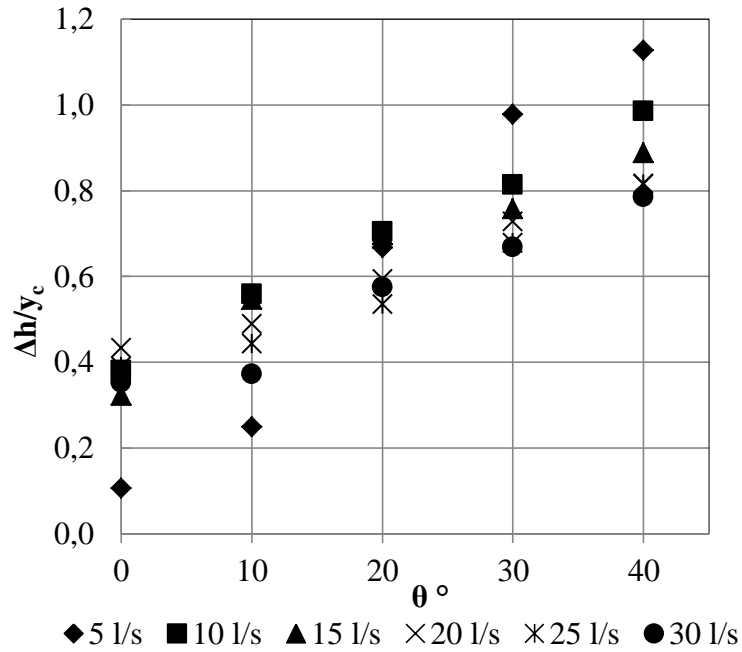


Σχήμα 4.2(γ) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 6 cm.

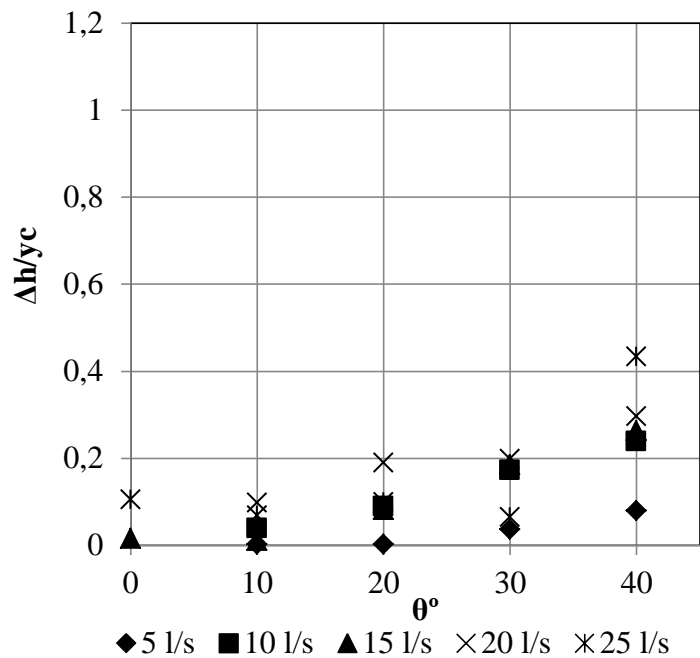


Σχήμα 4.2(δ) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 9 cm.

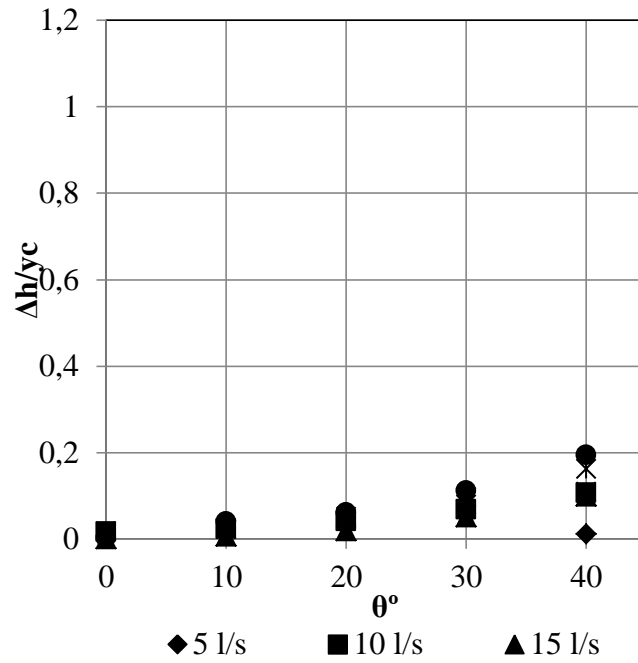
Στα Σχήματα 4.3(α) - 4.3(δ) που ακολουθούν φαίνεται η μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη (Δh) αδιαστατοποιημένη με το κρίσιμο βάθος (y_c) σε σχέση με την γωνία στροφής θ . Η μεταβολή είναι εντονότερη όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής και το μεσόβαθρο σχηματίζει γωνία 40° με τον άξονα της ροής όπου και ο λόγος $\Delta h/y_c$ παίρνει τιμές ακόμη και μεγαλύτερες της μονάδας (Σχήμα 4.3(α)) σε αντίθεση με την περίπτωση του ανεβασμένου υπερχειλιστή στα 9 cm όπου οι μεταβολές στο βάθος ροής είναι ανεπαίσθητες με το λόγο να κυμαίνεται από 0 σε 0,12 (Σχήμα 4.3(δ)). Στο Σχήμα 4.3(β) οι μετρήσεις δεν φαίνονται τόσο καλές με αποτέλεσμα να μην προκύπτει κάποιο ασφαλές συμπέρασμα από το διάγραμμα. Σε όλα τα υπόλοιπα εντοπίζεται το ίδιο μοτίβο της περίπου γραμμικής μεταβολής του λόγου όσο αυξάνεται η γωνία στροφής και αυτό συμβαίνει για όλες τις παροχές με εξαίρεση αυτή των 5 L/s



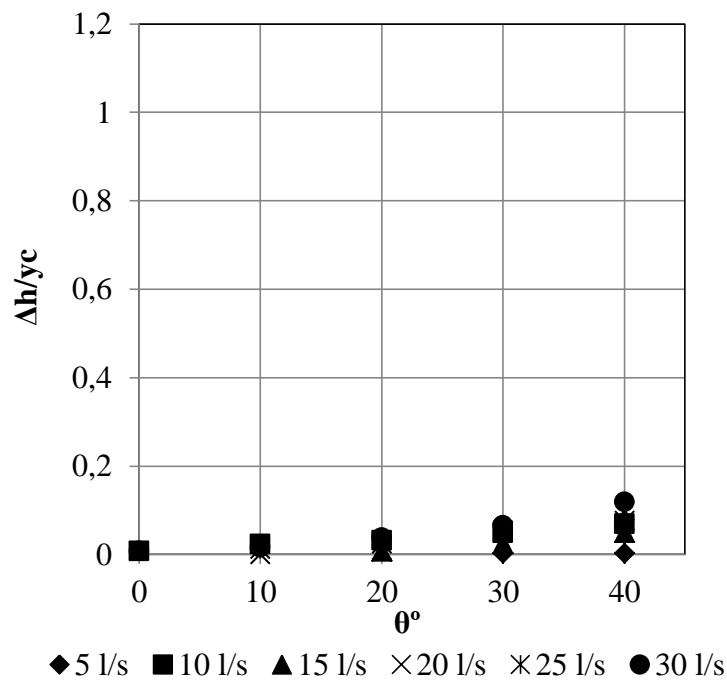
Σχήμα 4.3(α) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.



Σχήμα 4.3(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta h/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.

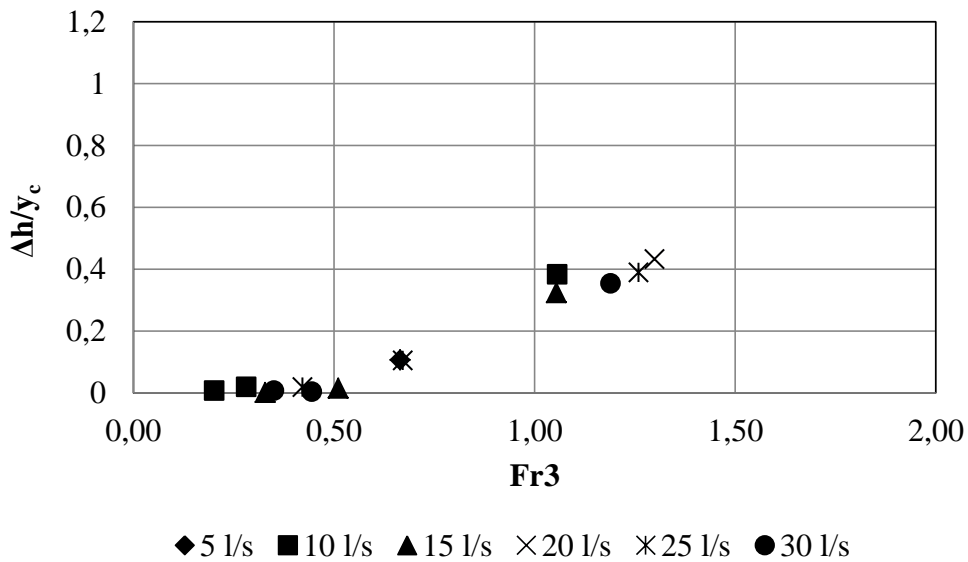


Σχήμα 4.3(γ) Μεταβολή του $\Delta h/\gamma_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.

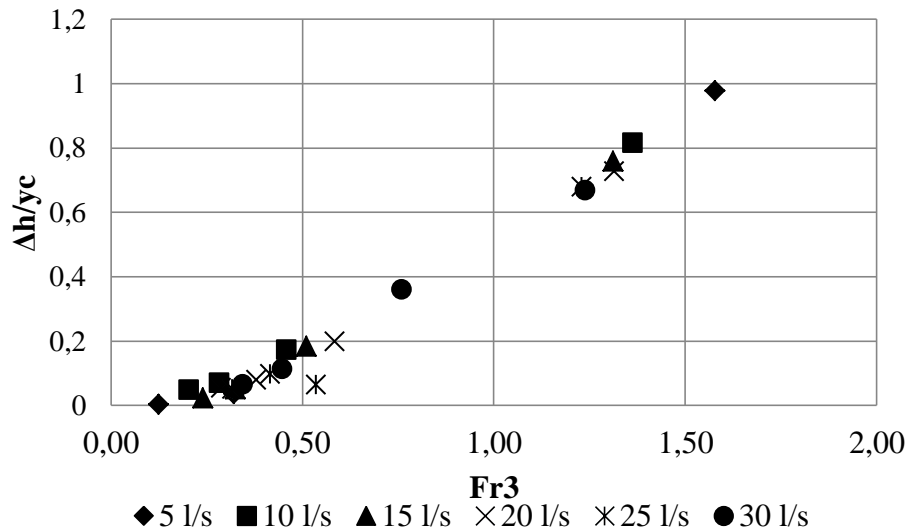


Σχήμα 4.3(δ) Μεταβολή του $\Delta h/\gamma_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.

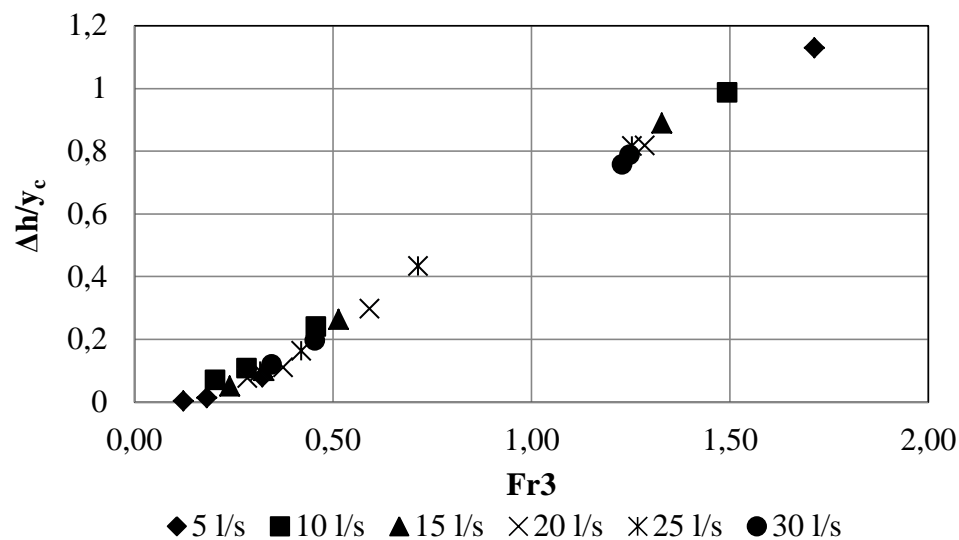
Στα σχήματα 4.4(α) – 4.4(γ) που ακολουθούν φαίνεται η μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη $\Delta h/y_c$ σαν συνάρτηση του αριθμού Froude Fr_3 στα κατόντη για διαφορετικές τιμές της γωνίας θ . Είναι προφανές ότι η διαφορά των βαθών ροής ανάντη και κατόντη είναι σημαντική μόνο όταν η ροή είναι υπερκρίσιμη στα κατόντη, επειδή για $Fr_3 < 1$ οι τιμές συγκεντρώνονται κοντά στο 0 (Σχήμα 4.4(α)). Παρόλα αυτά όσο μεγαλώνει η γωνία θ τόσο πιο καθαρά φαίνεται η γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στην διαφορά των βαθών ροής και του αριθμού Froude (Fr_3), με πιο χαρακτηριστική την περίπτωση των 40° (Σχήματα 4.4(β) και 4.4(γ)).



Σχήμα 4.4(α) Μεταβολή του λόγου $\Delta h/y_c$ σε σχέση με τον Fr_3 στα κατόντη για όλες τις παροχές και για $\theta=0^\circ$.



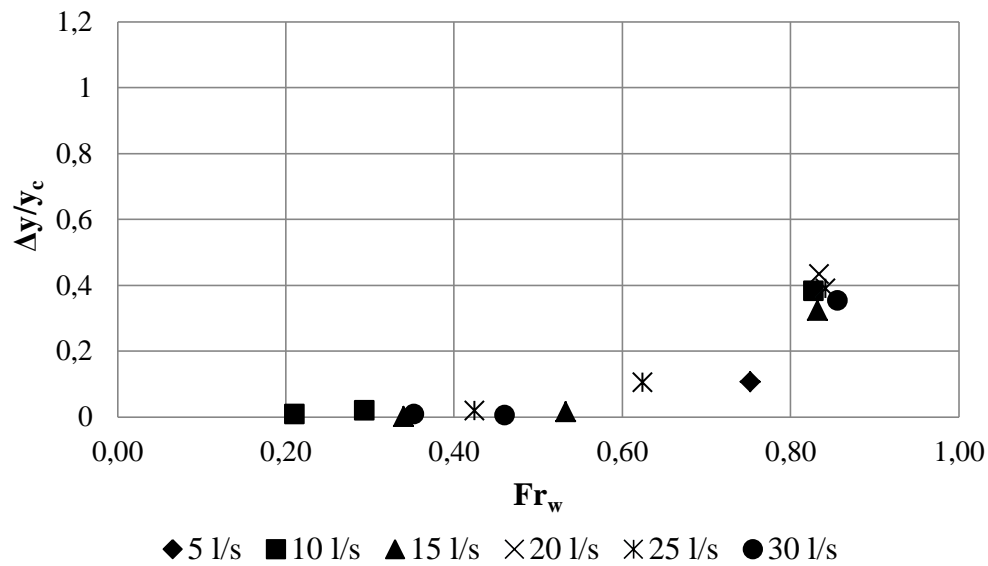
Σχήμα 4.4(β) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με τον Fr_3 στα κατόντη για όλες τις παροχές και για $\theta=30^\circ$.



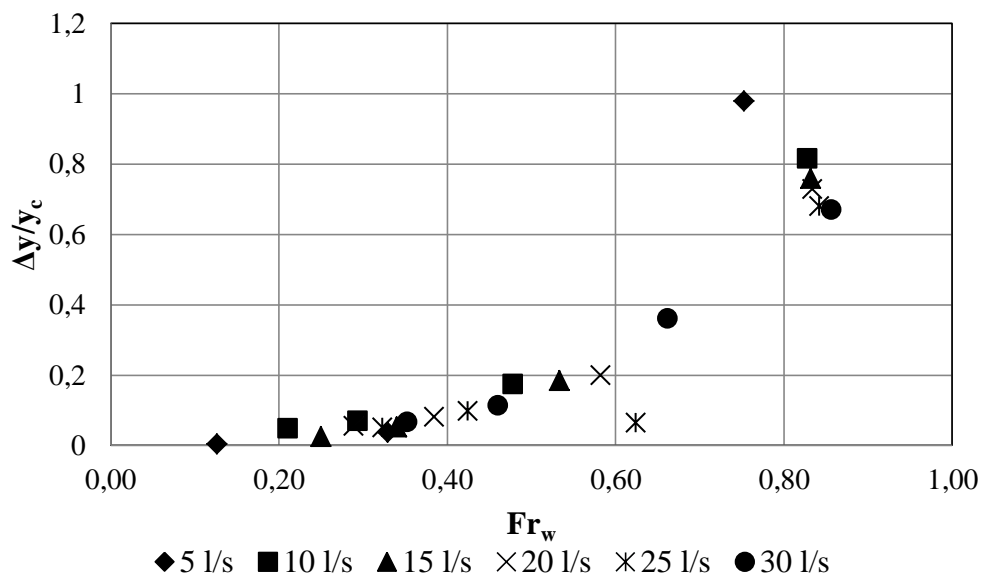
Σχήμα 4.4(γ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατόντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με τον Fr_3 στα κατόντη για όλες τις παροχές και για $\theta=40^\circ$.

Στα σχήματα 4.4(δ) – 4.4(ζ) που ακολουθούν φαίνεται η μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο βάθος προς το κρίσιμο βάθος $\Delta y/y_c$ σαν συνάρτηση του αριθμού Froude Fr_w της αδιατάρακτης ροής για διαφορετικές τιμές της γωνίας θ . Είναι προφανές οι μεταβολές του βάθους ροής στα ανάντη

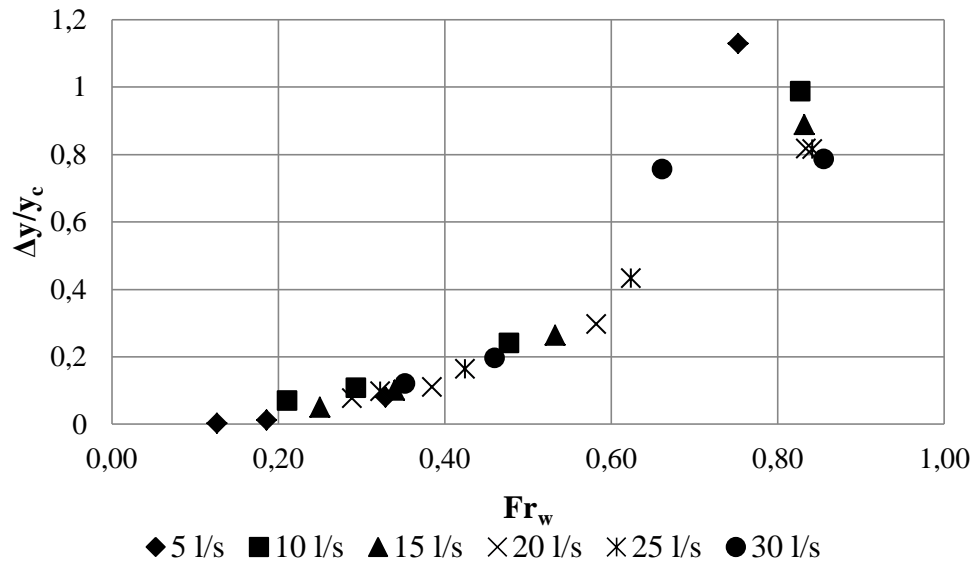
είναι σημαντικές για μεγάλες γωνίες στροφής όταν ο αριθμός Froude της ροής δεν υπερβαίνει το 0,40. Για γωνίες στροφής μικρότερες των 20° οι διαφορές είναι ανεπαίσθητες για $Fr_w < 0.40$.



Σχήμα 4.4(δ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=0^\circ$.



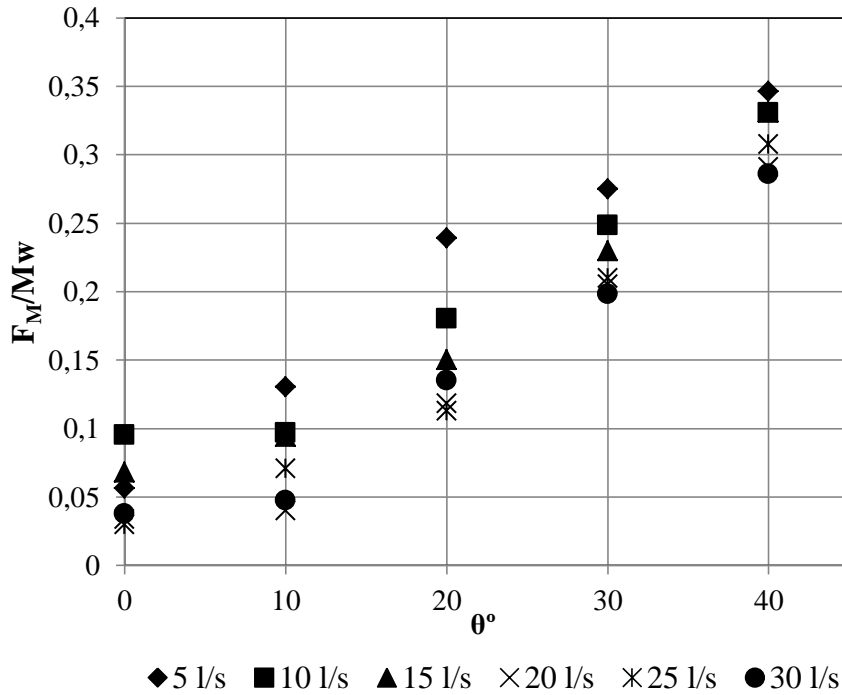
Σχήμα 4.4(ε) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=30^\circ$.



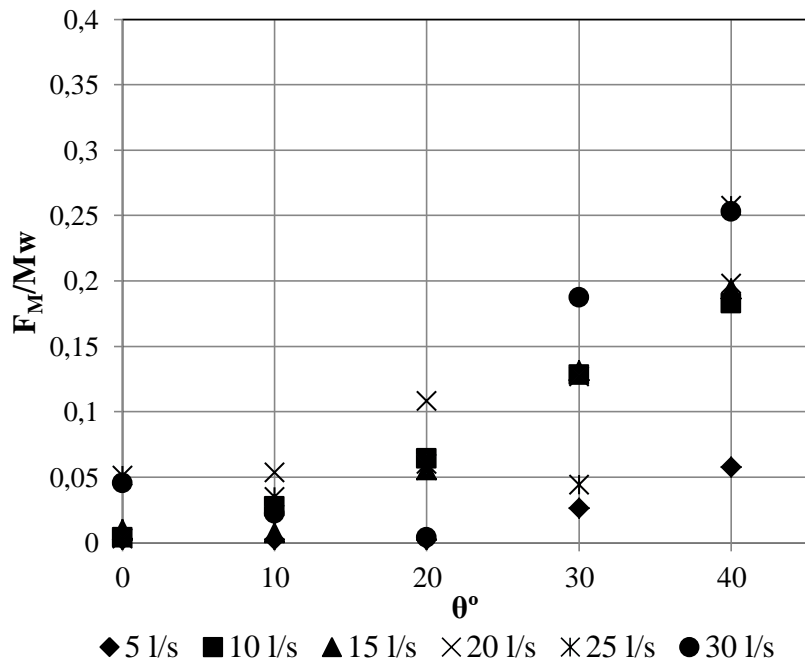
Σχήμα 4.4(ζ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=40^\circ$.

4.2 Μεταβολή της ειδικής δύναμης

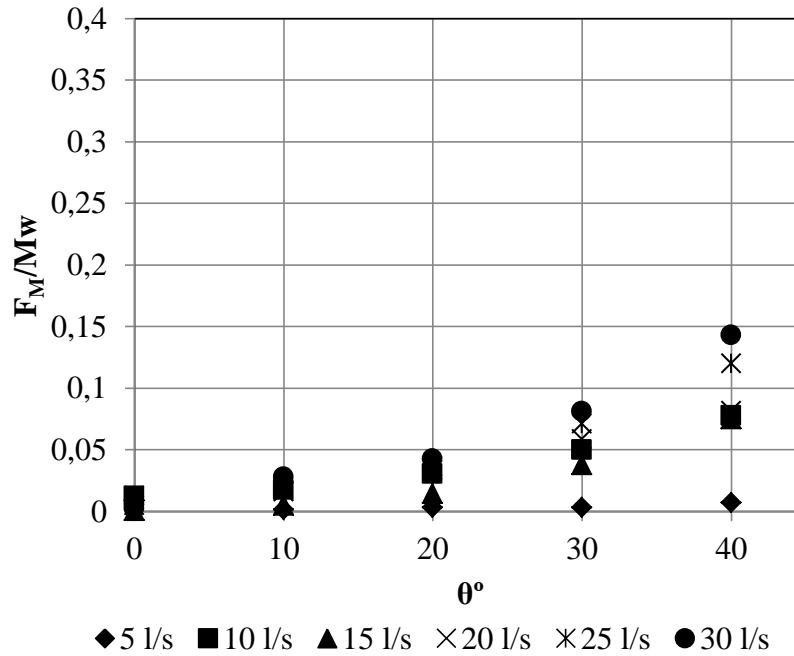
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο λόγος της ειδικής δύναμης F_M ανά μονάδα βάρους του ρευστού προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (M_w) σε σχέση με τις γωνίες στροφής του μεσόβαθρου (θ°), για όλες τις παροχές αλλά για κάθε θέση του υπερχειλιστή στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.5(α) – 4.5(δ). Η δύναμη F_M ορίζεται ως η διαφορά των ειδικών δυνάμεων στις διατομές 1 και 3 (M_1-M_3). Στα σχήματα που ακολουθούν παρατηρούμε γραμμική μεταβολή του λόγου F_M/M_w σε σχέση με την γωνία στροφής, η κλίση της οποίας μειώνεται σαν συνάρτηση του ύψους του υπερχειλιστή, δηλαδή γίνεται ηπιότερη καθώς ο αριθμός Froude Fr_3 της ροής στα κατάντη μειώνεται. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα με σύγκριση του διαγράμματος στο Σχήμα 4.5(α) με αυτό του Σχήματος 4.5(δ). Στις μεγάλες γωνίες παρατηρείται η μεγαλύτερη αύξηση της ειδικής δύναμης F_M γιατί εκεί γίνεται το μεγαλύτερο μπλοκάρισμα της ροής λόγω μείωσης της διατομής.



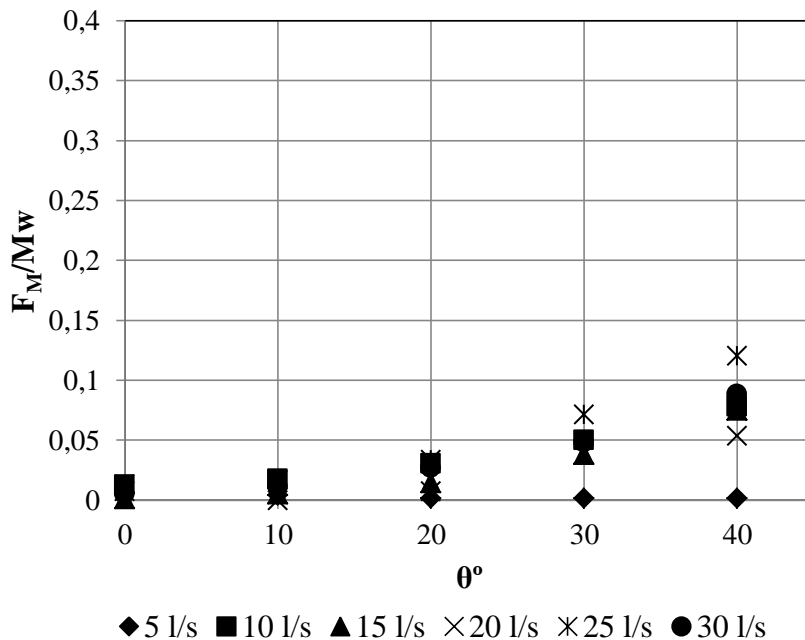
Σχήμα 4.5(α) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.



Σχήμα 4.5(β) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.



Σχήμα 4.5(γ) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.



Σχήμα 4.5(δ) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.

4.3 Απώλειες ενέργειας

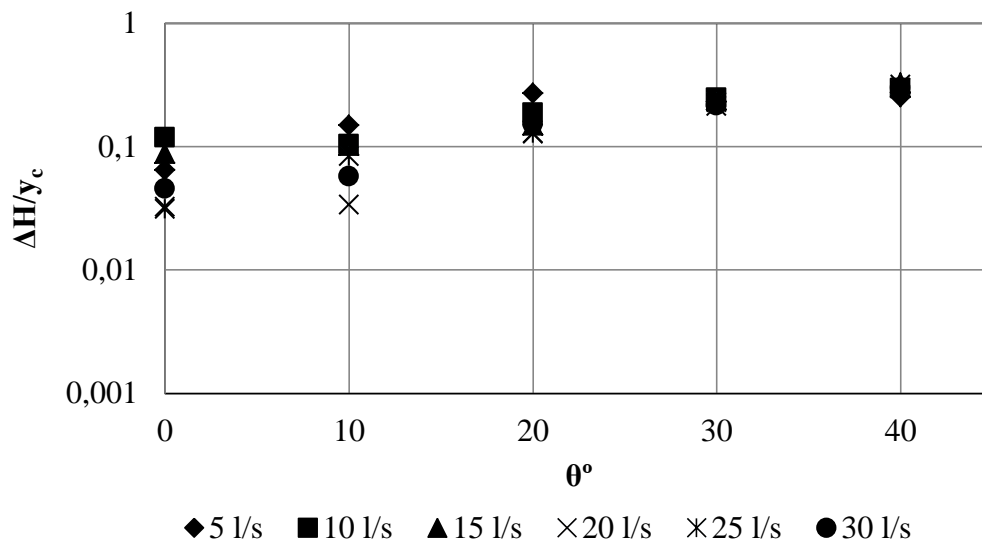
Οι απώλειες ενέργειας υπολογίστηκαν από την εξίσωση

$$H_1 = H_2 + \Delta H$$

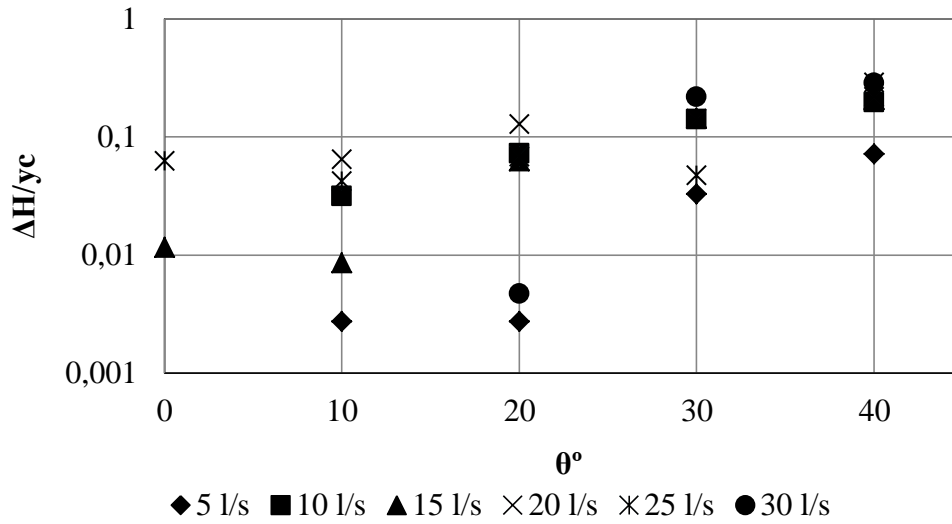
δηλαδή

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_3 + \frac{V_3^2}{2g} + \Delta H(\theta) \quad (4.9)$$

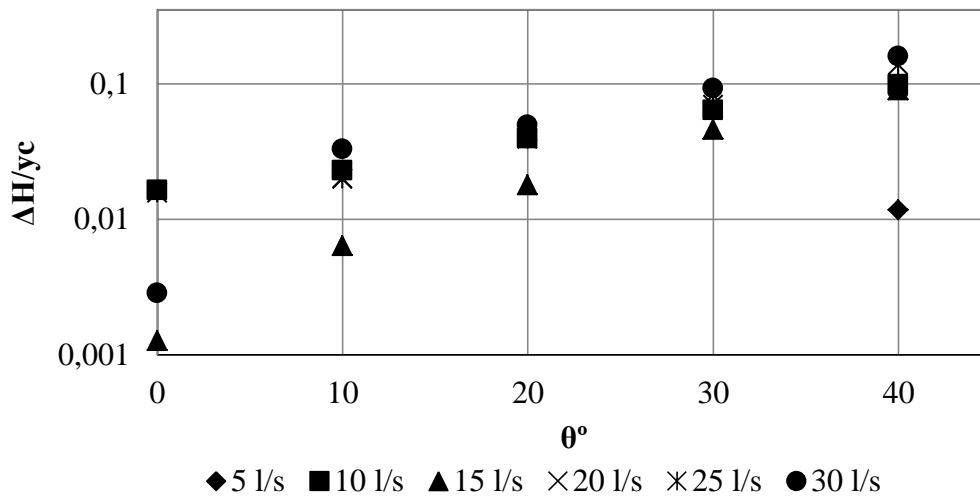
για κάθε γωνία και για τις τέσσερις θέσεις του υπερχειλιστή και φαίνονται σε αδιάστατη μορφή στα Σχήματα 4.6(α) – 4.6(δ) σαν συνάρτηση της γωνίας θ . Στο Σχήμα 4.6(α) παρατηρούνται οι μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας ενώ στα επόμενα παρατηρείται μείωση τους εφόσον μειώνεται ο αριθμός Froude με την αύξηση του βάθους ροής λόγω ανύψωσης του υπερχειλιστή.



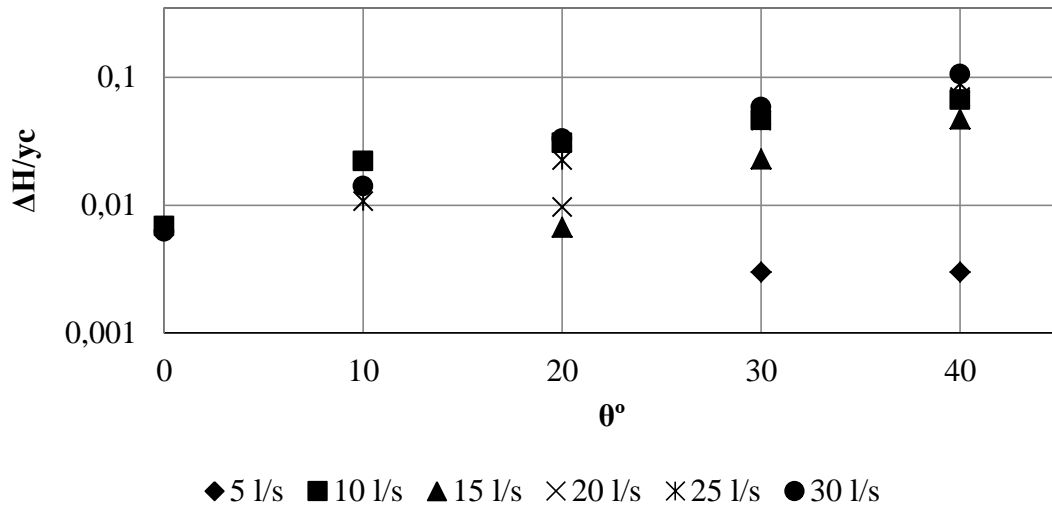
Σχήμα 4.6(α) Μεταβολή του λόγου των απωλειών ενέργειας προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta H/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.



Σχήμα 4.6(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/\gamma_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.



Σχήμα 4.6(γ) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/\gamma_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.



Σχήμα 4.6(δ) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.

4.4 Υπολογισμός του Συντελεστή Αντίστασης

Ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης C_D προκύπτει από τη σχέση

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho V^2 A_\mu} \quad (4.10)$$

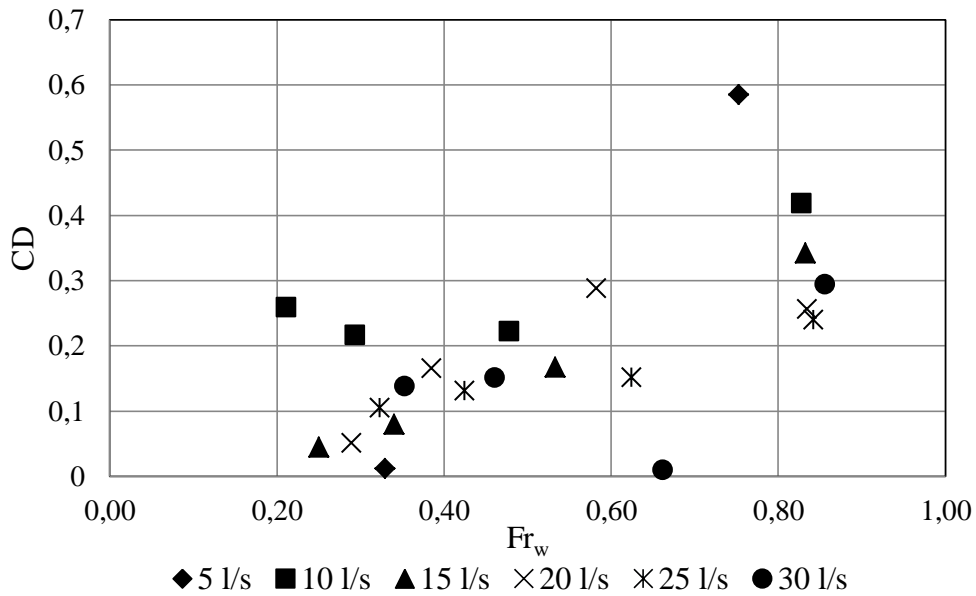
όπου $F_D = F_M \cdot \rho g$ η δύναμη αντίστασης σε N, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του νερού, V η μέση ταχύτητα ροής ανάντη του μεσόβαθρου και A_μ το εμβαδόν της μετωπικής επιφάνειας του βάθρου που είναι κάθετη στη ροή. Ο υπολογισμός της μετωπικής επιφάνειας έγινε με τη σχέση:

$$A_\mu = (2r + L \sin\left(\frac{\theta\pi}{180}\right))y_1 \quad (4.11)$$

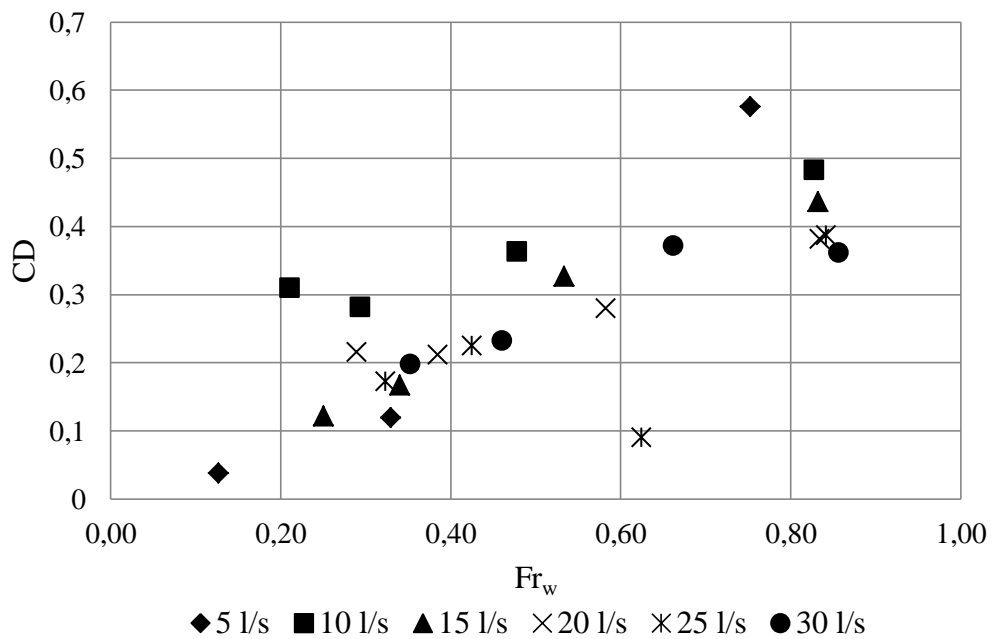
όπου y_1 το βάθος ροής ανάντη, r η ακτίνα του ημικυκλίου των εκατέρωθεν άκρων, L το μήκος του βάθρου χωρίς τα ημικύκλια και θ η γωνία στροφής.

Στα διαγράμματα των σχημάτων 4.7(α) – 4.7(γ) φαίνεται ο συντελεστής αντίστασης C_D συναρτήσει του αριθμού Froude της αδιατάρακτης ροής Fr_w για όλες τις παροχές για κάθε γωνία στροφής του μεσόβαθρου χωριστά. Φαίνονται μόνο τα διαγράμματα που αντιστοιχούν στις γωνίες των 20°, 30° και 40° γιατί σε αυτά των 0° και 10° οι διαφορές ήταν πολύ μικρές (βλέπε παράρτημα). Όσο αυξάνει η γωνία στροφής, αυξάνεται και ο συντελεστής αντίστασης

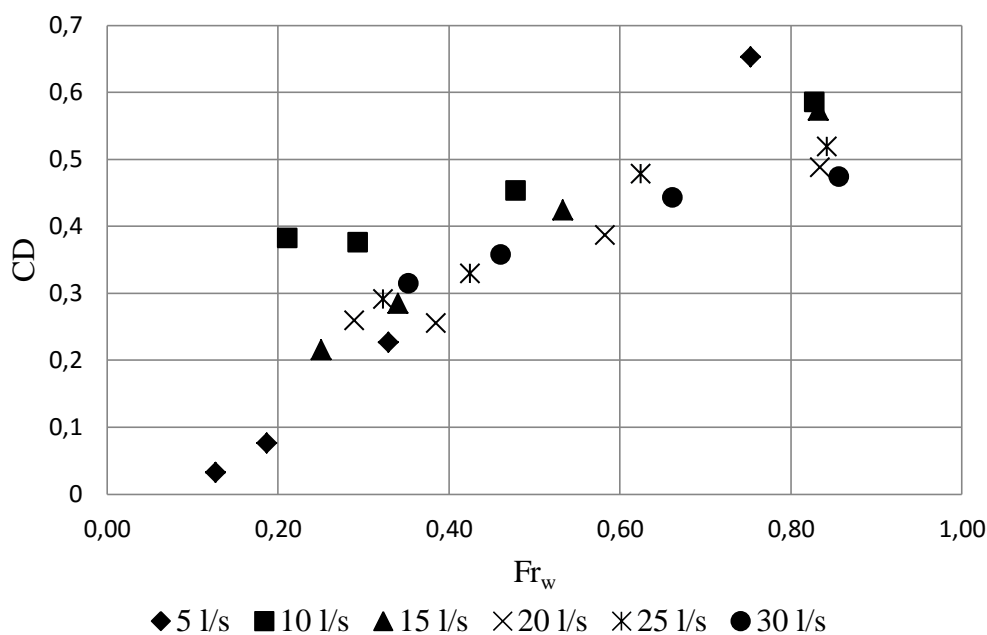
και μεγαλώνει η κλίση νοητής ευθείας που περνά από τα πειραματικά δεδομένα. Δίνεται έτσι η εντύπωση μιας γραμμικής εξάρτησης σαν συνάρτηση του Froude.



Σχήμα 4.7(α) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 20° .



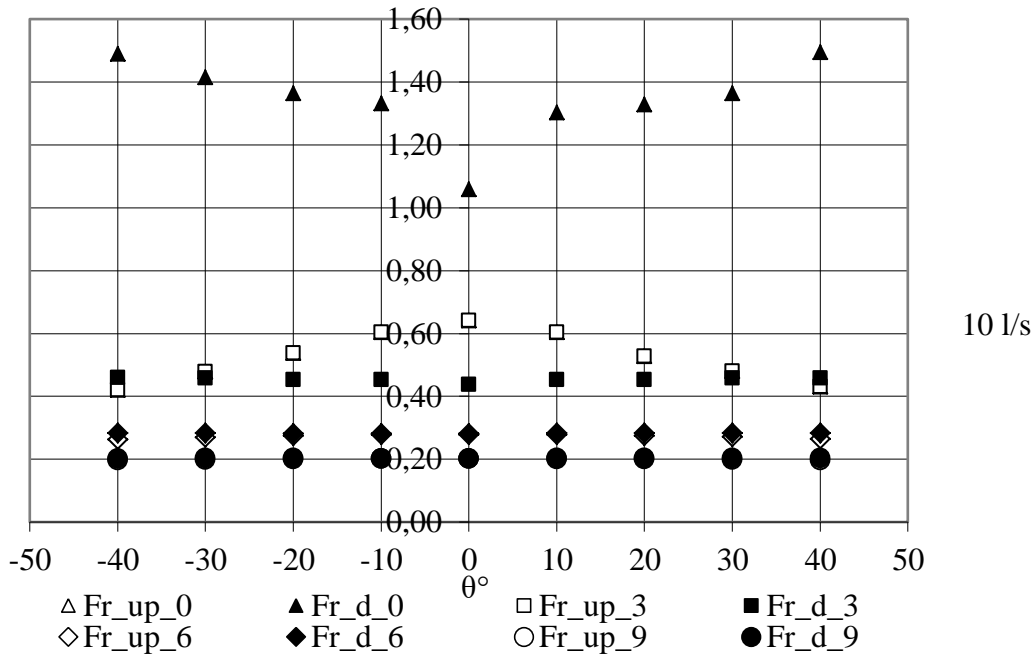
Σχήμα 4.7(β) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 30° .



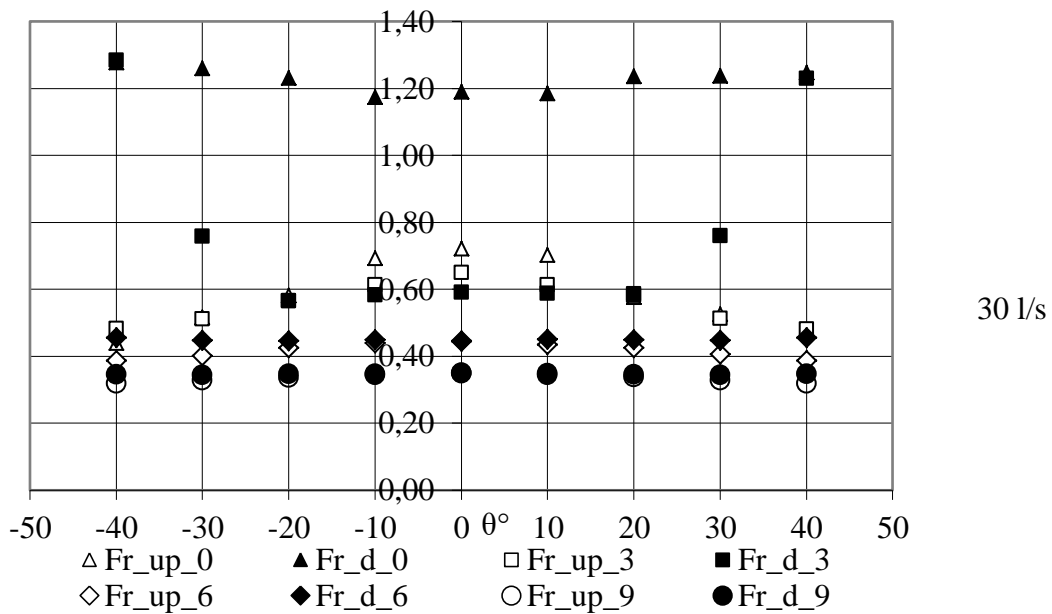
Σχήμα 4.7(γ) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 40° .

4.5 Μεταβολή του αριθμού Froude σαν συνάρτηση της γωνίας και του αδιατάρακτου βάθους

Κάθε πείραμα που πραγματοποιήθηκε, περιελάμβανε μετρήσεις του βάθους ροής ανάντη και κατόντη για εννιά γωνίες στροφής και όχι για πέντε όπως φαίνεται στα περισσότερα διαγράμματα στον οριζόντιο άξονα. Στόχος ήταν να εξασφαλιστεί η συμμετρία της διώρυγας και να εντοπίζονταν τυχόν ανωμαλίες στην κατασκευή, που θα επηρέαζαν την ομαλότητα της ροής. Όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα οι αποκλίσεις σε σχέση με την φορά στροφής του μεσόβαθρου είναι ανεπαίσθητες και μπορεί να οφείλονται και στο σφάλμα του παρατηρητή. Στο Σχήμα 4.8(α) που αντιστοιχεί σε παροχή 10 L/s παρατηρούνται εντονότερες μεταβολές του αριθμού Froude σε σχέση με την γωνία στροφής από αυτήν του Σχήματος 4.8(β) για παροχή 30 L/s. Επίσης για την ίδια παροχή η μεταβολή του αριθμού Froude με τη γωνία μειώνεται καθώς αυξάνουμε το ύψος του υπερχειλιστή και κατά συνέπεια το βάθος ροής μειώνοντας τον αριθμό Froude της αδιατάρακτης ροής.



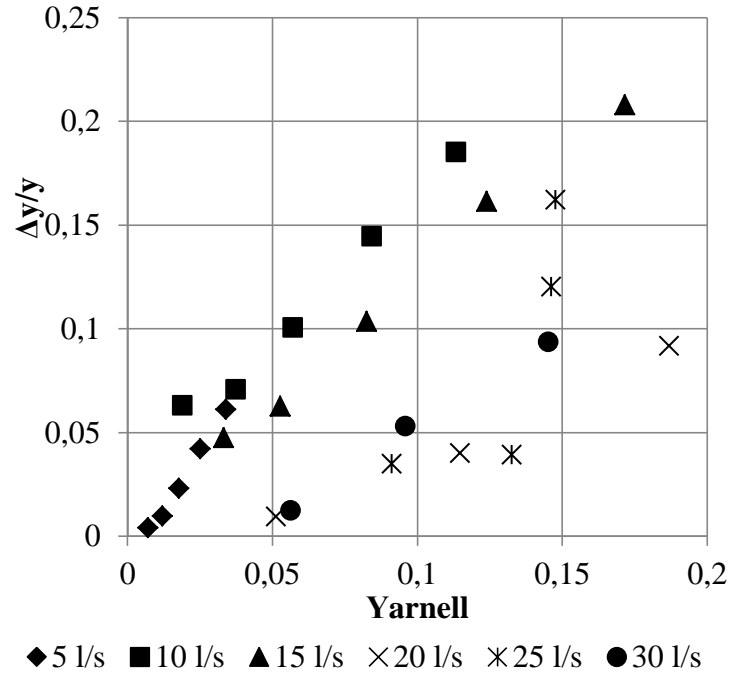
Σχήμα 4.8(α) Μεταβολή του αριθμού Froude (Fr), όπου Fr_up ο αριθμός Froude στα ανάντη και όπου Fr_d ο αριθμός Froude στα κατόντη με τον αριθμό που ακολουθεί να δείχνει το ύψος του υπερχειλιστή, σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή και για παροχή $Q= 10 \text{ L/s}$.



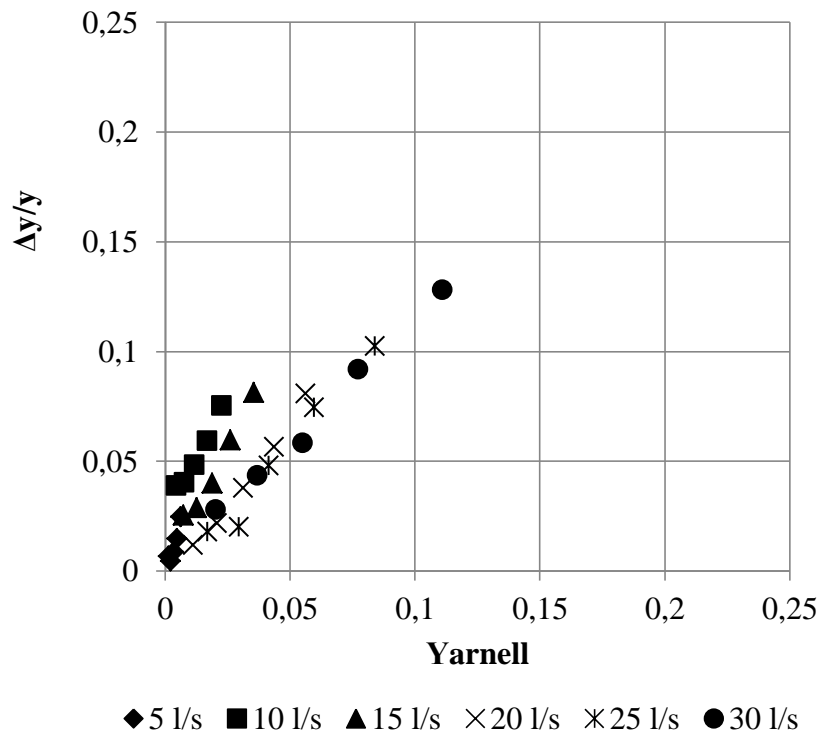
Σχήμα 4.8(β) Μεταβολή του αριθμού Froude (Fr), όπου Fr_up ο αριθμός Froude στα ανάντη και όπου Fr_d ο αριθμός Froude στα κατόντη με τον αριθμό που ακολουθεί να δείχνει το ύψος του υπερχειλιστή, σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή και για παροχή $Q= 30 \text{ L/s}$.

4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων με τη σχέση του Yarnell

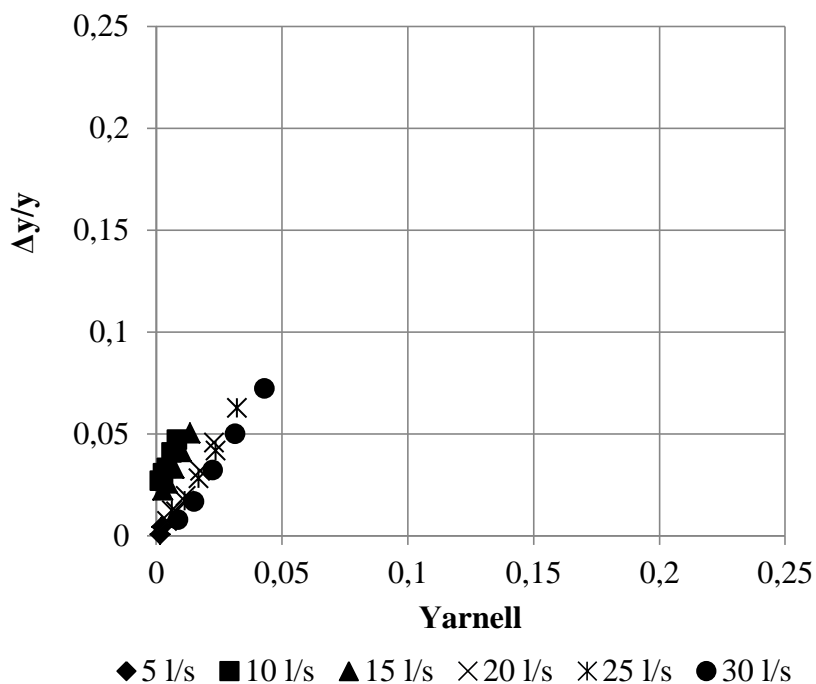
Στα επόμενα διαγράμματα συγκρίνεται ο λόγος της υπερύψωσης (Δy) προς το μέσο αδιατάρακτο βάθος (y), που προέκυψε από τις μετρήσεις του εργαστηρίου, σε σχέση με τον αντίστοιχο λόγο που δίνεται με εφαρμογή της εμπειρικής σχέσης (2.4) του Yarnell. Για να προκύψουν τα ακόλουθα διαγράμματα, αντικαταστάθηκε στην εξίσωση 2.4 όπου Fr_3 , ο αριθμός Froude στα κατάντη του μεσόβαθρου όπως αυτός προέκυψε από τις μετρήσεις και α ο λόγος του πλάτους του μεσόβαθρου που εμποδίζει την ροή προς το συνολικό πλάτος της διατομής. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 οι τιμές του α στα πειράματα του Yarnell είναι 11.7%, 23.3%, 35%, και 50%. Οι τιμές όμως που αντικαταστάθηκαν τώρα είναι 8,7%, 14,6%, 20,6 %, 26% και 30,9 %. Στα διαγράμματα δεν περιλαμβάνονται οι μετρήσεις στις οποίες δεν υπάρχει υπερχειλιστής γιατί στις συνθήκες αυτές η ροή ήταν υπερκρίσιμη και ο τύπος του Yarnell ισχύει για συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Συνεπώς με την εφαρμογή του δεν προέκυπταν λογικές τιμές για την υπερύψωση. Επίσης στο Σχήμα 4.9(α) δεν εμφανίζεται η τιμή της υπερύψωσης για την παροχή των 30 L/s και για γωνία 40° για τον ίδιο λόγο. Παρατηρούμε πως οι μετρήσεις στο εργαστήριο είναι σχετικά κοντά στα αποτελέσματα της εξίσωσης του Yarnell για παροχές μεγαλύτερες από 15 L/s. Πιο συγκεκριμένα σε αυτή την παροχή και για αριθμό Froude ίσο με 0,50 περίπου, ο τύπος δίνει παραπλήσια αποτελέσματα για την υπερύψωση με τις μετρήσεις του εργαστηρίου (Σχήμα 4.9(α)). Από εκεί και πέρα για ένα εύρος τιμών του αριθμού Froude από 0,38 μέχρι 0,50 και για παροχές μεγαλύτερες των 15 L/s (Σχήμα 4.9(β) και Σχήμα 4.9(γ)) παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο, με μια ελάχιστη διαφορά προς τα πάνω των μετρήσεων του εργαστηρίου. Αντίθετα, για τις αντίστοιχες παροχές και ένα εύρος τιμών για τον αριθμό Froude από 0,6 μέχρι 0,7 η εξίσωση του Yarnell δίνει κοντινές αλλά μεγαλύτερες τιμές για την υπερύψωση από αυτές του εργαστηρίου (Σχήμα 4.9(α)).



Σχήμα 4.9(α) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.

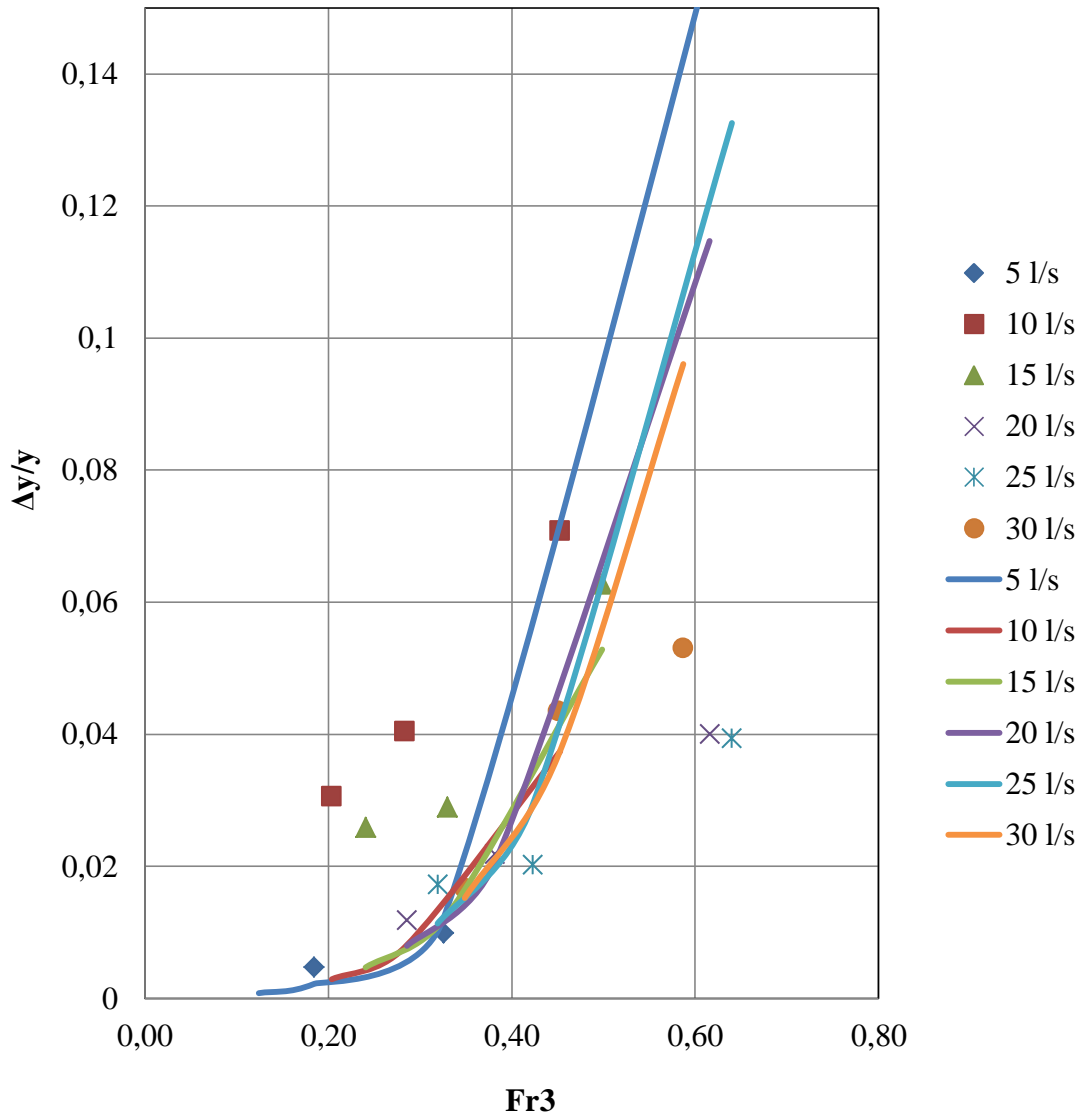


Σχήμα 4.9(β) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.

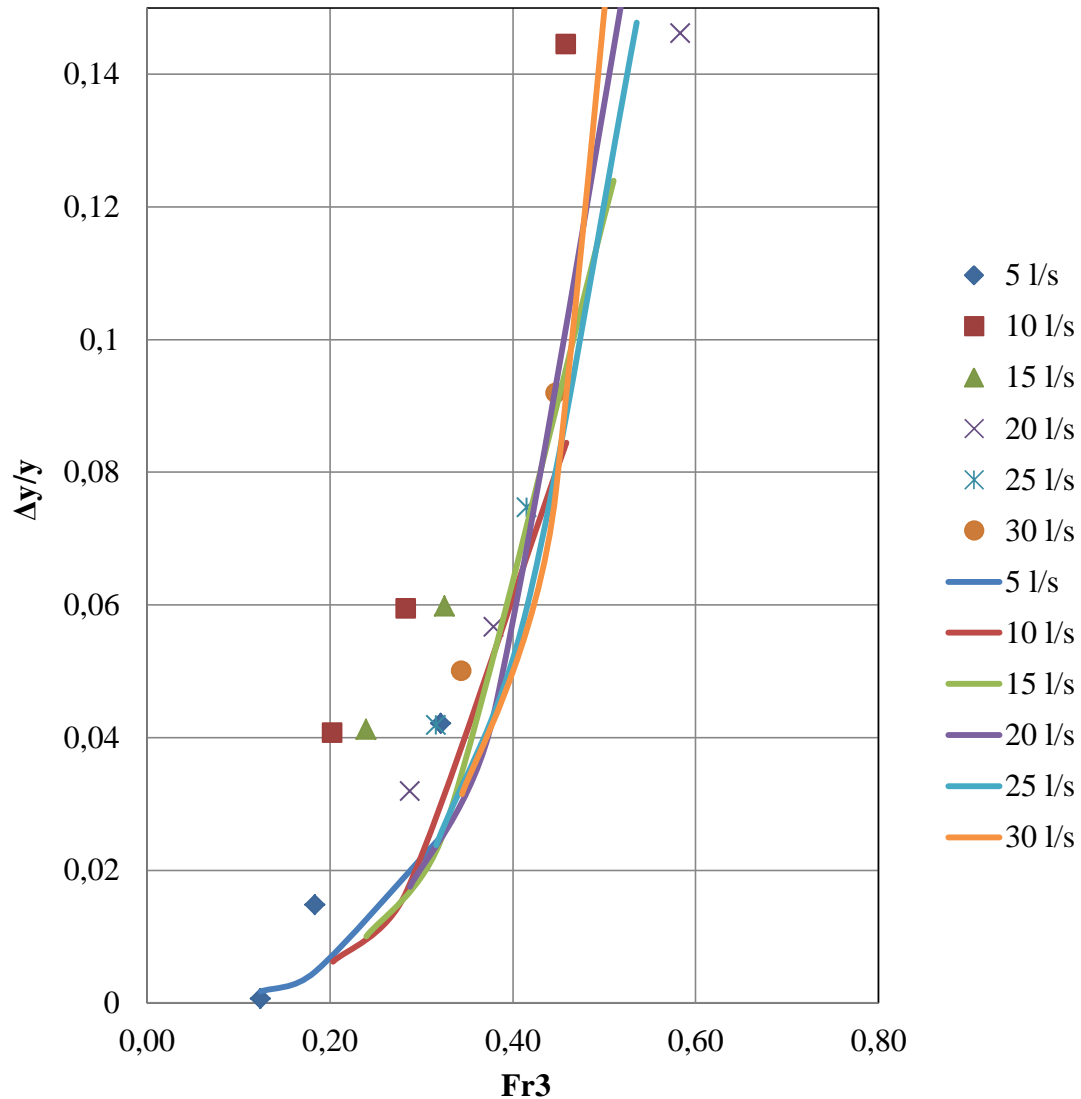


Σχήμα 4.9(γ) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.

Στη συνέχεια, σε παρόμοιο διάγραμμα έχει αποτυπωθεί ο λόγος της υπερύψωσης προς το αδιατάρακτο βάθος που προέκυψε από τις μετρήσεις στο εργαστήριο και από την εμπειρική σχέση (2.4) του Yarnell, συναρτήσει του αριθμού Froude. Οι υπερκρίσιμες τιμές του αριθμού Froude δεν αποτυπώθηκαν γιατί η εμπειρική σχέση εφαρμόζεται και δίνει λογικά αποτελέσματα μόνο σε συνθήκες υποκρίσιμης ροής. Δόθηκαν τα διαγράμματα για γωνίες 10° και 30° για να γίνει πιο σαφής η διαφοροποίηση στη μορφή τους. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10 παρατηρούνται αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων του εργαστηρίου και των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εμπειρική σχέση του Yarnell. Στο ίδιο σχήμα για τιμές του αριθμού Fr από 0,3 έως 0,5 και για παροχές μεγαλύτερες των 20 L/s παρατηρείται καλύτερη συσχέτιση μεταξύ των μετρήσεων και εκτιμήσεων από τις σχέσεις του Yarnell. Στο Σχήμα 4.11 που αντιστοιχεί σε γωνία 30° , παρατηρείται πάλι πρόβλημα στις μικρότερες παροχές (10 L/s, 15 L/s). Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση για αριθμούς Froude από 0,30 έως 0,50 υπάρχει σύγκλιση με τις καμπύλες του Yarnell. Επιπλέον, για τη γωνία των 10° παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των τιμών των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, σε αντίθεση με αυτές των 30° .



Σχήμα 4.10(α) Απεικόνιση του λόγου της υπερύψωσης προς το αδιατάρακτος βάθος ($\Delta y/y$), που προέκυψε από τις μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και από την εμπειρική σχέση του Yarnell συναρτήσει του αριθμού Froude (Fr_3) στα κατάντη για όλες τις παροχές και τα ύψη υπερχειλιστή και για γωνία 10° .



Σχήμα 4.10(β) Απεικόνιση του λόγου της υπερύψωσης προς το αδιατάρακτος βάθος ($\Delta y/y$), που προέκυψε από τις μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και από την εμπειρική σχέση του Yarnell συναρτήσει του αριθμού Froude (Fr_3) στα κατάντη για όλες τις παροχές και τα ύψη υπερχειλιστή και για γωνία 30° .

4.7 Παρατηρήσεις σχετικές με τα πειραματικά δεδομένα

Μετά την επεξεργασία των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο και παρατηρώντας τα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα υποκεφάλαια, παρατηρήθηκε απόκλιση στη συμπεριφορά των μετρήσεων που έγιναν με παροχή 5 L/s σε σχέση με τις μεγαλύτερες παροχές. Είναι πολύ πιθανόν η μέτρηση της παροχής να μην έχει

μετρηθεί με ακρίβεια και να υπάρχει κάποιο συστηματικό σφάλμα που δεν μπορούμε να εντοπίσουμε πού οφείλεται. Μια εκτίμηση είναι ότι η πραγματική τιμή της παροχής είναι μικρότερη από την αυτή που υπολογίσαμε από την ένδειξη του μανομέτρου του μετρητή Venturi. Επίσης 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 που επήλθε με την πάροδο του χρόνου με αποτέλεσμα την επίδραση του στις μετρήσεις. Τέλος όταν ο υπερχειλιστής βρίσκεται στα 6 cm και κυρίως στα 9 cm οι διαφορές στο βάθος ροής ανάντη και κατάντη είναι πολύ μικρές και δύσκολα προσδιορίζονται με ακρίβεια από τον παρατηρητή. Για αυτό το λόγο δικαιολογούνται κάποιες αρνητικές τιμές του Δy και του ΔH , οι οποίες όμως δεν απεικονίστηκαν στα διαγράμματα.

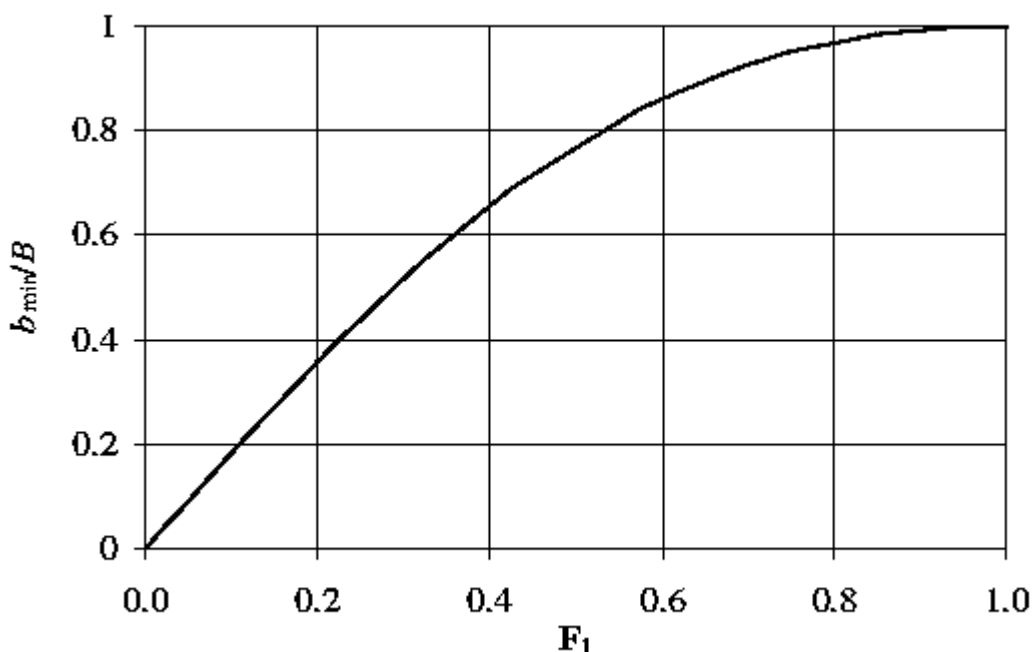
4.8 Έλεγχος Μείωσης Πλάτους

Σε ροή που διέρχεται από οποιοδήποτε είδους στένωση υπάρχει πιθανότητα υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνεια λόγω του μπλοκαρίσματος που πραγματοποιείται. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται συνήθως σε υποκρίσιμη ροή όταν κατασκευές με αρκετά μεγάλο πλάτος καλύπτουν μεγάλο μέρος της υγρής διατομής. Η στάθμη του νερού αυξάνεται ανάντη του εμποδίου ώστε να καταστεί δυνατή η μετάβαση από υποκρίσιμη σε υπερκρίσιμη ροή. Έτσι και σε ένα ορθογωνικό κανάλι που επικρατούν συνθήκες υποκρίσιμης ροής υπάρχει μία ελάχιστη τιμή του πλάτους b που αν μειωθεί περισσότερο, τότε είτε η παροχή που διέρχεται μειώνεται, είτε για να διέλθει η αρχική παροχή Q θα πρέπει να αυξηθεί η στάθμη στα ανάντη της στένωσης. Στην εξίσωση που ακολουθεί η ελάχιστη τιμή του λόγου b_{min}/B εκφράζεται σαν συνάρτηση του αριθμού Froude στα ανάντη του μεσόβαθρου, ώστε να διέρχεται η δεδομένη παροχή Q . Προκύπτει έτσι η ακόλουθη σχέση:

$$b_{min} = \frac{3}{2} \frac{Q}{E_1^{3/2}} \sqrt{\frac{3}{2g}} \Leftrightarrow \frac{b_{min}}{B} = \frac{Q}{b\sqrt{g}} \left(\frac{3}{2E_1}\right)^{3/2} = \frac{V_1 y_1^{3/2}}{\sqrt{g} y_1} \left(\frac{3}{2E_1}\right)^{3/2} = F_1 \left(\frac{3y_1}{2E_1}\right)^{3/2} = \dots \quad (4.12)$$

$$= F_1 \left(\frac{3}{2 + F_1^2}\right)^{3/2} \Leftrightarrow b_{min} = BF_1 \left(\frac{3}{2 + F_1^2}\right)^{3/2}$$

Στη σχέση (4.9) $E_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g}$ είναι η ειδική ενέργεια στη διατομή 1 (Σχήμα 2.1). Όλα τα μεγέθη αντικαθίστανται σε m. Για τον λόγο b_{min}/B οι οριακές τιμές είναι 0 και 1 όταν είναι από 0 έως 1 και η μεταβολή του αριθμού Froude ανάντη της στένωσης που πραγματοποιείται λόγω του μεσόβαθρου (Σχήμα 4.21).

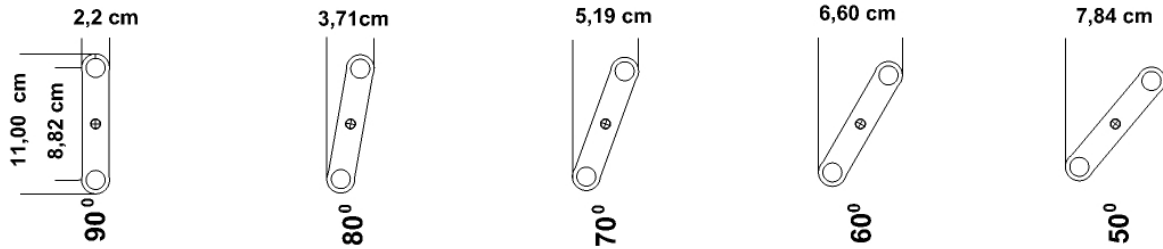


Σχήμα 4.11 Μεταβολή του b_{\min}/B σε ορθογωνική διάβρυγα σαν συνάρτηση του αριθμού Froude στα ανάντη, όταν η ροή είναι υποκρίσιμη (Πηγή: Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση και αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια, Διδακτικές σημειώσεις, Έκδοση 3, υπό Π. Ν. Παπανικολάου, 2014).

Η μεγαλύτερη γωνία στροφής του μεσόβαθρου είναι στις 40° και στην περίπτωση αυτή το ελεύθερο πλάτος της διατομής είναι $b' = 17,5$ cm. Ο μέγιστος αριθμός Froude στα ανάντη του μεσόβαθρου για να μην εμποδίζεται η ροή προκύπτει από την παραπάνω σχέση (4.12) και είναι ίσος με 0,43. Παρ' όλα αυτά υπήρξαν πειράματα με αριθμό Froude μεγαλύτερο από 0,43 γεγονός που σημαίνει πως υπάρχει παρεμπόδιση της ροής, υπερύψωση της, λόγω μείωσης πλάτους που προκαλεί το εμπόδιο. Εφαρμόστηκε η σχέση για όλες τις γωνίες και με διαφορετικό βέβαια, αριθμό Froude για κάθε γωνία, παρατηρείται πως υπάρχουν μετρήσεις που μπλοκάρει η ροή. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση της ροής με $Q = 25$ L/s στην οποία εντοπίζονται οι χαμηλότερες τιμές του αριθμού Froude για όλες τις γωνίες στροφής του μεσόβαθρου εκτός από αυτή των 0° και παράλληλα ισχύει $b_{\min} > b(\theta)$.

$$b(\theta) = B - (2r - L \sin\left(\frac{\theta\pi}{180}\right)) \quad (38)$$

όπου $B = 25,3$ cm το πλάτος της διατομής της ορθογωνικής δώρυγας, $2r = b = 2,18$ cm δηλαδή το πλάτος του μεσόβαθρου, $L = 8,82$ cm το μήκος του ορθογωνικού τμήματος του μεσόβαθρου και θ η γωνία στροφής σε μοίρες.



Σχήμα 4.12 Κάτοψη του μεσόβαθρου σε όλες τις γωνίες στροφής με όλα τα $b(\theta)$.

5. Συμπεράσματα και Προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήσαμε πειραματικά τη ροή γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας υπό γωνία. Συγκεκριμένα, σκοπός της εργασίας ήταν η μέτρηση της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του μεσόβαθρου και η σύγκριση της με αυτή που προκύπτει από την εμπειρική σχέση του Yarnell. Από τα πειραματικά δεδομένα υπολογίστηκαν η ειδική δύναμη, οι απώλειες ενέργειας και ο συντελεστής αντίστασης και εξετάστηκε πως μεταβάλλονται σε συνάρτηση με τις διάφορες γωνίες στροφής του μεσόβαθρου και τον αριθμό Froude (Fr) της αδιατάρακτης ροής. Για να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα από την παρούσα εργασία έγιναν έξι σειρές πειραμάτων η καθεμιά με διαφορετική παροχή για εννιά γωνίες στροφής και τέσσερα ύψη υπερχειλιστή.

Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε από την εργασία αυτή είναι τα παρακάτω:

- Η υπερύψωση αυξάνεται όσο αυξάνει η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του μεσοβάθρου με τη διεύθυνση τη ροής για δεδομένο αριθμό Froude. Επίσης όσο αυξάνεται το ύψος του υπερχειλιστή δηλαδή όσο μειώνεται ο αριθμός Froude τόσο μειώνεται η υπερύψωση καθώς επίσης και οι διαφορές στην υπερύψωση για μεγάλο εύρος παροχών (20 L/s, 25 L/s και 30 L/s).
- Η διαφορά του βάθους ροής από τα ανάντη στα κατάντη του μεσόβαθρου είναι σημαντική και μεγιστοποιείται για υπερκρίσιμη ροή ($Fr > 1$) στα κατάντη του μεσόβαθρου, επειδή στην υποκρίσιμη ροή οι τιμές της είναι κοντά στο μηδέν. Επίσης για μεγάλες γωνίες στροφής (30°, 40°) η διαφορά των βαθών ροής μεταβάλλεται γραμμικά συναρτήσει του Froude.
- Διαπιστώνεται γραμμική μεταβολή του αδιαστατοποιημένου μεγέθους της μεταβολής της ειδικής δύναμης F_M σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου. Στις μεγάλες γωνίες παρατηρείται η μεγαλύτερη μεταβολή στην ειδική δύναμη και κατ'επέκταση στη δύναμη αντίστασης του μεσοβάθρου γιατί προκαλείται το μεγαλύτερο μπλοκάρισμα της ροής. Όσο αυξάνεται το ύψος υπερχειλιστή τόσο μειώνεται ο αριθμός Froude της ροής, με αποτέλεσμα η μεταβολή της ειδικής δύναμης λόγω της γωνίας στροφής να είναι μικρότερη.

- Οι μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας περίπου 50% του y_c πραγματοποιούνται όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής και εμφανίζονται στις μεγάλες παροχές και τις μεγάλες γωνίες στροφής για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή. Επίσης η μεταβολή των απωλειών ενέργειας φαίνεται να έχει γραμμική εξάρτηση από τη γωνία στροφής του μεσόβαθρου, κάτι που είναι περισσότερο εμφανές για τις μικρότερες τιμές του αριθμού Froude της αδιατάρακτης ροής, δηλαδή όταν ο υπερχειλιστής τοποθετείται στα 6 cm και στα 9 cm.
- Παρατηρήσαμε ότι η ροή ήταν συμμετρική μεταβάλλοντας τη γωνία του μεσοβάθρου και προς τις δύο κατευθύνσεις.
- Ο αριθμός Froude Fr_3 στα κατάντη σαν συνάρτηση της γωνίας του μεσοβάθρου μεταβάλλεται εντονότερα στις χαμηλότερες παροχές δηλαδή έχει μεγαλύτερο εύρος τιμών, χωρίς την παρουσία υπερχειλιστή, απ' ό,τι στις μεγαλύτερες.
- Οι υπερυψώσεις που υπολογίστηκαν στην διώρυγα του εργαστηρίου είναι σχετικά κοντά στα αποτελέσματα που προκύπτουν με την εφαρμογή της σχέσης του Yarnell για παροχές μεγαλύτερες από 15 L/s και για αριθμό Froude περί το 0,50. Επί πλέον για εύρος τιμών του αριθμού Froude από 0,38 μέχρι 0,50 και για παροχές μεγαλύτερες των 15 L/s οι μετρήσεις δίνουν ελαφρά μεγαλύτερες τιμές από τη σχέση του Yarnell. Αντίθετα, για τις αντίστοιχες παροχές και ένα εύρος τιμών για τον αριθμό Froude από 0,6 μέχρι 0,7 η εξίσωση του Yarnell δίνει κοντινές αλλά μεγαλύτερες τιμές για την υπερύψωση από τις μετρημένες στο εργαστήριο.
- Τέλος διαπιστώθηκε πως οι παροχές περί τα 5 L/s μάλλον δεν είναι ακριβείς, επειδή από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των πειραματικών μετρήσεων, προέκυψαν μεγαλύτερες αποκλίσεις για τις παροχές αυτές.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Από την παρούσα διπλωματική εργασία εξήχθησαν τα συμπεράσματα που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Ωστόσο, για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων και της χρησιμότητάς τους προτείνονται σαν επέκταση της παρούσας εργασίας να γίνουν τα ακόλουθα:

- Συνθήκες λειτουργίας του μεσοβάθρου σε υπερκρίσιμη ροή με την τοποθέτηση ενός θυροφράγματος στα ανάντη αυτού. Έτσι είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε κάτω από ποιες συνθήκες το μεσόβαθρο δημιουργεί υδραυλικό άλμα σε συνάρτηση με τον αριθμό Froude και τη γωνία στροφής.

- Η χρήση μεσόβαθρων με διαφορετική γεωμετρία άκρων και ποικιλία στις διαστάσεις (μήκος προς πλάτος), θα παρείχε περισσότερη πληροφορία στον μελλοντικό μελετητή.
- Η χρήση σωλήνα Pitot για τη μέτρηση της ταχύτητας, θα είχε σαν αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη αξιοπιστία των μετρήσεων, ειδικότερα στον υπολογισμό της δύναμης αντίστασης.

Βιβλιογραφία

1. Νουτσόπουλος, Γ., Ν. Χριστοδούλου, 1996. *Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών*. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
2. Νουτσόπουλος, Γ., Ν. Χριστοδούλου, Τ. Παπαθανασιάδη, 2007. *Υδραυλική ανοιχτών αγωγών*. Εκδόσεις Φούντας, Αθήνα
3. Παπανικολάου Π., (2014) . *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*. Διδακτικές σημειώσεις: έκδοση 3, Εκδόσεις ΕΜΠ,
4. Aubuisson de Voissins, J. and Bennett, J. (1852). *A treatise on hydraulics*. Boston: Little, Brown, and Company, p.532.
5. Al-Nassri, S. (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.
6. Benn, J. R., P. Mantz, R. Lamb, J. Riddell, C. Nalluri, (2004). *Afflux at bridges and culverts*. Defra/Environmental Agency, UK.
7. Chadwick, A. and Morfett, J. (1998). *Hydraulics in civil and environmental engineering third edition*. London: E & FN Spon, p.510
8. Charbeneau, R. and Holley, E. (2001). *Backwater effects of bridge piers in subcritical flow*. Austin, TX: Center for Transportation Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin.
9. Cresy, E. (1865). *An encyclopaedia of civil engineering, historical, theoretical, and practical*. 1752 pp., illus. London.
10. Chow, VT, (1973). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, p.499-506.
11. Dubuat-Nancay, L. G. (1786). *Principes d’hydraulique, vérifiés par un grand nombre d’expériences faites par ordre du government*. NoUV. Cd.,rev. & considérablement augm. 2 v., illus. Paris.
12. 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.
13. Fenton, J. D. (2003). *The effects of obstacles on surface levels and boundary resistance in open channels*, Proc. 30th IAHR Congress, Thessaloniki, 25-29 August, J. Ganoulis & P. Prinos (eds), Vol. **C2**, pp. 9–16.

14. Fenton, J. D.(2008) Keynote Lecture, pp 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.
15. Henderson, F. M. (1966). *Open Channel Flow*, Macmillan, New York.
16. French, RH, (1985). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill.
17. Hsieh, T.(1964) Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 90, pp. 161-173.
18. Hunt, J. and Brunner, G. (1995). *Flow Transitions in Bridge Backwater Analysis*. *Journal of Hydraulic Engineering*, **42**(9), pp.1-22.
19. Kassem, L., (2009). *Backwater rise due to flow constriction by bridge piers*. 13th International Water Technology Conference, IWTC 13, Hurgada, Egypt.
20. Lane, E. W. (1920). *Experiments on the flow of water through contractions in an open channel*. Amer. Soc. Civ. Engin. Trans. (1919-20) 83: 1149-1219, illus.
21. Montes, S. (1998). *Hydraulics of open channel flow*. Reston, VA: ASCE Press.
22. Nagler, F. A. (1918): *Obstruction of Bridge Piers to the Flow of Water*, Transactions, American Society of Civil Engineers, v. **82**, pp. 334-395.
23. Ranga Raju, K., Rana, O., Asawa, G. and Pillai, A. (1983). *Rational assessment of blockage effect in channel flow past smooth circular cylinders*, J. Hydraulic Res. 21, 289-302.
24. Rehbock, T. (1921): *Zur Frage des Bruckenstanes, Zentrolblatt des Bauverwattung*, Berlin, Germany, vol. **2**, no. 13, pp. 341-347
25. Sethuraman, V., Vasudevan, O., (1971). *Transverse load coefficients for some bridge pier shapes*. Monash University, Melbourne, Australia
26. Skogerboe, G., Austin, L. and Chang, K. (1970). *Subcritical flow at open channel structures*. Logan: [s.n.].
27. Soliman, M.A. (1989) “*Design of irrigation structures and works*”, Al-Azhar University, Cairo, Egypt.
28. Sturm, T.W. (2001) *Open channel hydraulics*, McGraw Hill Inc., New York.
29. Weisbach, J. (1855). *Die Experimentalhydraulik*. Freiburg, Germany.
30. Weisbach, J.(1847-48). *Principles of the mechanics of machinery and engineering*. 2 v., illus. London. 1877. THEORETICAL MECHANICS. Traus. from ed. 4 by A. J. Dubois.New York.
31. Wood, A., Palmer, R. and Petroff, C. (1997). *An assessment of the zero-rise ordinance in King County*. [Olympia]: Washington State Dept. of Transportation.

32. Yarnell, D. (1934). *Pile trestles as channel obstructions*. Washington: U.S. Dept. of Agriculture.
33. Yarnell, D. (1934). *Bridge piers as channel obstructions*. Washington: U.S. Dept. of Agriculture.
34. <https://www.aegean.gr/gympeir/gefires.htm>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Q	: Παροχή
b	: Πλάτος διώρυγας
y_1	: Βάθος ροής ανάντη του μεσόβαθρου
y_3	: Βάθος ροής κατάντη του μεσόβαθρου
Fr_1	: Αριθμός Froude ανάντη του μεσόβαθρου
Fr_3	: Αριθμός Froude κατάντη του μεσόβαθρου
y_c	: Κρίσιμο βάθος
Δy	: Υπερύψωση
y	: Αδιατάρακτο βάθος
b_{min}	: Ελάχιστο πλάτος για να μην μπλοκάρεται η ροή
$b(\theta)$: Πλάτος που διέρχεται η ροή συναρτήσει της γωνίας στροφής του μεσόβαθρου
F_w	: Αριθμός Froude για αδιατάρακτη ροή
Re_w	: Αριθμός Reynolds για αδιατάρακτη ροή
Re_1	: Αριθμός Reynolds ανάντη του μεσόβαθρου
Δy	: Υπερύψωση ελεύθερης επιφάνειας λόγω μεσόβαθρου
F_M	: Ειδική δύναμη
M_w	: Ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή
C_D	: Συντελεστής αντίστασης
Δh	: Διαφορά βάθους ροής από τα ανάντη στα κατάντη
ΔH	: Απώλειες ενέργειας
θ	: Γωνία στροφής μεσόβαθρου

5.1 Χωρίς Υπερχειλιστή

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	4,71	25,30	4,65	0,59	4,30	0,67	3,28	0,77	3,96	49451,28	21,60	23,12	0,75	51496
10	4,71	25,30	4,87	0,55	4,05	0,73	3,28	0,99	3,96	48830,32	20,75	21,59	0,75	51496
20	4,71	25,30	5,19	0,50	3,00	1,14	3,28	1,31	3,96	47954,44	19,53	20,10	0,75	51496
30	4,71	25,30	5,63	0,44	2,42	1,58	3,28	1,75	3,96	46800,17	17,94	18,71	0,75	51496
40	4,71	25,30	5,99	0,41	2,29	1,71	3,28	2,11	3,96	45896,31	16,73	17,45	0,75	51496
-10	4,71	25,30	4,85	0,56	4,21	0,69	3,28	0,97	3,96	48886,12	20,83	21,59	0,75	51496
-20	4,71	25,30	5,21	0,50	2,87	1,22	3,28	1,33	3,96	47900,74	19,46	20,10	0,75	51496
-30	4,71	25,30	5,63	0,44	2,41	1,59	3,28	1,75	3,96	46800,17	17,94	18,71	0,75	51496
-40	4,71	25,30	6,00	0,40	2,24	1,77	3,28	2,12	3,96	45871,70	16,69	17,45	0,75	51496

5.2 Υπερχειλιστής 3 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	4,71	25,30	6,89	0,33	6,90	0,33	3,28	0,03	6,88	43782,35	14,10	23,12	0,33	43807
10	4,71	25,30	6,94	0,32	6,93	0,33	3,28	0,07	6,88	43670,60	13,98	21,59	0,33	43807
20	4,71	25,30	6,98	0,32	6,97	0,32	3,28	0,16	6,88	43581,62	13,87	20,10	0,33	43807
30	4,71	25,30	7,11	0,31	6,99	0,32	3,28	0,29	6,88	43294,90	13,55	18,71	0,33	43807
40	4,71	25,30	7,24	0,30	6,98	0,32	3,28	0,42	6,88	43011,92	13,23	17,45	0,33	43807
-10	4,71	25,30	6,93	0,33	6,93	0,33	3,28	0,06	6,88	43692,91	14,00	21,59	0,33	43807
-20	4,71	25,30	6,95	0,32	6,97	0,32	3,28	0,09	6,88	43648,32	13,95	20,10	0,33	43807
-30	4,71	25,30	7,13	0,31	7,00	0,32	3,28	0,31	6,88	43251,12	13,50	18,71	0,33	43807
-40	4,71	25,30	7,30	0,30	7,00	0,32	3,28	0,48	6,88	42882,56	13,09	17,45	0,33	43807

5.3 Υπερχειλιστής 6 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	4,71	25,30	10,06	0,19	10,11	0,18	3,28	0,07	10,05	37670,94	8,43	23,12	0,19	37696
10	4,71	25,30	10,11	0,18	10,12	0,18	3,28	0,05	10,05	37588,19	8,37	21,59	0,19	37696
20	4,71	25,30	10,12	0,18	10,14	0,18	3,28	0,09	10,05	37571,68	8,36	20,10	0,19	37696
30	4,71	25,30	10,13	0,18	10,15	0,18	3,28	0,15	10,05	37555,19	8,35	18,71	0,19	37696
40	4,71	25,30	10,23	0,18	10,19	0,18	3,28	0,25	10,05	37391,05	8,23	17,45	0,19	37696
-10	4,71	25,30	10,11	0,18	10,19	0,18	3,28	0,09	10,05	37588,19	8,37	21,59	0,19	37696
-20	4,71	25,30	10,11	0,18	10,12	0,18	3,28	0,13	10,05	37588,19	8,37	20,10	0,19	37696
-30	4,71	25,30	10,19	0,18	10,17	0,18	3,28	0,18	10,05	37456,53	8,28	18,71	0,19	37696
-40	4,71	25,30	10,23	0,18	10,14	0,18	3,28	0,25	10,05	37391,05	8,23	17,45	0,19	37696

5.4 Υπερχειλιστής 9 cm

θ	Q L/s	b cm	γ_1 cm	Fr ₁	γ_3 cm	Fr ₃	γ_c cm	$\Delta\gamma$ cm	γ cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	4,71	25,30	13,12	0,12	13,16	0,12	3,28	-0,09	13,00	33197,79	5,74	23,12	0,13	33355
10	4,71	25,30	13,15	0,12	13,18	0,12	3,28	-0,04	13,00	33159,19	5,72	21,59	0,13	33355
20	4,71	25,30	13,17	0,12	13,18	0,12	3,28	-0,02	13,00	33133,51	5,71	20,10	0,13	33355
30	4,71	25,30	13,19	0,12	13,18	0,12	3,28	0,01	13,00	33107,86	5,70	18,71	0,13	33355
40	4,71	25,30	13,23	0,12	13,22	0,12	3,28	0,06	13,00	33056,69	5,67	17,45	0,13	33355
-10	4,71	25,30	13,12	0,12	13,17	0,12	3,28	-0,05	13,00	33197,79	5,74	21,59	0,13	33355
-20	4,71	25,30	13,14	0,12	13,18	0,12	3,28	-0,03	13,00	33172,05	5,73	20,10	0,13	33355
-30	4,71	25,30	13,19	0,12	13,20	0,12	3,28	0,00	13,00	33107,86	5,70	18,71	0,13	33355
-40	4,71	25,30	13,23	0,12	13,22	0,12	3,28	0,05	13,00	33056,69	5,67	17,45	0,13	33355

10.1 Χωρίς Υπερχειλιστή

θ	Q L/s	b cm	γ_1 cm	Fr ₁	γ_3 cm	Fr ₃	γ_c cm	$\Delta\gamma$ cm	γ cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	10,52	25,30	7,54	0,64	5,40	1,06	5,61	1,20	6,36	94748,49	22,52	23,12	0,83	100632
10	10,52	25,30	7,84	0,60	4,70	1,30	5,61	1,50	6,36	93361,25	21,85	21,59	0,83	100632
20	10,52	25,30	8,59	0,53	4,64	1,33	5,61	2,25	6,36	90064,60	20,16	20,10	0,83	100632
30	10,52	25,30	9,13	0,48	4,56	1,36	5,61	2,79	6,36	87831,59	18,98	18,71	0,83	100632
40	10,52	25,30	9,82	0,43	4,29	1,49	5,61	3,48	6,36	85134,49	17,55	17,45	0,83	100632
-10	10,52	25,30	7,85	0,60	4,63	1,33	5,61	1,51	6,36	93315,71	21,83	21,59	0,83	100632
-20	10,52	25,30	8,48	0,54	4,56	1,36	5,61	2,14	6,36	90533,46	20,41	20,10	0,83	100632
-30	10,52	25,30	9,17	0,48	4,45	1,41	5,61	2,83	6,36	87670,58	18,89	18,71	0,83	100632
-40	10,52	25,30	9,97	0,42	4,30	1,49	5,61	3,63	6,36	84569,94	17,25	17,45	0,83	100632

10.2 Υπερχειλιστής 3 cm

θ	Q L/s	b cm	γ_1 cm	Fr ₁	γ_3 cm	Fr ₃	γ_c cm	$\Delta\gamma$ cm	γ cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	10,52	25,30	9,69	0,44	9,72	0,44	5,61	0,57	9,17	85629,91	17,81	23,12	0,48	87660
10	10,52	25,30	9,73	0,44	9,51	0,45	5,61	0,64	9,17	85476,86	17,73	21,59	0,48	87660
20	10,52	25,30	10,00	0,42	9,50	0,45	5,61	0,91	9,17	84457,93	17,19	20,10	0,48	87660
30	10,52	25,30	10,40	0,40	9,43	0,46	5,61	1,31	9,17	82992,28	16,43	18,71	0,48	87660
40	10,52	25,30	10,77	0,38	9,43	0,46	5,61	1,68	9,17	81681,13	15,76	17,45	0,48	87660
-10	10,52	25,30	9,78	0,43	9,51	0,45	5,61	0,69	9,17	85286,32	17,63	21,59	0,48	87660
-20	10,52	25,30	10,12	0,41	9,50	0,45	5,61	1,03	9,17	84012,83	16,96	20,10	0,48	87660
-30	10,52	25,30	10,48	0,39	9,42	0,46	5,61	1,39	9,17	82705,24	16,28	18,71	0,48	87660
-40	10,52	25,30	10,80	0,37	9,41	0,46	5,61	1,71	9,17	81576,64	15,71	17,45	0,48	87660

10.3 Υπερχειλιστής 6 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	10,52	25,30	13,12	0,28	13,02	0,28	5,61	0,49	12,69	74232,52	12,26	23,12	0,29	75487
10	10,52	25,30	13,14	0,28	13,00	0,28	5,61	0,51	12,69	74174,96	12,24	21,59	0,29	75487
20	10,52	25,30	13,24	0,28	13,00	0,28	5,61	0,61	12,69	73888,46	12,11	20,10	0,29	75487
30	10,52	25,30	13,38	0,27	12,99	0,28	5,61	0,75	12,69	73491,05	11,94	18,71	0,29	75487
40	10,52	25,30	13,58	0,27	12,98	0,28	5,61	0,95	12,69	72930,69	11,71	17,45	0,29	75487
-10	10,52	25,30	13,15	0,28	13,04	0,28	5,61	0,52	12,69	74146,21	12,22	21,59	0,29	75487
-20	10,52	25,30	13,27	0,27	13,03	0,28	5,61	0,64	12,69	73802,94	12,08	20,10	0,29	75487
-30	10,52	25,30	13,43	0,27	13,00	0,28	5,61	0,80	12,69	73350,16	11,88	18,71	0,29	75487
-40	10,52	25,30	13,63	0,26	12,97	0,28	5,61	1,00	12,69	72791,94	11,65	17,45	0,29	75487

10.4 Υπερχειλιστής 9 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	10,52	25,30	16,27	0,20	16,23	0,20	5,61	0,43	15,82	66147,03	9,12	23,12	0,21	67189
10	10,52	25,30	16,33	0,20	16,20	0,20	5,61	0,49	15,82	66010,08	9,07	21,59	0,21	67189
20	10,52	25,30	16,37	0,20	16,19	0,20	5,61	0,53	15,82	65919,09	9,04	20,10	0,21	67189
30	10,52	25,30	16,49	0,20	16,22	0,20	5,61	0,65	15,82	65647,64	8,95	18,71	0,21	67189
40	10,52	25,30	16,59	0,20	16,20	0,20	5,61	0,75	15,82	65423,12	8,87	17,45	0,21	67189
-10	10,52	25,30	16,30	0,20	16,24	0,20	5,61	0,46	15,82	66078,48	9,10	21,59	0,21	67189
-20	10,52	25,30	16,34	0,20	16,18	0,20	5,61	0,50	15,82	65987,31	9,07	20,10	0,21	67189
-30	10,52	25,30	16,45	0,20	16,18	0,20	5,61	0,61	15,82	65737,87	8,98	18,71	0,21	67189
-40	10,52	25,30	16,58	0,20	16,23	0,20	5,61	0,74	15,82	65445,50	8,88	17,45	0,21	67189

15.1 Χωρίς Υπερχειλιστή

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	14,63	25,30	9,00	0,68	6,74	1,06	6,99	1,09	7,90	122858,19	23,19	23,12	0,83	129459
10	14,63	25,30	9,71	0,61	5,89	1,29	6,99	1,80	7,90	118957,06	21,95	21,59	0,83	129459
20	14,63	25,30	10,50	0,54	5,63	1,38	6,99	2,59	7,90	114897,61	20,52	20,10	0,83	129459
30	14,63	25,30	11,13	0,50	5,83	1,31	6,99	3,22	7,90	111853,65	19,40	18,71	0,83	129459
40	14,63	25,30	11,99	0,44	5,78	1,33	6,99	4,08	7,90	107949,67	17,94	17,45	0,83	129459
-10	14,63	25,30	9,620	0,62	5,92	1,28	6,99	1,71	7,90	119437,80	22,11	21,59	0,83	129459
-20	14,63	25,30	10,43	0,55	5,60	1,39	6,99	2,52	7,90	115246,09	20,65	20,10	0,83	129459
-30	14,63	25,30	11,45	0,48	5,72	1,35	6,99	3,54	7,90	110368,46	18,85	18,71	0,83	129459
-40	14,63	25,30	12,03	0,44	5,88	1,29	6,99	4,12	7,90	107774,71	17,88	17,45	0,83	129459

15.2 Υπερχειλιστής 3 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	14,63	25,30	11,03	0,50	10,92	0,51	6,99	0,50	10,63	112326,00	19,58	23,12	0,53	114279
10	14,63	25,30	11,19	0,49	11,11	0,50	6,99	0,66	10,63	111572,14	19,30	21,59	0,53	114279
20	14,63	25,30	11,62	0,47	11,05	0,50	6,99	1,09	10,63	109595,38	18,56	20,10	0,53	114279
30	14,63	25,30	12,23	0,43	10,94	0,51	6,99	1,70	10,63	106908,35	17,55	18,71	0,53	114279
40	14,63	25,30	12,72	0,41	10,88	0,51	6,99	2,19	10,63	104843,51	16,79	17,45	0,53	114279
-10	14,63	25,30	11,17	0,49	10,95	0,51	6,99	0,64	10,63	111665,82	19,33	21,59	0,53	114279
-20	14,63	25,30	11,58	0,47	10,92	0,51	6,99	1,05	10,63	109776,30	18,63	20,10	0,53	114279
-30	14,63	25,30	12,26	0,43	10,90	0,51	6,99	1,73	10,63	106779,60	17,51	18,71	0,53	114279
-40	14,63	25,30	12,73	0,41	10,82	0,52	6,99	2,20	10,63	104802,20	16,77	17,45	0,53	114279

15.3 Υπερχειλιστής 6 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	14,63	25,30	14,65	0,33	14,64	0,33	6,99	0,36	14,34	97431,49	14,14	23,12	0,34	98550
10	14,63	25,30	14,69	0,33	14,64	0,33	6,99	0,41	14,34	97288,95	14,09	21,59	0,34	98550
20	14,63	25,30	14,85	0,32	14,71	0,33	6,99	0,57	14,34	96722,90	13,90	20,10	0,34	98550
30	14,63	25,30	15,13	0,31	14,77	0,33	6,99	0,85	14,34	95748,01	13,57	18,71	0,34	98550
40	14,63	25,30	15,44	0,30	14,74	0,33	6,99	1,16	14,34	94691,34	13,22	17,45	0,34	98550
-10	14,63	25,30	14,70	0,33	14,63	0,33	6,99	0,42	14,34	97253,37	14,08	21,59	0,34	98550
-20	14,63	25,30	14,97	0,32	14,75	0,33	6,99	0,69	14,34	96302,67	13,75	20,10	0,34	98550
-30	14,63	25,30	15,17	0,31	14,69	0,33	6,99	0,89	14,34	95610,34	13,52	18,71	0,34	98550
-40	14,63	25,30	15,47	0,30	14,71	0,33	6,99	1,19	14,34	94590,32	13,18	17,45	0,34	98550

15.4 Υπερχειλιστής 9 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	14,63	25,30	17,99	0,24	18,03	0,24	6,99	0,39	17,59	86810,70	10,77	23,12	0,25	87959
10	14,63	25,30	18,02	0,24	18,06	0,24	6,99	0,45	17,59	86725,78	10,74	21,59	0,25	87959
20	14,63	25,30	18,13	0,24	18,08	0,24	6,99	0,58	17,59	86415,85	10,66	20,10	0,25	87959
30	14,63	25,30	18,27	0,24	18,10	0,24	6,99	0,72	17,59	86024,57	10,54	18,71	0,25	87959
40	14,63	25,30	18,43	0,23	18,08	0,24	6,99	0,88	17,59	85581,72	10,42	17,45	0,25	87959
-10	14,63	25,30	18,02	0,24	18,06	0,24	6,99	0,47	17,59	86725,78	10,74	21,59	0,25	87959
-20	14,63	25,30	18,11	0,24	18,08	0,24	6,99	0,56	17,59	86472,03	10,67	20,10	0,25	87959
-30	14,63	25,30	18,27	0,24	18,09	0,24	6,99	0,72	17,59	86024,57	10,54	18,71	0,25	87959
-40	14,63	25,30	18,50	0,23	18,07	0,24	6,99	0,95	17,59	85389,40	10,36	17,45	0,25	87959

20.1 Χωρίς Υπερχειλιστή

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	19,777147	25,3	10,87	0,6964	7,17	1,3	8,54029	1,18	9,64	152884,56	23,37	23,12	0,83	161326
10	19,777147	25,3	11,16	0,6694	6,98	1,3534	8,54029	1,47	9,64	151022,46	22,98	21,59	0,83	161326
20	19,777147	25,3	12,24	0,5828	7,16	1,3027	8,54029	2,55	9,64	144469,46	21,41	20,10	0,83	161326
30	19,777147	25,3	13,34	0,5122	7,12	1,3137	8,54029	3,65	9,64	138354,94	19,79	18,71	0,83	161326
40	19,777147	25,3	14,20	0,4664	7,22	1,2865	8,54029	4,51	9,64	133923,46	18,57	17,45	0,83	161326
-10	19,777147	25,3	11,27	0,6597	7,10	1,3192	8,54029	1,58	9,64	150327,96	22,82	21,59	0,83	161326
-20	19,777147	25,3	12,43	0,5695	7,19	1,2945	8,54029	2,74	9,64	143374,99	21,13	20,10	0,83	161326
-30	19,777147	25,3	13,39	0,5094	7,23	1,2838	8,54029	3,70	9,64	138089,28	19,72	18,71	0,83	161326
-40	19,777147	25,3	14,39	0,4572	7,34	1,2551	8,54029	4,70	9,64	132982,43	18,31	17,45	0,83	161326

20.2 Υπερχειλιστής 3 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	19,777147	25,3	12,29	0,5793	12,34	0,5758	8,54029	0,12	12,25	144179,82	21,34	23,12	0,58	144411
10	19,777147	25,3	12,64	0,5554	11,8	0,6157	8,54029	0,49	12,25	142184,45	20,82	21,59	0,58	144411
20	19,777147	25,3	13,27	0,5163	11,65	0,6277	8,54029	1,12	12,25	138728,58	19,89	20,10	0,58	144411
30	19,777147	25,3	13,93	0,48	12,23	0,5835	8,54029	1,78	12,25	135283,85	18,95	18,71	0,58	144411
40	19,777147	25,3	14,63	0,446	12,1	0,593	8,54029	2,48	12,25	131812,49	17,98	17,45	0,58	144411
-10	19,777147	25,3	12,63	0,556	12,02	0,5989	8,54029	0,48	12,25	142240,70	20,83	21,59	0,58	144411
-20	19,777147	25,3	13,35	0,5117	11,79	0,6165	8,54029	1,20	12,25	138301,72	19,77	20,10	0,58	144411
-30	19,777147	25,3	13,94	0,4795	11,92	0,6064	8,54029	1,79	12,25	135232,98	18,93	18,71	0,58	144411
-40	19,777147	25,3	14,68	0,4437	12,2	0,5857	8,54029	2,53	12,25	131571,34	17,91	17,45	0,58	144411

20.3 Υπερχειλιστής 6 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	$b(\theta)$ cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	19,777147	25,3	16,35	0,3775	16,41	0,3754	8,54029	0,19	16,15	123994,65	15,83	23,12	0,38	124868
10	19,777147	25,3	16,43	0,3748	16,23	0,3817	8,54029	0,35	16,15	123653,54	15,73	21,59	0,38	124868
20	19,777147	25,3	16,69	0,366	16,25	0,381	8,54029	0,61	16,15	122557,76	15,44	20,10	0,38	124868
30	19,777147	25,3	16,99	0,3564	16,3	0,3793	8,54029	0,91	16,15	121317,30	15,10	18,71	0,38	124868
40	19,777147	25,3	17,38	0,3445	16,44	0,3744	8,54029	1,30	16,15	119741,75	14,68	17,45	0,38	124868
-10	19,777147	25,3	16,42	0,3751	16,24	0,3814	8,54029	0,34	16,15	123696,07	15,74	21,59	0,38	124868
-20	19,777147	25,3	16,67	0,3667	16,35	0,3775	8,54029	0,59	16,15	122641,37	15,46	20,10	0,38	124868
-30	19,777147	25,3	17,07	0,3539	16,3	0,3793	8,54029	0,99	16,15	120990,74	15,02	18,71	0,38	124868
-40	19,777147	25,3	17,43	0,343	16,72	0,3651	8,54029	1,35	16,15	119542,71	14,63	17,45	0,38	124868

20.4 Υπερχειλιστής 9 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	b(θ) cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	19,777147	25,3	19,69	0,2857	19,78	0,2837	8,54029	0,14	19,54	111188,77	12,50	23,12	0,29	111698
10	19,777147	25,3	19,69	0,2857	19,69	0,2857	8,54029	0,23	19,54	111188,77	12,50	21,59	0,29	111698
20	19,777147	25,3	19,84	0,2824	19,75	0,2844	8,54029	0,38	19,54	110675,43	12,38	20,10	0,29	111698
30	19,777147	25,3	20,08	0,2774	19,61	0,2874	8,54029	0,62	19,54	109863,88	12,18	18,71	0,29	111698
40	19,777147	25,3	20,35	0,2719	19,70	0,2854	8,54029	0,89	19,54	108964,99	11,97	17,45	0,29	111698
-10	19,777147	25,3	19,71	0,2852	19,67	0,2861	8,54029	0,25	19,54	111120,05	12,49	21,59	0,29	111698
-20	19,777147	25,3	19,86	0,282	19,70	0,2854	8,54029	0,40	19,54	110607,35	12,36	20,10	0,29	111698
-30	19,777147	25,3	20,02	0,2786	19,65	0,2865	8,54029	0,56	19,54	110065,65	12,23	18,71	0,29	111698
-40	19,777147	25,3	20,36	0,2717	19,66	0,2863	8,54029	0,90	19,54	108931,98	11,96	17,45	0,29	111698

25.1 Χωρίς Υπερχειλιστή

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	b(θ) cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	25,045814	25,3	12,47	0,7178	8,57	1,2598	9,99663	1,18	11,21	181281,23	23,66	23,12	0,84	190826
10	25,045814	25,3	13,23	0,6568	8,80	1,2108	9,99663	1,94	11,21	175957,67	22,77	21,59	0,84	190826
20	25,045814	25,3	14,06	0,5995	8,70	1,2317	9,99663	2,77	11,21	170489,87	21,75	20,10	0,84	190826
30	25,045814	25,3	15,50	0,5179	8,71	1,2296	9,99663	4,21	11,21	161768,54	19,93	18,71	0,84	190826
40	25,045814	25,3	16,75	0,4611	8,60	1,2532	9,99663	5,46	11,21	154890,63	18,42	17,45	0,84	190826
-10	25,045814	25,3	13,07	0,6689	8,90	1,1904	9,99663	1,78	11,21	177052,27	22,97	21,59	0,84	190826
-20	25,045814	25,3	13,98	0,6047	8,73	1,2253	9,99663	2,69	11,21	171002,04	21,85	20,10	0,84	190826
-30	25,045814	25,3	15,73	0,5066	8,58	1,2576	9,99663	4,44	11,21	160457,52	19,65	18,71	0,84	190826
-40	25,045814	25,3	16,72	0,4623	8,69	1,2338	9,99663	5,43	11,21	155048,84	18,45	17,45	0,84	190826

25.2 Υπερχειλιστής 3 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr_1	y_3 cm	Fr_3	y_c cm	Δy cm	y cm	Re_1	b_{min} cm	b(θ) cm	Fr_w (Υπολογ.)	Re_w (Υπολογ.)
0	25,045814	25,3	14,08	0,5982	13,03	0,672	9,99663	0,48	13,69	170362,31	21,72	23,12	0,62	172900
10	25,045814	25,3	14,14	0,5944	13,46	0,64	9,99663	0,54	13,69	169980,76	21,65	21,59	0,62	172900
20	25,045814	25,3	15,24	0,5313	14,25	0,5876	9,99663	1,64	13,69	163276,60	20,26	20,10	0,62	172900
30	25,045814	25,3	15,81	0,5028	15,16	0,5355	9,99663	2,21	13,69	160006,48	19,55	18,71	0,62	172900
40	25,045814	25,3	16,83	0,4578	12,50	0,7152	9,99663	3,23	13,69	154470,30	18,32	17,45	0,62	172900
-10	25,045814	25,3	14,03	0,6014	13,50	0,6372	9,99663	0,43	13,69	170681,58	21,78	21,59	0,62	172900
-20	25,045814	25,3	15,38	0,524	14,25	0,5876	9,99663	1,78	13,69	162461,09	20,08	20,10	0,62	172900
-30	25,045814	25,3	16,55	0,4694	15,20	0,5334	9,99663	2,95	13,69	155951,52	18,65	18,71	0,62	172900
-40	25,045814	25,3	16,86	0,4566	12,45	0,7195	9,99663	3,26	13,69	154313,26	18,29	17,45	0,62	172900

25.3 Υπερχειλιστής 6 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	25,045814	25,3	17,94	0,416	17,75	0,4227	9,99663	0,32	17,70	148865,13	17,07	23,12	0,42	150049
10	25,045814	25,3	17,98	0,4146	17,74	0,423	9,99663	0,36	17,70	148670,73	17,03	21,59	0,42	150049
20	25,045814	25,3	18,47	0,3982	18,00	0,4139	9,99663	0,85	17,70	146329,83	16,51	20,10	0,42	150049
30	25,045814	25,3	18,94	0,3835	17,96	0,4153	9,99663	1,32	17,70	144152,72	16,02	18,71	0,42	150049
40	25,045814	25,3	19,43	0,369	17,80	0,4209	9,99663	1,81	17,70	141950,89	15,54	17,45	0,42	150049
-10	25,045814	25,3	18,07	0,4115	17,95	0,4156	9,99663	0,45	17,70	148235,17	16,93	21,59	0,42	150049
-20	25,045814	25,3	18,48	0,3979	18,02	0,4132	9,99663	0,86	17,70	146282,83	16,50	20,10	0,42	150049
-30	25,045814	25,3	19,03	0,3807	18,01	0,4135	9,99663	1,41	17,70	143743,20	15,93	18,71	0,42	150049
-40	25,045814	25,3	19,52	0,3665	17,88	0,4181	9,99663	1,90	17,70	141553,76	15,45	17,45	0,42	150049

25.4 Υπερχειλιστής 9 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	25,045814	25,3	21,47	0,3177	21,52	0,3166	9,99663	0,27	21,24	133463,79	13,72	23,12	0,32	134381
10	25,045814	25,3	21,53	0,3164	21,41	0,319	9,99663	0,37	21,24	133229,50	13,67	21,59	0,32	134381
20	25,045814	25,3	21,76	0,3114	21,51	0,3168	9,99663	0,60	21,24	132338,98	13,48	20,10	0,32	134381
30	25,045814	25,3	22,05	0,3053	21,54	0,3162	9,99663	0,89	21,24	131232,98	13,25	18,71	0,32	134381
40	25,045814	25,3	22,49	0,2963	21,51	0,3168	9,99663	1,33	21,24	129589,77	12,91	17,45	0,32	134381
-10	25,045814	25,3	21,53	0,3164	21,45	0,3182	9,99663	0,37	21,24	133229,50	13,67	21,59	0,32	134381
-20	25,045814	25,3	21,85	0,3095	21,47	0,3177	9,99663	0,69	21,24	131993,75	13,41	20,10	0,32	134381
-30	25,045814	25,3	22,14	0,3034	21,47	0,3177	9,99663	0,98	21,24	130893,49	13,18	18,71	0,32	134381
-40	25,045814	25,3	22,43	0,2975	21,50	0,317	9,99663	1,27	21,24	129811,42	12,96	17,45	0,32	134381

30.1 Χωρίς Υπερχειλιστή

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	29,8826	25,3	13,98	0,7214	10,01	1,1907	11,2454	1,42	12,47	204025,54	23,70	23,12	0,86	216276
10	29,8826	25,3	14,23	0,7025	10,04	1,1854	11,2454	1,67	12,47	202127,98	23,46	21,59	0,86	216276
20	29,8826	25,3	16,23	0,5767	9,76	1,2368	11,2454	3,67	12,47	188130,19	21,28	20,10	0,86	216276
30	29,8826	25,3	17,27	0,5254	9,75	1,2387	11,2454	4,71	12,47	181590,91	20,12	18,71	0,86	216276
40	29,8826	25,3	18,54	0,4724	9,70	1,2483	11,2454	5,98	12,47	174196,86	18,73	17,45	0,86	216276
-10	29,8826	25,3	14,35	0,6937	10,1	1,1748	11,2454	1,79	12,47	201229,63	23,33	21,59	0,86	216276
-20	29,8826	25,3	16,15	0,581	9,79	1,2311	11,2454	3,59	12,47	188652,78	21,37	20,10	0,86	216276
-30	29,8826	25,3	17,47	0,5164	9,64	1,2599	11,2454	4,91	12,47	180385,13	19,89	18,71	0,86	216276
-40	29,8826	25,3	19,47	0,4389	9,55	1,2778	11,2454	6,91	12,47	169153,18	17,77	17,45	0,86	216276

30.2 Υπερχειλιστής 3 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	29,8826	25,3	14,99	0,6498	15,97	0,5909	11,2454	0,18	14,81	196570,19	22,66	23,12	0,66	197883
10	29,8826	25,3	15,59	0,6126	16,04	0,587	11,2454	0,78	14,81	192393,77	22,00	21,59	0,66	197883
20	29,8826	25,3	16,13	0,5821	16,05	0,5865	11,2454	1,38	14,81	188783,88	21,39	20,10	0,66	197883
30	29,8826	25,3	17,55	0,5129	13,50	0,7603	11,2454	2,80	14,81	179907,28	19,81	18,71	0,66	197883
40	29,8826	25,3	18,30	0,4817	9,80	1,2292	11,2454	3,55	14,81	175547,66	18,99	17,45	0,66	197883
-10	29,8826	25,3	15,58	0,6132	16,10	0,5837	11,2454	0,80	14,81	192461,92	22,01	21,59	0,66	197883
-20	29,8826	25,3	16,46	0,5647	16,45	0,5652	11,2454	1,71	14,81	186643,77	21,02	20,10	0,66	197883
-30	29,8826	25,3	17,58	0,5116	13,52	0,7586	11,2454	2,83	14,81	179728,75	19,77	18,71	0,66	197883
-40	29,8826	25,3	18,29	0,4821	9,52	1,2838	11,2454	3,54	14,81	175604,40	19,00	17,45	0,66	197883

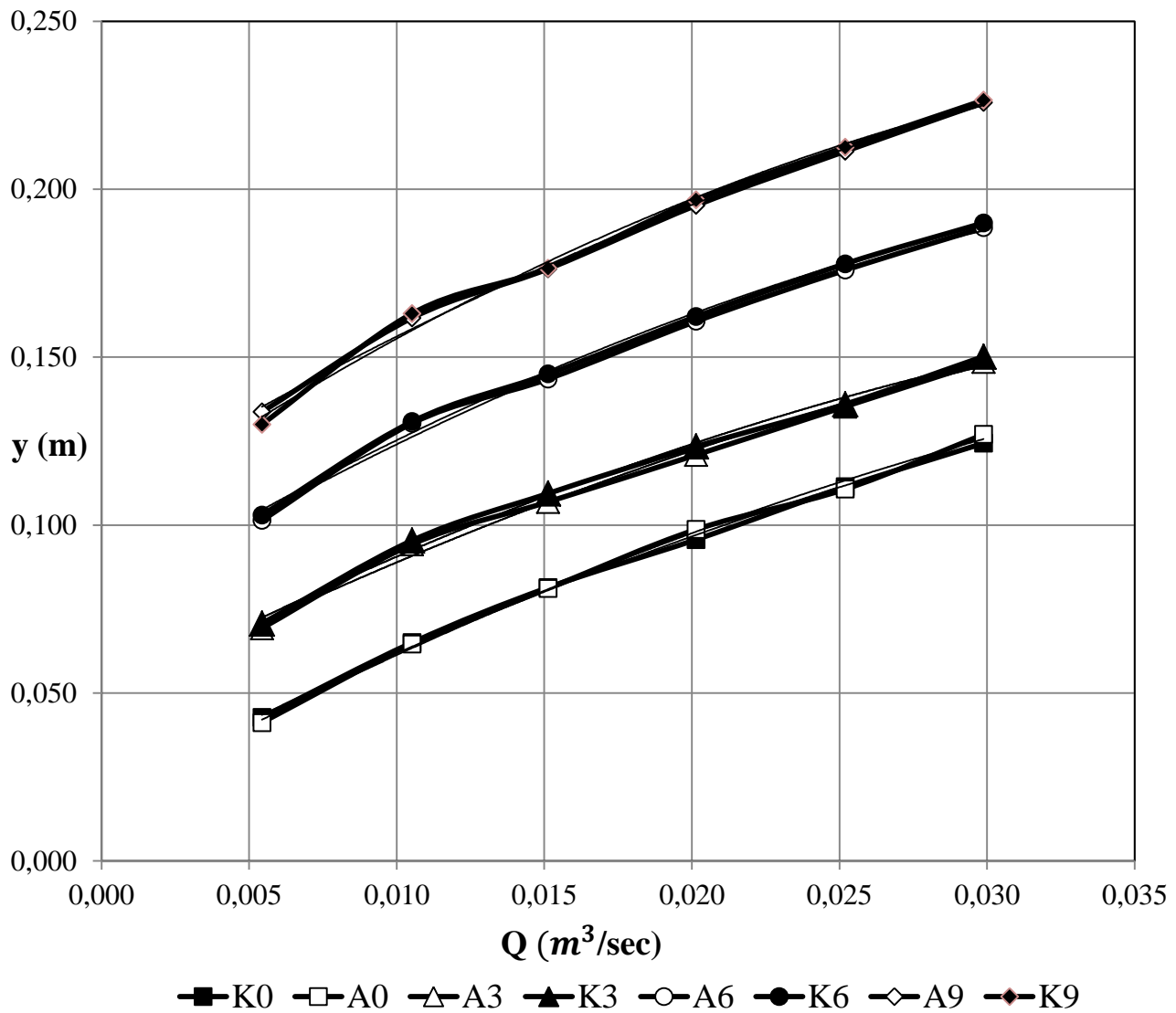
30.3 Υπερχειλιστής 6 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	29,8826	25,3	19,3	0,4448	19,26	0,4461	11,2454	0,53	18,86	170053,21	17,95	23,12	0,46	172441
10	29,8826	25,3	19,59	0,4349	19,13	0,4507	11,2454	0,82	18,86	168523,57	17,65	21,59	0,46	172441
20	29,8826	25,3	19,87	0,4258	19,18	0,4489	11,2454	1,10	18,86	167072,57	17,37	20,10	0,46	172441
30	29,8826	25,3	20,5	0,4063	19,23	0,4472	11,2454	1,73	18,86	163897,44	16,77	18,71	0,46	172441
40	29,8826	25,3	21,18	0,3869	18,99	0,4557	11,2454	2,41	18,86	160603,02	16,14	17,45	0,46	172441
-10	29,8826	25,3	19,46	0,4393	19,17	0,4493	11,2454	0,69	18,86	169205,85	17,78	21,59	0,46	172441
-20	29,8826	25,3	19,88	0,4254	19,27	0,4458	11,2454	1,11	18,86	167021,21	17,36	20,10	0,46	172441
-30	29,8826	25,3	20,68	0,401	19,20	0,4482	11,2454	1,91	18,86	163012,30	16,60	18,71	0,46	172441
-40	29,8826	25,3	21,17	0,3872	19,00	0,4553	11,2454	2,40	18,86	160650,50	16,15	17,45	0,46	172441

30.4 Υπερχειλιστής 9 cm

θ	Q L/s	b cm	y_1 cm	Fr ₁	y_3 cm	Fr ₃	y_c cm	Δy cm	y cm	Re ₁	b _{min} cm	b(θ) cm	Fr _w (Υπολογ.)	Re _w (Υπολογ.)
0	29,8826	25,3	22,68	0,3491	22,6	0,351	11,2454	0,18	22,52	153784,32	14,85	23,12	0,35	154475
10	29,8826	25,3	22,88	0,3446	22,7	0,3487	11,2454	0,38	22,52	152918,66	14,69	21,59	0,35	154475
20	29,8826	25,3	23,23	0,3368	22,81	0,3462	11,2454	0,73	22,52	151426,98	14,41	20,10	0,35	154475
30	29,8826	25,3	23,63	0,3283	22,89	0,3443	11,2454	1,13	22,52	149757,44	14,10	18,71	0,35	154475
40	29,8826	25,3	24,13	0,3181	22,79	0,3466	11,2454	1,63	22,52	147721,59	13,73	17,45	0,35	154475
-10	29,8826	25,3	22,93	0,3434	22,74	0,3478	11,2454	0,43	22,52	152703,77	14,65	21,59	0,35	154475
-20	29,8826	25,3	23,26	0,3362	22,80	0,3464	11,2454	0,76	22,52	151300,47	14,39	20,10	0,35	154475
-30	29,8826	25,3	23,61	0,3287	22,90	0,3441	11,2454	1,11	22,52	149840,04	14,12	18,71	0,35	154475
-40	29,8826	25,3	24,15	0,3178	22,83	0,3457	11,2454	1,65	22,52	147641,30	13,72	17,45	0,35	154475

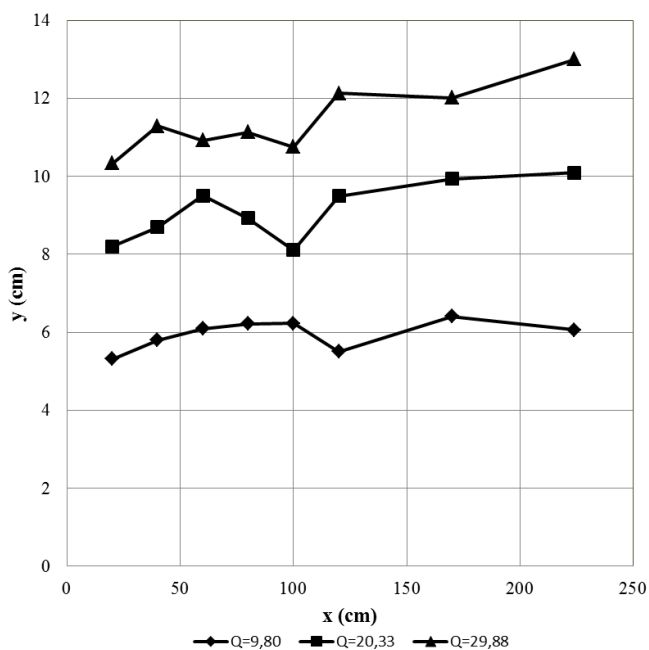
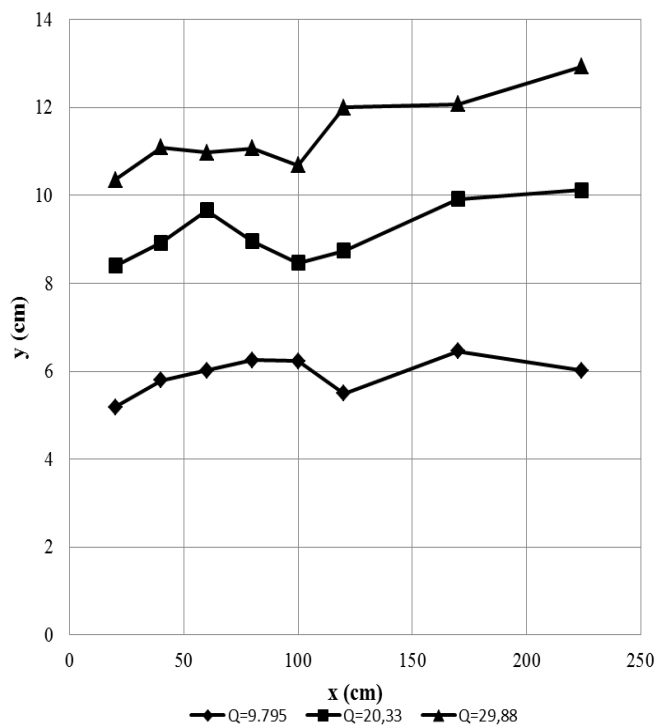
Q L/s	5,43		10,52		15,13		20,15		25,19		29,88	
	Y_{1w}	Y_{3w}	Y_{1w}	Y_{3w}	Y_{1w}	Y_{3w}	Y_{1w}	Y_{3w}	Y_{1w}	Y_{3w}	Y_{1w}	Y_{3w}
Χωρίς Υπερχειλιστή	4,12	4,27	6,46	6,5	8,11	8,14	9,87	9,57	11,07	11,14	12,7	12,44
Υπερχειλιστής 3 cm	6,93	7,07	9,43	9,54	10,69	10,94	12,09	12,34	13,53	13,6	14,86	15,02
Υπερχειλιστής 6 cm	10,14	10,3	13,03	13,08	14,35	14,5	16,07	16,2	17,59	17,78	18,86	19
Υπερχειλιστής 9 cm	13,37	13	16,17	16,3	17,63	17,65	19,52	19,68	21,13	21,25	22,58	22,65

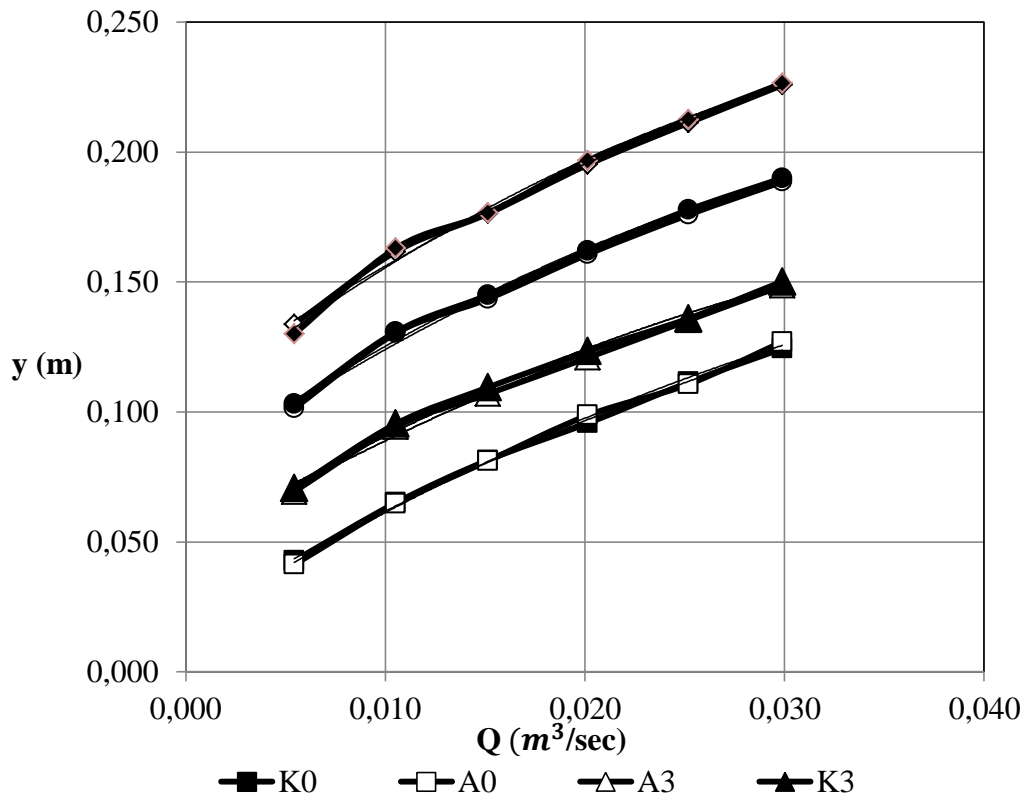


1ο Πείραμα

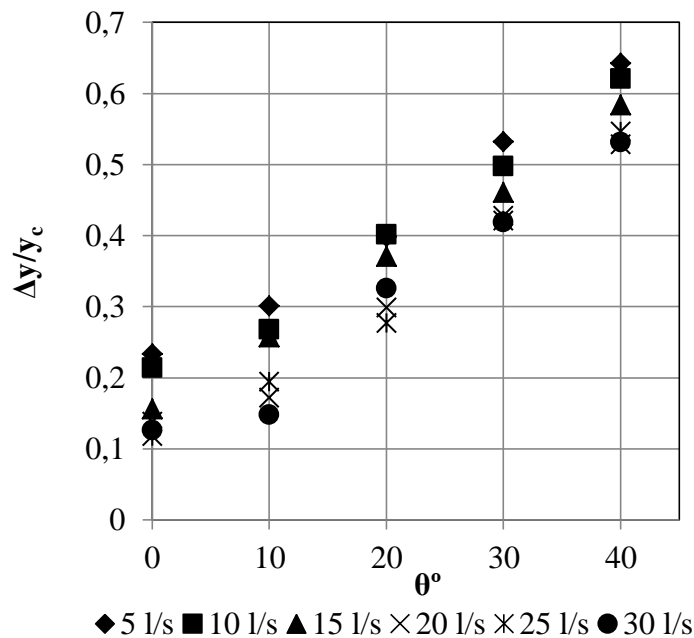
2ο Πείραμα

Αποστάσεις από την εκροή πρός το μεσόβαθρο cm	Q L/s			Q L/s		
	10,16	19,78	30,73	9,79	20,33	29,88
20	5,31	8,20	10,33	5,18	8,40	10,36
40	5,80	8,69	11,29	5,79	8,92	11,09
60	6,09	9,50	10,92	6,02	9,66	10,97
80	6,22	8,92	11,13	6,25	8,96	11,07
100	6,23	8,11	10,75	6,23	8,46	10,69
120	5,50	9,49	12,13	5,50	8,74	12,00
170	6,40	9,93	12,01	6,46	9,92	12,07
224	6,06	10,09	13,00	6,02	10,12	12,93

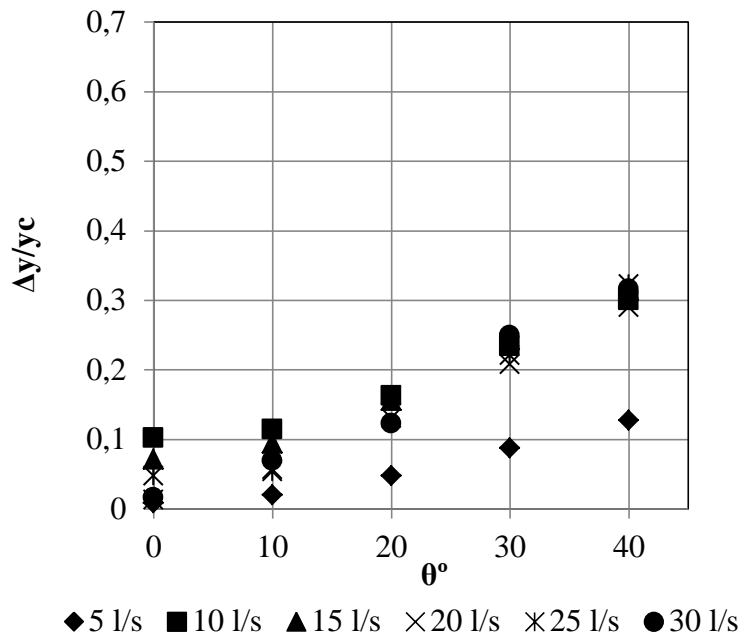




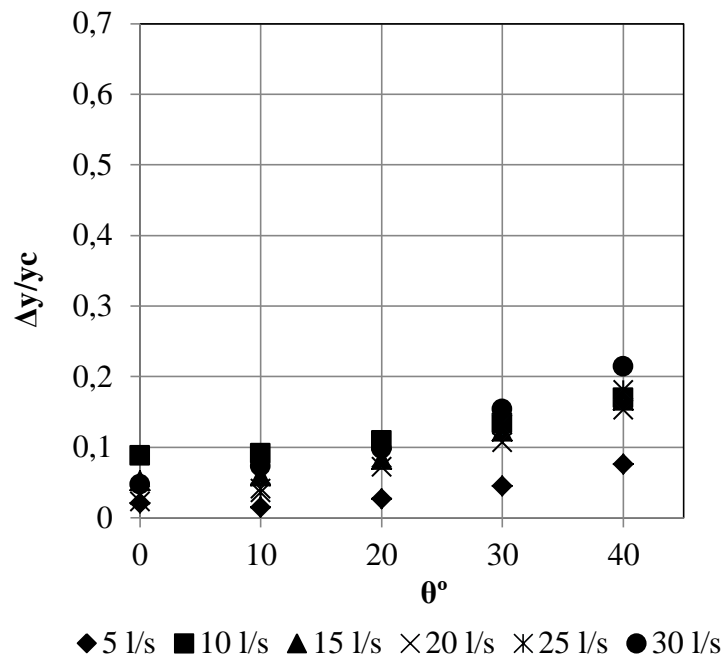
Σχήμα 1 Αδιατάρακτα βάθη ροής στην περιοχή του μεσόβαθρου σαν συνάρτηση της παροχής για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή.



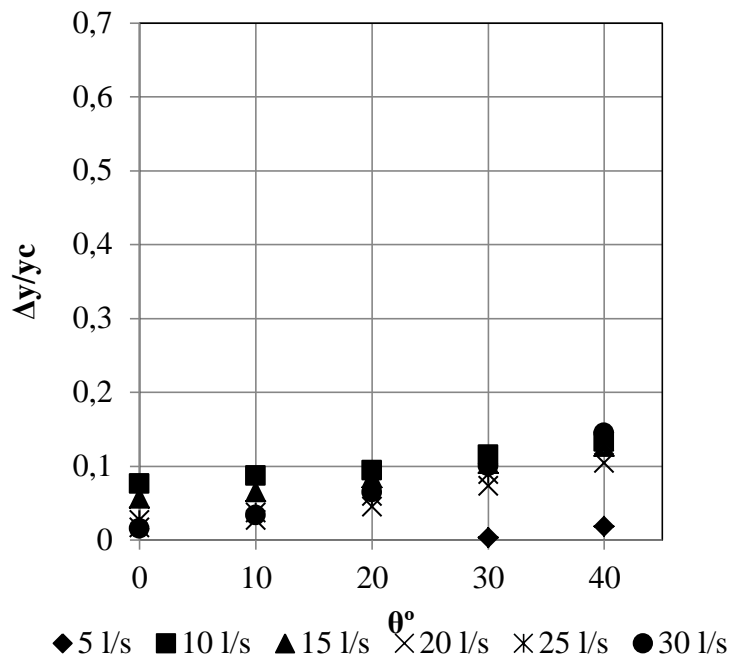
Σχήμα 2(α) Μεταβολή του λόγου της υπερύψωσης προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές χωρίς την παρουσία υπερχειλιστή.



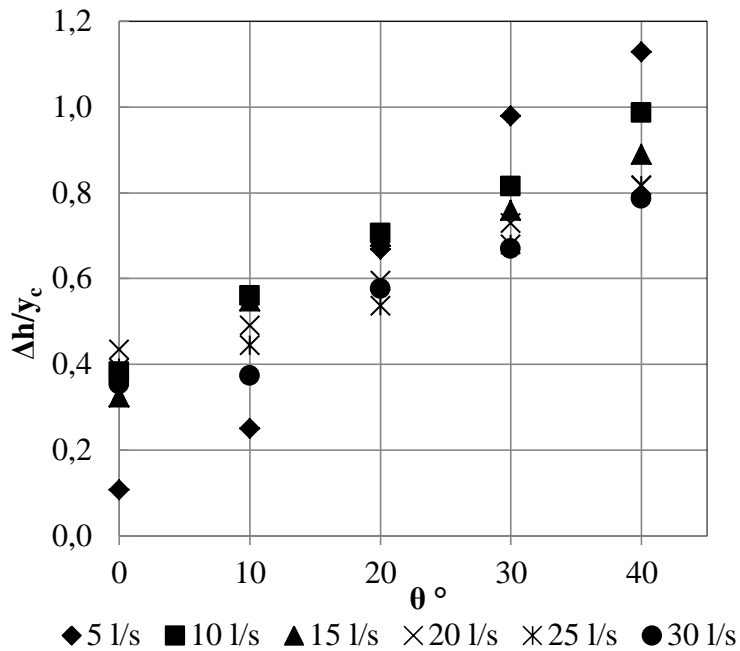
Σχήμα 2(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 3 cm.



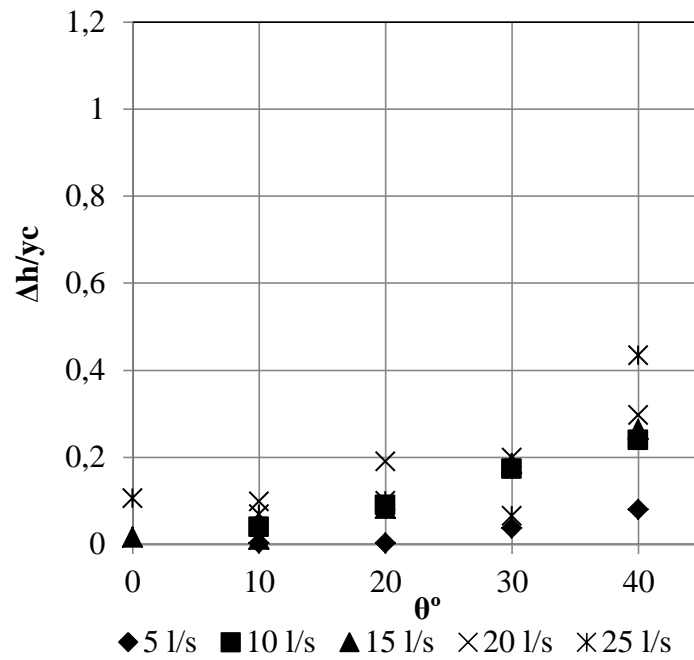
Σχήμα 2(γ) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 6 cm.



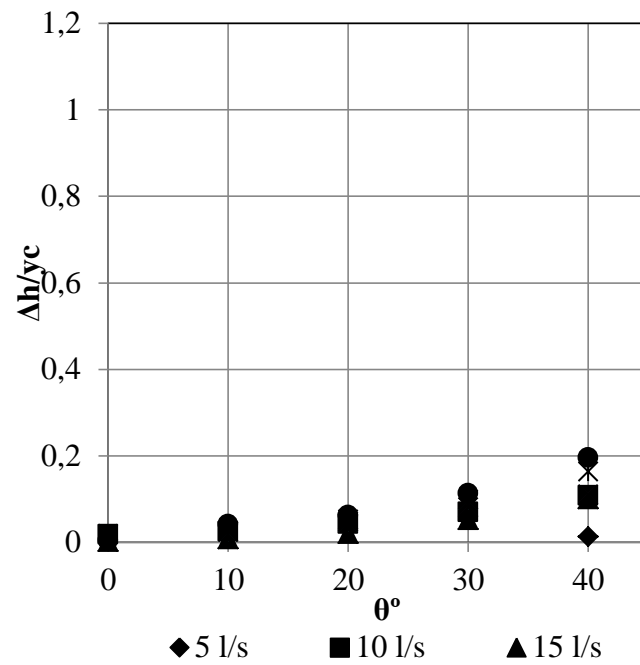
Σχήμα 2(δ) Μεταβολή του λόγου $\Delta y/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής του μεσόβαθρου (θ) για όλες τις παροχές όταν το ύψος υπερχειλιστή είναι στα 9 cm.



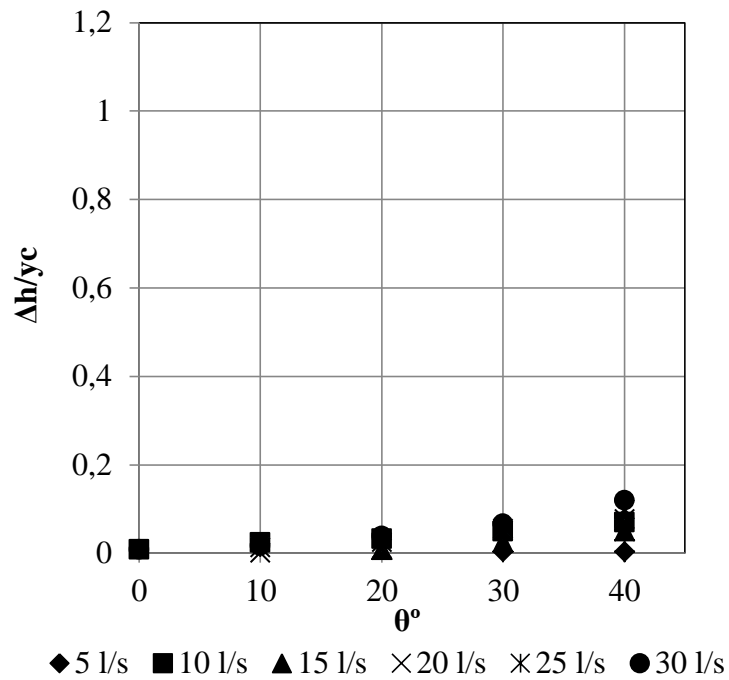
Σχήμα 3(α) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατάντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.



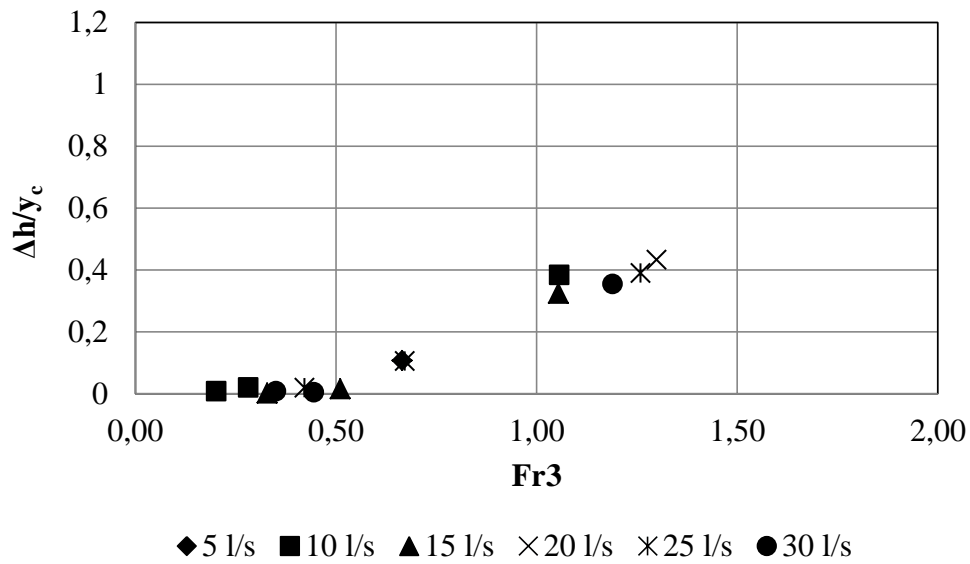
Σχήμα 3(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta h/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.



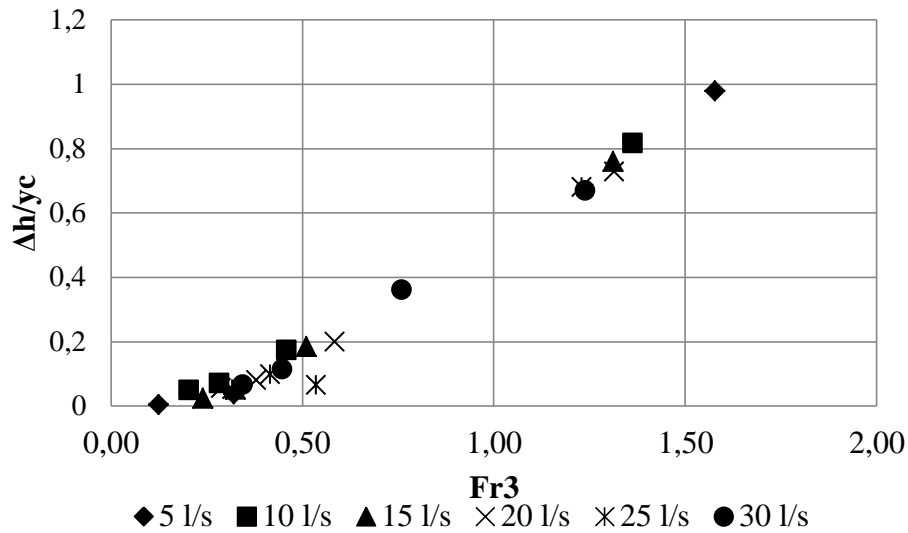
Σχήμα 3(γ) Μεταβολή του $\Delta h/y_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.



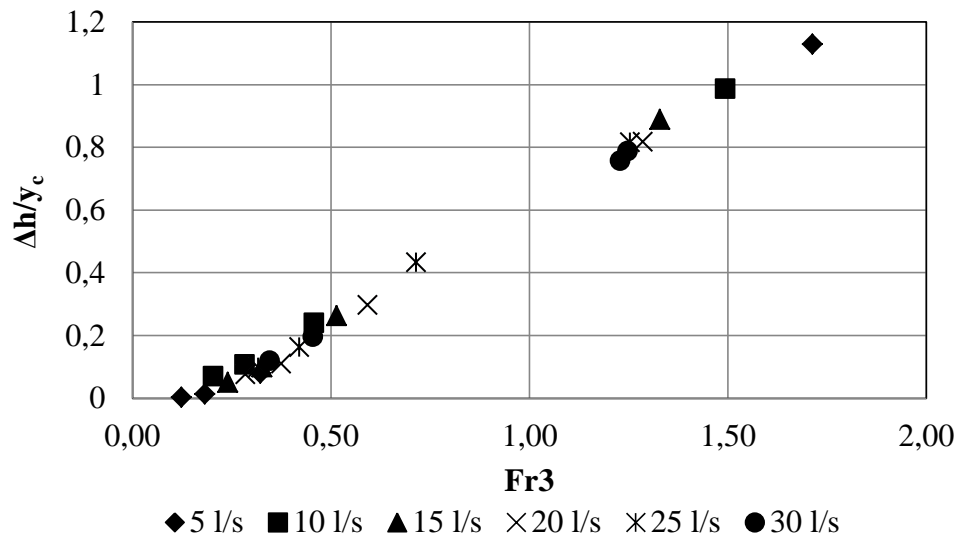
Σχήμα 3(δ) Μεταβολή του $\Delta h/\gamma_c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.



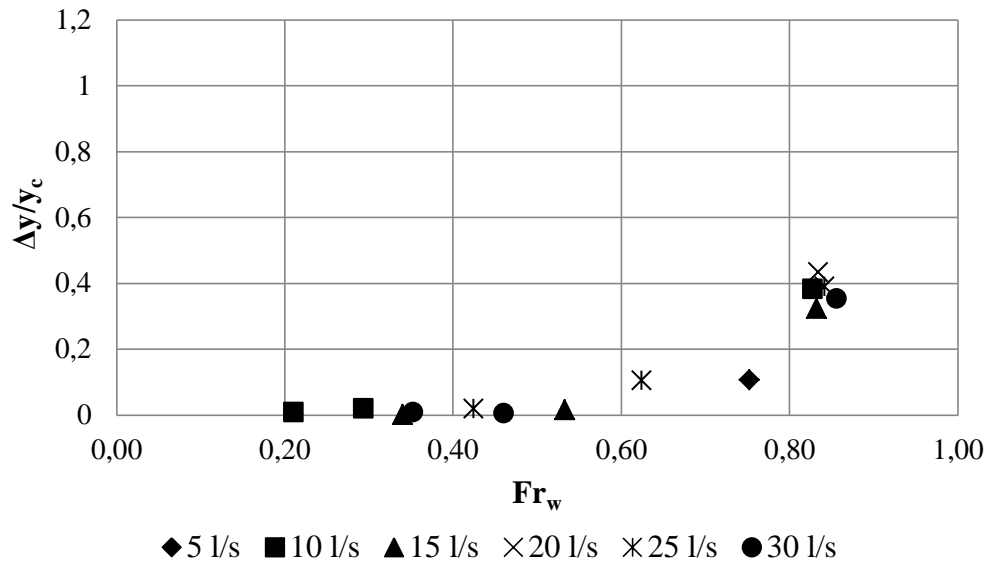
Σχήμα 4(α) Μεταβολή του λόγου $\Delta h/\gamma_c$ σε σχέση με τον Fr_3 στα κατάντη για όλες τις παροχές και για $\theta=0^\circ$.



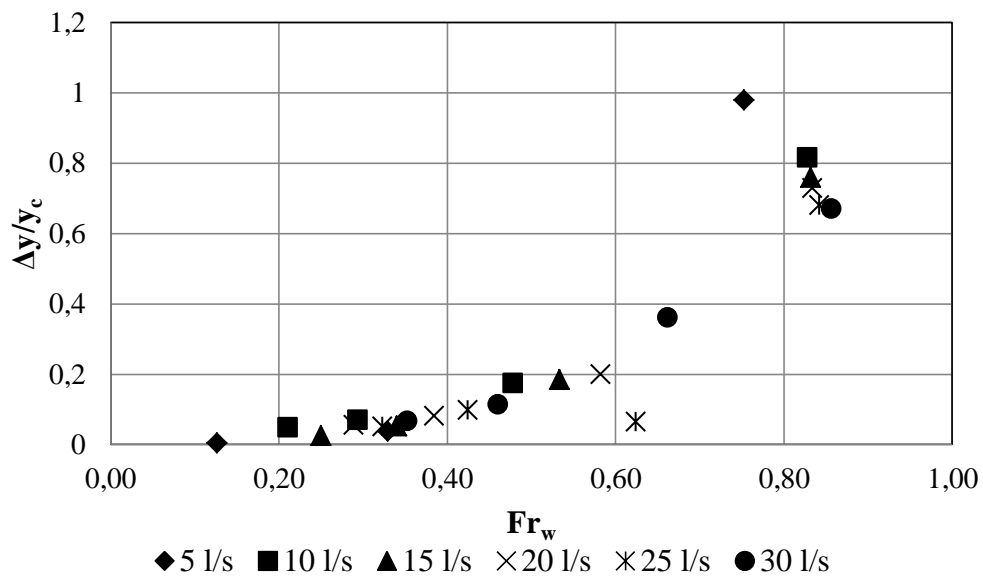
Σχήμα 4(β) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατάντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με τον Fr_3 στα κατάντη για όλες τις παροχές και για $\theta=30^\circ$.



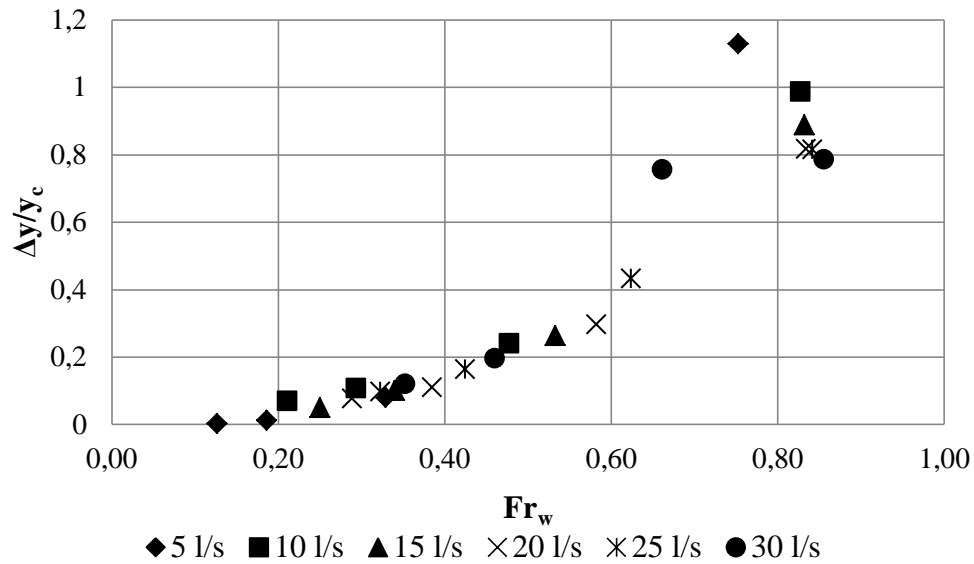
Σχήμα 4(γ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής από τα ανάντη του μεσόβαθρου στα κατάντη προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta h/y_c$) σε σχέση με τον Fr_3 στα κατάντη για όλες τις παροχές και για $\theta=40^\circ$.



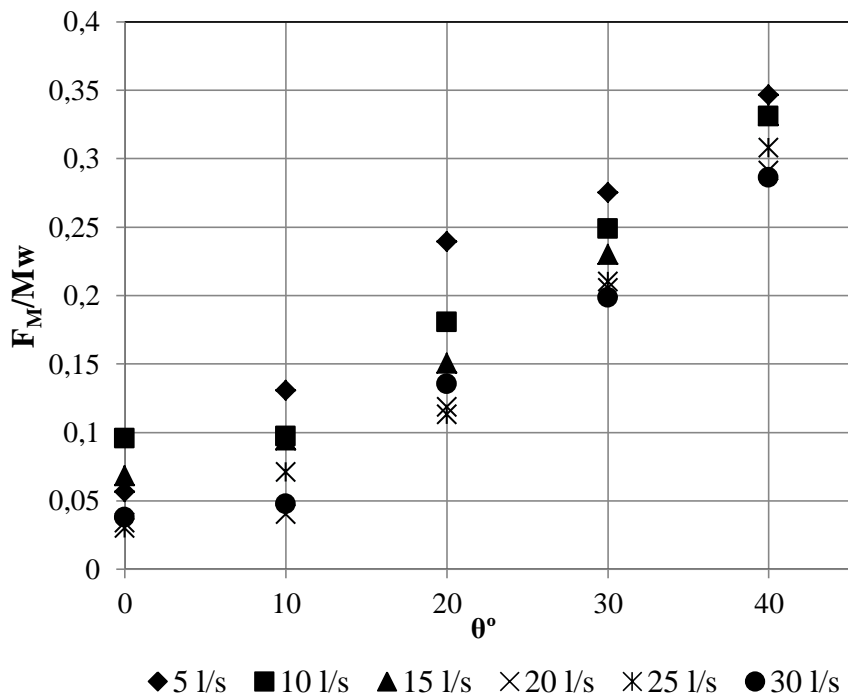
Σχήμα 4(δ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=0^\circ$.



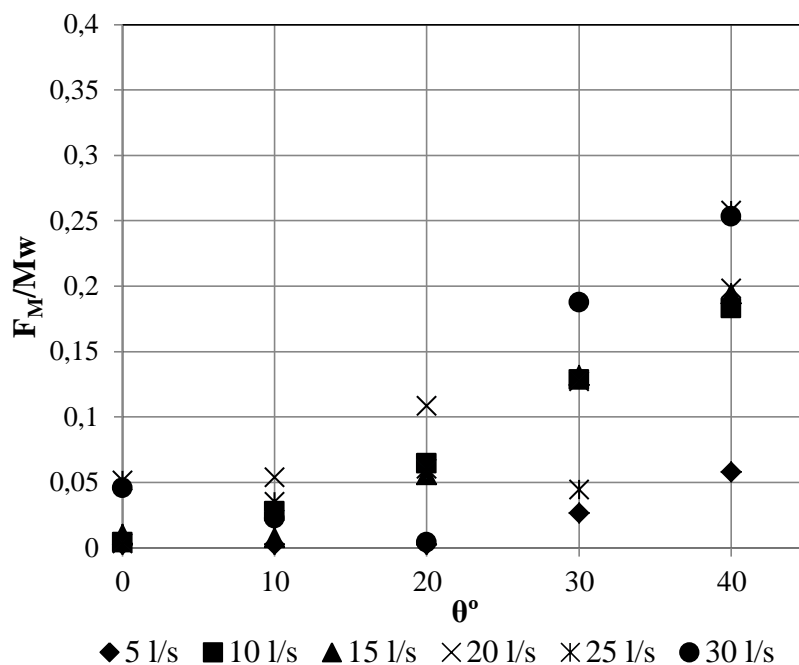
Σχήμα 4(ε) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=30^\circ$.



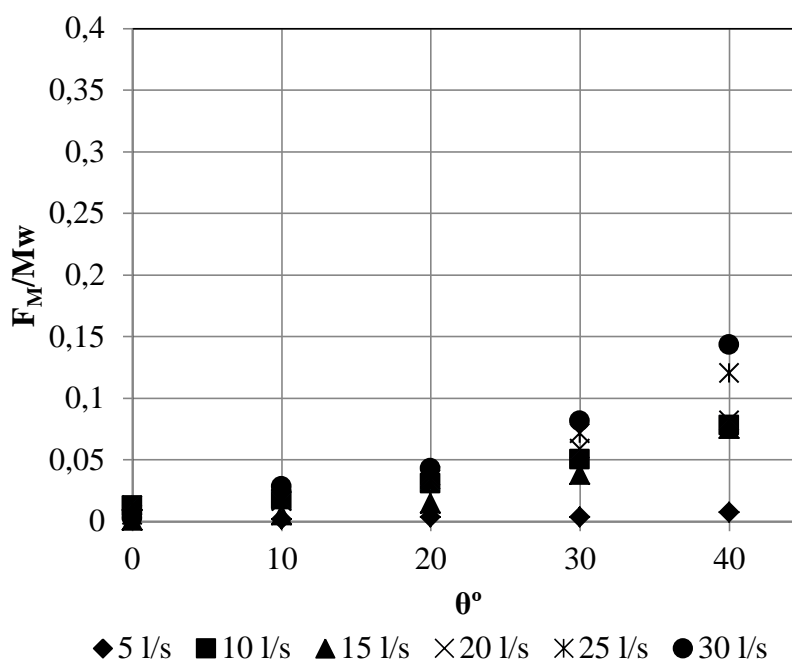
Σχήμα 4(ζ) Μεταβολή του λόγου της διαφοράς του βάθους ροής στα ανάντη του μεσόβαθρου από το αδιατάρακτο προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta y/y_c$) σε σχέση με τον Fr_w για όλες τις παροχές και για $\theta=40^\circ$.



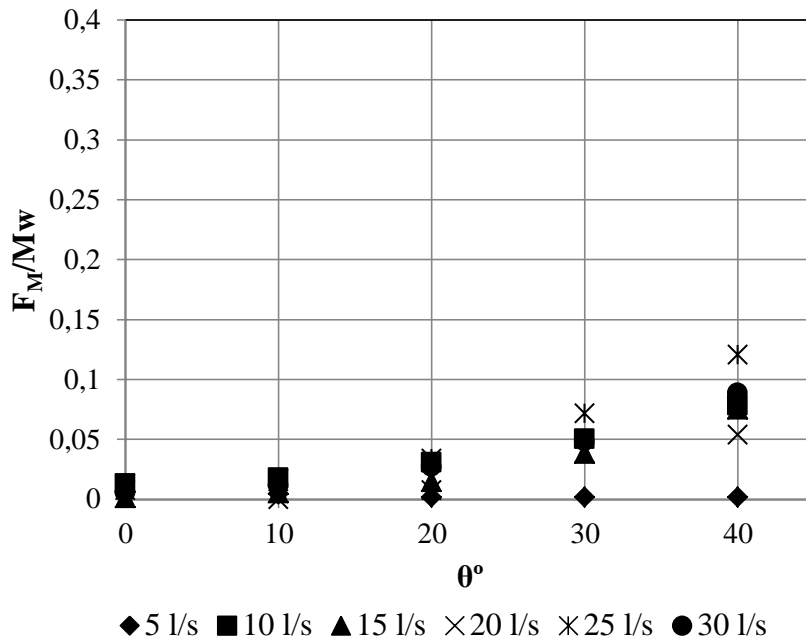
Σχήμα 5(α) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.



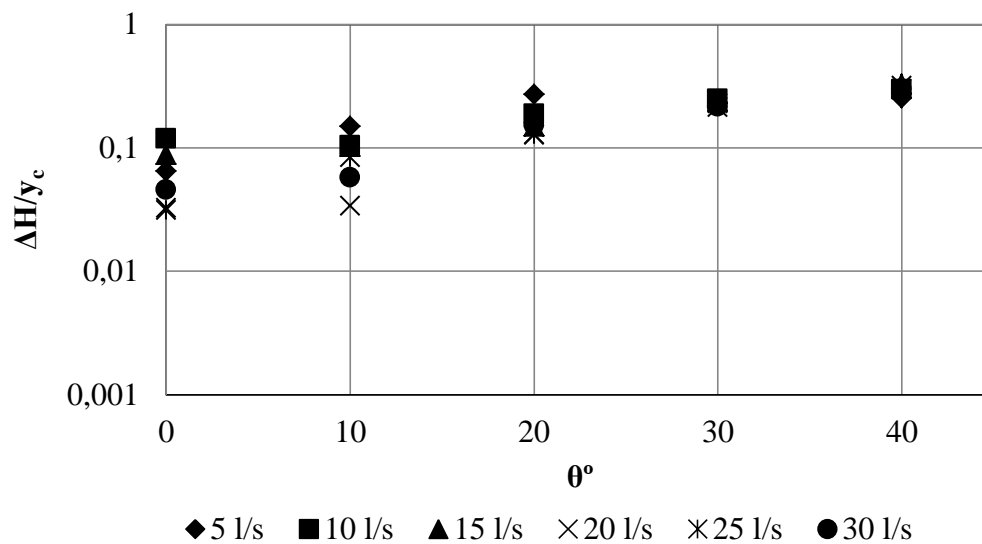
Σχήμα 5(β) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.



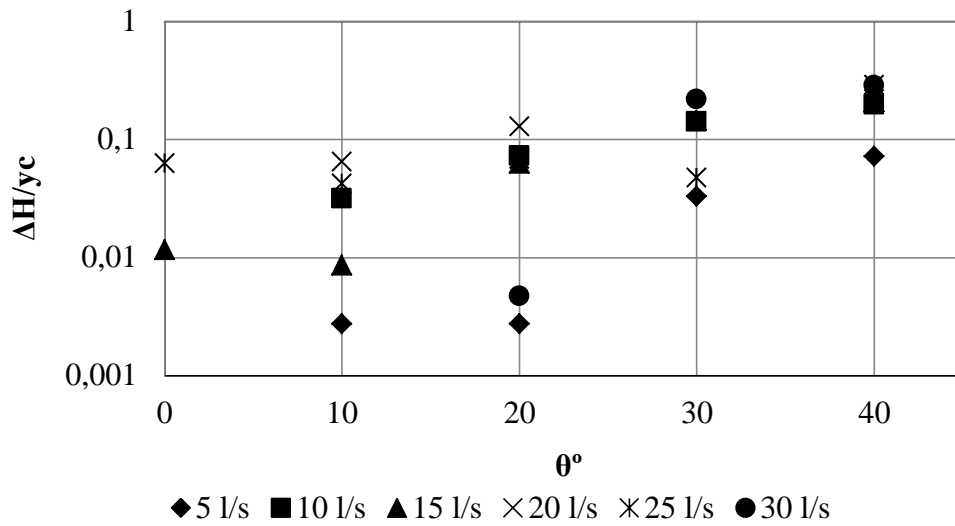
Σχήμα 5(γ) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.



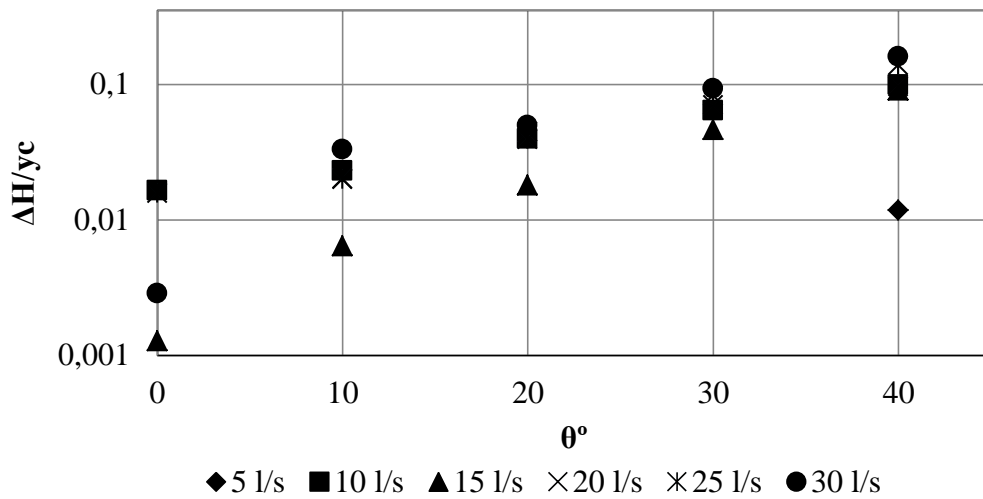
Σχήμα 5(δ) Μεταβολή του λόγου της ειδικής δύναμης προς την ειδική δύναμη σε αδιατάρακτη ροή (F_M/M_w) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.



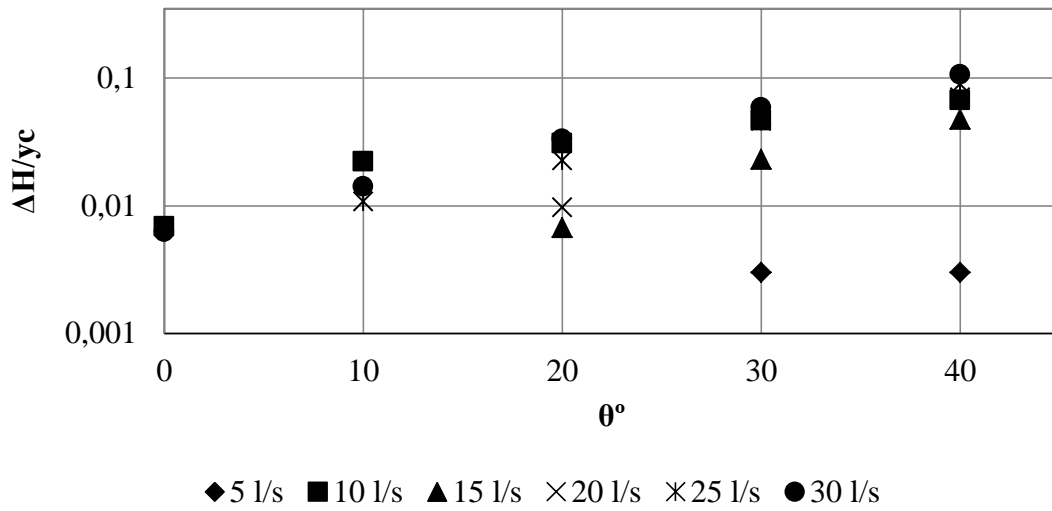
Σχήμα 6(α) Μεταβολή του λόγου των απωλειών ενέργειας προς το κρίσιμο βάθος ($\Delta H/y_c$) σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν δεν υπάρχει υπερχειλιστής.



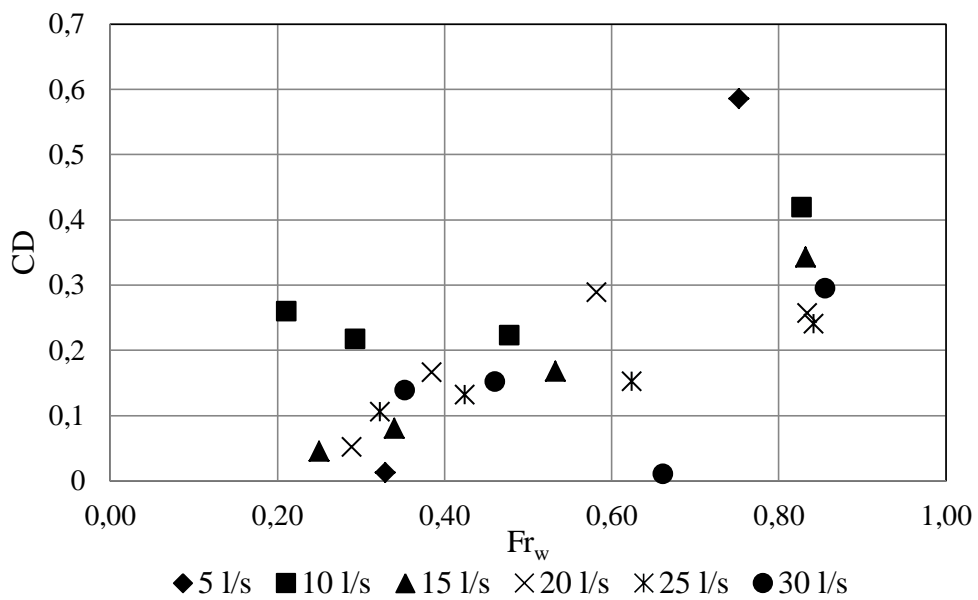
Σχήμα 6(β) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/\gamma c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.



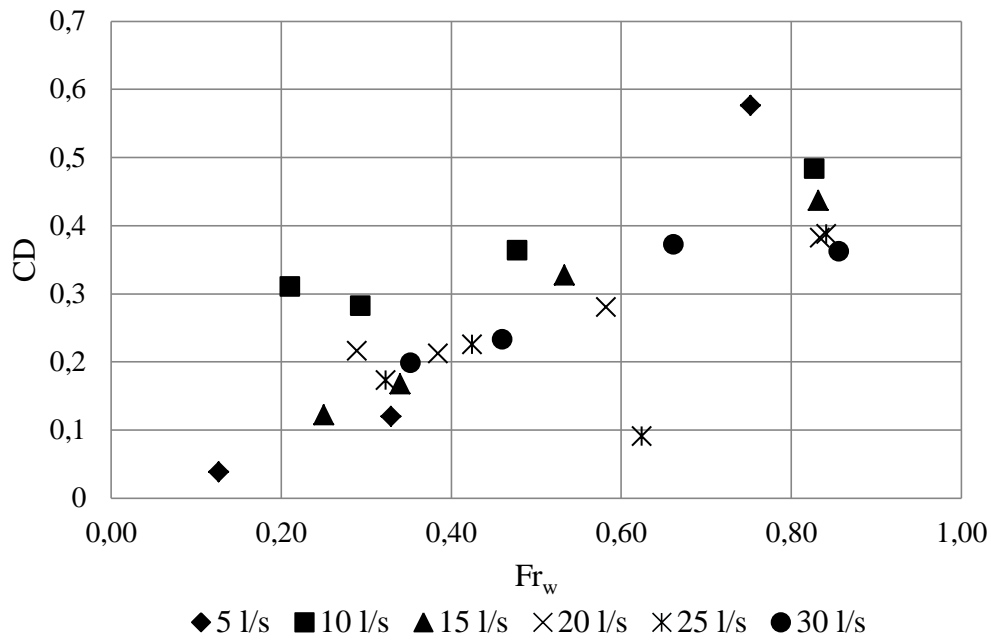
Σχήμα 6(γ) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/\gamma c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.



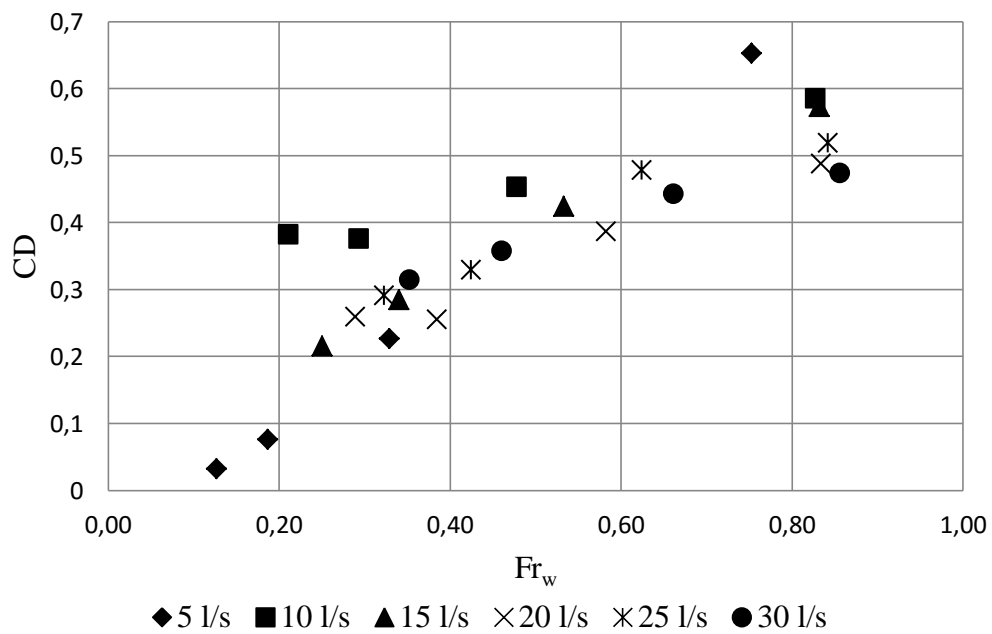
Σχήμα 6(δ) Μεταβολή του λόγου $\Delta H/\gamma c$ σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις παροχές όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.



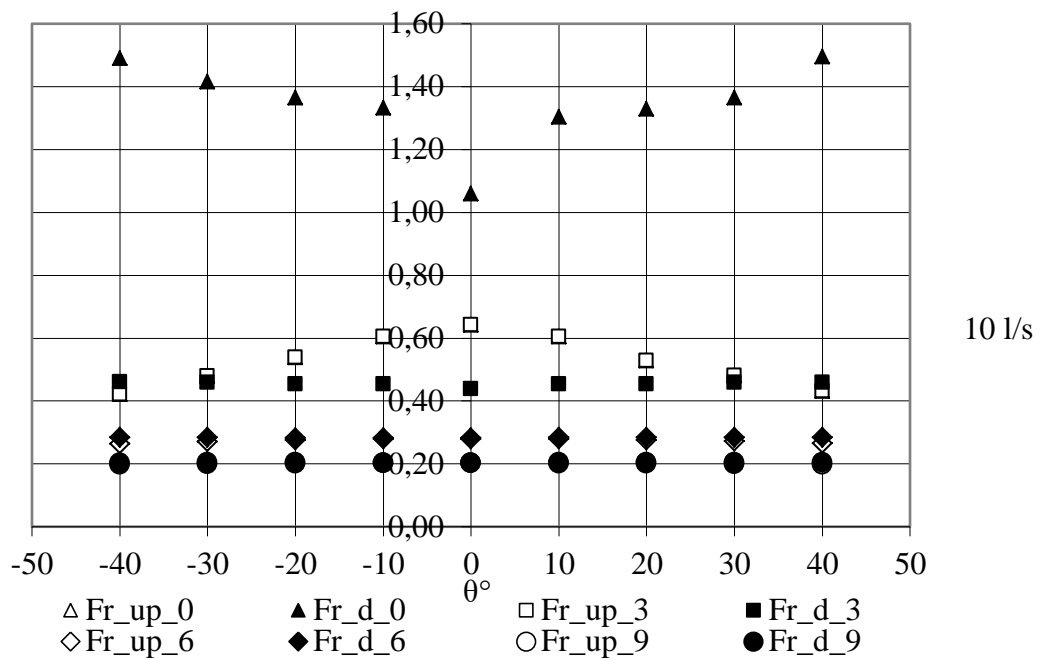
Σχήμα 7(α) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 20°.



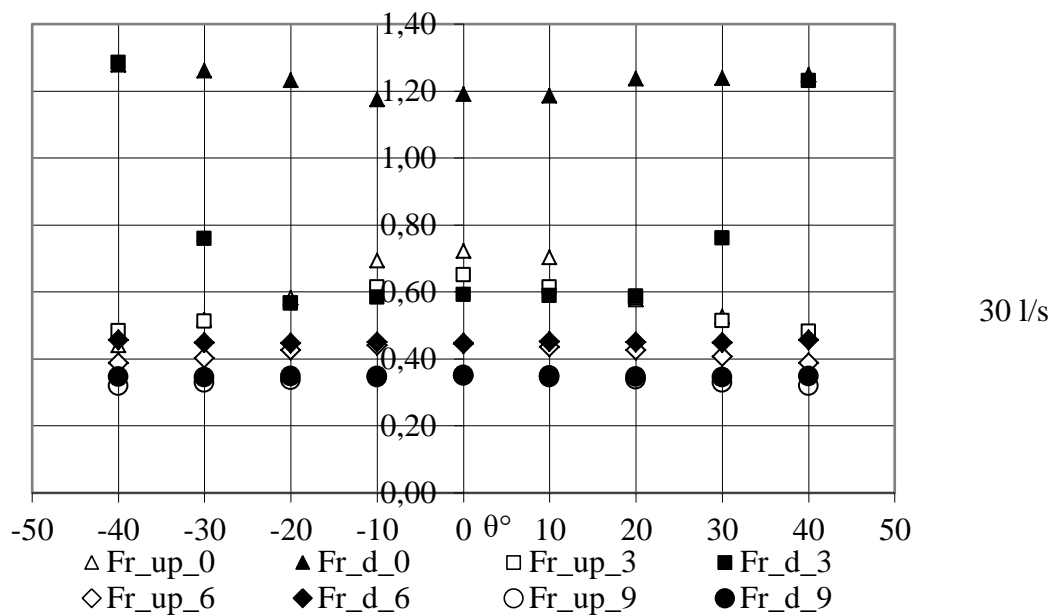
Σχήμα 7(β) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 30° .



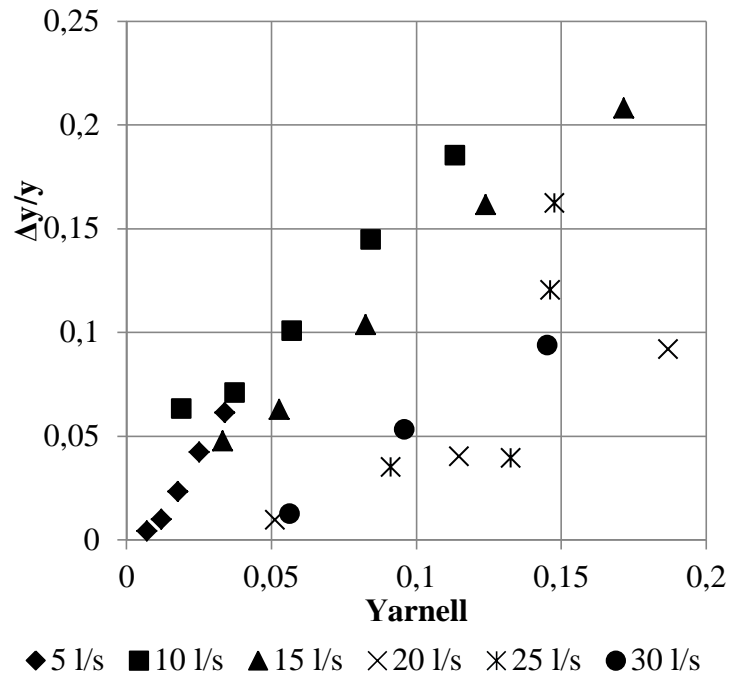
Σχήμα 7(γ) Μεταβολή του C_D συναρτήσει του αριθμού Froude σε αδιατάρακτη ροή για όλες τις παροχές και για γωνία στροφής του μεσόβαθρου 40° .



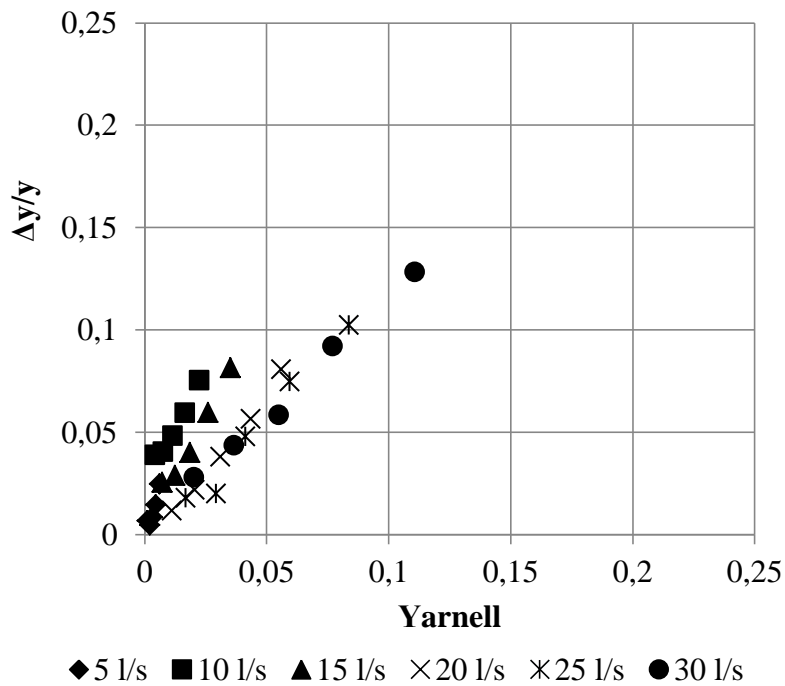
Σχήμα 8(α) Μεταβολή του αριθμού Froude (Fr), όπου Fr_{up} ο αριθμός Froude στα ανάντη και όπου Fr_d ο αριθμός Froude στα κατάντη με τον αριθμό που ακολουθεί να δείχνει το ύψος του υπερχειλιστή, σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή και για παροχή $Q = 10 \text{ L/s}$.



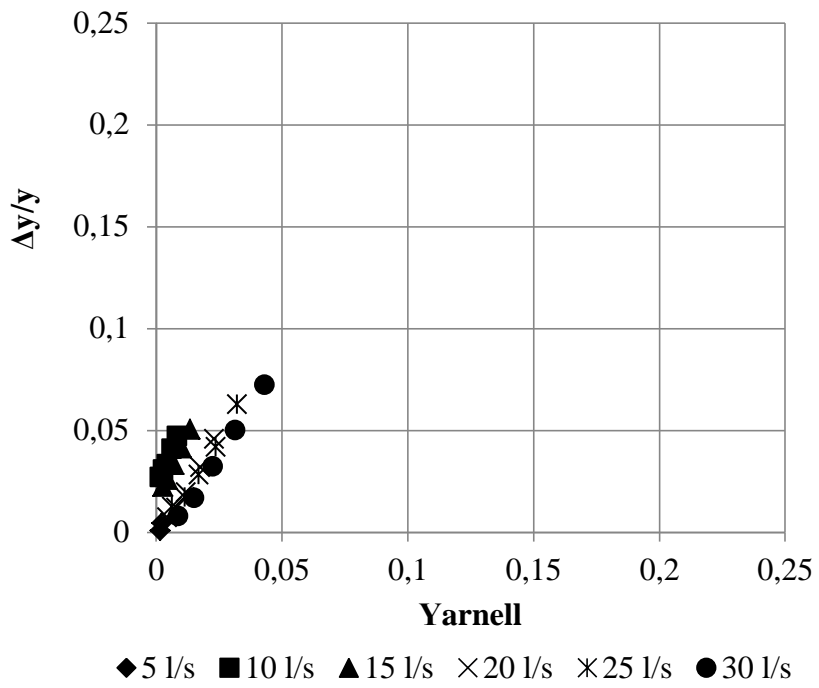
Σχήμα 8(β) Μεταβολή του αριθμού Froude (Fr) , όπου Fr_{up} ο αριθμός Froude στα ανάντη και όπου Fr_d ο αριθμός Froude στα κατάντη με τον αριθμό που ακολουθεί να δείχνει το ύψος του υπερχειλιστή, σε σχέση με την γωνία στροφής θ για όλες τις θέσεις του υπερχειλιστή και για παροχή $Q = 30 \text{ L/s}$.



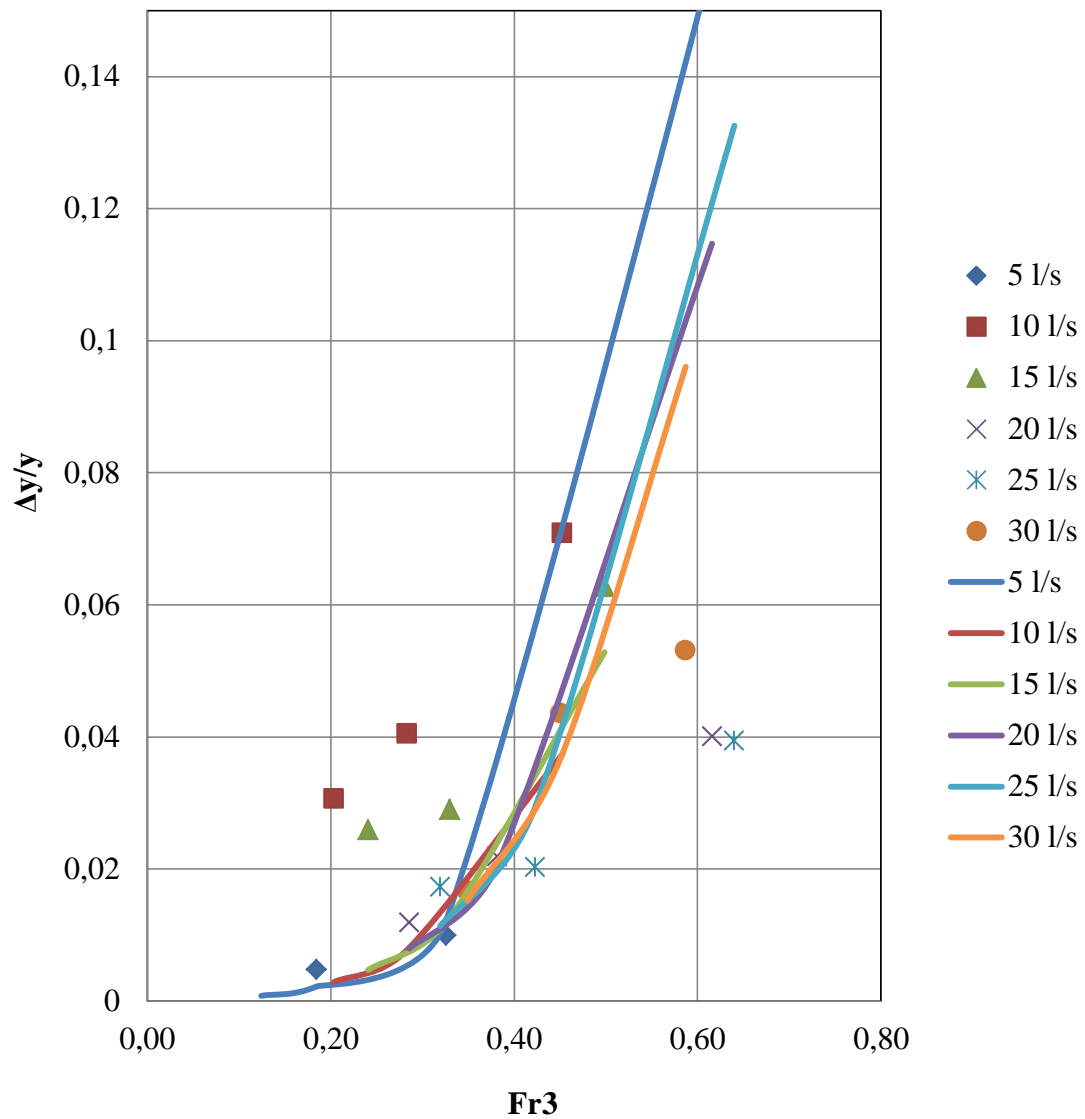
Σχήμα 9(α) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 3 cm.



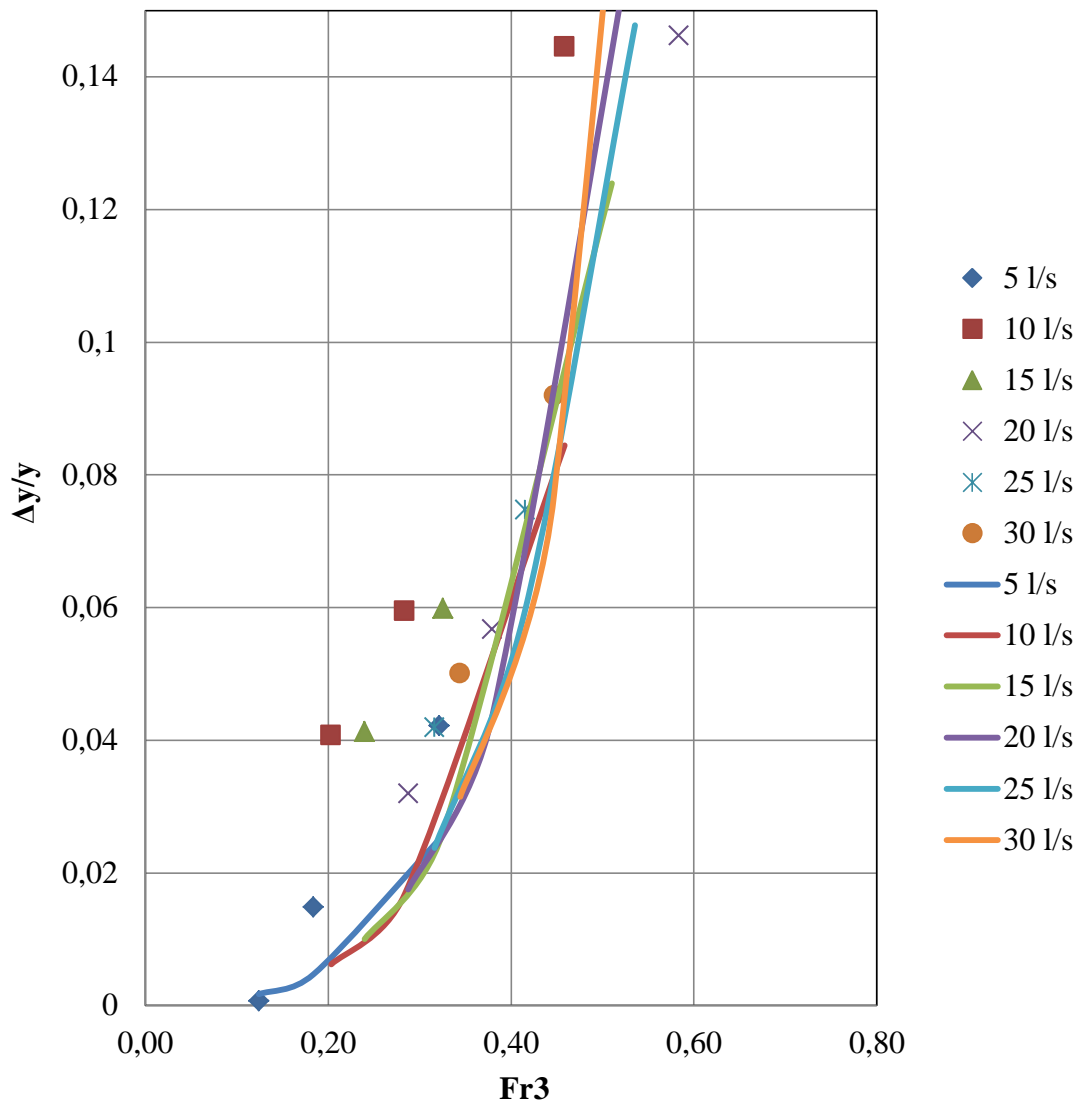
Σχήμα 9(β) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 6 cm.



Σχήμα 9(γ) Σύγκριση της υπερύψωσης που μετρήθηκε στο εργαστήριο ($\Delta y/y$) με την υπερύψωση από την εμπειρική σχέση του Yarnell όταν ο υπερχειλιστής είναι στα 9 cm.



Σχήμα 10(α) Απεικόνιση του λόγου της υπερύψωσης προς το αδιατάρακτος βάθος ($\Delta y/y$), που προέκυψε από τις μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και από την εμπειρική σχέση του Yarnell συναρτήσει του αριθμού Froude (Fr_3) στα κατάντη για όλες τις παροχές και τα ύψη υπερχειλιστή και για γωνία 10° .



Σχήμα 10(β) Απεικόνιση του λόγου της υπερύψωσης προς το αδιατάρακτος βάθος ($\Delta y/y$), που προέκυψε από τις μετρήσεις στο εργαστήριο αλλά και από την εμπειρική σχέση του Yarnell συναρτήσει του αριθμού Froude (Fr_3) στα κατάντη για όλες τις παροχές και τα ύψη υπερχειλιστή και για γωνία 30° .