



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΡΟΗΣ
ΣΕ ΜΕΣΟΒΑΘΡΟ ΓΕΦΥΡΑΣ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΑΡΙΑ-ANNA ΒΑΣΙΛΑΚΗ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου
Επίκουρος Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2013

*Η φωτογραφία στο εξώφυλλο είναι από τη διάταξη στην οποία έγιναν οι μετρήσεις.

Ευχαριστίες

Γράφοντας αυτές τις γραμμές της διπλωματικής μου εργασίας συνειδητοποιώ ότι η πορεία μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών τελειώνει. Φυσικά, αυτό δε θα είχε συμβεί χωρίς τη συμβολή κάποιων ανθρώπων που με στήριξαν και με καθοδήγησαν, ο καθένας με το δικό του τρόπο.

Πρώτα από όλα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή μου, Παναγιώτη Παπανικολάου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της εργασίας μου, καθώς και για το χρόνο που μου αφιέρωσε απλόχερα κάθε φορά που τον χρειάστηκα και τέλος για την υπομονή του.

Ανεκτίμητη ήταν η βοήθεια του κυρίου Λασηθιωτάκη Μανώλη, καθώς και του Πατσέλη Ιωάννη που χάρη στην τεχνογνωσία και στο μεράκι τους «έστησαν» την πειραματική διάταξη και η βοήθεια τους ήταν διαθέσιμη όποτε τη χρειάστηκα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και την οικογένεια μου για τη στήριξη τους σε όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας. Χωρίς την αμέριστη ηθική και υλική υποστήριξή τους δεν ξέρω αν θα τα είχα καταφέρει.

Περίληψη

Η παρουσία εμποδίων στον πυθμένα ανοιχτών αγωγών είναι συχνή, καθώς σε πληθώρα υδραυλικών έργων είναι απαραίτητη η τοποθέτησή τους. Η τοποθέτηση οποιουδήποτε εμποδίου εντός ενός υδατορεύματος επιφέρει αλλαγές στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της ροής. Το εμπόδιο δέχεται μια δύναμη αντίστασης από τη ροή και προκαλεί απώλειες ενέργειας σε αυτή. Προκαλείται, έτσι, υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη του εμποδίου. Πολλές πειραματικές και αριθμητικές εργασίες έχουν γίνει για ροές πάνω ή ανάμεσα από εμπόδια, καθώς υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με την ακριβή συμπεριφορά της ροής και ενέχει πάντα ο κίνδυνος πλημμύρας.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της ροής γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας υπό γωνία. Τόσο ανάντη, όσο και κατάντη του μεσόβαθρου η ροή ήταν υποκρίσιμη. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν ο υπολογισμός της δύναμης αντίστασης που ασκείται στο μεσόβαθρο και εν συνεχεία ο προσδιορισμός του συντελεστή αντίστασης. Εφαρμόστηκε, επίσης, ο εμπειρικός τύπος του Yarnell (1934), προκειμένου να βρεθεί η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας και να συγκριθεί με τη μετρημένη υπερύψωση. Για τον προσδιορισμό των παραπάνω πραγματοποιήθηκαν δέκα σειρές πειραματικών μετρήσεων υπό διαφορετικές συνθήκες ανά σειρά. Σε κάθε σειρά μετρήθηκαν οι ταχύτητες μέσω συσκευής Pitot σε δύο διατομές, μία ανάντη και μία κατάντη του μεσόβαθρου. Στο εργαστήριο μετρούνταν, επίσης και οι στάθμες της ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή του μεσόβαθρου. Μετρήσεις έγιναν για δύο παροχές και για πέντε γωνίες στροφής του μεσόβαθρου.

Abstract

Obstacles in an open channel are commonly observed, as their presence in a wide range of hydraulic constructions, is considered to be essential. The installation of any kind of obstacle, inside a stream, affects the hydrodynamic characteristics of the flow. Drag force is acting on the obstacle from the flow thus leading to energy losses and resulting in an increase of the upstream water level, referred to as backwater effect. Several experimental and theoretical surveys have been conducted for flows around obstacles, as there is uncertainty regarding the exact behavior of the flow and a potential overflow risk.

The purpose of this thesis is to investigate experimentally the behavior of a flow around an oblique bridge pier. Upstream and downstream of the pier, the flow is subcritical. The goal of this work is to calculate the drag force on the pier and define the drag coefficient. The empirical formula of Yarnell (1934) was applied to calculate the backwater rise of the free surface, and compared well with the measured one. Ten different sets of experiments were conducted. In each set, velocity measurements were taken in two cross-sectional areas, one upstream and one downstream of the pier, with the use of a Pitot tube. Measurements regarding the free surface elevation at the surrounding area of the pier were also taken using a point gauge with vernier. The experiments were conducted for two different flow rates, and for each one five different angles of the pier to the flow direction were examined.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	iii
Abstact.....	iv
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Αντικείμενα Μελέτης	1
1.3 Διάρθρωση της εργασίας	2
2. Θεωρητική Ανάλυση – Βιβλιογραφική Επισκόπηση	3
2.1 Εισαγωγή.....	3
2.2 Ροή σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια.....	3
2.3 Χαρακτηριστικά της ροής.....	4
2.3.1 <i>Κινηματικά κριτήρια</i>	4
2.3.2 <i>Δυναμικά κριτήρια</i>	4
2.4 Εξισώσεις υπερύψωσης	5
2.5 Προσδιορισμός δυνάμεων αντίστασης σε μεσόβαθρα	9
2.6 Προσδιορισμός της δύναμης αντίστασης μέσω εξίσωσης ορμής	10
3. Πειραματική Διάταξη.....	13
3.1 Διαστάσεις Διώρυγας	13
3.2 Εμπόδιο	13
3.3 Μέτρηση Παροχής	14
3.4 Μέτρηση Ταχύτητας.....	15
3.5 Μέτρηση Στάθμης	17
4. Πειραματική Διαδικασία.....	19
4.1 Υπολογισμός Ταχύτητας.....	19
4.2 Υπολογισμός Παροχής με Αριθμητική Ολοκλήρωση.....	20
4.3 Έλεγχος Μείωσης Πλάτους	21

4.4	Υπολογισμός Δύναμης Αντίστασης	21
4.5	Υπολογισμός του Συντελεστή Αντίστασης	22
5.	Ανάλυση και Αποτελέσματα	23
5.1	Διαδικασία Ανάλυσης.....	23
5.2	Πειράματα	24
5.3	Σύγκριση Παροχών.....	25
5.4	Υπερύψωση.....	26
5.5	Δύναμη αντίστασης	27
5.6	Συντελεστής αντίστασης.....	27
6.	Συμπεράσματα.....	29
7.	Αναφορές.....	31
8.	Παράρτημα.....	33

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η παρουσία εμποδίων σε ένα υδατόρευμα επηρεάζει σημαντικά τη ροή, καθώς επιφέρει αλλαγές στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της. Όταν το νερό σε ένα κανάλι περνάει πάνω από ή ανάμεσα από ένα εμπόδιο (μεσόβαθρα, πασσάλους κ.α.) υπάρχουν μεταβολές στην ορμή και ενέργεια και διαφοροποίηση του βάθους ροής στη περιοχή γύρω από το εμπόδιο.

Σε πολλές περιπτώσεις, όμως, η παρουσία τους είναι αναπόφευκτη. Για παράδειγμα, πολλές φορές για την κατασκευή μιας γέφυρας απαιτείται τοποθέτηση μεσόβαθρου στην κοίτη του ποταμού. Έτσι, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε πως θα επηρεαστεί η ροή μετά την τοποθέτηση αυτού και ακόμα τις βέλτιστες διαστάσεις του προκειμένου η επίδρασή του στη ροή να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Τα σημαντικότερα προβλήματα είναι η μεταβολή της ορμής και η απώλεια ενέργειας που προκαλεί το εμπόδιο στη ροή, η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη του μεσόβαθρου λόγω της παρεμπόδισης που προκαλείται στη ροή, καθώς επίσης και η υποσκαφή στην περιοχή του μεσόβαθρου. Η υπερύψωση θεωρείται σημαντικό πρόβλημα, ιδιαίτερα στις σιδηροδρομικές και μεγάλου μήκους οδικές γέφυρες, καθώς το μεγάλο φορτίο τους οδηγεί σε κατασκευή μεσόβαθρων μεγάλου μεγέθους. Η σημασία του φαινομένου της υπερύψωσης προέρχεται επίσης από την οικονομική σπουδαιότητα του βάθους ροής των ποταμών, όπου το κόστος των προστατευτικών έργων εξαρτάται από τη μέγιστη προβλεπόμενη στάθμη πλημμύρας. Το μέγεθος της παρεμπόδισης που θα προκληθεί εξαρτάται κυρίως από το γεωμετρικό σχήμα του μεσόβαθρου, τη θέση του στη ροή, την ταχύτητα ροής και το ποσοστό της συστολής. Η έρευνα σχετικά με το πώς τα μεσόβαθρα επηρεάζουν τη ροή είναι ένα πολύ σημαντικό θέμα στη σχεδίαση γεφυρών.

Για υποκρίσιμη ροή, που είναι ο τύπος ροής στα περισσότερα ποτάμια, η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας λόγω του μεσόβαθρου θεωρείται ότι συμβαίνει εκεί που ξεκινά η συστολή.

1.2 Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της ροής γύρω από μεσόβαθρο τοποθετημένο στον πυθμένα ορθογωνικής διώρυγας υπό γωνία ως προς τη διεύθυνση της ροής με σκοπό τον προσδιορισμό :

1. Της δύναμης αντίστασης του εμποδίου με εφαρμογή του θεωρήματος διατήρησης της ορμής.

2. Του συντελεστή αντίστασης σαν συνάρτηση της γωνίας και
3. Της υπερύψωσης στα ανάντη σαν συνάρτηση της γωνίας.

Προκειμένου να προσδιοριστούν τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν δέκα σειρές πειραμάτων.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια και ένα παράρτημα. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο αντικείμενο μελέτης και τους στόχους της εργασίας.

Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας, αποτελούμενο από τις βασικές για την εργασία αυτή υδραυλικές έννοιες. Γίνεται, επίσης, αναφορά σε παλιότερες εργασίες σχετικές με την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας ανάντη ενός μεσόβαθρου.

Στο τρίτο κεφάλαιο δίδονται τα στοιχεία της πειραματικής διάταξης. Αναφέρονται τόσο οι διαστάσεις του καναλιού και της διώρυγας, όσο και τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία. Φαίνεται ο τρόπος εξαγωγής της κατανομής της ταχύτητας, ο υπολογισμός της παροχής με αριθμητική ολοκλήρωση, καθώς και ο τρόπος υπολογισμού της δύναμης και του συντελεστή αντίστασης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση της διαδικασίας ανάλυσης των μετρήσεων και εν συνεχεία παρατίθενται τα αποτελέσματα.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την ανάλυση.

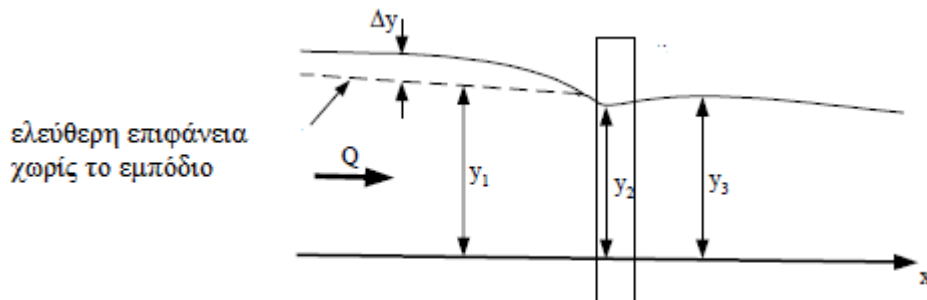
Στο παράρτημα παρατίθενται οι μετρημένες ταχύτητες, κάποια βασικά υδραυλικά χαρακτηριστικά και τα αποτελέσματα για κάθε πείραμα.

2. Θεωρητική Ανάλυση – Βιβλιογραφική Επισκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Κάθε εμπόδιο εντός ενός υδατορεύματος ασκεί μια δύναμη αντίστασης στη ροή και προκαλεί απώλειες ενέργειας σε αυτή. Έτσι, η ροή πρέπει να “προσαρμοστεί” ώστε να αντισταθμίσει τις αλλαγές που προκλήθηκαν εξαιτίας της παρουσίας του εμποδίου. Σε υποκρίσιμη ροή, που είναι η συνήθης ροή στα περισσότερα ποτάμια, η “προσαρμογή” αυτή γίνεται με την υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας 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.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται κάποια βασικά υδραυλικά χαρακτηριστικά και οι εξισώσεις υπολογισμού της ορμής, της δύναμης αντίστασης και της υπερύψωσης. Επίσης, γίνεται αναφορά σε παλιότερες εργασίες σχετικές με την υπερύψωση.



Σχήμα 2.1.1: Ελεύθερη επιφάνεια στην περιοχή του εμποδίου

2.2 Ροή σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια

Η ροή του νερού σε φυσικούς και τεχνητούς αγωγούς πραγματοποιείται με την εμφάνιση ελεύθερης επιφάνειας. Η ροή στις περιπτώσεις αυτές γίνεται σε χώρο που ορίζεται από τα στερεά όρια του αγωγού και από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού και ο αγωγός αυτός ονομάζεται ανοικτός αγωγός. Στην ελεύθερη επιφάνεια η πίεση ισούται με τη ατμοσφαιρική.

Η σημασία των προβλημάτων ροής σε ανοικτούς αγωγούς είναι εμφανής. Ο καθορισμός της θέσης ελεύθερης επιφάνειας για διάφορες πλημμυρικές παροχές σε φυσικούς αγωγούς

(ρέματα, χειμάρρους, και ποταμούς) συνιστά ένα σημαντικό πρόβλημα προς επίλυση, για τον καθορισμό των απαιτούμενων έργων αντιπλημμυρικής προστασίας.

Η μεταφορά νερού με τεχνητούς αγωγούς είναι πολλές φορές επιβεβλημένη από λειτουργικούς λόγους των υδραυλικών έργων. Η ροή σε πλωτές διώρυγες ναυσιπλοΐας, σε αρδευτικές διώρυγες, σε στραγγιστικές τάφρους, σε αγωγούς υπονόμων κλπ, πραγματοποιείται για λειτουργικούς λόγους με ελεύθερη επιφάνεια.

2.3 Χαρακτηριστικά της ροής

2.3.1 Κινηματικά κριτήρια

Η ροή καλείται μόνιμη όταν το βάθος ροής διατομής, σε κάθε θέση κατά μήκος του αγωγού παραμένει σταθερό, δηλαδή αμετάβλητο με το χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι και η ταχύτητα είναι αμετάβλητη με το χρόνο.

Σα μόνιμη ομοιόμορφη ροή ορίζουμε τη μόνιμη ροή που πραγματοποιείται σε αγωγούς ικανού μήκους για την οποία:

- Οι γραμμές ροής είναι παράλληλες μεταξύ τους
- Η μέση ταχύτητα κατά μήκος μιας γραμμής ροής είναι σταθερή
- Η πίεση κατανέμεται υδροστατικά

Η ροή καλείται ανομοιόμορφη ή μεταβαλλόμενη όταν το βάθος ροής μεταβάλλεται από θέση σε θέση κατά μήκος του αγωγού και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

1. Τη βαθμιαία μεταβαλλόμενη ροή, όταν το βάθος ροής μεταβάλλεται λίγο σε σχέση με το μήκος. Αυτό σημαίνει ότι η καμπύλωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι μικρή, ώστε με ικανή προσέγγιση οι γραμμές ροής να μπορούν να θεωρηθούν περίπου παράλληλες,
2. Την ταχέως μεταβαλλόμενη ροή, όταν το βάθος ροής μεταβάλλεται σημαντικά κατά μήκος της ροής σε σχετικά μικρό μήκος. Η καμπύλωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι έντονη. Ροές αυτής της κατηγορίας πραγματοποιούνται σε μικρά τμήματα κατά μήκος του αγωγού ή και σε περιοχές ασυνέχειας αυτού.

2.3.2 Δυναμικά κριτήρια

Η επίδραση της συνεκτικότητας στη ροή εκφράζεται με τον αριθμό Reynolds (Re), ο οποίος ορίζεται από τη σχέση:

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

όπου V είναι μια χαρακτηριστική ταχύτητα (συνήθως η μέση ταχύτητα της ροής στη διατομή), $L=R$ όπου R είναι η υδραυλική ακτίνα, συνήθως, ή το τετραπλάσιο αυτής $L=4R$ και ν ο συντελεστής κινηματικής συνεκτικότητας.

Στρωτή ονομάζεται η ροή όταν ο αριθμός Reynolds είναι μικρότερος από κάποια κρίσιμη τιμή, ενώ αν υπερβαίνει την τιμή αυτή η ροή ονομάζεται τυρβώδης. Για κάθε γεωμετρία αγωγού υπάρχει μια κρίσιμη τιμή, η οποία είναι γενικά μικρή και στη μεγάλη πλειονότητα των πρακτικών προβλημάτων η ροή είναι τυρβώδης. Τυπική κρίσιμη τιμή του αριθμού Reynolds σε ορθογωνικό αγωγό είναι (με χρήση ως μήκους του R) $Re_{κρ} = 750$.

Η επίδραση της βαρύτητας σε προβλήματα ροής με ελεύθερη επιφάνεια είναι σημαντική και εκφράζεται από τον αριθμό Froude (F), ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις βαρύτητας, δηλαδή:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

όπου V είναι η μέση ταχύτητα ροής και L χαρακτηριστικό μήκος ίσο με το υδραυλικό βάθος ($t_m = E/B$), E το εμβαδόν της υγρής διατομής και B το πλάτος της ελεύθερης επιφάνειας.

Όταν $F < 1$ η ροή καλείται υποκρίσιμη. Η ροή έχει μικρή σχετικά ταχύτητα και καλείται ποτάμια.

Όταν $F > 1$ η ροή καλείται υπερκρίσιμη. Η ροή κυριαρχείται από τις δυνάμεις αδράνειας και έχει μεγάλη ταχύτητα και καλείται χειμαρρώδης.

Για $F = 1$ καλείται κρίσιμη, ασταθής ροή που άλλοτε είναι υπερκρίσιμη και άλλοτε υποκρίσιμη.

2.4 Εξισώσεις υπερύψωσης

Πολλοί ερευνητές έχουν κατά το παρελθόν ασχοληθεί με τον προσδιορισμό της υπερύψωσης Δy . Ανάμεσα σε αυτούς ήταν ο Yarnell (1934), ο D'Aubuisson (1852), ο Rehbock (1919), Al-Nassri (1994) και άλλοι.

Η περισσότερο ευρέως χρησιμοποιούμενη εξίσωση για τον υπολογισμό της αύξησης του βάθους ροής λόγω του μεσόβαθρου είναι η εξίσωση Yarnell:

$$\Delta y = \frac{2K(K + 5Fr_3 - 0,6)(\alpha + 15\alpha^4)(U_3^2)}{2g}$$

Που μπορεί να γραφτεί και στην ακόλουθη μορφή

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{K(K + 5Fr_3^2 - 0,6)(\alpha + 15\alpha^4)(U_3^2)}{2g}$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, Δy είναι η υπερύψωση που προκαλείται από το εμπόδιο, y είναι το μέσο βάθος ροής, Fr_3 ο αριθμός Froude κατάντη του εμποδίου, α το ποσοστό συστολής του καναλιού που ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους του εμποδίου προς το πλάτος του καναλιού και K συντελεστής σχήματος που προσδιορίζεται από πίνακες ανάλογα με το σχήμα του μεσόβαθρου. Οι τιμές που υπολόγισε πειραματικά ο Yarnell για το K φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, όπου L είναι η απόσταση μεταξύ δύο κυλινδρικών μεσόβαθρων και D η διάμετρος του κάθε μεσόβαθρου.

Πίνακας 2.4.1: Συντελεστής K (κατά Yarnell)

Σχήμα μεσόβαθρου	K_N
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 χωρίς στέnowση	1,25

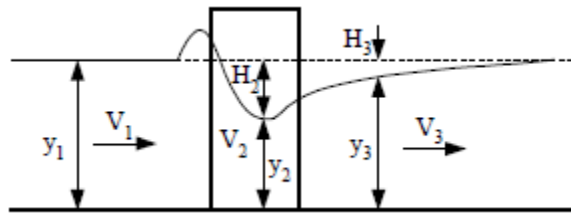
Οι παραπάνω εξισώσεις χρησιμοποιούνται για ροές Τάξης Α κατά Yarnell, για ροές δηλαδή που δεν προσκρούουν στη γέφυρα και παραμένουν υποκρίσιμες στη ευρύτερη περιοχή του εμποδίου.

Ένας λόγος που οι εξισώσεις του Yarnell (1934) έτυχαν τόσο ευρείας αποδοχής είναι πιθανώς ο μεγάλος αριθμός πειραμάτων που έκανε. Ο Yarnell πραγματοποίησε 2600 πειράματα σε μεγάλη ανοιχτή διώρυγα. Το κανάλι του είχε πλάτος 3,05m με παροχές μεγαλύτερες από 4,5 m³/s. Τα περισσότερα μεσόβαθρα που χρησιμοποίησε ο Yarnell ήταν ορθογωνικά με πλάτος 35,6 cm και μήκος 1,07 m δίνοντας μια αναλογία (μήκος προς πλάτος) 3:1. Άλλα σχήματα (π.χ ημικύκλια, ορθογώνια τρίγωνα) τα προσέθετε μπροστά και πίσω με αναλογία 4:1 ή μεγαλύτερη.

Ο D'Aubuisson (1852) είχε καταλήξει νωρίτερα σε μία εξίσωση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης. Με το σχήμα 2.4.1 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:

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

όπου Fr_{3c} είναι ο αριθμός Froude στη διατομή 3 κατάντη του μεσόβαθρου όταν προκύπτει κρίσιμη ροή στη διατομή 2 και K_{DA} είναι ο συντελεστής D'Aubuisson εξαρτώμενος από το σχήμα του μεσόβαθρου.



Σχήμα 2.4.1: Μορφή ελεύθερης επιφάνειας στην περιοχή του εμποδίου

Πίνακας 2.4.2: Συντελεστής K κατά D'Aubuisson

Σχήμα μεσόβαθρου	K_N
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

Σύμφωνα με το Rehbock (1919) (από Charbeneau και Holley, 2001, σ. 7) , η εξίσωση για τον υπολογισμό της υπερύψωσης για οποιοδήποτε μεσόβαθρο εντός ορθογωνικού καναλιού και για “κανονική” ροή (για ροή, δηλαδή, όπου το νερό περνάει το μεσόβαθρο ήρεμα) είναι η παρακάτω

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

Όπου δ_0 είναι ο συντελεστής σχήματος κατά Rehbock, οι τιμές του οποίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.4.3: Συντελεστής δ_0 κατά Rehbock

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

Η εξίσωση που πρότεινε ο Nagler (1918) (από Charbeneau και Holley, 2001, σ. 6) για τον υπολογισμό της υπερύψωσης, καθώς και ο πίνακας με τους συντελεστές K είναι:

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

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 παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.4.4: Συντελεστής K_N κατά Nagler

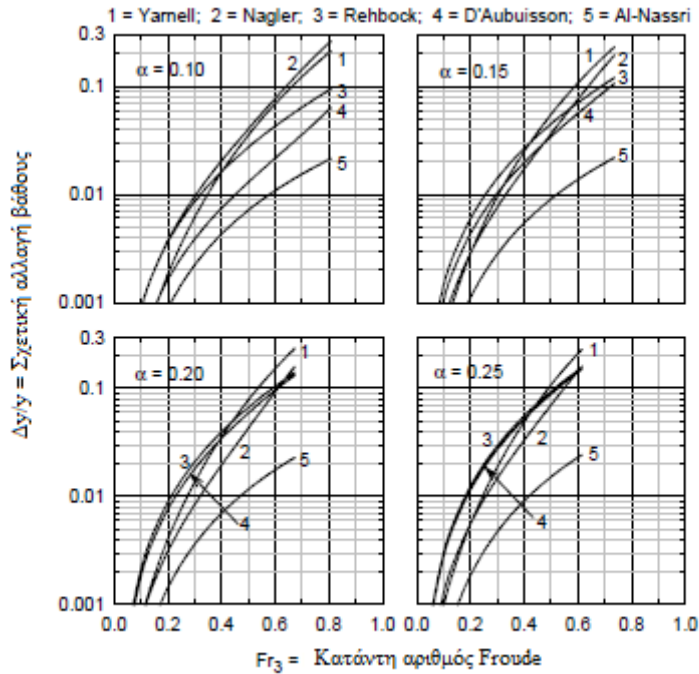
Σχήμα μεσόβαθρου	K_N
Ημικυκλικό μπροστά και πίσω	0,934
Φακοειδές (lens-shaped) μπροστά και πίσω	0,952
Δύο κυλινδρικά με διάφραγμα ($L/D = 4$)	0,907
Δύο κυλινδρικά χωρίς διάφραγμα ($L/D = 4$)	0,892
90° τριγωνικό μπροστά και πίσω	0,887
Τετράγωνο μπροστά και πίσω χωρίς στένωση	0,871

Τέλος, ο Al-Nassri (1994) (από Charbeneau και Holley, 2001, σ. 8) μετά από πρόσφατη έρευνα κατέληξε την παρακάτω εξίσωση

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

όπου φ είναι συντελεστής σχήματος. 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 ορθογώνια μεσόβαθρα, 3,19 για κυκλικά και 5,85 για μεσόβαθρα με ημικυκλική περιοχή μπροστά και πίσω.

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται μία σύγκριση των εξισώσεων 2.2 έως 2.6 για μεσόβαθρα με ημικυκλική μπροστινή και πίσω περιοχή.



Σχήμα 2.4.2: Εμπειρικές σχέσεις για την υπερύψωση (από Charbeneau and Holley, 2001, backwater effects of bridge piers in subcritical flow)

2.5 Προσδιορισμός δυνάμεων αντίστασης σε μεσόβαθρα

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι δυνάμεις αντίστασης στα μεσόβαθρα προκαλούν απώλεια ενέργειας και αύξηση του βάρους ροής ανάντη του εμποδίου στην υποκρίσιμη ροή. Η συνολική δύναμη που ασκείται από τη ροή στο μεσόβαθρο είναι το άθροισμα της αντίστασης τριβής και της κατανομής πίεσης στην επιφάνειά του:

$$F_D = F_f + F_p$$

Όπου η F_f οφείλεται στις διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια του εμποδίου και η F_p στη διαφορά πίεσης μεταξύ της ανάντη και της κατάντη επιφάνειας του εμποδίου.

Η δύναμη αντίστασης μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$F_D = C_D \rho \frac{U^2}{2} A_{pier}$$

όπου C_D ο συντελεστής αντίστασης, ρ η πυκνότητα, U η μέση ταχύτητα της ροής και A η εκτεθειμένη στη ροή μετωπική επιφάνεια του εμποδίου.

Ο συντελεστής αντίστασης εξαρτάται από πολλές παραμέτρους. Η εξάρτηση αυτή μπορεί να παρασταθεί διαστατικά ως εξής:

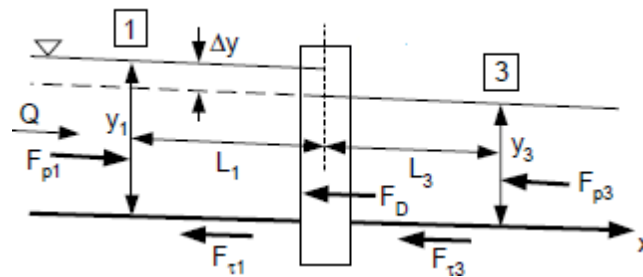
$$C_D = f\left(\text{σχήμα μεσόβαθρου}, Re, \frac{k_p}{B_p}, I_T, Fr, \frac{B_p}{B}, \frac{B_p}{y}\right)$$

όπου Re ο αριθμός Reynolds, B_p το κάθετο στη ροή πλάτος του εμποδίου, k_p η τραχύτητα της επιφάνειας του εμποδίου, I_T η ένταση της τύρβης και Fr ο αριθμός Froude. Οι όροι k_p/B_p , B_p/B και B/y σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι ο υπολογισμός του συντελεστή αντίστασης είναι εξαιρετικά δυσχερές.

2.6 Προσδιορισμός της δύναμης αντίστασης με την εξίσωση ορμής

Η υπερύψωση (Δy) ανάντη του μεσόβαθρου φαίνεται στο σχήμα 2.4.1. Μία θεωρητική προσέγγιση βασισμένη στην εξίσωση της ορμής μπορεί να δείξει την επίδραση της Δy στην δύναμη αντίστασης στο εμπόδιο. Στο σχήμα 2.6.1 παρακάτω φαίνονται όλες οι δυνάμεις που ασκούνται στο νερό. Συγκεκριμένα η δύναμη αντίστασης στο νερό είναι ίση και αντίθετη με τη δύναμη που ασκείται στο εμπόδιο. Στην παρακάτω ανάλυση θεωρείται ότι η κατανομή της ταχύτητας είναι ομοιόμορφη.



Σχήμα 2.6.1: Δυνάμεις για ιδανικές συνθήκες ροής

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

$$F_{p1} - F_{p3} - F_{t1} - F_{t3} - F_D = \rho Q(U_3 - U_1)$$

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 και αμελώντας τις δυνάμεις λόγω διατμητικών τάσεων έχουμε:

$$F_D = F_{p1} - F_{p2} + \rho \Sigma U_1 Q_1 - \rho \Sigma U_2 Q_2 = \rho \left(g \frac{y_1^2}{2} - g \frac{y_2^2}{2} + \int_A U_1^2 dA - \int_A U_2^2 dA \right)$$

Η δύναμη αντίστασης μπορεί να εκφραστεί και σαν συνάρτηση της υπερύψωσης Δy . Σε ορθογωνικό κανάλι με πλάτος B η πίεση είναι:

$$F_p = F_{p1} - F_{p3} = (pA)_1 - (pA)_3 = \gamma \frac{y_1}{2} y_1 B - \gamma \frac{y_3}{2} y_3 B = \gamma y_3^2 B \left(\frac{\Delta y}{y_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta y}{y_3} \right)^2 \right)$$

Το δεξί μέλος της εξίσωσης ορμής μπορεί να γραφτεί

$$\rho Q (U_3 - U_1) = \rho U_3^2 y_3 B \left(\frac{\Delta y / y_3}{1 + \Delta y / y_3} \right)$$

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

$$F_D = \gamma y_3^2 B \left(\frac{\Delta y}{y_3} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta y}{y_3} \right)^2 \right) - \rho U_3^2 y_3 B \left(\frac{\Delta y / y_3}{1 + \Delta y / y_3} \right)$$

3. Πειραματική Διάταξη

Τα πειράματα έγιναν σε ορθογωνική διώρυγα στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής (Αίθουσα «Γιώργος Νουτσόπουλος») στο ισόγειο του κτηρίου Υδραυλικής, στην Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου.

3.1 Διαστάσεις Διώρυγας

Οι μετρήσεις έγιναν σε ανοιχτή διώρυγα μήκους 11 m με ορθογωνική διατομή πλάτους 25,5 cm και βάθους 50 cm. Ο πυθμένας της διώρυγας είναι καλυμμένος με φύλλο plexiglass και πλευρικά τοιχώματα από γυαλί χωνευτό σε χαλύβδινες εσοχές, έτσι ώστε μήκος 10 cm από χάλυβα να διαδέχεται μήκος 1.30 m γυαλιού εναλλάξ. Ο πυθμένας της διώρυγας είναι οριζόντιος, ενώ το βάθος ροής ελέγχεται από υπερχειλιστή λεπτής στέψεως τοποθετημένο στο κατάντη άκρο της διώρυγας.

Η τροφοδοσία του συστήματος γινόταν από τις δεξαμενές σταθερού φορτίου του εργαστηρίου και ελεγχόταν είτε από την κεντρική δικλείδα είτε από μία δικλείδα μεγαλύτερης ακρίβειας που είναι τοποθετημένη στην είσοδο του καναλιού.

3.2 Εμπόδιο

Το εμπόδιο (μεσόβαθρο) ύψους 35,8 cm είναι κατασκευασμένο από plexiglass. Η οριζόντια διατομή του είναι ορθογωνική διαστάσεων 8,82 cm x 2,18 cm με ημικύκλια διαμέτρου ίσης με το πλάτος κολλημένα στην πρόσθια και οπίσθια στενή πλευρά. Το συνολικό του μήκος είναι 11 cm. Τοποθετήθηκε σε απόσταση επτά μέτρων από την είσοδο του καναλιού με εξασφαλισμένη την πλήρη ανάπτυξη της εισερχόμενης ροής. Κατά πλάτος, ο άξονας του τοποθετήθηκε στο μέσον της διώρυγας.

Η τοποθέτησή του εμποδίου επέτρεπε την περιστροφή του γύρω από τον κατακόρυφο άξονα, στην κορυφή του οποίου είχε τοποθετηθεί μοιρογνωμόνιο που κατάγραφε τη γωνία στροφής του εμποδίου.



Εικόνα 3.2.1 : Μεσόβαθρο

3.3 Μέτρηση Παροχής

Για τη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιήθηκε σε οκτώ σειρές πειραμάτων ο μετρητής Venturi τοποθετημένος οριζόντια στον κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας του εργαστηρίου με διαφορικό μανόμετρο τετραχλωράνθρακα (CCl_4). Η παροχή προσδιοριζόταν από τη σχέση

$$Q = 2,71714\sqrt{\Delta h}$$

όπου Q η παροχή σε l/s και Δh η διαφορά πιέσεων από το μανόμετρο σε mm.



Εικόνα 3.3.1 : Μανόμετρο Venturi

Σε δύο σειρές πειραμάτων το μανόμετρο του Venturi δε λειτουργούσε και έτσι, η παροχή μετρήθηκε με φορητό παροχόμετρο υπερήχων (Flowmeter).

Οι μετρητές υπερήχων είναι μετρητικές διατάξεις που αποτελούνται από πομποδέκτες υπερήχων, τοποθετημένους στον αγωγό της μετρητικής διάταξης. Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται σε παλμούς υπερήχων που μεταδίδονται από ένα πομπό και λαμβάνονται από ένα δέκτη. Χωρίς ροή ένας παλμός από τον πομποδέκτη Α προς τον Β θα ταξιδεύει με την ίδια ταχύτητα ενός παλμού από τον Β προς τον Α. Όταν μέσα στον αγωγό υπάρχει ροή, τότε ο παλμός θα ταξιδεύει με διαφορετική ταχύτητα από ότι αυτός από τον Β προς τον Α. Οι δύο χρόνοι μετάδοσης του παλμού μετρούνται ηλεκτρονικά και με τον τρόπο αυτόν προσδιορίζεται η ταχύτητας κίνησης του ρευστού και ακολούθως η παροχή.

3.4 Μέτρηση Ταχύτητας

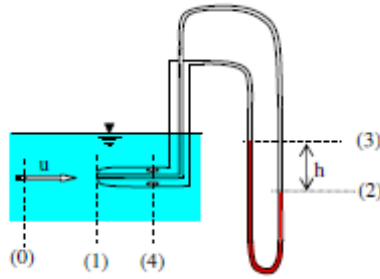
Για τη μέτρηση της ταχύτητας χρησιμοποιήθηκε σωλήνας Pitot. Ο σωλήνας Pitot είναι το κλασσικό όργανο μέτρησης της μέσης ταχύτητας “σημειακά”. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στη μέτρηση της δυναμικής και στατικής πίεσης σε κάποιο σημείο του ρέοντος ρευστού.



Εικόνα 3.4.1 : Σωλήνας Pitot

Η στατική (υδροστατική) συνιστώσα της πίεσης προσδιορίζεται τοποθετώντας ένα κεκαμένο τυφλό σωλήνα παράλληλο στις γραμμές ροής, που διαθέτει μικρές οπές κάθετες στον άξονα του, μακριά από την περιοχή πιθανής αποκόλλησης.

Στο παραπάνω σχήμα έχει τοποθετηθεί ένας σωλήνας Pitot παράλληλα με την κύρια διεύθυνση της ροής.



Σχήμα 3.4.1: Σωλήνας Pitot

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

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

Υδροστατική από (1) έως (2)

$$\frac{p_1}{\rho_1 g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho_1 g} + z_2 \Rightarrow p_1 - p_2 = \rho_1 g(z_2 - z_1)$$

Υδροστατική από (2) έως (3)

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

Υδροστατική από (3) έως (4)

$$\frac{p_3}{\rho_1 g} + z_3 = \frac{p_4}{\rho_1 g} + z_4 \Rightarrow p_3 - p_4 = \rho_1 g(z_4 - z_3)$$

Προσθέτουμε κατά μέλη τις τρεις εξισώσεις και επειδή $z_1 = z_4$

$$p_1 - p_4 = \dots = (\rho_2 - \rho_1)g(z_2 - z_1) = (\Delta\rho)gh$$

Επομένως

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

Όπου $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$

Το βαρύτερο υγρό είναι τετραχλωράνθρακας (CCl_4) που δεν αναμειγνύεται με το νερό. Θεωρώντας τις πυκνότητες νερού και τετραχλωράνθρακα 1000 και 1580 Kg/m^3 αντίστοιχα, η παραπάνω σχέση γράφεται $u = 3,38256\sqrt{h}$ όπου h σε m και u σε m/s.

Επειδή όμως το μανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε σχηματίζει γωνία 25 μοιρών με την οριζόντια, η ένδειξη της διαφοράς στάθμης h πρέπει να πολλαπλασιαστεί με $\sin 25 = 0,4226$.

3.5 Μέτρηση Στάθμης

Μετρήσεις της ελεύθερης επιφάνειας έγιναν τόσο στα ανάντη όσο και στα κατόντη του εμποδίου.

Στα ανάντη η στάθμη μετρήθηκε σε απόσταση 10 cm και 70 cm, όπου το βάθος ροής ήταν ίσο με το μέσο βάθος, από τον άξονα του εμποδίου με χάρακα κολλημένο στο τοίχωμα του καναλιού.

Για τη μέτρηση της ελεύθερης επιφάνειας στα κατόντη χρησιμοποιήθηκε σταθμήμετρο τύπου ακίδας ακρίβειας 0,1 mm, καθώς είχε προσαρμοσμένο διαστημόμετρο με βερνιέρο που κινείται τόσο κατακόρυφα, όσο και οριζόντια. Η πρώτη θέση μέτρησης ήταν 45 cm κατόντη του άξονα του εμποδίου και η τελευταία 90 cm. Το διάστημα μεταξύ των μετρήσεων ήταν 10 cm. Μετά τα 70 cm παρατηρήθηκε σταθεροποίηση της στάθμης, γι' αυτό και οι μετρήσεις περιορίστηκαν σε απόσταση 90 cm.



Εικόνα 3.5.1 : Σταθμήμετρο τύπου ακίδας

4. Πειραματική Διαδικασία

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο έγιναν οι μετρήσεις, καθώς και οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Έγιναν δέκα σειρές πειραματικών μετρήσεων. Στις πρώτες πέντε η παροχή ήταν περίπου 22 l/s και στις επόμενες περίπου 31 l/s. Σε κάθε σειρά άλλαζε η γωνία στροφής του μεσόβαθρου. Μετρήσεις έγιναν για πέντε διαφορετικές γωνίες στροφής, 0, 15, 20, 25, 30 μοίρες.

4.1 Υπολογισμός Ταχύτητας

Για τη μέτρηση της ταχύτητας έγινε χρήση σωλήνα Pitot, ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με κεκλιμένο διαφορικό μανόμετρο τετραχλωράνθρακα ($\theta = 25^\circ$). Ο σωλήνας Pitot τοποθετούνταν σε 90 σημεία εντός δύο διατομών της διώρυγας, μία ανάντη και μία κατάντη του μεσόβαθρου. Σε κάθε σημείο καταγράφηκε η στάθμη του τετραχλωράνθρακα στους γυάλινους σωλήνες στους οποίους καταλήγουν οι εύκαμπτοι σωλήνες από το μετρητή Pitot. Συγκεκριμένα, η κατανομή της ταχύτητας μετρήθηκε καθ' ύψος σε πέντε διαφορετικές θέσεις σε κάθε διατομή. Μετρήσεις έγιναν στον άξονα συμμετρίας της διατομής και σε αποστάσεις 6,25 cm και 9,25cm από τον άξονα και εκατέρωθεν αυτού. Σε κάθε μία από τις παραπάνω διατομές έγιναν μετρήσεις σε 18 βάθη. Τα σημεία των μετρήσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.1.1: Σημεία μετρήσεων

		Απόσταση από άξονα (cm)				
		9,25	6,25	0 (μέσον)	-6,25	-9,25
Βάθη (cm)	0	0	0	0	0	
	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
	1	1	1	1	1	
	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	
	2	2	2	2	2	
	3	3	3	3	3	
	4	4	4	4	4	
	5	5	5	5	5	
	6	6	6	6	6	
	7	7	7	7	7	
	8	8	8	8	8	
	9	9	9	9	9	
	10	10	10	10	10	
	12	12	12	12	12	
	14	14	14	14	14	
	16	16	16	16	16	
	18	18	18	18	18	

Στη συνέχεια, με χρήση του παρακάτω τύπου, υπολογίζοταν η ταχύτητα σε κάθε σημείο.

$$u = \sqrt{2 \frac{\Delta\rho}{\rho_1} g h \sin(25)}$$

όπου $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$, $\rho_2 = 1580 \text{ Kg/m}^3$ και $\rho_1 = 1000 \text{ Kg/m}^3$ και h (m) η διαφορά των ενδείξεων του μανόμετρου.

4.2 Υπολογισμός Παροχής με Αριθμητική Ολοκλήρωση

Ο υπολογισμός έγινε με αριθμητική ολοκλήρωση των μετρημένων ταχυτήτων με βάση τη σχέση $Q = \int_A u dA$. Προκειμένου να γίνει η ολοκλήρωση οι διατομές χωρίστηκαν σε επιμέρους εμβαδά όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Αριθμητική ολοκλήρωση έγινε τόσο ανάντη, όσο και κατάντη του μεσόβαθρου. Στους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκε η ανάντη παροχή.

*Στις δύο ακριανές διατομές δίπλα στα τοιχώματα θεωρήθηκε τριγωνική κατανομή ταχυτήτων (μηδενική ταχύτητα στο όριο).

Έτσι τα εμβαδά που προκύπτουν είναι:

Πίνακας 4.2.1: Εμβαδά ολοκλήρωσης (m²)

A/A Διατομής	1'	1	2	3	4	5	5'
x(cm)/y(cm)	10,75	9,25	6,25	0	-6,25	-9,25	-10,75
0	0,0001	0,00015	0,00015	0,000475	0,00015	0,00015	0,0001
0,5	0,0001	0,00015	0,00015	0,000475	0,00015	0,00015	0,0001
1	0,0001	0,00015	0,00015	0,000475	0,00015	0,00015	0,0001
1,5	0,0001	0,00015	0,00015	0,000475	0,00015	0,00015	0,0001
2	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
3	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
4	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
5	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
6	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
7	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
8	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
9	0,0002	0,0003	0,0003	0,00095	0,0003	0,0003	0,0002
10	0,0004	0,0006	0,0006	0,0019	0,0006	0,0006	0,0004
12	0,0004	0,0006	0,0006	0,0019	0,0006	0,0006	0,0004
14	0,0004	0,0006	0,0006	0,0019	0,0006	0,0006	0,0004
16	0,0004	0,0006	0,0006	0,0019	0,0006	0,0006	0,0004
18	0,0003	0,00045	0,00045	0,001425	0,00045	0,00045	0,0003

4.3 Έλεγχος Μείωσης Πλάτους

Σε ορθογωνική διάφυρα για υποκρίσιμη ροή υπάρχει μία μέγιστη τιμή της στένωσης του πλάτους πάνω από την οποία δεν είναι δυνατή η ροή. Είναι δυνατόν να γράψουμε την ελάχιστη τιμή του λόγου b_{min}/B σαν συνάρτηση του αριθμού Froude στα ανάντη της ροής, ώστε να διέρχεται η δεδομένη παροχή Q . Έχουμε την εξίσωση:

$$b_{min} = \frac{3}{2} \frac{Q}{E_1^{\frac{3}{2}}} \sqrt{\frac{3}{2g}} \Leftrightarrow \frac{b_{min}}{B} = \frac{Q}{b\sqrt{g}} \left(\frac{3}{2E_1}\right)^{\frac{3}{2}} = \frac{U_1 y_1^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{g y_1}} \left(\frac{3}{2E_1}\right)^{\frac{3}{2}} = F_1 \left(\frac{3y_1}{2E_1}\right)^{\frac{3}{2}} = \dots$$

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

Για γωνία μεσοβάθρου και διεύθυνσης της ροής 30° προκύπτει ότι το ελεύθερο πλάτος της διατομής είναι $25-6,59=18,91$ cm. Για να μην εμποδίζεται η ροή από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι ο μέγιστος αριθμός Froude είναι 0.473. Παρ' όλα αυτά υπήρξε πείραμα με αριθμό Froude 0.497 που οριακά επηρεάζει την υπερύψωση της ροής. Κατά κανόνα πάντως, δεν υπάρχει παρεμπόδιση της ροής λόγω μείωσης πλάτους που προκαλεί το εμπόδιο.

4.4 Υπολογισμός Δύναμης Αντίστασης

Ο υπολογισμός της δύναμης αντίστασης έγινε χρησιμοποιώντας το θεώρημα διατήρησης της ορμής, όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο:

$$F_D = F_{p1} - F_{p2} + \rho \Sigma U_1 Q_1 - \rho \Sigma U_2 Q_2 = \rho \left(g \frac{y_1^2}{2} - g \frac{y_2^2}{2} + \int_A U_1^2 dA - \int_A U_2^2 dA \right)$$

όπου F_{pi} οι υδροστατικές πιέσεις. Οι όροι με δείκτη 1 αναφέρονται στις συνθήκες ανάντη του μεσόβαθρου, ενώ αυτοί με δείκτη 2 στις κατάντη.

Ο όρος ρU_i^2 υπολογίστηκε σε κάθε σημείο της διατομής που έγιναν μετρήσεις και στη συνέχεια, αθροίζοντας όλους τους όρους και εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση προέκυψε η δύναμη αντίστασης.

4.5 Υπολογισμός του Συντελεστή Αντίστασης

Για τον υπολογισμό του συντελεστή αντίστασης έγινε χρήση του παρακάτω τύπου

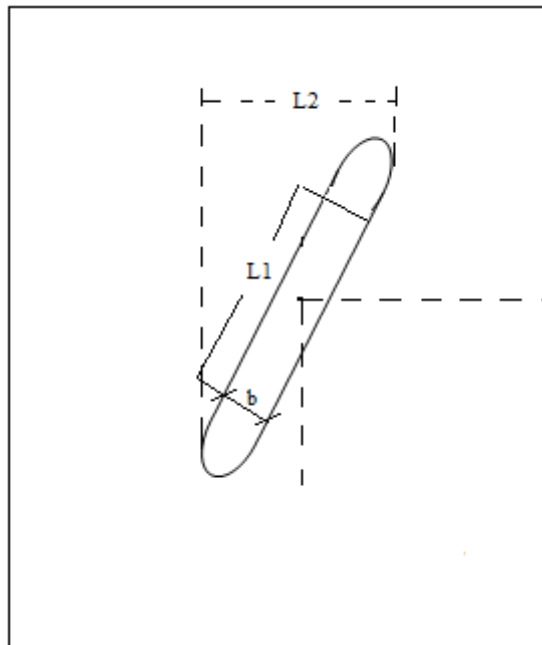
$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 A_{pier}}$$

όπου F_D η δύναμη αντίστασης σε N, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ η πυκνότητα του νερού, U η μέση ταχύτητα ροής ανάντη του μεσόβαθρου και A_{pier} η μετωπική στη ροή επιφάνεια του μεσόβαθρου όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.

Ο υπολογισμός της μετωπικής επιφάνειας έγινε χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο

$$A_{pier} = [2r + L_1 \sin(\varphi)]y_1 = L_2 y_1$$

όπου $2r = b = 2,18 \text{ cm}$ και $L_1 = 8,82 \text{ cm}$



Σχήμα 4.5.1: Μετωπική επιφάνεια μεσόβαθρου

5. Ανάλυση και Αποτελέσματα

5.1 Διαδικασία Ανάλυσης

Θα περιγραφεί εδώ η πορεία που ακολουθήθηκε τόσο στην πειραματική διαδικασία, όσο και στην ανάλυση.

Έγιναν δέκα σειρές μετρήσεων, πέντε με παροχή ~ 22 l/s για πέντε διαφορετικές γωνίες του μεσόβαθρου σε σχέση με τη διεύθυνση της ροής και τα υπόλοιπα με παροχή ~ 31 l/s για τις ίδιες γωνίες. Αρχικά, επιλεγόταν η γωνία στροφής του μεσόβαθρου και εν συνεχεία ρυθμιζόταν η παροχή από βάννα με τη βοήθεια της συσκευής Venturi. Έπειτα, τοποθετούνταν ο σωλήνας Pitot στα ανάντη και κατόντη του μεσόβαθρου και μετρούνταν η ταχύτητα σε ένα κάρναβο σημείων της διατομής.

Πρώτο βήμα της ανάλυσης των μετρήσεων ήταν ο υπολογισμός των ταχυτήτων από τις ενδείξεις πιεζόμετρου συνδεδεμένου με το σωλήνα Pitot, καθώς και ο υπολογισμός της παροχής με αριθμητική ολοκλήρωση και στις δύο διατομές. Στη συνέχεια, γινόταν εφαρμογή του θεωρήματος της ορμής για τον υπολογισμό της δύναμης αντίστασης. Έπειτα, υπολογίζονταν η υπερύψωση και ο συντελεστής αντίστασης.

5.2 Πειράματα

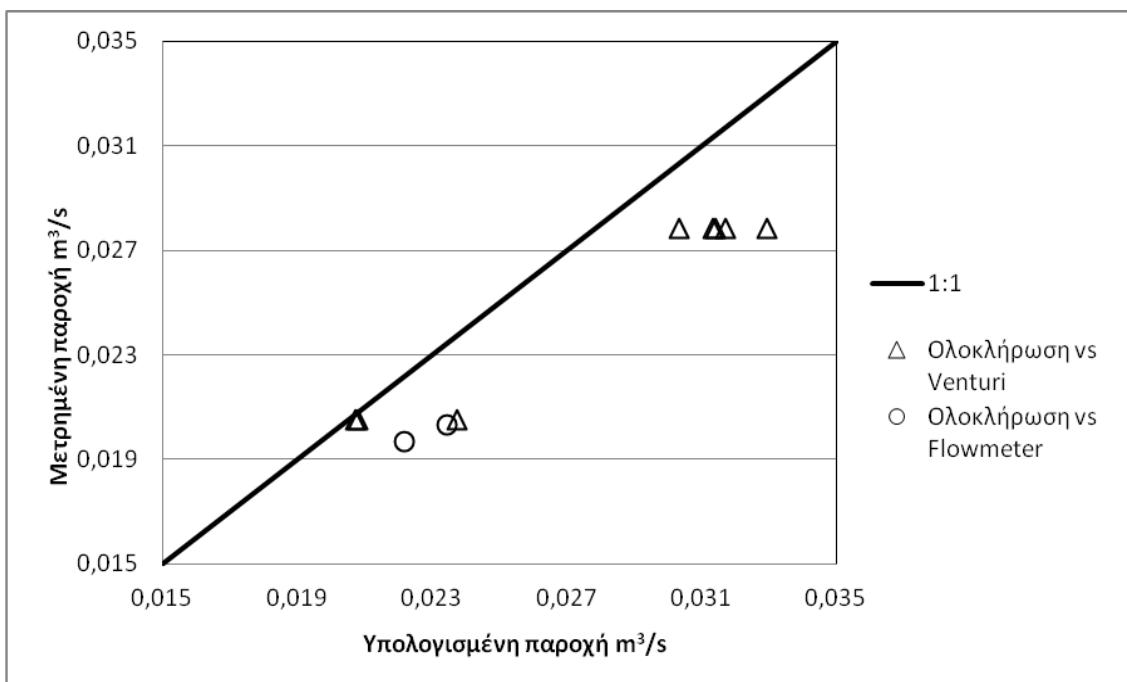
Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά τα βασικά στοιχεία και αποτελέσματα κάθε πειράματος.

Πείραμα	ϕ	Q_{venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$y_{\text{αν}}$ (cm)	$y_{\text{κατ}}$ (cm)	$U_{\mu,\text{αν}}$ (m/s)	$U_{\mu,\text{κατ}}$ (m/s)	$Fr_{\text{αν}}$	$Fr_{\text{κατ}}$	Δy (cm)	F (N)	L_2 (cm)	C_D
1	0	20,514	20,738	20,704	19,60	19,50	0,440	0,448	0,318	0,324	0,072	0,488	2,180	1,182
2	15	20,514	20,811	20,851	19,72	19,61	0,436	0,450	0,313	0,324	0,072	0,502	4,463	0,601
3	20	20,514	23,741	23,801	19,55	19,40	0,488	0,501	0,352	0,363	0,087	0,985	5,197	0,816
4	25	20,333	23,446	23,406	19,25	19,12	0,483	0,497	0,352	0,363	0,079	1,373	5,907	1,037
5	30	19,967	22,160	22,168	18,85	18,71	0,485	0,506	0,366	0,383	0,087	1,037	6,590	0,711
6	0	27,842	30,332	30,301	19,72	19,55	0,615	0,623	0,442	0,450	0,141	0,833	2,180	1,027
7	15	27,842	31,402	31,457	20,53	20,35	0,608	0,627	0,430	0,459	0,153	0,892	4,463	0,528
8	20	27,842	31,346	31,307	19,69	19,55	0,632	0,652	0,455	0,471	0,166	0,880	5,197	0,432
9	25	27,842	31,724	31,699	19,91	19,62	0,640	0,663	0,458	0,478	0,277	1,626	5,907	0,676
10	30	27,842	32,943	32,937	20,00	19,65	0,665	0,690	0,474	0,497	0,313	1,732	6,590	0,596

Στα πειράματα 4 και 5 η μέτρηση της παροχής έγινε με Flowmeter υπερήχων.

5.3 Σύγκριση Παροχών

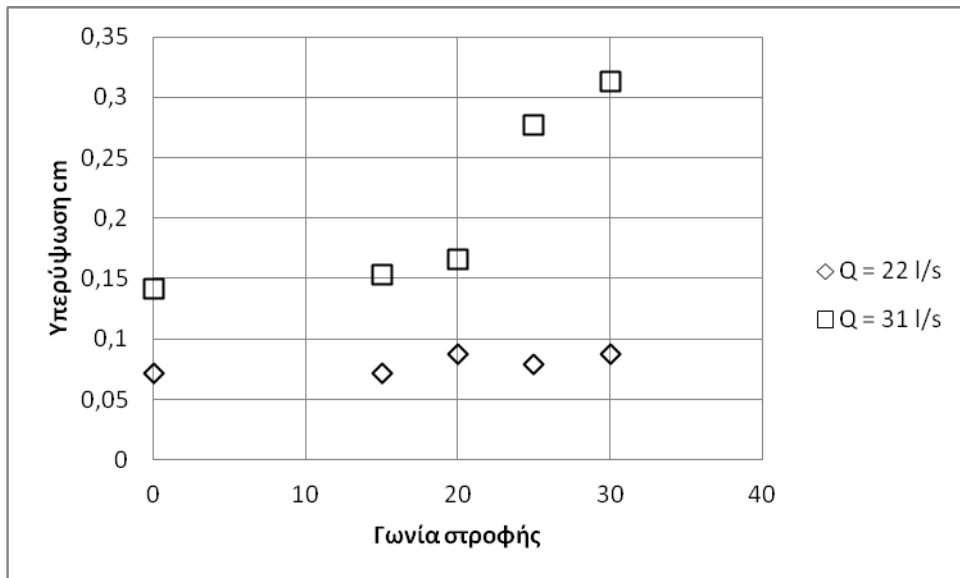
Η ρύθμιση και μέτρηση της παροχής στο εργαστήριο έγινε με συσκευή Venturi στις πρώτες οκτώ σειρές πειραμάτων και με φορητό παροχόμετρο υπερήχων στις υπόλοιπες δύο. Κατά την ανάλυση υπολογίστηκε η παροχή με αριθμητική ολοκλήρωση των μετρημένων ταχυτήτων, τόσο ανάντη όσο και κατόντη του μεσόβαθρου. Οι διαφορές των δύο παραπάνω παροχών είναι μικρές, της τάξης του 0,01 l/s. Οι τιμές της παροχής που προέκυψαν από την ολοκλήρωση των ταχυτήτων στα ανάντη συγκρίθηκαν για κάθε πείραμα και διαπιστώθηκε ότι τόσο η παροχή που προέκυπτε από το Venturi, όσο και αυτή του Flowmeter ήταν μικρότερη από αυτήν που προέκυπτε από την αριθμητική ολοκλήρωση. Συγκεκριμένα, η μεγαλύτερη διαφορά από τις τιμές του Venturi που προέκυψε σε πείραμα ήταν της τάξης του 16%, ενώ για το Flowmeter η διαφορά αυτή είναι της τάξης του 9%. Τα παραπάνω αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο διάγραμμα.



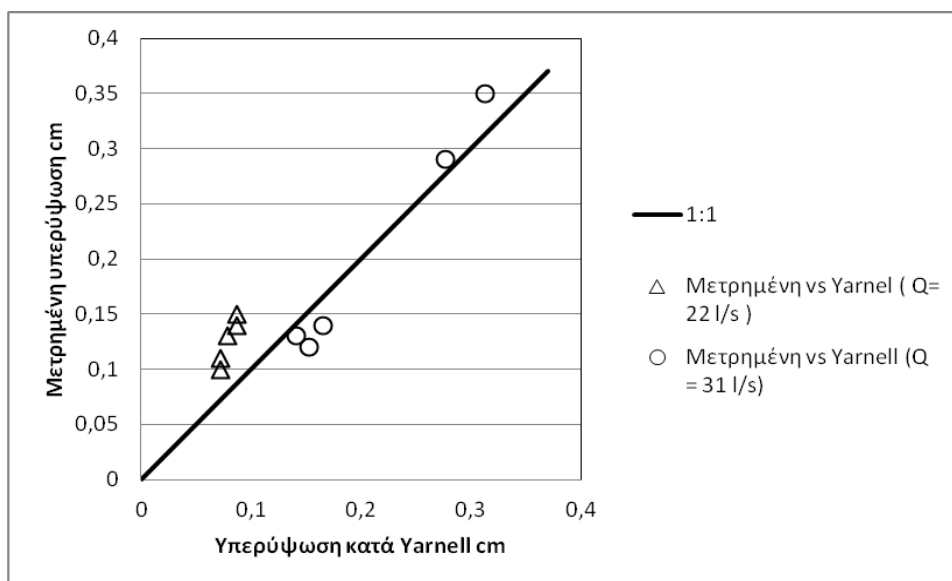
Σχήμα 5.3.1: Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης παροχής

5.4 Υπερύψωση

Σε κάθε πείραμα μετρούνταν η στάθμη ανάντη και κατόντη του εμποδίου. Η διαφορά των δύο αναφέρεται ως μετρημένη υπερύψωση. Υπολογισμός της υπερύψωσης έγινε και κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας τον τύπο του Yarnell. Στο σχήμα 5.4.1 φαίνονται οι τιμές της υπερύψωσης που υπολογίστηκαν από τον τύπο του Yarnell, ενώ στο σχήμα 5.4.2 γίνεται μια σύγκριση της μετρημένης με την υπολογισμένη υπερύψωση.



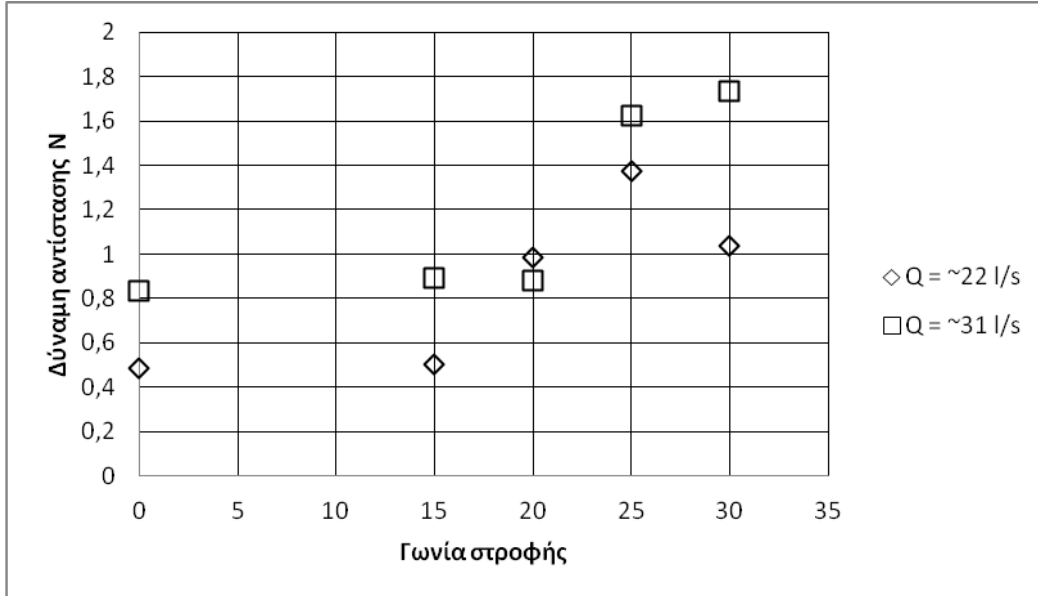
Σχήμα 5.4.1: Υπερύψωση για τις διάφορες γωνίες στροφής



Σχήμα 5.4.3 : Σύγκριση μετρημένης και υπολογισμένης υπερύψωσης

5.5 Δύναμη αντίστασης

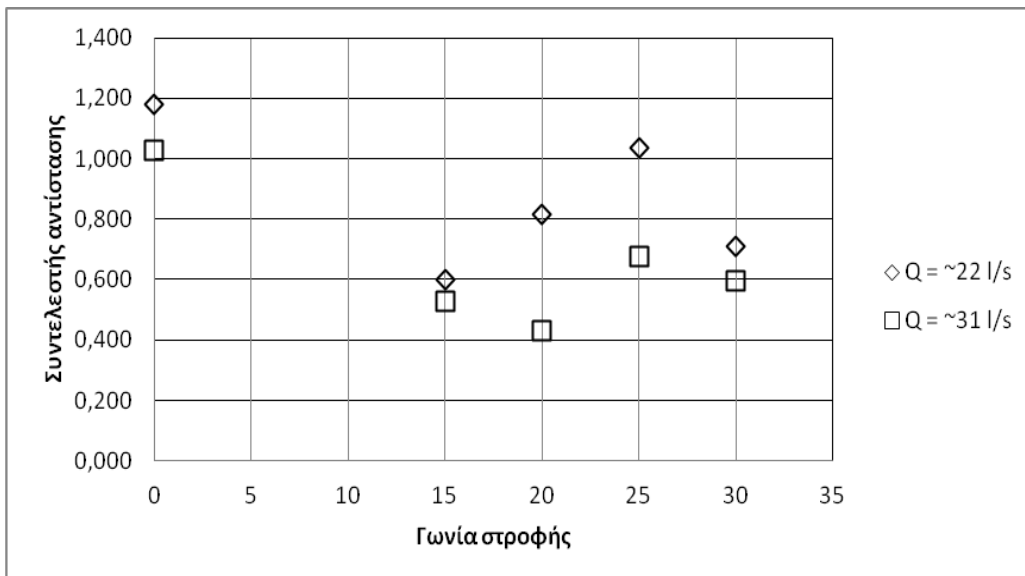
Γενικά, παρατηρήθηκε αύξηση της δύναμης αντίστασης με την αύξηση της γωνίας στροφής. Τα αποτελέσματα της δύναμης αντίστασης σε σχέση με τη γωνία στροφής φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.5.1: Δύναμη αντίστασης για διάφορες γωνίες στροφής

5.6 Συντελεστής αντίστασης

Τα αποτελέσματα του συντελεστή αντίστασης για τις διάφορες γωνίες στροφής του μεσόβαθρου φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 5.6.1: Συντελεστής αντίστασης για διάφορες γωνίες στροφής

6. Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε προσπάθεια να μελετηθεί πειραματικά η ροή γύρω από μεσόβαθρο γέφυρας υπό γωνία. Συγκεκριμένα, σκοπός ήταν ο υπολογισμός της υπερύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας στα ανάντη του μεσόβαθρου, της δύναμης αντίστασης που ασκείται στο νερό και του συντελεστή αντίστασης και πως αλλάζουν τα παραπάνω για τις διάφορες γωνίες στροφής του μεσόβαθρου. Για να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα από την παρούσα εργασία έγιναν δέκα σειρές πειραμάτων. Τα πρώτα πέντε πειράματα έγιναν με μέση παροχή περίπου 22 l/s και για πέντε διαφορετικές γωνίες στροφής και τα υπόλοιπα πέντε για τις ίδιες γωνίες στροφής με μέση παροχή περίπου 31 l/s.

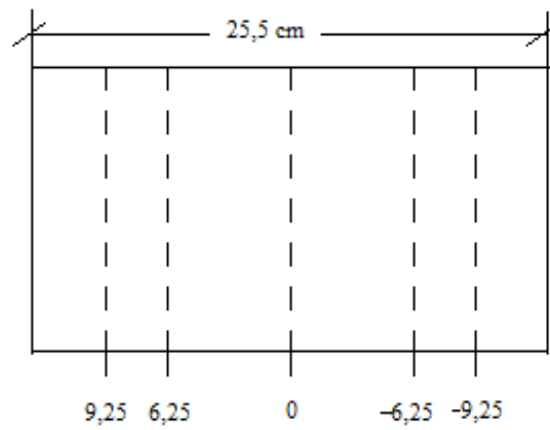
Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγουμε από την εργασία αυτή είναι τα παρακάτω:

- Η κατανομή ταχυτήτων κατάντη του μεσόβαθρου είναι συμμετρική, ενώ στα ανάντη η μέγιστη ταχύτητα παρατηρείται κοντά στο αριστερό όριο της διατομής.
- Η υπερύψωση της ελεύθερης επιφάνειας στα πειράματα με παροχή 22 l/s είναι σχεδόν σταθερή και περίπου 0,8 cm για κάθε γωνία στροφής. Καταλήγουμε, έτσι, στο συμπέρασμα ότι για αριθμούς Froude 0,313 έως 0,366 η ανύψωση δεν ξεπερνά το 5% της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας. Όμως, στα πειράματα με τη μεγαλύτερη παροχή (31 l/s) παρατηρήθηκε αύξηση της υπερύψωσης όσο μεγάλωνε η γωνία στροφής του μεσόβαθρου.
- Σχετικά με τη δύναμη αντίστασης διαπιστώθηκε ότι, τείνει να αυξάνεται όσο μεγαλώνει η γωνία στροφής του μεσόβαθρου.
- Όσον αφορά το συντελεστή αντίστασης έχει μέση τιμή κοντά στη μονάδα (0,8). Περαιτέρω συμπεράσματα δεν μπορούν να εξαχθούν. Αυτό συμβαίνει, είτε γιατί θα έπρεπε να γίνουν περισσότερα πειράματα για να έχουμε σαφή εικόνα, είτε θα έπρεπε να εκτελέσουμε πειράματα με μεγαλύτερες ταχύτητες ροής.

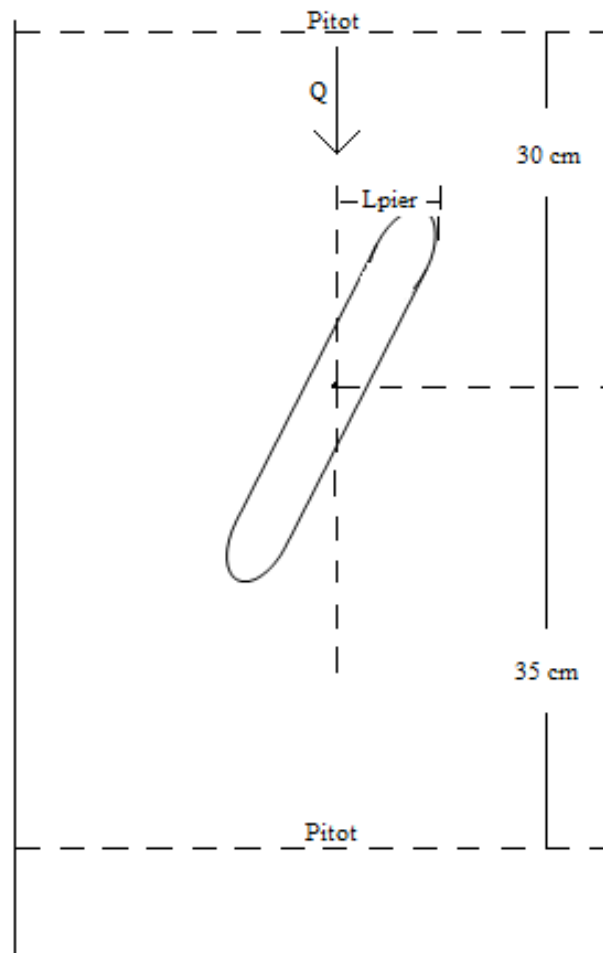
7. Αναφορές

- Νουτσόπουλος, Γ., Ν. Χριστοδούλου, 1996. *Μαθήματα Μηχανικής των Ρευστών*. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Παπανικολάου, Π., 2010. *Στοιχεία μόνιμης ροής σε αγωγούς υπό πίεση & σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια*. Διδακτικές σημειώσεις: έκδοση 1, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.
- Benn, J. R., P. Mantz, R. Lamb, J. Riddell, C. Nalluri, 2004. *Afflux at bridges and culverts*. Defra/Environmental Agency, UK.
- Charbeneau, R. J., E. R. Holley, 2001. *Backwater effects of bridge piers in subcritical flow*. Center for Transportation Research, Texas.
- D' Aubuisson de Voisins, J. F., 1852. *A treatise on Hydraulics for the use of engineers*, Translated from French and adapted to English units by J. Bennett, Boston, 532.
- Defina, A., F. M. Susin, 2006. Multiple states in open channel flow. *Wessex Institute of Technology in Press*, United Kingdom, 105-130.
- Fenton, J. D. 2005. On the energy and momentum principles in hydraulics, *Proc. 31st IAHR Congress*, 11-16 IAHR, Seoul, 625–636.
- Fenton, J. D. 2003. The effects of obstacles on surface levels and boundary resistance in open channels, *Proc. 30th IAHR Congress*, Thessaloniki, Vol. C2, 9–16.
- Fenton, J. D., 2008. Obstacles in streams and their roles as hydraulic structures, *Hydraulic Structures – Proc. 2nd International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures*, Pisa, Italy, 15-22.
- Kassem, L., 2009. Backwater rise due to flow constriction by bridge piers. *13th International Water Technology Conference, IWTC 13*, Hurghada, Egypt.
- Yarnell, D. L., 1934. Bridge piers as channel obstructions, *U. S. Dept of Agriculture ,Technical Bulletin*, U.S.A., 442-451.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ



Σχήμα Π-1 : Τομή διώρυγας – Σημεία μετρήσεων



Σχήμα Π-2 : Κάτοψη διώρυγας – Σημεία μετρήσεων

Πείραμα 1

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
0	20,51	20,73	20,70	19,60	19,50

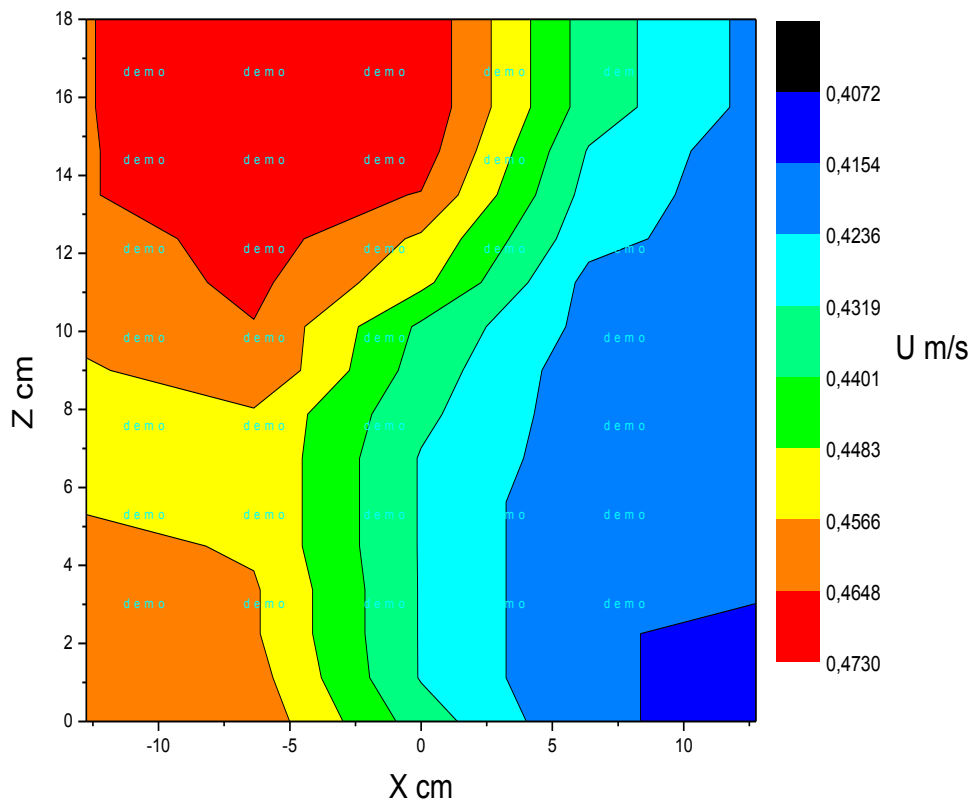
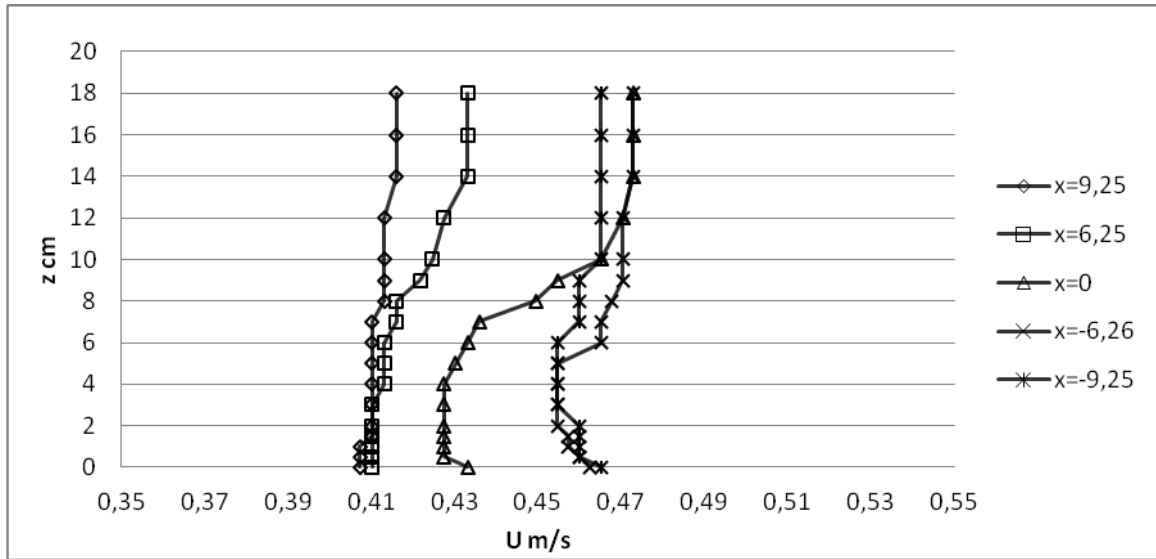
1.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,440	0,318

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,465	0,463	0,433	0,410	0,407
0,5	0,460	0,460	0,427	0,410	0,407
1	0,460	0,457	0,427	0,410	0,407
1,5	0,460	0,457	0,427	0,410	0,410
2	0,460	0,455	0,427	0,410	0,410
3	0,455	0,455	0,427	0,410	0,410
4	0,455	0,455	0,427	0,413	0,410
5	0,455	0,455	0,430	0,413	0,410
6	0,455	0,465	0,433	0,413	0,410
7	0,460	0,465	0,436	0,416	0,410
8	0,460	0,468	0,449	0,416	0,413
9	0,460	0,470	0,455	0,422	0,413
10	0,465	0,470	0,465	0,425	0,413
12	0,465	0,470	0,470	0,427	0,413
14	0,465	0,473	0,473	0,433	0,416
16	0,465	0,473	0,473	0,433	0,416
18	0,465	0,473	0,473	0,433	0,416

Κατανομή ταχυτήτων



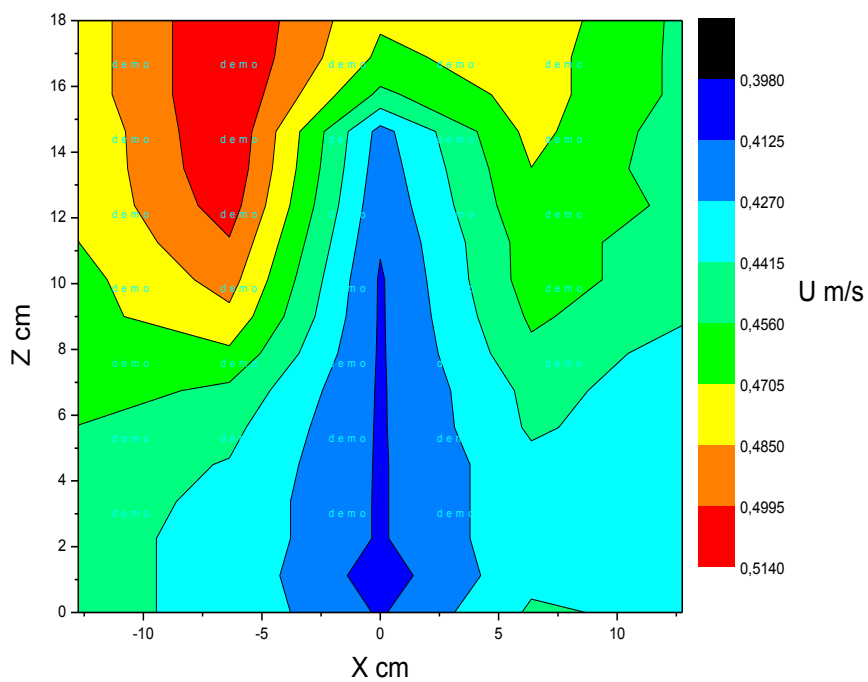
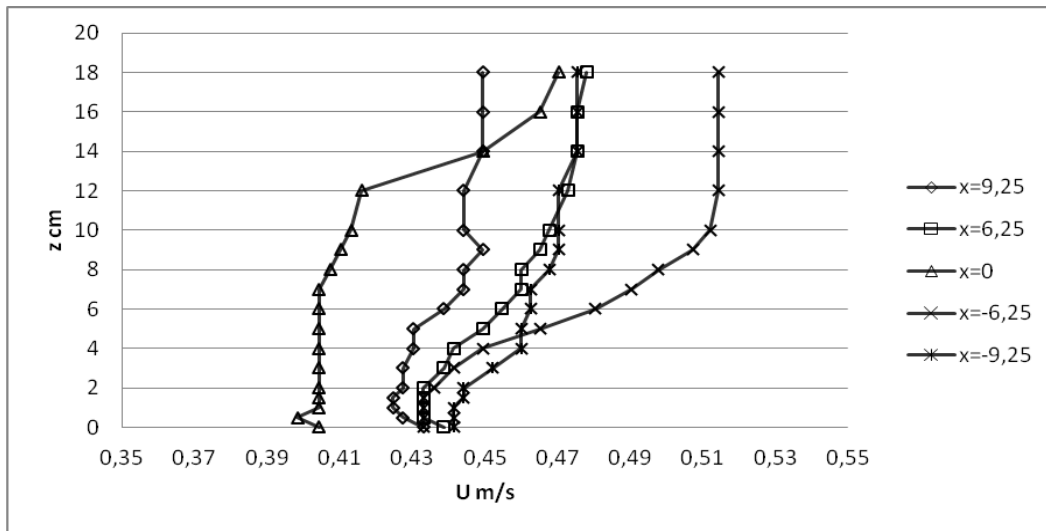
1.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,448	0,324

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,441	0,433	0,404	0,439	0,433
0,5	0,441	0,433	0,398	0,433	0,427
1	0,441	0,433	0,404	0,433	0,425
1,5	0,444	0,433	0,404	0,433	0,425
2	0,444	0,436	0,404	0,433	0,427
3	0,452	0,441	0,404	0,439	0,427
4	0,460	0,449	0,404	0,441	0,430
5	0,460	0,465	0,404	0,449	0,430
6	0,463	0,480	0,404	0,455	0,439
7	0,463	0,490	0,404	0,460	0,444
8	0,468	0,498	0,407	0,460	0,444
9	0,470	0,507	0,410	0,465	0,449
10	0,470	0,512	0,413	0,468	0,444
12	0,470	0,514	0,416	0,473	0,444
14	0,475	0,514	0,449	0,475	0,449
16	0,475	0,514	0,465	0,475	0,449
18	0,475	0,514	0,470	0,478	0,449

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,072	47,954	47,466	0,488	1,182

Πείραμα 2

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
15	20,51	20,81	20,79	19,72	19,61

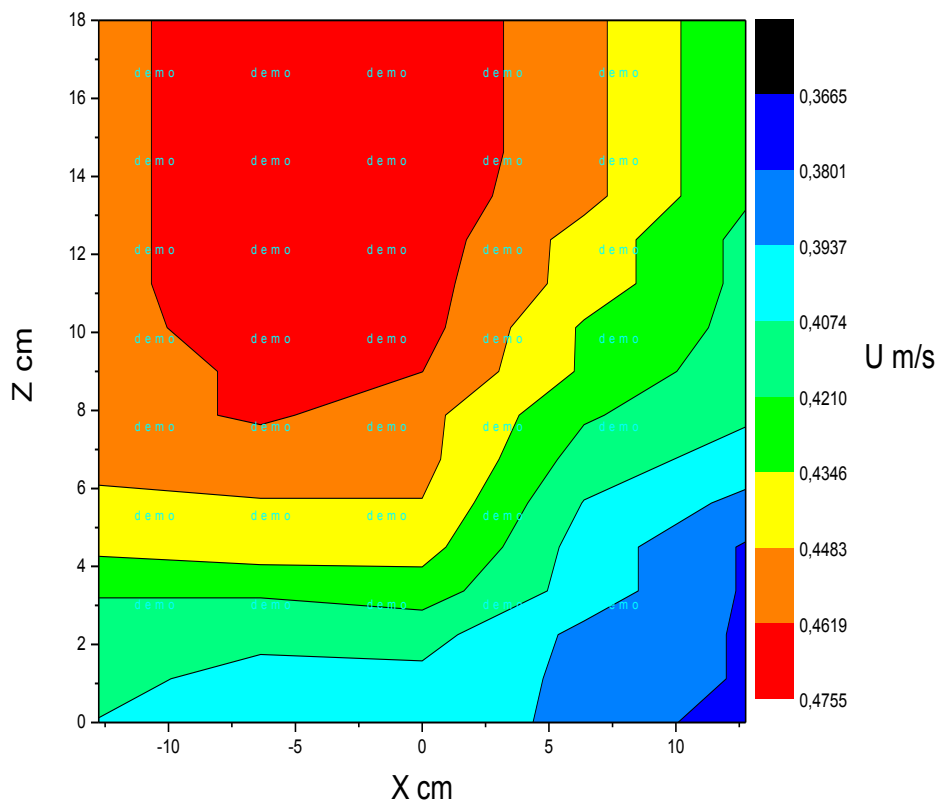
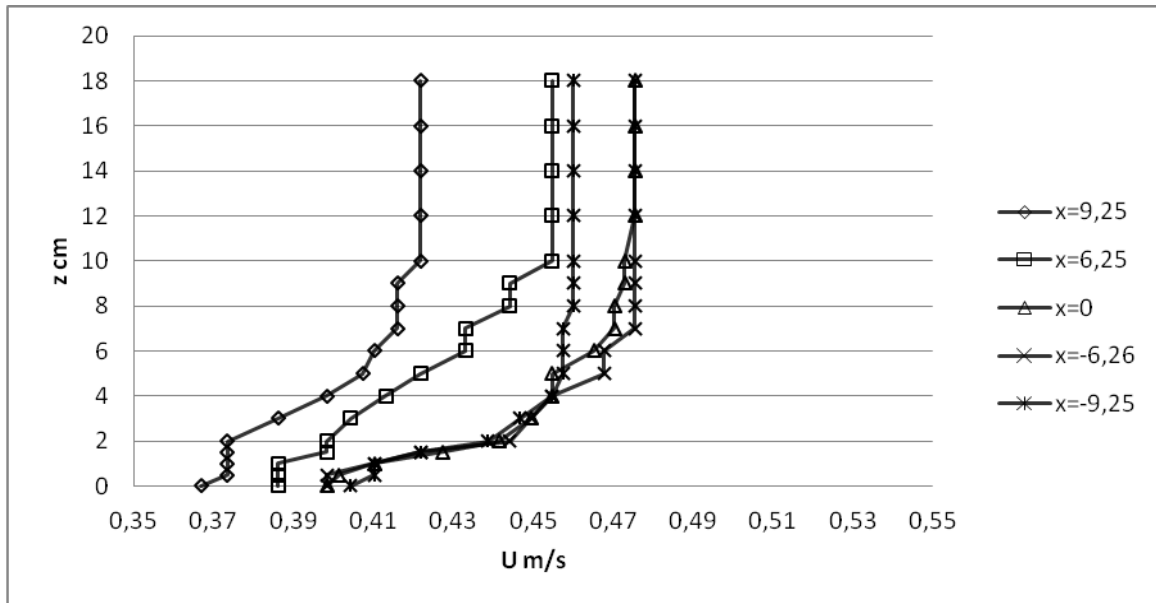
2.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,436	0,313

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,404	0,398	0,398	0,386	0,367
0,5	0,410	0,398	0,401	0,386	0,373
1	0,410	0,410	0,410	0,386	0,373
1,5	0,422	0,422	0,427	0,398	0,373
2	0,439	0,444	0,441	0,398	0,373
3	0,447	0,449	0,449	0,404	0,386
4	0,455	0,455	0,455	0,413	0,398
5	0,457	0,468	0,455	0,422	0,407
6	0,457	0,468	0,465	0,433	0,410
7	0,457	0,475	0,470	0,433	0,416
8	0,460	0,475	0,470	0,444	0,416
9	0,460	0,475	0,473	0,444	0,416
10	0,460	0,475	0,473	0,455	0,422
12	0,460	0,475	0,475	0,455	0,422
14	0,460	0,475	0,475	0,455	0,422
16	0,460	0,475	0,475	0,455	0,422
18	0,460	0,475	0,475	0,455	0,422

Κατανομή ταχυτήτων



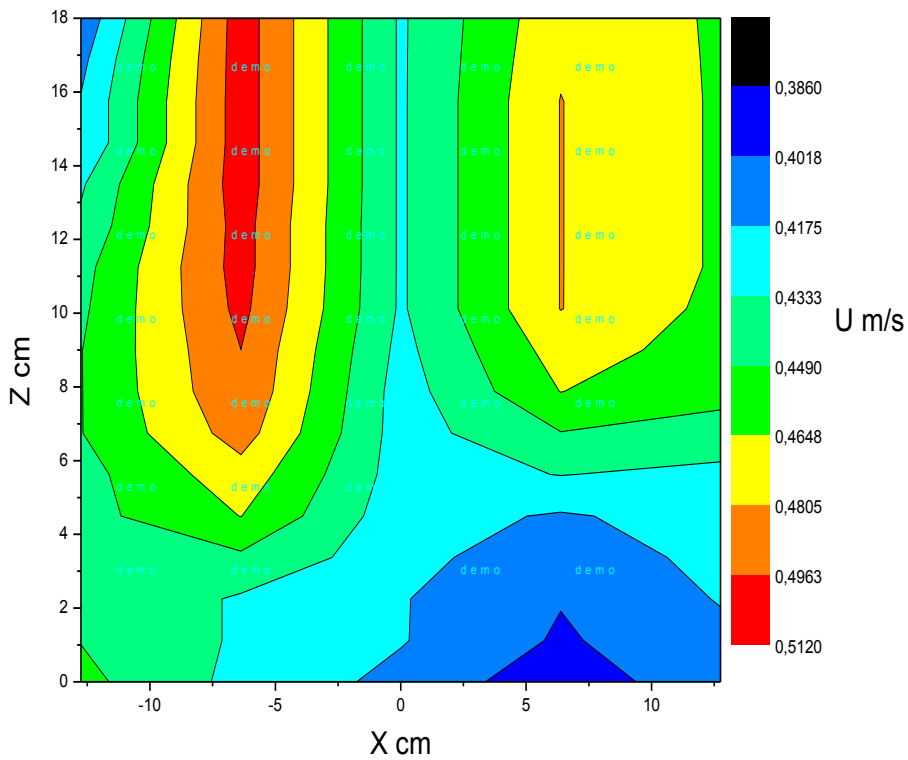
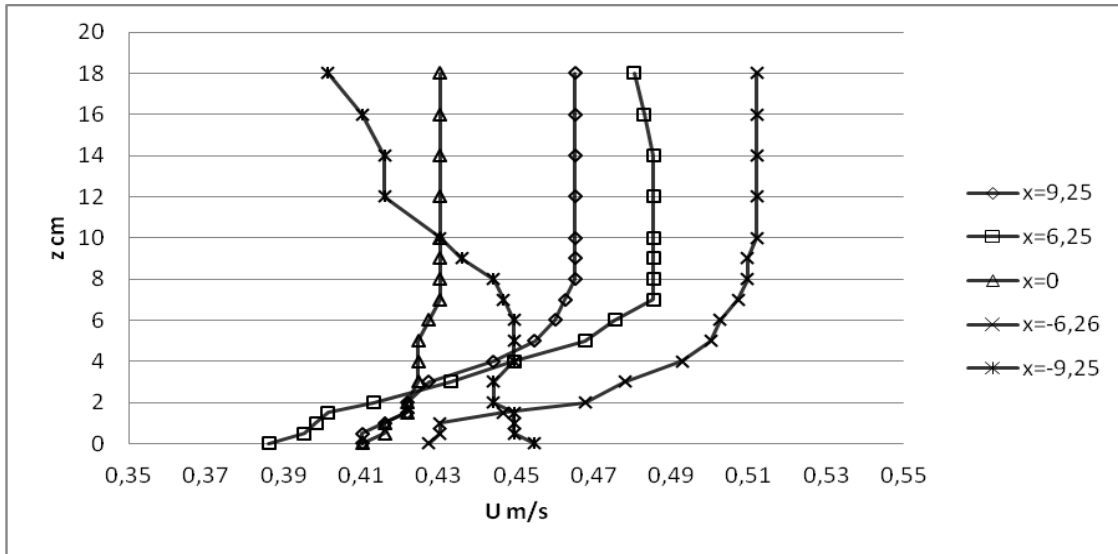
2.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,450	0,324

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,455	0,427	0,410	0,386	0,410
0,5	0,449	0,430	0,416	0,395	0,410
1	0,449	0,430	0,416	0,398	0,416
1,5	0,449	0,447	0,422	0,401	0,422
2	0,444	0,468	0,422	0,413	0,422
3	0,444	0,478	0,425	0,433	0,427
4	0,449	0,493	0,425	0,449	0,444
5	0,449	0,500	0,425	0,468	0,455
6	0,449	0,502	0,427	0,475	0,460
7	0,447	0,507	0,430	0,485	0,463
8	0,444	0,510	0,430	0,485	0,465
9	0,436	0,510	0,430	0,485	0,465
10	0,430	0,512	0,430	0,485	0,465
12	0,416	0,512	0,430	0,485	0,465
14	0,416	0,512	0,430	0,485	0,465
16	0,410	0,512	0,430	0,483	0,465
18	0,401	0,512	0,430	0,480	0,465

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_up (N)	P_down (N)	F (N)	CD
0,072	48,444	47,954	0,502	0,689

Πείραμα 3

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
20	20,51	23,74	23,71	19,55	19,40

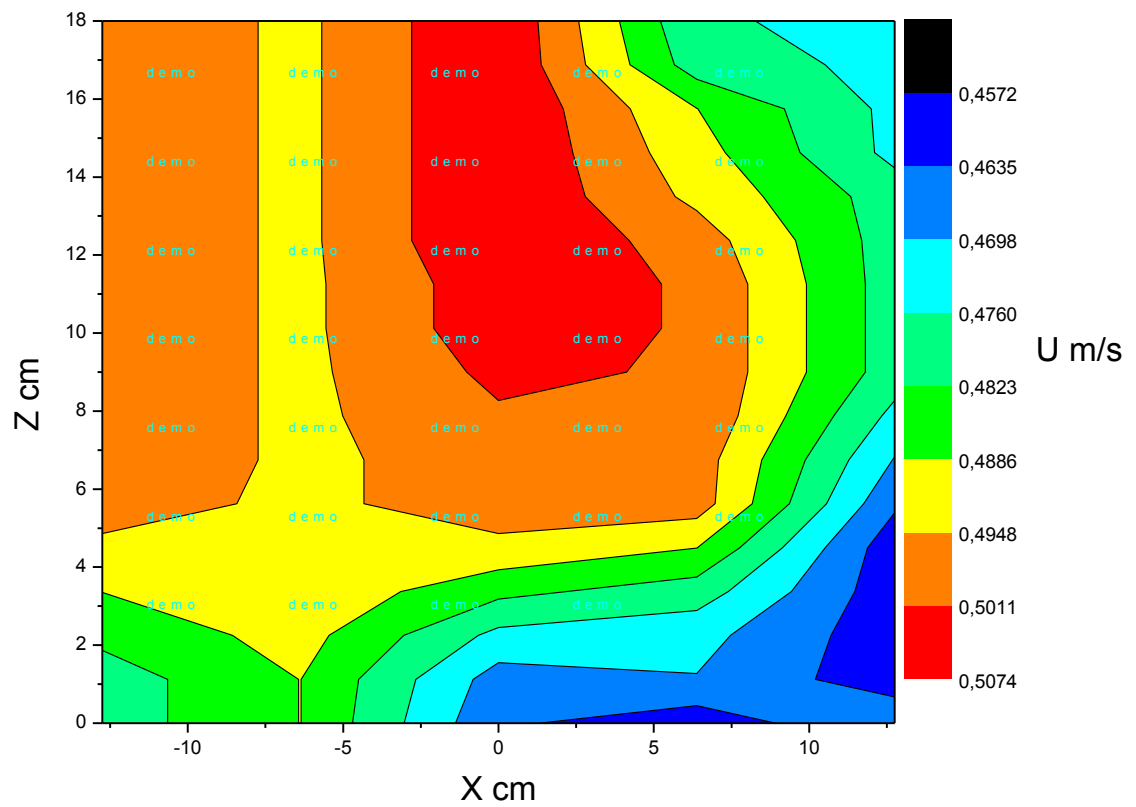
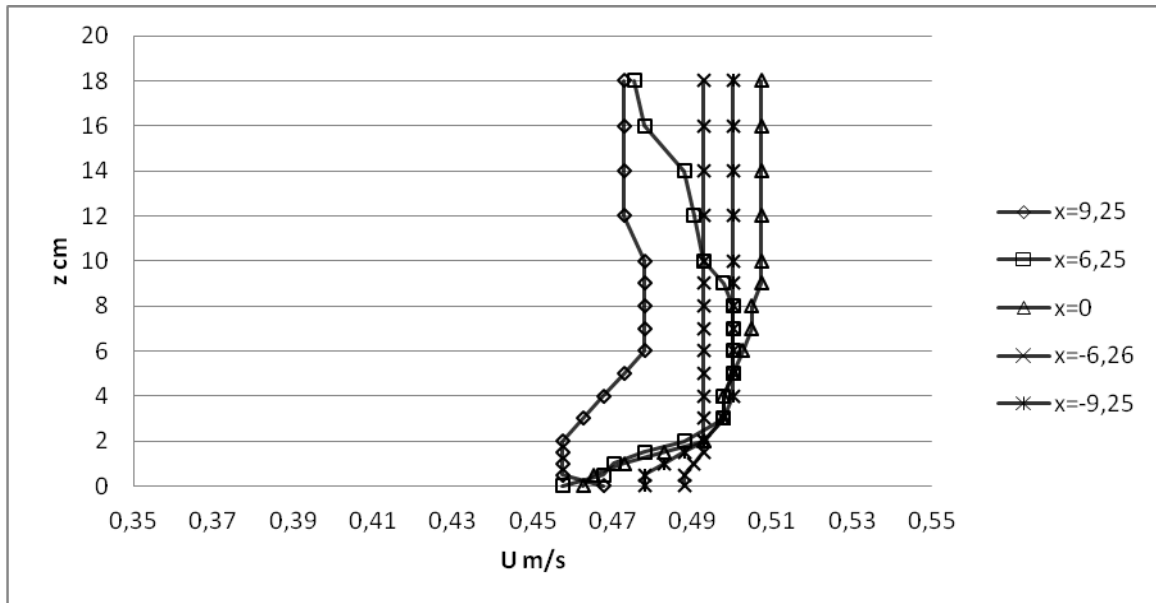
3.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,488	0,352

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,478	0,488	0,463	0,457	0,468
0,5	0,478	0,488	0,465	0,468	0,457
1	0,483	0,490	0,473	0,470	0,457
1,5	0,488	0,493	0,483	0,478	0,457
2	0,493	0,493	0,493	0,488	0,457
3	0,498	0,493	0,498	0,498	0,463
4	0,500	0,493	0,498	0,498	0,468
5	0,500	0,493	0,500	0,500	0,473
6	0,500	0,493	0,502	0,500	0,478
7	0,500	0,493	0,505	0,500	0,478
8	0,500	0,493	0,505	0,500	0,478
9	0,500	0,493	0,507	0,498	0,478
10	0,500	0,493	0,507	0,493	0,478
12	0,500	0,493	0,507	0,490	0,473
14	0,500	0,493	0,507	0,488	0,473
16	0,500	0,493	0,507	0,478	0,473
18	0,500	0,493	0,507	0,475	0,473

Κατανομή ταχυτήτων



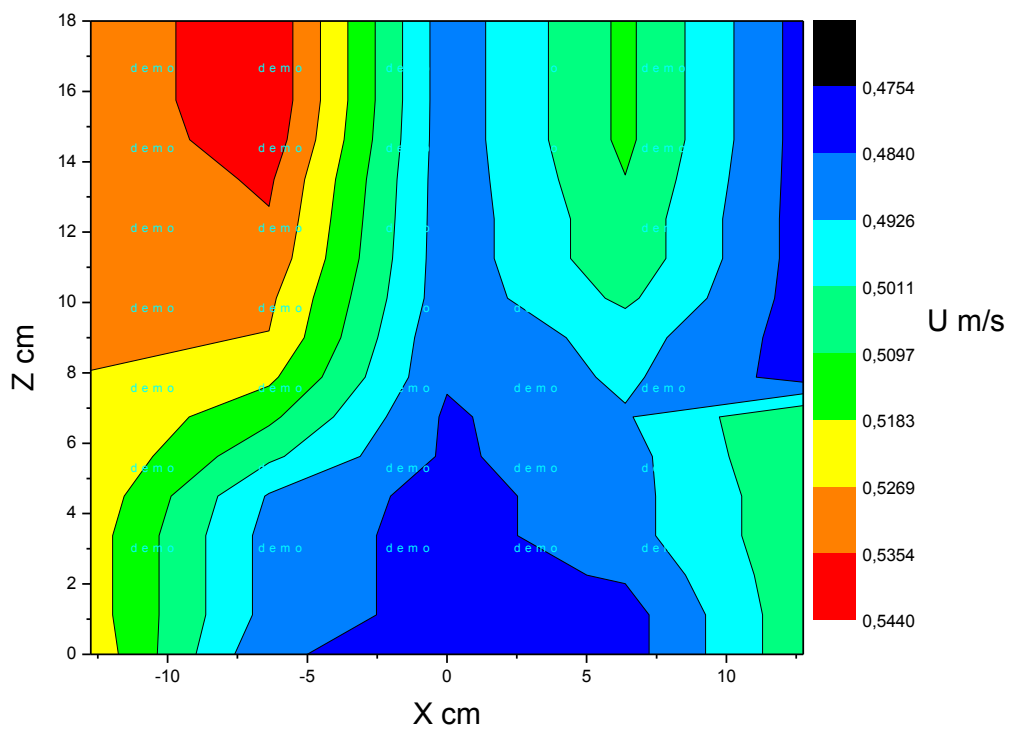
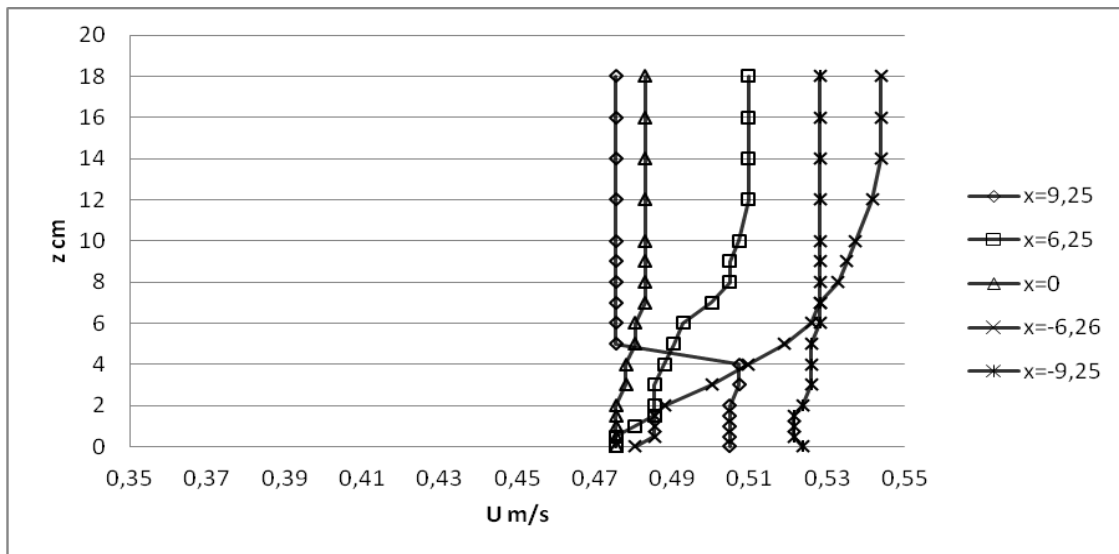
3.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,501	0,363

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,524	0,480	0,475	0,475	0,505
0,5	0,521	0,485	0,475	0,475	0,505
1	0,521	0,485	0,475	0,480	0,505
1,5	0,521	0,485	0,475	0,485	0,505
2	0,524	0,488	0,475	0,485	0,505
3	0,526	0,500	0,478	0,485	0,507
4	0,526	0,510	0,478	0,488	0,507
5	0,526	0,519	0,480	0,490	0,475
6	0,528	0,526	0,480	0,493	0,475
7	0,528	0,528	0,483	0,500	0,475
8	0,528	0,533	0,483	0,505	0,475
9	0,528	0,535	0,483	0,505	0,475
10	0,528	0,537	0,483	0,507	0,475
12	0,528	0,542	0,483	0,510	0,475
14	0,528	0,544	0,483	0,510	0,475
16	0,528	0,544	0,483	0,510	0,475
18	0,528	0,544	0,483	0,510	0,475

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,087	47,953	46,980	0,985	0,953

Πείραμα 4

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
25	20,51	23,45	23,41	19,25	19,12

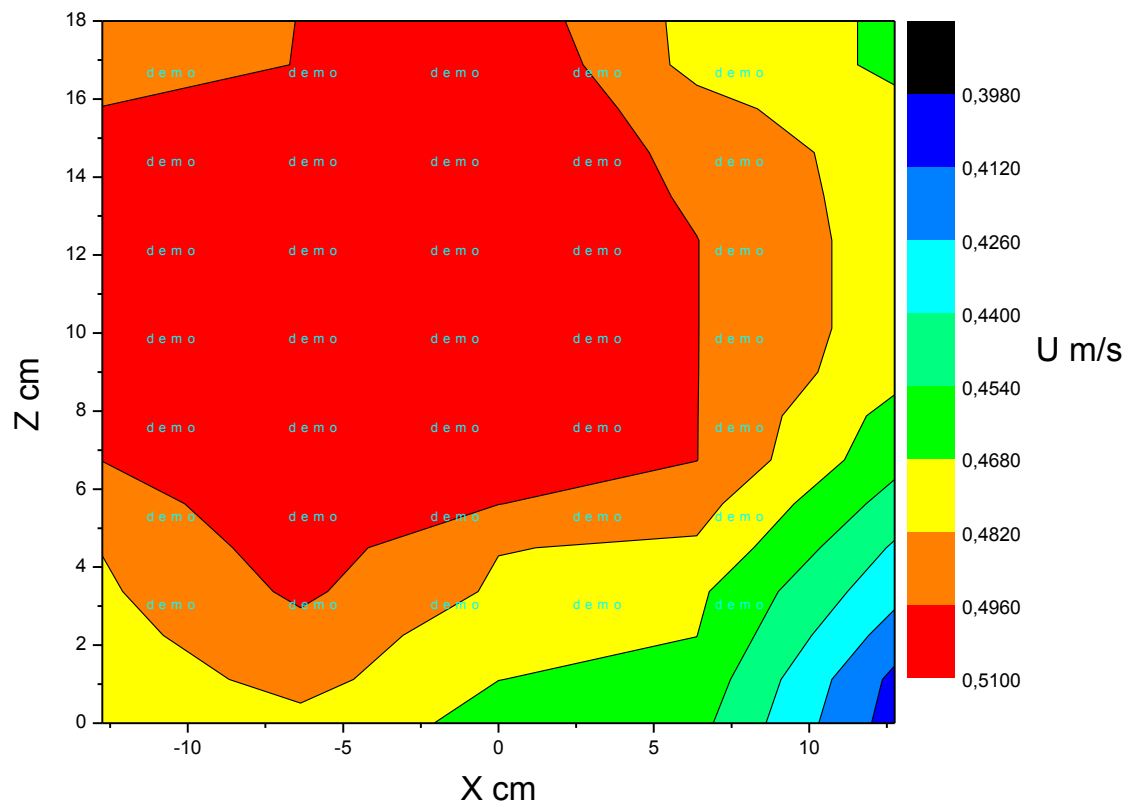
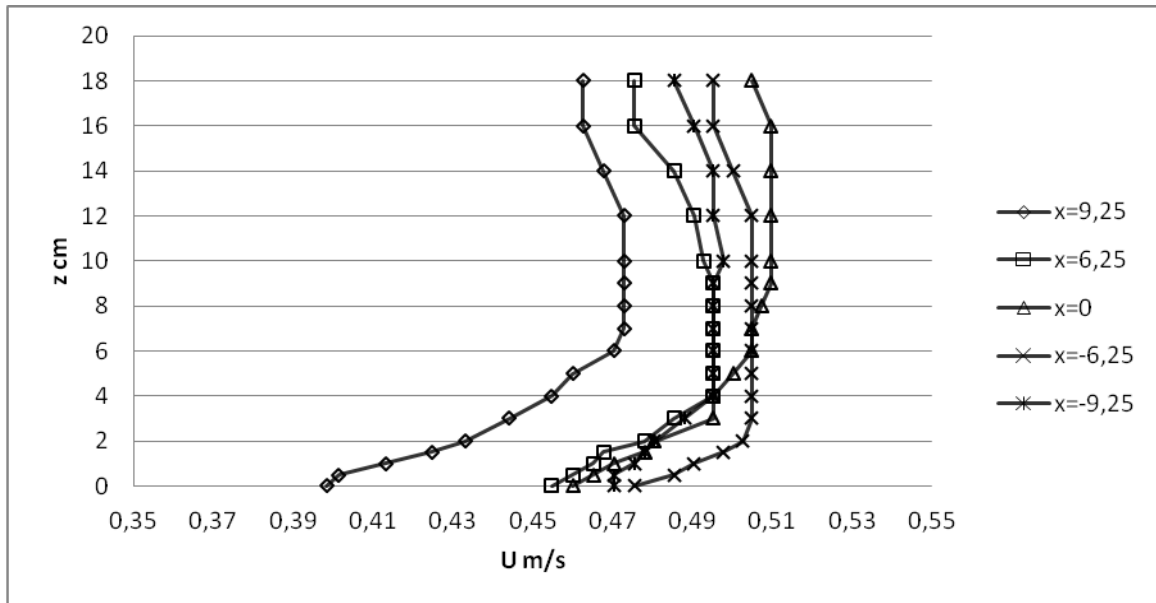
4.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,483	0,352

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,470	0,475	0,460	0,455	0,398
0,5	0,470	0,485	0,465	0,460	0,401
1	0,475	0,490	0,470	0,465	0,413
1,5	0,478	0,498	0,478	0,468	0,425
2	0,480	0,502	0,480	0,478	0,433
3	0,488	0,505	0,495	0,485	0,444
4	0,495	0,505	0,495	0,495	0,455
5	0,495	0,505	0,500	0,495	0,460
6	0,495	0,505	0,505	0,495	0,470
7	0,495	0,505	0,505	0,495	0,473
8	0,495	0,505	0,507	0,495	0,473
9	0,495	0,505	0,510	0,495	0,473
10	0,498	0,505	0,510	0,493	0,473
12	0,495	0,505	0,510	0,490	0,473
14	0,495	0,500	0,510	0,485	0,468
16	0,490	0,495	0,510	0,475	0,463
18	0,485	0,495	0,505	0,475	0,463

Κατανομή ταχυτήτων



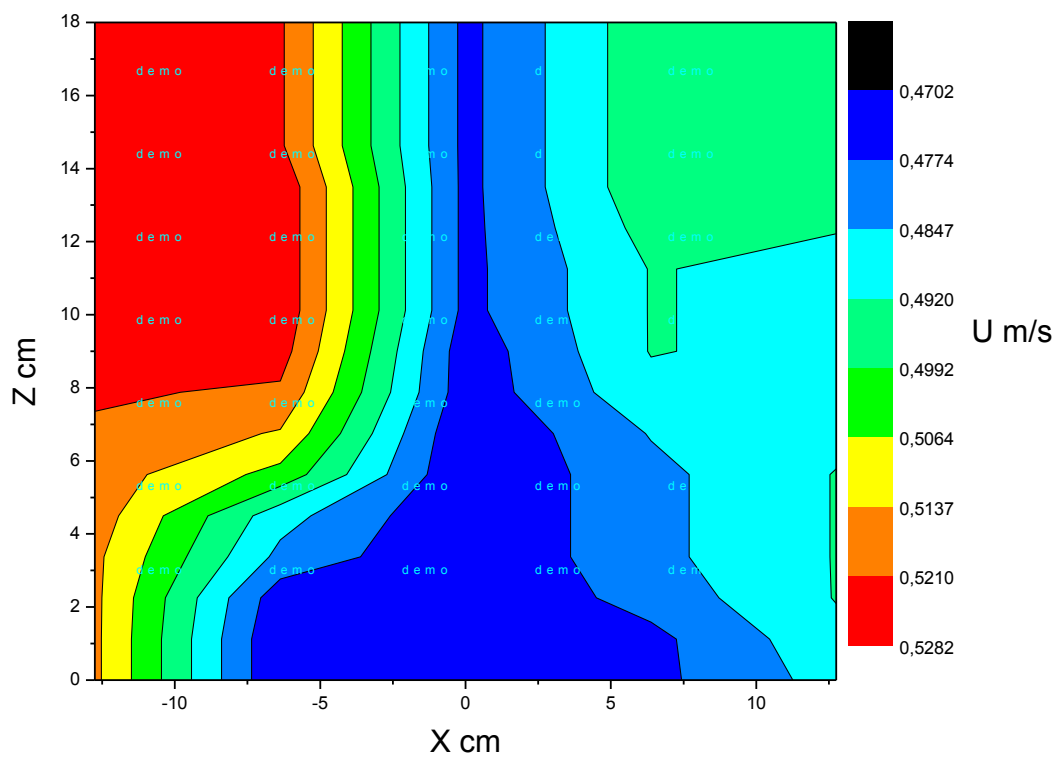
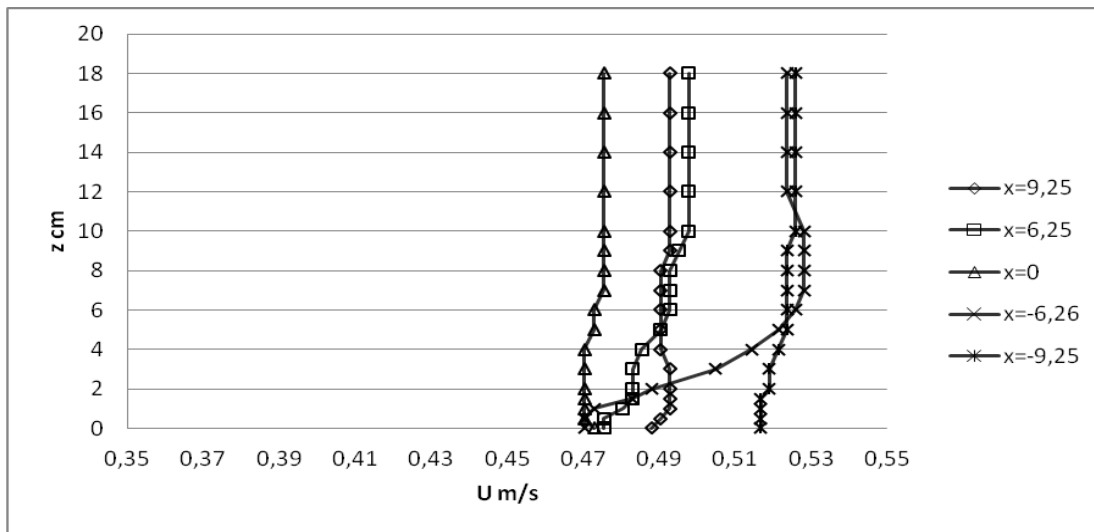
4.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,497	0,363

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,517	0,470	0,473	0,475	0,488
0,5	0,517	0,470	0,470	0,475	0,490
1	0,517	0,473	0,470	0,480	0,493
1,5	0,517	0,483	0,470	0,483	0,493
2	0,519	0,488	0,470	0,483	0,493
3	0,519	0,505	0,470	0,483	0,493
4	0,521	0,514	0,470	0,485	0,490
5	0,524	0,521	0,473	0,490	0,490
6	0,524	0,526	0,473	0,493	0,490
7	0,524	0,528	0,475	0,493	0,490
8	0,524	0,528	0,475	0,493	0,490
9	0,524	0,528	0,475	0,495	0,493
10	0,526	0,528	0,475	0,498	0,493
12	0,526	0,524	0,475	0,498	0,493
14	0,526	0,524	0,475	0,498	0,493
16	0,526	0,524	0,475	0,498	0,493
18	0,526	0,524	0,475	0,498	0,493

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,079	46,980	45,538	1,373	1,229

Πείραμα 5

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
30	20,51	22,16	22,17	18,85	18,71

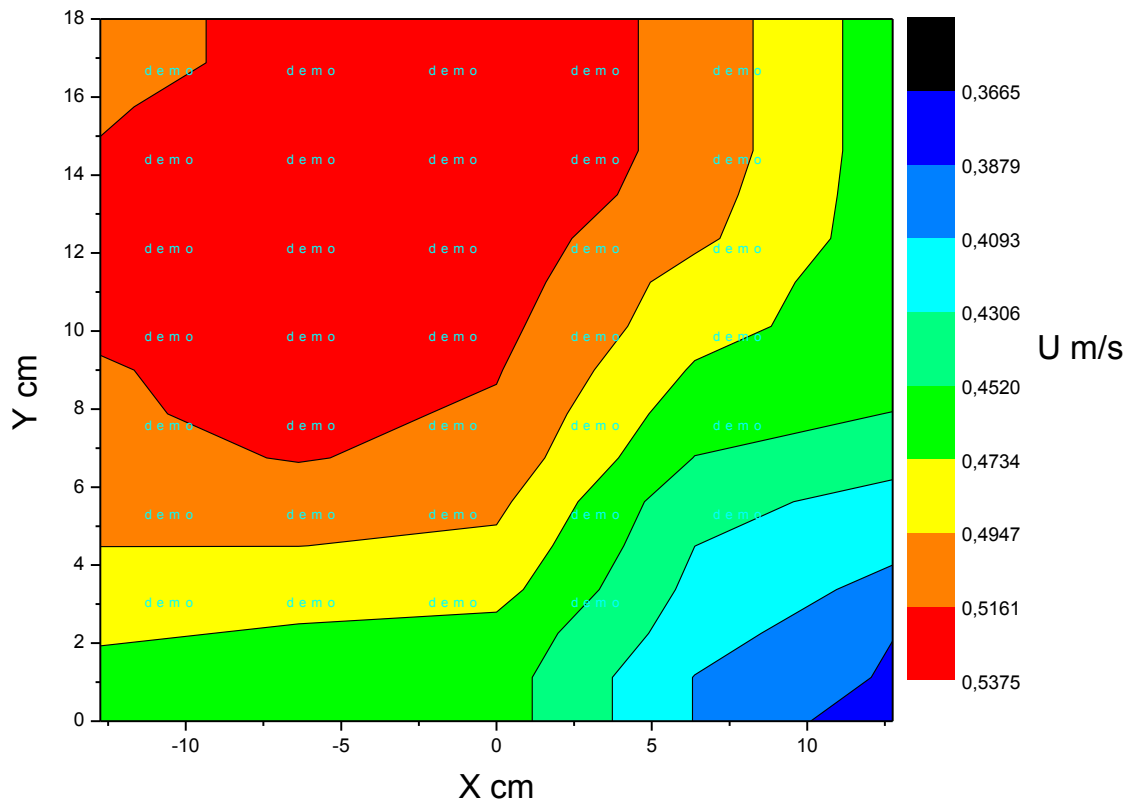
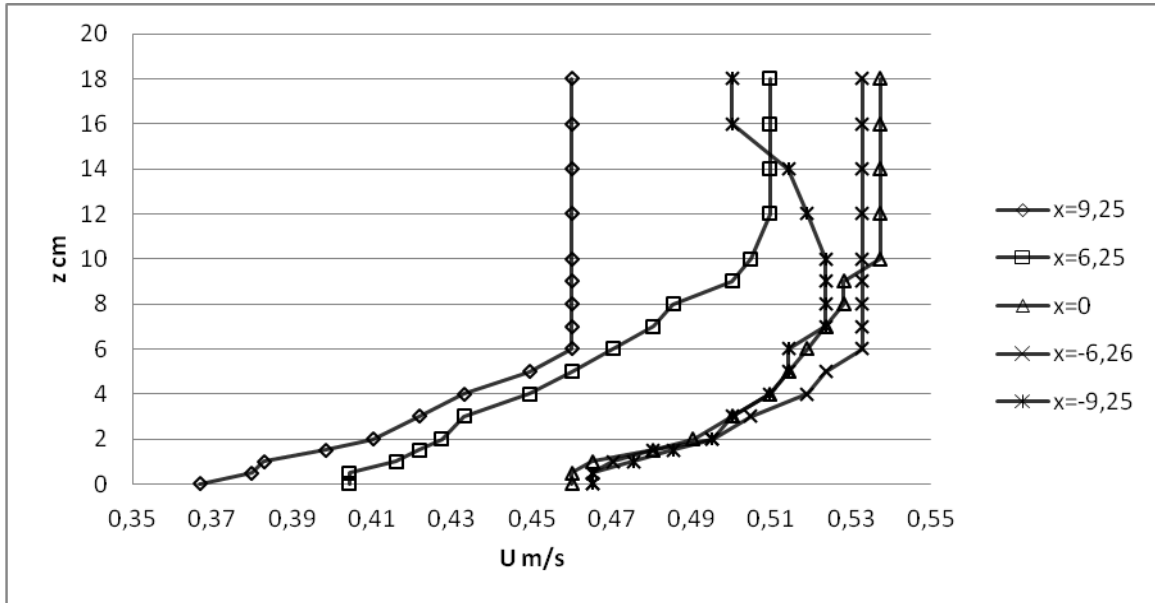
5.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,485	0,366

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,465	0,465	0,460	0,404	0,367
0,5	0,465	0,465	0,460	0,404	0,380
1	0,475	0,470	0,465	0,416	0,383
1,5	0,485	0,480	0,480	0,422	0,398
2	0,495	0,495	0,490	0,427	0,410
3	0,500	0,505	0,500	0,433	0,422
4	0,510	0,519	0,510	0,449	0,433
5	0,514	0,524	0,514	0,460	0,449
6	0,514	0,533	0,519	0,470	0,460
7	0,524	0,533	0,524	0,480	0,460
8	0,524	0,533	0,528	0,485	0,460
9	0,524	0,533	0,528	0,500	0,460
10	0,524	0,533	0,537	0,505	0,460
12	0,519	0,533	0,537	0,510	0,460
14	0,514	0,533	0,537	0,510	0,460
16	0,500	0,533	0,537	0,510	0,460
18	0,500	0,533	0,537	0,510	0,460

Κατανομή ταχυτήτων



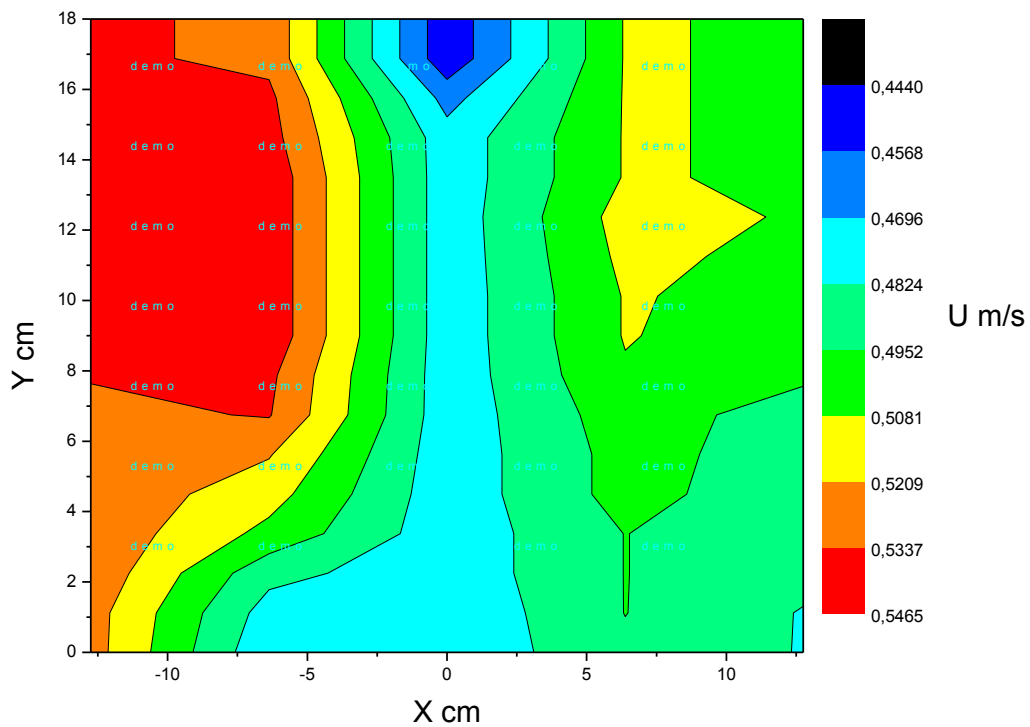
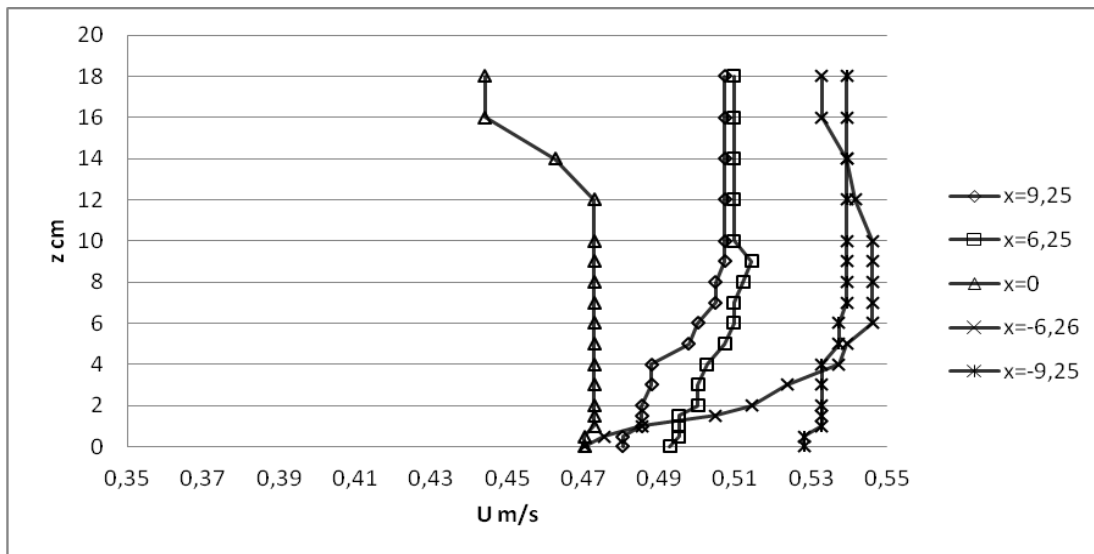
5.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,506	0,383

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,528	0,470	0,470	0,493	0,480
0,5	0,528	0,475	0,470	0,495	0,480
1	0,533	0,485	0,473	0,495	0,485
1,5	0,533	0,505	0,473	0,495	0,485
2	0,533	0,514	0,473	0,500	0,485
3	0,533	0,524	0,473	0,500	0,488
4	0,533	0,537	0,473	0,502	0,488
5	0,537	0,539	0,473	0,507	0,498
6	0,537	0,546	0,473	0,510	0,500
7	0,539	0,546	0,473	0,510	0,505
8	0,539	0,546	0,473	0,512	0,505
9	0,539	0,546	0,473	0,514	0,507
10	0,539	0,546	0,473	0,510	0,507
12	0,539	0,542	0,473	0,510	0,507
14	0,539	0,539	0,463	0,510	0,507
16	0,539	0,533	0,444	0,510	0,507
18	0,539	0,533	0,444	0,510	0,507

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,087	40,444	39,550	1,037	0,852

Πείραμα 6

ϕ	$Q_{\text{Venturi}} \text{ (l/s)}$	$Q_{\text{ολοκλ_αν}} \text{ (l/s)}$	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}} \text{ (l/s)}$	$\gamma_{\text{αν}} \text{ (cm)}$	$\gamma_{\text{κατ}} \text{ (cm)}$
0	27,84	30,33	30,30	19,72	19,55

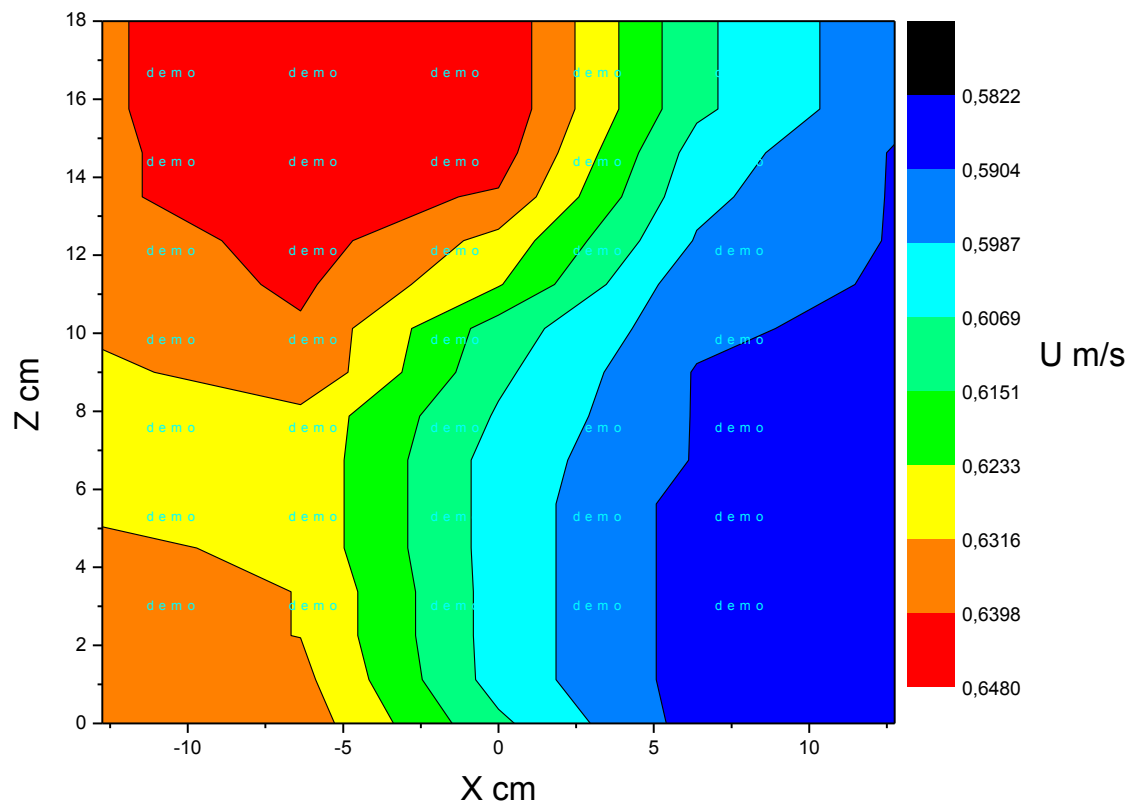
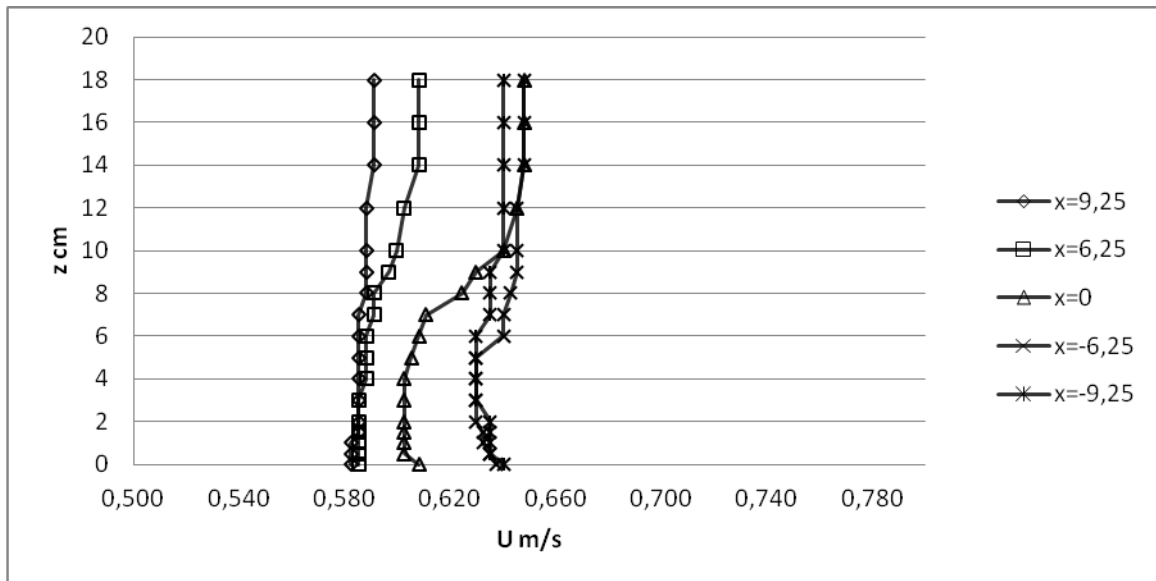
6.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,615	0,442

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

$z \text{ (cm)}$	απόσταση από τον άξονα $\chi \text{ (cm)}$				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,640	0,638	0,608	0,585	0,582
0,5	0,635	0,635	0,602	0,585	0,582
1	0,635	0,632	0,602	0,585	0,582
1,5	0,635	0,632	0,602	0,585	0,585
2	0,635	0,630	0,602	0,585	0,585
3	0,630	0,630	0,602	0,585	0,585
4	0,630	0,630	0,602	0,588	0,585
5	0,630	0,630	0,605	0,588	0,585
6	0,630	0,640	0,608	0,588	0,585
7	0,635	0,640	0,611	0,591	0,585
8	0,635	0,643	0,624	0,591	0,588
9	0,635	0,645	0,630	0,597	0,588
10	0,640	0,645	0,640	0,600	0,588
12	0,640	0,645	0,645	0,602	0,588
14	0,640	0,648	0,648	0,608	0,591
16	0,640	0,648	0,648	0,608	0,591
18	0,640	0,648	0,648	0,608	0,591

Κατανομή ταχυτήτων



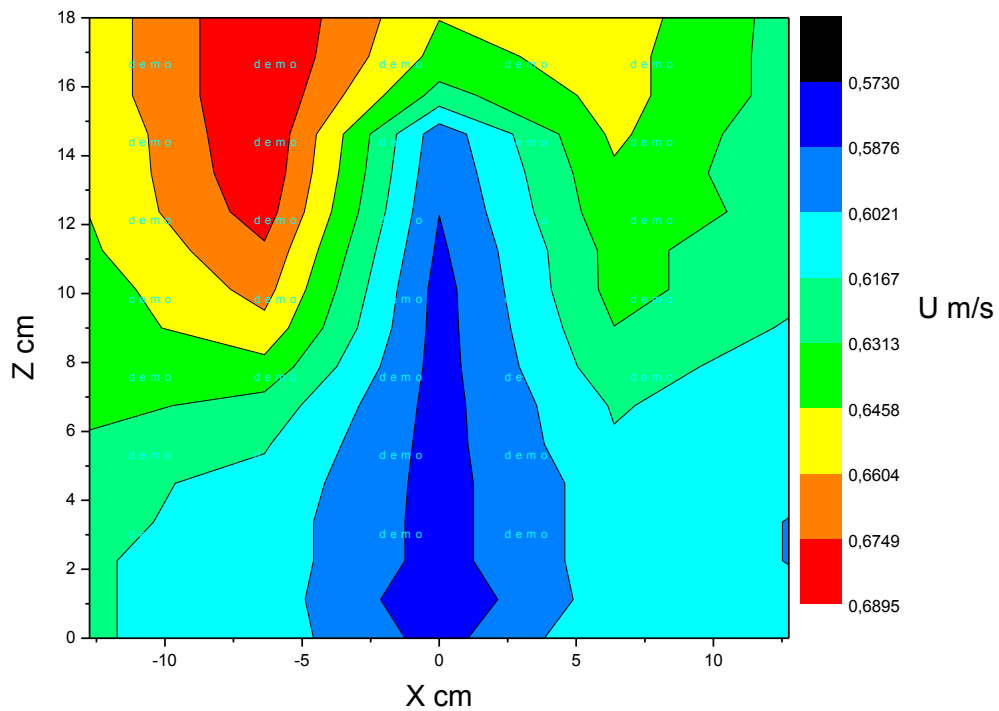
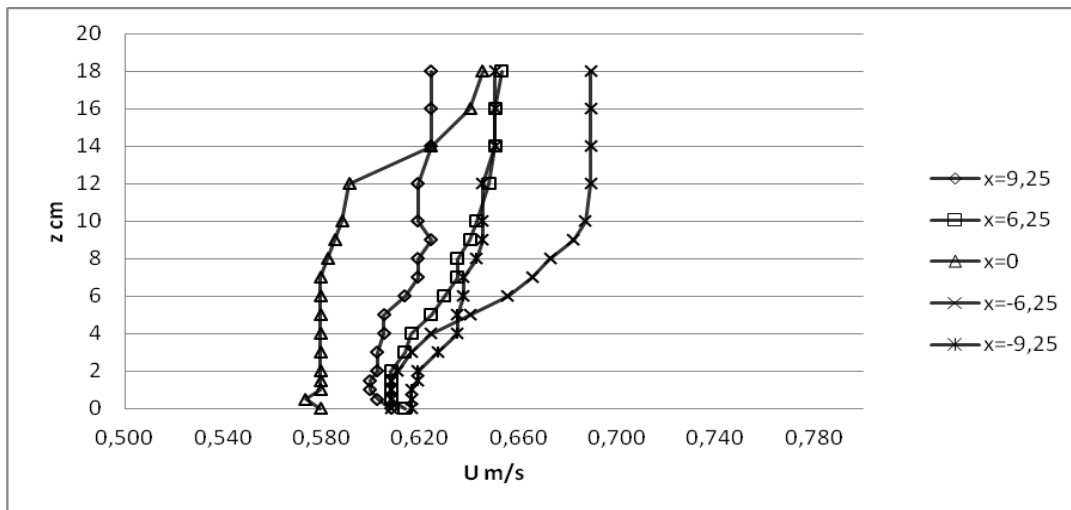
6.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,623	0,450

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,616	0,608	0,579	0,614	0,608
0,5	0,616	0,608	0,573	0,608	0,602
1	0,616	0,608	0,579	0,608	0,600
1,5	0,619	0,608	0,579	0,608	0,600
2	0,619	0,611	0,579	0,608	0,602
3	0,627	0,616	0,579	0,614	0,602
4	0,635	0,624	0,579	0,616	0,605
5	0,635	0,640	0,579	0,624	0,605
6	0,638	0,655	0,579	0,630	0,614
7	0,638	0,665	0,579	0,635	0,619
8	0,643	0,673	0,582	0,635	0,619
9	0,645	0,682	0,585	0,640	0,624
10	0,645	0,687	0,588	0,643	0,619
12	0,645	0,689	0,591	0,648	0,619
14	0,650	0,689	0,624	0,650	0,624
16	0,650	0,689	0,640	0,650	0,624
18	0,650	0,689	0,645	0,653	0,624

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,141	48,444	47,709	0,833	1,028

Πείραμα 7

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
15	27,84	31,40	31,35	20,53	20,35

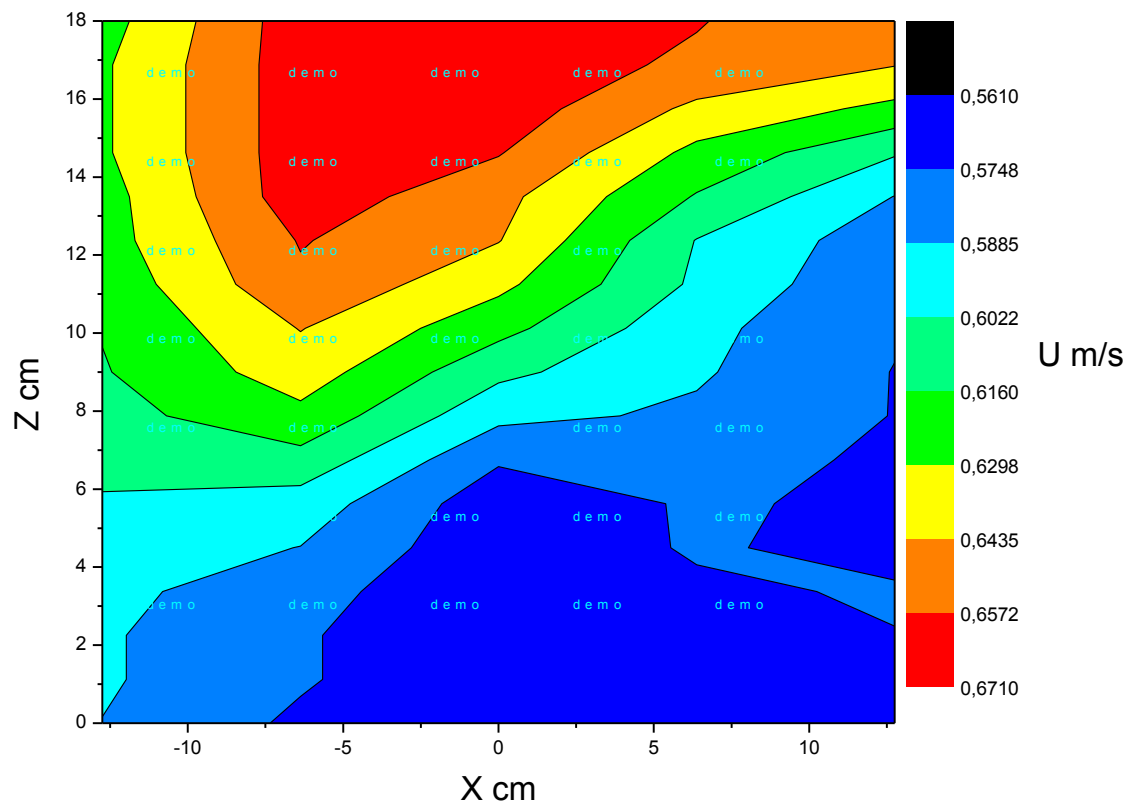
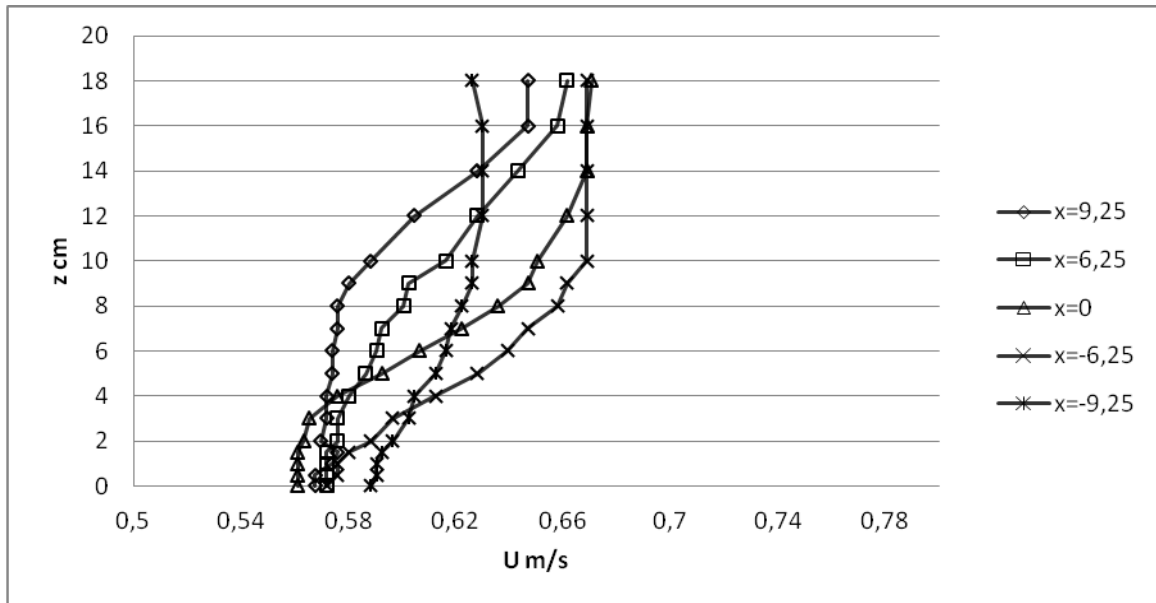
7.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,608	0,430

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,588	0,572	0,561	0,572	0,568
0,5	0,590	0,576	0,561	0,572	0,568
1	0,590	0,576	0,561	0,572	0,574
1,5	0,593	0,580	0,561	0,572	0,576
2	0,597	0,588	0,563	0,576	0,570
3	0,603	0,597	0,566	0,576	0,572
4	0,605	0,612	0,576	0,580	0,572
5	0,612	0,628	0,593	0,586	0,574
6	0,616	0,639	0,607	0,590	0,574
7	0,618	0,647	0,622	0,593	0,576
8	0,622	0,658	0,636	0,601	0,576
9	0,626	0,662	0,647	0,603	0,580
10	0,626	0,669	0,651	0,616	0,588
12	0,630	0,669	0,662	0,628	0,605
14	0,630	0,669	0,669	0,643	0,628
16	0,630	0,669	0,669	0,658	0,647
18	0,626	0,669	0,671	0,662	0,647

Κατανομή ταχυτήτων



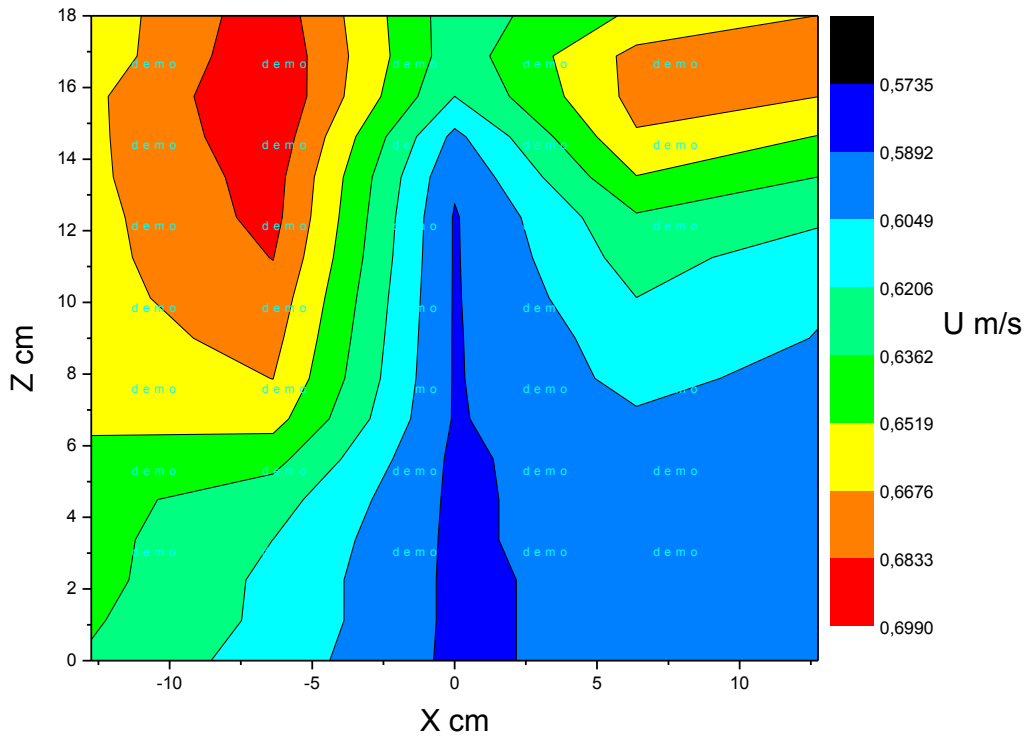
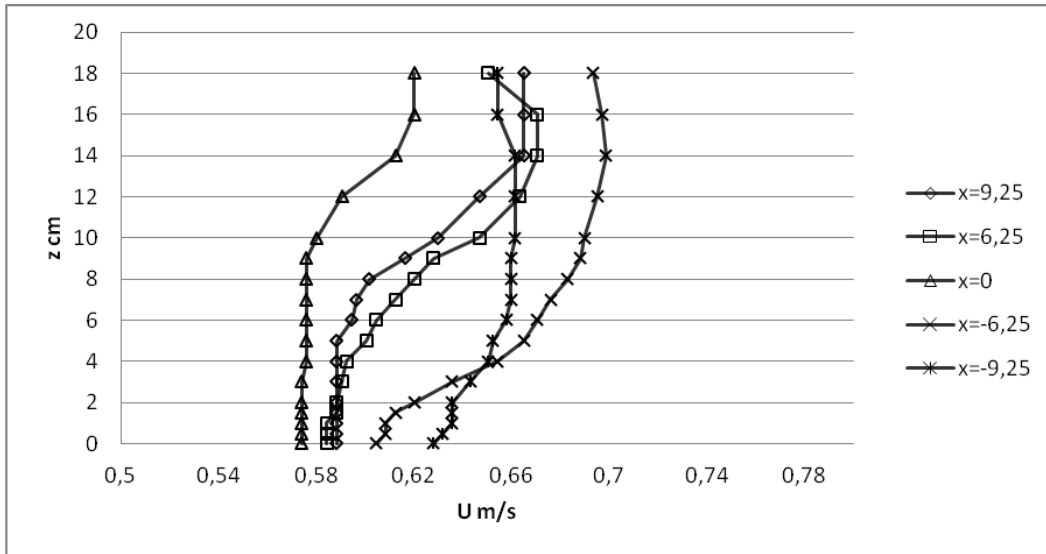
7.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,627	0,459

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,628	0,605	0,574	0,584	0,588
0,5	0,632	0,609	0,574	0,584	0,588
1	0,636	0,609	0,574	0,584	0,588
1,5	0,636	0,612	0,574	0,588	0,588
2	0,636	0,620	0,574	0,588	0,588
3	0,643	0,636	0,574	0,590	0,588
4	0,651	0,654	0,576	0,593	0,588
5	0,652	0,665	0,576	0,601	0,588
6	0,658	0,671	0,576	0,605	0,595
7	0,660	0,676	0,576	0,612	0,597
8	0,660	0,683	0,576	0,620	0,602
9	0,660	0,688	0,576	0,628	0,616
10	0,662	0,690	0,580	0,647	0,630
12	0,662	0,695	0,590	0,663	0,647
14	0,662	0,699	0,612	0,671	0,665
16	0,654	0,697	0,620	0,671	0,665
18	0,654	0,693	0,620	0,651	0,665

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,153	52,459	51,694	0,892	0,605

Πείραμα 8

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
20	27,84	31,35	31,31	19,69	19,55

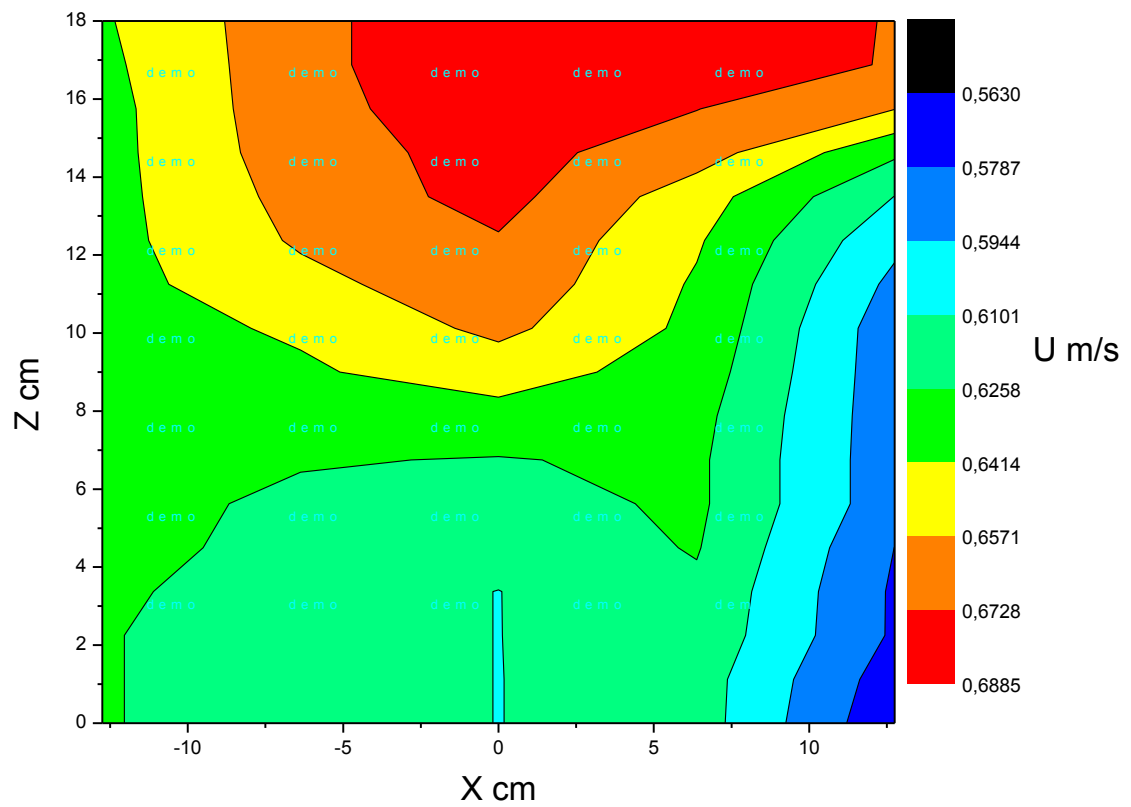
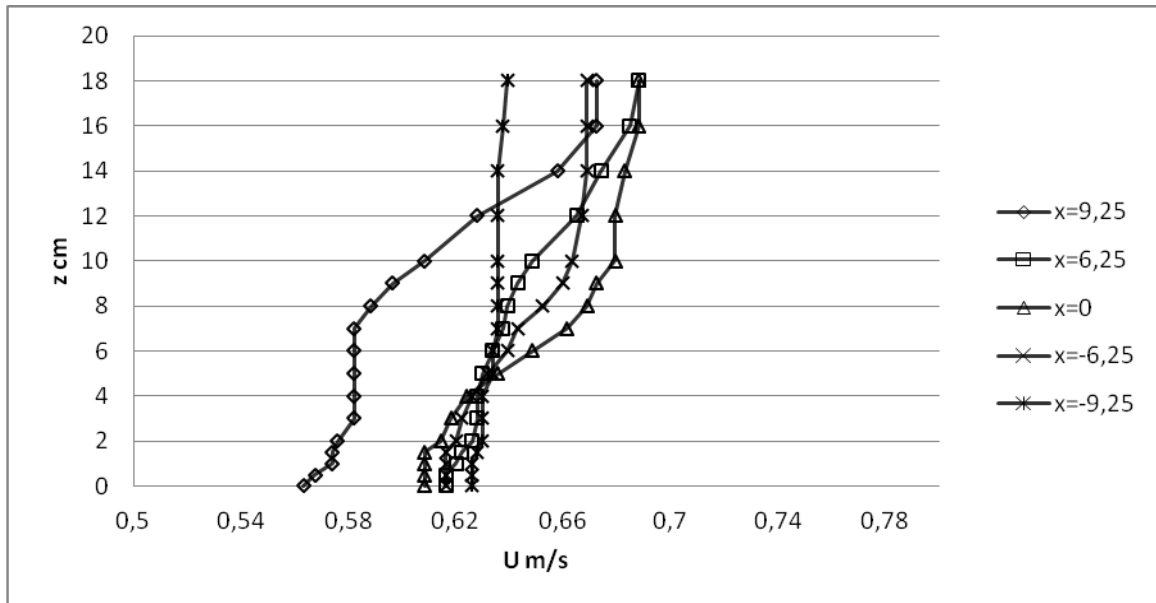
8.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,632	0,455

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,626	0,616	0,609	0,616	0,563
0,5	0,626	0,616	0,609	0,616	0,568
1	0,626	0,616	0,609	0,620	0,574
1,5	0,628	0,616	0,609	0,622	0,574
2	0,630	0,620	0,614	0,626	0,576
3	0,630	0,622	0,618	0,628	0,582
4	0,630	0,626	0,624	0,628	0,582
5	0,634	0,632	0,636	0,630	0,582
6	0,634	0,639	0,649	0,634	0,582
7	0,636	0,643	0,662	0,637	0,582
8	0,636	0,652	0,669	0,639	0,588
9	0,636	0,660	0,672	0,643	0,597
10	0,636	0,663	0,679	0,649	0,609
12	0,636	0,667	0,679	0,665	0,628
14	0,636	0,669	0,683	0,674	0,658
16	0,637	0,669	0,688	0,685	0,672
18	0,639	0,669	0,688	0,688	0,672

Κατανομή ταχυτήτων



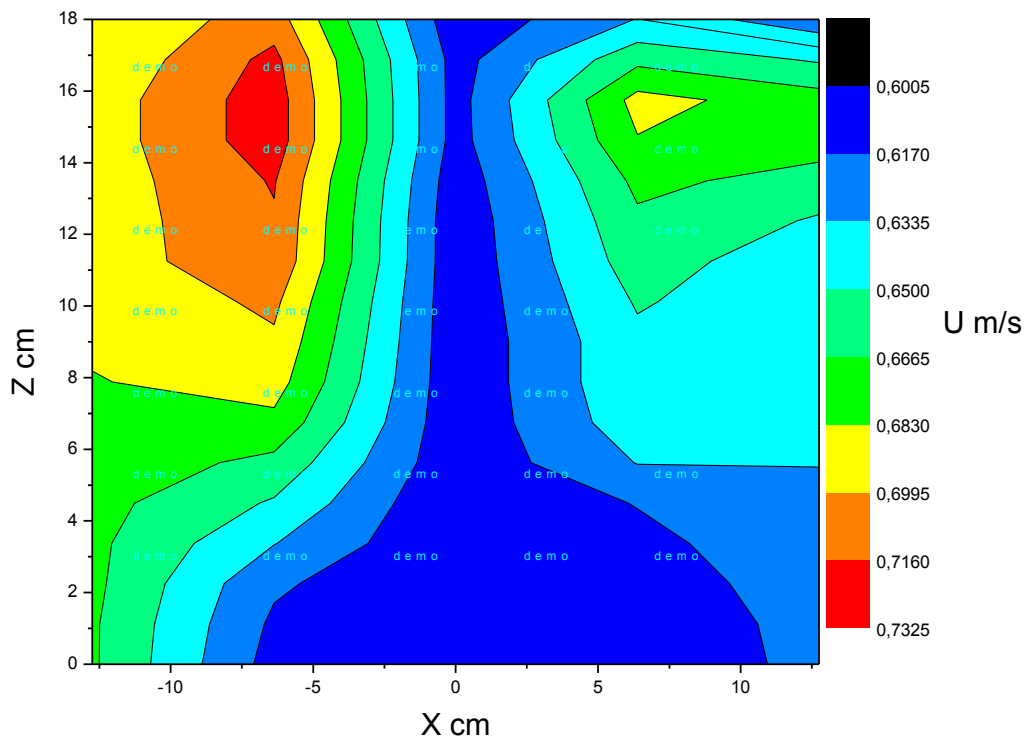
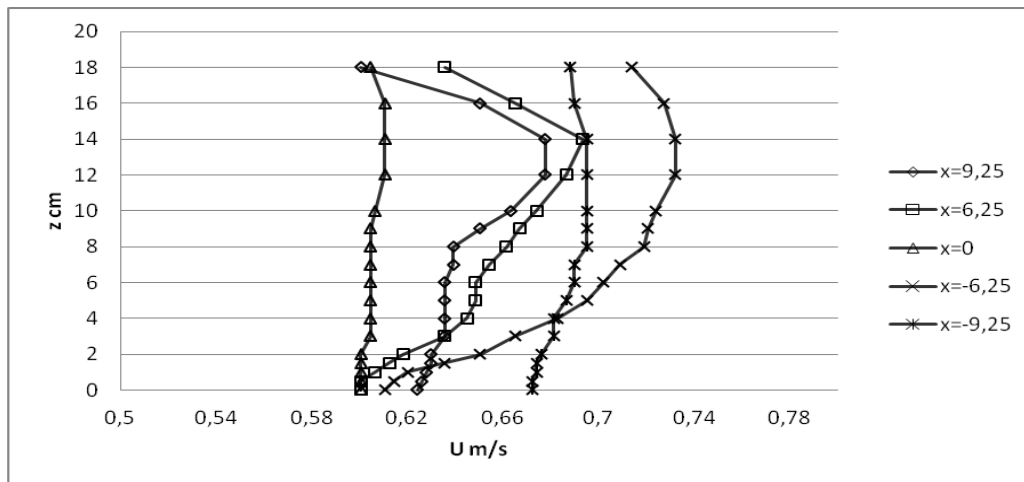
8.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,652	0,471

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,672	0,611	0,601	0,601	0,624
0,5	0,672	0,614	0,601	0,601	0,626
1	0,674	0,620	0,601	0,607	0,628
1,5	0,674	0,636	0,601	0,612	0,630
2	0,676	0,651	0,601	0,618	0,630
3	0,681	0,665	0,605	0,636	0,636
4	0,681	0,683	0,605	0,645	0,636
5	0,687	0,695	0,605	0,649	0,636
6	0,690	0,702	0,605	0,649	0,636
7	0,690	0,709	0,605	0,654	0,639
8	0,695	0,719	0,605	0,662	0,639
9	0,695	0,721	0,605	0,667	0,651
10	0,695	0,724	0,607	0,674	0,663
12	0,695	0,732	0,611	0,687	0,678
14	0,695	0,732	0,611	0,693	0,678
16	0,690	0,727	0,611	0,665	0,651
18	0,688	0,714	0,605	0,636	0,601

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,166	48,444	47,709	0,880	0,504

Πείραμα 9

ϕ	Q_{Venturi} (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_αν}}$ (l/s)	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}}$ (l/s)	$\gamma_{\text{αν}}$ (cm)	$\gamma_{\text{κατ}}$ (cm)
25	27,84	31,72	31,70	19,91	19,62

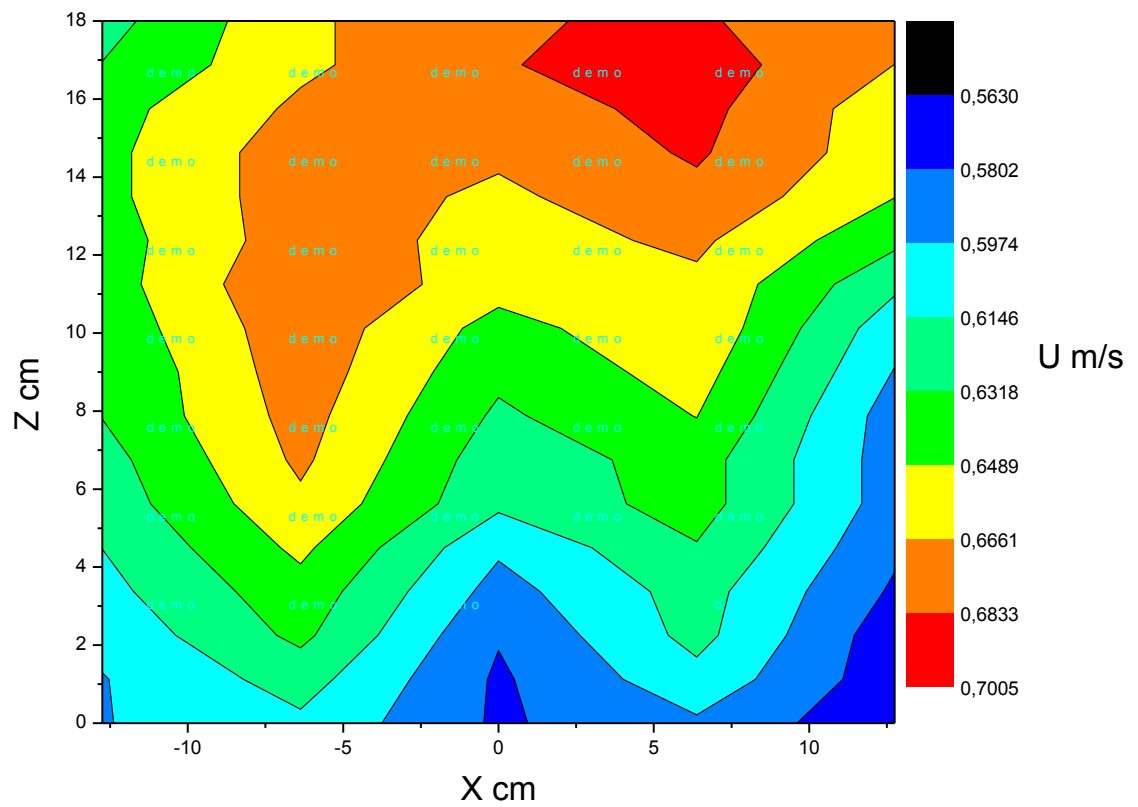
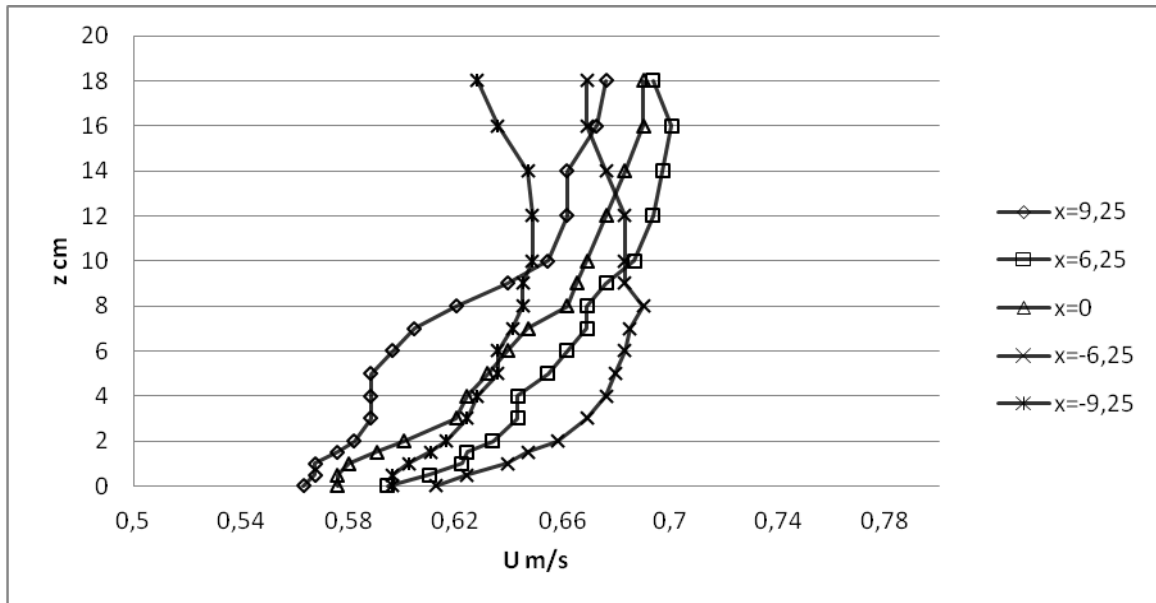
9.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,640	0,458

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z (cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,597	0,612	0,576	0,595	0,563
0,5	0,597	0,624	0,576	0,610	0,568
1	0,603	0,639	0,580	0,622	0,568
1,5	0,611	0,647	0,590	0,624	0,576
2	0,616	0,658	0,601	0,634	0,582
3	0,624	0,669	0,620	0,643	0,588
4	0,628	0,676	0,624	0,643	0,588
5	0,636	0,679	0,632	0,654	0,588
6	0,636	0,683	0,639	0,662	0,597
7	0,641	0,685	0,647	0,669	0,605
8	0,645	0,690	0,662	0,669	0,620
9	0,645	0,683	0,665	0,676	0,639
10	0,649	0,683	0,669	0,687	0,654
12	0,649	0,683	0,676	0,693	0,662
14	0,647	0,676	0,683	0,697	0,662
16	0,636	0,669	0,690	0,700	0,672
18	0,628	0,669	0,690	0,693	0,676

Κατανομή ταχυτήτων



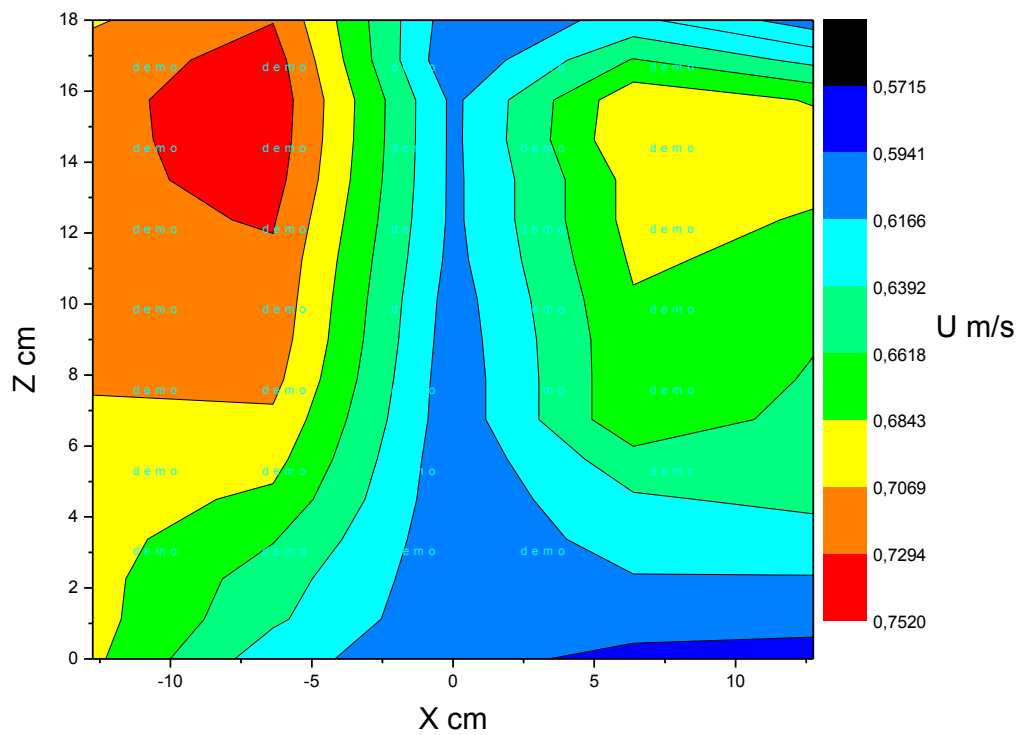
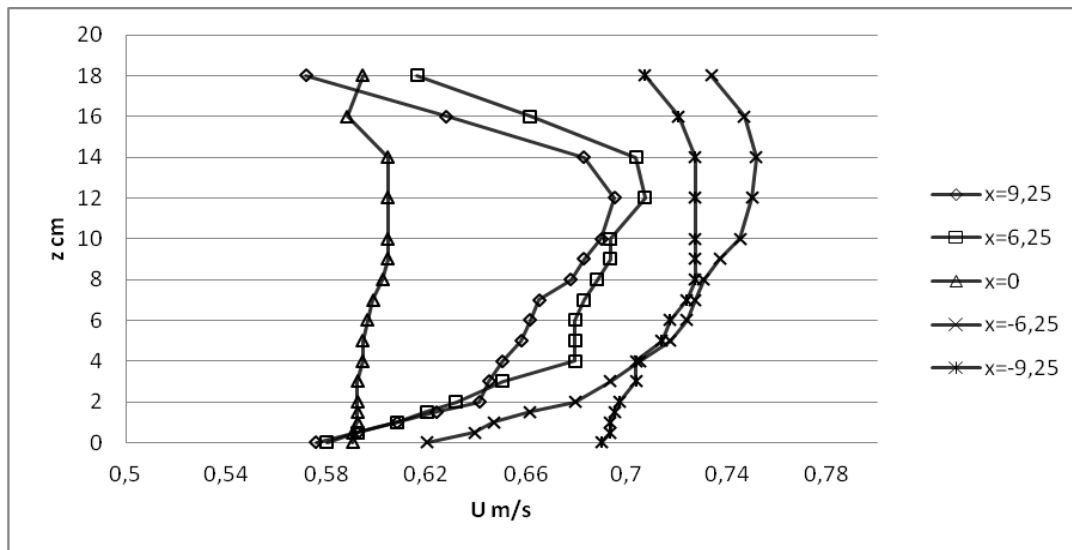
9.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,663	0,478

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,690	0,620	0,590	0,580	0,576
0,5	0,693	0,639	0,590	0,593	0,593
1	0,693	0,647	0,593	0,609	0,609
1,5	0,695	0,662	0,593	0,620	0,624
2	0,697	0,679	0,593	0,632	0,641
3	0,704	0,693	0,593	0,651	0,645
4	0,704	0,706	0,595	0,679	0,651
5	0,714	0,717	0,595	0,679	0,658
6	0,717	0,724	0,597	0,679	0,662
7	0,724	0,727	0,599	0,683	0,665
8	0,727	0,731	0,603	0,688	0,678
9	0,727	0,737	0,605	0,693	0,683
10	0,727	0,745	0,605	0,693	0,690
12	0,727	0,750	0,605	0,707	0,695
14	0,727	0,752	0,605	0,704	0,683
16	0,721	0,747	0,588	0,662	0,628
18	0,707	0,734	0,595	0,616	0,572

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,277	49,433	47,954	1,626	0,802

Πείραμα 10

ϕ	$Q_{\text{Venturi}} \text{ (l/s)}$	$Q_{\text{ολοκλ_αν}} \text{ (l/s)}$	$Q_{\text{ολοκλ_κατ}} \text{ (l/s)}$	$\gamma_{\text{αν}} \text{ (cm)}$	$\gamma_{\text{κατ}} \text{ (cm)}$
30	27,84	32,94	32,93	20,00	19,65

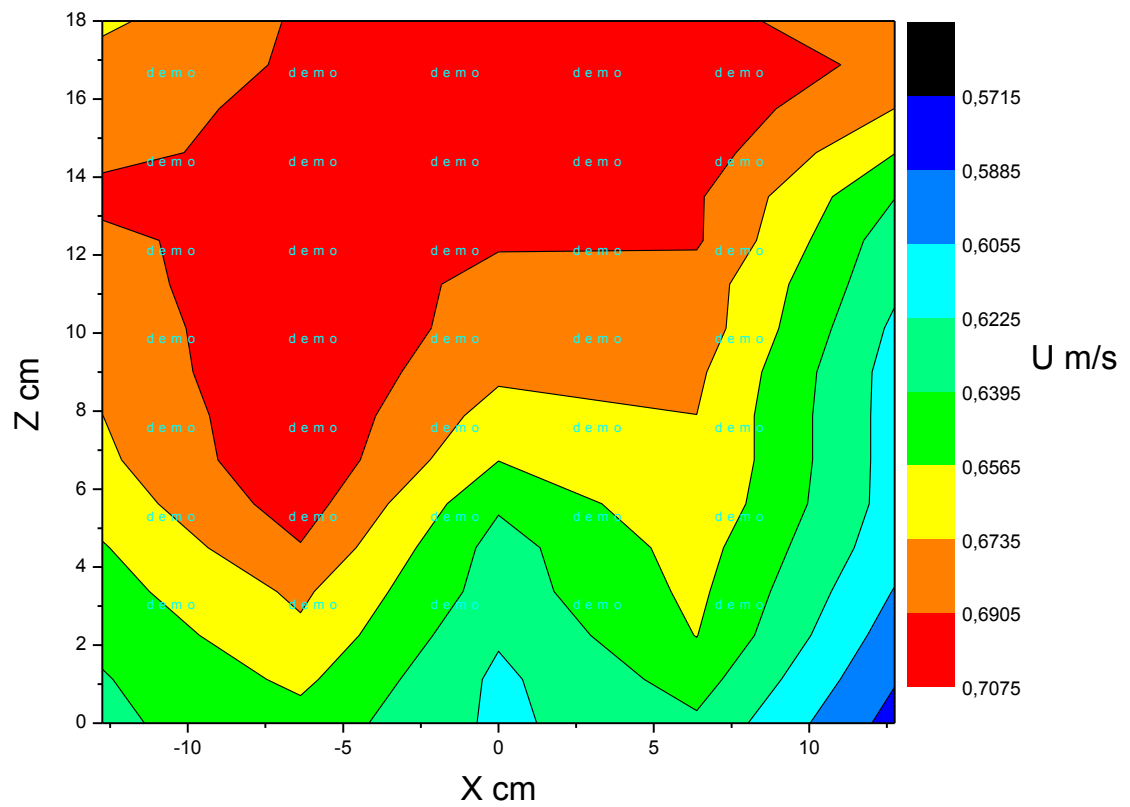
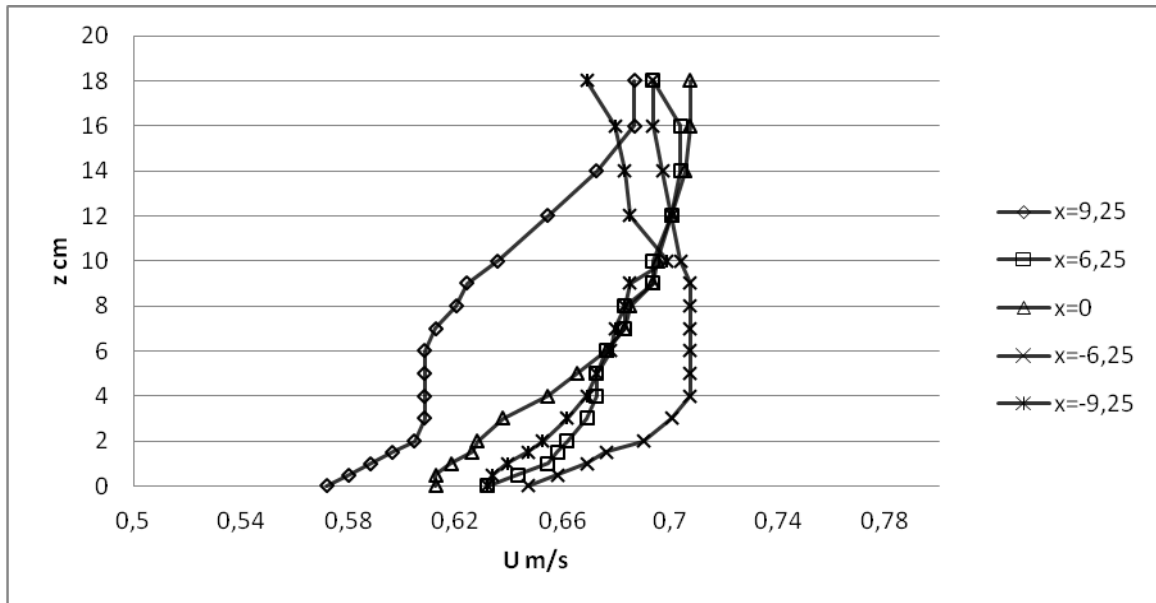
10.1 Pitot 0,30 m ανάντη του μεσόβαθρου

U_{avg}	Fr_{avg}
0,665	0,474

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

$z \text{ (cm)}$	απόσταση από τον άξονα $\chi \text{ (cm)}$				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,632	0,647	0,612	0,632	0,572
0,5	0,634	0,658	0,612	0,643	0,580
1	0,639	0,669	0,618	0,654	0,588
1,5	0,647	0,676	0,626	0,658	0,597
2	0,652	0,690	0,628	0,662	0,605
3	0,662	0,700	0,637	0,669	0,609
4	0,669	0,707	0,654	0,672	0,609
5	0,672	0,707	0,665	0,672	0,609
6	0,678	0,707	0,676	0,676	0,609
7	0,679	0,707	0,683	0,683	0,612
8	0,683	0,707	0,685	0,683	0,620
9	0,685	0,707	0,693	0,693	0,624
10	0,699	0,704	0,695	0,693	0,636
12	0,685	0,700	0,700	0,700	0,654
14	0,683	0,697	0,706	0,704	0,672
16	0,679	0,693	0,707	0,704	0,687
18	0,669	0,693	0,707	0,693	0,687

Κατανομή ταχυτήτων



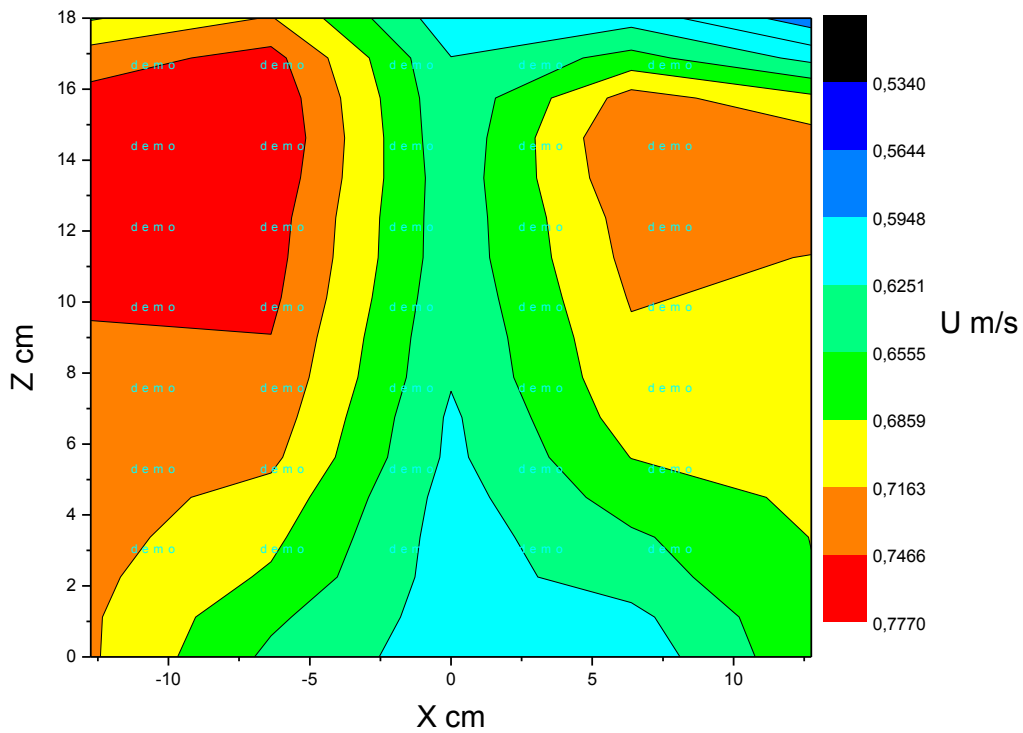
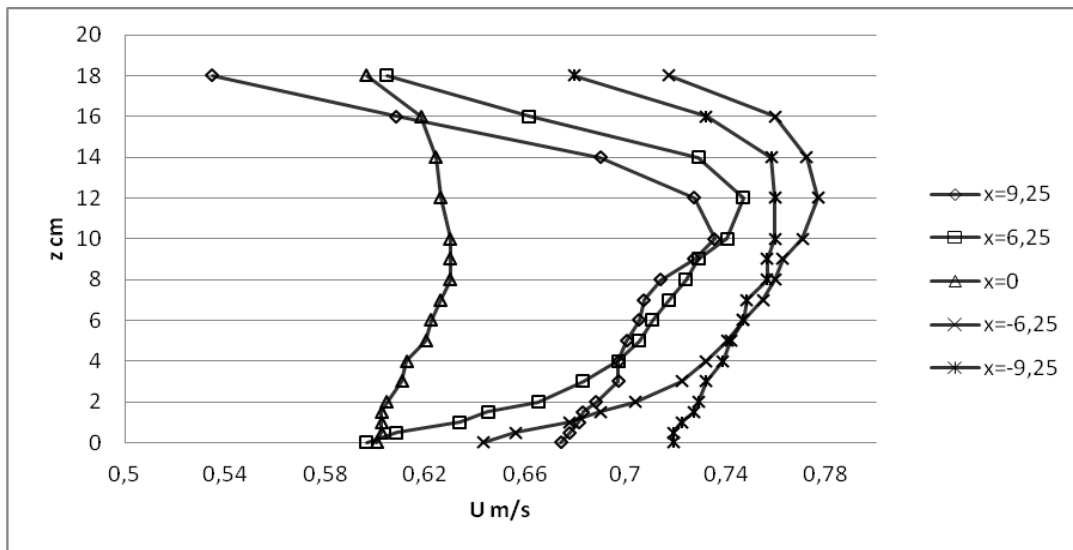
10.2 Pitot 0,35 m κατάντη του μεσόβαθρου

U_avg	Fr_avg
0,690	0,497

Μετρημένες ταχύτητες (m/s)

z(cm)	απόσταση από τον άξονα χ (cm)				
	-9,25	-6,25	0	6,25	9,25
0	0,719	0,643	0,601	0,597	0,674
0,5	0,719	0,656	0,603	0,609	0,678
1	0,722	0,678	0,603	0,634	0,681
1,5	0,727	0,690	0,603	0,645	0,683
2	0,729	0,704	0,605	0,665	0,688
3	0,732	0,722	0,611	0,683	0,697
4	0,739	0,732	0,612	0,697	0,697
5	0,742	0,740	0,620	0,706	0,700
6	0,747	0,747	0,622	0,711	0,706
7	0,749	0,755	0,626	0,717	0,707
8	0,757	0,760	0,630	0,724	0,714
9	0,757	0,763	0,630	0,729	0,727
10	0,760	0,771	0,630	0,740	0,736
12	0,760	0,777	0,626	0,747	0,727
14	0,758	0,772	0,624	0,729	0,690
16	0,732	0,760	0,618	0,662	0,609
18	0,679	0,717	0,597	0,605	0,535

Κατανομή ταχυτήτων



Αποτελέσματα

Δy (cm)	P_{up} (N)	P_{down} (N)	F (N)	CD
0,313	49,931	48,200	1,732	0,714