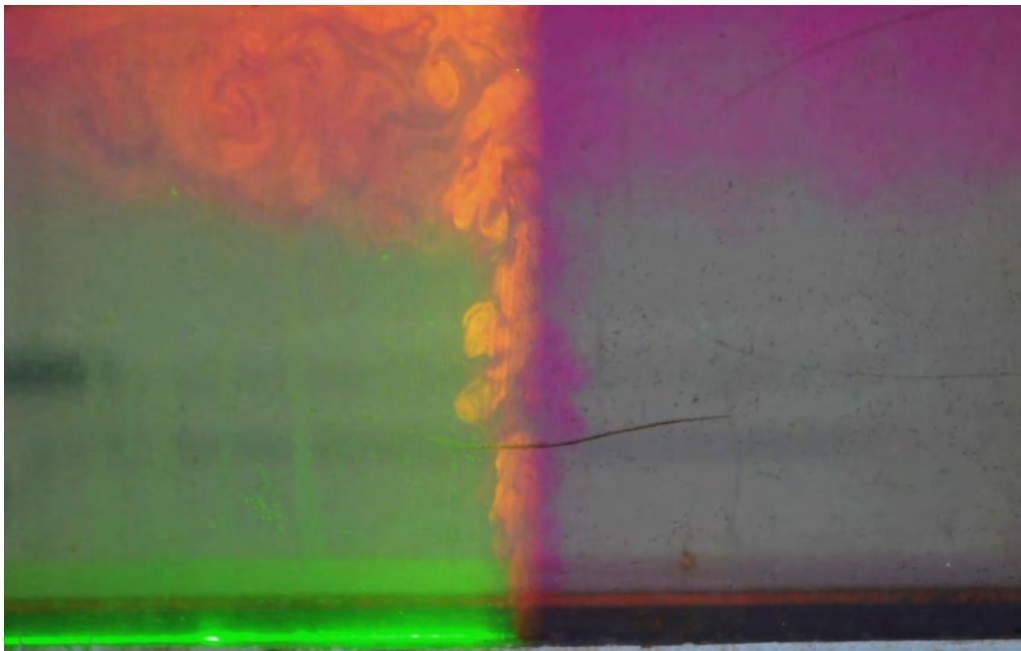




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ Πειραματική μελέτη τυρβώδους ανωστικής φλέβας μέσα σε ρευστό που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας ”



ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΧΡΙΣΤΟΣ

ΑΜ : 0808083

ΕΠΟΠΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΕΡΑΜΑΡΗΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί τον σημαντικότερο ίσως παράγοντα που λαμβάνεται υπόψη κατά την κατασκευή έργων του μηχανικού. Το αντικείμενο της περιβαλλοντικής ρευστομηχανικής είναι η μελέτη των ροών των ρευστών και κατά πόσο αυτή έχει συνέπειες σε περιβαλλοντικούς αποδέκτες.

Το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η μελέτη μίας τυρβώδους εκτοξευόμενης ανωστικής φλέβας σε ρευστό αποδέκτη που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Ο όρος ανωστική αναφέρεται στις δυνάμεις της άνωσης που ασκούνται από το ρευστό που κάθε άλλο παρά ασήμαντες είναι, καθώς πρόκειται για μια φλέβα βυθισμένη. Με τη βοήθεια υπάρχουσών θεωρητικών και πειραματικών εργασιών έγινε δυνατή η δική μας μελέτη. Πρόκειται, δηλαδή, για τη μελέτη της ροής μίας φλέβας γλυκού νερού η οποία διαχέεται σε περιβάλλον με αλατισμένο νερό, διαφορετικής δηλαδή πυκνότητας, το οποίο βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας. Η φλέβα εκτοξεύεται από μια πηγή, ώστε να επιτευχθεί γρήγορα διάλυσή της στο ακίνητο ρευστό περιβάλλον.

Τα πειράματα της εργασίας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Τεχνικής Περιβάλλοντος του τμήματος πολιτικών μηχανικών Τ.Ε. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, και κατέστησαν δυνατά με την συνεχή βοήθεια του Δρ. Ευάγγελου Κεραμάρη, Λέκτορα του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής εργασίας και του Δρ. Γεωργίου Πεχλιβανίδη, Καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης, τους οποίους και ευχαριστώ απεριόριστα για τις γνώσεις που μας προσέφεραν, την υπομονή και την κατανόηση που έδειξαν μέχρι και το πέρας της εργασίας. Τους ευχαριστώ επίσης για την δυνατότητα που μας έδωσαν στην χρήση της μεθόδου Particle Image Velocimetry (PIV), και των πειραματικών κατασκευών, χωρίς τα οποία η εργασία θα ήταν περίπλοκη, και χρονοβόρα.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να δώσω στον συνάδελφο και φίλο μου Ριρή Ιωάννη, με την συνεργασία του οποίου εκτελέστηκαν τα πειράματα και η εργασία κατέστη δυνατή. Σημαντικοί παράγοντες στην ολοκλήρωση της πειραματικής αυτής έρευνας ήταν η συνεχής υποστήριξη από τους γονείς μου και τους φίλους μου.

Γεωργίου Χρίστος

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.1. Εισαγωγικά	3
1.2. Τυρβώδης ροές	3
1.3. Κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες σε ομογενές περιβάλλον	4
1.4. Παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά της φλέβας	4
1.5. Στοιχεία προσδιορισμού ανωστικής φλέβας	5
1.6. Διάρθρωση της εργασίας	5
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ	7
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	24
3.1. Πειραματική διάταξη και ανάλυση εικόνων	24
3.2. Μέθοδος PIV	29
3.2.1. Γενικά για PIV	29
3.2.2. Πειραματική διαδικασία λογισμικού και εργαλεία PIV	32
3.3. Περιπτώσεις μετρήσεων	37
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	40
4.1. Προφίλ Ταχυτήτων	40
4.2. Ροή Μάζας	56
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	62
5.1. Σύγκριση προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων	62
5.2. Σύγκριση προφίλ ροής μάζας	66
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	70
6.1. Βιβλιογραφία	70

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Εισαγωγικά

Ροές ανωστικών φλεβών παρουσιάζονται σε αρκετά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάθεση υγρών σε υδάτινους αποδέκτες (λίμνες, ποτάμια, θάλασσα) ή την εκπομπή αέριων ρύπων (καμινάδες εργοστασίων, καυσαέρια από προωθητικά πυραύλων και καύσιμα κατά την εκτόξευσή τους, «ουρές» καυσαερίων από τους κινητήρες των αεροσκαφών) στην ατμόσφαιρα. Τα υγρά απόβλητα, από παραθαλάσσιες εγκαταστάσεις επεξεργασίας λυμάτων, συνήθως διαχέονται στη θάλασσα. Βαρύτερα λύματα από μονάδες αφαλάτωσης μπορούν επίσης να διατίθενται στον παρακείμενο υδάτινο αποδέκτη.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν μερικές από τις εφαρμογές διάχυσης ρύπων στο περιβάλλον με μηχανισμούς που αποβλέπουν στην γρηγορότερη και αποτελεσματικότερη διάλυσή τους. Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων απαιτείται ο προσδιορισμός της αραίωσης των αποβλήτων. Για την προσομοίωση της ροής ανωστικών φλεβών χρησιμοποιούνται ευρέως, μονοδιάστατα και δισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και πιο πολύπλοκα αριθμητικά μοντέλα, καθώς και εύχρηστες πειραματικές διατάξεις και υπολογιστικά μοντέλα, ικανά να προσομοιώσουν συνθήκες που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Στην εργασία αυτή μελετήσαμε τη συμπεριφορά μιας ανωστικής (κατακόρυφης) τυρβώδους εκτοξευόμενης φλέβας από ακροφύσιο κυκλικής διατομής σε ακίνητο περιβάλλον. Μελετήσαμε τα διάφορα προφίλ ταχύτητας και ροής μάζας που δημιουργήθηκαν στην περιοχή του ακροφύσιου της φλέβας που διαχεόταν στον αγωγό.

1.2. Τυρβώδεις ροές

Οι περισσότερες ροές στη φύση αλλά και σε ανθρωπογενείς εφαρμογές είναι τυρβώδεις. Παραδείγματα από την καθημερινή ζωή (π.χ. άνεμος, κίνηση νερού σε ποταμούς) μας δίνουν μια διαισθητική κατανόηση του φαινομένου. Η γένεση της τύρβης προκαλείται σε πραγματικές ροές από διαταράξεις οι οποίες εισάγονται σε αυτές. Πλήρης ορισμός για την τυρβώδη ροή δεν υπάρχει, χαρακτηρίζεται μόνον από την μη προβλεψιμότητα (unpredictability), την ταχεία διάχυση (rapid diffusivity), το υψηλό επίπεδο διακύμανσης των δινών (high levels of fluctuating vorticity) και την ταχεία εξασθένηση της κινητικής ενέργειας (dissipation of kinetic energy). Η ροή στην ανωστική φλέβα είναι τυρβώδης γι' αυτό και η τυρβώδης διάχυση που παρατηρείται στο φαινόμενο είναι έντονη.

Το ιξώδες του ρευστού τείνει να εξομαλύνει τις διαταράξεις καθώς αυτές μεταγονται στα κατάντη και στη στρωτή ροή πράγματι οι διαταράξεις αυτές εξαλείφονται. Όμως με την αύξηση της ταχύτητας λόγω των ανωστικών δυνάμεων βαρύτητας η κλίμακα των δινών αυξάνει και έχουμε έντονη ανάμειξη του φρέσκου και του αλμυρού νερού

μέχρι το σημείο που έχουμε ομοιογενοποίηση της πυκνότητας. Κατόπιν ακολουθεί ένα ύψος απόσβεσης της ταχύτητας λόγω των διατμητικών τάσεων.

Στις ροές αυτές δηλαδή, τα σωματίδια του ρευστού έχουν κυρίως ακανόνιστη, τυχαία κίνηση και η ταχύτητα σε κάθε σημείο του ρευστού μεταβάλλεται με το χρόνο τόσο κατά το μέγεθος, όσο και κατά τη διεύθυνση της. Οι γειτονικές στρώσεις της ροής αναμιγνύονται και διασπώνται πλήρως, πράγμα που συμβαίνει λόγω των δυνάμεων αδρανείας που είναι μεγαλύτερες από τις δυνάμεις συνεκτικότητας.

Η παράμετρος η οποία, μαζί με το μέγεθος και τον τύπο της διατάραξης, καθορίζει την έναρξη της τυρβώδους φύσης της ροής, είναι ο αριθμός Reynolds. Σε υψηλούς αριθμούς Reynolds προκαλούνται αστάθειες στη ροή οι οποίες είναι αδύνατο να εξαλειφθούν από το ιξώδες του ρευστού. Οι αστάθειες αυτές είναι υπεύθυνες για την παραγωγή τύρβης, παράγοντας στροβίλους μεγάλης κλίμακας. Οι στρόβιλοι αυτοί είναι επίσης ασταθείς και προκαλούν την παραγωγή μικρότερων στροβίλων, και ούτω καθ' εξής, έως ότου το ιξώδες γίνεται σημαντικό στις μικρότερες κλίμακες. Οι τυρβώδεις ροές μπορούν να περιγραφούν από διαφορικές εξισώσεις της ίδιας μορφής. Συγκεκριμένα γίνεται ανάλυση της ταχύτητας κατά Reynolds σε μια μέση και σε μια διακύμανση. Η παρουσία της διακύμανσης δημιουργεί και τις γνωστές τάσεις Reynolds.

Για την τυρβώδη ροή, η λύση των εξισώσεων Navier- Stokes είναι αδύνατη καθώς οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές. Γι' αυτό και η μελέτη των τυρβωδών ροών γίνεται πειραματικά στην περίπτωσή μας.

1.3. Κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες σε ομογενές περιβάλλον

Οι κατακόρυφες τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες είναι εκροές ρευστού από ένα ακροφύσιο, σωλήνα ή οπή οποιασδήποτε γεωμετρίας, που διαχέεται κατακόρυφα σε ομοειδές ή μη ρευστό με την ίδια ή διαφορετική πυκνότητα, για παράδειγμα στις καμινάδες σπιτιών και εργοστασίων, ή σε εκρήξεις ηφαιστείων.

1.4. Παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά της φλέβας

Τα χαρακτηριστικά και η ρευστοδυναμική συμπεριφορά των εκτοξευόμενων φλεβών εξαρτώνται από τους παρακάτω παράγοντες: παράμετροι (χαρακτηριστικά) της φλέβας, παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού και γεωμετρικές παράμετροι (Fischer et al. 1979).

Στα χαρακτηριστικά των φλεβών περιλαμβάνονται η αρχική κατανομή ταχύτητας και η ένταση τύρβης της φλέβας, η ογκομετρική παροχή και η ορμή της φλέβας καθώς και η συγκέντρωση ή η θερμοκρασία μεταφερόμενων ουσιών. Στις παραμέτρους του περιβάλλοντος ρευστού περιλαμβάνονται η πυκνομετρική διαφορά φλέβας και αποδέκτη, η στρωμάτωση (θερμική ή πυκνομετρική), η κίνηση του αποδέκτη κλπ. Οι

γεωμετρικές παράμετροι περιλαμβάνουν τη μορφή και τον προσανατολισμό των φλεβών, την αλληλεπίδραση με άλλες φλέβες, καθώς και την επίδραση που έχουν σε αυτήν τα όρια του αποδέκτη.

Οι βασικοί τύποι φλεβών είναι οι παρακάτω:

- απλή (εκτοξευόμενη) φλέβα μόνο με αρχική ορμή (jet)
- πλούμιο ή απλή ανωστική φλέβα με «μηδενική» αρχική ορμή αλλά με πυκνομετρική διαφορά σε σχέση με το περιβάλλον διάχυσης (plume)
- ανωστική φλέβα με αρχική ορμή και πυκνομετρική διαφορά σε σχέση με το περιβάλλον ρευστό (buoyant jet).

Οι παραπάνω φλέβες μπορεί να είναι αξονοσυμμετρικές ή δισδιάστατες όταν εκρέουν από σχισμή φλέβας. Οι φλέβες μπορεί να εκβάλλουν κατακόρυφα, οριζόντια ή υπό γωνία διαφορετική των 90° ως προς την οριζόντια. Η δε ανωστική δύναμη μπορεί να είναι ομόρροπη με την κίνηση (θετική άνωση) ή αντίρροπη (αρνητική άνωση). Ο αποδέκτης μπορεί να είναι ομογενής ή πυκνομετρικά στρωματωμένος (π.χ. γραμμικό προφίλ πυκνότητας σαν συνάρτηση του βάθους), καθώς επίσης ακίνητος ή να κινείται σε σχέση με το σημείο εκβολής της φλέβας (Παπανικολάου 2009).

Παρά των διαχωρισμό των τυρβωδών φλεβών σε jets και πλούμια, οι δύο αυτές κατηγορίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει διότι, μετά από μία σημαντική απόσταση από την πηγή που εκτοξεύεται ένα ρευστό σε ένα άλλο, η επίδραση της αρχικής ορμής μηδενίζεται και η ροή της φλέβας καθορίζεται από την άνωση. Έτσι, ένα jet σε σημαντική απόσταση από την πηγή μετατρέπεται σε πλούμιο (Σ. Ι. Παπαντωνίου 2009). (Αυτό δεν παρατηρείται στην δική μας περίπτωση διότι έχουμε αύξηση της ταχύτητας μέχρι του σημείου ομοιογενοποίησης και μετά έχουμε απόσβεση λόγω των διατμητικών τάσεων και της απουσίας των ανωστικών δυνάμεων).

1.5. Στοιχεία προσδιορισμού ανωστικής φλέβας

Ανωστική είναι η φλέβα της οποίας η πυκνότητα αρχικά διαφέρει κατά μία ποσότητα $\Delta\rho_0$ από την πυκνότητα του υγρού αποδέκτη. Η διαφορά $\Delta\rho_0$ μπορεί να είναι θετική ή αρνητική, κάτι το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό προκειμένου να προσδιορίσουμε τον προσανατολισμό της φλέβας σε σχέση με την κατακόρυφο (Σ. Ι. Παπαντωνίου 2009).

1.6. Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει την παρούσα εισαγωγή (Κεφάλαιο 1) και 5 ακόμα κεφάλαια.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται σύντομη συνοπτική βιβλιογραφική αναφορά μερικών πειραματικών προσεγγίσεων (η εφαρμογή σε τυρβώδη ανωστική εκτοξευόμενη φλέβα, εφαρμογές όσον αφορά τις ιδιότητες τυρβωδών φλεβών σε ακίνητο και

κινούμενο αποδέκτη) και άλλων μεθόδων προσομοίωσης των ανωστικών φλεβών (π.χ. η υπολογιστική διερεύνηση της ροής ανωστικών φλεβών, η τυρβώδης διάχυση διδιάστατης κατακόρυφης φλέβας σε ήρεμο, γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη, η μελέτη ρύπανσης επιφανειακών υδάτων από οριζόντια βυθισμένη εξάπλωση λυμάτων στη θερμοκλίνη θαλάσσιας περιοχής, ή τη διάθεση υγρών αποβλήτων από μικρούς παραθαλάσσιους οικισμούς).

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία. Συνολικά έγιναν 15 πειράματα για διαφορετικές περιπτώσεις (αρχικές συνθήκες) στο Εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Τεχνικής Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. στο Α.Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης. Στα πειράματα αυτά μελετήσαμε τα προφίλ ταχύτητας και τα προφίλ ροής μάζας που παρατηρήθηκαν στο φαινόμενο. Σε κάθε ένα από τα 15 πειράματα ετοιμάστηκαν διαφορετικά υδραυλικά χαρακτηριστικά, δηλαδή οι αρχικές συνθήκες που είχαν προβλεφθεί. Γίνεται αναφορά στην λειτουργία της μεθόδου PIV (Particle Image Velocimetry).

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι περιπτώσεις των μετρήσεων, τα αποτελέσματα και οι υπολογισμοί που έγιναν για την εργασία αυτή.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται σύγκριση, σχολιασμός και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

Στο άρθρο 2.1 (Κωτσοβίνος Ν. Ε. , Αγγελίδης Π. Β. , 2001) μελετώνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η διαστασιολόγηση υποβρύχιου αγωγού και διαχυτήρα. Προτείνεται επίσης μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της αραιώσης, μεταφοράς και διάθεσης των υγρών αποβλήτων από ένα φρεάτιο εξόδου των εγκαταστάσεων καθαρισμού λυμάτων σε θαλάσσιο αποδέκτη μέσω του υποβρύχιου αγωγού και του διαχυτήρα.

Στο άρθρο 2.2 (G. M. Faeth, Z. Dai+, F. J. Diez, O. C. Kwon‡ and R. Sangras , 2002) παρουσιάζεται η μελέτη για τις συνθήκες ροής από φλέβα, σε ακίνητο ρευστό κυρίως με σταθερά πλούμια, οι οποίες εξαρτώνται από την τάξη μεγέθους της οπής της «πηγής». Οι μετρήσεις που έγιναν με θερμικές και ανωστικές φλέβες, για αλατισμένο νερό σε περιβάλλον νερού με κανονική αλατότητα, μέσω των κατάλληλων πειραμάτων, δίνουν υψηλούς αριθμούς Reynolds. Σημαντικό ρόλο παίζει το δυναμικό της ροής, η φύση της ροής, το περιβάλλον ρευστό και η δομή της πηγής. Επίσης σημαντικό βαθμό για την μεταφορά της μάζας έχει η έντονη τύρβη που παρατηρείται στον κάθετο με την πηγή άξονα.

Στο άρθρο 2.3 (Κωτσοβίνος Ν.Ε. , 2005) μελετάται πως η δημιουργούμενη αξισυμμετρική ροή μέσα σε στρωματισμένη θάλασσα, που προέρχεται από την οπή ενός διαχυτήρα, ανέρχεται προς τα πάνω, μέχρι το επίπεδο που επιτρέπει η αρχική ορμή και η ασκούμενη ανωστική δύναμη, και στη συνέχεια εξαπλώνεται βυθισμένα μέσα στη θάλασσα, σχηματίζοντας ένα αξισυμμετρικό ρεύμα βαρύτητας.

Στο άρθρο 2.4 (Παπαντωνίου Σ. Ι. , 2009) υπολογίζεται πειραματικά η διάλυση σε διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από ελλειπτικό ακροφύσιο καθώς και η σύγκρισή της με τη διάλυση που επιτυγχάνεται σε διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από κυκλικό ακροφύσιο. Η μελέτη αφορά τυρβώδη ανωστική εκτοξευόμενη φλέβα. Η ροή της φλέβας θερμού νερού η οποία εκβάλλει σε μία δεξαμενή με νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δηλαδή γίνεται μέτρηση θερμοκρασιών σε όλο το πλάτος της φλέβας και για διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από την έξοδο του ακροφύσιου. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με κυκλικά ακροφύσια και ελλειπτικά ακροφύσια (κυκλικά ακροφύσια τα οποία διατηρήσαμε κατά γωνία 45°), ποικίλων διαμέτρων.

Στο άρθρο 2.5 (Μύρτου Ε. , 2012) παρουσιάζεται ένα δισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης τυρβωδών ανωστικών φλεβών. Καταστρώθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran PowerStation 4.0 για την περιγραφή της ροής τυρβωδών αξονοσυμμετρικών ανωστικών φλεβών σε πυκνομετρικά ομογενή αποδέκτη. Επιλύθηκε αριθμητικά μέσω πεπερασμένων διαφορών τις εξισώσεις RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes). Ως μοντέλο τύρβης χρησιμοποιείται το απλό μοντέλο μήκους ανάμειξης Prandtl. Από την εφαρμογή του μοντέλου υπολογίστηκαν σε κάθε σημείο της ροής οι μέσες χρονικά ταχύτητες της ροής, η διαμήκης u και η εγκάρσια v, w πυκνομετρική διαφορά $\Delta\rho$ της φλέβας με το

περιβάλλον, η γωνία θ που σχηματίζει ο άξονας της φλέβας με το οριζόντιο επίπεδο και η τροχιά της φλέβας.

Στο άρθρο 2.6 (Παπανικολάου Π. , 2010) εξετάστηκε πειραματικά η διάχυση μιας φλέβας σε ακίνητο αποδέκτη με γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση, που αποτελεί την απλούστερη δυνατή μορφή στρωμάτωσης, η οποία προσομοιάστηκε αριθμητικά με τη χρήση κατάλληλα προσαρμοσμένου μονοδιάστατου μοντέλου, ώστε να αναπαραχθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά της, όπως η στάθμη αναρρίχησης και η στάθμη διάχυσης της φλέβας.

2.1. Διάθεση Αστικών Υγρών Αποβλήτων από Μικρούς Παραθαλάσσιους Οικισμούς (Κωτσοβίνος Ν. Ε., Αγγελίδης Π. Β. 2001)

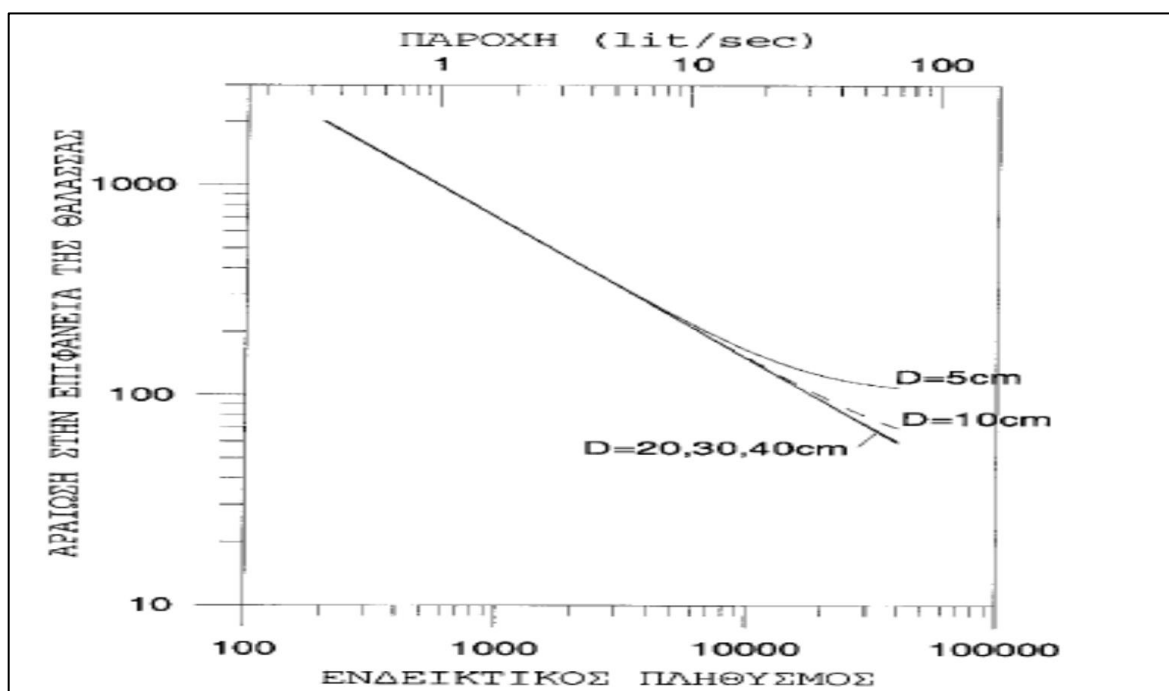
Στην εργασία αυτή μελετάται η μεταφορά και η διάθεση των υγρών αποβλήτων από το φρεάτιο εξόδου των εγκαταστάσεων καθαρισμού λυμάτων σε θαλάσσιο αποδέκτη με τη χρησιμοποίηση υποβρύχιου αγωγού και διαχυτήρα. Συγκεκριμένα μελετώνται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η διαστασιολόγηση του υποβρύχιου αγωγού και του διαχυτήρα και προτείνεται μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό της αραίωσης των λυμάτων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι: α) να παρουσιάσει μια μεθοδολογία για τον ορθό και ακριβή υπολογισμό της αραίωσης, που να βασίζεται σε σύγχρονες θεωρίες μίξης ρευστών με διαφορετική πυκνότητα, και β) επειδή η διαδικασία σχεδιασμού διαχυτήρων είναι κατά βάση επαναληπτική και ο τελικός σχεδιασμός που θα επιλεγεί είναι συνήθως η κατάληξη πολλών δοκιμών, να παρουσιάσει διαγράμματα για την απευθείας επιλογή διαχυτήρα χωρίς επαναληπτικές δοκιμές.

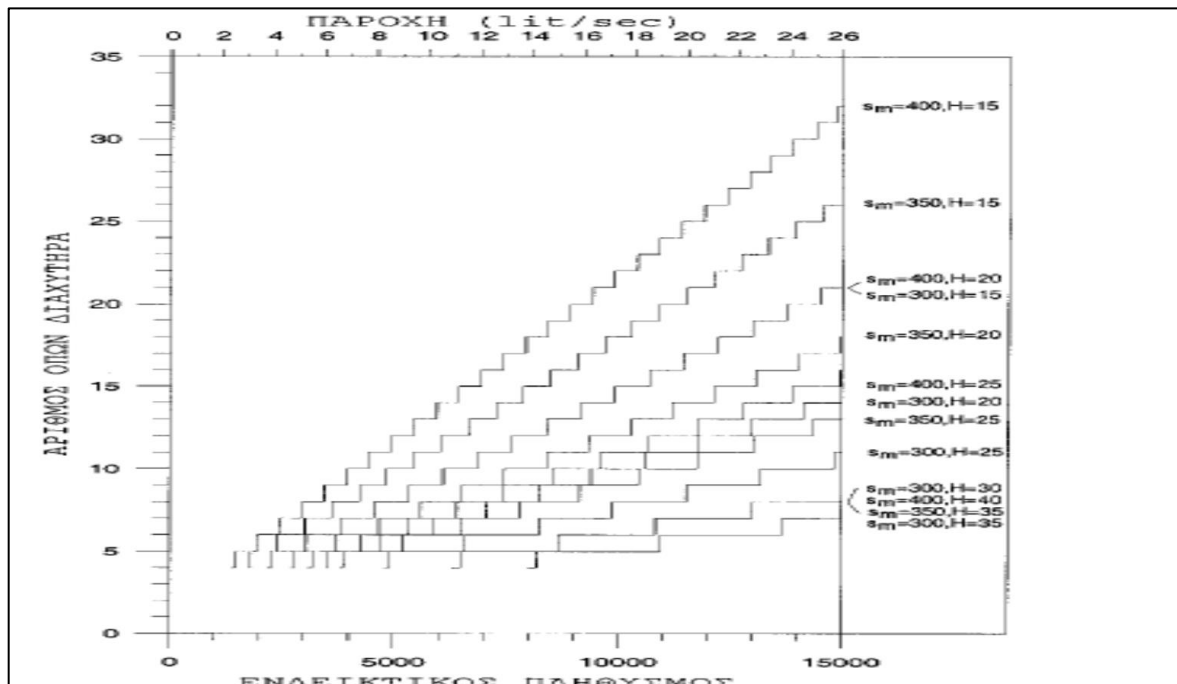
Παρουσιάζονται, επίσης, διαγράμματα υπολογισμού της αραίωσης για υποβρύχιο αγωγό χωρίς διαχυτήρα και αποδεικνύεται ότι η κατασκευή διαχυτήρα είναι απαραίτητη για πληθυσμό μεγαλύτερο της τάξεως των 2000 κατοίκων. Για να έχει ο μελετητής έναν αρχικό τρόπο επιλογής της κατάλληλης διαμέτρου της οπής εκροής, παρουσιάζεται στη συνέχεια το νομογράφημα του σχήματος 2.1, στο οποίο έχει υπολογισθεί η αραίωση ως συνάρτηση του ενδεικτικού πληθυσμού (ή της παροχής), για διάφορες διαμέτρους από 5 έως 40 cm και για βάθος θάλασσας ίσο με 20 m. Η ελάχιστη αποδεκτή ταχύτητα μέσα στον υποβρύχιο αγωγό είναι μικρή, της τάξεως των 10 cm/s, δεδομένου ότι τα λύματα θα υποβληθούν σε βιολογικό καθαρισμό και συνεπώς είναι απαλλαγμένα από άμμο και από ευκόλως καθιζάνοντα σωματίδια. Η ελάχιστη αραίωση s_m σε οριζόντιο επίπεδο πάνω από την εκροή των λυμάτων ορίζεται ως ο λόγος c_0/c_m , όπου c_0 και c_m είναι αντιστοίχως οι συγκεντρώσεις οποιουδήποτε ρύπου στην εκροή και στο εξεταζόμενο οριζόντιο επίπεδο του υδάτινου αποδέκτη (θάλασσας).

Παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την κατάλληλη επιλογή του αριθμού των οπών και του μήκους του διαχυτήρα με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, το διατιθέμενο βάθος και την επιθυμητή αραίωση (Σχήμα 2.2). Η διαδικασία επιλογής του αγωγού

είναι επαναληπτική και μετά από δοκιμές επιλέγεται ο καταλληλότερος τελικός σχεδιασμός. Για κατακόρυφη διάθεση των λυμάτων, από το σχήμα 2, με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, είναι δυνατό να επιλεγεί ο διαχυτήρας για τρεις επιθυμητές αραιώσεις (300, 350, 400) και για βάθη 15, 20, 25, 30, 35 και 40 m. Με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό σχεδιασμού, που βρίσκεται στον κάτω οριζόντιο άξονα, ή την αντιστοιχούσα παροχή λυμάτων, που βρίσκεται στον άνω οριζόντιο άξονα, μετακινούμε κατακόρυφα στο σχήμα αυτό μέχρι να συναντήσουμε την τεθλασμένη με την επιθυμητή αραιώση και το διαθέσιμο βάθος και στη συνέχεια οριζόντια και αριστερά διαβάζουμε τον αριθμό των οπών. Το μήκος του διαχυτήρα σε μέτρα ισούται με $L=(N-1)*1.25$, όπου N ο αριθμός των οπών.



Σχήμα 2.1. Αραίωση στην επιφάνεια της θάλασσας από διάθεση λυμάτων σε βάθος 20 m από υποβρύχιο αγωγό με διάμετρο οπής D από 5 έως 40 cm



Σχήμα 2.2. Επιλογή διαχυτήρα με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, την επιθυμητή αραίωση και το επιθυμητό βάθος. Υποτέθηκε ημερήσια κατανάλωση από 150 lit/άτομο, απόσταση οπών 1.25 m και διάμετρος οπών 4.56 cm

Σημειώνεται ότι για μικρούς πληθυσμούς υποδεικνύεται η διαμόρφωση κατάλληλου διαχυτήρα με στόχο την επίτευξη αραίωσης μεγαλύτερης του 1000, ώστε να μειωθεί ή να εξαλειφθεί η απαίτηση για χλωρίωση των λυμάτων πριν από τη διάθεσή τους στη θάλασσα.

Το μήκος του υποβρύχιου αγωγού πρέπει να επιλέγεται μεγαλύτερο από τα 500 m με βέλτιστη τιμή της τάξεως των 750 έως 1000 m από την ακτή, ενώ το βάθος εκροής, δηλαδή το βάθος τοποθέτησης του διαχυτήρα, πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 m. Οι παραπάνω τιμές προκύπτουν από την ανάγκη επίτευξης ικανοποιητικής αραίωσης στην ακτή με τους μηχανισμούς της δυναμικής μίξης στην «κοντινή περιοχή», της οριζόντιας εξάπλωσης και της παθητικής διάχυσης.

Ο μελετητής μηχανικός καλείται να επιλέξει τον καταλληλότερο σχεδιασμό για την επίτευξη του αντικειμενικού σκοπού, που είναι η ικανοποιητική ανάμιξη των λυμάτων με τον υδάτινο αποδέκτη έτσι, ώστε οι υγειονομικές προδιαγραφές να μη παραβιάζονται. Ο πρωταρχικός σκοπός ενός συστήματος διάθεσης υγρών λυμάτων είναι η επίτευξη ταχείας αρχικής ανάμιξης λυμάτων και περιβάλλοντος ρευστού στην «κοντινή» περιοχή. Στην πραγματικότητα μόνο η αρχική ανάμιξη στην «κοντινή» περιοχή βρίσκεται κάτω από τον έλεγχο του μηχανικού, αφού η τυρβώδης διάχυση και διασπορά, που ακολουθούν, εξαρτώνται πρωταρχικά από τη ροή στο περιβάλλον ρευστό και ως εκ τούτου ελέγχεται από τη φύση.

Οι τυρβώδεις ανωστικές φλέβες, αξισυμμετρικές ή διδιάστατες, εκτοξευόμενες κατακόρυφα, οριζόντια ή υπό κλίση, δημιουργούνται από την αρχική ορμή στην έξοδο και με τη σύγχρονη δράση των ανωστικών δυνάμεων οδηγούνται προς τα

πάνω. Οι διάφορες κατηγορίες των ροών αυτών έχουν μελετηθεί άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά με στόχο την κατανόηση του μηχανισμού της ανάμιξης και της δομής των ροών αυτών καθώς και τη μαθηματική τους προσομοίωση. Οι κατακορύφως εκτοξευόμενες αξισυμμετρικές και διδιάστατες ανωστικές φλέβες έχουν μελετηθεί σε μεγάλο βάθος τα τελευταία χρόνια, βλέπε για παράδειγμα List [1, 2], Kotsovinos [3], Kotsovinos [4], Papanicolaou and List [5], κ.λπ. Λιγότερο έχουν μελετηθεί οι οριζοντίως ή υπό γωνία εκτοξευόμενες ανωστικές φλέβες, βλέπε Lemieux [6], Abdel-Rahman [7], Αγγελίδης [8], Papps and Wood [9].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται εύχρηστα διαγράμματα για τον υπολογισμό του αριθμού των οπών του διαχυτήρα με βάση την παροχή των λυμάτων και την επιθυμητή αραίωση. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται διαγράμματα για την απευθείας εκλογή των χαρακτηριστικών του διαχυτήρα - χωρίς επαναληπτικές δοκιμές - με βάση τον ενδεικτικό πληθυσμό, το διατιθέμενο βάθος και την επιθυμητή αραίωση, τόσο για κατακόρυφη όσο και για οριζόντια διάθεση των υγρών αποβλήτων. Ακόμη για μικρούς πληθυσμούς υποδεικνύεται η διαμόρφωση κατάλληλου διαχυτήρα με στόχο την επίτευξη αραίωσης μεγαλύτερης του 1,000, ώστε να μειωθεί ή να εξαλειφθεί η απαίτηση για χλωρίωση των λυμάτων πριν από τη διάθεσή τους στη θάλασσα.

2.2. Οι ιδιότητες των τυρβωδών ανωστικών φλεβών σε ακίνητο και κινούμενο ρευστό. (The properties of buoyant turbulent thermals and plumes in still and crossflowing environments, G. M. Faeth, Z. Dai+, F. J. Diez, O. C. Kwon† and R. Sangras, 2002)

Η παρούσα μελέτη, ασχολείται κυρίως με σταθερά πλούμια και τις συνθήκες ροής από τη φλέβα, σε ακίνητο ρευστό, οι οποίες σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες, εξαρτούνται από την τάξη μεγέθους της οπής της «πηγής», σε μήκη μεγαλύτερα από 100 φορές τη διάμετρο της οπής της «πηγής», όπου και παρατηρείται πιο ομαλή ροή. Μετρήσεις που έγιναν με θερμικές και ανωστικές φλέβες, για αλατισμένο νερό σε περιβάλλον νερού με κανονική αλατότητα, μέσω των κατάλληλων πειραμάτων, έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αφού παρατηρούνταν υψηλοί αριθμοί Reynolds .

Άλλα πειράματα που έγιναν στο παρελθόν, έδειξαν ότι οι συνθήκες ροής σταθεροποιούνται αναλόγως γρήγορα, δηλαδή 40 φορές τη διάμετρο της οπής της φλέβας. Πολύ μικρότερη απόσταση, σε σχέση με τα αποτελέσματα των σταθερών πλουμίων (100 φορές τη διάμετρο οπής). Μετά από παρατήρηση της συμπεριφοράς σε όλες τις περιπτώσεις συνθηκών ροής, οι μετρήσεις έδειξαν ότι όλες οι περιπτώσεις έχουν σχετικά ίδια συμπεριφορά σε περιοχές κοντά στην πηγή. Έτσι έγινε πιο απλό να μελετηθούν τα διάφορα είδη φλεβών μέσω σύγκρισης, για τα φαινόμενα αυτά που αποτέλεσαν ξανά αντικείμενο μελέτης από τους Baum et al., Turner, Tennekes and Lumley, Hinze, Chen and Rodi, List, απ' όπου και χρησιμοποιήθηκαν καταστατικοί νόμοι για τους υπολογισμούς, των πειραμάτων της παρούσας εργασίας. Η μελέτη αυτών των φαινομένων είναι αρκετά ενδιαφέρον για τους μηχανικούς γιατί μας δίνει πληροφορίες για τον τρόπο διάθεσης των βιομηχανικών και μη υγρών και αέριων αποβλήτων στη θάλασσα ή στην ατμόσφαιρα αντίστοιχα.

Μια παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο είναι το μέγεθος $(x-x_0)/d$ όπου $(x-x_0)$ είναι η απόσταση στον άξονα x από την αρχή της φλέβας (x_0) και d η διάμετρος οπής της φλέβας. Αυτό το μέγεθος εξαρτάται από το είδος της ροής, τις ιδιότητες της ροής και την ικανότητα της ροής να σταθεροποιηθεί. Όπως προαναφέρθηκε το αριθμός αυτός κυμαίνεται από το 40 στο 100. Συγκεκριμένα κατά 10-25, είναι $(x-x_0)/d \leq 62$, στα σταθερά πλούμια απ' ό,τι στα jet. Σημαντικό ρόλο έχουν επίσης οι ταχύτητες που αναπτύσσονται, οι οποίες είναι σχετικά μικρές στα πλούμια συγκρινόμενες με αυτές που αναπτύσσονται στα jet.

Μια δεύτερη παράμετρος είναι η απόσταση από την πηγή μετρημένη κατά κλίμακα Morton, $(x-x_0)/l_M$, σε μετρήσεις όπου το δυναμικό της τύρβης είναι πολύ μεγαλύτερο από ο δυναμικό της ροής στην πηγή.

Μια τρίτη παράμετρος που πρέπει να ικανοποιείται είναι η πυκνότητα του εισερχόμενου ρευστού πρέπει να συμπεριφέρεται γραμμικά σε σχέση με του περιβάλλοντος ρευστού.

Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ενώσεις άνθρακα ή θείου σε μορφή αερίου (carbon dioxide or sulfur hexafluoride). Χρησιμοποιήθηκε στρογγυλός μακρύς αγωγός. Το αέριο της πηγής εισρέει στο περιβάλλον ρευστό, και με τη χρήση ειδικά λέιζερ γίνεται μέτρηση των συνθηκών της ροής, όσον αφορά τη συμπεριφορά της στην πηγή και μακριά από αυτή. Οι συνθήκες πηγής ήταν: διάμετρος οπής 6.4 και 9.7 mm, μέσες ταχύτητες 1.74 και 1.89 m/s, αριθμός Reynolds 2000 και 4600, αριθμοί Froude 7.80 και 3.75, τιμές l_M/d 7.34 και 3.53, πίεση της τάξης του 99 ± 0.5 kPa και θερμοκρασίες 297 ± 0.5 K που καθιστούν την πυκνότητα και το κινηματικό ιξώδες στα 1.16 kg/m^3 και $14.8 \text{ mm}^2/\text{s}$. Οι μετρήσεις αυτές επεξεργάστηκαν μέσω ηλεκτρονικού προγράμματος στον υπολογιστή απ' όπου και εξήχθησαν τα πιο κάτω διάγραμματα για $(x-x_0)/d \geq 7$, $(x-x_0)/d \geq 87$ με $(x-x_0)/l_M \geq 12$ και αριθμούς Reynolds 2300-5900.

Οι συνθήκες που δημιουργούνται στην παρούσα πειραματική εργασία σταθερές φλέβες σε ακίνητο μη στρωματομένο περιβάλλον δείχνουν ομαλή συμπεριφορά ροής των πλουμίων για $(x-x_0)/d \geq 87$ και $(x-x_0)/l_M \geq 12$, δηλαδή αρκετά μακριά από την πηγή, πράγμα διαφορετικό από παλαιότερες μετρήσεις που ήταν περιορισμένες μέχρι $(x-x_0)/d \leq 62$. Σημαντικό ρόλο παίζει το δυναμικό της ροής, η φύση της ροής, το περιβάλλον ρευστό και η δομή της πηγής. Επίσης σημαντικό βαθμό για την μεταφορά της μάζας έχει η έντονη τύρβη που παρατηρείται στον κάθετο με την πηγή άξονα.

2.3. Ρύπανση επιφανειακών υδάτων από την οριζόντια βυθισμένη εξάπλωση λυμάτων στη θερμοκλίνη θαλάσσιας περιοχής (Κωτσοβίνος Ν. Ε. 2005)

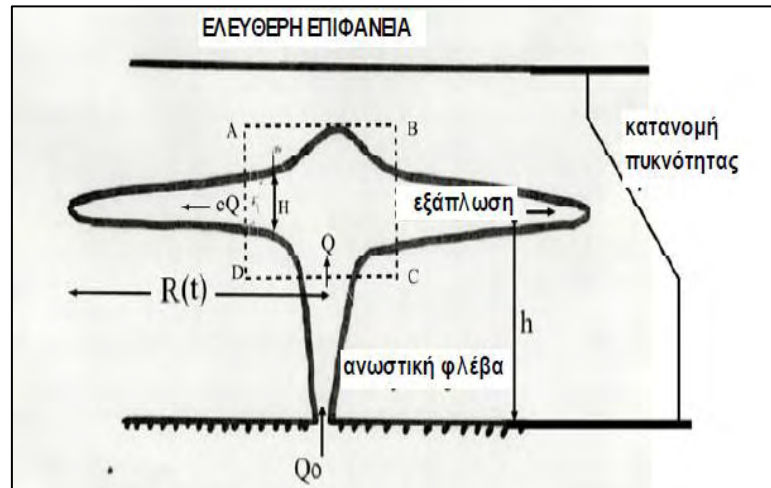
Στη παρούσα εργασία μελετάται πως η δημιουργούμενη αξισυμμετρική ροή μέσα σε στρωματισμένη θάλασσα, που προέρχεται από την οπή ενός διαχυτήρα, ανέρχεται προς τα πάνω, μέχρι το επίπεδο που επιτρέπει η αρχική ορμή και η ασκούμενη ανωστική δύναμη, και στη συνέχεια εξαπλώνεται βυθισμένα μέσα στη θάλασσα, σχηματίζοντας ένα αξισυμμετρικό ρεύμα βαρύτητας.

Ο υδραυλικός μηχανικός έχει στη διάθεσή του διάφορα μοντέλα για να υπολογίσει τα χαρακτηριστικά της δημιουργούμενης ανωστικής φλέβας (αραιώση, διερχόμενη παροχή, τερματικό ύψος) από την έξοδο της μέχρι το επίπεδο του τερματικού ύψους ας. Ωστόσο με τα μοντέλα αυτά καθώς και με τις ημιεμπειρικές εξισώσεις δεν είναι δυνατό να προβλεφθεί η εξέλιξη της ακτίνας οριζόντιας βυθισμένης εξάπλωσης του δημιουργούμενου ρεύματος βαρύτητας, ως συνάρτησης του χρόνου.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση αδιάστατων εξισώσεων για την εξέλιξη της ακτίνας εξάπλωσης του πεδίου ρύπανσης, που δημιουργείται από τη διάθεση λυμάτων μέσω οπής σε στρωματισμένο περιβάλλον. Τα μόνα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα που αναφέρονται σε ακτινική εξάπλωση σε στρωματισμένο περιβάλλον, που προέρχονται από συνεχή διάθεση παροχής μέσω οπής, είναι των: α) Zatsepin and Shapiro, οι οποίοι μελέτησαν στρωτές ροές πλουμίων σε ακίνητο στρωματισμένο περιβάλλον και εξέτασαν μόνο τη μακρινή «ιξώδη» περιοχή, β) των Lemkert and Imberger, οι οποίοι διεξήγαγαν δύο σειρές πειραματικών μετρήσεων σε λίμνη στην κοντινή «αδρανειακή» περιοχή του πεδίου ακτινικής εξάπλωσης, και γ) του Kotsovinos, ο οποίος έκανε πειράματα με ένα μεγάλο εύρος μεταβολής αρχικών παραμέτρων και κάλυψε τόσο την κοντινή «αδρανειακή» περιοχή όσο και τη μακρινή «ιξώδη» περιοχή.

Η οριζόντια βυθισμένη ακτινική εξάπλωση σε στρωματισμένο περιβάλλον έχει μελετηθεί θεωρητικά από τους Chen, Zatssepin and Shapiro, Ivey and Blake, Didden and Maxworthy, Lister and Kerr, Lemkert and Imberger, και Kotsovinos. Όλοι αυτοί οι ερευνητές συμφωνούν, ότι για μεγάλους χρόνους υπάρχει μια ισορροπία ανάμεσα στις ασκούμενες στις δύο πλευρές του ρεύματος βαρύτητας διατμητικές (λόγω ιξώδους) δυνάμεις και στις ανωστικές (λόγω πίεσης) δυνάμεις και ότι σε αυτή την περιοχή η ακτίνα εξάπλωσης $R(t)$ του ρεύματος βαρύτητας αυξάνει με το χρόνο t ανάλογα με το $t^{1/2}$.

Το περιβάλλον ρευστό είναι ακίνητο και στρωματισμένο ως προς την πυκνότητα. Υποτίθεται, ότι μια αξισυμμετρική ανωστική φλέβα ανέρχεται προς τα πάνω μέχρι το επίπεδο που η μεταφερόμενη ορμή και η ασκούμενη ανωστική δύναμη της επιτρέπουν, και στη συνέχεια εξαπλώνεται οριζόντια στο επίπεδο του τερματικού της ύψους. Υποτίθεται, ότι το σχηματιζόμενο με τον τρόπο αυτό ρεύμα βαρύτητας είναι αξισυμμετρικό. Αυτό είναι ακριβές με την υπόθεση ακίνητου περιβάλλοντος και εκροή λυμάτων μόνο από μία κυκλική οπή. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη τα πολύ μεγάλα μήκη οριζόντιας εξάπλωσης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης και για οριζόντια βυθισμένη εξάπλωση, που δημιουργείται από εκροή μέσω διαχυτήρα.



Σχήμα 2.3. Σχηματική απεικόνιση ρεύματος βαρύτητας προερχόμενου από αξισυμμετρική ροή σε ακίνητο στρωματισμένο περιβάλλον

Ανάλυση τάξεως μεγέθους δείχνει, ότι η οριζόντια βυθισμένη εξάπλωση ρεύματος βαρύτητας χαρακτηρίζεται γενικά από δύο περιοχές ανάλογα με το σχετικό μέγεθος των δυνάμεων, που προκαλούν ή επιβραδύνουν την εξάπλωση. Η δύναμη λόγω πίεσης (ανωστική) είναι η κυρίαρχη δύναμη, που οδηγεί τη ροή. Οι δυνάμεις, που κυρίως ανθίστανται, είναι στην κοντινή περιοχή η δύναμη αδράνειας και στη μακρινή περιοχή η διατμητική δύναμη λόγω ιξώδους. Μετά από θεωρητική ανάλυση και πειραματική επιβεβαίωση προτείνονται στην παρούσα εργασία αναλυτικές εξισώσεις για την ακτίνα εξάπλωσης του ρεύματος βαρύτητας στην κοντινή «αδρανειακή» περιοχή, στη μακρινή «ιξώδη» περιοχή καθώς και για τον μεταβατικό χρόνο αλλαγής συμπεριφοράς και για την αντιστοιχούσα μεταβατική ακτίνα εξάπλωσης. Οι εξισώσεις αυτές είναι χρήσιμες για τον υδραυλικό μηχανικό για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης ρύπων, που έχουν το χαρακτηριστικό της απομείωσης με την πάροδο του χρόνου.

2.4. Πειραματική εφαρμογή σε τυρβώδη ανωστική εκτοξευόμενη φλέβα. (Παπαντωνίου Σ. Ι., 2009)

Το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η μελέτη μία τυρβώδους εκτοξευόμενης ανωστικής φλέβας. Σύμφωνα με τους Fischer et al., η συμπεριφορά μιας εκτοξευόμενης φλέβας εξαρτάται από τριών ειδών παραμέτρους: παράμετροι της φλέβας, περιβαλλοντικές παράμετροι, γεωμετρικοί παράγοντες. Στις παραμέτρους της φλέβας περιλαμβάνονται η αρχική ταχύτητα εκτόξευσης, το επίπεδο τύρβης, η αρχική ορμή και η παροχή καθώς και η ροή που οφείλεται στις ιδιότητες του ρευστού της φλέβας όπως είναι η θερμότητα και η αλατότητα. Στις περιβαλλοντικές παραμέτρους περιλαμβάνονται ο κινητός ή ακίνητος αποδέκτης, η ένταση της τύρβης αυτού, το βάθος του αποδέκτη και τα διαφορετικά επίπεδα πυκνότητας (διαστρωμάτωση). Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν συνήθως τη συμπεριφορά της φλέβας σε ορισμένη απόσταση από το στόμιο. Οι γεωμετρικοί (ή κατασκευαστικοί) παράγοντες είναι το σχήμα, η διεύθυνσης εκροής, το υλικό κατασκευής του διαχυτήρα, η απόσταση της φλέβας από τα στερεά όρια, και εάν η φλέβα είναι βυθισμένη, η σχετική θέση με την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Πρόκειται, δηλαδή για τη μελέτη τυρβώδους ανωστικής εκτοξευόμενης φλέβας που πραγματοποιήθηκε μέσα από τη διενέργεια 36 συνολικά πειραμάτων. Η ροή μίας φλέβας θερμού νερού η οποία εκβάλλει σε μία δεξαμενή με νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, δηλαδή σε περιβάλλον διαφορετικής πυκνότητας, και η οποία εκτοξεύεται από μια πηγή, ώστε να επιτυγχάνεται γρήγορη διάλυση της σε αυτό. Αυτό μελετάται με τη χρήση θερμιστόρων ταχείας απόκρισης, οι οποίοι μετρούν θερμοκρασίες σε όλο το πλάτος της φλέβας και για διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από την έξοδο του ακροφύσιου.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με κυκλικά ακροφύσια και ελλειπτικά ακροφύσια (κυκλικά ακροφύσια τα οποία διατηρήσαμε κατά γωνία 45°), ποικίλων διαμέτρων. Παράλληλα, ο όρος «ανωστική» αναφέρεται στην επιρροή της άνωσης σε αυτήν, καθώς πρόκειται για μία φλέβα βυθισμένη. Τα πειράματα της εργασίας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου. Η πειραματική διάταξη αποτελείται από:

- Δεξαμενή εσωτερικών διαστάσεων 1m, πλάτους 0.7m και ύψους 0.8m
- Θερμοσίφωνα γλυκού νερού
- Κυκλοφορητή
- Ρυθμιστή πίεσης
- Κάρτα δειγματοληψίας 8 διαφορετικών καναλιών
- Απλό δέκτης θερμοκρασίας από 1 θερμόμετρο
- 8 θερμίστορες
- Θερμοστοιχείο PT100
- Ροόμετρο / παροχόμετρο
- Μανιβέλα (για την κίνηση των θερμιστόρων)
- Θερμόμετρο
- Φορητό υπολογιστή (με λογισμικό Labview 7)

Η δεξαμενή με το περιβάλλον ρευστό είναι μία κατασκευή από ανοξείδωτο χάλυβα με πάχος γυαλιού 1.25 cm. Ο πυθμένας της καθώς και η μία από τις πλευρές στις οποίες υπάρχουν υποδοχές για τα ακροφύσια είναι κατασκευασμένα από Plexiglas (ή Lucite), ενώ οι υπόλοιπες πλευρές είναι από γυαλί.

Στο αριστερό τμήμα της δεξαμενής υπάρχει περιμετρικός υπερχειλιστής ώστε το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας σε σχέση με το ακροφύσιο να παραμένει σταθερό. Στο κέντρο του πυθμένα της δεξαμενής τοποθετήθηκαν τα ακροφύσια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματά μας κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο κατακόρυφος άξονας της φλέβας που περνά από το κέντρο της διατομής του ακροφύσιου να ταυτίζεται με τον άξονα της δεξαμενής.

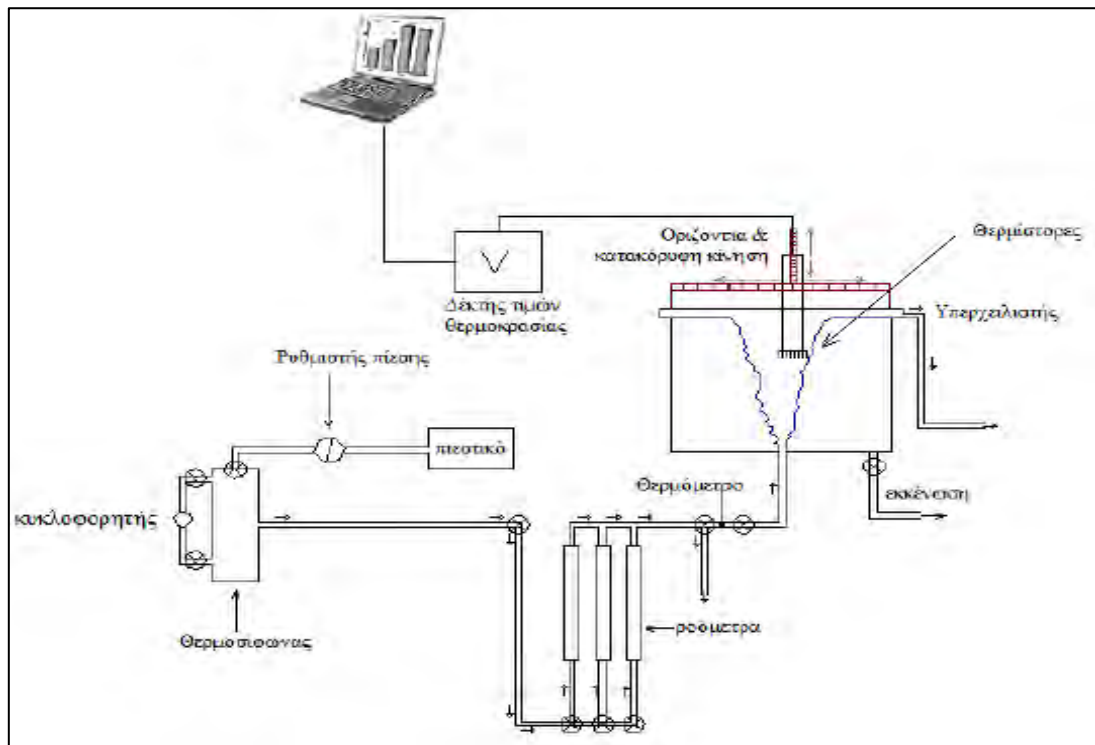
Όπως παρατηρείται και στο Σχήμα 2.4 τα ακροφύσια συνδέονται με έναν θερμοσίφωνα μέσω ενός σωλήνα. Ο σωλήνας αυτός, ο οποίος τροφοδοτείται από έναν θερμοσίφωνα, μεταφέρει το θερμό νερό στη δεξαμενή. Λίγο πριν την έξοδο του νερού στη δεξαμενή υπάρχει ένα ροόμετρο το οποίο μετράει την παροχή του. Στο θερμοσίφωνα, πριν και μετά το ροόμετρο και πριν την έξοδο από το ακροφύσιο υπάρχουν βάνες, ενώ πριν την τελευταία βάνη κοντά στο ακροφύσιο υπάρχει ένα θερμοστοιχείο PT100 το οποίο χρησιμεύει στο να μετράται η θερμοκρασία του διαχεόμενου ρευστού.



Εικόνα 2.1. Η δεξαμενή του πειράματος



Εικόνα 2.2. Ρυθμιστής πίεσης στο θερμοσίφωνα



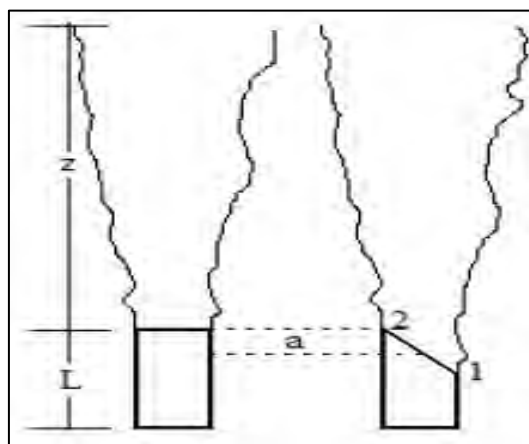
Σχήμα 2.4. Διάταξη συσκευών πειράματος

Στον θερμοσίφωνα υπάρχει ένας κυκλοφορητής, προκειμένου να «κυκλοφορεί» το νερό που θερμαίνεται, ώστε όλο το νερό μέσα σε αυτόν να έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία. Επιπρόσθετα, στον θερμοσίφωνα είναι συνδεδεμένος ένας σωλήνας που μεταφέρει πεπιεσμένο αέρα, δια μέσου μίας συσκευής ρύθμισης της πίεσης. Έτσι, επιτυγχάνονται συνθήκες πίεσης ίσης με 2 Atm. Μετά τη θέρμανση του νερού, οι βάνες του κυκλοφορητή κλείνουν.

Τέλος, πάνω από τη δεξαμενή, οι μετρήσεις της θερμοκρασίας πραγματοποιούνται με τη χρήση 8 θερμίστρων που λαμβάνουν θερμοκρασιακές τιμές με ακρίβεια $\pm 5\%$

κατά μήκος της διαχεόμενης φλέβας θερμού νερού (σε σχέση με το περιβάλλον νερό της δεξαμενής) σε αποστάσεις πολλαπλάσιες της διαμέτρου της διατομής των χρησιμοποιούμενων ακροφύσιων (0.5, 1 και 1.5 cm). Η κίνηση των θερμιστόρων γίνεται οριζόντια (με κύλιση πάνω σε ράγες) και κατακόρυφα (με τη χρήση μανιβέλας). Οι θερμιστορες συνδέονται με κάρτα δειγματοληψίας που τροφοδοτείται από μία τροφοδοτική συσκευή και ο οποίος «στέλνει» τις μετρήσεις στον υπολογιστή. Μέσω του λογισμικού Labview 7, οι τιμές της θερμοκρασίας αποθηκεύονται σε αρχεία κειμένου, ενώ η συχνότητα λήψης τιμών καθορίζεται από το λογισμικό.

Ο βασικός σκοπός της εργασίας ήταν ο υπολογισμός της διάλυσης σε διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το ελλειπτικό ακροφύσιο καθώς και η σύγκρισή της με τη διάλυση που επιτυγχάνεται σε διαφορετικές κατακόρυφες αποστάσεις από το κυκλικό ακροφύσιο. Η πεποίθηση ότι η διάτμηση ενός κυκλικού ακροφύσιου κατά 45° θα αύξανε τα επίπεδα της διάλυσης για συγκεκριμένες κατακόρυφες αποστάσεις από το στόμιο, όχι μόνο δεν επιβεβαιώθηκε, αλλά τα αποτελέσματα που προέκυψαν απέδειξαν ακριβώς το αντίθετο: ότι η διάτμηση ενός κυκλικού διαχυτήρα κατά 45° θα επιφέρει μείωση, έστω και μικρή, της μέσης διάλυσης του διαχεόμενου ρευστού, το οποίο παρατηρείται και στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Διαφορά κυκλικής και ελλειπτικής οπής

Ενδεχομένως η διάλυση του διαχεόμενου ρευστού να επηρεάζεται από το μήκος του αγωγού, το οποίο στην περίπτωση του ελλειπτικού ακροφύσιου μειώθηκε κατά a . Η «αποκόλληση» του διαχεόμενου ρευστού από το ακροφύσιο στο σημείο 1 και η «συγκράτησή» του από το απέναντι τοίχωμά του μέχρι την «αποκόλλησή» του και από το σημείο 2 (απόσταση $+ 2a$), ενδεχομένως να επηρεάζει αρνητικά την τελική διάλυση του διαχεόμενου ρευστού στο περιβάλλον ρευστό σε υψόμετρο z .

Μία τελική διαπίστωση σε σχέση με την εφαρμογή των πειραματικών αποτελεσμάτων στο περιβάλλον, αυτή θα μπορούσε να περιοριστεί στο γεγονός ότι, εάν διατμηθεί ένας κυκλικός αγωγός που εκβάλλει σε έναν υδάτινο αποδέκτη μικρότερης πυκνότητας διαχεόμενο ρευστό, τότε τα επίπεδα της διάλυσης του διαχεόμενου ρευστού θα είναι ελαφρώς μικρότερα σε σχέση με αυτά που επιτυγχάναμε πριν την διάτμηση.

2.5. Υπολογιστική διερεύνηση της ροής ανωστικών φλεβών. (Μεταπτυχιακή Εργασία , Μύρτου Ε. , 2012)

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η παρουσίαση ενός δισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης τυρβωδών ανωστικών φλεβών. Στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας καταστρώθηκε ένα υπολογιστικό μοντέλο σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran PowerStation 4.0 για την περιγραφή της ροής τυρβωδών αξονοσυμμετρικών ανωστικών φλεβών σε πυκνομετρικά ομογενή αποδέκτη. Επιλύει αριθμητικά μέσω πεπερασμένων διαφορών τις εξισώσεις RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes).

Ως μοντέλο τύρβης χρησιμοποιείται το απλό μοντέλο μήκους ανάμειξης Prandtl. Από την εφαρμογή του μοντέλου υπολογίζονται σε κάθε σημείο της ροής οι μέσες χρονικά ταχύτητες της ροής, η διαμήκης u και η εγκάρσια v , η πυκνομετρική διαφορά $\Delta\rho$ της φλέβας με το περιβάλλον, η γωνία θ που σχηματίζει ο άξονας της φλέβας με το οριζόντιο επίπεδο και η τροχιά της φλέβας.

Επειδή η φλέβα θεωρείται αξονοσυμμετρική, τα πιο πάνω υπολογίζονται, από τον άξονα συμμετρίας μέχρι το όριο της φλέβας με τον αποδέκτη σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις εκροής: κατακόρυφη, οριζόντια και υπό γωνία 45° σε ομογενή, κινούμενο με μικρή ταχύτητα αποδέκτη.

Η εργασία χωρίζεται σε τρία σκέλη. Το πρώτο περιλαμβάνει τη θεωρητική επισκόπηση των πειραματικών προσεγγίσεων και αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης ανωστικών φλεβών. Στο δεύτερο παρουσιάζεται το μαθηματικό υπόβαθρο στο οποίο βασίστηκε ο αλγόριθμος του αριθμητικού μοντέλου. Το τρίτο έχει ως στόχο τη συστηματική αξιολόγηση του αλγορίθμου που αναπτύχθηκε σε σχέση με πειραματικά αλλά και υπολογιστικά αποτελέσματα.

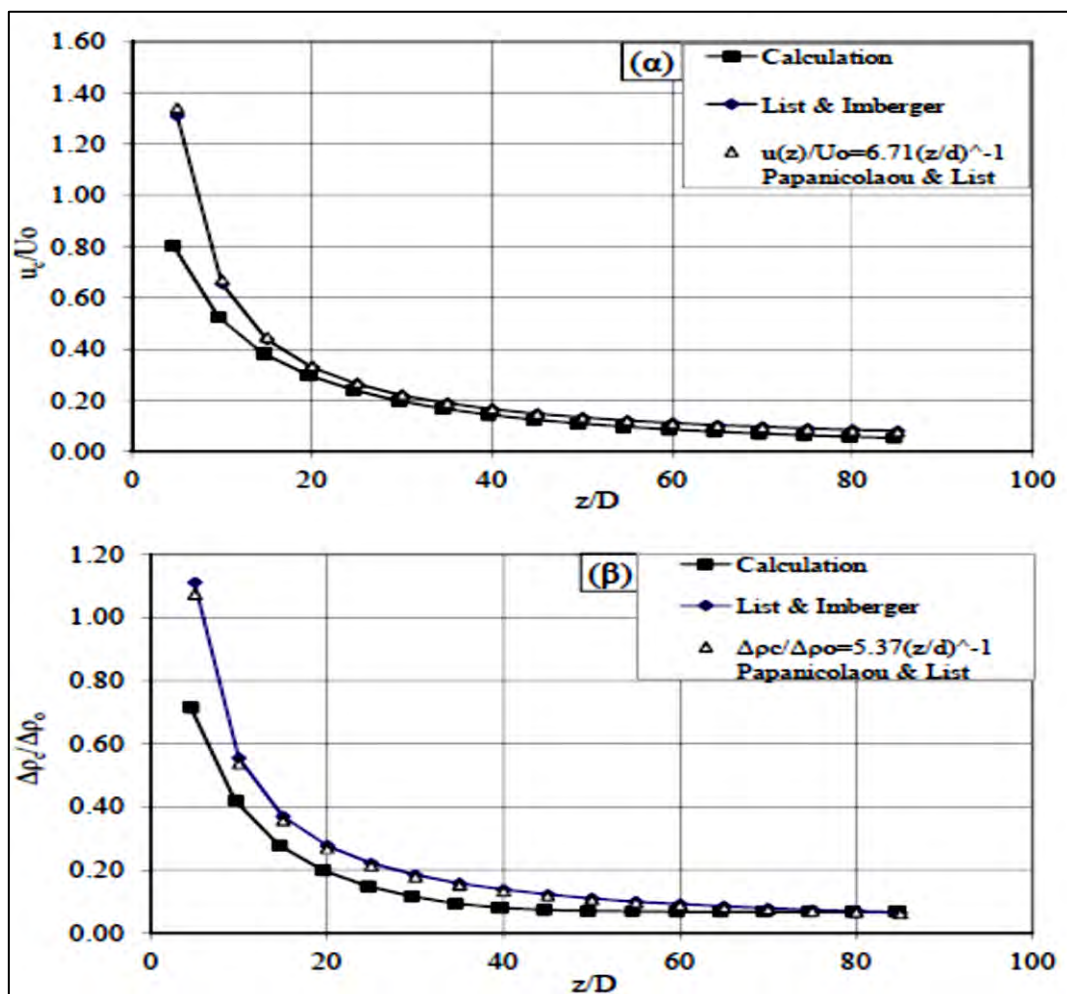
Για κατακόρυφη φλέβα μελετήθηκαν τέσσερεις τυρβώδεις φλέβες με διαφορετικές αρχικές συνθήκες, μία απλή φλέβα και τρεις ανωστικές φλέβες όπου, D η διάμετρος του στομίου εκροής, u_0 η αρχική ταχύτητα εκροής της φλέβας, $\Delta\rho_0$ η αρχική πυκνομετρική διαφορά μεταξύ φλέβας και περιβάλλοντος εκροής, u_a η ταχύτητα του περιβάλλοντος, θ_0 η αρχική γωνία εκροής της φλέβας, Q_0 η αρχική παροχή, M_0 η αρχική ορμή, B_0 η αρχική άνωση, l_q και l_m χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους που δίνονται από τις εξισώσεις $l_q = Q_0/\sqrt{M_0}$ και $l_m = M_0^{3/4}/B_0^{1/2}$, όπου Ri_0 ο αρχικός αριθμός Richardson και Fr_0 ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude.

D	u_0	$\Delta\rho_0$	u_a	θ_0	Q_0	M_0	B_0	l_q	l_m	Ri_0	Fr_0
(m)	(m/s)	(kg/m ³)	(m/s)		(m ³ /s)	(m ⁴ /s ²)	(m ⁴ /s ²)	(m)	(m)		
0.2	2	0.1	0.06	90°	0.063	0.126	0.00006	0.177	26.883	0.0066	142.78
0.2	2	5	0.06	90°	0.063	0.126	0.00308	0.177	3.802	0.0466	20.19
0.2	2	10	0.06	90°	0.063	0.126	0.00616	0.177	2.688	0.0659	14.28
0.2	2	15	0.06	90°	0.063	0.126	0.00925	0.177	2.195	0.0807	11.66

Πίνακας 2.1. Αρχικά δεδομένα για τους υπολογισμούς κατακόρυφων φλεβών

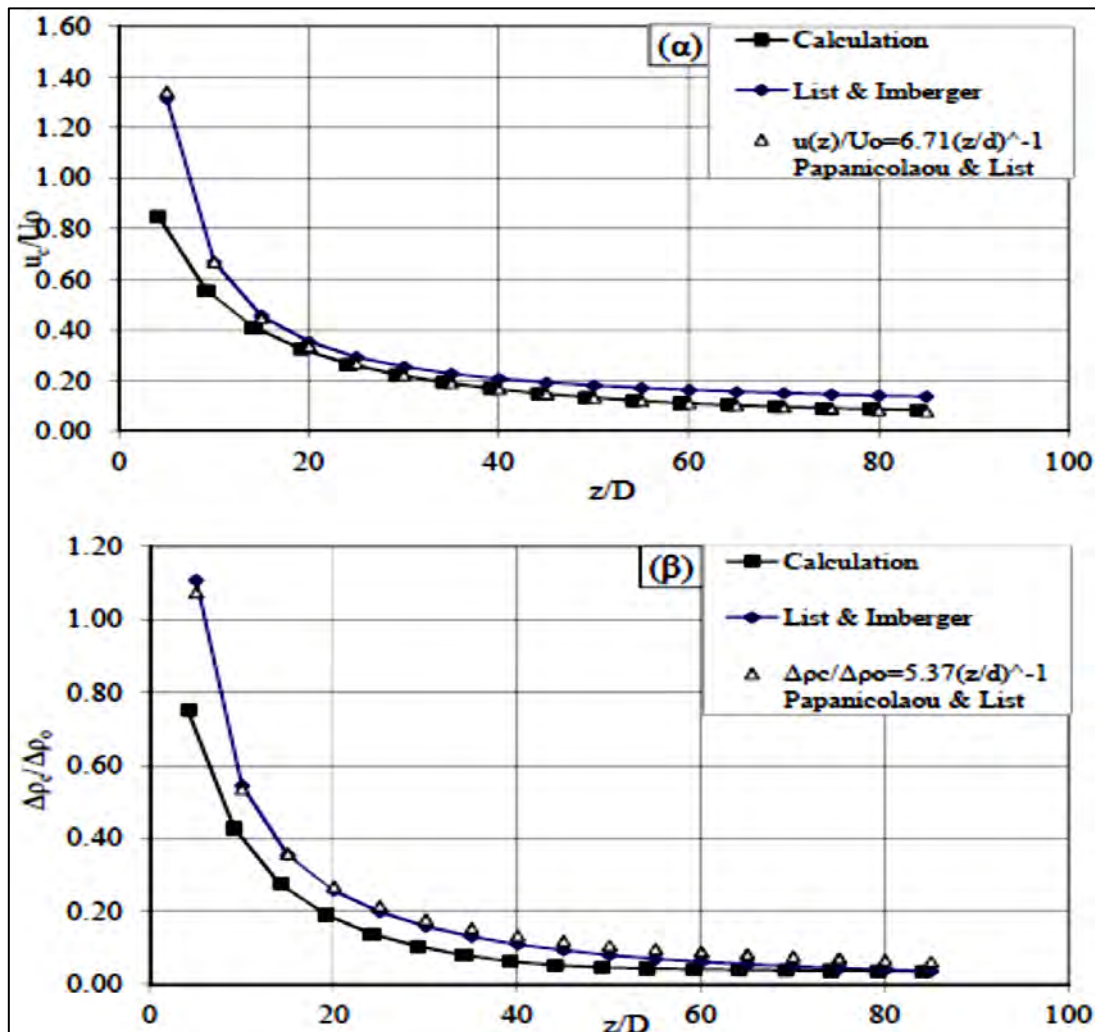
Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα του κώδικα για τη διαμήκη ταχύτητα u και την πυκνομετρική διαφορά $\Delta\rho$ με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της θεωρίας των List & Imberger (1973) και με τα πειραματικά δεδομένα των Papanicolaou & List (1988).

Από την κατανομή των αδιάστατων πυκνομετρικών διαφορών φαίνεται ότι στα μικρότερα z/D υπολογίζονται από τον αλγόριθμο μικρότερες πυκνομετρικές διαφορές αρχικά κατά 50% σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Όπου παρατηρείται ότι για την απλή φλέβα οι κατανομές των ταχυτήτων συμφωνούν ικανοποιητικά (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6. (α) Αδιάστατη ταχύτητα, και (β) αδιάστατη πυκνομετρική διαφορά ως συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης από την πηγή, για $Fr_0=142.78$ και $\Delta\rho_0 =0.1 \text{ kg/m}^3$.

Στο σχήμα 2.7 παρατηρείται ότι για την τυρβώδη ανωστική φλέβα υπάρχει καλή συμφωνία της κατανομής των υπολογισμένων ταχυτήτων με την κατανομή των μετρημένων τιμών των Papanicolaou & List (1988). Σύγκλιση των τιμών υπάρχει για αδιάστατες αποστάσεις $z/D > 60$ από την πηγή.



Σχήμα 2.7. (α) Αδιάστατη ταχύτητα, και (β) αδιάστατη πυκνομετρική διαφορά ως συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης από την πηγή, για $Fr_0=20.19$ και $\Delta\rho_0 =5.0 \text{ kg/m}^3$

- *Κατακόρυφες φλέβες*

Στην περίπτωση της απλής φλέβας, το διάγραμμα των ταχυτήτων u συμφωνεί ικανοποιητικά με τα διαγράμματα που προκύπτουν από τη θεωρία των List & Imberger (1973) και από τα δεδομένα των Papanicolaou & List (1988). Στις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις τυρβωδών ανωστικών φλεβών, τα διαγράμματα της αδιάστατης ταχύτητας u έχουν καλή συμφωνία με τα διαγράμματα που προκύπτουν από τις μετρημένες σταθερές των Papanicolaou & List (1988). Ωστόσο, το αριθμητικό μοντέλο υπολογίζει γρηγορότερη μείωση της αδιάστατης αξονικής ταχύτητας σε σχέση με τη θεωρία των List & Imberger (1973). Για όλες τις περιπτώσεις των ανωστικών φλεβών που μελετήθηκαν, οι αδιάστατες κατανομές των πυκνομετρικών διαφορών $\Delta\rho$ που προκύπτουν από το μοντέλο αποκλίνουν αρχικά έως και 50%, σε σχέση με τις κατανομές που προκύπτουν από τη θεωρία των List & Imberger (1973) και των μετρημένων σταθερών των Papanicolaou & List (1988), για z/D μέχρι 40. Για μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή ($z/D > 40$), όπου η φλέβα αναμένεται να συμπεριφέρεται ως πλούμιο, οι υπολογισμένες κατανομές συμφωνούν ικανοποιητικά με τα διαγράμματα της γενικευμένης θεωρίας των List & Imberger

(1973). Οι κατανομές που προκύπτουν από τις μετρημένες σταθερές των Papanicolaou & List (1988) είναι μεγαλύτερες κατά 20% έως 40% για την πυκνομετρική διαφορά σε σχέση με το μοντέλο και στις περιοχές μακριά από την πηγή, για τις περιπτώσεις φλεβών με $Fr_o=14.28$ και $Fr_o=11.26$ αντιστοίχως.

- *Οριζόντιες φλέβες*

Οι αδιαστατοποιημένες τροχιές που προέκυψαν από το μοντέλο παρουσιάζουν αρχικά καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα των Ryskiewich & Hafetz (1975), Davidson (1989), Gaskin (1995) και Michas & Papanicolaou (2008). Καθώς η απόσταση από την πηγή αυξάνεται, οι υπολογισμένες τροχιές αποκλίνουν σημαντικά από τις πειραματικές. Πιθανώς αυτό να οφείλεται στη συμπεριφορά της ροής ως πλουμίου.

2.6. Τυρβώδης διάχυση διδιάστατης κατακόρυφης φλέβας σε ήρεμο, γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη. (Παπανικολάου Π. , 2010)

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το μέγιστο ύψος αναρρίχησης και η στάθμη οριζόντιας διάχυσης μιας διδιάστατης (2-D) κατακόρυφης φλέβας με μηδενική ή θετική αρχική άνωση, που εκβάλλει σε ήρεμο αποδέκτη με γραμμική στρωμάτωση πυκνότητας. Οι πειραματικές μετρήσεις προσεγγίστηκαν αριθμητικά με τη χρήση μη γραμμικού, μονοδιάστατου ομοιώματος, αφού για την περιοχή της αρχικά απλής φλέβας (jet), μειώθηκε ο συντελεστής συμπαράσυρσης περί το 50% του μετρημένου.

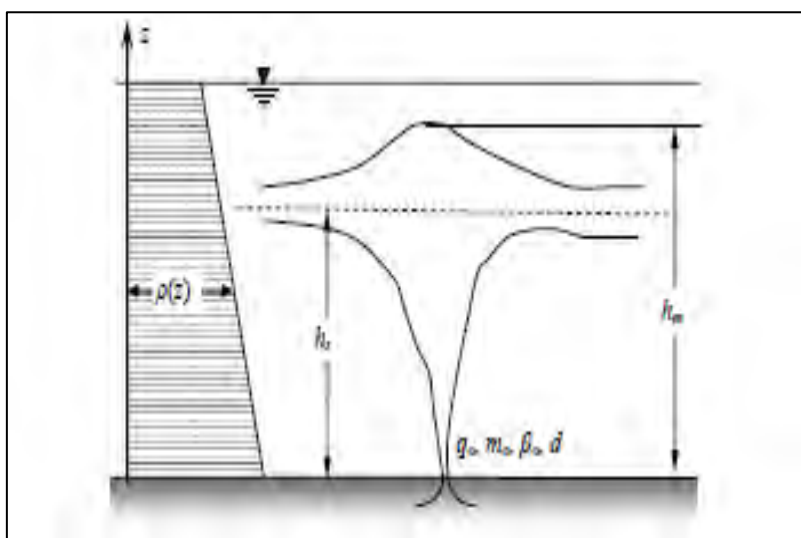
Συγκεκριμένα οι τυρβώδεις ανωστικές φλέβες και τα πλούμια παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις επιστήμες του μηχανικού που σχετίζονται με το περιβάλλον. Υγροί ρυπαντές που προέρχονται από επεξεργασμένα αστικά απόβλητα ή απόβλητα μονάδων αφαλάτωσης, καθώς επίσης και από θερμικά απόβλητα, όπως είναι για παράδειγμα θερμό νερό από την ψύξη θερμικών μονάδων παραγωγής ενέργειας καθώς και ψυχρό νερό από τη θέρμανση υγροποιημένου υγρού αερίου (LNG) για τη μετατροπή του σε αέρια φάση, πρέπει να διατεθούν σε υδάτινους αποδέκτες του άμεσου περιβάλλοντός τους. Έτσι το ρυπαντικό φορτίο (BOD, θερμοκρασιακή διαφορά ή διαφορά αλατότητας) μπορεί να μεταβάλλει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αποδέκτη σε επίπεδα πάνω από τα αποδεκτά όρια. Η πολιτεία βεβαίως (π.χ. U.S. EPA, E.E., κλπ), έχει θεσπίσει όρια για την πιθανή μεταβολή των χαρακτηριστικών του υγρού αποδέκτη, τα οποία δεν πρέπει να υπερβαίνουμε. Για το λόγο αυτό απαιτείται μια αρχική αραίωση του προς διάθεση ρυπαντικού φορτίου των αποβλήτων, η οποία επιτυγχάνεται με μηχανισμούς δημιουργίας φλεβών διάχυσης.

Σύμφωνα με την εργασία οι διαθέσιμοι αποδέκτες, είτε πρόκειται για τη θάλασσα είτε για την ατμόσφαιρα έχουν δύο κοινά χαρακτηριστικά, την κίνηση υπό μορφή ρευμάτων και την πυκνομετρική στρωμάτωση. Για παράδειγμα, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του επιφανειακού νερού και του νερού σε βάθος 70 m από την επιφάνεια της θάλασσας μπορεί να πλησιάσει και τους 15°C , με αποτέλεσμα η πυκνότητα να μεταβάλλεται σαν συνάρτηση του βάθους (θερμοκλίνη). Επίσης στις εκβολές υδατορευμάτων παρατηρείται πυκνομετρική στρωμάτωση της θάλασσας, επειδή το γλυκό νερό παραμένει στην επιφάνεια χωρίς να αναμειγνύεται καθ' ύψος στην περιοχή της εκβολής. Υπάρχει επομένως πυκνομετρική στρωμάτωση στη

θάλασσα και λόγω της διαφοράς αλατότητας ανάμεσα στις επιφανειακές και βαθύτερες στρώσεις της. Οι παραπάνω περιβαλλοντικές παράμετροι, τα ρεύματα και η πυκνομετρική στρωμάτωση του αποδέκτη επηρεάζουν και την αρχική αραίωση της φλέβας.

Η εισαγωγή περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως τα εγκάρσια ρεύματα και η πυκνομετρική στρωμάτωση του αποδέκτη προσθέτουν ένα επί πλέον βαθμό δυσκολίας στην μελέτη της διάχυσης, αλλά είναι αναγκαίες για την καλύτερη περιγραφή του ρυθμού αραίωσης των υπό διάχυση ανωστικών φλεβών. Συχνά η πυκνομετρική στρωμάτωση ενός αποδέκτη πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη σωστή λειτουργία είτε ενός διαχυτήρα επεξεργασμένων αποβλήτων στη θάλασσα, είτε για τη λειτουργία της καμινάδας ενός εργοστασίου στην ατμόσφαιρα, έτσι ώστε να επιτυγχάνουμε τη μέγιστη δυνατή αραίωση.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πειραματικά η διάχυση μιας φλέβας σε ακίνητο αποδέκτη με γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση, που αποτελεί τη απλούστερη δυνατή μορφή στρωμάτωσης. Επίσης, γίνεται και αριθμητική προσομοίωση με τη χρήση κατάλληλα προσαρμοσμένου μονοδιάστατου μοντέλου, ώστε να αναπαραχθούν τα κυριότερα χαρακτηριστικά όπως κη στάθμη αναρρίχησης και η στάθμη διάχυσης της φλέβας.



Σχήμα 2.9. Διδιάστατη ανωστική φλέβα σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη

Σύμφωνα με τα πιο πάνω άρθρα η ροή ανωστικών φλεβών παρουσιάζεται σε αρκετά φαινόμενα που σχετίζονται με τη διάθεση υγρών σε υδάτινους αποδέκτες ή την εκπομπή αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Για την προσομοίωση της ροής ανωστικών φλεβών χρησιμοποιούνται ευρέως, μονοδιάστατα και δισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και πιο πολύπλοκα αριθμητικά μοντέλα, καθώς και εύχρηστες πειραματικές διατάξεις και υπολογιστικά μοντέλα, ικανά να προσομοιώσουν συνθήκες που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

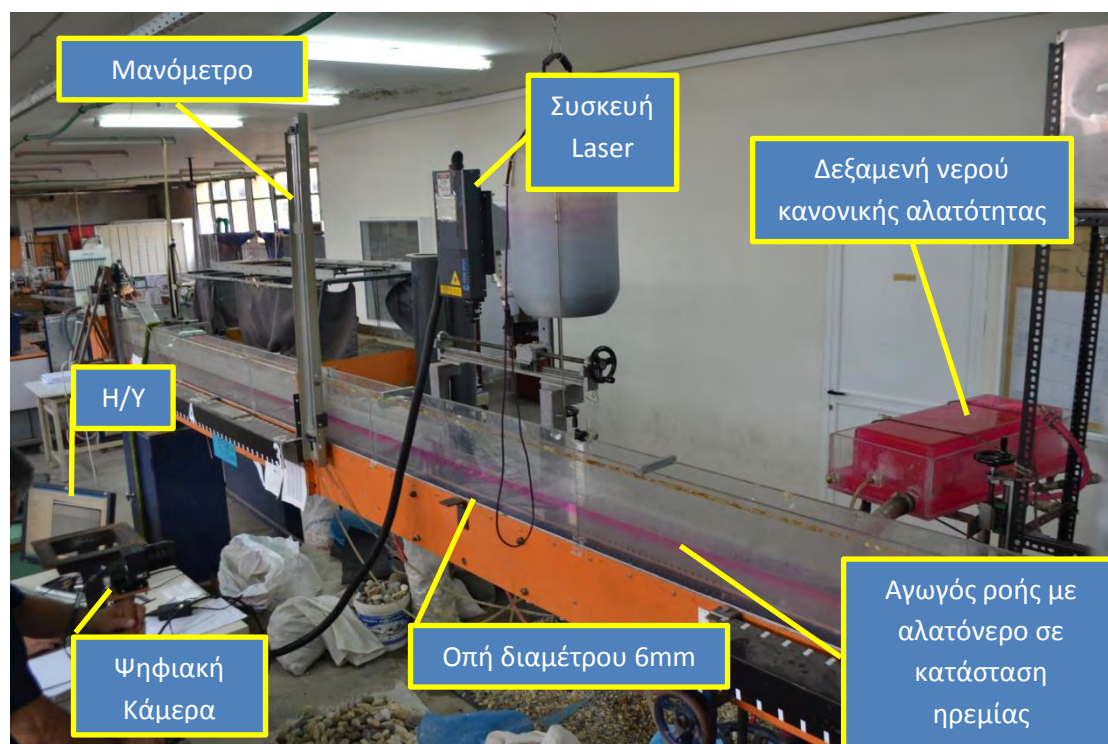
Στην πειραματική αυτή εργασία μελετήθηκε η συμπεριφορά μιας ανωστικής (κατακόρυφης) τυρβώδους εκτοξευόμενης φλέβας (γλυκό νερό) από ακροφύσιο κυκλικής διατομής σε ακίνητο αποδέκτη (αλμυρό νερό). Μελετήθηκαν για διαφορετικές περιπτώσεις τα διάφορα προφίλ ταχύτητας που δημιουργήθηκαν στην περιοχή του ακροφύσιου, λόγω της τύρβης της φλέβας που διαχεόταν στον αγωγό. Υπολογίστηκαν και δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα ροής μάζας για κάθε πείραμα. Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται άρθρα, σχετικά με το θέμα της παρούσας εργασίας.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

3.1. Πειραματική Διάταξη

Στην διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων στο εργαστήριο Υδραυλικών Έργων και Τεχνικής Περιβάλλοντος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε. του Α.Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης. Συνολικά έγιναν 15 πειράματα για διαφορετικές περιπτώσεις χαρακτηριστικών ροής (αρχικές συνθήκες). Στα πειράματα αυτά μελετήθηκαν τα προφίλ ταχύτητας και η ροή μάζας που παρατηρήθηκαν στο φαινόμενο.

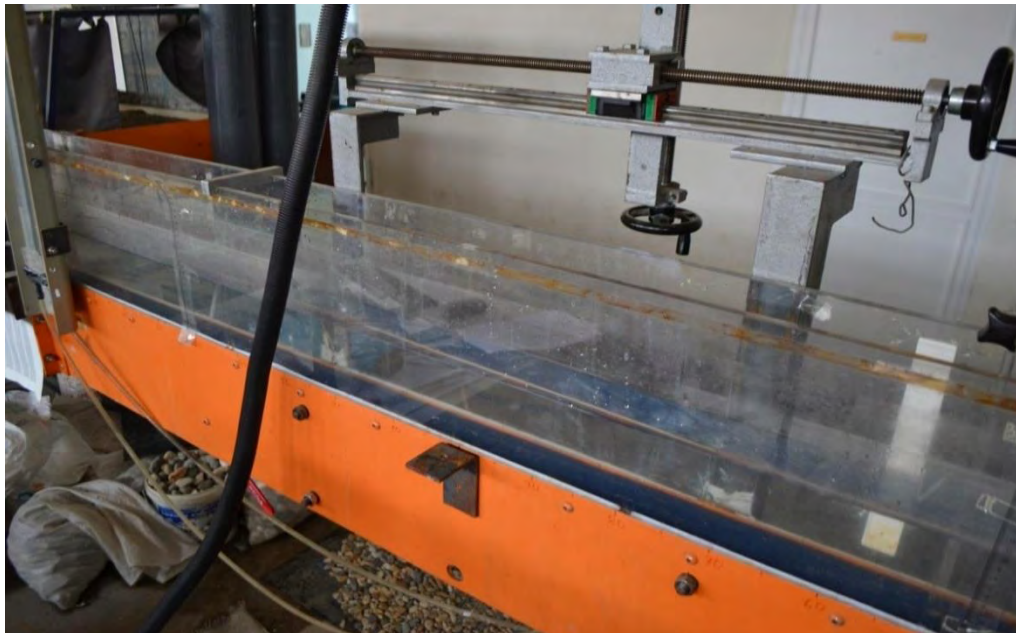
Σε κάθε ένα από τα 15 πειράματα ετοιμάστηκαν διαφορετικά υδραυλικά χαρακτηριστικά, δηλαδή οι αρχικές συνθήκες που είχαν προβλεφθεί. Στη φωτογραφία 3.1 φαίνεται η διάταξη των συσκευών του πειράματος.



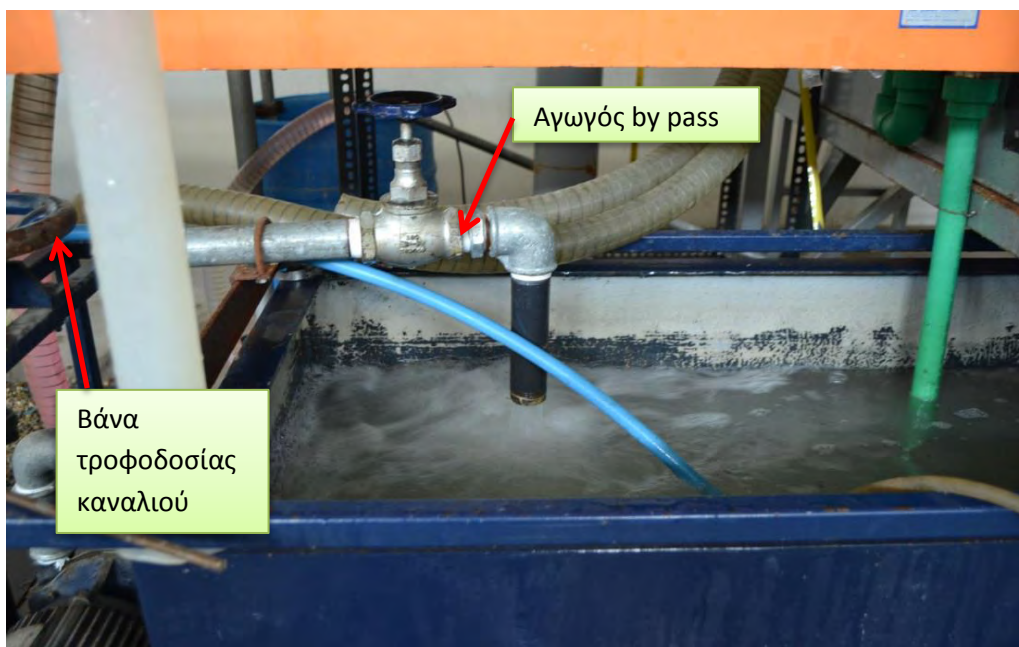
Φωτογραφία 3.1. Διάταξη συσκευών πειράματος

Πρόκειται για έναν ανοιχτό αγωγό ορθογωνικής διατομής πλάτους 0.75 m, μήκους 6.5 m και ύψους 0.25 m με διάφανα τοιχώματα από Plexiglas (Φωτογραφία 3.2), που τροφοδοτείται από μεταλλική δεξαμενή (Φωτογραφία 3.3), στην οποία είχε διαλυθεί συγκεκριμένη ποσότητα αλατιού. Η αλατότητα του νερού επιτυγχάνεται με την ανάδευση του νερού και την υπάρχουσα αντλία μέσω αγωγού by pass. Κατόπιν, πληρούται το κανάλι με αλμυρό νερό της προκαθορισμένης αλατότητας μέσω της αντλίας του καταθλιπτικού αγωγού. Για τη μέτρηση της αλατότητας χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο όργανο, το αλατόμετρο (Φωτογραφία 3.4).

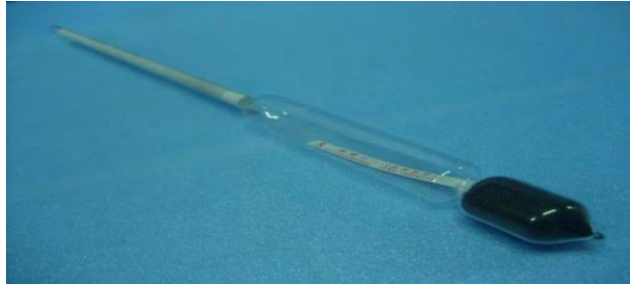
Το χειροκίνητο θυρόφραγμα, στην έξοδο του καναλιού επιτρέπει τον έλεγχο βάθους ροής του νερού εντός του αγωγού (Φωτογραφία 3.5). Τα νερά από το κανάλι αν ανοιχτεί το θυρόφραγμα μπορούν να παροχετευτούν σε δεξαμενή κατάντη του καναλιού. Το βάθος ροής του νερού καθορίζεται ξεχωριστά για κάθε πείραμα (Φωτογραφία 3.6).



Φωτογραφία 3.2. Αγωγός ορθογωνικής διατομής



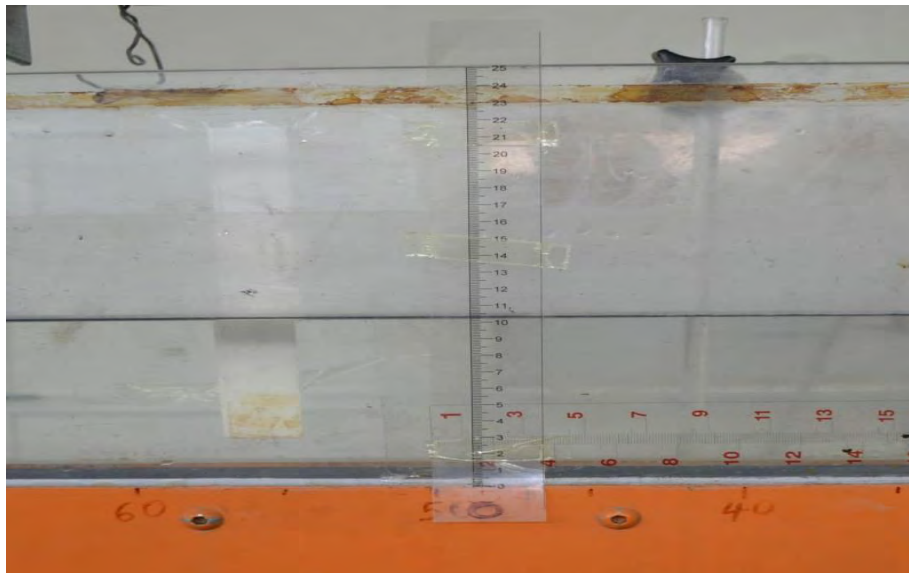
Φωτογραφία 3.3. Δεξαμενή με αλατισμένο νερό



Φωτογραφία 3.4. Αλατόμετρο



Φωτογραφία 3.5. Χειροκίνητο θυρόφραγμα



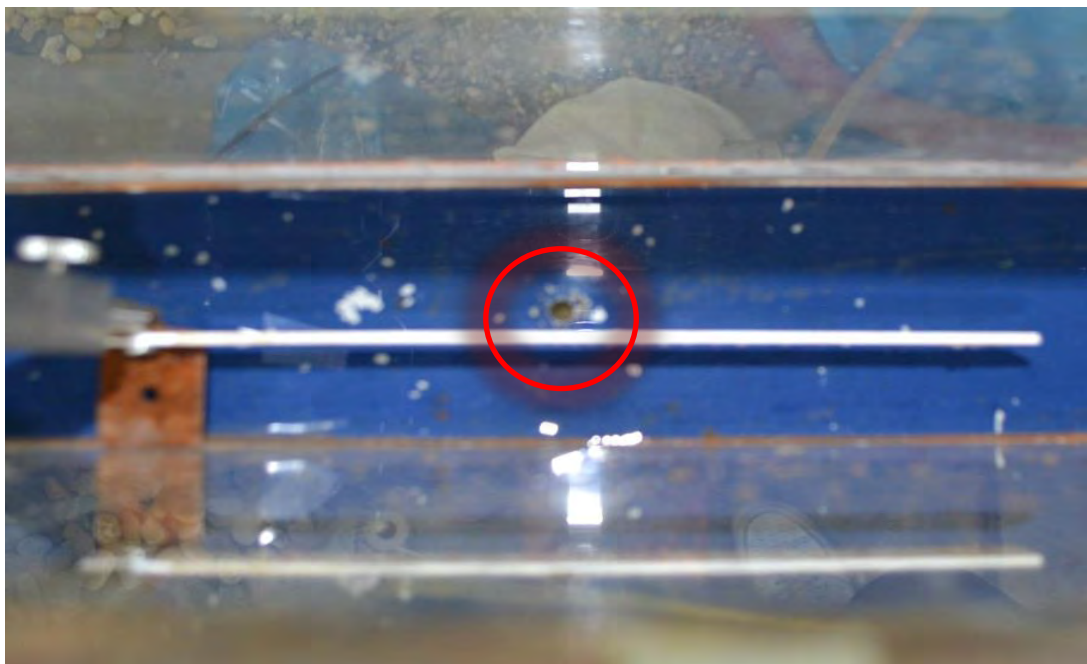
Φωτογραφία 3.6. Καθορισμός βάθους ροής στον αγωγό

Η φλέβα παροχετεύεται από δεξαμενή, τέτοιας διάταξης ώστε να διοχετεύεται – «εκτοξεύεται» νερό μέσω ακροφύσιου στον αγωγό. Στον πυθμένα του αγωγού

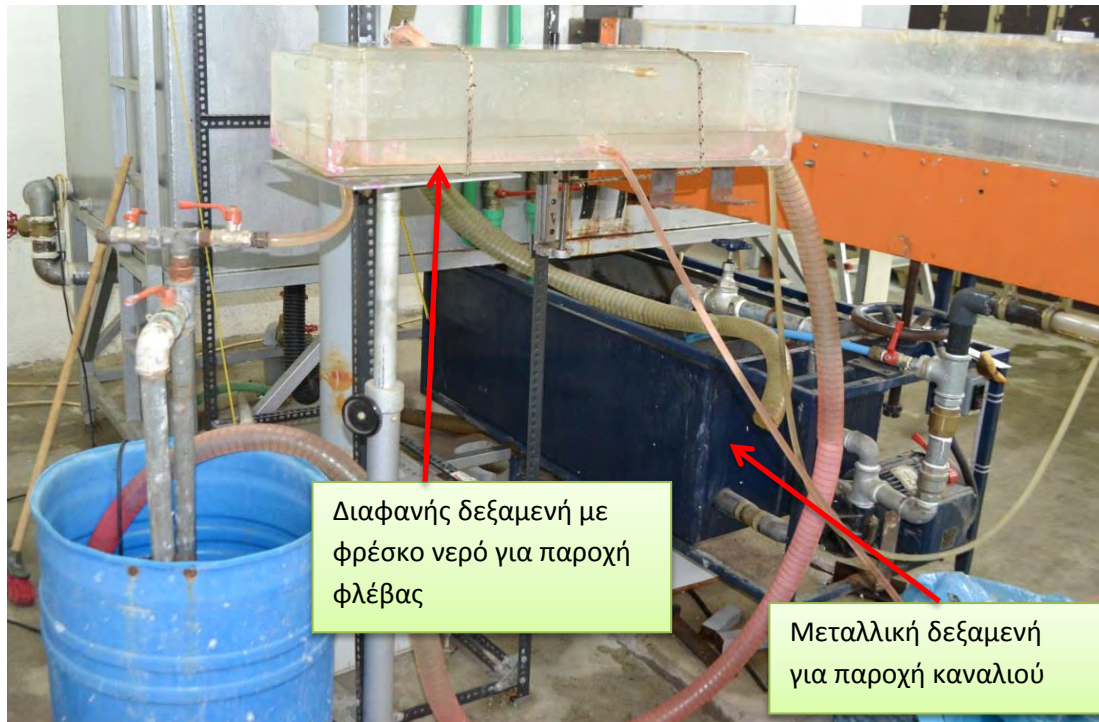
υπάρχει κυκλική οπή σταθερής διαμέτρου $d = 6\text{mm}$ για το πλαστικό ακροφύσιο, μέσω του οποίου διοχετεύεται το νερό της φλέβας στον αγωγό που περιέχει νερό σε κατάσταση ηρεμίας. Η οπή βρίσκεται στο κέντρο του πυθμένα του αγωγού, για καλύτερη ορθότητα αποτελεσμάτων (Φωτογραφία 3.7).

Η συγκεκριμένη δεξαμενή έχει σταθερή στάθμη και τροφοδοτείται συνεχώς με νερό μέσω της αντλίας από βαρέλι όπως φαίνεται στην φωτογραφία 3.8. Μέσω μοχλοβραχίονα ήταν δυνατό να ρυθμίζεται το ύψος της ελεύθερης στάθμης του νερού της δεξαμενής από την ελεύθερη στάθμη του νερού μέσα στο κανάλι. Η δεξαμενή αποτελείται από δύο ορθογωνικές δεξαμενές, η μία μέσα στην άλλη. Όταν γεμίσει η εσωτερική δεξαμενή το νερό υπερχειλίζει και ρέει στην εξωτερική δεξαμενή. Με τον τρόπο αυτόν διατηρείται σταθερή η ελεύθερη επιφάνεια του νερού ανεξάρτητα από την ποσότητα του νερού που εισέρχεται σε αυτήν (εσωτερική δεξαμενή) μέσω της αντλίας. Υπάρχει δε αγωγός διαφανής και ελαστικός που συνδέεται με μανόμετρο που καθορίζει το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας της στάθμης του φρέσκου νερού σε σχέση με την στάθμη του αλμυρού νερού στο κανάλι ώστε να παραμένει σταθερό. Έτσι καθορίζοντας την διαφορά στάθμης τους, καθορίζεται η σταθερή αρχική ταχύτητα εκτόξευσης της πηγής – φλέβας (Φωτογραφία 3.9).

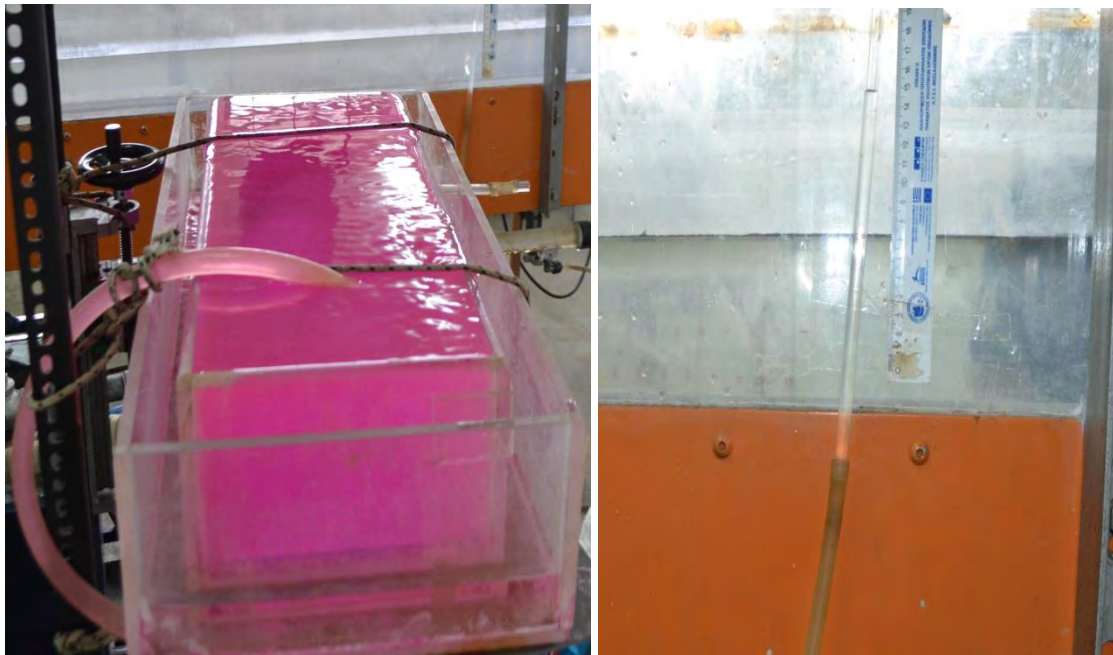
Οι μετρήσεις των ταχυτήτων πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο PIV (Particle Image Velocimetry), η οποία και αναλύεται παρακάτω.



Φωτογραφία 3.7. Κυκλική οπή διαμέτρου $d = 6\text{mm}$ στο κέντρο του πυθμένα του αγωγού



Φωτογραφία 3.8. Διαφανής δεξαμενή με νερό κανονικής αλατότητας συνδεδεμένη με ελαστικό διαφανές σωλήνα για παροχή της φλέβας



Φωτογραφία 3.9. Καθορισμός διαφοράς στάθμης νερού στο κανάλι ελεύθερης στάθμης του νερού της φλέβας.

3.2. Μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry)

3.2.1. Γενικά για την PIV

Σε όλα τα ρευστά υπάρχουν εξαιρετικά μικρά σωματίδια, τα οποία έχει αποδειχθεί ότι, ακολουθούν το δυναμικό πεδίο της ροής του ρευστού (στο βαθμό τον οποίο, τα σωματίδια ακολουθούν τη ροή, που μπορεί να παρασταθεί με ακρίβεια από τον αριθμό Stokes).

Η μέθοδος PIV (Particle Image Velocimetry) χρησιμοποιεί την κίνηση των σωματιδίων, για τον υπολογισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών της ροής. Έχει την δυνατότητα ταυτόχρονης μέτρησης του διανύσματος της ταχύτητας των σωματιδίων, σε συγκεκριμένο διδιάστατο ροϊκό πεδίο. Παράλληλα, προκύπτει και η οπτικοποίηση της ροής. Καθώς το υπό εξέταση υγρό παίζει σημαντικό ρόλο στην μελέτη αυτή, τα σωματίδια έχουν τον κύριο ρόλο για τη μέθοδο, καθώς πρέπει να είναι συμβατά στις προϋποθέσεις που απαιτούνται, ώστε να ακολουθούν τις ιδιότητες του υπό εξέταση πεδίου ροής του υγρού. Αν τα σωματίδια δεν τηρούν τις προϋποθέσεις, θα δημιουργηθεί σφάλμα καθώς η ανάλυση της μεθόδου PIV θα θεωρήσει μη αποδεκτά τα δεδομένα. Ιδανικό θεωρείται τα σωματίδια να είναι σφαιρικά, και να έχουν την ίδια πυκνότητα με το υγρό (μικροσφαίρες).

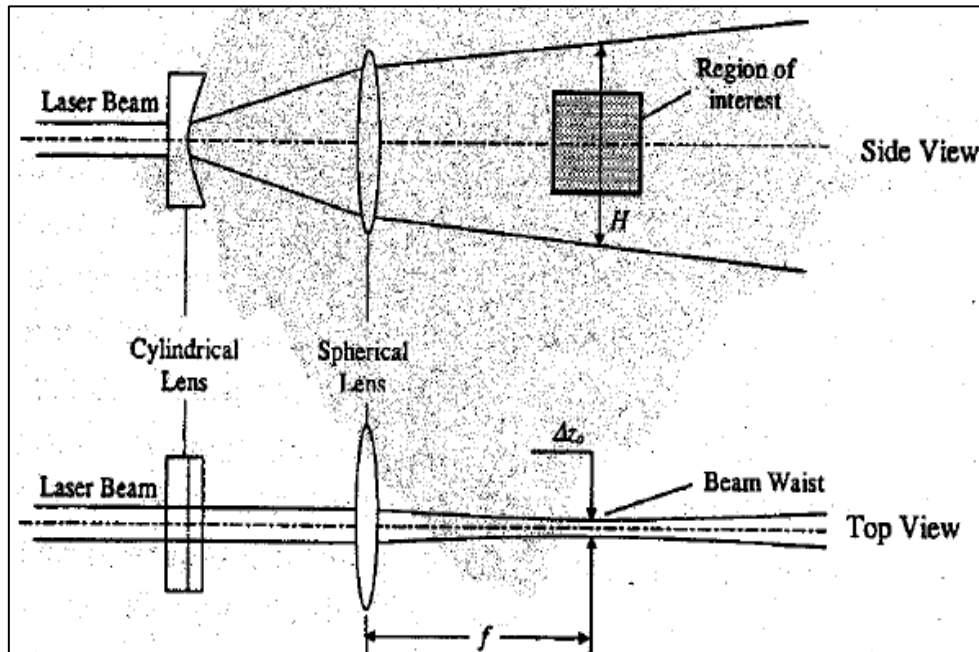
Στην μέθοδο μπορεί κάποιος να διακρίνει: α) το πειραματικό μέρος, που περιλαμβάνει την οπτική καταγραφή εικόνων του ροϊκού πεδίου και την αποθήκευση τους στον υπολογιστή και β) την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων, για εξαγωγή πληροφοριών (διανυσματικό πεδίο ταχυτήτων ρευστού κ.α.).

Το ολοκληρωμένο σύστημα PIV, αποτελείται από δύο λέιζερ των οποίων οι ακτίνες διέρχονται τελικά από το ίδιο σύστημα φακών και μια ψηφιακή κάμερα. Και οι δύο συσκευές συγχρονίζονται από συγχρονιστή. Κάθε ακτίνα με την βοήθεια ενός ημικυλινδρικού φακού γίνεται επίπεδη, λεπτού πάχους ίσο με 1mm (light sheet) στην περιοχή μέτρησης. Προστίθενται δε και άλλοι δύο σφαιρικοί φακοί ώστε να εστιαστεί το φύλλο φωτός στην περιοχή μέτρησης (Σχήμα 3.11). Στην αρχή των πειραμάτων ρυθμίζονται οι καθρέπτες αντανάκλασης της ακτίνας φωτός κάθε λέιζερ ώστε τα δύο φύλλα φωτός να συμπίπτουν.

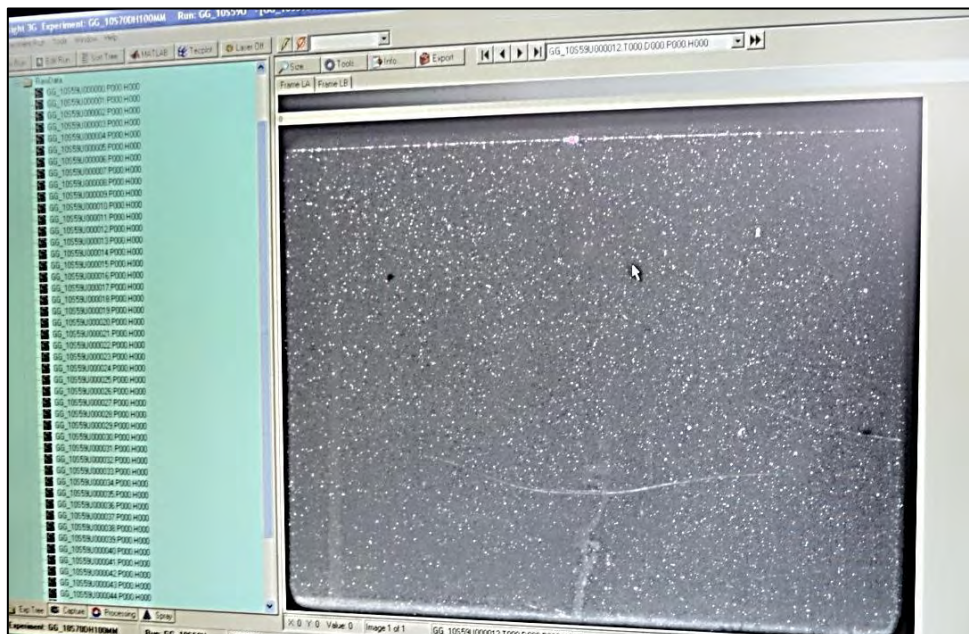
Η κάμερα τοποθετημένη κάθετα στο επίπεδο του φωτός, ρυθμίζεται να καταγράφει συνεχώς και να αποθηκεύει στον υπολογιστή ζεύγη εικόνων του ροϊκού πεδίου με χρονική απόσταση Δt , μεταξύ των εικόνων που δημιουργούνται μεταξύ των διεγέρσεων των δύο λέιζερ. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται από 10 nsec μέχρι 10 sec. Χρησιμοποιείται ο όρος ζεύγη, γιατί τα φωτισμένα σωματίδια στις δύο εικόνες έχουν υποστεί μια σχετική μετατόπιση, στη διάρκεια του χρονικού διαστήματος Δt .

Η μέθοδος PIV βασίζεται στη φυσική διατύπωση της ταχύτητας ως ένα διαφορικό πηλίκο. Η κίνηση αυτή των σωματιδίων μπορεί να ανιχνευθεί με κάμερα τύπου CCD- ή CMOS, μέσω των βραχέων φωτεινών παλμών, από λίγα μέχρι και αρκετά

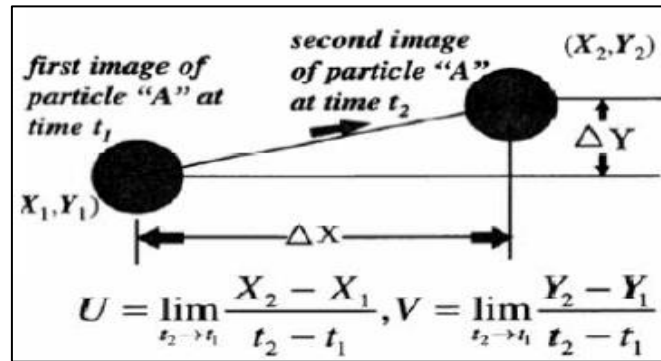
millisecond. Η έκθεση στην επιφάνεια φωτισμού πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να φαίνονται με ευκρίνεια τα σωματίδια. Έτσι αποτυπώνονται δύο στιγμιότυπα, διαφοράς χρόνου Δt , που δείχνουν ουσιαστικά την κίνηση των σωματιδίων στον άξονα συμμετρίας της φλέβας (Σχήμα 3.12 και Σχήμα 3.13). Τα στιγμιότυπα αποθηκεύονται στην μνήμη του προγράμματος.



Σχήμα 3.11. Μετατροπή ευθύγραμμης δέσμης λέιζερ σε γραμμή

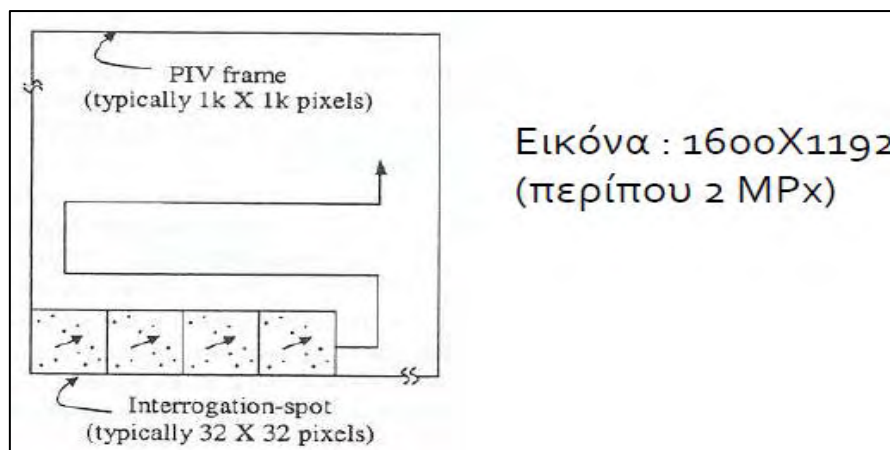


Σχήμα 3.12. Φωτογραφία πεδίου ροής



Σχήμα 3.13. Στιγμιότυπο για ένα σωματίδιο "A" για διαφορά χρόνου Δt

Οι τυρβώδεις ανωστικές φλέβες, μελετούνται πειραματικά χρησιμοποιώντας εικόνες σωματιδίων για μέτρηση των πεδίων ταχύτητας που δημιουργούνται στην ροή. Αυτό καθιστά δυνατή την πολλαπλή συσχέτιση (cross-correlation) των δύο στιγμιότυπων ροής, στο τμήμα ελέγχου (interrogation spot) το οποίο πρέπει να είναι αρκετά μικρό έτσι ώστε ένα διάνυσμα ταχύτητας να περιγράφει την ροή των στοιχείων του ρευστού μέσα σε αυτό (Σχήμα 3.14). Σημαντικό είναι, τα σωματίδια στο τμήμα ελέγχου, να έχουν ικανοποιητικό αριθμό, για να είναι εύκολα ανιχνεύσιμα ως σημεία, και ο βέλτιστος αριθμός είναι δέκα (Particle tracking velocimetry).



Σχήμα 3.14. Τμήμα ελέγχου (interrogation spot)

Τα πεδία ταχυτήτων της ανωστικής φλέβας εξάχθηκαν αναλύοντας 50 ζεύγη φωτογραφιών σε κάθε πείραμα. Αυτά τα πεδία χρησιμοποιήθηκαν για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά της ανωστικής φλέβας, κάθετης στον πυθμένα του αποδέκτη, δηλαδή το ακίνητο ρευστό (αλμυρό νερό). Το χρονικό διάστημα μεταξύ των ζευγαριών των εικόνων ήταν περίπου 0.675sec, γεγονός που δείχνει ότι η προσοχή δεν εστιάζεται στην χρονική καταγραφή, αλλά στην χωρική. Παρ' όλα αυτά, η αλλαγή της κίνησης των στοιχείων του ρευστού μπορεί να ελεγχθεί.

Η μέγιστη μετακίνηση των σωματιδίων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον μικρότερη από το $\frac{1}{4}$ της διάστασης του τμήματος ελέγχου. Έτσι για τμήμα ελέγχου 32pixel*32pixel η μέγιστη μετακίνηση πρέπει να είναι $\frac{1}{4} * 32 = 8$ pixel. Η μικρότερη

μετακίνηση στο επίπεδο φωτισμού θα πρέπει να είναι διπλάσια της διαμέτρου των σωματιδίων (Κεραμάρης E. et al. , 2012).

3.2.2. Πειραματική διαδικασία λογισμικού και εργαλεία PIV

Το σύστημα PIV αποτελείται από τα εξής εργαλεία : α) σύστημα ελέγχου laser, β) σύστημα λέιζερ, γ) ψηφιακή κάμερα 4 MP, δ) μονάδα συγχρονισμού, για τον παλμό λέιζερ, την κάμερα και την αποθήκευση φωτογραφιών.

Αρχικά τίθεται σε λειτουργία το λέιζερ (Φωτογραφία 3.15) για χρονικό διάστημα 10 min ώστε να είναι έτοιμο για χρήση. Τοποθετήθηκαν το laser και η κάμερα (Φωτογραφία 3.16) στις θέσεις τους, δηλαδή το φύλλο φωτός του λέιζερ ακριβώς στην περιοχή ενδιαφέροντος με κέντρο την οπή, απ' όπου θα εκτοξεύεται η φλέβα γλυκού νερού, στον αγωγό με αλατόνερο που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας (Φωτογραφία 3.17). Η κάμερα τοποθετήθηκε μπροστά από το τμήμα ελέγχου – περιοχή ενδιαφέροντος έτσι ώστε να ληφθούν οι κατάλληλες φωτογραφίες για κάθε πείραμα. Στη συνέχεια τέθηκε ο υπολογιστής σε λειτουργία και ενεργοποιήθηκε το λογισμικό INSIGHT-3G, για την ταχυμετρία απεικόνισης σωματιδίων.

Στο χρονικό αυτό διάστημα ετοιμάζεται το πείραμα και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Πρέπει πάντα να ελέγχεται, η σωστή λειτουργία του λέιζερ μέσω του υπολογιστή και να επιλέγεται κατάλληλη διεύθυνση αποθήκευσης των φωτογραφιών, ικανή να δεχτεί μεγάλο αριθμό δεδομένων (1 Tbyte) (Φωτογραφία 3.18). Γίνεται πρόχειρη λήψη φωτογραφιών για να ρυθμιστεί η εστίαση της κάμερας ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή εικόνα. Η λήψη γίνεται από κάμερα με κλίση 90° και αναφερόμαστε στην περίπτωση διδιάστατου πεδίου ροής. Αποτυπώθηκαν περίπου 100 φωτογραφίες για κάθε πείραμα.

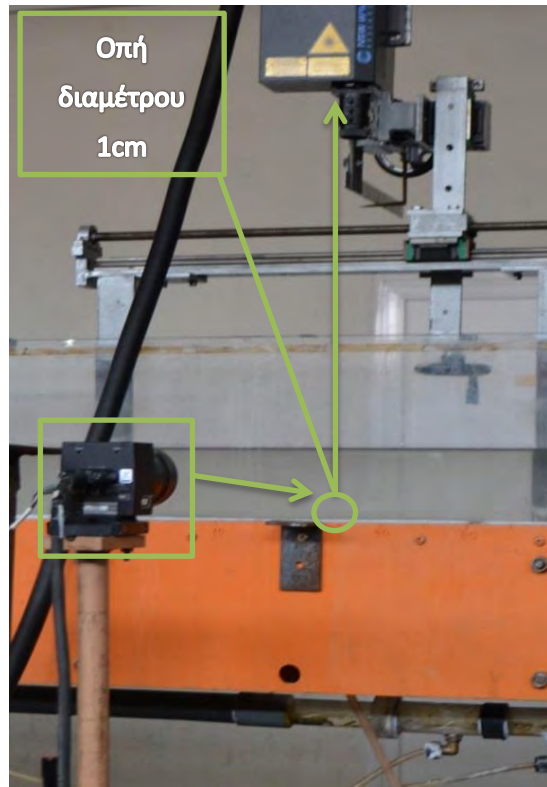
Στη συνέχεια γίνεται η *βαθμονόμηση (calibration)* των εικόνων. Γίνεται, δηλαδή μετατροπή των pixel σε mm, για να προσδιοριστεί η ταχύτητα για κάθε τμήμα ελέγχου σε m/s. Η μετατροπή των pixel σε mm, επιτεύχθηκε με το εξής τρόπο : τοποθετήθηκε στο επίπεδο φωτισμού ένας κανόνας και έγινε λήψη φωτογραφιών, από τις οποίες, αποθηκεύτηκε η τελευταία (σύμφωνα με την κρίση του μελετητή για το αν πληρούνται οι προϋποθέσεις των σωματιδίων). Καθορίστηκε ένα συγκεκριμένο μήκος του κανόνα στην φωτογραφία ίσο με το πραγματικό μήκος. Έτσι επιτεύχθηκε μετατροπή περίπου 14 pixel ανά mm (Φωτογραφία 3.19).



Φωτογραφία 3.15. Σύστημα laser



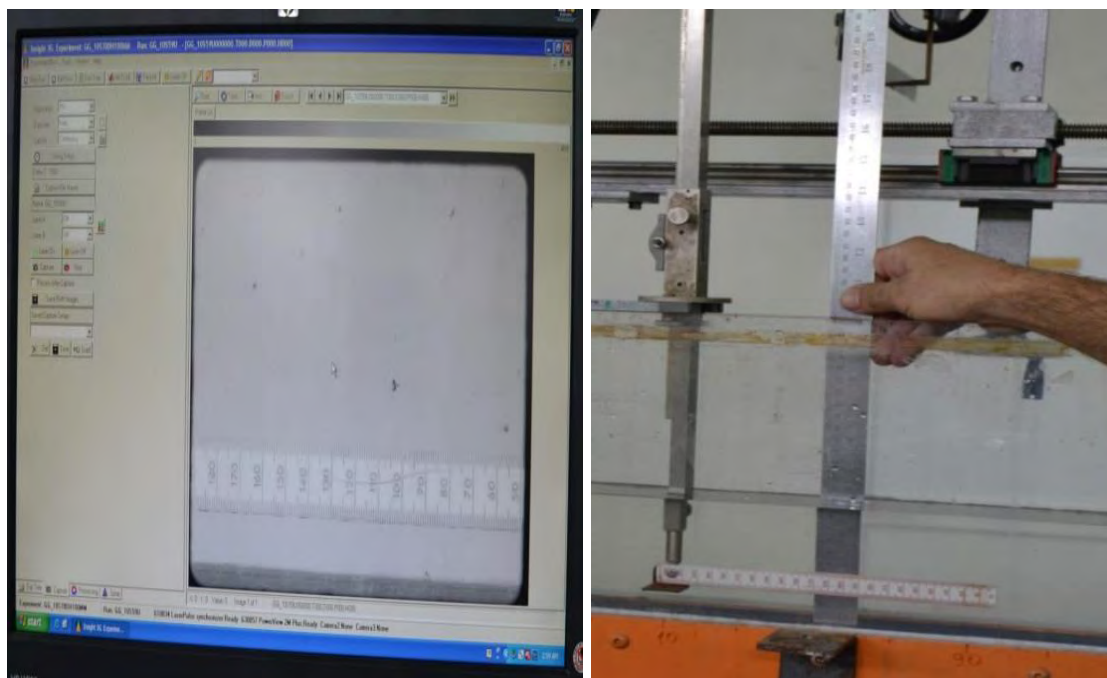
Φωτογραφία 3.16. Κάμερα



Φωτογραφία 3.17. Κατάλληλη τοποθέτηση λέιζερ και κάμερας στο τμήμα έλεγχου



Φωτογραφία 3.18. Η/Υ συνδεδεμένος με το Λογισμικό PIV



Φωτογραφία 3.19. Βαθμονόμηση

Η επόμενη διαδικασία ήταν η *βελτιστοποίηση του χρόνου Δt*. Πρώτα επιλέχθηκε μια αυθαίρετη τιμή Δt, που καθορίζει το διάστημα μεταξύ των φωτογραφιών A και B. Αυτός είναι και ο χρόνος που απαιτείται για την μετακίνηση των σωματιδίων κατά 8 pixel για την μέγιστη ταχύτητα. Μετά από την ρύθμιση του χρόνου Δt μεταξύ των δύο φωτογραφιών A και B που είναι της τάξεως 2.5 millisecond γίνεται η λήψη των φωτογραφιών του πειράματος (περίπου 100 για κάθε πείραμα). Με την ολοκλήρωση της προσαρμογής και ρύθμισης των φωτογραφιών μέσω του λογισμικού επιλέχθηκε μια ορθογώνια *περιοχή ενδιαφέροντος (Region of Interest (R.O.I.))*, δηλαδή το μέρος φωτογραφίας στην οποία, γύρω από την πηγή, παρουσιάζονται τα καλύτερα αποτελέσματα.

Ακολούθησε η *ανάλυση των φωτογραφιών (Analysis)*. Επιλέχθηκαν 5-10 φωτογραφίες, προκειμένου να εξάγουμε την φωτογραφία εκείνη που θα είναι η *βασική (Background)*, που υπάρχει σε όλες τις παραπάνω φωτογραφίες, από τις φωτογραφίες που είχαν αποθηκευτεί και στη συνέχεια υπολογίστηκε η *μέση ένταση του φόντου (Image generator)*. Αυτό εξαρτάται από το φωτισμό στο εργαστήριο, όπου και θεωρήθηκε ιδανική συνθήκη ο φωτισμός να είναι περιορισμένος. Η βασική φωτογραφία δεν δίνει πληροφορία για το πεδίο ταχυτήτων, μάλλον δε, δημιουργεί και λάθη στον προσδιορισμό αυτού. Είναι θέσεις όπου εμφανίζονται σταθεροί φωτισμοί, θέσεις φυσαλίδων, θέσεις χαραγμάτων στις επιφάνειες των plexiglass, ανακλάσεις φωτισμού του χώρου καθώς και σε άλλες θέσεις με τυχαίο φωτισμό αντανάκλασης. Στην ανάλυση των φωτογραφιών έγινε επίσης η *προεπεξεργασία (Preprocessing)*, δηλαδή αφαιρέθηκε η βασική φωτογραφία από όλες τις φωτογραφίες (*Image Calculator*). Έτσι έγινε επεξεργασία ώστε να υπάρχει η χαμηλότερη απόκριση (Φωτογραφία 3.20).

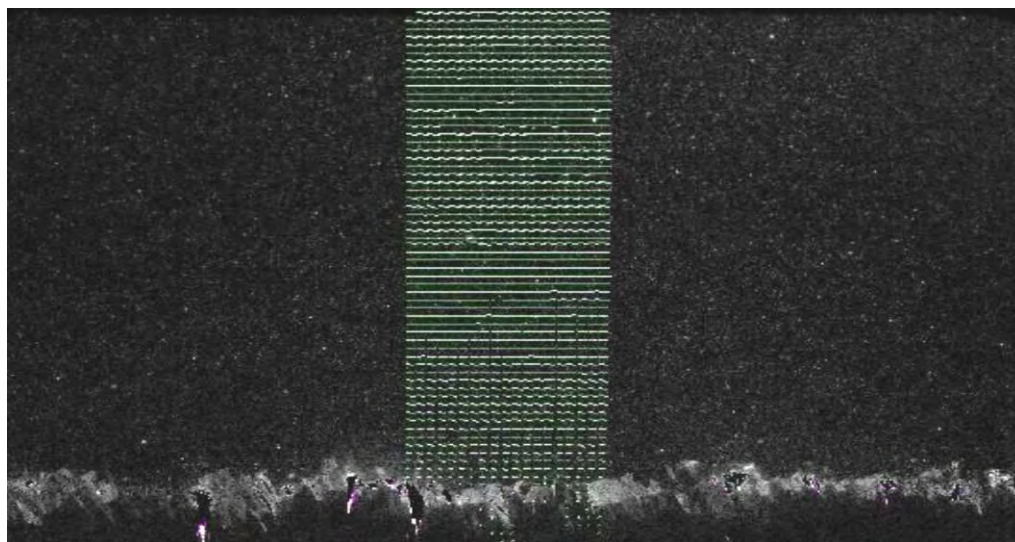
Με τις φωτογραφίες που ελήφθησαν από την ανάλυση, έγινε η *επεξεργασία (Processing)*, δηλαδή η μέγιστη μετακίνηση των σωματιδίων να είναι τουλάχιστον μικρότερη από το $\frac{1}{4}$ της διάστασης του τμήματος ελέγχου. Έτσι για τμήμα ελέγχου $16\text{pixel} \times 32\text{pixel}$, για ακίνητο ρευστό, η μέγιστη μετακίνηση πρέπει να είναι $\frac{1}{4} * 32 = 8\text{ pixel}$. Μέσω της επεξεργασίας των διανυσμάτων απορρίφθηκαν τα αναληθή, και με παρεμβολή και ομαλοποίηση επιτεύχθηκε το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Τέλος έγινε η *βελτιστοποίηση (Validation)*. Κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιούνται τα φίλτρα της μέσης τιμής, της μεσαίας τιμής και της τυπικής απόκλισης. Με τα φίλτρα αυτά απορρίπτονται τιμές που εκτός της τυπικής απόκλισης των ταχυτήτων του πεδίου, σε περιοχή 3×3 περιοχών ελέγχου συμπληρώνεται ένα κενό ταχύτητας αν υπάρχει και απορρίπτεται μία τιμή που δεν είναι κοντά στις υπόλοιπες (Φωτογραφία 3.21).

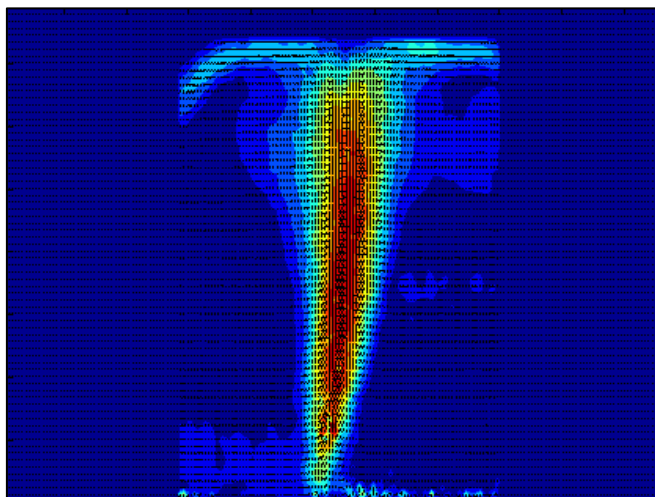
Επόμενο βήμα ήταν να *μεταφερθούν* τα τελικά δεδομένα από τις τελικές φωτογραφίες στο *λογισμικό Matlab*, όπου και έγινε επεξεργασία των πεδίων ταχυτήτων. Έγινε δηλαδή εξαγωγή των προφίλ ταχυτήτων για κάθε πείραμα, σε εικόνες, όπου φαίνεται η κατανομή των U χρωματικά, και σχηματικά. (Φωτογραφία 3.22).



Φωτογραφία 3.20. Ανάλυση φωτογραφιών (Background)



Φωτογραφία 3.21. Πεδίο ταχυτήτων στη μέθοδο PIV



Φωτογραφία 3.22. Πεδίο ταχυτήτων στο Matlab

3.3. Περιπτώσεις μετρήσεων.

Από την δεξαμενή, μέσω αγωγού, διοχετεύθηκε στο κανάλι αλατισμένο νερό. Στο κανάλι μέσω της οπής εκτοξευόταν η κατακόρυφη φλέβα γλυκού νερού (κανονικής αλατότητας), επιτυγχάνοντας έτσι θετική κινηματική άνωση. Στο σύστημα που δημιουργήθηκε, μελετήθηκε η συμπεριφορά της ροής στην περιοχή της φλέβας, για διαφορετικές πυκνότητες ή βάθη ροής του αγωγού. Συνολικά έγιναν 15 πειράματα, δηλαδή 15 διαφορετικές περιπτώσεις (αρχικές συνθήκες). Με τα πειράματα αυτά μελετήθηκαν τα προφίλ ταχύτητας και η ροής μάζας που παρατηρήθηκαν στο φαινόμενο.

Με σταθερή διαφορά στάθμης $\Delta H = 7 \text{ cm}$, για το σύνολο 15 πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για τα πιο κάτω χαρακτηριστικά ροής :

- Διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho$ με ποσοστό αλατότητας $S = 10, 15, 20, 25, 30 \text{ ‰}$ (σημειώνεται ότι χρησιμοποιήθηκε απλό θαλασσινό αλάτι).
- Βάθος ελεύθερης επιφάνειας στο κανάλι $h = 7, 10, 15 \text{ cm}$, για κάθε ποσοστό αλατότητας.

Σε κάθε ένα από τα 15 πειράματα ετοιμάστηκαν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, δηλαδή οι αρχικές συνθήκες που είχαν προβλεφθεί. Για την επίτευξη της κατάλληλης πυκνότητας, μετρήθηκε με αλατόμετρο, η αλατότητα του ομοιογενοποιημένου νερού στη μεταλλική δεξαμενή, που γέμιζε με νερό στο οποίο χυνόταν σταδιακά θαλασσινό αλάτι που αναδευόταν. Η βάνα που επέτρεπε την κυκλοφορία νερού από την δεξαμενή προς το κανάλι, σε αυτό το βήμα είναι κλειστή, ενώ ήταν ανοικτή η βάνα του αγωγού επιστροφής στην δεξαμενή (by pass).

Ανοίγεται η βάνα που παρέχει νερό στο κανάλι έχοντας ρυθμισμένες όλες τις παραμέτρους. Με το θυρόφραγμα κατάντη του καναλιού, κρατάμε σταθερό το βάθος ροής για κάθε περίπτωση. Γεμίζεται το βαρέλι του συστήματος της φλέβας, με

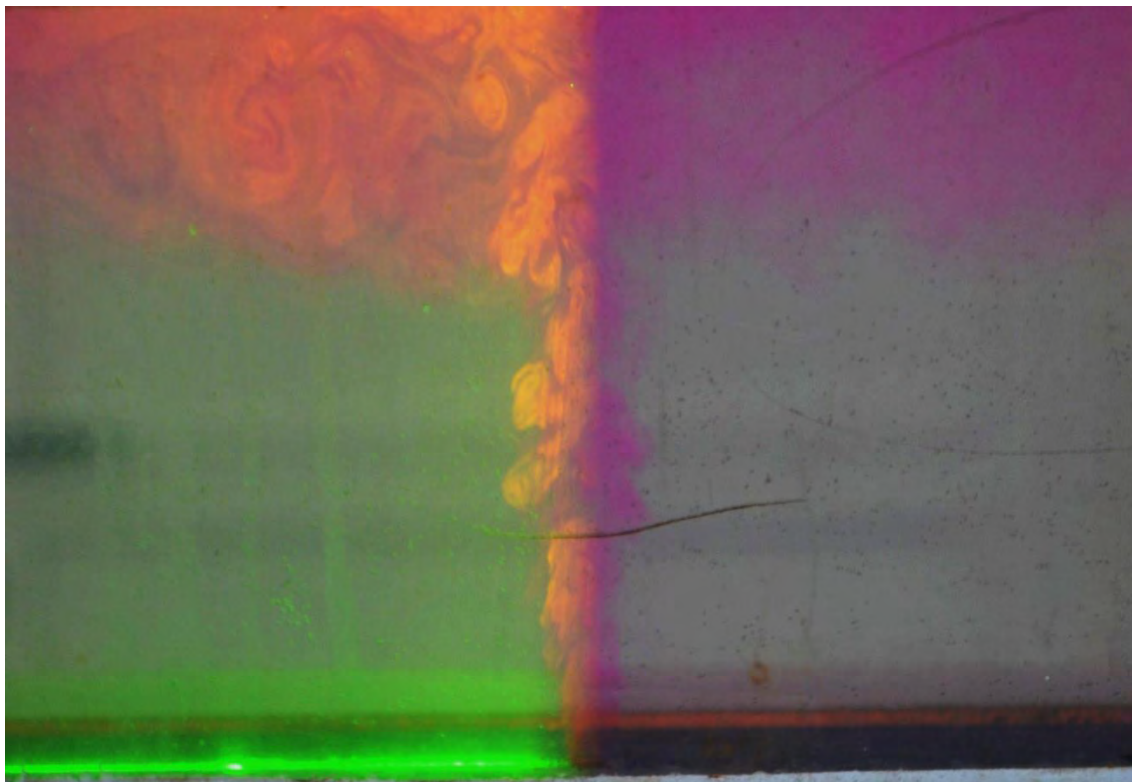
φρέσκο νερό, ενώ παράλληλα ρυθμίζεται το ύψος της διπλής δεξαμενής, ώστε η διαφορά στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας του νερού της δεξαμενής ακροφύσιου με την ελεύθερη στάθμη του αλμυρού νερού στο κανάλι να παραμένει σταθερή, προκειμένου να επιτευχθεί η σταθερή αρχική ταχύτητα της φλέβας. Απελευθερώνοντας - εκτοξεύοντας το νερό στη φλέβα το φαινόμενο βρίσκεται σε εξέλιξη. Οι μετρήσεις διεξήχθησαν σε μια περιοχή $12 \times 10 \text{ cm}^2$. Για καλύτερη απεικόνιση, το νερό της φλέβας, το οποίο εισέρχεται κάθετα πάνω από την πηγή, ήταν βαμμένο με ροδαμίνη (κόκκινο χρώμα) (Φωτογραφία 3.23).

Τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στο επόμενο υποκεφάλαιο. Συζητήθηκαν και συγκρίθηκαν με μοντέλα παρόμοιων συνθηκών που αναφέρονταν στο παρελθόν. Αυτά τα αποτελέσματα από την πειραματική ανάλυση είναι χρήσιμα για την πιστοποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο πίνακας αρχικών συνθηκών, των πειραμάτων. (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1. Αρχικές συνθήκες ροής των 15 πειραμάτων

Παράμετροι που παραμένουν σταθεροί		
Διαφορά στάθμης Dh (mm)	70	
Παράμετροι που αλλάζουν		
Πειράματα	Βάθος ροής h (mm)	Αλατότητα Αποδέκτη S (‰)
1 ^ο	70	10
2 ^ο	100	10
3 ^ο	150	10
4 ^ο	70	15
5 ^ο	100	15
6 ^ο	150	15
7 ^ο	70	20
8 ^ο	100	20
9 ^ο	150	20

10°	70	25
11°	100	25
12°	150	25
13°	70	30
14°	100	30
15°	150	30



Φωτογραφία 3.23. Στυγμιότυπο τμήματος ελέγχου χρωματισμένης εκτοξευόμενης ανωστικής φλέβας. Αριστερά, φωτισμένη με λέιζερ. Δεξιά, πραγματικό χρώμα.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Προφίλ Ταχυτήτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων, μετά από την επεξεργασία που έγινε στο λογισμικό INSIGHT-3G. Για κάθε πείραμα ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία για την εύρεση των προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας.

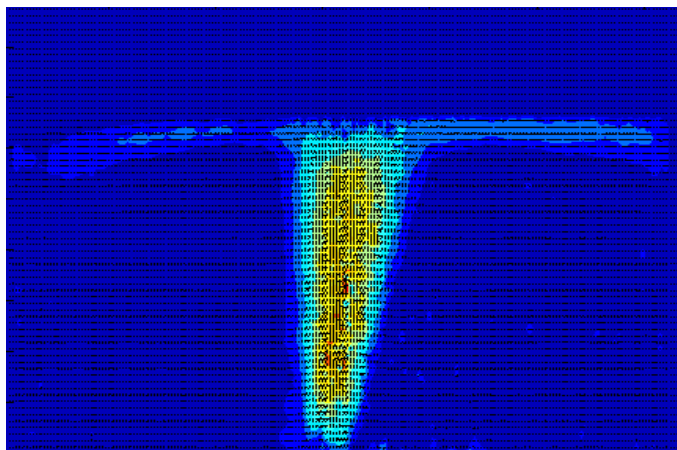
Τα δεδομένα από το λογισμικό INSIGHT-3G μεταφέρθηκαν στο λογισμικό Matlab και έτσι δημιουργήθηκαν σε μορφή διαγράμματος τα πεδία ταχυτήτων (Εικόνα 4.1). Τα δεδομένα που μεταφέρθηκαν στο Matlab αφορούν τις 100 εικόνες που ελήφθησαν για το κάθε πείραμα. Για κάθε εικόνα υπάρχει ένας πίνακας συντεταγμένων (x,y) και ένας πίνακας κατακόρυφων και οριζόντιων ταχυτήτων (u,v) που αντιστοιχούν στις συντεταγμένες αυτές.

Έγινε επιλογή 50 φωτογραφιών, από τις 100 που ελήφθησαν για κάθε ένα από 15 πειράματα. Επιλέχθηκαν δηλαδή, 50 πίνακες δεδομένων, αριθμός που θεωρήθηκε ικανοποιητικός ώστε να παρασταθεί το γενικό προφίλ των ταχυτήτων, οι οποίοι και μεταφέρθηκαν στο Excel (Εικόνα 4.2). Έπειτα υπολογίστηκε ο μέσος όρος \bar{X} , των 50 αυτών εικόνων-πινάκων για κάθε συντεταγμένη Y που επαναλαμβάνόταν (Πίνακας 4.1).

Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζεται η μέση κατακόρυφη ταχύτητα (V'_μ) που αντιστοιχεί σε κάθε συγκεκριμένο X και προκύπτει σαν μέσος όρος όλων των κατακόρυφων ταχυτήτων που μετρήθηκαν για το κάθε Y . Αυτά τα δεδομένα μεταφέρονται και πάλι στο λογισμικό Matlab όπου δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα του γενικού προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για κάθε πείραμα (Εικόνα 4.2).

Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα στιγμιότυπα, τα δεδομένα από κάθε πείραμα, καθώς και τα προφίλ ταχύτητας τους όπως προέκυψαν από τα δεδομένα στο INSIGHT-3G. Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα κάθε πειράματος και τα προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων που προέκυψαν. Στις εικόνες 4.3 - 4.11 παρουσιάζεται η αποτύπωση του προφίλ ταχύτητας στην φλέβα που εκτοξεύεται από οπή διαμέτρου $d = 6\text{mm}$.

Επόμενο βήμα ήταν η αδιαστατοποίηση των διαγραμμάτων προφίλ ταχύτητας. Η αδιαστατοποίηση των ταχυτήτων έγινε διαιρώντας τις μέσες κατακόρυφες ταχύτητες V_m , με την διατμητική ταχύτητα $U = \sqrt{RSg}$. Η αδιαστατοποίηση της απόστασης X έγινε διαιρώντας το X με την συνολική απόσταση $\Delta x = X_{\text{τελ.}} - X_{\text{αρχ.}}$ (Εικόνες 4.12 - 4.20).



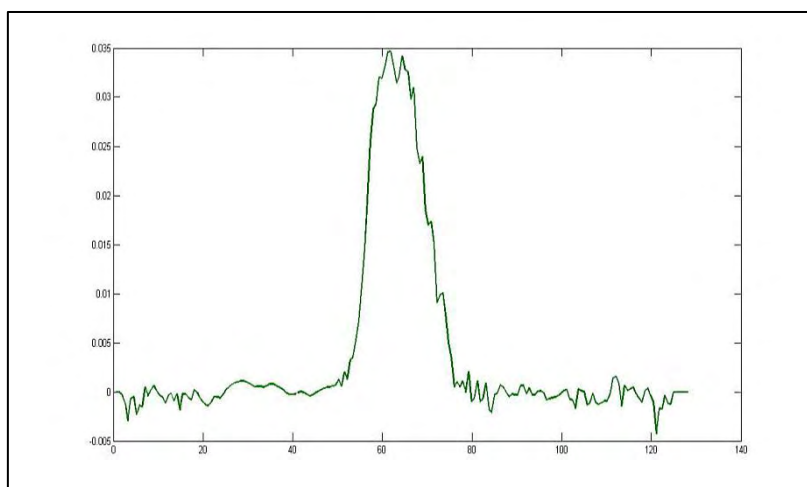
Εικόνα 4.1. Πεδίο ταχυτήτων στο Matlab

X mm	Y mm	U μ m/s	V μ m/s
0,668	-1,335	0	0
1,335	-1,335	0	0
2,003	-1,335	0	0
2,67	-1,335	0	0
3,338	-1,335	0	0
4,006	-1,335	0	0
4,673	-1,335	0	0
5,341	-1,335	0	0
6,008	-1,335	0	0

X mm	V' μ m/s
0,64429	0
1,28858	0
1,93287	-0,00034
2,577161	-0,00115
3,221451	-0,00295
3,865741	-0,00064
4,510031	-0,00051
5,154321	-0,00232
5,798611	-0,00139
6,442902	-0,00148
7,087192	0,000483
7,731482	-0,00041

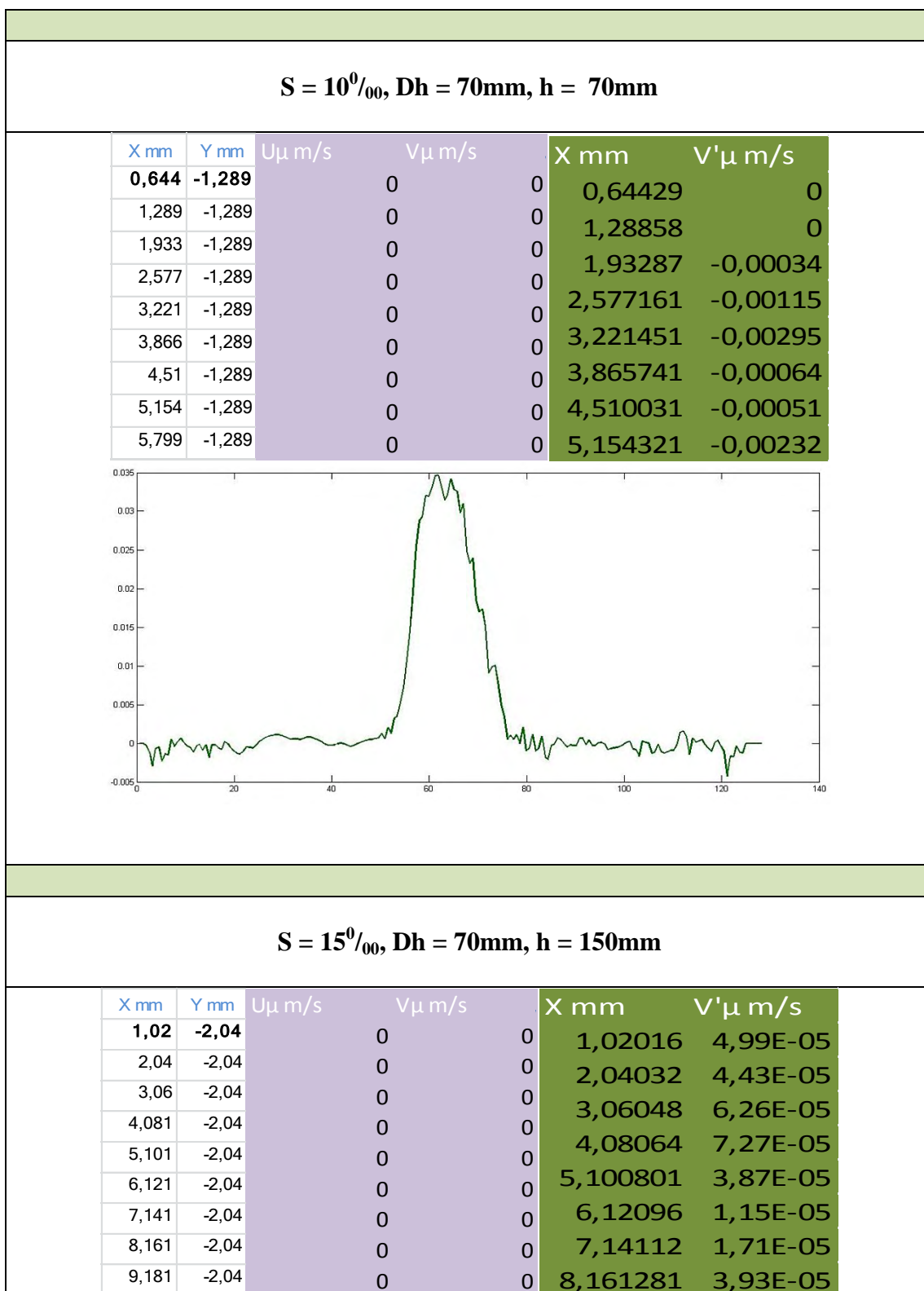
Πίνακας 4.1. Πίνακας Δεδομένων στο Excel.

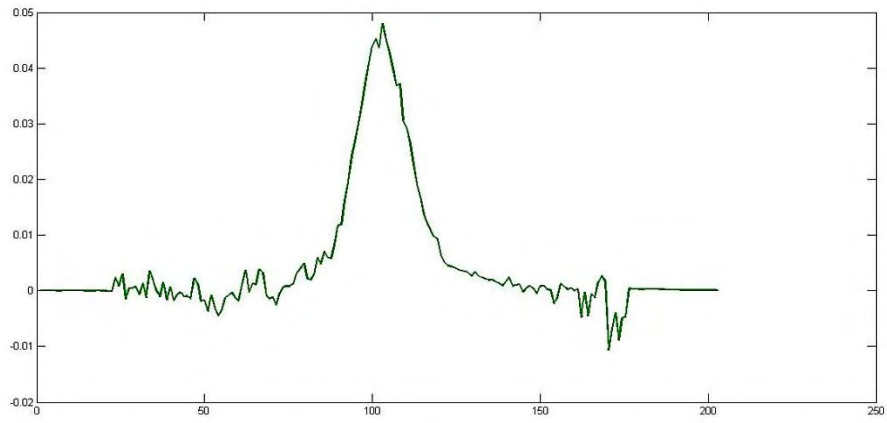
Πίνακας 4.2. Πίνακας μέσω κατακόρυφων ταχυτήτων για κάθε X.



Εικόνα 4.2. Γενικό προφίλ μέσης κατακόρυφης ταχύτητας.

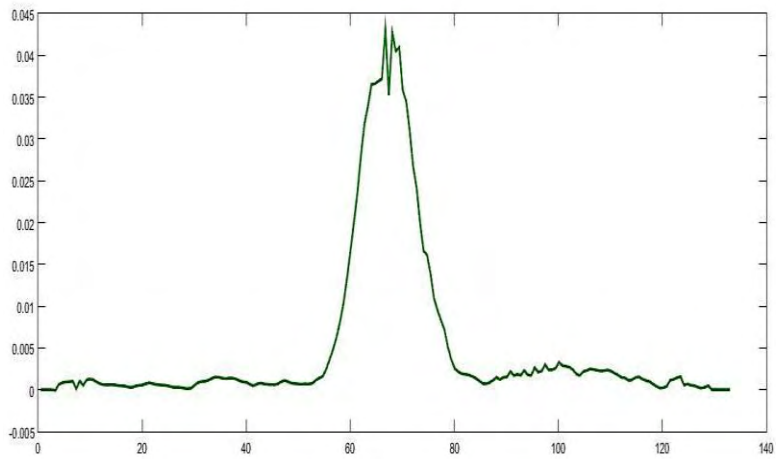
Πίνακας 4.3. Δεδομένα πειραματικών μετρήσεων, διαγράμματα μέσω των ταχυτήτων.





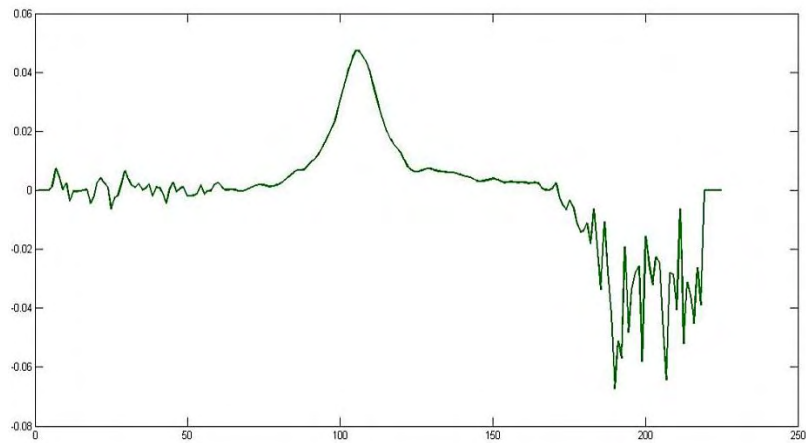
S = 20⁰/₀₀ Dh = 70mm, h = 70mm

X mm	Y mm	U μ m/s	V μ m/s	X mm	V' μ m/s	
0,668	-1,335		0	0	0,667588	0
1,335	-1,335		0	0	1,335176	0
2,003	-1,335		0	0	2,002764	0
2,67	-1,335		0	0	2,670352	0
3,338	-1,335		0	0	3,337941	-7,2E-05
4,006	-1,335		0	0	4,005528	0,000645
4,673	-1,335		0	0	4,673117	0,000841
5,341	-1,335		0	0	5,340705	0,000936
6,008	-1,335		0	0	6,008293	0,000964



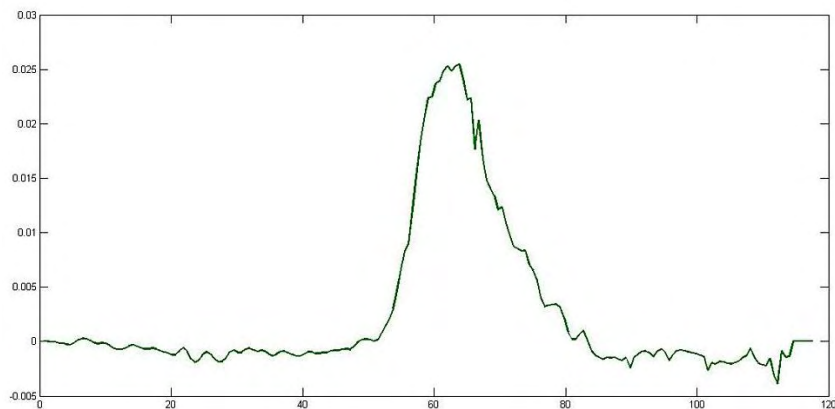
$S = 20^0/_{00}$, $Dh = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$

X mm	Y mm	U $\mu\text{m/s}$	V $\mu\text{m/s}$	X mm	V' $\mu\text{m/s}$	
1,131	-2,261		0	0	1,130502	6,22E-05
2,261	-2,261		0	0	2,261003	3,43E-05
3,392	-2,261		0	0	3,391505	2,35E-05
4,522	-2,261		0	0	4,522007	1,36E-05
5,653	-2,261		0	0	5,652508	0,001345
6,783	-2,261		0	0	6,78301	0,007487
7,914	-2,261		0	0	7,913511	0,004151
9,044	-2,261		0	0	9,044013	0,000123
10,175	-2,261		0	0	10,17452	0,002382



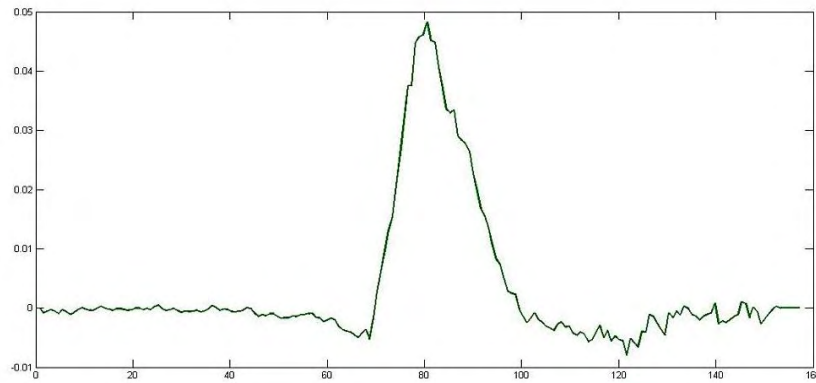
$S = 25^0/_{00}$, $Dh = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$

X mm	Y mm	U $\mu\text{m/s}$	V $\mu\text{m/s}$	X mm	V' $\mu\text{m/s}$	
0,591	-1,182		0	0	0,59096	0
1,182	-1,182		0	0	1,18192	0
1,773	-1,182		0	0	1,77288	-2,6E-05
2,364	-1,182		0	0	2,36384	-3,5E-05
2,955	-1,182		0	0	2,9548	-0,00015
3,546	-1,182		0	0	3,54576	-0,00018
4,137	-1,182		0	0	4,13672	-0,00025
4,728	-1,182		0	0	4,72768	-0,0003
5,319	-1,182		0	0	5,31864	-8,2E-05



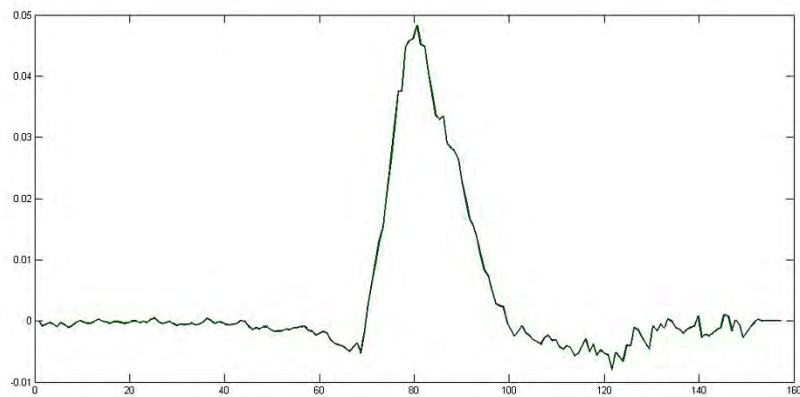
S = 25⁰/₀₀, Dh = 70mm, h = 100mm

X mm	Y mm	U μ m/s	V μ m/s	X mm	V' μ m/s	
0,79	-1,58		0	0	0,78976	0
1,58	-1,58		0	0	1,57952	-0,00083
2,369	-1,58		0	0	2,36928	-0,00051
3,159	-1,58		0	0	3,15904	-0,0003
3,949	-1,58		0	0	3,9488	-0,00056
4,739	-1,58		0	0	4,73856	-0,00097
5,528	-1,58		0	0	5,52832	-0,00032
6,318	-1,58		0	0	6,31808	-0,00069
7,108	-1,58		0	0	7,107841	-0,00108



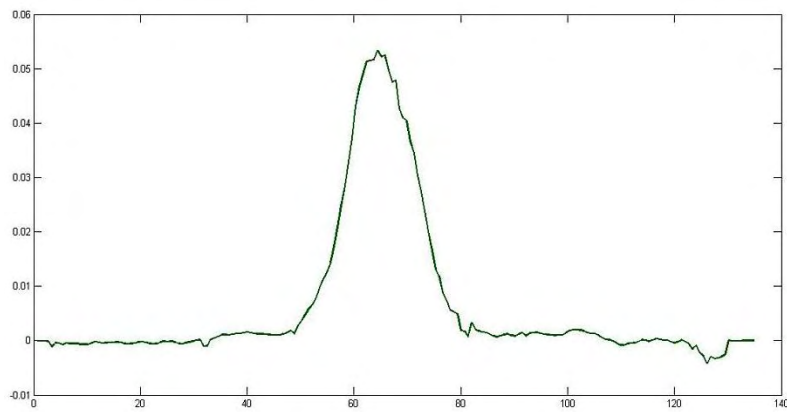
S = 30⁰/₀₀, Dh = 70mm, h = 70mm

X mm	Y mm	U μ m/s	V μ m/s	X mm	V' μ m/s	
0,79	-1,58		0	0	0,78976	0
1,58	-1,58		0	0	1,57952	-0,00083
2,369	-1,58		0	0	2,36928	-0,00051
3,159	-1,58		0	0	3,15904	-0,0003
3,949	-1,58		0	0	3,9488	-0,00056
4,739	-1,58		0	0	4,73856	-0,00097
5,528	-1,58		0	0	5,52832	-0,00032
6,318	-1,58		0	0	6,31808	-0,00069
7,108	-1,58		0	0	7,107841	-0,00108



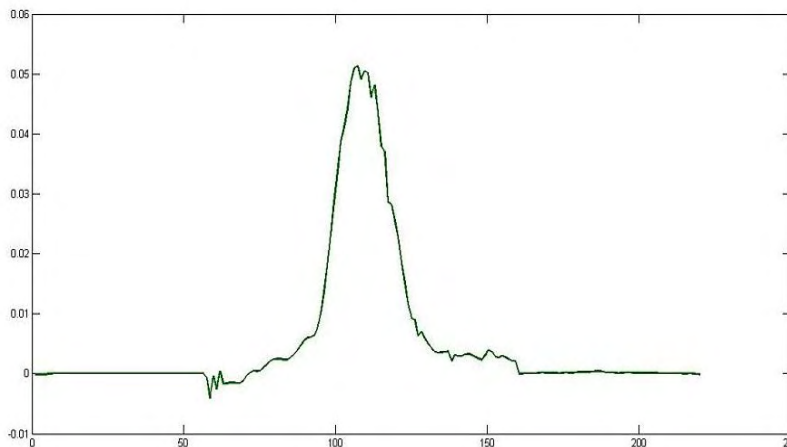
S = 30⁰/₀₀, Dh = 70mm, h = 100mm

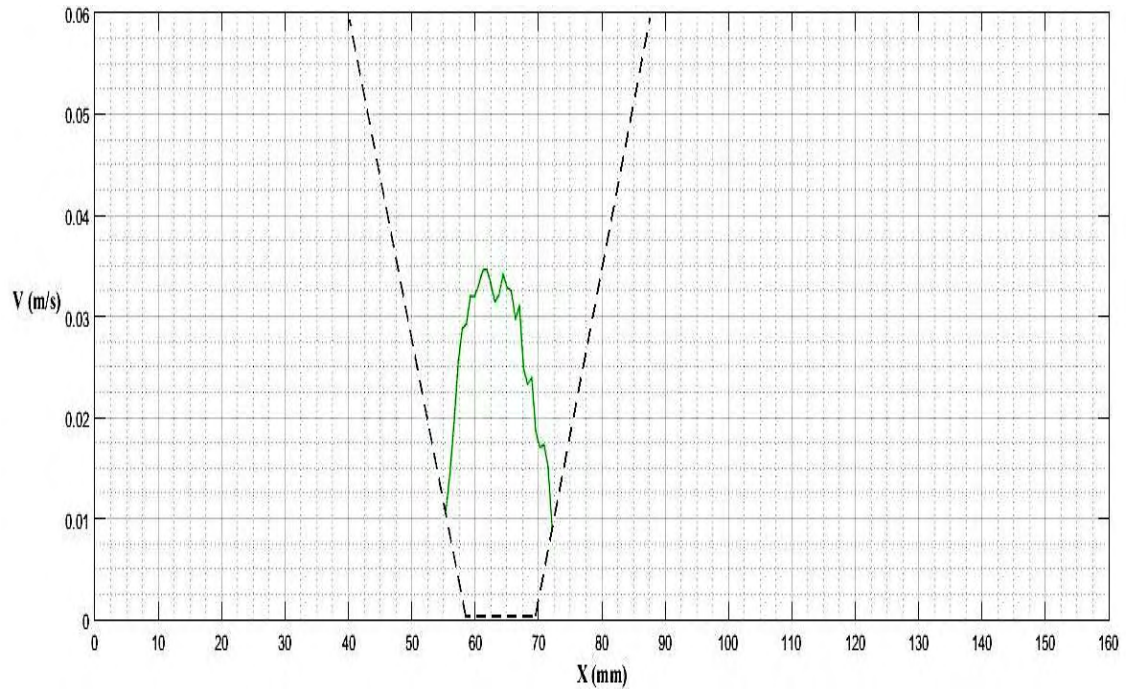
X mm	Y mm	U μm/s	V μm/s	X mm	V' μm/s
0,678	-1,356		0	0	0,678 -3,5E-05
1,356	-1,356		0	0	1,356 -4,7E-05
2,034	-1,356		0	0	2,034 -3,1E-05
2,712	-1,356		0	0	2,712 -0,00011
3,39	-1,356		0	0	3,39 -0,00114
4,068	-1,356		0	0	4,068 -0,00039
4,746	-1,356		0	0	4,746 -0,00047
5,424	-1,356		0	0	5,424 -0,00071
6,102	-1,356		0	0	6,102 -0,00046



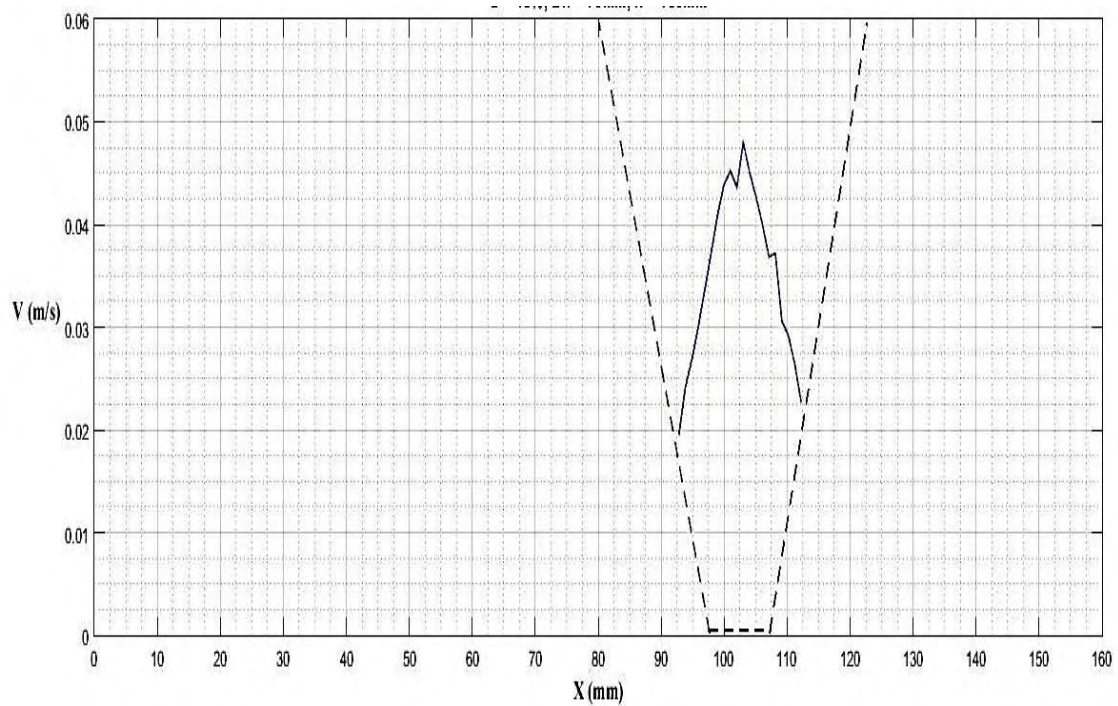
S = 30⁰/₀₀, Dh = 70mm, h = 150mm

X mm	Y mm	U μm/s	V μm/s	X mm	V' μm/s
1,106	-2,213		0	0	1,106441 -0,00012
2,213	-2,213		0	0	2,212882 -0,00012
3,319	-2,213		0	0	3,319323 -0,00001
4,426	-2,213		0	0	4,425764 -9,8E-05
5,532	-2,213		0	0	5,532205 1,93E-05
6,639	-2,213		0	0	6,638645 0
7,745	-2,213		0	0	7,745086 0
8,852	-2,213		0	0	8,851527 0
9,958	-2,213		0	0	9,957968 0

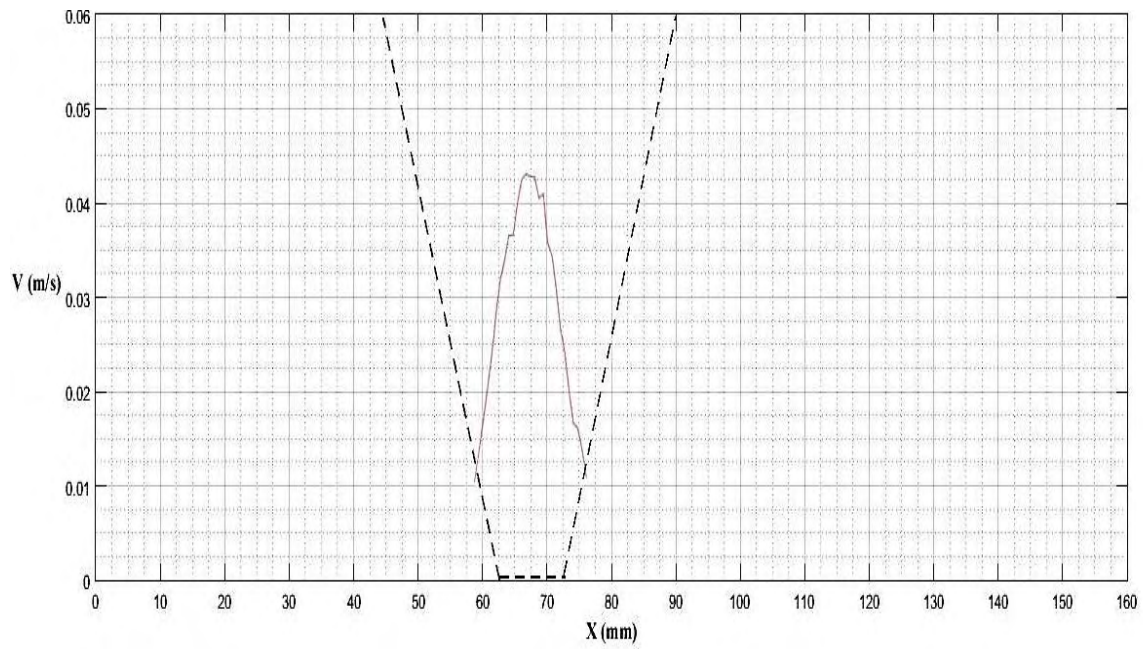




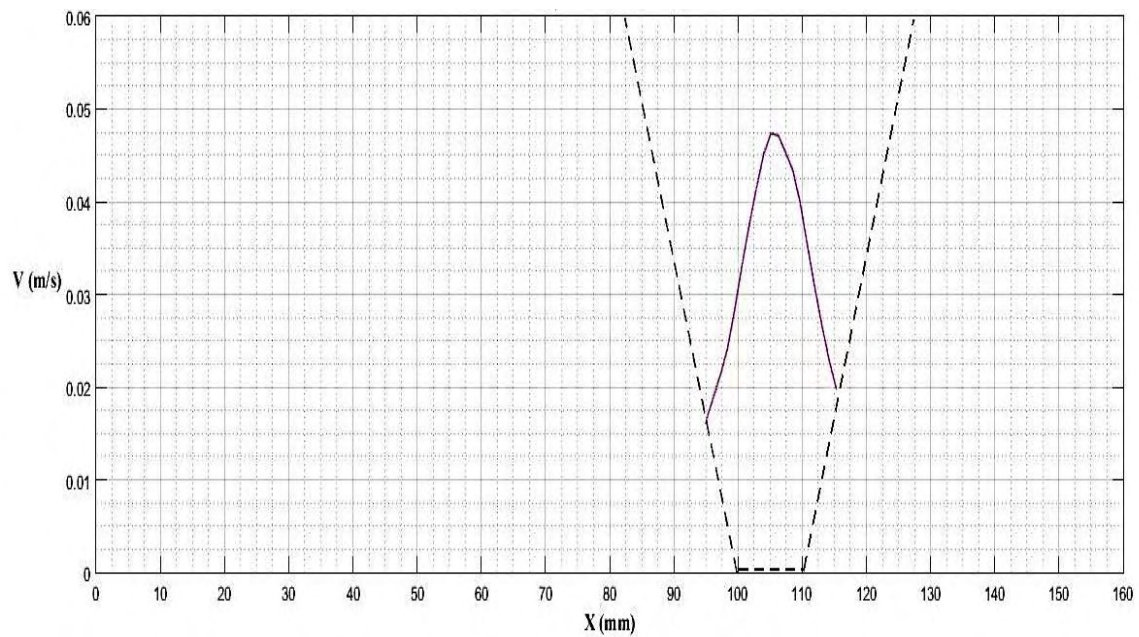
Εικόνα 4.3. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S=10\text{‰}$, $D_h = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



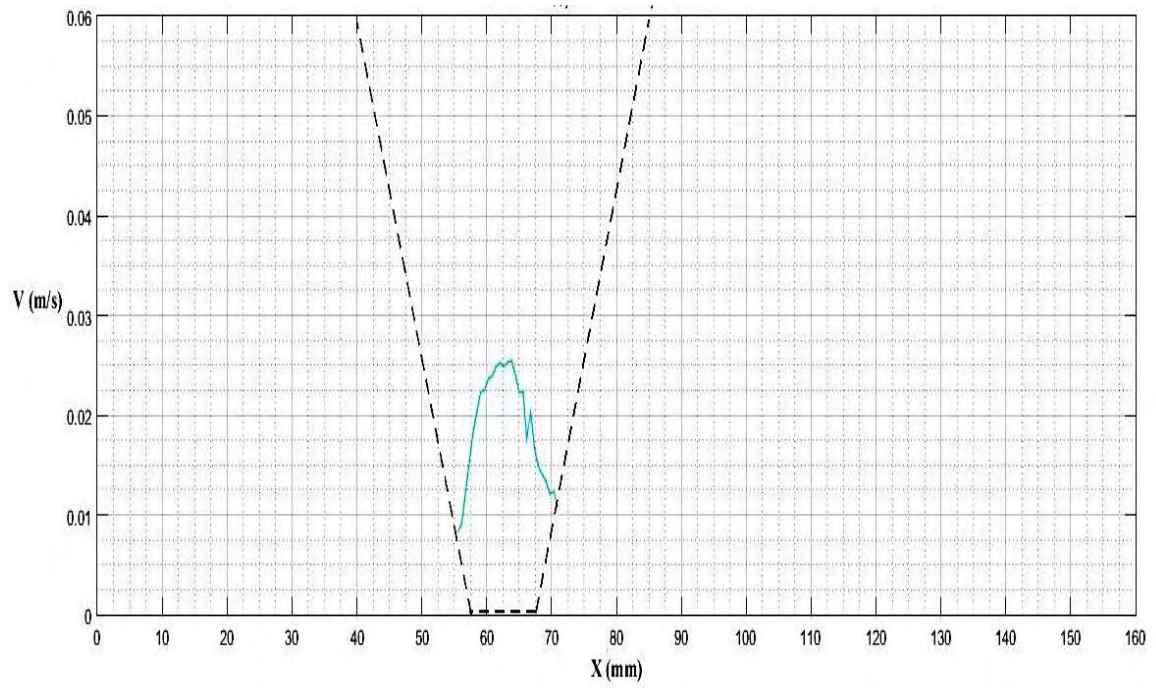
Εικόνα 4.4. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S=15\text{‰}$, $D_h = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$



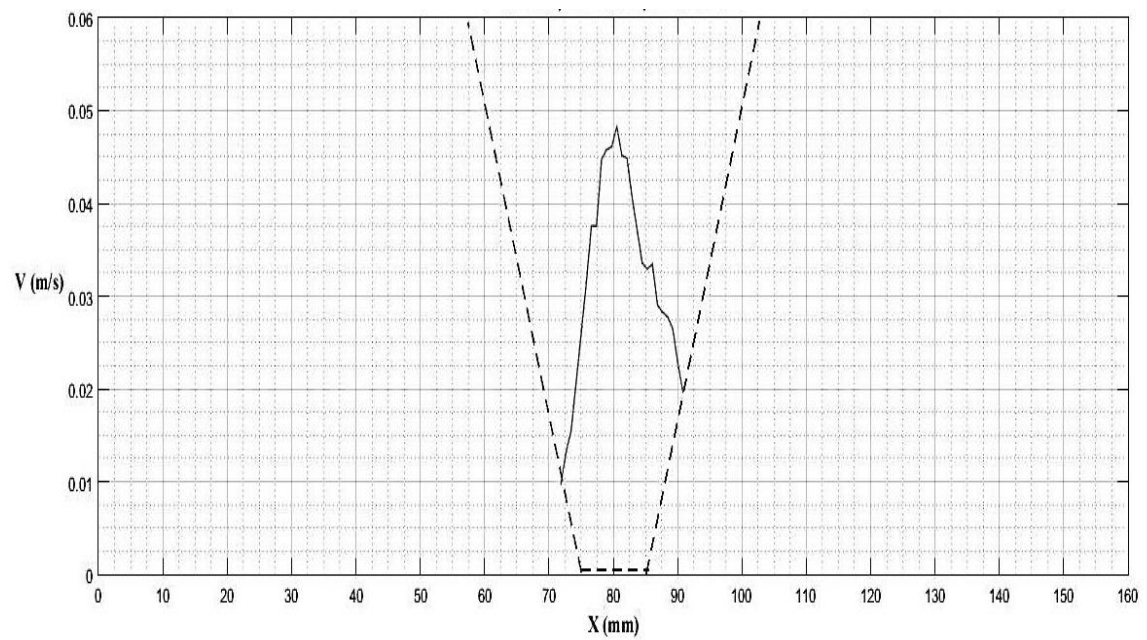
Εικόνα 4.5. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S = 20^0/_{00}$
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



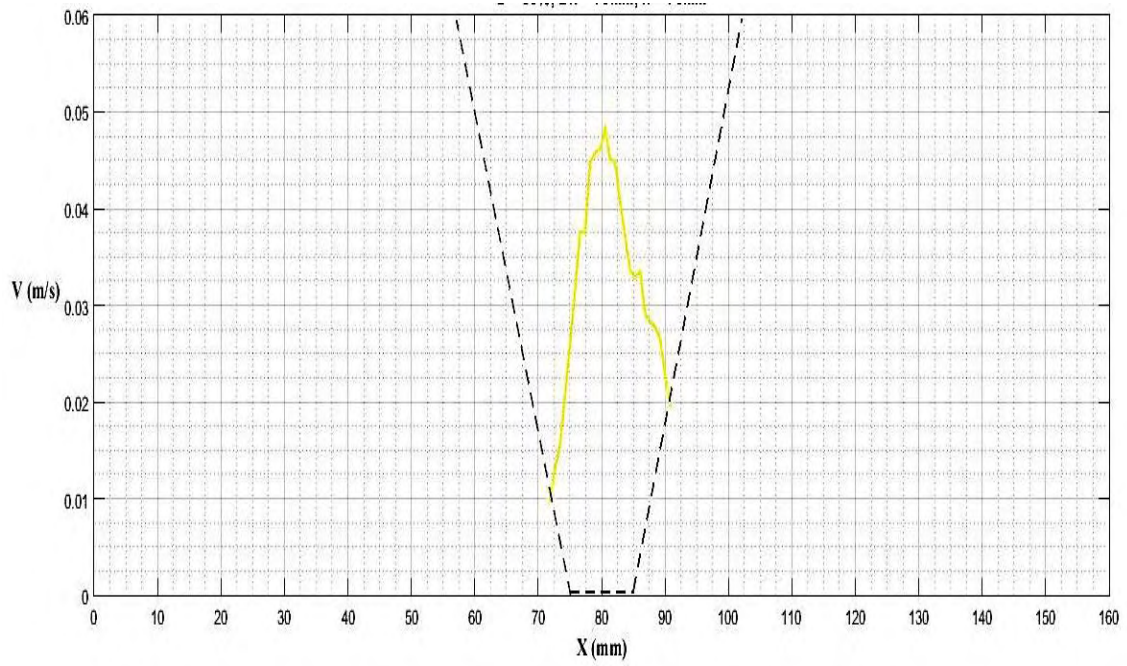
Εικόνα 4.6. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S = 20^0/_{00}$,
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$



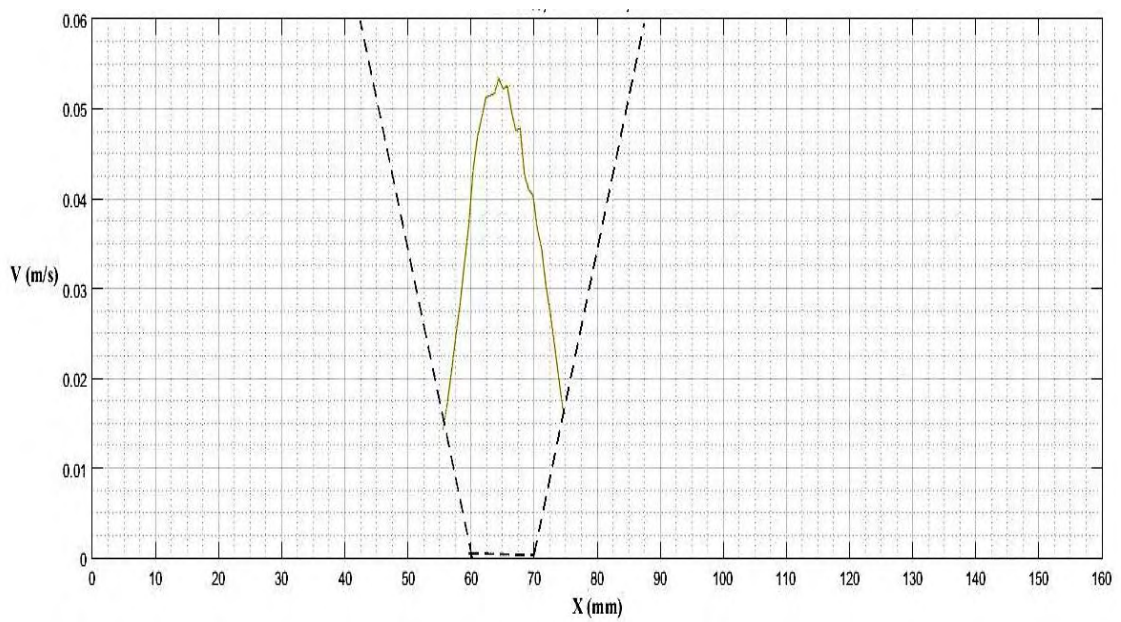
Εικόνα 4.7. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S=25^0/00$,
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



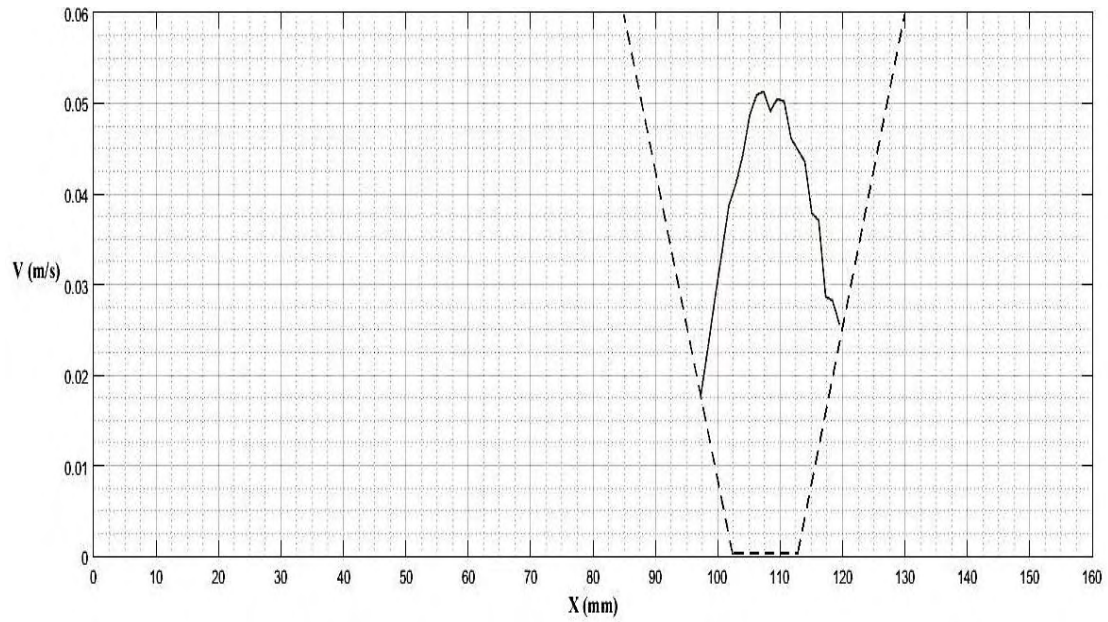
Εικόνα 4.8. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S=25^0/00$,
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 100\text{mm}$



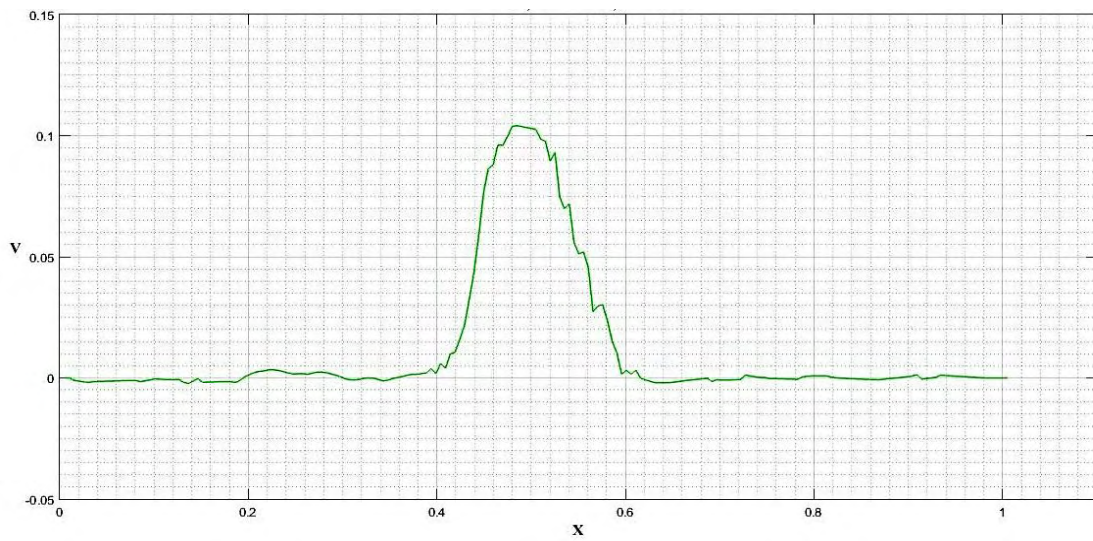
Εικόνα 4.9. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S=30\text{‰}$, $Dh = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



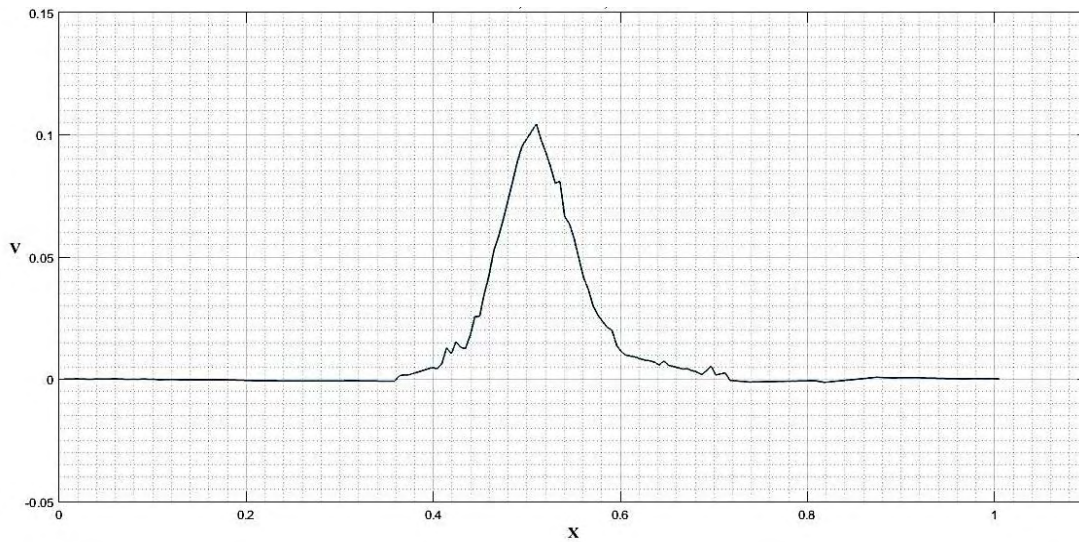
Εικόνα 4.10. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S=30\text{‰}$, $Dh = 70\text{mm}$, $h = 100\text{mm}$



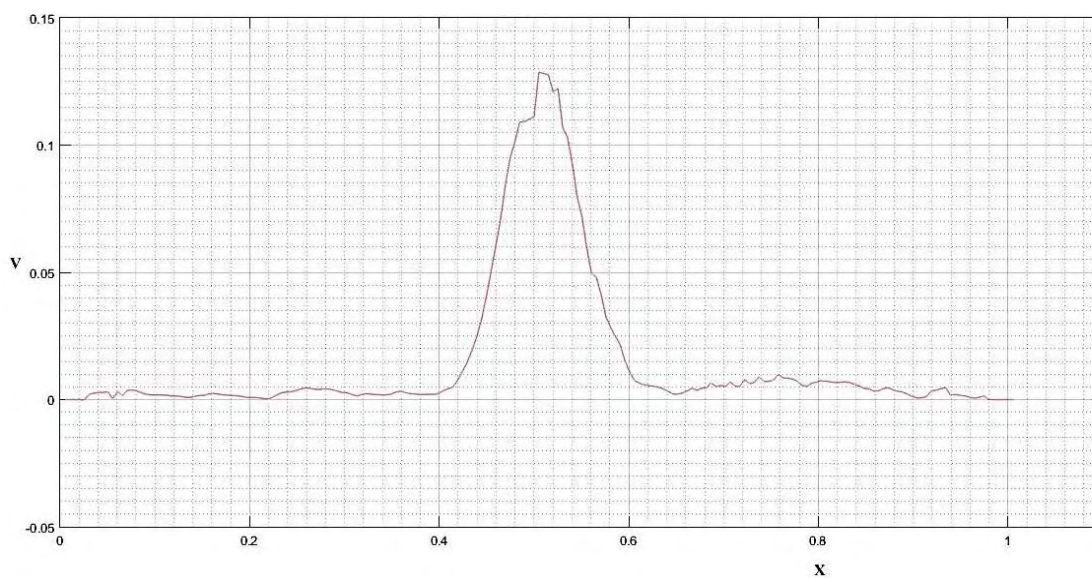
Εικόνα 4.11. Προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας στην φλέβα οπής $d = 6\text{mm}$ για $S=30/_{00}$, $D_h = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$



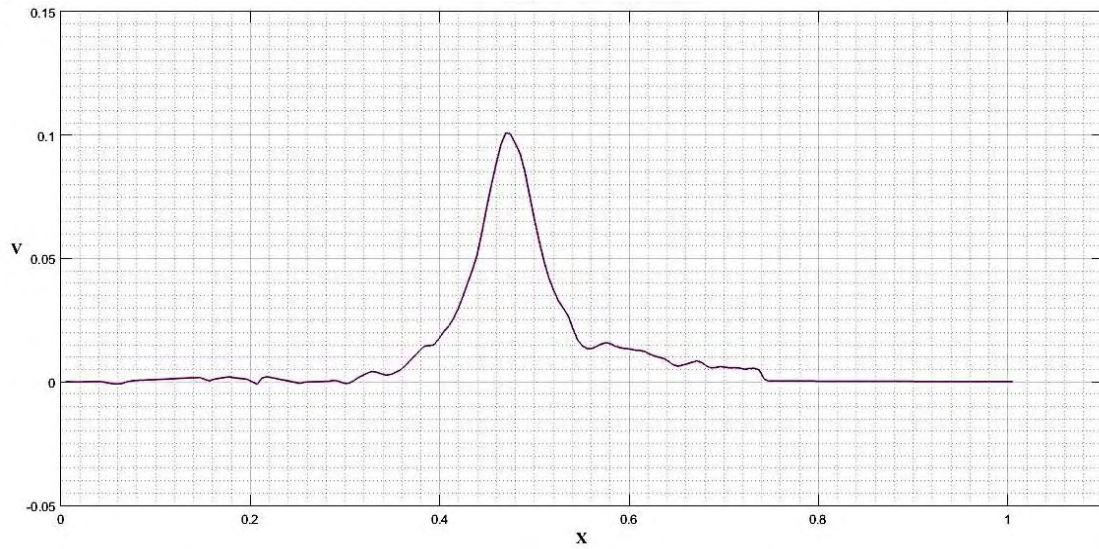
Εικόνα 4.12. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 10/_{00}$, $D_h = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



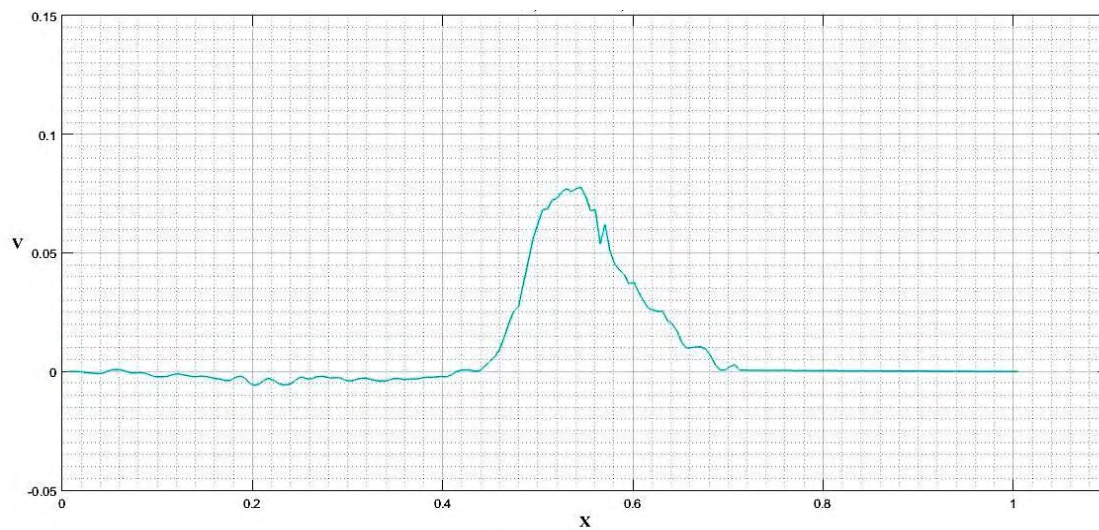
Εικόνα 4.13. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 15^{0}/_{00}$,
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$



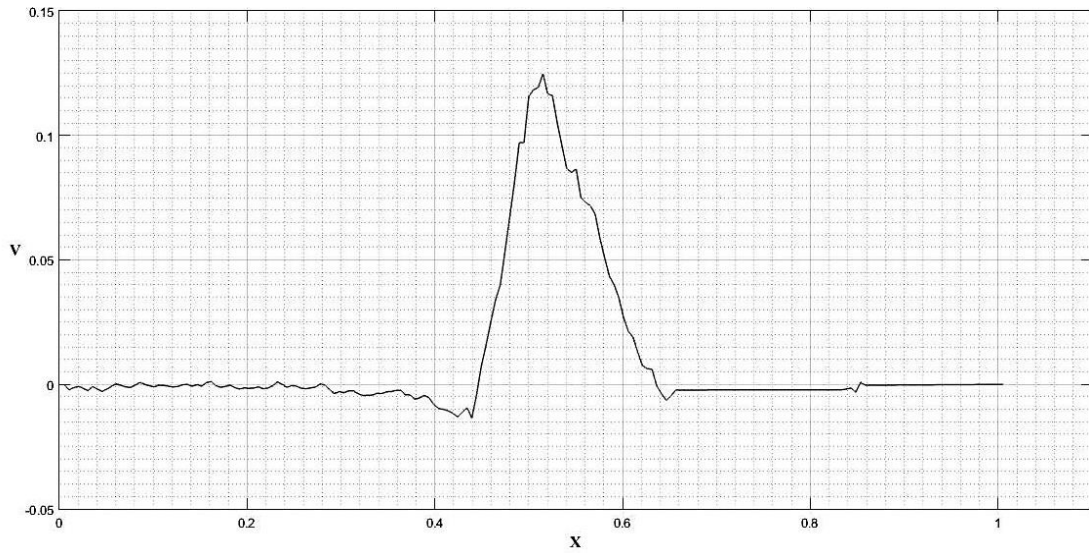
Εικόνα 4.14. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 20^{0}/_{00}$,
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



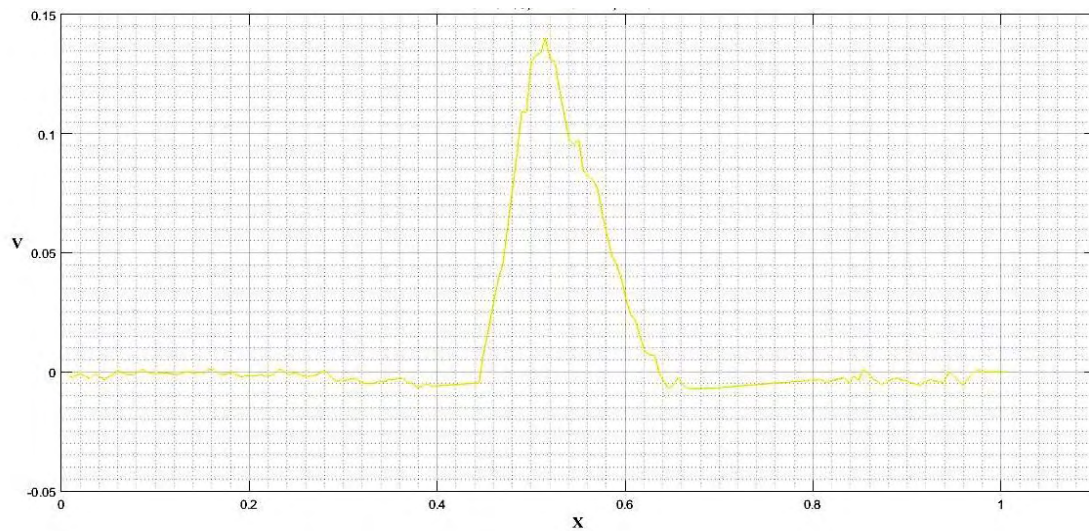
Εικόνα 4.15. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 20\text{‰}$,
 $D_h = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$



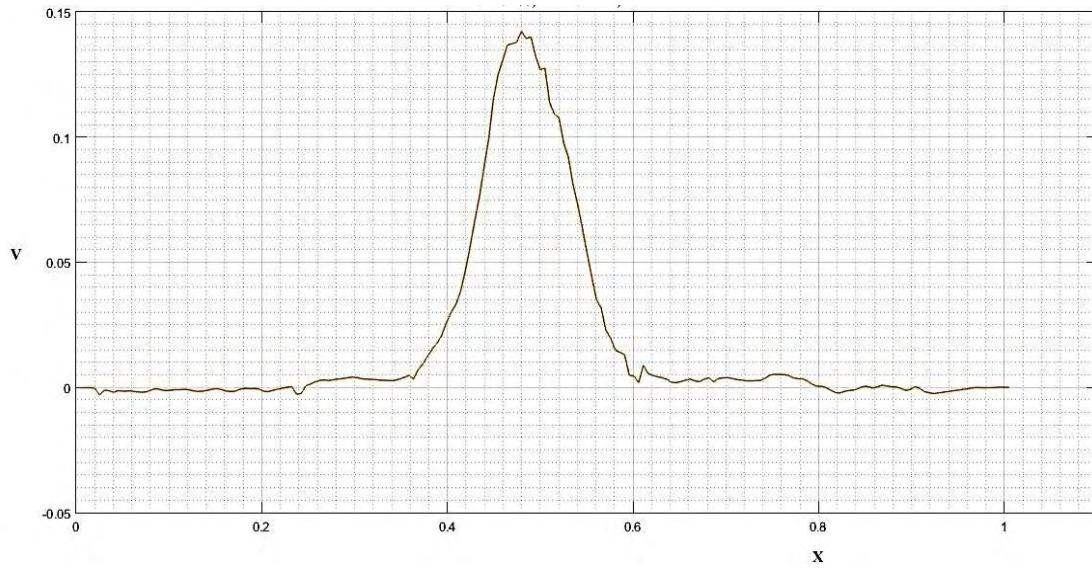
Εικόνα 4.16. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 25\text{‰}$,
 $D_h = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



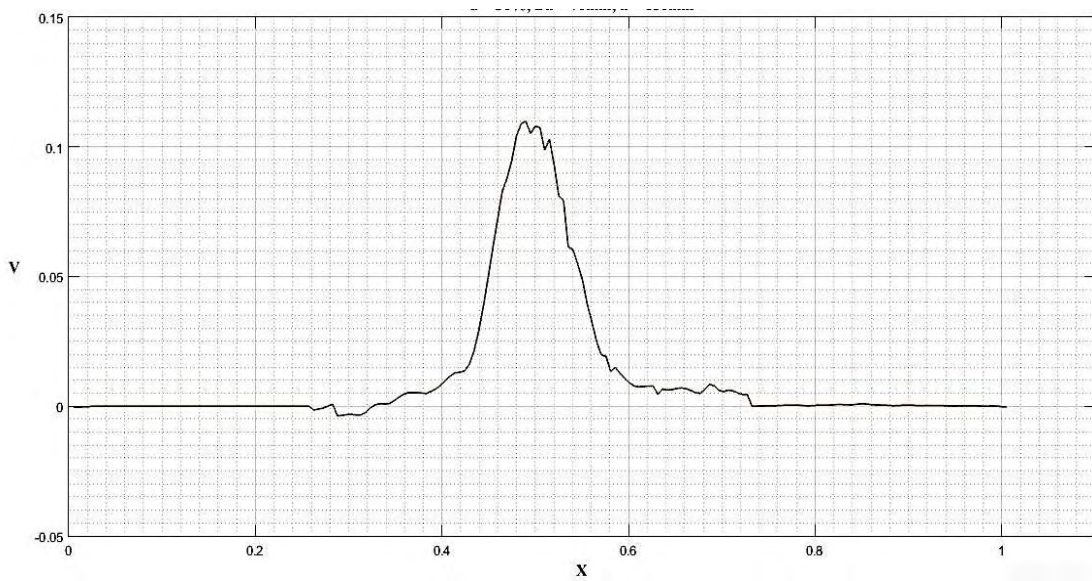
Εικόνα 4.17. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 25^0/00$,
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 100\text{mm}$



Εικόνα 4.18. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 30^0/00$,
 $Dh = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



Εικόνα 4.19. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 30\text{‰}$,
 $D_h = 70\text{mm}$, $h = 100\text{mm}$



Εικόνα 4.20. Αδιαστατοποιημένο προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 30\text{‰}$,
 $D_h = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$

4.2. Ροή μάζας

Η ροή μάζας δείχνει την συγκέντρωση μίγματος ρευστού λόγω μοριακής και τυρβώδους διάχυσης. Για ασυμπίεστες ροές, σε ακίνητο ρευστό η πυκνότητα δεν μεταβάλλεται ανάμεσα στην είσοδο και την έξοδο του αγωγού. Καθώς η ταχύτητα είναι ομοιόμορφη σε ολόκληρη την περιοχή, η ροή μάζας ικανοποιεί τους νόμους της συνέχειας, δηλαδή η παροχή είναι σταθερή κατά μήκος οποιουδήποτε σωλήνα ροής έτσι είναι δυνατόν να συσχετιστούν οι ταχύτητες με τη ροή μάζας, ανάμεσα σε τομείς του δυναμικού ροής στην περιοχή ενδιαφέροντος στον αγωγό.

Η ποσότητα $\dot{m} = \rho AV$ είναι η ροή μάζας (*mass flux*), έχει μονάδες kg/s και εξετάζει πόση συγκέντρωση μίγματος ρευστού διαπερνά – τέμνει διατομή κάθετη προς την κατεύθυνση ανά μονάδα χρόνου. Η ποσότητα VA είναι ο ρυθμός ροής (εκροής της φλέβας) και έχει μονάδες m^3/s . Η ροή μάζας χρησιμοποιείται συχνά στην ροή αερίων και ο ρυθμός ροής στην ροή υγρών (P.C. Yannopoulos και M.G. Markou 2010). Με τα ίδια δεδομένα που προέκυψαν από το λογισμικό INSIGHT-3G, υπολογίστηκε στο Excel, η ροή μάζας για κάθε πείραμα και με πλοτάρισμα των δεδομένων στο Matlab δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα ροής μάζας. Στον πιο κάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ροής μάζας \dot{m} για κάθε πείραμα. Παρουσιάζεται η μέση κατακόρυφη ταχύτητα (V_μ) που αντιστοιχεί σε κάθε συγκεκριμένο Y και προκύπτει σαν μέσος όρος όλων των κατακόρυφων ταχυτήτων που μετρήθηκαν για το κάθε X .

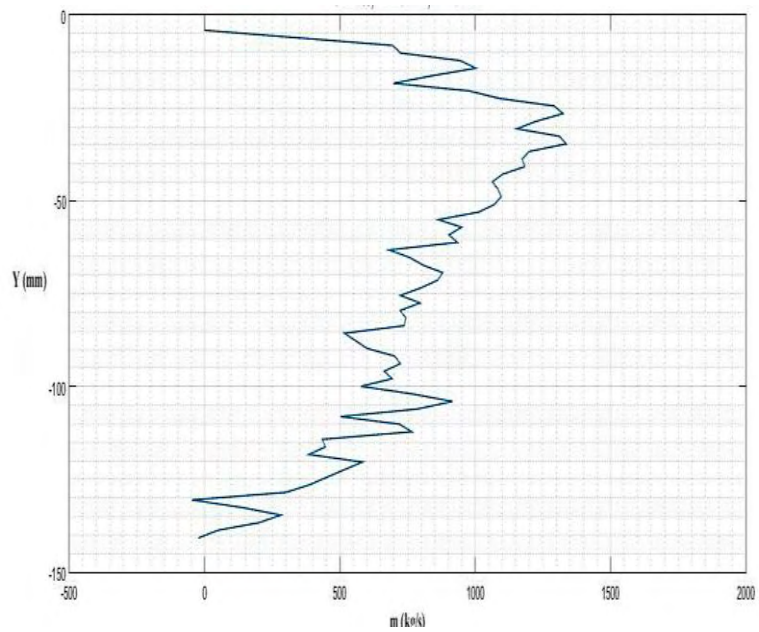
Επιλέχθηκε διατομή A , ίση με το πλάτος του αγωγού (0.75 m) επί τη μεταβολή $\Delta x = (X_{\text{τελ.}} - X_{\text{αρχ.}})$ για κάθε Y , πυκνότητα $\sigma(S, t, p) = \rho(S, t, 0) - p_o = \rho(S, t, 0) - 1000kg/m^3$, όπου σ είναι ένας συντελεστής που δείχνει προσεγγιστικά την πυκνότητα στις θαλάσσιες μάζες, ανάλογα με την αλατότητα $S(\%)$, την θερμοκρασία $t(^{\circ}c)$ και μηδενική πίεση αφού πρόκειται για περιοχή πολύ κοντά στην επιφάνεια του αποδέκτη. Μέσω νομογράμματος του σ με την αλατότητα και την θερμοκρασία εξήχθησαν οι παρακάτω τιμές:

$S(^{\circ}/_{00})$	σ	ρ
10	4	1004
15	7	1007
20	12	1012
25	15	1015
30	19	1019

Πίνακας 4.4. Τιμές νομογραφήματος σ (κανονικές συνθήκες $t = 25^{\circ}c$).

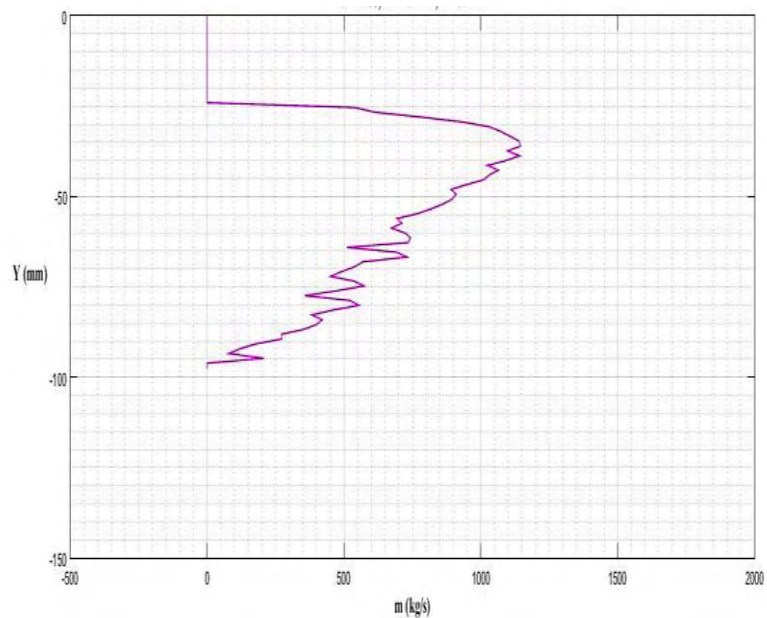
S = 15⁰/100, Dh = 70mm, h = 150mm

Y	Vm	m
-2,04032	0	0
-4,08064	0	0
-6,12096	-0,00258	-393,0046874
-8,16128	0,004552	694,3753804
-10,2016	0,004748	724,3415989
-12,2419	0,006187	943,8995336
-14,2822	0,006568	1001,952254
-16,3226	0,005512	840,8353261
-18,3629	0,004573	697,6853266



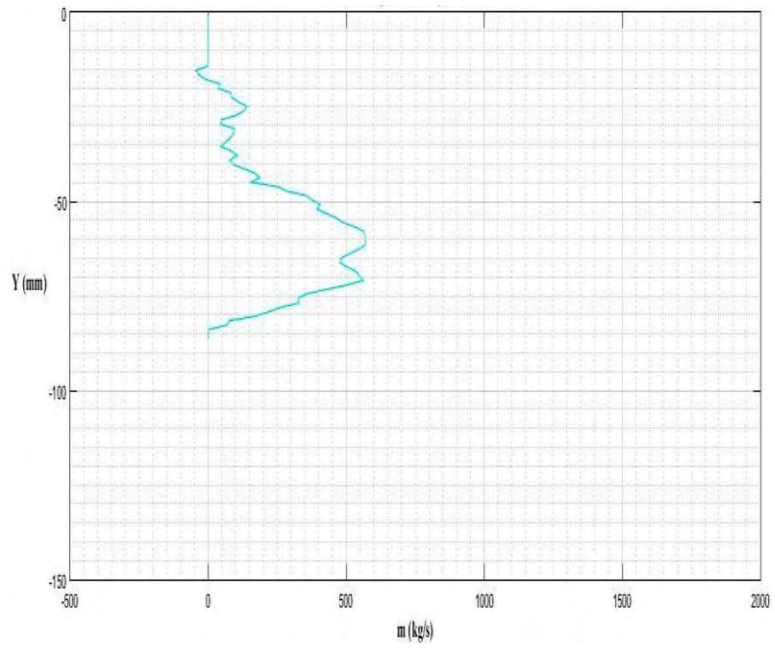
S = 20⁰/100, Dh = 70mm, h = 70mm

Y	Vm	m
-1,33518	0	0
-2,67035	0	0
-4,00553	0	0
-5,34071	0	0
-6,67588	0	0
-8,01106	0	0
-9,34623	0	0
-10,6814	0	0
-12,0166	0	0



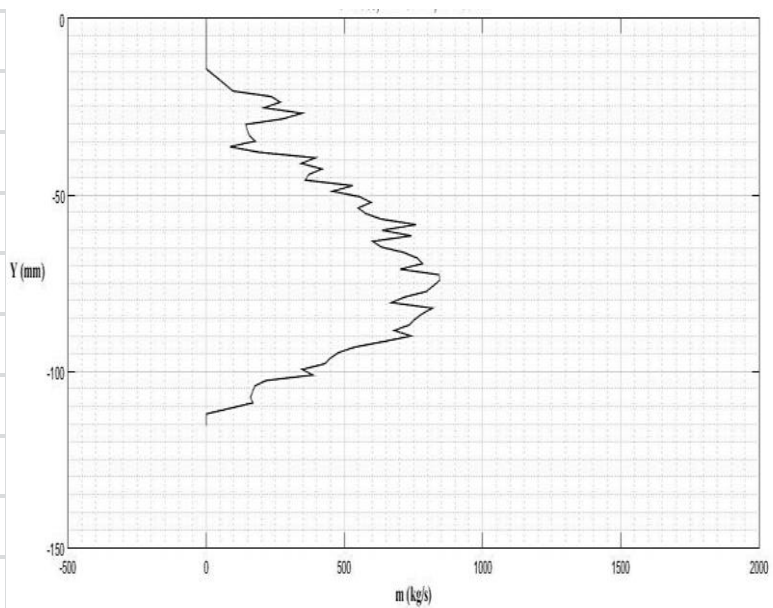
$S = 25^0/_{00}$, Dh = 70mm, h = 70mm

Y	Vm	m
-1,18192	0	0
-2,36384	0	0
-3,54576	0	0
-4,72768	0	0
-5,9096	0	0
-7,09152	0	0
-8,27344	0	0
-9,45536	0	0
-10,6373	0	0



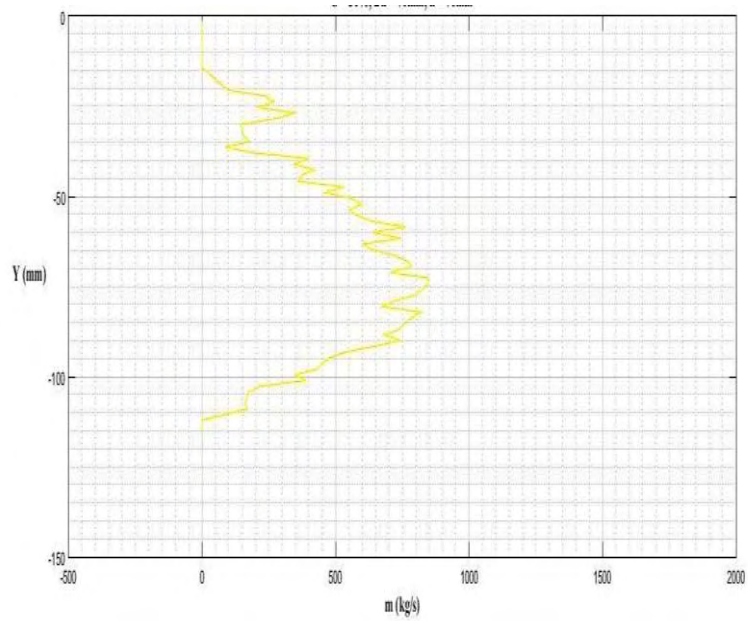
$S = 25^0/_{00}$, Dh = 70mm, h = 100mm

Y	Vm	m
-1,57952	0	0
-3,15904	0	0
-4,73856	0	0
-6,31808	0	0
-7,8976	0	0
-9,47712	0	0
-11,0566	0	0
-12,6362	0	0
-14,2157	0	0



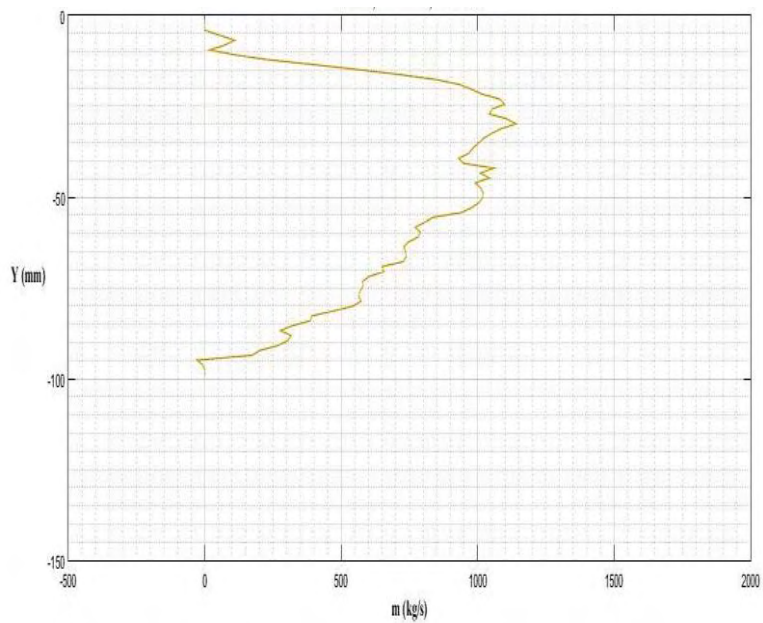
S = 30⁰/₀₀, Dh = 70mm, h = 70mm

Y	Vm	m
-1,57952	0	0
-3,15904	0	0
-4,73856	0	0
-6,31808	0	0
-7,897601	0	0
-9,47712	0	0
-11,056641	0	0
-12,636161	0	0
-14,215681	0	0



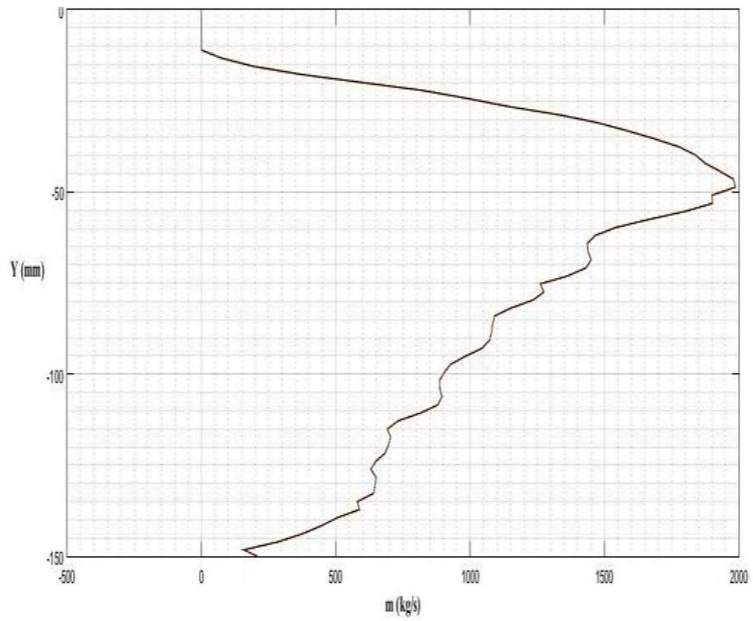
S = 30⁰/₀₀, Dh = 70mm, h = 100mm

Y	Vm	m
-1,356	0	0
-2,712	0	0
-4,068	0	0
-5,424	-0,004509527	-462,659
-6,78	0,001066171	109,3849
-8,136	0,000719143	73,78121
-9,492	0,000176679	18,12658
-10,848	0,001083743	111,1877
-12,204	0,002278077	233,7216



S = 30⁰/100, Dh = 70mm, h = 150mm

Y	Vm	m
-2,21288	0	0
-4,42576	0	0
-6,63865	0	0
-8,85153	0	0
-11,0644	0	0
-13,2773	0,00045	75,37218
-15,4902	0,001151	192,6926
-17,7031	0,002198	368,0811
-19,9159	0,003554	595,1149



5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Σύγκριση προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων

Στην εικόνα 5.1 γίνεται σύγκριση των προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων για διαφορά στάθμης $Dh = 70$ mm και βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70$ mm. Τα προφίλ ταχύτητας δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, όσον αφορά την κατανομή αφού ομοιάζουν με την γκαουσιανή κατανομή. Τα ύψη κατακόρυφης ταχύτητας για τιμές αλατότητας $S = 10^0/00$, $20^0/00$, $30^0/00$, δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Η μεγαλύτερη τιμή ταχύτητας που παρατηρείται είναι $0,0475$ m/s για $S = 30^0/00$. Ακολούθως για $S = 20^0/00$ η μέγιστη ταχύτητα είναι $0,0425$ m/s και για $S = 10^0/00$ η μέγιστη τιμή ταχύτητας είναι $0,0350$ m/s. Από τις παραπάνω τιμές συμπεραίνουμε ότι όσο αυξάνεται η αλατότητα (S) του περιβάλλοντος ακίνητου ρευστού, δηλαδή η διαφορά πυκνότητας του σε σχέση με την πυκνότητα ρευστού που εκτοξέυεται από την φλέβα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού της φλέβας.

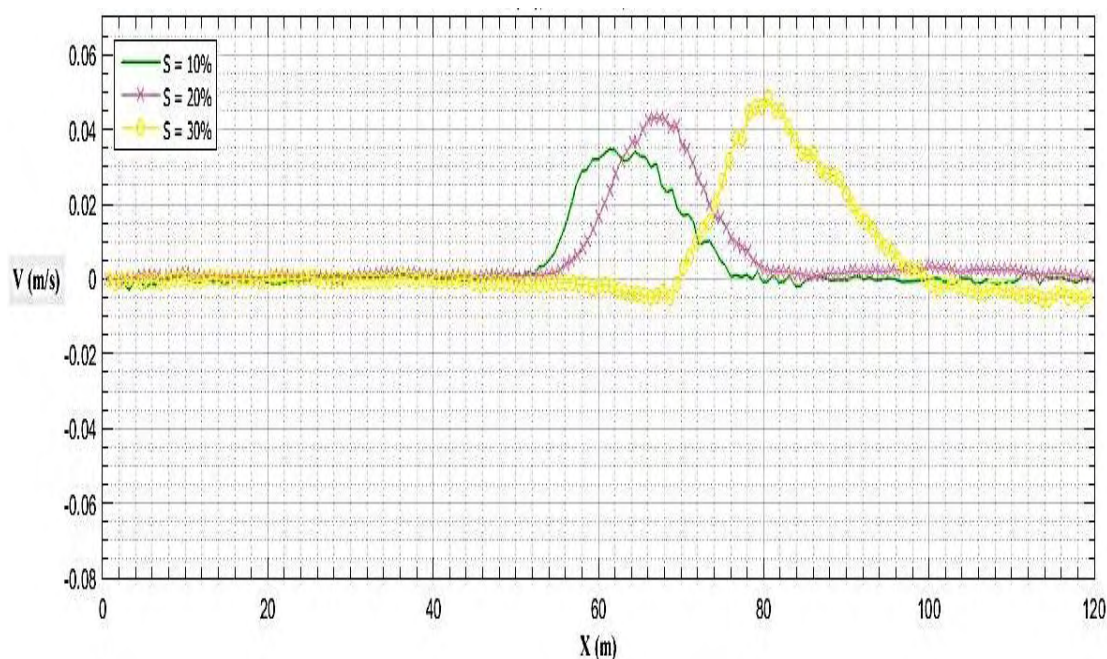
Στην εικόνα 5.2 γίνεται σύγκριση των προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων για διαφορά στάθμης $Dh = 70$ mm και βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 150$ mm. Τα προφίλ ταχύτητας ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή. Τα ύψη κατακόρυφης ταχύτητας για τιμές αλατότητας $S = 15^0/00$, $20^0/00$, $30^0/00$, δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Η μέγιστη τιμή ταχύτητας που παρατηρείται είναι $0,0510$ m/s για $S = 30^0/00$, για $S = 20^0/00$ είναι $0,04750$ m/s και για $S = 15^0/00$ είναι $0,0450$ m/s. Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η αλατότητα του περιβάλλοντος ρευστού, δηλαδή η διαφορά πυκνότητας αποδέκτη – φλέβας, τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ταχύτητας των σωματιδίων του ρευστού της φλέβας.

Στην εικόνα 5.3 γίνεται σύγκριση των προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων για αλατότητα $S = 20^0/00$, διαφορά στάθμης $Dh = 70$ mm και βάθη ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70, 150$ mm. Και στις δύο περιπτώσεις τα προφίλ ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή με σχεδόν ίδιο ύψος ταχύτητας. Η μέγιστη τιμή ταχύτητας που παρατηρείται είναι $0,0450$ m/s για βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 150$ mm ενώ για βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70$ mm, το ύψος ταχύτητας φτάνει μέχρι $0,0425$ m/s. Σύμφωνα με τις παραπάνω τιμές, φαίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού (h) τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα των σωματιδίων του ρευστού της φλέβας.

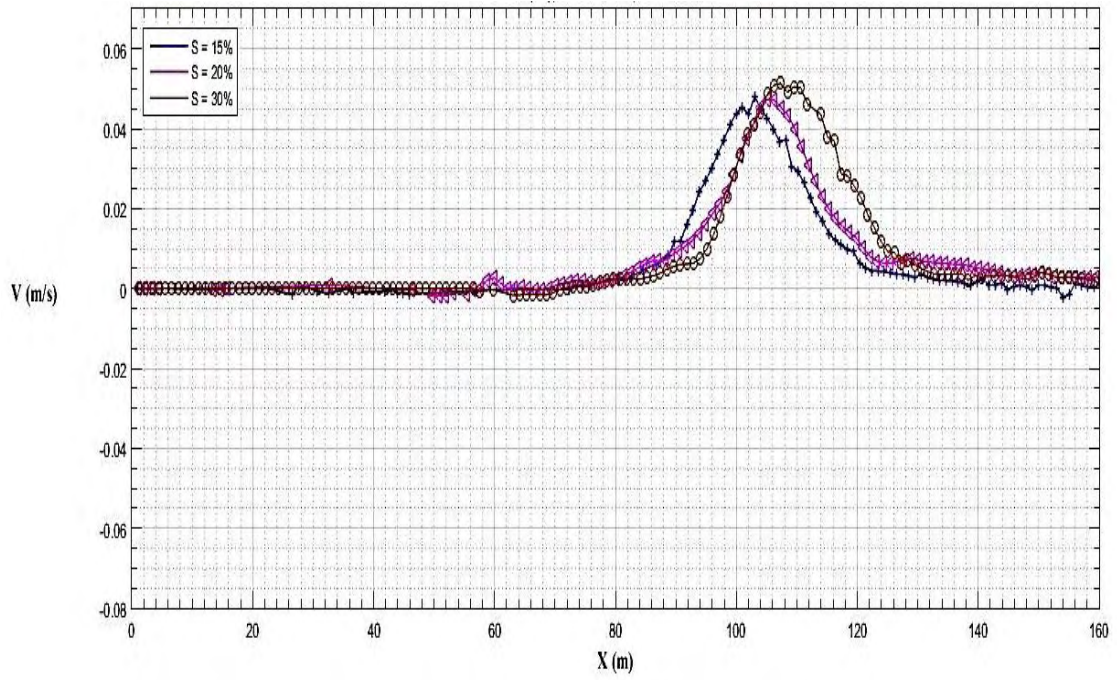
Στην εικόνα 5.4 γίνεται σύγκριση των προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων για $S = 25^0/00$, διαφορά στάθμης $Dh = 70$ mm και βάθη ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70, 100$ mm. Και τα δύο προφίλ ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή, με το δεύτερο προφίλ ($h = 100$ mm) να παρουσιάζει μερικές ανομοιομορφίες στην βάση του, δηλαδή στην πηγή της φλέβας. Το ύψος ταχύτητας παρουσιάζουν σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο προφίλ αφού η μέγιστη τιμή ταχύτητας που παρατηρείται είναι $0,0475$ m/s για βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 100$ mm, ενώ για βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70$ mm η ταχύτητα φτάνει μέχρι $0,0250$ m/s. Τα

αποτελέσματα δείχνουν ότι οι ταχύτητες των σωματιδίων του ρευστού της φλέβας αυξάνονται όσο αυξάνεται το βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού (h).

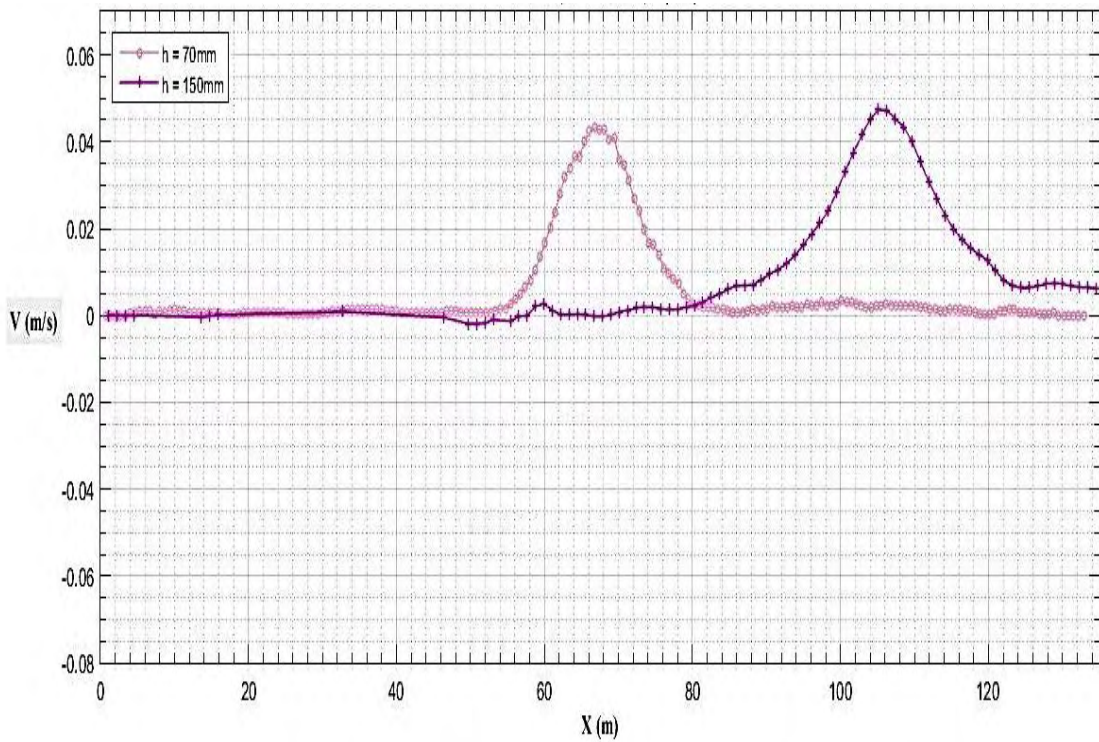
Στην εικόνα 5.5 γίνεται σύγκριση των προφίλ κατακόρυφων ταχυτήτων για $S = 30\%$, διαφορά στάθμης $Dh = 70$ mm και βάθη ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70, 100, 150$ mm. Και στις τρεις περιπτώσεις, τα προφίλ ομοιάζουν με γκαουσιανή κατανομή χωρίς σημαντικές διαφορές μεταξύ τους, ούτε στη μορφή, αλλά ούτε και στο ύψος ταχύτητας. Η μέγιστη τιμή ταχύτητας που παρατηρείται είναι $0,0520$ m/s για $h = 150$ mm και ακολουθεί η τιμή $0,0510$ m/s για βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 100$ mm. Για βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70$ mm η μέγιστη τιμή ταχύτητας είναι $0,04750$ m/s. Σύμφωνα με τα πιο πάνω αποτελέσματα, οι ταχύτητες των σωματιδίων του ρευστού της φλέβας αυξάνονται όσο αυξάνεται το βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού (h).



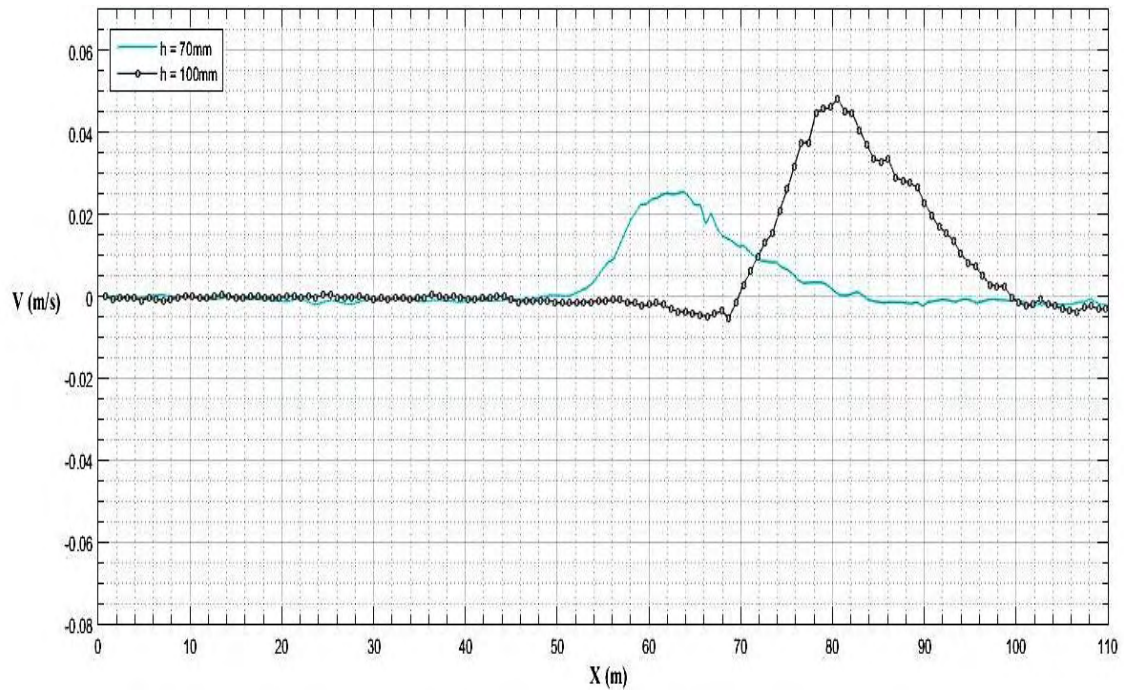
Εικόνα 5.1. Σύγκριση προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για S ($\%$), $Dh = 70$ mm, $h = 70$ mm



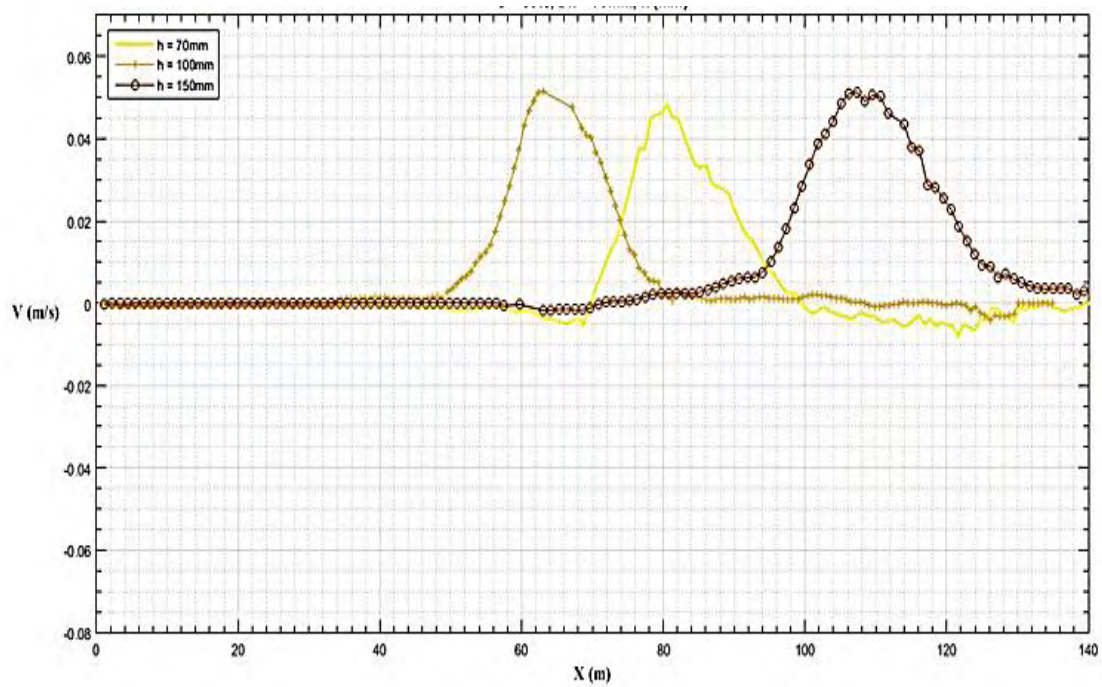
Εικόνα 5.2. Σύγκριση προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = (‰)$, $Dh = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$



Εικόνα 5.3. Σύγκριση προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 20‰$, $Dh = 70\text{mm}$, h (mm)



Εικόνα 5.4. Σύγκριση προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 25\%$, $Dh = 70\text{mm}$, h (mm)



Εικόνα 5.5. Σύγκριση προφίλ κατακόρυφης ταχύτητας για $S = 30\%$, $Dh = 70\text{mm}$, h (mm)

5.2. Σύγκριση προφίλ ροής μάζας

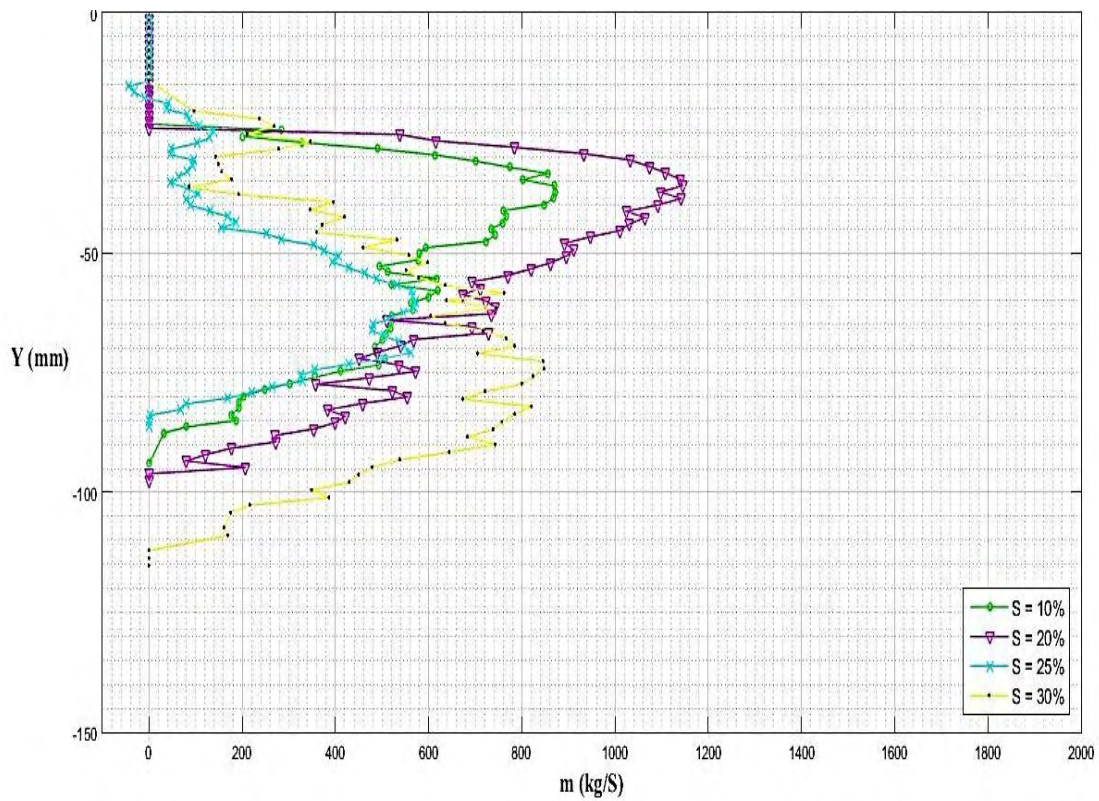
Στην εικόνα 5.5 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων ροής μάζας για αλατότητα $S = 10^0/00, 20^0/00, 25^0/00, 30^0/00$, διαφορά στάθμης $Dh = 70\text{mm}$ και βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70\text{mm}$. Όπως φαίνεται στην εικόνα, η μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 1160kg/s για $S = 20^0/00$. Ακολουθώντας η μέγιστη τιμή είναι 880kg/s για $S = 10^0/00$, 850kg/s για $S = 30^0/00$, ενώ για $S = 25^0/00$ παρατηρείται αρκετά χαμηλή ροή μάζας με μέγιστη τιμή 480kg/s .

Στην εικόνα 5.6 συγκρίνονται τα διαγράμματα ροής μάζας για αλατότητα $S = 25^0/00, 30^0/00$, διαφορά στάθμης $Dh = 70\text{mm}$ και βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 100\text{mm}$. Όπως φαίνεται στην εικόνα τα διαγράμματα παρουσιάζουν σημαντική διαφορά αφού για $S = 25^0/00$ η μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 840kg/s ενώ για $S = 30^0/00$ η μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 1130kg/s .

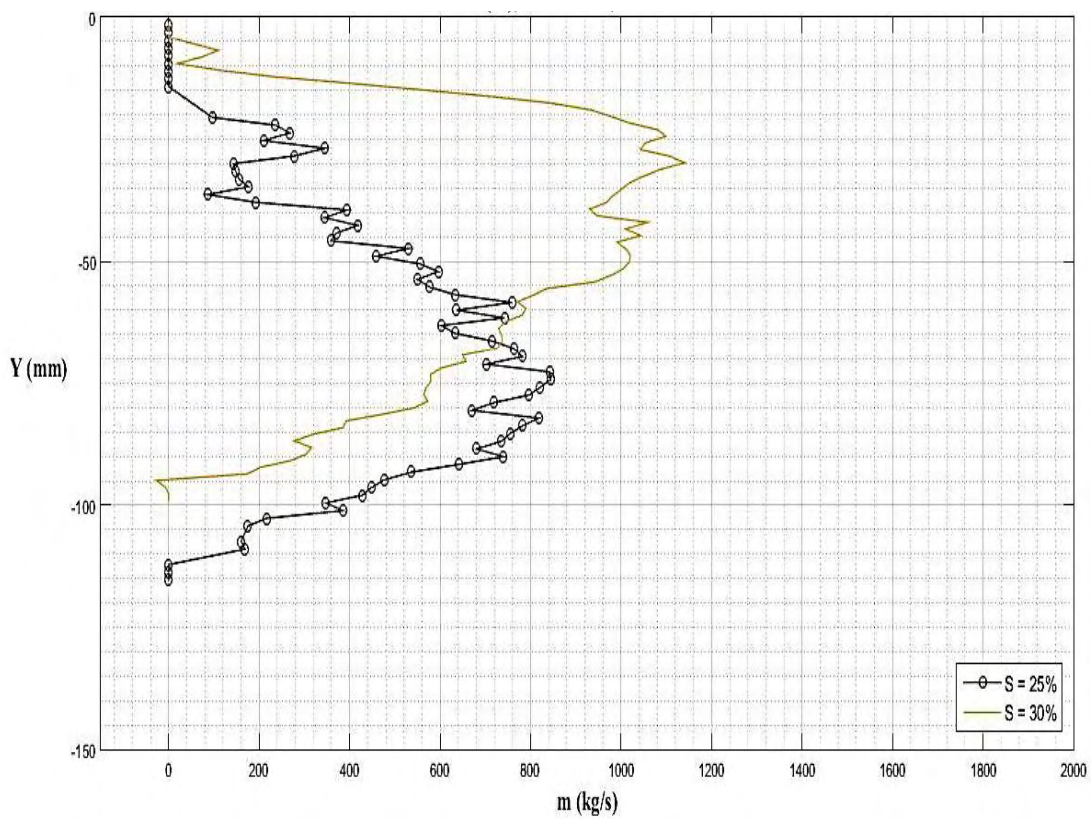
Στην εικόνα 5.7 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων ροής μάζας για αλατότητα $S = 15^0/00, 30^0/00$, διαφορά στάθμης $Dh = 70\text{mm}$ και βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 150\text{mm}$. Όπως φαίνεται στην εικόνα υπάρχει αρκετή διαφορά μεταξύ των δύο διαγραμμάτων. Για $S = 15^0/00$ η μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 1330kg/s ενώ για $S = 30^0/00$ παρατηρείται περίπου διπλάσια τιμή με μέγιστη τιμή 2000kg/s .

Στην εικόνα 5.8 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων της ροής μάζας για αλατότητα $S = 25^0/00$, διαφορά στάθμης $Dh = 70\text{mm}$ και βάθη ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70, 100\text{mm}$. Τα δύο διαγράμματα δεν παρουσιάζουν σημαντική διαφορά αφού για $h = 70\text{mm}$ η μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 560kg/s ενώ για $h = 100\text{mm}$ η μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 840kg/s .

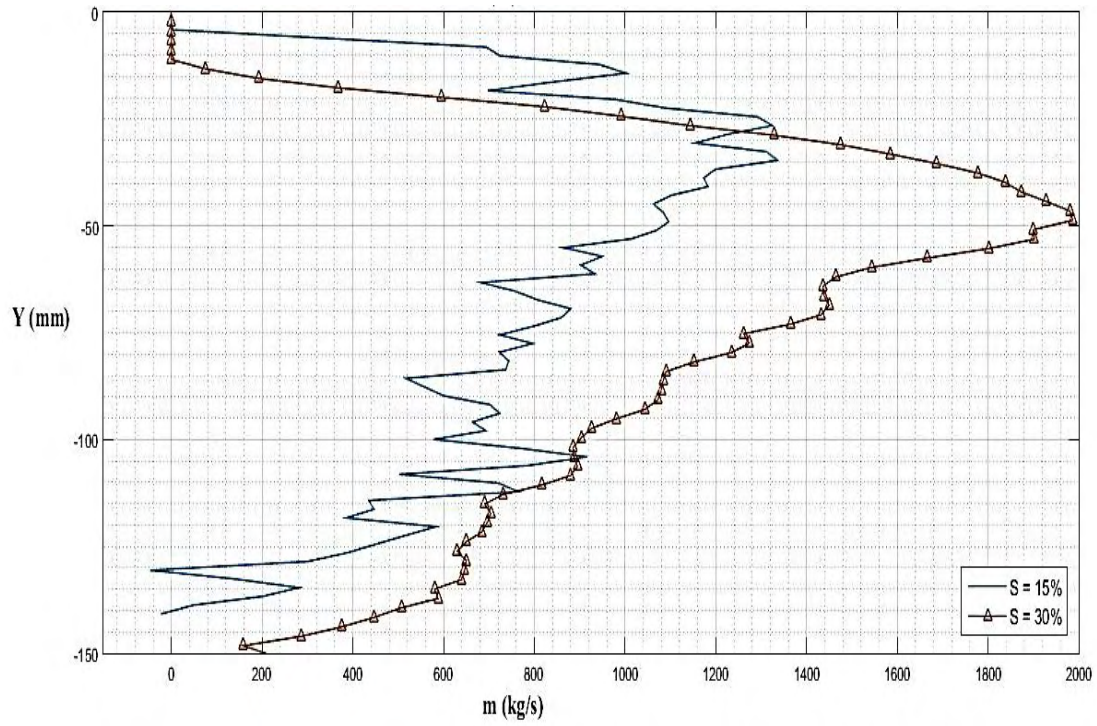
Στην εικόνα 5.9 γίνεται σύγκριση των διαγραμμάτων ροής μάζας για αλατότητα $S = 30^0/00$, διαφορά στάθμης $Dh = 70\text{mm}$ και βάθη ελεύθερης επιφάνειας καναλιού $h = 70, 100, 150\text{mm}$. Όπως φαίνεται στην εικόνα, τα διαγράμματα είναι ανάλογα του βάθους ροής. Δηλαδή για $h = 70\text{mm}$ η μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 840kg/s . Για $h = 100\text{mm}$ η μέγιστη τιμή ροής μάζας αυξάνεται περίπου στη διπλάσια και φτάνει τα 1130kg/s και περίπου τριπλάσια για $h = 150\text{mm}$ με μέγιστη τιμή ροής μάζας είναι 2000kg/s .



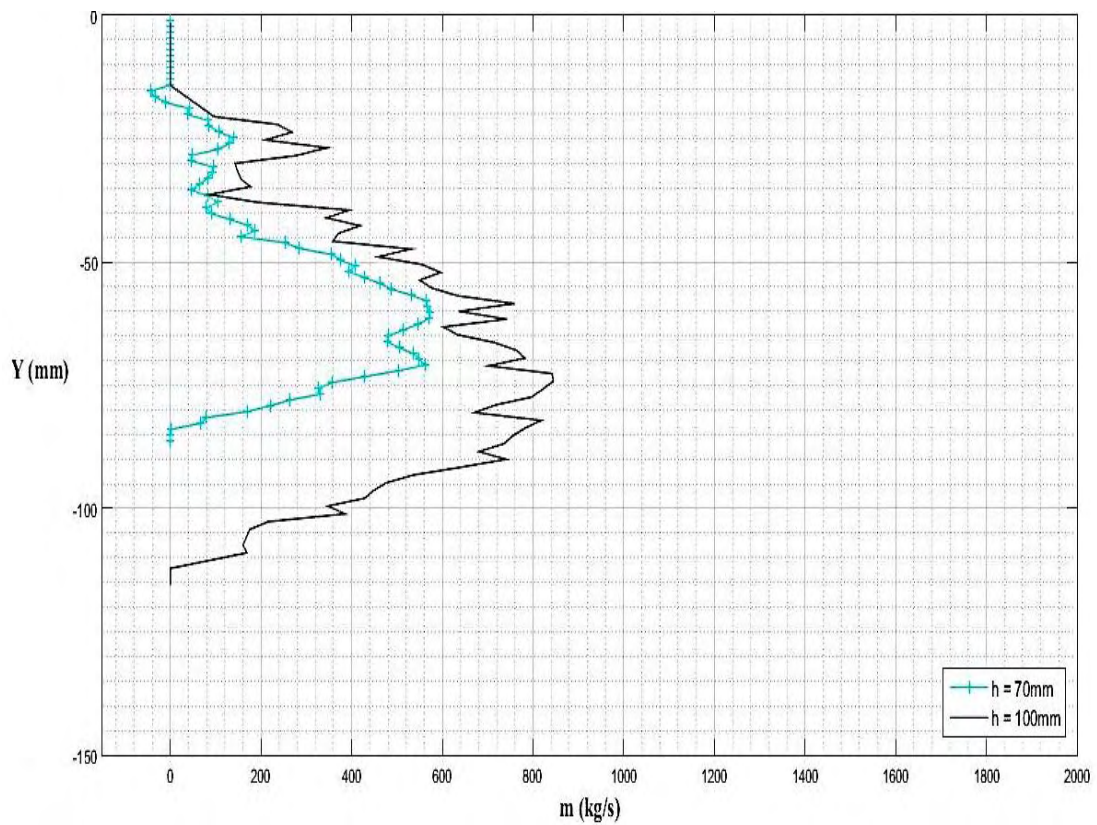
Εικόνα 5.5. Σύγκριση ροής μάζας για S ($^0/_{00}$) , $D_h = 70\text{mm}$, $h = 70\text{mm}$



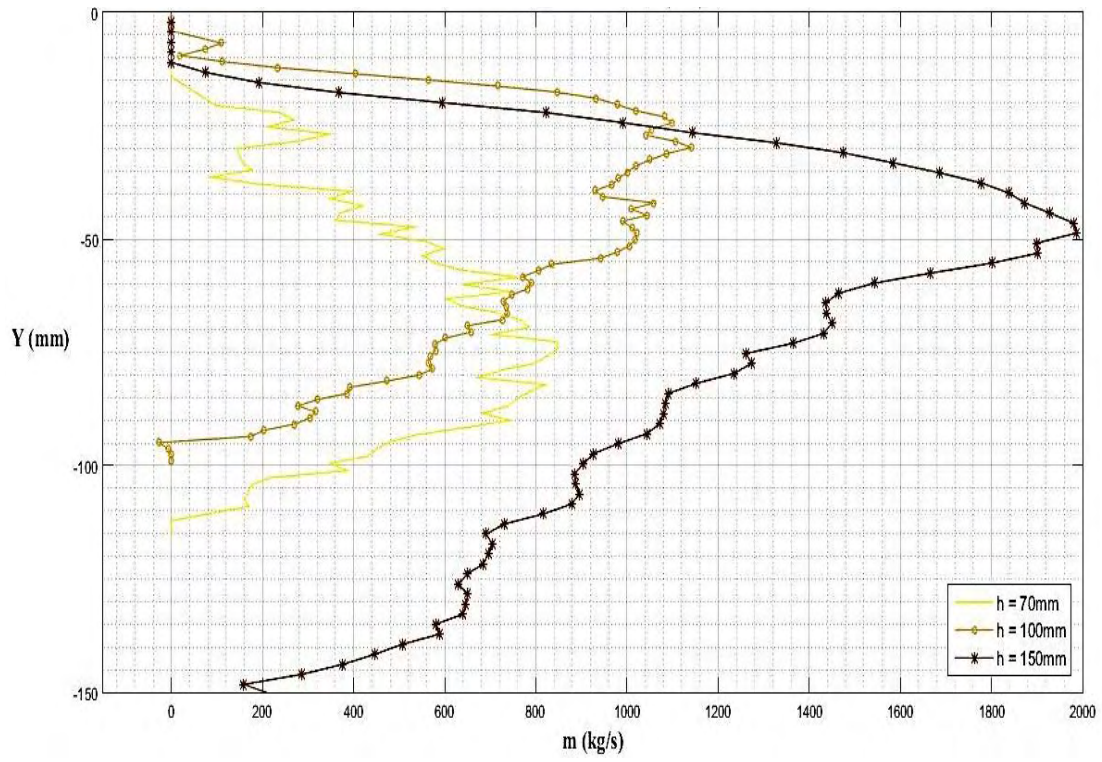
Εικόνα 5.6. Σύγκριση ροής μάζας για S ($^0/_{00}$) , $D_h = 70\text{mm}$, $h = 100\text{mm}$



Εικόνα 5.7. Σύγκριση ροής μάζας για S ($^0/_{00}$), $D_h = 70\text{mm}$, $h = 150\text{mm}$



Εικόνα 5.8. Σύγκριση ροής μάζας για $S = 25^0/_{00}$, $D_h = 70\text{mm}$, h (mm)



Εικόνα 5.9. Σύγκριση ροής μάζας για $S = 30^0/_{00}$, $D_h = 70\text{mm}$, h (mm)

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, με βάση την ανάλυση αποτελεσμάτων στο κεφάλαιο 5.1, είναι εμφανές ότι η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την ταχύτητα των σωματιδίων της εκτοξευόμενης φλέβας είναι η αλατότητα (S), που σχετίζεται γραμμικά με τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ των δύο ρευστών (φλέβας - ακίνητου αποδέκτη). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης, η παράμετρος βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού (h), καθώς τα αποτελέσματα δείχνουν ότι όσο αυξάνεται, τόσο μεγαλύτερες ταχύτητες έχουν τα σωματίδια του ρευστού της εκτοξευόμενης φλέβας. Η διαφορά στις απόστασεις X οφείλεται στην θέση της κάμερας αφού για κάθε διαφορετικό βάθος ροής, η κάμερα μετακινούταν πιο κοντά ή μακριά από τον αγωγό – κανάλι, για καλύτερη λήψη φωτογραφιών, ανάλογα με την περιοχή ενδιαφέροντος.

Όσον αφορά τα προφίλ ροής μάζας, σύμφωνα με την ανάλυση αποτελεσμάτων στο κεφάλαιο 5.2, η μεγαλύτερη μεταφορά μάζας γίνεται με αλατότητα $S = 300/00$ και $h = 150\text{mm}$ όπου παίρνει τιμή μέχρι και 2000kg/s . Από αυτό φαίνεται ότι η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την ροή μάζας είναι η αλατότητα (S), ενώ σημαντικό ρόλο έχει και η παράμετρος βάθος ελεύθερης επιφάνειας καναλιού (h), καθώς για $h = 150\text{mm}$ παρατηρείται η μεγαλύτερη τιμή ροής μάζας.

6.1. Βιβλιογραφία

- Fischer, HB, List, EJ, Koh, RCY, Imberger, J, and Brooks, NH, 1979. «Mixing in inland and coastal waters», Academic Press, New York 1979.
- Παπαντωνίου Σ.Ι. , 2009. «Πειραματική εφαρμογή σε τυρβώδη ανωστική εκτοξευόμενη φλέβα», Ε.Μ.Π, Αθήνα, Ιανουάριος 2009.
- Κωτσοβίνος Ν.Ε. , Αγγελίδης Π.Β., 2001. «Διάθεση Αστικών Υγρών Αποβλήτων από Μικρούς Παραθαλάσσιους Οικισμούς», Επιστημονική Έκδοση. ΤΕΕ, Ι, τεύχος 2, 2001.
- G.M. Faeth, Z.Dai, F.J. Diez, O.C. Kwon, R. Sangras, 2002. «The properties of buoyant turbulent thermals and plumes in still and crossflowing environments», 8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, St. Louis, Missouri, 24-26 June 2002.
- Κωτσοβίνος Ν.Ε., Αγγελίδης Π.Β., 2005. «Ρύπανση επιφανειακών υδάτων από την οριζόντια βυθισμένη εξάπλωση λυμάτων στη θερμοκλίνη θαλάσσιας περιοχής», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 2005.

- Μύρτου Ε. , 2012. «Υπολογιστική διερεύνηση της ροής ανωστικών φλεβών», Αθήνα, Οκτώβριος 2012.
- Παπανικολάου Π. 2010. «Τυρβώδης διάχυση διδιάστατης κατακόρυφης φλέβας σε ήρεμο, γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2010.
- Keramaris E., Pechlivanidis G., Pechlivanidis I., Samaras G., (2012). «Measurements of Turbulent Characteristics in an Open Channel Using PIV (Particle Image Velocimetry) », Global NEST Journal, Volume 14 (3), pag. 378-385, September 2012.