

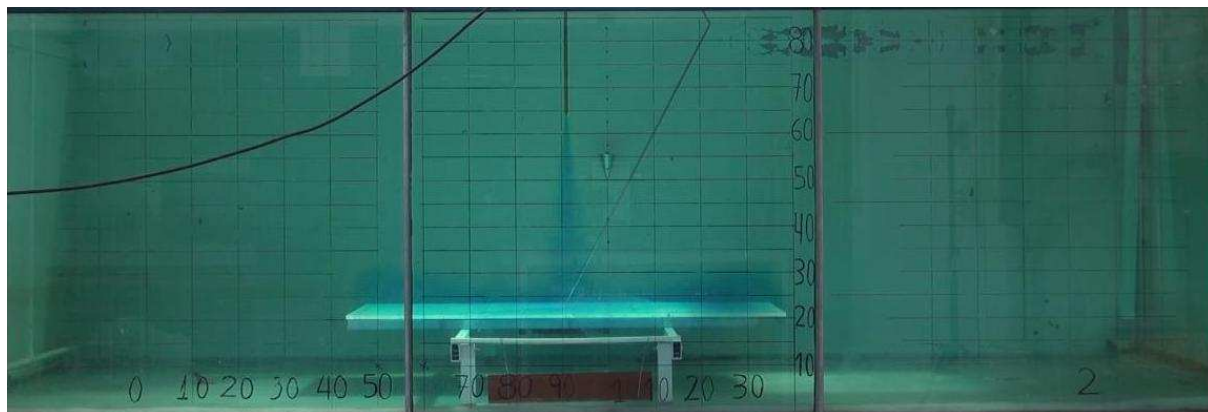


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΡΙΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ
ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ ΘΕΤΙΚΗΣ
ΑΝΩΣΗΣ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΘΩΜΑ Δ. ΔΙΑΜΑΝΤΗ**

Επιβλέπων: Αναστάσιος Στάμου

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ
ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΡΙΟΥ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ
ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ ΘΕΤΙΚΗΣ
ΑΝΩΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΩΜΑ Δ. ΔΙΑΜΑΝΤΗ / Αριθμός μητρώου: 01103612

Επιβλέπων : Αναστάσιος Στάμου

Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής

Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

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

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου, καθηγητή Αναστάσιο Ι. Στάμου που με ενθάρρυνε να καταπιαστώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θερμές ευχαριστίες απευθύνονται προς τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Νικηφοράκη Ιωάννη, για την συμβολή, επιμονή και υπομονή του στη διεξαγωγή των πειραμάτων καθώς και τη βοήθεια και τις οδηγίες του στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους τεχνικούς του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Ε.Μ.Π κ. Μανώλη Λασηθιωτάκη και κ. Γιάννη Πατσέλη για την έγκαιρη τροποποίηση της πειραματικής διάταξης, καθώς και για την προθυμία τους να επιλύσουν οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυπτε με αυτήν, μέσα σε αντίξοες συνθήκες.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που με στήριξε ολόπλευρα όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνάται πειραματικά η επίδραση οριζόντιου στερεού ορίου σε κατακόρυφες τυρβώδεις κυκλικές φλέβες θετικής άνωσης που εκφορτίζονται σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 12 πειράματα σε τέσσερις διαδοχικές φάσεις. Σε κάθε φάση προσεγγιζόταν μία ορισμένη τιμή του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού Froude ($F_o \approx 23, 17, 3.5$ και 11). Όλα τα πειράματα έλαβαν χώρα σε πειραματική δεξαμενή, στον πυθμένα της οποίας τοποθετήθηκε ορθογωνικό τεμάχιο από plexiglas που χρησιμοποιήθηκε ως στερεό όριο. Κυκλικά ακροφύσια διαμέτρων $D_o = 0.8, 1.0$ και 1.6 cm χρησιμοποιήθηκαν για την εκτόξευση της φλέβας κατακόρυφα από την επιφάνεια προς τον πυθμένα. Η δεξαμενή πληρωνόταν με νερό βρύσης ενώ η φλέβα ήταν μείγμα αλατόνερου πυκνότητας $1.9-5.5\%$ υψηλότερης από του αποδέκτη. Οι πυκνότητες τόσο του μείγματος αλατόνερου (ρ_a) όσο και του νερού της δεξαμενής ($\rho_o < \rho_a$) υπολογίστηκαν μέσω της αλατότητάς τους (ppt) και της θερμοκρασίας τους ($^{\circ}\text{C}$) με τη βοήθεια ενός φορητού οργάνου. Αυτές οι πυκνότητες προσέγγιζαν ικανοποιητικά τις αντίστοιχες που πάρθηκαν ζυγίζοντας δείγμα γνωστού όγκου που περιεχόταν σε βαθμονομημένο κύλινδρο. Η παροχή της φλέβας προσδιοριζόταν μέσω ενός μετρητή Venturi συνδεδεμένου με διαφορικό μανόμετρο και ενός ογκομετρικού κυλίνδρου. Οι μετρήσεις συγκέντρωσης (αλατότητας) πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση αναλογικού αγωγιμομέτρου. Σε κάθε φάση πειραμάτων λαμβάνονταν μετρήσεις αλατότητας τόσο στον άξονα της φλέβας όσο και εγκάρσια σ' αυτόν. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρουσία του στερεού ορίου επηρεάζει την αξονική διάλυση της φλέβας σε ένα ύψος h_D από το στερεό όριο, το οποίο συσχετίζεται γραμμικά με την απόσταση από την πηγή σε αδιάστατους όρους (κλίμακα μήκους l_M). Η διάλυση στο σημείο πρόσκρουσης με το στερεό όριο εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη σε σχέση με αυτήν που αφορά ελεύθερα εξελισσόμενη φλέβα στην ίδια θέση. Επίσης, προτείνονται αδιαστατοποιημένες εμπειρικές σχέσεις προσδιορισμού του ύψους h_D και της διάλυσης στο σημείο πρόσκρουσης. Η παρουσία του στερεού ορίου φαίνεται επίσης ότι διαταράσσει τις εγκάρσιες κατανομές συγκεντρώσεων. Η διαταραχή αυτή εκδηλώνεται με σημαντικές αποκλίσεις από τις κατανομές Gauss καθώς προσεγγίζεται ο οριζόντιος πυθμένας. Όταν η φλέβα προσκρούει στο στερεό όριο δημιουργείται ρεύμα πυκνότητας, το οποίο μετακινείται οριζόντια απομακρυνόμενο από το σημείο πρόσκρουσης. Εκτιμάται η απόσταση από τον άξονα της φλέβας, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως αρχή του ρεύματος πυκνότητας,

καθώς και το πάχος αυτού τόσο σε απόλυτους όσο και σε αδιάστατους όρους (κλίμακα I_M) για τις περιπτώσεις $F_0 \approx 3.5$ και 11.

ABSTRACT

In the present diploma thesis, the effect of horizontal solid boundary to vertical turbulent round positively buoyant jets, which are discharged into stagnant and homogeneous ambient, is investigated. Twelve experiments were performed in four sequential stages. In each stage a specific value of the initial densimetric Froude number was approximated ($F_o \approx 23, 17, 3.5$ and 11). All experiments were conducted in an experimental tank. A rectangular perspex false bottom, which was used as solid boundary, was introduced above the tank bottom. Round pipes of diameter $D_o = 0.8, 1.0$ and 1.6 cm, were used to discharge the jet vertically downwards. The tank was initially filled up with tap water and the jet effluent was salt water solution of density 1.9-5.5% higher than the ambient. The densities of salt water solution (ρ_o) and the tank water ($\rho_a < \rho_o$) were calculated from their salinity (ppt) and temperature ($^{\circ}\text{C}$) measured by a portable instrument. These densities were generally in good agreement with the densities measured by weighting a known volume of sample contained in a calibrated flask. The flow rate of the salt water effluent was measured by means of a Venturi meter combined with a differential manometer and a volumetric cylinder. Concentration measurements concerning salinity were performed by using an analog conductivity meter. In each experimental stage, salinity measurements were taken on the jet axis and transversely to it as well. The experimental results showed that the presence of the solid boundary affects the axial dilution of the approaching jet up to a distance of h_D which is well correlated to the source height and the length scale l_M . The dilution at the impingement point on the boundary is reduced appreciably compared to that of a boundary-free jet at the same location. Dimensionless empirical equations are proposed for the distance h_D and the dilution at the impingement point, in terms of geometrical parameters and the F_o . The presence of the solid boundary also seems to distort the jet cross-sectional distribution. This distortion is manifested by significant deviations from the far-field Gaussian similarity profiles as the solid boundary is approached. When the jet impinges on the solid boundary a density current is created, which moves horizontally away from the impact point. The distance from the jet axis, where the density current is formed and its thickness are estimated both in absolute and dimensionless terms (length scale l_M), for cases $F_o \approx 3.5$ and 11 .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας.....	3
1.3 Διάρθρωση της εργασίας.....	4
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	6
2.1 Εισαγωγή.....	6
2.2 Ανωστικές φλέβες.....	6
2.2.1 Ορισμοί και διάκριση.....	6
2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή ανωστικών φλεβών.....	8
2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ανωστικών φλεβών.....	8
2.3.1 Παροχή, ορμή και άνωση ανωστικής φλέβας.....	8
2.3.2 Αριθμοί Reynolds και Froude.....	10
2.3.3 Διαστατική ανάλυση.....	11
2.3.4 Κλίμακες μήκους και αριθμός Richardson.....	11
2.3.5 Διάλυση.....	14
2.4 Εμβάθυνση στις τρεις βασικές μορφές φλεβών.....	15
2.4.1 Απλή κυκλική φλέβα.....	15
2.4.2 Πλούμιο.....	19
2.4.3 Τυρβώδης Ανωστική Φλέβα.....	21
2.5 Γενικευμένη θεωρία των List & Imberger.....	22
2.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	25
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	28
3.1 Δεξαμενές.....	30
3.1.1 Δεξαμενή διάχυσης.....	30
3.1.2 Δεξαμενή παρασκευής διαλύματος.....	31
3.1.3 Δεξαμενή τροφοδοσίας.....	32
3.2 Σύστημα μέτρησης της αγωγιμότητας.....	32

3.2.1 Αναλογικό αγωγιμόμετρο.....	32
3.2.2 Συσκευή μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό.....	34
3.2.3 Λογισμικό συλλογής και καταγραφής μετρήσεων.....	35
3.2.4 Ανάρτηση και μετακίνηση του ανιχνευτή αγωγιμότητας.....	36
3.3 Σύστημα ρύθμισης και μέτρησης της παροχής.....	37
3.4 Σύστημα παροχέτευσης της φλέβας.....	40
3.5 Ψηφιακό όργανο μέτρησης αλατότητας-θερμοκρασίας YSI 30.....	42
3.6 Βοηθητικά όργανα.....	43
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ.....	45
4.1 Προετοιμασία και εκτέλεση τυπικού πειράματος.....	45
4.1.1 Προετοιμασία.....	45
4.1.2 Βαθμονόμηση του οργάνου MSCTI.....	46
4.1.3 Εκτέλεση πειράματος.....	48
4.1.4 Μετρήσεις πυκνοτήτων.....	49
4.1.5 Προσδιορισμός της παροχής Q_0 της φλέβας.....	50
4.1.6 Αρχικές συνθήκες τυπικού πειράματος.....	50
4.1.7 Αξονικές μετρήσεις αλατότητας.....	51
4.1.8 Εγκάρσιες ως προς τον άξονα της φλέβας μετρήσεις αλατότητας.....	52
4.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	56
4.2.1 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων.....	56
4.2.2 Μετρήσεις πυκνοτήτων.....	57
4.2.3 Αξονικές μετρήσεις αλατότητας.....	59
4.2.4 Εγκάρσιες ως προς τον άξονα της φλέβας μετρήσεις αλατότητας.....	62
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	67
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	72
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	74
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	77
Α. Προσδιορισμός πυκνότητας αλατόνευρου από μετρήσεις συγκέντρωσης και θερμοκρασίας.....	77

B. Αξονικές μετρήσεις αλατότητας.....	81
Γ. Εγκάρσιες ως προς τον άξονα της φλέβας μετρήσεις αλατότητας.....	83

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

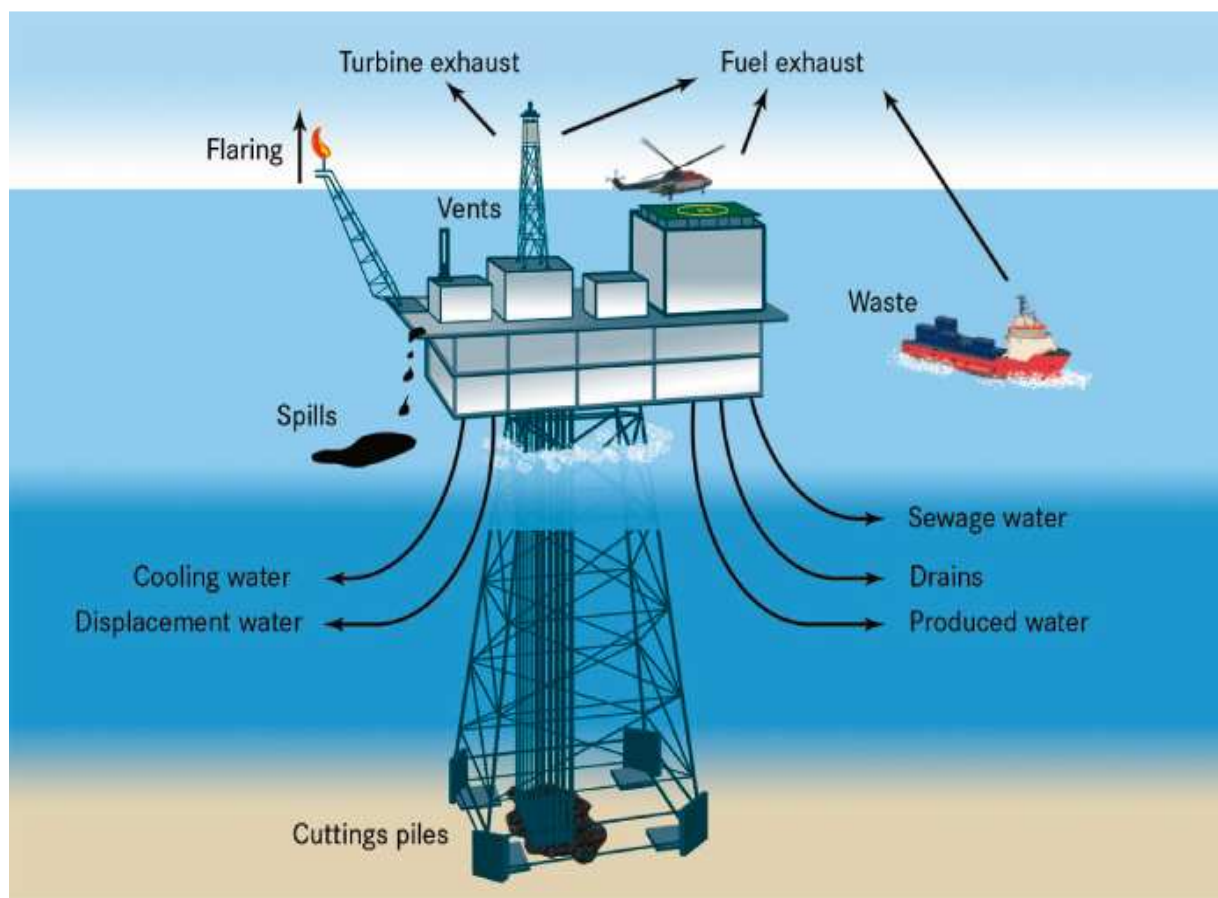
Η διάθεση υγρών αποβλήτων σε επιφανειακούς αποδέκτες (ποτάμια, λίμνες, παράκτιο περιβάλλον κτλ.) αποτελεί ένα πεδίο εφαρμογών της περιβαλλοντικής μηχανικής, στο οποίο έχει διεξαχθεί σημαντική ερευνητική δραστηριότητα διεθνώς. Τα υγρά αυτά απόβλητα συνίστανται συνήθως σε αστικά λύματα, βιομηχανικά απόβλητα (Νταρακάς, 2006), νερό ψύξης υδροηλεκτρικών σταθμών (Stamou & Nikiforakis, 2013), νερά που παρασύρουν φερτές ύλες, αλμόλοιπο από εγκαταστάσεις αφαλάτωσης (Jirka, 2008) κ.α. Συνήθως, η πυκνότητα του υγρού των αποβλήτων διαφέρει από την πυκνότητα του νερού του εκάστοτε αποδέκτη, και είναι είτε μικρότερη όπως συμβαίνει π.χ. με τα αστικά λύματα, είτε μεγαλύτερη όπως π.χ. στο διάλυμα που μένει μετά την αφαλάτωση του νερού. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ανωστικές ροές, δηλαδή ροές που προκαλούνται από ανωστικές δυνάμεις και λαμβάνουν τη μορφή ανωστικών φλεβών (buoyant jets).

Οι εκροές υγρών αποβλήτων λαμβάνουν χώρα συνήθως ως κατακόρυφες διοχετεύσεις, από τον πυθμένα ή την επιφάνεια ρηχών επιφανειακών νερών, με χρήση διαχυτήρων. Η παρουσία προσμειξέων ή θερμότητας καθίσταται επιβαρυντική και κρίσιμη, τόσο για την επιβίωση των φυτικών και ζωικών οργανισμών των αποδεκτών, όσο και για το ευρύτερο περιβάλλον μέσα στο οποίο ζει και δραστηριοποιείται ο άνθρωπος (βλ. Ταμπακίδης, 2012). Κατά συνέπεια, και σε αντιστοιχία πάντα με τις τοπικές κανονιστικές διατάξεις, είναι επιθυμητή η επίτευξη ενός ελάχιστου βαθμού διάλυσης (dilution) σε ορισμένη απόσταση από το σημείο εκροής. Η επιθυμητή διάλυση επιτυγχάνεται μέσω του μηχανισμού της συμπαράσυρσης (entrainment). Η φλέβα της εκροής συμπαρασύρει μεγάλες μάζες καθαρού νερού από τον αποδέκτη, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης των ρυπαντών και κατά συνέπεια στη διάλυση της παροχτευόμενης ποσότητας ρευστού.

Η ανωστική φλέβα κατά την εκροή της διαθέτει μία αρχική ποσότητα κίνησης (λόγω αρχικής ταχύτητας παροχέτευσης), ενώ δέχεται και ανωστικές δυνάμεις (λόγω αρχικής διαφοράς πυκνότητας). Όταν οι ανωστικές δυνάμεις έχουν την ίδια κατεύθυνση με την κατακόρυφη συνιστώσα της αρχικής ποσότητας κίνησης, τότε η φλέβα χαρακτηρίζεται από θετική άνωση, ενώ σε αντίθετη περίπτωση από αρνητική άνωση. Η παροχέτευση των υγρών αποβλήτων γίνεται συνήθως μέσω διαχυτήρων που βρίσκονται στον πυθμένα των αποδεκτών. Συνεπώς,

ελαφρύτερα από τον αποδέκτη απόβλητα οδηγούν στη δημιουργία φλεβών θετικής άνωσης, ενώ τα βαρύτερα σε φλέβες αρνητικής άνωσης.

Παρ' όλα αυτά, προκύπτει πολλές φορές η αναγκαιότητα για παροχέτευση των αποβλήτων από την επιφάνεια προς τον πυθμένα του αποδέκτη. Μια τέτοια περίπτωση αποτελούν οι παράκτιες πλατφόρμες εξερεύνησης και εξόρυξης πετρελαίου (βλ. Σχήμα 1.1). Σ' αυτές τις πλατφόρμες το πετρέλαιο διαχωρίζεται από το νερό με το οποίο συνυπάρχει με τη μορφή γαλακτώματος ήδη από το κοίτασμα. Ο διαχωρισμός αυτός, που περιλαμβάνει επίσης άμμο και ακαθαρσίες, είναι αναγκαίος για να μειωθεί το κόστος μεταφοράς καθώς και τα προβλήματα διάβρωσης.



Σχήμα 1.1 Παράκτια πλατφόρμα εξερεύνησης πετρελαίου και συνεπαγόμενες εκροές νερού με προσμείξεις (πηγή: http://qsr2010.ospar.org/en/ch07_01.html).

Το παραγόμενο από τον διαχωρισμό νερό περιέχει μία ευρεία ποικιλία δυσδιάλυτων ανόργανων αλάτων και οργανικών ενώσεων, οι οποίες σε μερικές περιπτώσεις συμβάλλουν στην δημιουργία ρευστού με πυκνότητα δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτήν του θαλάσσιου αποδέκτη, στον οποίο διοχετεύεται (E & P Forum 1994; Furnes 1994). Σε τέτοιες συνθήκες

το παραγόμενο νερό διοχετεύεται στο θαλάσσιο περιβάλλον ως τυρβώδης ανωστική φλέβα θετικής άνωσης, ενώ το σημείο εκροής βρίσκεται είτε πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας είτε ακριβώς κάτω από αυτήν.

1.2 Αντικείμενο της εργασίας

Η ανάπτυξη παράκτιων πλατφορμών εξερεύνησης και εξόρυξης πετρελαίου, έδωσε το κίνητρο για μελέτη και μοντελοποίηση της επίδρασης του πυθμένα στις τυρβώδεις ανωστικές φλέβες του παραγόμενου νερού με προσμείξεις. Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στο φαινόμενο της πρόσκρουσης κατακόρυφης τυρβώδους ανωστικής φλέβας σε οριζόντιο στερεό όριο. Συγκεκριμένα, αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση των αποκλίσεων και διαταράξεων που δημιουργούνται στις κατανομές συγκεντρώσεων μιας κατακόρυφης τυρβώδους φλέβας θετικής άνωσης, όταν η τελευταία διακόπτεται από ένα οριζόντιο στερεό όριο, ενώ το σημείο εκροής της είναι βυθισμένο στον αποδέκτη. Αναμένεται αυτές οι αποκλίσεις να παίξουν σημαντικό ρόλο τόσο στη διάλυση στο κοντινό πεδίο όσο και στη συμπεριφορά του ρεύματος πυκνότητας στο μακρινό πεδίο. Ως κοντινό πεδίο (near field) ορίζεται η περιοχή, η οποία επηρεάζεται από τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας και οι παράμετροί της μπορούν να ελεγχθούν μέσω του σχεδιασμού, ενώ το μακρινό πεδίο (far field) επηρεάζεται αποκλειστικά από τα χαρακτηριστικά του αποδέκτη (Νάνου, 2013). Παρόλο που και τα δύο πεδία είναι ιδιαίτερα κρίσιμα αναφορικά με τις περιβαλλοντικές οχλήσεις που δημιουργούνται, η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση στερεού ορίου στο κοντινό πεδίο καθώς και στην αρχή του μακρινού πεδίου (intermediate field).

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου (Αίθουσα ερευνών Γ. Νουτσόπουλος). Συνολικά διεξήχθησαν 12 πειράματα, τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude ($F_o \approx 23, 17, 11, 3.5$). Χρησιμοποιήθηκαν κυκλικά ακροφύσια για κατακόρυφη διοχέτευση αλατόνευρο διαφόρων πυκνοτήτων σε καθαρό νερό, από την επιφάνεια προς τον πυθμένα, ώστε να προκύψουν κυκλικές ανωστικές φλέβες θετικής άνωσης.

1.3 Διάρθρωση της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια και τρία παραρτήματα. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στα κίνητρα και στην πρακτική αξιοποίηση παρόμοιων ερευνητικών προσπαθειών σχετικών με τις ανωστικές φλέβες, καθώς και μία συνοπτική παρουσίαση των πειραματικών συνθηκών και του αντικειμένου της εργασίας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία διάκριση των ανωστικών φλεβών με κριτήρια όπως η προέλευσή τους και η μηχανική τους συμπεριφορά. Ακολουθεί μία εκτενής παρουσίαση της θεωρίας των ανωστικών φλεβών καθώς και αναφορά σε κρίσιμες παραμέτρους τους όπως η διάλυση. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην παρουσίαση της γενικευμένης θεωρίας των List & Imberger, η οποία χρησιμεύει για την αντιπαραβολή των πειραματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ίδια. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μία εκτενέστερη ανασκόπηση των ερευνητικών εργασιών στο πεδίο των τυρβωδών ανωστικών φλεβών θετικής άνωσης και της επίδρασης του πυθμένα στις τελευταίες.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική διάταξη, στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και τα βοηθητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν.

Ακολούθως, στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά η προετοιμασία και η εκτέλεση για ένα τυπικό πείραμα, καθώς και οι μετρήσεις που διενεργήθηκαν με σκοπό την εκτίμηση των αρχικών συνθηκών του. Δίνονται αναλυτικά αποτελέσματα για την τρίτη αντιπροσωπευτική φάση των πειραμάτων και καταγράφονται οι σχετικές παρατηρήσεις. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθενται διαγράμματα αποτελεσμάτων για όλες τις φάσεις των πειραμάτων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται σχολιασμός των πειραματικών αποτελεσμάτων και καταγράφονται επιπλέον παρατηρήσεις επί αυτών. Παράλληλα γίνεται απόπειρα συσχέτισης μεταξύ διαφόρων αδιαστατοποιημένων μεγεθών και εξαγωγής χρήσιμων σχέσεων. Επίσης, γίνεται αναφορά σε παρόμοιες ερευνητικές προσπάθειες με αφορμή ενδεχόμενες συγκλίσεις ή αποκλίσεις στα αποτελέσματα, καθώς και προσπάθεια θεωρητικής ερμηνείας αυτών.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξε η παρούσα διπλωματική εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές αναφορές της παρούσας εργασίας.

Στο Παράρτημα Α γίνεται αναφορά στις σχέσεις προσδιορισμού της πυκνότητας αλατόνευρου από μετρήσεις συγκέντρωσης και θερμοκρασίας, καθώς και στον τρόπο εξαγωγής τους στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Ηλία Παπακωνσταντή (2009).

Στο Παράρτημα Β δίνονται όλοι οι πίνακες εξαγωγής αδιαστατοποιημένων αξονικών τιμών διάλυσης για τις τέσσερις περιπτώσεις F_0 που εξετάζονται.

Τέλος, στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται όλοι οι πίνακες που αφορούν εγκάρσιες μετρήσεις αλατότητας για τις τέσσερις φάσεις των πειραμάτων.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Οι τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες αποτελούν μία υποκατηγορία των ελεύθερων διατμητικών ροών (free shear flows) (Παπανικολάου, 2009). Προκύπτουν όταν φλέβες ή δέσμες ρευστού εκρέουν από σωλήνα ή διατομή τυχαίας γεωμετρίας και διαχέονται σε ομογενές ή μη ρευστό μεγαλύτερου όγκου. Χαρακτηρίζονται τυρβώδεις, επειδή στο πεδίο ροής τους παρατηρείται χρονική διακύμανση της ταχύτητας και συγκέντρωσης της ουσίας που μεταφέρουν.

Οι εκτοξευόμενες τυρβώδεις φλέβες διακρίνονται ανάλογα με την προέλευσή τους σε:

α) Φυσικές, όπως οι φυσικές υποθαλάσσιες φλέβες του βυθού (sea vents ή black smokers), καθώς και αυτές που προκύπτουν κατά την έκρηξη ηφαιστείων και από άλλες γεωφυσικές ροές.

β) Τεχνητές, όπως για παράδειγμα οι φλέβες καπνού από καμινάδες εργοστασίων, αυτές σε υποθαλάσσιους διαχυτήρες διάθεσης αποβλήτων από μονάδες βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, καυσαέρια από τα προωθητικά και τα καύσιμα των πυραύλων κατά την εκτόξευσή τους, οι «ουρές» των καυσαερίων από τους κινητήρες των αεροσκαφών κ.λ.π.

2.2 Ανωστικές φλέβες

2.2.1 Ορισμοί και διάκριση

Οι βασικές μορφές (τύποι) φλεβών ως προς τη μηχανική τους συμπεριφορά είναι οι παρακάτω:

α) Απλή φλέβα ή φλέβα (jet): Είναι η εκροή ρευστού από ένα στόμιο μέσα σε αποδέκτη με ρευστό της ίδιας πυκνότητας. Χαρακτηρίζεται στην εκροή της από ορμή (ποσότητα κίνησης) και μηδενική διαφορά πυκνότητας.

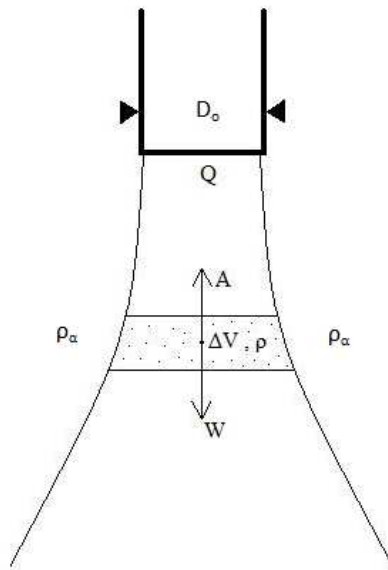
β) Πλούμιο (plume): είναι μια ροή με μηδενική αρχική ορμή, αλλά με πυκνομετρική διαφορά σε σχέση με το περιβάλλον διάθεσης. Η διαφορά πυκνότητας προκαλεί άνωση (θετική ή αρνητική).

γ) Ανωστική φλέβα (buoyant jet): Διαθέτει αρχική ορμή και πυκνομετρική διαφορά σε σχέση με το περιβάλλον ρευστό. Πρόκειται για γενικότερη περίπτωση που περιλαμβάνει ως οριακές περιπτώσεις τις (α) και (β).

Μία ακόμα διάκριση των ανωστικών φλεβών είναι μεταξύ αυτών που είναι θετικής άνωσης και αυτών που χαρακτηρίζονται ως αρνητικής άνωσης. Έστω μία ανωστική φλέβα πυκνότητας ρ , που εκρέει από ακροφύσιο διαμέτρου D_o με παροχή Q και διαχέεται σε αποδέκτη με πυκνότητα ρ_α (βλ. Σχ. 2.1). Αν θεωρήσουμε ότι σε χρονικό διάστημα Δt παροχετεύεται ένας όγκος αναφοράς της φλέβας ΔV , τότε ο όγκος αυτός δέχεται τις εξής δυνάμεις (βλ. Σχ. 2.1): (α) τη δύναμη λόγω αρχικής ποσότητας κίνησης με κατεύθυνση αυτή της αρχικής ταχύτητας, (β) το βάρος W του όγκου αναφοράς της φλέβας και (γ) τη δύναμη A λόγω άνωσης. Η συνισταμένη F του βάρους και της δύναμης λόγω άνωσης έχει μέτρο (θετική κατεύθυνση προς τα πάνω):

$$F = A - W = \rho_\alpha g \Delta V - \rho g \Delta V = g \Delta V (\rho_\alpha - \rho) = g Q \Delta t (\rho_\alpha - \rho) = g (\rho_\alpha - \rho) Q \Delta t \quad (2.1)$$

Η δύναμη F ονομάζεται συνολική ανωστική δύναμη (Παπακωνσταντής, 2009).



Σχήμα 2.1 Όγκος αναφοράς ΔV που παροχετεύεται σε χρόνο Δt με ρυθμό Q .

Συνεπώς για αρχική πυκνότητα της φλέβας ρ_o ($\rho = \rho_o$) (στο σημείο εκροής) διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

α) Για $\rho_\alpha > \rho_o$ προκύπτει $A > W$ και συνεπώς $F > 0$ (φορά προς τα πάνω). Άρα όταν η παροχέτευση γίνεται προς τα πάνω (π.χ. από ακροφύσιο στον πυθμένα της δεξαμενής), η F και η δύναμη λόγω αρχικής ποσότητας κίνησης είναι ομόφορες (θετική άνωση). Αντιθέτως

όταν η παροχέτευση γίνεται προς τα κάτω (όπως στο Σχήμα 2.1) οι δύο αυτές δυνάμεις προκύπτουν αντίφορες (αρνητική άνωση).

β) Για $\rho_a < \rho_o$ προκύπτει $A < W$ και συνεπώς $F < 0$ (φορά προς τα κάτω). Κατ' αντιστοιχία όταν η παροχέτευση γίνεται προς τα πάνω προκύπτει φλέβα αρνητικής άνωσης, ενώ όταν η παροχέτευση γίνεται προς τα κάτω προκύπτει φλέβα θετικής άνωσης.

2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή ανωστικών φλεβών

Τα χαρακτηριστικά και η ρευστοδυναμική συμπεριφορά των εκτοξευόμενων φλεβών εξαρτώνται σύμφωνα με τους Fischer *et al.* από τους παρακάτω παράγοντες:

α) Παράμετροι (χαρακτηριστικά) της φλέβας, όπως η αρχική κατανομή ταχύτητας και ένταση τύρβης της φλέβας, η ογκομετρική παροχή και ορμή της φλέβας, η συγκέντρωση μεταφερόμενων ουσιών όπως θερμοκρασία κ.λ.π.

β) Παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού, όπως η πυκνομετρική διαφορά φλέβας και αποδέκτη, η στρωμάτωση (θερμική ή πυκνομετρική), η κίνηση στον αποδέκτη, το επίπεδο τύρβης του αποδέκτη κ.λ.π.

γ) Γεωμετρικές παράμετροι, όπως ο προσανατολισμός των φλεβών, η αλληλεπίδραση με άλλες φλέβες, το σχήμα του στομίου παροχέτευσης που καθορίζει τη μορφή των φλεβών, καθώς και η επίδραση που έχουν στις φλέβες τα όρια των αποδεκτών.

2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη ανωστικών φλεβών

2.3.1 Παροχή, ορμή και άνωση ανωστικής φλέβας

Σύμφωνα με τους Fischer *et al.* (1979) ορίζονται τρία βασικά μεγέθη που περιγράφουν ικανοποιητικά τις ιδιότητες μιας φλέβας. Τα τρία αυτά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη ροή των ανωστικών φλεβών είναι η ογκομετρική παροχή, η ροή ειδικής (ανά μονάδα μάζας ρέοντος ρευστού) ποσότητα κίνησης και η ροή ειδικής άνωσης, η οποία προκαλείται από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του ρευστού της φλέβας και του ρευστού του αποδέκτη. Οι ορισμοί των βασικών αυτών παραμέτρων της ροής ανωστικών φλεβών δίνονται ως εξής:

α) Η παροχή μάζας της φλέβας ρ_m , είναι η μάζα στη μονάδα του χρόνου που διέρχεται από ένα επίπεδο, κάθετο στη ροή της φλέβας και δίνεται από τη σχέση:

$$\rho m = \int_A \rho u(z, r) dA \quad (2.2)$$

β) Η ροή ορμής της φλέβας ρm ορίζεται ως η ορμή στη μονάδα του χρόνου που διέρχεται από ένα επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση της ροής της φλέβας και δίνεται από τη σχέση:

$$\rho m = \int_A \rho u^2(z, r) dA \quad (2.3)$$

γ) Η ροή άνωσης $\rho \beta$ που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου από ένα επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση ροής της φλέβας δίνεται από τη σχέση:

$$\rho \beta = \int_A \rho g \frac{|\rho - \rho_\alpha|}{\rho_\alpha} u(z, r) dA \quad (2.4)$$

όπου z είναι η απόσταση από την «πηγή» (ακροφύσιο, σωλήνας κ.λ.π), r είναι η εγκάρσια απόσταση από τον άξονα της φλέβας, A είναι το εμβαδόν της διατομής της φλέβας κάθετα στην ροή, u είναι η μέση ταχύτητα της φλέβας (ως προς το χρόνο), ρ είναι η πυκνότητα της φλέβας, ρ_α είναι η πυκνότητα του αποδέκτη, m η ειδική παροχή της φλέβας και β η ροή ειδικής άνωσης.

Αυτές οι ποσότητες διαφοροποιούνται κατά μήκος της φλέβας, καθώς η τελευταία συμπαρασύρει ρευστό του αποδέκτη και οι ταχύτητες μειώνονται (Maclatchy, 1999). Για να μπορέσουμε να προβλέψουμε πως θα συμπεριφερθεί η φλέβα, είναι γενικά βολικό να προσδιορίζουμε αυτές τις ποσότητες κατ' αντιστοιχία με τις αρχικές συνθήκες στην εκροή της φλέβας. Για μία κυκλική ανωστική φλέβα κατά τις αρχικές συνθήκες εκροής της, οι αντίστοιχες κινηματικές ποσότητες των εξισώσεων 2.2, 2.3, 2.4 (δηλαδή διαιρεμένες με την πυκνότητα ρ) έχουν ως εξής:

$$Q_o = \frac{\pi}{4} D_o^2 U_o \quad (2.5)$$

$$M_o = \frac{\pi}{4} D_o^2 U_o^2 \quad (2.6)$$

$$B_o = g \left| \frac{\rho_\alpha - \rho_o}{\rho_\alpha} \right| Q_o \quad (2.7)$$

όπου Q_o η αρχική ογκομετρική παροχή, M_o η αρχική ροή ειδικής ποσότητας κίνησης, B_o η αρχική ροή ειδικής άνωσης, U_o η αρχική μέση ταχύτητα της φλέβας (στην πηγή), D_o η διάμετρος του στομίου παροχέτευσης και ρ_o η πυκνότητα της φλέβας στο σημείο εκροής (αρχική).

2.3.2 Αριθμοί Reynolds και Froude

Για κυκλικό στόμιο παροχέτευσης ορίζεται ο αδιάστατος αριθμός Reynolds στην εκροή (Re_o) ως εξής:

$$Re_o = \frac{U_o D_o}{\nu} \quad (2.8)$$

όπου ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα που θεωρείται πρακτικά σταθερή και στο πεδίο ανάμειξης. Όταν ο Re_o καθώς και οι τοπικοί αριθμοί Reynolds ξεπερνούν την τιμή 2000, τότε η ροή της φλέβας είναι συνήθως τυρβώδης (Fischer *et al.*, 1979). Για πλήρως τυρβώδεις ροές ($Re > 4000$) (Fischer *et al.*, 1979), οι προαναφερθείσες αρχικές παράμετροι (Q_o , M_o , B_o) τείνουν να καθορίζουν πλήρως την συμπεριφορά των ανωστικών φλεβών.

Επίσης, σημαντικές αδιάστατες παράμετροι για τη συμπεριφορά απλών και ανωστικών φλεβών είναι ο αρχικός απλός αριθμός Froude Fr , ο τοπικός πυκνομετρικός αριθμός Froude F και ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude F_o , οι οποίοι ορίζονται ως εξής:

$$Fr = \frac{U_o}{\sqrt{g D_o}} \quad (2.9)$$

$$F = \frac{U}{\sqrt{g' D}} \quad (2.10)$$

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{g'_o D_o}} \quad (2.11)$$

όπου U η μέση τοπική ταχύτητα και D η τοπική διάμετρος της φλέβας. Επίσης g' και g'_o είναι η τοπική και αρχική φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας όπως ορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$g' = g \frac{|\Delta\rho|}{\rho_\alpha} = g \frac{|\rho - \rho_\alpha|}{\rho_\alpha} \quad (2.12)$$

$$g'_o = g \left| \frac{\rho_\alpha - \rho_o}{\rho_\alpha} \right| \quad (2.13)$$

Ο Fr εκφράζει γενικά τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας εξόδου (αρχικής ποσότητας κίνησης) και των διαστάσεων του κυκλικού στομίου παροχέτευσης. Έχει παρατηρηθεί ότι για $Fr < 1$, μπορεί η θύρα εξόδου να μην πληρώνεται τελείως από την διατομή της φλέβας (Maclatchy, 1999). Οι πυκνομετρικοί αριθμοί Froude έχουν παραπλήσιες ιδιότητες με τον Fr αλλά

λαμβάνουν επιπλέον υπόψη τους τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ της φλέβας και του ρευστού του αποδέκτη.

2.3.3 Διαστατική ανάλυση

Η διαστατική ανάλυση (dimensional analysis) είναι μία μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην πειραματική υδραυλική, προκειμένου να αναγνωρίσουμε την τάση (ή εξάρτηση) των εξαρτημένων από τις ανεξάρτητες μεταβλητές ενός προβλήματος ροής. Βασίζεται στην αρχή της διαστατικής ομοιογένειας των εξισώσεων που περιγράφουν κάποιο φυσικό φαινόμενο (Fourier, 1922). Πρακτικά στη μέθοδο αυτή γίνεται εφαρμογή κάποιου θεωρήματος, συνήθως του θεωρήματος Π του Buckingham. Σύμφωνα με το θεώρημα αυτό υπάρχει δυνατότητα όλα τα φυσικά φαινόμενα να περιγραφούν με αδιάστατα μονώνυμα που αποτελούνται από μεταβλητές που τα περιγράφουν, ενώ αν κάποιο φυσικό φαινόμενο διέπεται από n μεταβλητές και εμφανίζονται σ' αυτό m θεμελιώδεις διαστάσεις, τότε υπάρχουν $n - m$ αδιάστατα μονώνυμα που μπορούν το περιγράψουν (Παπανικολάου, 2006). Θεμελιώδεις διαστάσεις στη μηχανική θεωρούνται το μήκος (L), η μάζα (M) και ο χρόνος (T).

2.3.4 Κλίμακες μήκους και αριθμός Richardson

Από τα αρχικά μεγέθη μιας απλής φλέβας (jet), Q_0 και M_0 ορίζεται η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους l_Q , ενδεικτική του μεγέθους της φλέβας, ως εξής (Fischer *et al.*, 1979):

$$l_Q = \frac{Q_0}{\sqrt{M_0}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/2} D_0 = \sqrt{A} \quad (2.14)$$

όπου A είναι το εμβαδόν του στομίου παροχέτευσης. Επίσης, για μια ανωστική φλέβα ορίζεται από τα αρχικά της μεγέθη M_0 , B_0 το χαρακτηριστικό μήκος l_M ως εξής:

$$l_M = \frac{M_0^{3/4}}{B_0^{1/2}} \quad (2.15)$$

Οι κλίμακες μήκους l_Q και l_M είναι χρήσιμες διότι, με εφαρμογή της διαστατικής ανάλυσης, οι παράμετροι της ροής απλών φλεβών και πλουμιών μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των αδιάστατων όρων z / l_Q και z / l_M (βλ. Παρ. 2.4).

Εξαιρετικής σπουδαιότητας είναι και η φυσική σημασία των κλιμάκων l_Q και l_M (Wright (1984), Roberts *et al.* (1997)).

Συγκεκριμένα, έχει βρεθεί με τη μέθοδο της διαστατικής ανάλυσης ότι σε απόσταση από την πηγή $z = l_Q$ η παροχή λόγω συμπαράσυρσης ρευστού του αποδέκτη είναι σχεδόν ίση με την αρχική παροχή Q_o . Για πολύ μεγάλα z ($z / l_Q \gg 1$) η Q_o γίνεται αμελητέα σε σχέση με την παροχή λόγω συμπαράσυρσης, ενώ σε πολύ μικρές αποστάσεις από την πηγή ($z / l_Q \ll 1$) τόσο η Q_o όσο και η γεωμετρία της διατομής του στομίου παροχέτευσης καθίστανται κρίσιμες για τη συμπεριφορά της φλέβας (Παπακωνσταντής, 2009).

Αντίστοιχης βαρύτητας είναι και η επίδραση της κλίμακας l_M . Καθώς η εκτοξευόμενη ανωστική φλέβα διαχέεται στο ρευστό του αποδέκτη αποκτά βαθμιαία ποσότητα κίνησης λόγω θετικής άνωσης. Σύμφωνα με τον Παπακωνσταντή (2009) για απόσταση $z = l_M$ από την πηγή η ποσότητα κίνησης που προκαλείται από την άνωση είναι περίπου ίση με την αρχική M_o . Για $z \gg l_M$ η M_o γίνεται αμελητέα σε σχέση με την ποσότητα κίνησης λόγω άνωσης, ενώ πολύ κοντά στην πηγή ($z / l_M \ll 1$) η συμπεριφορά της φλέβας καθορίζεται από τη M_o .

Επίσης, από τα πειράματα των Paranicolaou & List (1988) προέκυψε ακόμα μία ιδιότητα της κλίμακας l_M . Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2, η αδιαστατοποιημένη μέση αξονική ταχύτητα ανωστικής φλέβας για $z / l_M < 1$ είναι περίπου σταθερή και προκύπτει ροή απλής φλέβας, για $z / l_M > 5$ μπορεί να περιγραφεί από μία απλή συνάρτηση του (z / l_M) και προκύπτει ροή πλουμίου, ενώ για $1 < z / l_M < 5$ δεν μπορεί να περιγραφεί από μία απλή σχέση και προκύπτει ροή ανωστικής φλέβας.

Από τον λόγο των δύο κλιμάκων μήκους ορίζεται ο αρχικός αριθμός Richardson ανωστικής φλέβας Ri_o ως εξής (Fischer *et al.*, 1979):

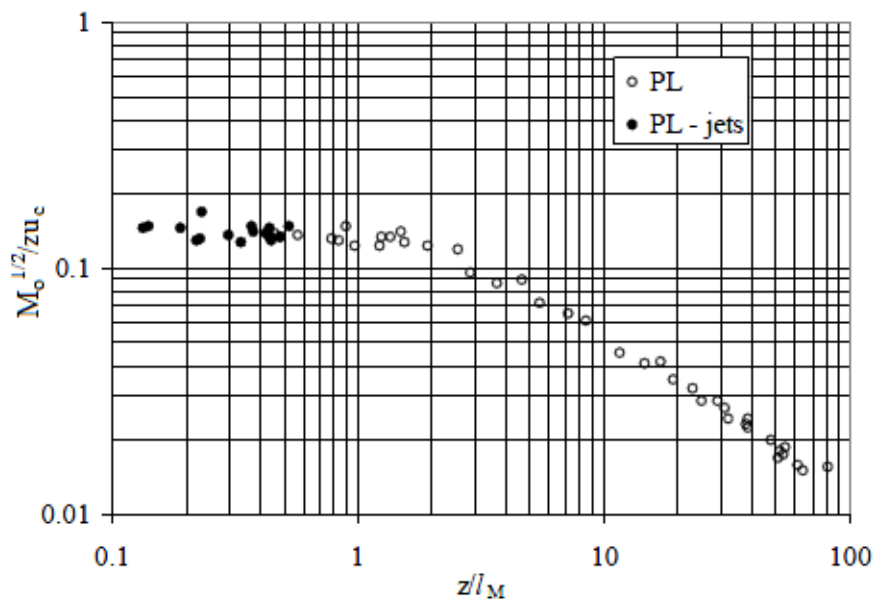
$$Ri_o = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{Q_o B_o^{1/2}}{M_o^{5/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{F_o} \quad (2.16)$$

Αν θέλουμε να υπολογίσουμε τον τοπικό αριθμό Richardson $R(z)$ σε μια απόσταση z από το ακροφύσιο χρησιμοποιούμε τις τοπικές τιμές των αντίστοιχων παραμέτρων:

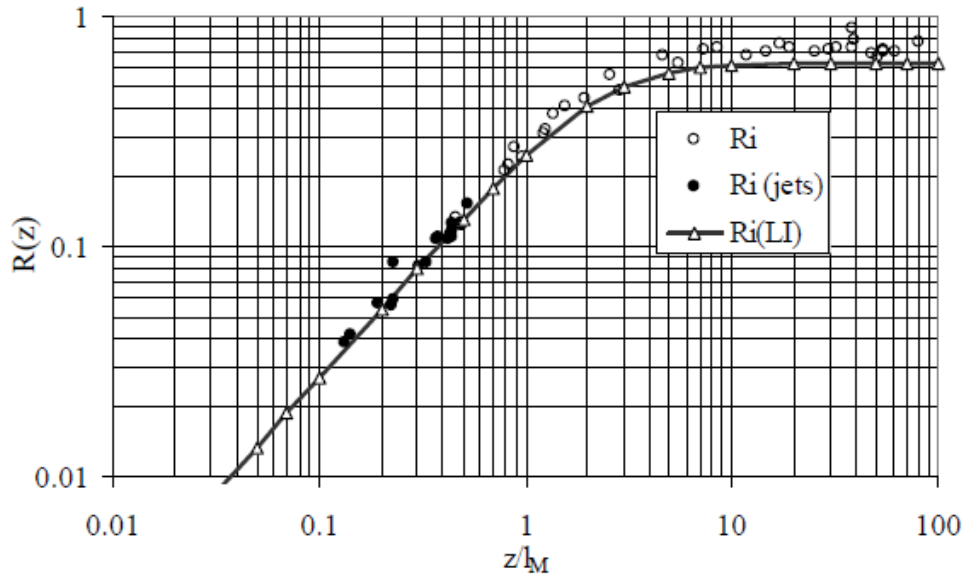
$$R(z) = \frac{\mu(z)\beta(z)^{1/2}}{m(z)^{5/4}} \quad (2.17)$$

Χρήσιμα συμπεράσματα εξάγονται από τον συσχετισμό του $R(z)$ με την αδιάστατη απόσταση z / l_M . Οι Paranicolaou & List (1988), στα πλαίσια των πειραματικών τους μετρήσεων, προσδιόρισαν τον $R(z)$ από μετρήσεις ταχυτήτων και συγκεντρώσεων. Τα αποτελέσματά τους

συνοψίζονται στο Σχήμα 2.3 στο οποίο παρατηρούμε ότι για $z / l_M < 1$ (ροή απλής φλέβας) προκύπτει $R(z) \approx z$, ενώ για $z / l_M > 5$ (ροή πλούμιου) ο $R(z)$ τείνει ασυμπτωτικά σε μια σταθερή τιμή R_p . Μετά από διόρθωση προέκυψε ότι $R_p=0.63$. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν και την ευστάθεια της συμπεριφοράς των φλεβών, καθώς παρατηρούμε ότι μία ανωστική φλέβα με αμελητέα αρχική άνωση B_0 μετατρέπεται σε πλούμιο σε απόσταση z από το σημείο εκροής, μεγαλύτερη από $5l_M$ και όταν ο $R(z)$ έχει λάβει την τιμή $R_p=0.63$ (Παπανικολάου, 2009).



Σχήμα 2.2 Αδιαστατοποιημένη μέση αξονική ταχύτητα ανωστικών φλεβών (u_c : η μέση χρονικά αξονική ταχύτητα της φλέβας) (πηγή: Παπανικολάου, 2009).



Σχήμα 2.3 Τοπικός αριθμός Richardson ανωστικών φλεβών $R(z)$ ως συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης z/l_M (πηγή: Παπανικολάου, 2009).

2.3.5 Διάλυση

Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Εισαγωγή), η διάλυση αποτελεί μία παράμετρο σημαντικής σπουδαιότητας για τις ανωστικές φλέβες, για την οποία επιδιώκεται η μέγιστη δυνατή τιμή κατά το σχεδιασμό τόσο στο κοντινό όσο και στο μακρινό πεδίο.

Σε ένα σημείο του άξονα της ανωστικής φλέβας ορίζεται η διάλυση S_c ως εξής:

$$S_c = \frac{C_o - C_\alpha}{C_c - C_\alpha} \quad (2.18)$$

όπου C_c η μετρημένη τιμή της συγκέντρωσης στο υπόψιν σημείο και C_o , C_α η συγκέντρωση της πηγής και του αποδέκτη αντίστοιχα.

Εγκάρσια στον άξονα της φλέβας ορίζεται η εγκάρσια διάλυση (S) ως εξής:

$$S = \frac{C_c - C_\alpha}{C_m - C_\alpha} \quad (2.19)$$

όπου C_m είναι η μετρημένη τιμή της συγκέντρωσης σε εγκάρσια απόσταση r από τον άξονα της φλέβας και σε ύψος h από τον πυθμένα.

Επίσης, σε μία διατομή της φλέβας σε απόσταση z από την πηγή ορίζεται η μέση διάλυση (S_{ave}):

$$S_{ave} = \frac{\mu(z)}{Q_o} \quad (2.20)$$

Θεωρώντας κανονική κατανομή συγκέντρωσης η S_{ave} μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

$$S_{ave} = 1.7S_c \quad (2.21)$$

Η ολική διάλυση (S_m) μεταξύ του σημείου μέτρησης και της πηγής της φλέβας ορίζεται ως εξής:

$$S_m = \frac{C_o - C_\alpha}{C_m - C_\alpha} \quad (2.22)$$

Τέλος, ορίζεται και η τοπική διάλυση (S_L) μεταξύ σημείου μέτρησης στον πυθμένα, εντός του ρεύματος πυκνότητας, και του σημείου πρόσπτωσης της ανωστικής φλέβας ως εξής:

$$S_L = \frac{C_{imp} - C_\alpha}{C_m - C_\alpha} \quad (2.23)$$

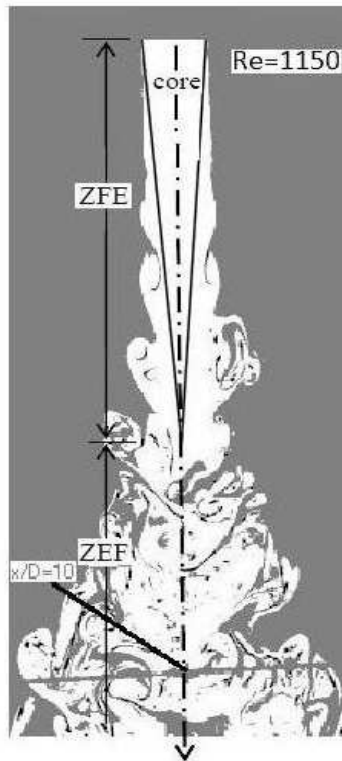
όπου C_{imp} είναι η μετρημένη τιμή της συγκέντρωσης στο σημείο πρόσπτωσης.

2.4 Εμβάθυνση στις τρεις βασικές μορφές φλεβών

2.4.1 Απλή κυκλική φλέβα

Πρόκειται για βυθισμένη φλέβα ρευστού με αρχική ογκομετρική παροχή Q_o , η οποία κατά την εκροή της από το ακροφύσιο διαθέτει μόνον ορμή M_o . Η δε πυκνότητα της φλέβας είναι ίδια με του ρευστού του ακίνητου αποδέκτη, στον οποίο διαχέεται ($\rho = \rho_\alpha$).

Καθώς το ρευστό της φλέβας εκρέει από το ακροφύσιο, στην αρχή αναπτύσσεται στρωτή ροή. Στη συνέχεια, λόγω της επίδρασης της διάτμησης μεταξύ του ρευστού της φλέβας και αυτού του αποδέκτη, εμφανίζονται δακτυλιοειδείς στρόβιλοι (vortex rings) που ζευγαρώνουν (βλ. Σχ. 2.4). Μετά από δύο ζευγαρώματα περίπου η ροή παύει να έχει κανονική μορφή και μεταπίπτει σε τυρβώδη. Αυτό συμβαίνει σε απόσταση περίπου πέντε ή έξι διαμέτρων από το ακροφύσιο, όταν ο Re_o υπερβαίνει την τιμή 2000 (Παπανικολάου, 2009).



Σχήμα 2.4 Τομογραφία απλής φλέβας (πηγή: Παπανικολάου, 2009).

Στην περιοχή ανάμεσα στο ακροφύσιο και το σημείο μετάβασης σε τύρβη, η οποία ονομάζεται περιοχή εγκατάστασης της ροής (zone of flow establishment, ZFE), οι διατμητικές δυνάμεις που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της φλέβας με το ρευστό του αποδέκτη δεν έχουν ακόμα διεισδύσει στον άξονα της φλέβας. Αυτό έχει ως συνέπεια να οριοθετείται μία κωνική επιφάνεια γύρω από τον άξονα της φλέβας, επί της οποίας η ταχύτητα είναι ίση με την αρχική ταχύτητα εξόδου της φλέβας, ενώ εσωτερικά της δημιουργείται ένας πυρήνας (core), στον οποίο η συγκέντρωση της ουσίας που μεταφέρεται από τη φλέβα είναι ίδια με την αρχική συγκέντρωση της φλέβας (βλ. Σχ. 2.4).

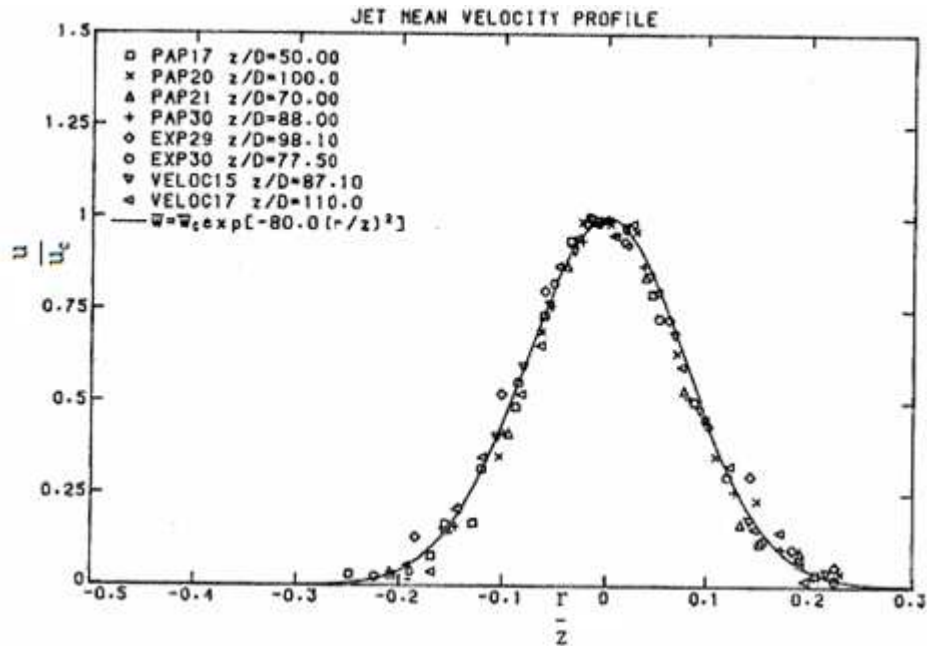
Αντιθέτως, στην περιοχή που εκτείνεται πέρα από το σημείο μετάβασης σε τύρβη, η οποία ονομάζεται περιοχή εγκατεστημένης ροής (zone of established flow, ZEF), η διάτμηση μεταξύ φλέβας και αποδέκτη έχει φτάσει στον άξονα της φλέβας και οι κατανομές της μέσης χρονικά ταχύτητας u και μέσης χρονικά συγκέντρωσης C ακολουθούν κατανομή Gauss. Η μορφή των κατανομών αυτών προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις των Papanicolaou & List, τα αποτελέσματα των οποίων συνοψίζονται στα Σχήματα 2.5 και 2.6.

Επίσης εξάγονται οι ακόλουθες σχέσεις:

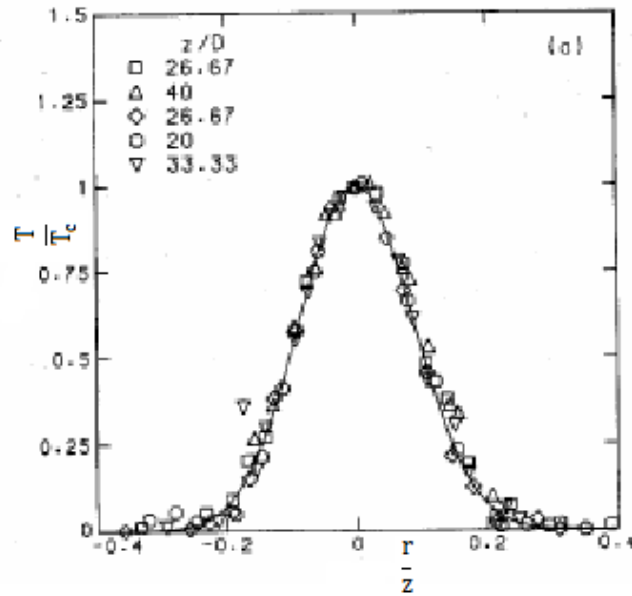
$$u = u_c e^{-r^2/b_w^2} \quad (2.24)$$

$$C = C_c e^{-r^2/b_c^2} \quad (2.25)$$

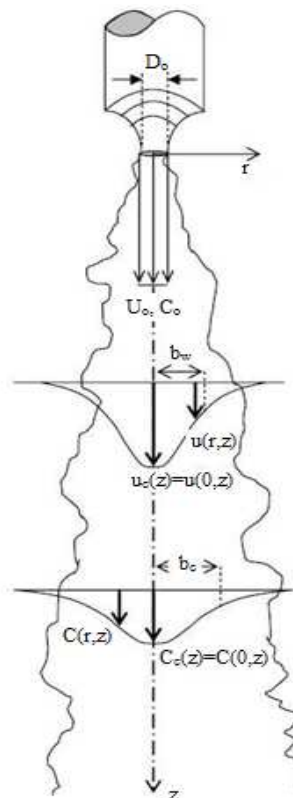
όπου u_c , C_c είναι αντίστοιχα οι μέσες χρονικά τιμές της ταχύτητας και συγκέντρωσης στον άξονα της φλέβας, ενώ b_w , b_c είναι τα πλάτη των προφίλ ταχύτητας και συγκέντρωσης αντίστοιχα (βλ. Σχ. 2.7). Τα πλάτη αυτά ορίζονται ως οι αποστάσεις από τον άξονα της φλέβας, στις οποίες η μέση ταχύτητα και η μέση συγκέντρωση έχουν τις τιμές $1/e$ (όπου $e=2.718\dots$ είναι η βάση των Νεπέριων λογαρίθμων) των u_c , C_c αντίστοιχα.



Σχήμα 2.5 Αδιαστατοποιημένη κατανομή μέσης ταχύτητας (Paranicolaou, 1984).



Σχήμα 2.6 Αδιαστατοποιημένη κατανομή μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς (αντίστοιχα μέσης συγκέντρωσης σε απλή φλέβα) (Papanicolaou & List, 1987).



Σχήμα 2.7 Πλάτος προφίλ ταχύτητας b_w και πλάτος προφίλ συγκέντρωσης b_c κατακόρυφης απλής φλέβας με μέση ταχύτητα εκροής U_0 και μέση συγκέντρωση εκροής C_0 (πηγή: Παπανικολάου, 2009).

Σε μια απλή φλέβα η ποσότητα κίνησης διατηρείται περίπου σταθερή, δηλαδή $M \approx M_0$ και όλες οι μεταβλητές της ροής εξαρτώνται από τα Q_0 , M_0 , z/l_Q (Παπακωνσταντής, 2009). Αξιοποιώντας τη μέθοδο της διαστατικής ανάλυσης, είναι εφικτό μέσω σχετικής διερεύνησης να καταλήξουμε σε μια σειρά σχέσεων μεταξύ των χαρακτηριστικών μεγεθών της απλής φλέβας, στις οποίες παρεμβάλλονται μια σειρά αντίστοιχες σταθερές. Ορισμένοι ερευνητές (Fischer et al., Chen & Rodi, Papanicolaou & List, Wang & Law), κατέληξαν μέσα από τις εργασίες τους και την πειραματική έρευνα σε συγκεκριμένες τιμές σχετικά με τις σταθερές της μεθόδου. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές που προτείνουν οι Fischer et al. (1979) για κυκλικές απλές φλέβες:

$$\mu = 0.25 \frac{z}{l_Q} Q_0 \quad (2.26)$$

$$u_c = 7 \frac{l_Q}{z} U_0 \quad (2.27)$$

$$C_c = 5.6 \frac{l_Q}{z} C_0 \quad (2.28)$$

$$\frac{b_w}{z} = 0.107 \quad (2.29)$$

$$\frac{b_c}{z} = 0.127 \quad (2.30)$$

Από τις σχέσεις 2.2 και 2.24 μπορούμε να υπολογίσουμε την ογκομετρική παροχή $\mu(z)$ κυκλικής απλής φλέβας σε κάθε διατομή που βρίσκεται σε απόσταση z από την πηγή ως εξής:

$$\mu(z) = \int_A u dA = \int_0^\infty u_c e^{-r^2/b_w^2} 2\pi r dr = \pi u_c b_w^2 \quad (2.31)$$

Επίσης, από τις σχέσεις 2.3 και 2.24 προκύπτει η ορμή $m(z)$ για κάθε διατομή κυκλικής απλής φλέβας:

$$m(z) = \int_A u^2 dA = \int_0^\infty u_c^2 e^{-2r^2/b_w^2} 2\pi r dr = \frac{\pi u_c^2 b_w^2}{2} \quad (2.32)$$

2.4.2 Πλούμιο

Πλούμιο ονομάζεται η απλή ανωστική φλέβα, δηλαδή η φλέβα που δεν διαθέτει αρχική ταχύτητα U_0 και συνεπώς αρχική ποσότητα κίνησης M_0 , αλλά μόνο διαφορά πυκνότητας με

το ρευστό του αποδέκτη. Αποτέλεσμα της διαφοράς πυκνότητας είναι να αποκτά η φλέβα αρχική ειδική (κινηματική) άνωση B_0 όπως αυτή ορίστηκε από την εξίσωση 2.7 (βλ. Παρ. 2.3.1). Για μία πλήρως ανωστική φλέβα γίνεται η παραδοχή ότι η B_0 παραμένει σταθερή με την απόσταση z από την πηγή ($B(z)=B_0$) (Παπανικολάου, 2009).

Σύμφωνα με τις μετρήσεις των Papanicolaou & List (1988), τα αποτελέσματα των οποίων απεικονίζονται στο Σχήμα 2.8, οι μέσες χρονικά τιμές της ταχύτητας και συγκέντρωσης των πλουμίων ακολουθούν επίσης κανονική κατανομή και προκύπτουν από τις σχέσεις (2.24) και (2.25).

Επίσης οι Fischer *et al.* μέσα από τις εργασίες τους και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της διαστατικής ανάλυσης κατέληξαν σε μια σειρά σχέσεις για τα κυριότερα μεγέθη που διέπουν τη ροή των πλουμίων:

$$\mu = 0.15 B_0^{1/3} z^{5/3} \quad (2.33)$$

$$u_c = 4.7 B_0^{1/3} z^{-1/3} \quad (2.34)$$

$$C_c = 9.1 Q_0 C_0 B_0^{-1/3} z^{-5/3} \quad (2.35)$$

$$\frac{b_w}{z} = 0.10 \quad (2.36)$$

$$\frac{b_c}{z} = 0.12 \quad (2.37)$$

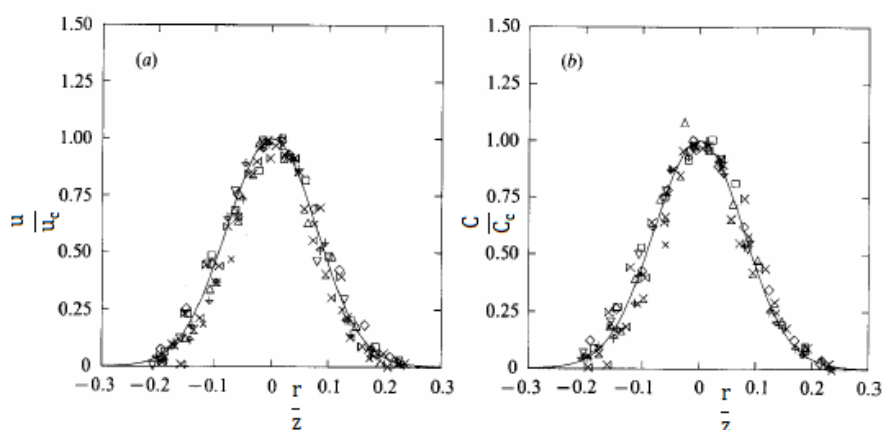


FIGURE 7. Non-dimensional (a) mean velocity and (b) mean concentration profile across a turbulent plume z/z_M : X, 8.58; †, 11.77; □, 14.80; ‡, 17.02; ◇, 29.30; ⋈, 32.38; △, 38.26; ⋈, 47.98; ▽, 54.71; X, 61.87.

Σχήμα 2.8 Αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά ταχύτητας και συγκέντρωσης σε πλούμια (Papanicolaou & List, 1988).

2.4.3 Τυρβώδης Ανωστική Φλέβα

Οι δύο απλές μορφές φλεβών που αναλύθηκαν προηγουμένα (απλή φλέβα, πλούμιο) αποτελούν, όπως προαναφέρθηκε, οριακές καταστάσεις της γενικότερης μορφής στην οποία συναντάται μια φλέβα που περιγράφεται ως τυρβώδης ανωστική φλέβα (buoyant jet). Βασικό χαρακτηριστικό της τυρβώδους ανωστικής φλέβας είναι ότι διαθέτει αρχική ποσότητα κίνησης M_0 καθώς και διαφορά πυκνότητας με το ρευστό του αποδέκτη που προκαλεί άνοση B_0 στην πηγή. Όταν η M_0 είναι επικρατέστερη τότε η φλέβα αρχικά συμπεριφέρεται σαν απλή κατόπιν δε σε κάποια απόσταση από την πηγή μετατρέπεται σε πλούμιο (Παπανικολάου, 2009). Ενδεικτική για τη συμπεριφορά της φλέβας είναι η κλίμακα μήκους l_M (βλ. Παρ. 2.3.4).

Για μία ανωστική φλέβα ορίζεται ο λόγος $\lambda = b_c/b_w$ των πλατών της φλέβας (βλ. Παρ. 2.4.1). Επίσης, στη ζώνη της εγκατεστημένης ροής μιας ανωστικής φλέβας, η μέση χρονικά ταχύτητα u και η μέση χρονικά συγκέντρωση C ακολουθούν κατανομή Gauss (Παπακωνσταντής, 2009) και δίνονται ομοίως από τις σχέσεις (2.24) και (2.25). Κατανομή Gauss ακολουθεί και η φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας g' , για την οποία ισχύει:

$$g' = g'_c e^{-r^2/b_c^2} \quad (2.38)$$

όπου:

$$g' = g \frac{\rho_a - \rho}{\rho_o} \quad (2.39)$$

$$g'_c = g \frac{\rho_a - \rho_c}{\rho_o} \quad (2.40)$$

ρ είναι η μέση χρονικά πυκνότητα της φλέβας, και ρ_c η μέση χρονικά αξονική πυκνότητα της φλέβας. Τέλος, από παρατηρήσεις σε φλέβες θετικής άνωσης έχουν προκύψει οι εξής σχέσεις για τα τοπικά μεγέθη των τυρβωδών ανωστικών φλεβών (Παπακωνσταντής, 2009):

$$\mu = \pi b_w^2 u_c \quad (2.41)$$

$$m = \frac{\pi}{2} b_w^2 u_c^2 \quad (2.42)$$

$$\beta = \pi \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} g'_c b_w^2 u_c = \frac{\lambda^2}{\lambda^2 + 1} g'_c \mu \quad (2.43)$$

2.5 Γενικευμένη θεωρία των List & Imberger

Για τον υπολογισμό απλών φλεβών και πλουμιών μπορούμε να κάνουμε χρήση των σχέσεων (2.26) έως (2.30) και (2.33) έως (2.37) αντίστοιχα. Όταν όμως πρόκειται για τυρβώδεις ανωστικές φλέβες που διαθέτουν M_o και B_o , τότε η κατάσταση περιπλέκεται αρκετά. Οι List & Imberger (1973) ανέπτυξαν μία γενικευμένη θεωρία για τον υπολογισμό των τυρβωδών ανωστικών φλεβών, η οποία ως τέτοια μπορεί να αξιοποιηθεί και στην περίπτωση των απλών φλεβών και πλουμιών. Με βάση τη θεωρία αυτή είναι δυνατός ο υπολογισμός της ογκομετρικής παροχής και ορμής σε οποιαδήποτε απόσταση z από το σημείο εκροής, αν είναι γνωστές οι αρχικές παράμετροι της ροής.

Οι List & Imberger βασίστηκαν στην ασυμπτωτική θεωρία και αξιοποιώντας το εργαλείο της διαστατικής ανάλυσης κατάφεραν να εκφράσουν τον τοπικό αριθμό Richardson $R(z)$ μιας ανωστικής φλέβας ως συνάρτηση των z , Ri_o , R_p καθώς και μιας σταθεράς παραμέτρου C_p . Η σταθερά C_p αποτελεί μία έκφραση του πλάτους της φλέβας και εκτιμήθηκε πειραματικά από τους Papanicolaou & List (1988) ως $C_p=0.27$ με βάση τη σχέση:

$$C_p = \frac{\mu}{z\sqrt{m}} = \sqrt{2\pi} \frac{b_w}{z} \quad (2.44)$$

Επίσης, από τις αρχικές παραμέτρους της ροής ορίζεται η απόσταση του νοητού κέντρου (virtual origin) z_o της φλέβας:

$$z_o = \frac{Q_o}{C_p\sqrt{M_o}} = \frac{l_Q}{C_p} = 3.7 l_Q = 3.28D_o \quad (2.45)$$

Οπότε ο $R(z)$ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\frac{R(z)}{R_p} = \left(\frac{z}{z_o}\right) \left(\frac{Ri_o}{R_p}\right) \left\{ 1 + \left(\frac{Ri_o}{R_p}\right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o}\right)^2 - 1 \right] \right\}^{-1/2} ; \frac{z}{z_o} \frac{Ri_o}{R_p} = \frac{z}{l_M} \frac{C_p}{R_p} \quad (2.46)$$

Από την εξίσωση (2.46) επιβεβαιώνεται ο γενικευμένος χαρακτήρας της θεωρίας List & Imberger. Συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι για $Ri_o \rightarrow 0$ (απλή φλέβα) προκύπτει $R(z) \approx z$, ενώ για $Ri_o \rightarrow R_p$ προκύπτει $R(z) = R_p$, οπότε επαληθεύονται τα συμπεράσματα της Παραγράφου 2.3.4.

Σύμφωνα με τους Fischer *et al.* (1979), οι εξισώσεις κίνησης μιας ανωστικής φλέβας σε απόσταση z από την πηγή προκύπτουν ως εξής:

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{d\mu}{dz} = 2 \sqrt{2\pi} \alpha m^{1/2} \quad (2.47)$$

όπου α ο συντελεστής συμπαράσυρσης του περιβάλλοντος ρευστού (Taylor, 1958).

Εξίσωση ποσότητας κίνησης:

$$\frac{dm}{dz} = \frac{1 + \lambda^2 \mu\beta}{2} \frac{\mu\beta}{m} \quad (2.48)$$

Εξίσωση διατήρησης της άνωσης:

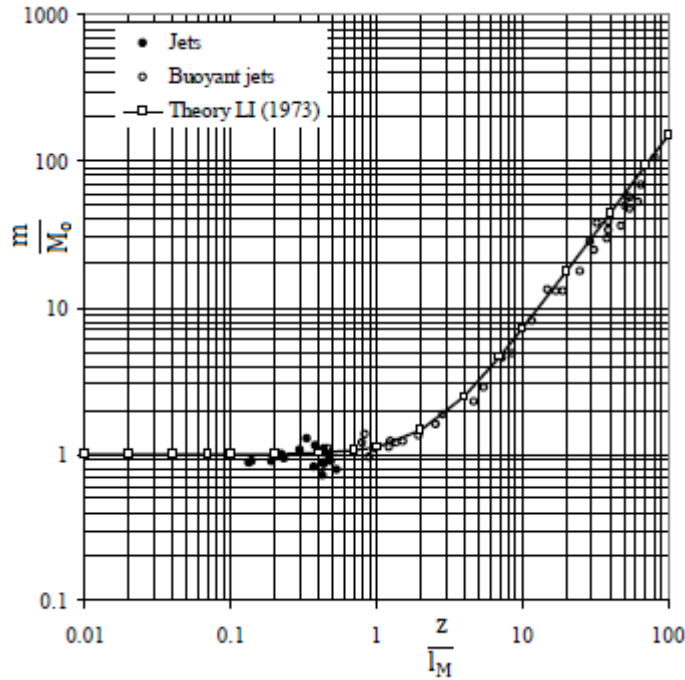
$$\frac{d\beta}{dz} = 0 \quad (2.49)$$

Από τη σχέση (2.46) και το σύστημα των εξισώσεων (2.47), (2.48), (2.49) προέκυψε μετά από πράξεις ότι η ποσότητα κίνησης $m(z)$ (λαμβάνοντας υπόψη κατανομή ταχύτητας μέσης ροής και αμελώντας τη συνεισφορά της τύρβης), καθώς και η ογκομετρική παροχή $\mu(z)$ της φλέβας μπορούν να υπολογιστούν απ' ευθείας από τις ακόλουθες σχέσεις (Παπανικολάου, 2009):

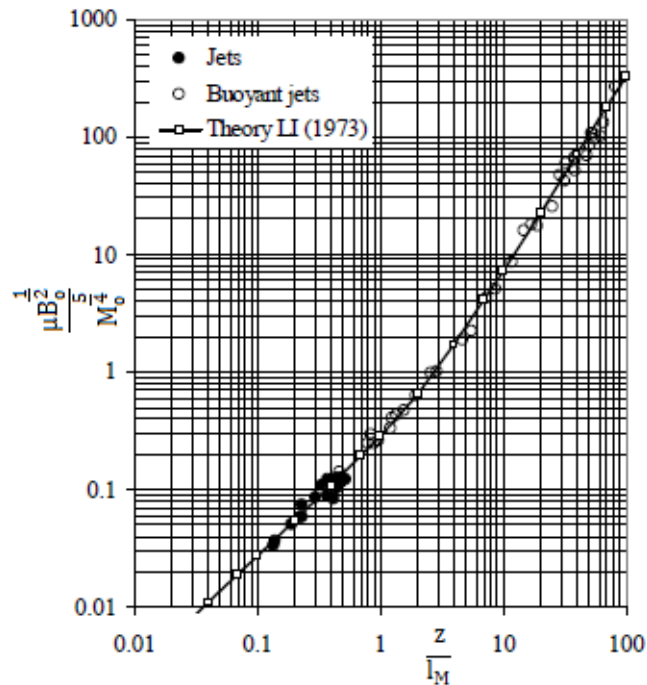
$$\frac{m}{M_o} = \left\{ 1 + \left(\frac{Ri_o}{R_p} \right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{2/3} \quad (2.50)$$

$$\frac{\mu}{Q_o} = \frac{z}{z_o} \left\{ 1 + \left(\frac{Ri_o}{R_p} \right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/3} \quad (2.51)$$

Στα Σχήματα 2.9 και 2.10 που ακολουθούν απεικονίζονται συγχρόνως τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων των Papanicolaou & List (1988), καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη γενικευμένη θεωρία για την αδιάστατη ποσότητα κίνησης και την αδιάστατη ογκομετρική παροχή αντίστοιχα, ως συναρτήσεις της απόστασης z/l_M από την πηγή. Όπως διαπιστώνουμε παρατηρείται αξιοσημείωτη σύμπτωση των δύο προσεγγίσεων:



Σχήμα 2.9 Αντιπαραβολή προσεγγίσεων της γενικευμένης θεωρίας List & Imberger (1973) με τις πειραματικές μετρήσεις των Papanicolaou & List (1988) για την αδιάστατη ποσότητα κίνησης (πηγή: Παπανικολάου, 2009).



Σχήμα 2.10 Αντιπαραβολή προσεγγίσεων της γενικευμένης θεωρίας List & Imberger (1973) με τις πειραματικές μετρήσεις των Papanicolaou & List (1988) για την αδιάστατη ογκομετρική παροχή (πηγή: Παπανικολάου, 2009).

2.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το επιστημονικό πεδίο των τυρβωδών ανωστικών φλεβών περιλαμβάνει μία ευρύτατη ποικιλία συνθηκών προς έρευνα, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται με τη φύση του αποδέκτη (ομογενής ή στρωματωμένος πυκνομετρικά, περιορισμένος ή μη πλευρικά, στάσιμος ή κινούμενος), τη φύση και τη μηχανική της φλέβας (απλή ή πλούμιο), τον προσανατολισμό της, το σχήμα του στομίου παροχέτευσης κ.α. Οι List & Imberger (1973) παρουσίασαν αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού όλων των χαρακτηριστικών παραμέτρων μιας φλέβας, για κάθε Re_0 . Οι Fischer *et al.* (1979) εξέδωσαν μία ολοκληρωμένη μελέτη για τις ανωστικές φλέβες. Αργότερα, ο Rodi (1982) συνόψισε ένα πλήθος πειραματικών και θεωρητικών εργασιών που σχετίζονταν κυρίως με ελεύθερα εξελισσόμενες φλέβες και πλούμια (List & Rodi, 1982), καθώς και με ανωστικές φλέβες που αλληλεπιδρούν με τα όρια του αποδέκτη (Jirka & Rodi, 1982). Αποτέλεσμα της ερευνητικής προσπάθειας ήταν και η παραγωγή μαθηματικού - αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης ανωστικών ροών με εφαρμογή στις κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες (Hossain & Rodi, 1982).

Ωστόσο, την πλειοψηφία των επιστημονικών εργασιών στο συγκεκριμένο πεδίο κατέχουν οι τυρβώδεις φλέβες θετικής άνωσης, εξαιτίας του μεγάλου εύρους των πρακτικών εφαρμογών τους. Ήδη από το 1975 ο Kotsovinos καταπιάστηκε πειραματικά και θεωρητικά με δισδιάστατες ανωστικές φλέβες, ενώ το 1978 παρουσίασε σχέσεις υπολογισμού της αξονικής συγκέντρωσης σε δισδιάστατες και κυκλικές φλέβες. Οι Noutsopoulos & Yannopoulos (1987) διεξήγαγαν πειράματα για τη μέτρηση της αξονικής ταχύτητας και της κατανομής της συγκέντρωσης σε κατακόρυφες τυρβώδεις ανωστικές φλέβες θετικής άνωσης. Οι θεωρητικές τους υποθέσεις επαληθεύτηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα και κατέληξαν σε αναλυτικές εκφράσεις για τον υπολογισμό της αξονικής ταχύτητας και συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα της φλέβας. Οι Papanicolaou & List (1988) πραγματοποίησαν πειραματικές μετρήσεις σε κατακόρυφες φλέβες θετικής άνωσης με χρήση των τεχνικών LDA (Laser Doppler Anemometer) και LIF (Laser Induced Fluorescence), οι οποίες επέτρεψαν τη λήψη μετρήσεων στην περιοχή μετάβασης της ροής σε πλούμιο, όπου η χρήση κάποιου είδους ανιχνευτή παρουσίαζε δυσκολίες. Με χρήση της διαστατικής ανάλυσης προέκυψαν αδιαστατοποιημένες σχέσεις για τη ροή ποσότητας κίνησης, παροχής και τη μέση διάλυση ως συναρτήσεις της αδιαστατοποιημένης απόστασης από την πηγή. Παρουσιάστηκαν αποτελέσματα για τα χαρακτηριστικά της τύρβης και την περιοχή μετάβασης από απλή φλέβα σε πλούμιο.

Η εργασία των Papanicolaou & List (1988) αφορούσε φλέβες θετικής άνωσης που εξελίσσονται ελεύθερα χωρίς να διακόπτονται από κάποιο όριο του αποδέκτη. Έτσι, αποτέλεσε σημείο αναφοράς και σύγκρισης για τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ώστε να είναι διακριτές οι μεταβολές των χαρακτηριστικών της ροής για την περίπτωση που η κατακόρυφη φλέβα αλληλεπιδρά με οριζόντιο στερεό όριο. Μέχρι στιγμής έχουν δημοσιευθεί ελάχιστες εργασίες που σχετίζονται με την επίδραση του πυθμένα. Αυτές εξετάζουν κυρίως ρεύματα πυκνότητας, τα οποία προκύπτουν μετά την πρόσκρουση της φλέβας στον πυθμένα ακίνητου ομογενούς αποδέκτη (ενδιάμεσο πεδίο).

Οι Cavalletti & Davies (2003) διεξήγαγαν μία σειρά πειραμάτων που αφορούσαν την εκτόξευση τυρβωδών δισδιάστατων φλεβών θετικής άνωσης από την επιφάνεια προς τον πυθμένα ομογενούς και ακίνητου αποδέκτη. Η δεξαμενή των πειραμάτων τους είχε μήκος 3.0 m, πλάτος 0.30 m και βάθος 0.90 m, ενώ η εκτόξευση των φλεβών γινόταν από δισδιάστατη οπή πλάτους 5 mm και μήκους 265 mm. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι από την πρόσκρουση με τον οριζόντιο πυθμένα προκαλείται διαταραχή του πεδίου ταχυτήτων και συγκεντρώσεων της φλέβας, ενώ συγχρόνως προκύπτει ρεύμα πυκνότητας που κινείται οριζόντια, απομακρυνόμενο από το σημείο πρόσκρουσης. Η διαταραχή συνίσταται σε σημαντικές αποκλίσεις των προφίλ ταχυτήτων και συγκεντρώσεων από την κατανομή Gauss καθώς προσεγγίζεται το στερεό όριο, ενώ το πεδίο διαταραχής φαίνεται να εκτείνεται κατακόρυφα σε απόσταση από τον πυθμένα που εξαρτάται από την παράμετρο $F_o^{-4/3}$. Επίσης, δόθηκαν εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού του μέγιστου ύψους που φτάνει η στρώση του υγρού της φλέβας μετά την πρόσκρουσή της με το στερεό όριο, καθώς και για τη μέγιστη οριζόντια ταχύτητα και το πάχος του προκαλούμενου ρεύματος πυκνότητας. Αποδείχθηκε ότι έξω από το ενδιάμεσο πεδίο το αδιαστατοποιημένο πάχος του ρεύματος πυκνότητας εξαρτάται γραμμικά από τον F_o .

Αργότερα, ο Παπακωνσταντής (2009) στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής πραγματοποίησε σειρά πειραμάτων που αφορούσαν την πρόσκρουση κατακορύφων και υπό γωνία φλεβών θετικής άνωσης σε οριζόντιο πυθμένα. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η διερεύνηση της εξάπλωσης των ρευμάτων πυκνότητας που προέκυπταν από την πρόσκρουση των φλεβών για ένα εύρος F_o που κυμαινόταν από 3.0 έως 26.7. Τα πειράματα έλαβαν χώρα στην πειραματική συσκευή που πραγματοποιήθηκαν και τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας (βλ. Κεφ. 3).

Οι Abessi *et al.* (2012) μελέτησαν πειραματικά την οριζόντια εκροή αλατόνευρου σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη από καθαρό νερό, μέσω ενός προεξέχοντος επιφανειακού ορθογωνικού

καναλιού. Η φλέβα αλατόνερου τελικά βυθιζόταν σε κάποια απόσταση από το σημείο εκροής και προσέκρουε στον οριζόντιο πυθμένα της πειραματικής δεξαμενής ως πλούμιο. Οι τροχιές και η γεωμετρία των πλουμίων προσδιορίστηκαν με χρήση ψηφιακής κάμερας, ενώ μετρήσεις συγκεντρώσεων έγιναν με τη βοήθεια ανιχνευτή αγωγιμότητας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ομοιότητες των αδιαστατοποιημένων χαρακτηριστικών των πλουμίων με την περίπτωση βυθισμένων φλεβών αρνητικής άνωσης. Ωστόσο καταγράφηκαν αξιοσημείωτες διαφορές για την περιοχή πριν τη βύθιση της φλέβας. Τελικά, όπως ήταν αναμενόμενο η ολική διάλυση προέκυψε μειωμένη συγκρινόμενη με βυθισμένες εκροές.

Τέλος, οι Nikiforakis *et al.* (2013) διεξήγαγαν μετρήσεις συγκεντρώσεων κατακόρυφα και εγκάρσια στην περιοχή ρευμάτων πυκνότητας, τα οποία προέκυπταν από την πρόσκρουση κατακορύφων τυρβωδών φλεβών θετικής άνωσης σε πυθμένα δεξαμενής με κλίση 5°. Χρησιμοποιήθηκαν κατακόρυφες φλέβες, ώστε να είναι ακριβές το σημείο πρόσκρουσης στον πυθμένα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων ανέδειξαν σημαντικές διακυμάνσεις των συγκεντρώσεων στη γειτονία της πρόσκρουσης, γεγονός που προϋποθέτει υψηλή ένταση τύρβης, ενώ προέκυψαν και αδιαστατοποιημένες συσχετίσεις της διάλυσης με την απόσταση από την πηγή. Σημειώνεται ότι οι μετρήσεις έλαβαν χώρα στην πειραματική συσκευή που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα πειραματική εργασία.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

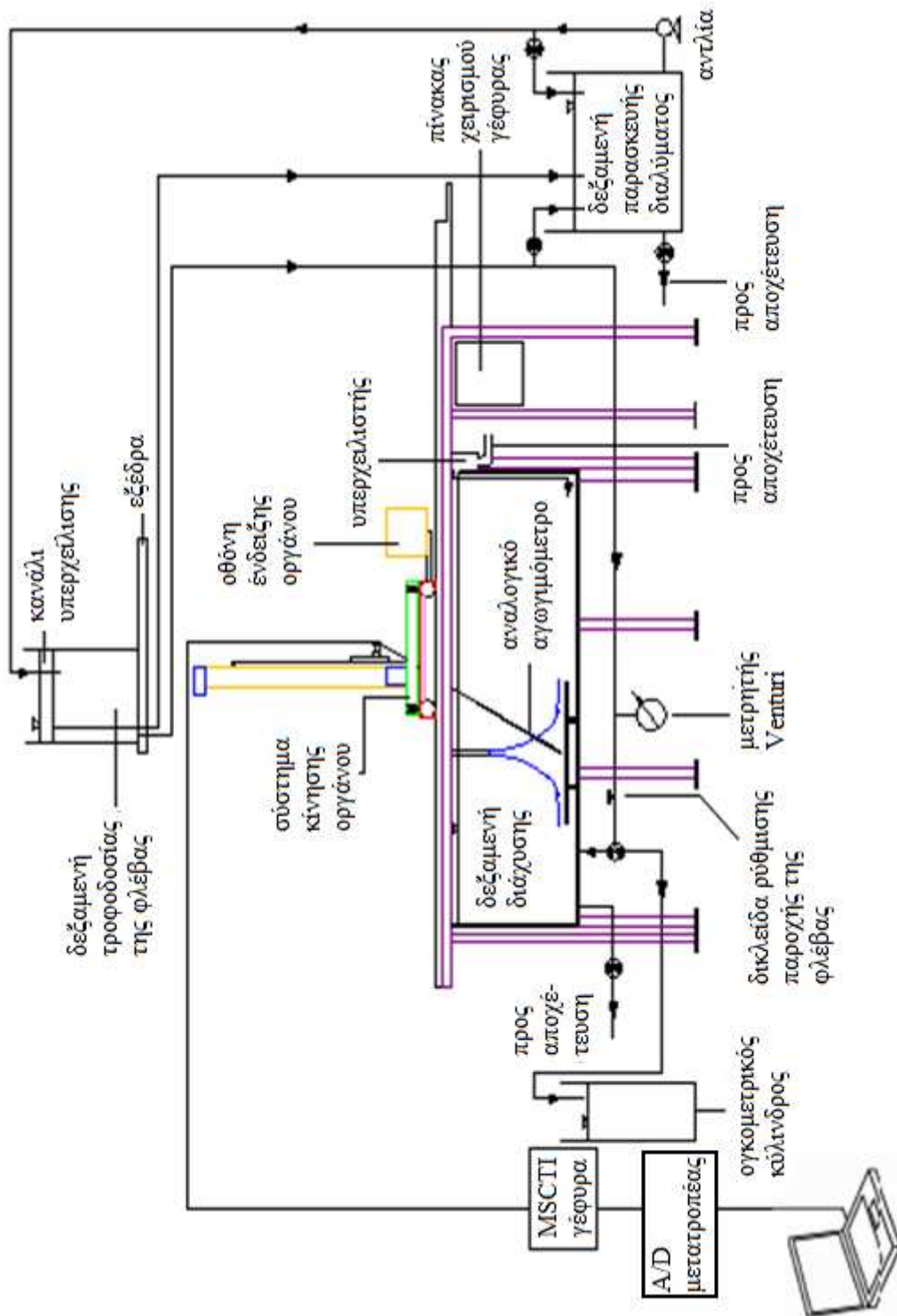
Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται μία γενική άποψη της πειραματικής διάταξης, που περιλαμβάνει τα εξής τμήματα:

- Μία δεξαμενή διάχυσης, στην οποία διεξάγονται τα πειράματα.
- Μία δεξαμενή παρασκευής διαλύματος που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του διαλύματος της φλέβας (χρωματισμένο μείγμα αλατόνερου).
- Μία δεξαμενή τροφοδοσίας τοποθετημένη σε υπερυψωμένη εξέδρα που χρησιμεύει για την τροφοδοσία της φλέβας.
- Ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης και καταγραφής δεδομένων αγωγιμότητας-αλατότητας.
- Στένωση τύπου Venturi σε συνδυασμό με διαφορικό μανόμετρο για τη μέτρηση της παροχής της φλέβας.

Αναλυτική περιγραφή των τμημάτων της πειραματικής διάταξης παρατίθεται παρακάτω, ενώ σχηματική λειτουργία της δίνεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1 Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 3.2 Σχηματική λειτουργία της πειραματικής διάταξης (αναπαραγωγή σχήματος από Παπακωνσταντής (2009) μετά από προσαρμογή).

3.1 Δεξαμενές

3.1.1 Δεξαμενή διάχυσης

Η δεξαμενή διάχυσης είναι κατασκευασμένη από χάλυβα, κρύσταλλο και Plexiglas. Έχει διαστάσεις κάτοψης 3.0 m x 1.5 m ενώ το βάθος της είναι περίπου 0.90 m. Μία από τις δύο μεγάλες πλευρές της δεξαμενής (3.0 x 1.0 m) είναι από κρύσταλλο ώστε να διευκολύνεται η παρατήρηση της φλέβας. Πάνω στο κρύσταλλο έχει χαραχθεί αριθμημένο πλέγμα (βλ. Σχ. 3.3).



Σχήμα 3.3 Πρόσωση της δεξαμενής με προσθήκη του οριζόντιου στερεού ορίου για τις ανάγκες των πειραμάτων.

Ο πυθμένας της δεξαμενής είναι κατασκευασμένος από Plexiglas που έχει βαφτεί σε χρώμα γαλάζιο. Διαθέτει οπή για την εκκένωση της δεξαμενής, από την οποία το νερό μέσω πλαστικού σωλήνα (από PVC) οδηγείται στην αποχέτευση (βλ. Σχ. 3.2). Πάνω στον πυθμένα τοποθετήθηκε βάση με τέσσερις στηρίξεις, επί της οποίας σε ύψος 18 cm από τον πυθμένα ενσωματώθηκε ορθογωνικό τεμάχιο από Plexiglas διαστάσεων 1.05 m x 0.50 m και πάχους 1 cm που χρησίμευσε ως στερεό όριο για την πρόσκρουση της φλέβας (βλ. Σχ. 3.3 & 3.4).

Το ύψος αυτό κρίθηκε επαρκές, μετά από μία σειρά προκαταρκτικών πειραμάτων, ώστε να αποφεύγονται επιδράσεις στη ροή της φλέβας από την αύξηση του πάχους του στρώματος αλατόνευρου που δημιουργείται στον πυθμένα.

Πάνω στο τεμάχιο Plexiglas χαράχθηκε πλέγμα (κάνναβος) με τετράγωνα διαστάσεων 10 cm x 10 cm.

Η δεξαμενή φέρει υπερχειλιστή λεπτής στέψης καθ' όλο το πλάτος της μικρής της πλευράς (βλ. Σχ. 3.2), ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη υπερχείλιση. Η τροφοδοσία της πραγματοποιείται εντός 30 λεπτών μέσω δύο σωλήνων 40mm από το δίκτυο του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής.



Σχήμα 3.4 Άποψη του πυθμένα της δεξαμενής και της κατασκευής που φέρει το οριζόντιο τεμάχιο από Plexiglas (στερεό όριο).

3.1.2 Δεξαμενή παρασκευής διαλύματος

Η δεξαμενή αυτή είναι κατασκευασμένη από πλαστικό και έχει χωρητικότητα 1 m³ (βλ. Σχ. 3.5). Χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του μίγματος αλατόνευρου, με το οποίο τροφοδοτείται η φλέβα. Συγκεκριμένα, στη δεξαμενή αυτή αναμιγνύεται καθαρό νερό από το δίκτυο του εργαστηρίου με μαγειρικό αλάτι, ενώ προστίθεται και μικρή ποσότητα ειδικής βαφής χρώματος μπλε σε μορφή σκόνης. Η ειδική αυτή βαφή μάρκας «PATENT BLUE VOE-131 85» χρησιμεύει για να διακρίνεται η φλέβα από το νερό του αποδέκτη κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Σχήμα 3.5 Δεξαμενή παρασκευής διαλύματος.

3.1.3 Δεξαμενή τροφοδοσίας

Η δεξαμενή αυτή έχει χωρητικότητα 0.3 m^3 . Βρίσκεται τοποθετημένη σε ειδική εξέδρα σε ύψος περίπου 4.5 m (βλ. Σχ. 3.1 & 3.2) και είναι κατασκευασμένη από Plexiglas. Μέσω μιας αντλίας επιτυγχάνεται η τροφοδοσία της με μείγμα αλατόνευρου από τη δεξαμενή παρασκευής. Η ύπαρξη του συστήματος υπερχειλίσης παρέχει τη δυνατότητα για σταθερή στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας στο ύψος της υπερχειλίσης, με αποτέλεσμα η φλέβα να τροφοδοτείται με σταθερή παροχή διαλύματος.

3.2 Σύστημα μέτρησης της αγωγιμότητας

3.2.1 Αναλογικό αγωγιμόμετρο

Για τη λήψη σημειακών μετρήσεων συγκέντρωσης (αλατότητας) χρησιμοποιήθηκε αναλογικό αγωγιμόμετρο της εταιρίας Precision Measurement Engineering (www.pme.com). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο MSCTI (MicroScale Conductivity and Temperature Instrument) (βλ. Σχ. 3.6). Το μοντέλο αυτό σχεδιάστηκε για τη λήψη μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας (conductivity) και θερμοκρασίας (temperature) διαλυμάτων που περιέχουν αγώγιμα ιόντα. Παρέχει δύο αναλογικές εξόδους τάσης, μία γραμμικά ανάλογη στην αγωγιμότητα του διαλύματος και μία μη γραμμικά ανάλογη στη θερμοκρασία του. Το



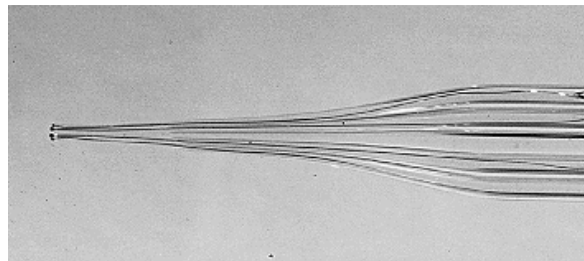
Σχήμα 3.6 Το όργανο μέτρησης της αγωγιμότητας MSCTI της εταιρίας PME (πηγή: www.pme.com).

όργανο έχει χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση τυρβωδών διακυμάνσεων συγκέντρωσης και θερμοκρασίας σε στρωματωμένες ροές καθώς και για την εξαγωγή κατανομών (προφίλ) συγκεντρώσεων (www.pme.com). Έχει παρατηρηθεί ότι η συσχέτιση αγωγιμότητας και αλατότητας είναι αναλογική, ενώ η αλατότητα μπορεί να υπολογιστεί όταν είναι γνωστή η αγωγιμότητα και η θερμοκρασία ενός διαλύματος αλατόνευρου. Οπότε η συσχέτιση τάσης και αλατότητας θα είναι επίσης αναλογική (Παπακωνσταντής, 2009). Αναλυτικά τα επιμέρους τμήματα του οργάνου είναι τα ακόλουθα:

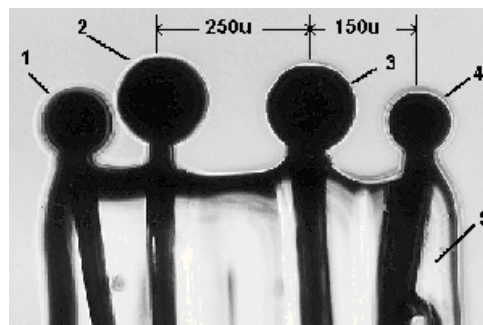
- Ηλεκτρονική γέφυρα (electronic bridge), η οποία παρέχει ενίσχυση των αναλογικών σημάτων τάσης καθώς και δυνατότητα ελέγχου των διαφόρων λειτουργιών του οργάνου. Διαθέτει δύο αναλογικές εξόδους, μία για την αγωγιμότητα (έξοδος C) και μία για τη θερμοκρασία (έξοδος T). Κάθε έξοδος μπορεί να συνδεθεί με συσκευή μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (βλ. Παρ. 3.4.2). Τα πειράματα που έλαβαν χώρα στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιελάμβαναν μετρήσεις μόνο της συγκέντρωσης (αλατότητας) στη ροή φλέβας διαλύματος αλατόνευρου, γι' αυτό χρησιμοποιήθηκε μόνο η έξοδος C.
- Ανιχνευτής-προενισχυτής, ο οποίος αποτελείται από έναν αισθητήρα αγωγιμότητας (Fast Conductivity Sensor) ενσωματωμένο σε έναν άξονα από ανοξείδωτο χάλυβα διαμέτρου 0.25 ιντσών. Ο αισθητήρας αγωγιμότητας (βλ. Σχ. 3.7(α)) είναι σχεδιασμένος ώστε να διενεργεί ταχύτερες και υψηλής ανάλυσης μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού, με συχνότητα δειγματοληψίας έως 800 Hz. Ενδεικτικά, χρησιμοποιείται για την διερεύνηση της τυρβώδους ανάμιξης σε στρωματωμένα υγρά. Αποτελείται από τέσσερα ηλεκτρόδια (βλ. Σχ. 3.7(β)), καθένα

από τα οποία είναι γαλβανισμένο με άμορφη μάζα από πλατίνα και ενισχυμένο με γυαλί. Ο αισθητήρας λειτουργεί με τρόπο ώστε να αποτελεί μία σταθερή σύνδεση μεταξύ του διαλύματος γύρω του και του ηλεκτρικού του κυκλώματος. Το ηλεκτρικό κύκλωμα παρέχει ρεύμα μεταξύ των εσωτερικών ηλεκτροδίων του αισθητήρα και μετρά την τάση που αναπτύσσεται στα εξωτερικά ηλεκτρόδια η οποία αντιστοιχεί στην ηλεκτρική αγωγιμότητα. Σύμφωνα με τα εγχειρίδια χρήσης της εταιρίας, η ακρίβεια μετρήσεων του οργάνου είναι 1%, ενώ ο όγκος της χωρικής ευαισθησίας του αισθητήρα μπορεί να προσεγγιστεί από μία σφαίρα ακτίνας 0.5 mm με κέντρο μεταξύ των εσωτερικών του ηλεκτροδίων.

- Μετασχηματιστής που τροφοδοτεί με ηλεκτρικό ρεύμα την ηλεκτρονική γέφυρα.



(α)



(β)

Σχήμα 3.7 (α) Ο αισθητήρας του οργάνου, (β) λεπτομέρεια των ηλεκτροδίων (πηγή: www.pme.com).

3.2.2 Συσκευή μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό

Ο αισθητήρας αγωγιμότητας συνδέεται με την ηλεκτρονική γέφυρα με ένα καλώδιο μήκους περίπου 10 μέτρων, μέσω σειριακής θύρας που διαθέτει η τελευταία. Μεταβιβάζει σε αυτήν αναλογικό σήμα το οποίο και ενισχύεται. Για να είναι όμως δυνατή η επεξεργασία των δεδομένων που αντιστοιχούν στο αναλογικό σήμα θα πρέπει αυτό να μετατραπεί σε ψηφιακό, δηλαδή να αντιστοιχηθεί σε μετρημένες τιμές τάσης. Συνεπώς, είναι απαραίτητο να υπάρχει

μία συσκευή μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Η συσκευή μετατροπής που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η USB-1608FS της εταιρίας Measurement Computing (βλ. Σχ. 3.8). Σύμφωνα με τα στοιχεία της εταιρείας



Σχήμα 3.8 Συσκευή μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό USB-1608FS (πηγή: www.mccdaq.com).

(www.mccdaq.com) η συσκευή διαθέτει οκτώ απλά αναλογικά κανάλια εισόδου με δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης δεδομένων. Το καθένα από αυτά λειτουργεί με ανάλυση 16-bit και διαθέτει ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (1 A/D converter per input). Αφού το αναλογικό σήμα μετατραπεί σε ψηφιακό, το τελευταίο στέλνεται στον υπολογιστή μέσω θύρας USB. Μέσω της ίδιας θύρας τροφοδοτείται η συσκευή με ηλεκτρικό ρεύμα.

3.2.3 Λογισμικό συλλογής και καταγραφής μετρήσεων

Η συλλογή και καταγραφή των δεδομένων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή έγινε μέσω του προγράμματος Das-Wizard. Με το πρόγραμμα αυτό καθορίζονται τα κανάλια δειγματοληψίας, η συχνότητα και το χρονικό διάστημα δειγματοληψίας. Επίσης, παρέχεται ειδικό πλήκτρο στο πρόγραμμα, ώστε να μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη η στιγμή έναρξης της δειγματοληψίας κατά την εξέλιξη του πειράματος, γεγονός ιδιαίτερα χρήσιμο για τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς ήταν σκόπιμο να ξεκινάει η δειγματοληψία αφότου η φλέβα είχε προσκρούσει στο στερεό όριο. Το λογισμικό Das-Wizard λειτουργεί σε συνδυασμό με το πρόγραμμα Microsoft Excel. Ουσιαστικά, δίνει τη δυνατότητα αποστολής κάθε μετρημένης τιμής σε ένα κελί του Excel. Με αυτόν τον τρόπο

προκύπτει ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής, καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων (Data Acquisition System).

3.2.4 Ανάρτηση και μετακίνηση του ανιχνευτή αγωγιμότητας

Για την ανάρτηση και μετακίνηση του ανιχνευτή αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε ειδική γέφυρα κίνησης, γενική άποψη της οποίας φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Η γέφυρα φέρει κατακόρυφο μεταλλικό υποστύλωμα με ενσωματωμένο μεταλλικό στέλεχος, το οποίο έχει δυνατότητα κίνησης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση z. Από το μεταλλικό αυτό στέλεχος αναρτάται ο ανιχνευτής αγωγιμότητας μέσω κατάλληλων μεταλλικών ελασμάτων και κοχλιών, ώστε να σχηματίζει γωνία 28° με τον κατακόρυφο άξονα z στο επίπεδο x-z (βλ. Σχ. 3.2). Το κατακόρυφο υποστύλωμα είναι στερεωμένο σε επίπεδη βάση πάνω σε ορθογωνικό μεταλλικό πλαίσιο, το οποίο έχει δυνατότητα κίνησης κατά την εγκάρσια διεύθυνση y μέσω ενός συστήματος τροχαλιών και οδηγών τριγωνικής διατομής που είναι τοποθετημένοι σε μεγαλύτερο μεταλλικό πλαίσιο. Το μεγαλύτερο μεταλλικό πλαίσιο με τη σειρά του διαθέτει δυνατότητα μετακίνησης κατά x με παρόμοιο σύστημα τροχαλιών και τριγωνικών οδηγών που βρίσκονται εκτός της δεξαμενής. Έτσι, η γέφυρα παρέχει δυνατότητα μετακίνησης του

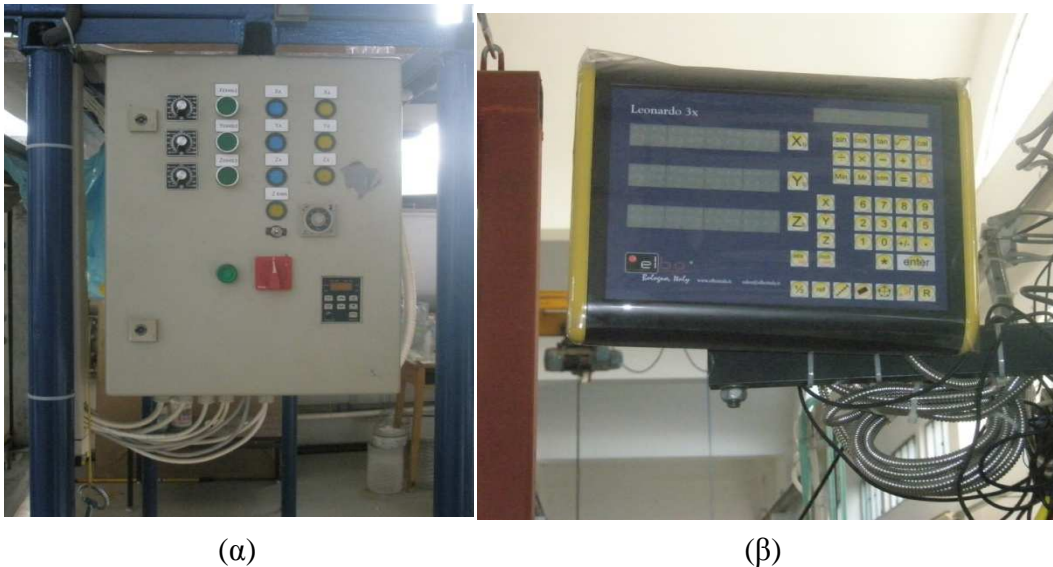


Σχήμα 3.9 Γενική άποψη της γέφυρας κίνησης του οργάνου MSCTI.

ανιχνευτή αγωγιμότητας και κατά τις τρεις διευθύνσεις x, y, z, η οποία υποστηρίζεται ενεργειακά με τη λειτουργία τριών ηλεκτροκινητήρων, έναν για κάθε διεύθυνση κίνησης.

Η μετακίνηση του οργάνου μέτρησης της αγωγιμότητας κατά τις τρεις διευθύνσεις ρυθμίζεται μέσω ειδικού πίνακα χειρισμού, που βρίσκεται τοποθετημένος δίπλα στη δεξαμενή διάχυσης (βλ. Σχ. 3.10(α)). Ουσιαστικά ο πίνακας παρέχει τη δυνατότητα ενεργοποίησης συγκεκριμένου ηλεκτροκινητήρα κάθε φορά, ενώ ο χρήστης μπορεί επιπλέον να καθορίσει την ταχύτητα μετακίνησης του οργάνου για την εκάστοτε διεύθυνση.

Για να είναι γνωστές οι συντεταγμένες θέσης του αισθητήρα αγωγιμότητας κάθε φορά, καθώς και για να υπάρχει η δυνατότητα να μετακινηθεί το όργανο με μεγαλύτερη ακρίβεια, χρησιμοποιήθηκε ειδική ψηφιακή οθόνη (βλ. Σχ. 3.10(β)). Η οθόνη φέρει ειδικά κουμπιά, με τα οποία μπορεί να οριστεί ένα σημείο αναφοράς, και στη συνέχεια σε κάθε μετακίνηση να απεικονίζεται σ' αυτήν η θέση του αισθητήρα αγωγιμότητας σε χιλιοστά με ακρίβεια τριών δεκαδικών ψηφίων.



Σχήμα 3.10 (α) Πίνακας χειρισμού κινούμενης γέφυρας, (β) Ψηφιακή οθόνη ένδειξης συντεταγμένων.

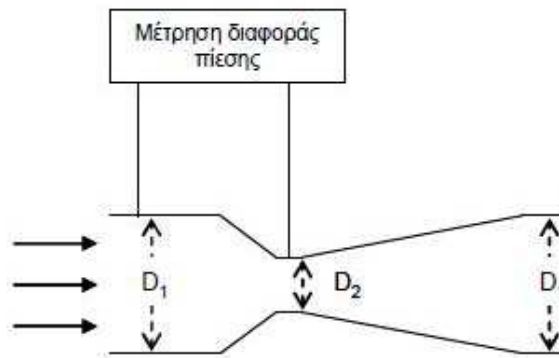
3.3 Σύστημα ρύθμισης και μέτρησης της παροχής

Το διάλυμα μεταφέρεται από τη δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας μέσω ενός χαλκοσωλήνα. Αυτός καταλήγει σε ένα σύστημα με δύο δικλείδες, απ' όπου υπάρχει η δυνατότητα είτε να παροχετευθεί μέσω εύκαμπτου σωλήνα (λάστιχου) σε ορειχάλκινο σωλήνα που τροφοδοτεί τη δεξαμενή διάχυσης (βλ. Παρ. 3.4), είτε να οδηγηθεί πάλι με λάστιχο εκτός δεξαμενής (παρακαμπτήριος γραμμή).

Ανάντη του συστήματος των δύο δικλείδων υπάρχει μία ανοξείδωτη δικλείδα ρύθμισης της παροχής (βλ. Σχ. 3.12), και ανάντη της τελευταίας παρεμβάλλεται στο χαλκοσωλήνα ένας

μετρητής τύπου Venturi. Ο μετρητής Venturi είναι κατασκευασμένος από Plexiglas και αποτελείται από ένα κωνικό τμήμα εισόδου με γωνία περίπου 20° , από ένα κυλινδρικό τμήμα μικρού μήκους και ένα διαχύτη με γωνία κορυφής περίπου 5° (Παπακωνσταντής, 2009). Η μικρή γωνία κορυφής του διαχύτη συμβάλλει στο να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες ενέργειας. Ανάντη και κατάντη του κυλινδρικού τμήματος ο μετρητής συνδέεται με διαφορικό μανόμετρο τετραγλωράνθρακα πυκνότητας ρ_μ (βλ. Σχ. 3.12).

Η αρχή λειτουργίας του μετρητή Venturi συνοψίζεται στα εξής (βλ. Σχ. 3.11): η αρχική διατομή της ροής περιορίζεται με κατασκευαστικό τρόπο (στένωση), έτσι ώστε με βάση την εξίσωση συνέχειας, η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται. Κατά συνέπεια, σύμφωνα με την εξίσωση του Bernoulli η πίεση μειώνεται και η διαφορά πίεσης που προκύπτει αποτυπώνεται στο διαφορικό μανόμετρο.



Σχήμα 3.11 Αρχή λειτουργίας μετρητή Venturi.

Από την εξίσωση συνέχειας μεταξύ των σημείων 1 και 2 προκύπτει:

$$Q_o = A_1 V_{\mu 1} = A_2 V_{\mu 2} \quad (3.1)$$

όπου Q_o η ογκομετρική παροχή του συστήματος, A_1 , A_2 το εμβαδόν των διατομών 1 και 2 αντίστοιχα και $V_{\mu 1}$, $V_{\mu 2}$ οι μέσες ταχύτητες ροής στις διατομές 1 και 2 αντίστοιχα. Με εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ των σημείων 1 και 2 προκύπτει (για οριζόντια συσκευή):

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_{\mu 2}^2}{2\alpha_2} - \frac{V_{\mu 1}^2}{2\alpha_1} + W = 0 \quad (3.2)$$

όπου P_1 , P_2 είναι οι πιέσεις στα σημεία 1, 2 αντίστοιχα και ρ είναι η πυκνότητα του διαλύματος της φλέβας που ρέει στον χαλκοσωλήνα. Το W είναι ο ρυθμός απωλειών ενέργειας ανά μονάδα μάζας λόγω τριβών και τα α_1 , α_2 οι συντελεστές συνόρθωσης της

κινητικής ενέργειας στα σημεία 1 και 2. Οι συντελεστές αυτοί εξαρτώνται από τις κατανομές της ταχύτητας στις αντίστοιχες διατομές. Γενικά ισχύει ότι $\alpha_i > 1$, ενώ στην ιδεατή περίπτωση ομοιόμορφης κατανομής είναι $\alpha_i = 1$ (Νουτσόπουλος & Χριστοδούλου, 1996). Αν Δh είναι η υψομετρική διαφορά που καταγράφεται στο διαφορικό μανόμετρο ισχύει:

$$P_1 - P_2 = g(\rho_\mu - \rho)\Delta h \quad (3.3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.1), (3.2) και (3.3) η ογκομετρική παροχή του συστήματος προκύπτει:

$$Q_o = A_2 \left(\frac{2g(\rho_\mu - \rho)\Delta h/\rho - W}{\frac{1}{\alpha_2} - \frac{A_2^2}{A_1^2 \alpha_1}} \right)^{1/2} \quad (3.4)$$

Αν θεωρήσουμε ότι $W=0$ και $\alpha_1=\alpha_2=1$ προκύπτει η ιδανική παροχή Q_i :

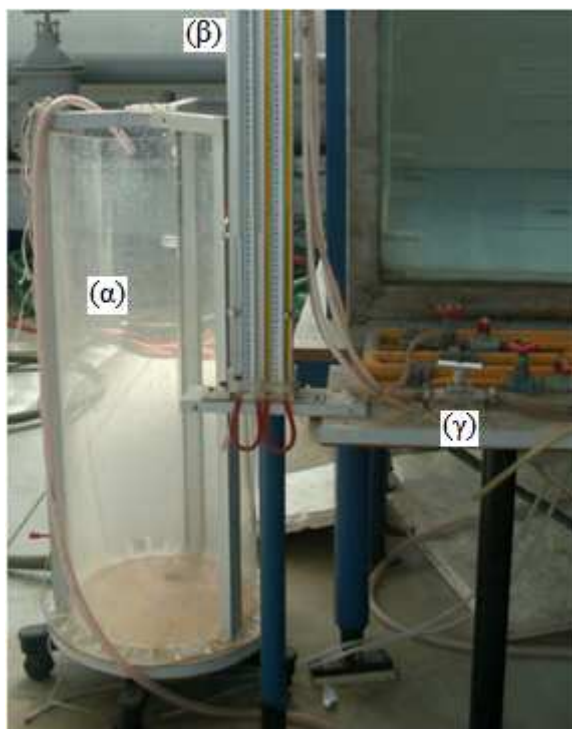
$$Q_i = A_2 \left(\frac{2g(\rho_\mu - \rho)\Delta h/\rho}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}} \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

Η πραγματική παροχή του συστήματος Q_o συνδέεται με την ιδανική μέσω του συντελεστή εκροής C , ο οποίος εξαρτάται από τη γεωμετρία της συσκευής, το λόγο των διαμέτρων D_2/D_1 και τον αριθμό Reynolds (Re) :

$$Q_o = C Q_i \quad (3.6)$$

Ο κατάλληλος τρόπος χρήσης της συσκευής είναι η κατασκευή πειραματικής καμπύλης μεταξύ του C και του Re ή η χρήση της καμπύλης που ενδεχομένως δίνεται από τον κατασκευαστή.

Στην παρούσα πειραματική εργασία η εκτίμηση της Q_o για το κάθε πείραμα γινόταν με τη βοήθεια ενός ογκομετρικού κυλίνδρου (βλ. Σχ. 3.12). Ο ογκομετρικός κύλινδρος έχει διάμετρο $D_c=39$ cm και ενσωματωμένο κατακόρυφο μεταλλικό αριθμημένο κανόνα με υποδιαίρεση χιλιοστού για μέτρηση του ύψους της στάθμης του περιεχόμενου υγρού. Στην Παράγραφο 4.1.3 περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος εκτίμησης της παροχής Q_o .



Σχήμα 3.12 (α) Ο ογκομετρικός κύλινδρος, (β) το διαφορικό μανόμετρο και (γ) η δικλείδα ρύθμισης της παροχής (πηγή: Παπακωνσταντής, 2009).

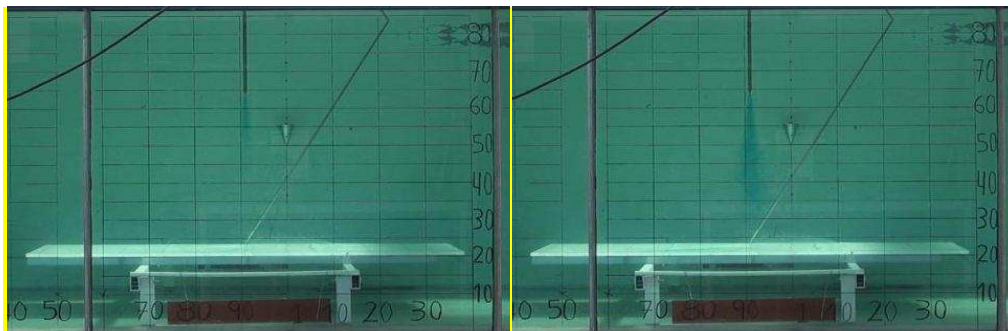
3.4 Σύστημα παροχέτευσης της φλέβας

Για την παροχέτευση της φλέβας χρησιμοποιήθηκαν ορειχάλκινοι σωλήνες εμπορίου καμπτόμενοι κατά ορθή γωνία και στερεωμένοι στην μεγάλη μεταλλική πλευρά της δεξαμενής (βλ. Σχ. 3.13). Όπως προαναφέρθηκε, ο χαλκοσωλήνας, που μεταφέρει το διάλυμα από τη δεξαμενή τροφοδοσίας συνδέεται με εύκαμπτο σωλήνα, ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται με τον ορειχάλκινο σωλήνα που παροχετεύει το ρευστό στη δεξαμενή διάχυσης. Οι ορειχάλκινοι σωλήνες, τριών διαφορετικών διαμέτρων, τοποθετήθηκαν με ακρίβεια ώστε η παροχέτευση να γίνεται απολύτως κατακόρυφα, και το ρευστό της φλέβας να προσκρούει ακριβώς στο κέντρο του καννάβου του οριζοντίου τεμαχίου από Plexiglas. Χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες με εσωτερικές διαμέτρους $D_{εσ}=8\text{mm}$, 10mm και 16mm .

Στο Σχήμα 3.14 δίνονται τέσσερα στιγμιότυπα που περιλαμβάνουν την εκτόξευση της φλέβας από το ορειχάλκινο ακροφύσιο και την πρόσκρουσή της με το οριζόντιο στερεό όριο για ένα τυπικό πείραμα.

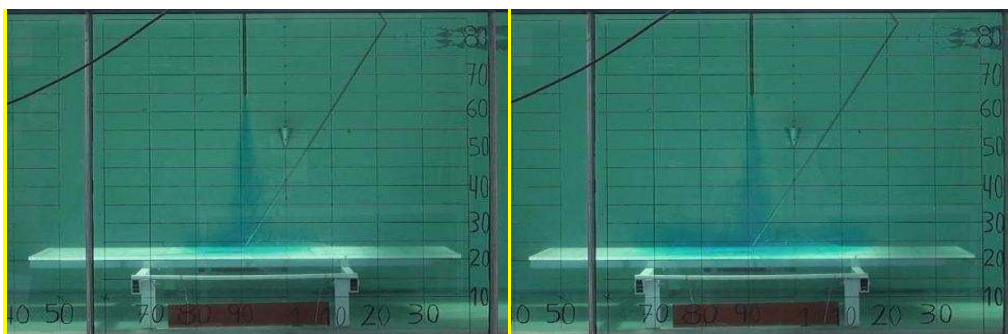


Σχήμα 3.13 Λεπτομέρεια τοποθέτησης και στερέωσης του ορειχάλκινου ακροφυσίου στην μεταλλική μεγάλη πλευρά της δεξαμενής για κατακόρυφη παροχέτευση.



(α) $t = 2 \text{ s}$

(β) $t = 3 \text{ s}$



(γ) $t = 7 \text{ s}$

(δ) $t = 10 \text{ s}$

Σχήμα 3.14 Στιγμιότυπα εκτόξευσης της φλέβας και πρόσκρουσής της με το οριζόντιο στερεό όριο για ένα τυπικό πείραμα.

3.5 Ψηφιακό όργανο μέτρησης αλατότητας-θερμοκρασίας YSI 30

Το φορητό όργανο μέτρησης της αγωγιμότητας, της αλατότητας και της θερμοκρασίας διαλυμάτων νερού YSI 30, βασίζεται στη λειτουργία ενός μικροεπεξεργαστή και διαθέτει ενσωματωμένο πυρήνα τεσσάρων ηλεκτροδίων αγωγιμότητας. Το σώμα του ανιχνευτή, που φέρει τον αισθητήρα του οργάνου, έχει κατασκευαστεί από ανοξείδωτο χάλυβα, ώστε να είναι πιο ανθεκτικό. Το όργανο διαθέτει επίσης μεγάλη ψηφιακή οθόνη υγρών κρυστάλλων (LCD), στην οποία είναι δυνατή η ταυτόχρονη προβολή της θερμοκρασίας σε °C και της αλατότητας σε ppt (parts per thousand) (βλ. Σχ. 3.15). Σπανίως χρειάζεται βαθμονόμηση επειδή αυτή έχει πραγματοποιηθεί εργοστασιακά, αλλά προτείνεται από τον κατασκευαστή να ελέγχεται κατά καιρούς και να γίνονται οι απαραίτητες προσαρμογές. Με τη βύθιση του ανιχνευτή σε διαλύματα αλατόνευρο διαπιστώνεται ότι απαιτείται ένα διάστημα 2-3 sec ώστε να σταθεροποιηθεί η ένδειξη στην οθόνη του οργάνου, γεγονός που καθιστά την απόκρισή του σχετικά αργή και ακατάλληλη για μετρήσεις σε τυρβώδεις ροές.

Η ακρίβεια του οργάνου στη μέτρηση της αλατότητας 0.1 ppt και της θερμοκρασίας είναι 0.1 °C. Επίσης, επειδή από την αλατότητα και τη θερμοκρασία μπορεί να υπολογιστεί η πυκνότητα (βλ. Παράρτημα Α), με το όργανο αυτό προσδιορίζεται η πυκνότητα του διαλύματος της φλέβας και του υγρού του αποδέκτη.



Σχήμα 3.15 Το όργανο μέτρησης της αλατότητας και της θερμοκρασίας YSI 30 (πηγή: <http://www.envco.com.au>).

3.6 Βοηθητικά όργανα

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν κάποια επιπλέον όργανα. Συγκεκριμένα, για την παρασκευή διαλυμάτων προκαθορισμένης αλατότητας, κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης του οργάνου MSCTI, χρησιμοποιήθηκε το πλαστικό δοχείο που φαίνεται στο Σχήμα 3.16(α). Μετά την παρασκευή του κάθε διαλύματος, το δοχείο τοποθετούνταν σε ειδική υποδοχή, η οποία κατασκευάστηκε στη μικρή μεταλλική πλευρά της δεξαμενής (βλ. Σχ. 3.16(β)). Κατόπιν, με τη μετακίνηση του οργάνου MSCTI επιτυγχανόταν η βύθιση του αισθητήρα αγωγιμότητας μέσα στο διάλυμα του δοχείου και έτσι λάμβανε χώρα η διαδικασία της βαθμονόμησης του οργάνου μέτρησης της αγωγιμότητας.

Οι πυκνότητες του διαλύματος της φλέβας και του αποδέκτη προσδιορίστηκαν, πέρα από τη χρήση του YSI 30, και με τη χρήση της ζυγαριάς ακριβείας Kern EMB2200-0 (βλ. Σχ. 3.17(β)) μέσω της ζύγισης δειγμάτων γνωστού όγκου. Ο όγκος των δειγμάτων προσδιορίστηκε με τη χρήση του ογκομετρικού κυλίνδρου του Σχ. 3.17(α).



(α)

(β)

Σχήμα 3.16 (α) Δοχείο παρασκευής διαλυμάτων προκαθορισμένης αλατότητας, (β) υποδοχή δοχείου παρασκευής διαλυμάτων προκαθορισμένης αλατότητας για τη βαθμονόμηση του οργάνου MSCTI.



(α)



(β)

Σχήμα 3.17 (α) Ογκομετρικός κύλινδρος από γυαλί Pyrex χωρητικότητας 1000 ml, (β) Εργαστηριακή ζυγαριά ακριβείας Kern EMB2200-0.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Διεξήχθησαν συνολικά 12 πειράματα σε τέσσερις διαδοχικές φάσεις. Σε κάθε φάση που περιελάμβανε τρία πειράματα προσεγγιζόταν μία ορισμένη τιμή F_o , ενώ έγινε χρήση τριών διαφορετικών διαμέτρων D_o των ακροφυσίων. Στην πρώτη φάση προσεγγίστηκε η τιμή $F_o=23$ για $D_o=0.8$ cm, στη δεύτερη φάση η τιμή $F_o=17$ για $D_o=0.8$ cm, στην τρίτη φάση η τιμή $F_o=3.50$ για $D_o=1.6$ cm, και στην τέταρτη φάση η τιμή $F_o=11$ για $D_o=1.0$ cm.

Στις τέσσερις φάσεις πειραμάτων προέκυπτε και διαφορετική κατακόρυφη απόσταση H του στομίου του ακροφυσίου από το οριζόντιο στερεό όριο, λόγω των διαφορετικών τεμαχίων σωλήνων που χρησιμοποιούνταν. Στις δύο πρώτες φάσεις ($F_o \approx 23$ και $F_o \approx 17$) η απόσταση στομίου-στερεού ορίου ήταν $H=47.9$ cm (ίδιο τεμάχιο), στην τρίτη φάση ($F_o \approx 3.50$) $H=43.1$ cm και στην τέταρτη φάση ($F_o \approx 11$) $H=34.6$ cm.

4.1 Προετοιμασία και εκτέλεση τυπικού πειράματος

Παρακάτω παρατίθενται η προετοιμασία, η εκτέλεση και οι μετρήσεις για ένα τυπικό πείραμα, στο οποίο δόθηκε η ονομασία 29/8/13-EXP1 για λόγους κατηγοριοποίησης. Επίσης παρουσιάζονται οι μετρήσεις αλατότητας που ελήφθησαν για ολόκληρη την αντιπροσωπευτική τρίτη φάση, η οποία περιλαμβάνει τα πειράματα 29/8/13-EXP1, 30/8/13-EXP1 και 30/8/13-EXP2. Αντίστοιχα με τα πειράματα αυτής της φάσης πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις και για τα υπόλοιπα πειράματα.

4.1.1 Προετοιμασία

Αρχικά προετοιμαζόταν το διάλυμα της φλέβας (αλατόνερο) στη δεξαμενή παρασκευής διαλύματος. Συνήθως παρασκευαζόταν διάλυμα περίπου 700lt χρησιμοποιώντας σακίδια μαγειρικού αλάτος των 10 kg. Γινόταν μια εκτίμηση της μάζας αλατιού που χρειαζόταν για την επίτευξη της επιθυμητής αλατότητας c (ppt), η οποία για τις ανάγκες των συγκεκριμένων πειραμάτων επιλέχθηκε να βρίσκεται μεταξύ των τιμών 27.5 ppt και 28.0 ppt. Ακολουθούσε ανάδευση του διαλύματος χειρωνακτικά για μερικά λεπτά, και κατόπιν με χρήση του οργάνου YSI 30 που μετρά την αλατότητα και τη θερμοκρασία εκτιμούνταν αν έχει επιτευχθεί η επιθυμητή αλατότητα. Αν είχε προκύψει αλατότητα μεγαλύτερη ή μικρότερη από την επιθυμητή τότε προσθέτονταν νερό ή μαγειρικό αλάτι αντίστοιχα, ακολουθούσε ανάδευση για μερικά λεπτά και τέλος νέα μέτρηση της αλατότητας με το όργανο YSI 30. Εκτός από την

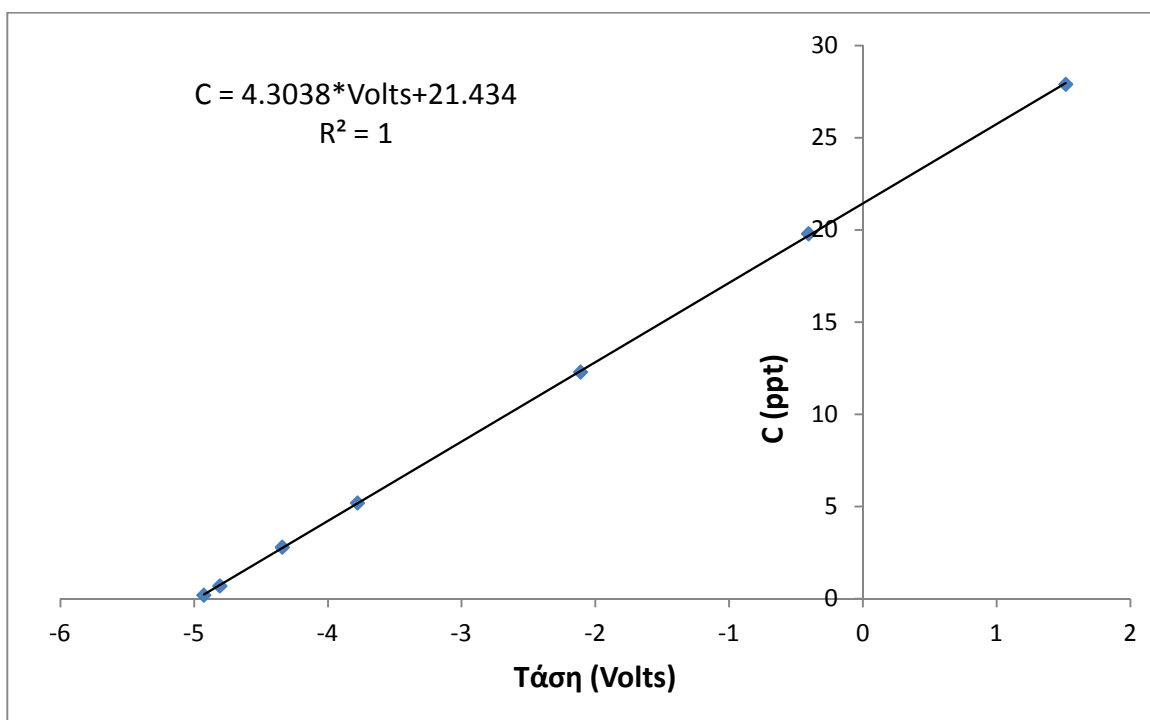
χειρωνακτική ανάδευση με χρήση σιδερένιας βέργας, λάμβανε χώρα και ανάδευση μέσω ανακυκλοφορίας με αντλία (βλ. Σχ. 3.2) που έπαιρνε διάλυμα από τον πυθμένα και το επανέφερε κοντά στην επιφάνεια του διαλύματος. Προκειμένου να μπορεί να παρατηρηθεί η τροχιά της φλέβας, το διάλυμα χρωματιζόταν προσθέτοντας μικρή ποσότητα χρωστικής ουσίας μπλε χρώματος που χρησιμοποιείται για τη βαφή τροφίμων (βλ. Παρ. 3.1.2).

Μετά την ομογενοποίησή του (αποκατάσταση επιθυμητής και ομοιόμορφης αλατότητας) το διάλυμα στέλνονταν στη δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας μέσω της ίδιας αντλίας που χρησιμοποιούνταν για την ανάδυσή του. Όταν γέμιζε η δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας, υπερχείλιζε, και το υπερχείλιζον διάλυμα παροχετευόταν σε ειδικό κανάλι της δεξαμενής και επέστρεφε στη δεξαμενή παρασκευής διαλύματος μέσω σωλήνα. Με τη συνεχή λειτουργία της αντλίας εξασφαλιζόταν ικανοποιητική ανάμιξη του διαλύματος καθώς και σταθερή στάθμη στη δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας πάντα στο ύψος της υπερχείλισης. Μετά από μισή ώρα περίπου λειτουργίας της αντλίας λαμβανόταν μία ακόμα μέτρηση της αλατότητας με χρήση του οργάνου YSI 30. Τέλος, ποσότητα διαλύματος από τη δεξαμενή τροφοδοσίας στέλνονταν μέσω παρακαμπτήριας γραμμής σωληνώσεως (γραμμή bypass) στο δοχείο του Σχήματος 3.16(α), προκειμένου να μετρηθεί η αλατότητα και η θερμοκρασία του μέσω του οργάνου YSI 30. Γινόταν έλεγχος ώστε οι τιμές αλατότητας και θερμοκρασίας της φλέβας να ταυτίζονται με τις αντίστοιχες στη δεξαμενή παρασκευής του διαλύματος. Σε περίπτωση που εμφανίζονταν μικρές διαφορές ανοιγόταν και πάλι η παροχή διαλύματος προς τον παρακαμπτήριο αγωγό (bypass) μέχρι να εκκενωθεί το διάλυμα που είχε μείνει μέσα στις σωληνώσεις και να φτάσει διάλυμα από τη δεξαμενή τροφοδοσίας. Στη συνέχεια ελέγχονταν και πάλι οι τιμές αλατότητας και θερμοκρασίας και αφού διαπιστωνόταν ταύτιση με αυτές στη δεξαμενή παρασκευής διαλύματος ή στη δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας, διακοπτόταν η ροή μέσω ενός διακόπτη (δικλείδας) που μόλις ανοιγόταν διοχέτευε τη φλέβα στη δεξαμενή διάχυσης. Αξίζει να σημειωθεί πως το διάλυμα αλατόνευρο που παρασκευαζόταν αρκούσε για τις ανάγκες 3-4 πειραμάτων περίπου. Οπότε, δεν παρασκευαζόταν νέο διάλυμα για κάθε ξεχωριστό πείραμα, γινόταν όμως κάθε φορά ο έλεγχος ταύτισης αλατότητας και θερμοκρασίας της φλέβας και του υγρού στη δεξαμενή παρασκευής.

4.1.2 Βαθμονόμηση του οργάνου MSCTI

Κατόπιν, πριν την έναρξη του πειράματος, γινόταν βαθμονόμηση (calibration) του οργάνου MSCTI. Λαμβάνονταν οχτώ διαλύματα διαβαθμισμένης αλατότητας C, των οποίων μετρούνταν η συγκέντρωση σε αλάτι με το όργανο YSI 30. Συγκεκριμένα πριν την έναρξη

της βαθμονόμησης παρασκευαζόταν στο δοχείο του Σχ. 3.16(α) ένα διάλυμα με αλατότητα λίγο μεγαλύτερη από τη μέγιστη αλατότητα που αναμενόταν να εμφανιστεί στο πείραμα, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση αλατότητα μεταξύ 27.5 ppt και 28.0 ppt. Στο διάλυμα αυτό καταγραφόταν η ακριβής αλατότητα με χρήση του οργάνου YSI 30. Στη συνέχεια το δοχείο τοποθετούνταν στην υποδοχή του Σχ. 3.16(β), και με μετακίνηση του οργάνου MSCTI επιτυγχανόταν η βύθιση του αισθητήρα αγωγιμότητας μέσα στο διάλυμα του δοχείου. Για 10 δευτερόλεπτα μετρούνταν η αγωγιμότητα με το όργανο MSCTI και λαμβανόταν μια μέση τιμή των καταγραφόμενων τάσεων (σε Volts). Στη συνέχεια το διάλυμα αραιωνόταν διαδοχικά ώστε η αλατότητά του να προσεγγίζει κατά σειρά τις τιμές 20.0 ppt, 12.0 ppt, 6.0 ppt, 2.5 ppt, 1.0 ppt, 0.6 ppt και 0.2 ppt (αλατότητα αποδέκτη). Για καθένα από τα διαδοχικά αραιωμένα διαλύματα επαναλαμβανόταν η ίδια διαδικασία μέτρησης με το όργανο YSI 30 καθώς και καταγραφής και εξαγωγής μέσης χρονικά τάσης με το όργανο MSCTI. Από τα ζεύγη τιμών χαρασσόταν ευθεία με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων μέσω του προγράμματος Microsoft Excel. Έτσι, στη συνέχεια το όργανο MSCTI μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της συγκέντρωσης (αλατότητας), αφού κάθε ένδειξη του οργάνου (τάση σε Volt) αντιστοιχεί σε αλατότητα C μέσω της προσδιορισμένης εξίσωσης της ευθείας. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η ευθεία βαθμονόμησης που αντιστοιχεί στο πείραμα 29/8/13-EXP1. Η ευθεία συσχέτισης θεωρείται έγκυρη σύμφωνα με τον κατασκευαστή για 8 περίπου ώρες.



Σχήμα 4.1 Καμπύλη βαθμονόμησης οργάνου MSCTI για το πείραμα 29/8/13-EXP1.

4.1.3 Εκτέλεση πειράματος

Ενώ η διαδικασία της βαθμονόμησης βρισκόταν σε εξέλιξη, η δεξαμενή διάχυσης γέμιζε με νερό από το δίκτυο του Εργαστηρίου μέσω συστήματος δύο σωλήνων διαμέτρου 40 mm ο καθένας. Παρόλο που υπήρχε η δυνατότητα πλήρωσης της δεξαμενής σε περίπου 30 λεπτά, εντούτοις κρίθηκε σκόπιμο να μην ανοιχθεί πολύ η δικλείδα παροχής νερού, διότι θα χρειαζόταν έπειτα πολύ περισσότερος χρόνος για να ηρεμήσει το υγρό στην πληρωμένη πλέον δεξαμενή, ώστε να ξεκινήσει το πείραμα.

Μόλις υπερχείλιζε η δεξαμενή μέσω του συστήματος υπερχείλισης, κλείναμε τη δικλείδα παροχής της. Ακολουθούσε αναμονή περίπου μισής ώρας ώστε να ηρεμήσει σχετικά το νερό της δεξαμενής και έπειτα το όργανο MSCTI βυθιζόταν αργά στο υγρό του αποδέκτη, ώστε να αποφευχθεί περίπτωση βλάβης του. Το όργανο MSCTI τοποθετούνταν με τέτοιο τρόπο ώστε η αιχμή του αισθητήρα αγωγιμότητάς του να εφάπτεται στο πρώτο σημείο μέτρησης συγκέντρωσης (αγωγιμότητας) του πειράματος. Έπειτα καθοριζόταν η παροχή της φλέβας ανοίγοντας τη δικλείδα τροφοδοσίας της φλέβας και ρυθμίζοντάς την έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή υψομετρική διαφορά Δh στο διαφορικό μανόμετρο.

Στη συνέχεια το υγρό της δεξαμενής διάχυσης ανακατευόταν ελαφρά και προσεκτικά, ώστε να αναμιχθεί με τη μικρή ποσότητα διαλύματος που είχε εισαχθεί λόγω ρύθμισης της παροχής. Λόγω των επιμέρους διαταράξεων που δημιουργούνται, ακολουθούσε ένα χρονικό διάστημα μίας ώρας για να ηρεμήσει πλήρως το υγρό της δεξαμενής και να ξεκινήσει το πείραμα.

Ακολούθως ανοιγόταν η δικλείδα τροφοδοσίας της φλέβας και ξεκινούσε το πείραμα. Ελεγχόταν η υψομετρική διαφορά στο μανόμετρο και καταγραφόταν η σχετική ένδειξη. Σε κάθε σημείο το όργανο MSCTI έπαιρνε ενδείξεις επί 30 sec με συχνότητα 100 Hz. Η χρονική διάρκεια των 30 s επιλέχθηκε λόγω του τυρβώδους χαρακτήρα της ροής και ύστερα από παρατήρηση δοκιμαστικών μετρήσεων ως μία επαρκής διάρκεια για τον υπολογισμό της μέσης χρονικά τιμής της αγωγιμότητας, και επομένως της αλατότητας, στο σημείο μέτρησης.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος ο γράφων βρισκόταν στη θέση λήψης των μετρήσεων για το χειρισμό του σχετικού λογισμικού Das-Wizard (μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή). Μέσω του λογισμικού αυτού δινόταν εντολή συλλογής και καταγραφής των τιμών τάσης στη συγκεκριμένη θέση. Δεύτερο άτομο βρισκόταν στη θέση του πίνακα χειρισμού της γέφυρας για μετακίνηση του ανιχνευτή αγωγιμότητας από θέση σε θέση.

Στιγμιότυπα από την εκροή της φλέβας θετικής άνωσης από το ακροφύσιο, την πρόσκρουσή της με το οριζόντιο στερεό όριο και την ανάπτυξη του ρεύματος πυκνότητας δίνονται στο Σχήμα 3.14 του προηγούμενου κεφαλαίου. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και το όργανο MSCTI, το οποίο, τοποθετημένο υπό κλίση 28° ως προς την κατακόρυφο, λαμβάνει την πρώτη σημειακή μέτρηση.

4.1.4 Μετρήσεις πυκνοτήτων

Μετά το πέρας του κάθε πειράματος λαμβάνονταν μετρήσεις της αλατότητας C (ppt) και της θερμοκρασίας T ($^\circ\text{C}$) τόσο του διαλύματος που ερχόταν από την παρακαμπτήριο γραμμή όσο και από τον αποδέκτη. Συγκεκριμένα, μέσω της παρακαμπτηρίου γραμμής διοχετευόταν ποσότητα διαλύματος στο δοχείο του Σχήματος 3.16(α), όπου με χρήση του οργάνου YSI 30 γινόταν εκτίμηση της αλατότητας και της θερμοκρασίας. Για το πείραμα 29/8/13-EXP1 προέκυψε $C_0=27.6$ ppt και $T_0=30$ $^\circ\text{C}$. Για τον αποδέκτη βυθιζόταν ο αισθητήρας του οργάνου YSI 30 σε βάθος περίπου 20 cm από την επιφάνεια της δεξαμενής διάχυσης, ώστε να μην έρθει σε επαφή με το στρωματοποιημένο αλατόνερο κοντά στον πυθμένα. Για το τυπικό πείραμα πάρθηκαν οι μετρήσεις $C_a=0.2$ ppt και $T_a=28.5$ $^\circ\text{C}$. Κατόπιν, μέσω των σχέσεων (A.1) και (A.2) καθώς και της διορθωτικής σχέσης (A.3) (βλ. Παράρτημα Α), γινόταν εκτίμηση των πυκνοτήτων του διαλύματος της φλέβας ρ_0 (kg/m^3) και του υγρού του αποδέκτη ρ_a (kg/m^3), οι οποίες για το πείραμα 29/8/13-EXP1 προέκυψαν $\rho_0=1015.13$ kg/m^3 και $\rho_a=996.27$ kg/m^3 .

Για λόγους επαλήθευσης οι πυκνότητες ρ_0 , ρ_a (kg/m^3) του διαλύματος της φλέβας και του υγρού του αποδέκτη αντίστοιχα, προσδιορίζονταν και με τη χρήση ζυγαριάς ακριβείας (βλ. Σχ. 3.17(β)). Λαμβάνονταν δείγματα τόσο μέσω της παρακαμπτηρίου γραμμής (διάλυμα φλέβας), όσο και από τη δεξαμενή διάχυσης (υγρό αποδέκτη) μέχρι την ένδειξη των 900 ml του ογκομετρικού κυλίνδρου του Σχήματος 3.17(α). Κατόπιν, τα δείγματα ζυγίζονταν στην εργαστηριακή ζυγαριά ακριβείας και έτσι προέκυπτε το μεικτό βάρος δείγματος-ογκομετρικού κυλίνδρου. Το βάρος του ογκομετρικού κυλίνδρου (απόβαρο) μετρήθηκε 590 g. Οπότε, αφαιρώντας το απόβαρο από το μεικτό βάρος και διαιρώντας το αποτέλεσμα με τον όγκο-ένδειξη του κυλίνδρου (900 ml) προέκυπτε μία επιπλέον εκτίμηση των πυκνοτήτων ρ_0 και ρ_a . Για το πείραμα 29/8/13-EXP1 προέκυψε $\rho_0=1003.33$ kg/m^3 , δηλαδή καταγράφηκε μία απόκλιση 1.16% σε σχέση με την αντίστοιχη μέτρηση που πάρθηκε με το YSI 30 ($\rho_0=1015.13$ kg/m^3), και $\rho_a=987.78$ kg/m^3 με απόκλιση 0.85% από την αντίστοιχη με το YSI

30 ($\rho_a = 996.27 \text{ kg/m}^3$). Συνεπώς, παρατηρήθηκαν αμελητέες αποκλίσεις και οι μετρημένες τιμές επαληθεύτηκαν ικανοποιητικά.

4.1.5 Προσδιορισμός της παροχής Q_o της φλέβας

Για τον προσδιορισμό της παροχής της φλέβας ρυθμιζόταν η υψομετρική διαφορά Δh στο διαφορικό μανόμετρο, ώστε να ταυτίζεται με αυτή που επικρατούσε στο εκάστοτε πείραμα, ενώ το διάλυμα της φλέβας οδηγούνταν μέσω της παρακαμπτηρίου γραμμής στον ογκομετρικό κύλινδρο του Σχήματος 3.12. Όπως προαναφέρθηκε (βλ. Παρ. 3.3), ο ογκομετρικός κύλινδρος διαθέτει ενσωματωμένο έναν κατακόρυφο μεταλλικό αριθμημένο κανόνα με υποδιαίρεση χιλιοστών για τη μέτρηση του ύψους της εκάστοτε στάθμης του περιεχόμενου υγρού. Για τέσσερα διαδοχικά διαστήματα υψών, 4 cm το καθένα, μετρούνταν ο χρόνος που χρειαζόταν για να διανύσει η στάθμη του υγρού καθένα από αυτά και τα αποτελέσματα καταγράφονταν. Έπειτα, γνωρίζοντας τη διάμετρο του ογκομετρικού κυλίνδρου ($D_c = 39 \text{ cm}$) υπολογιζόταν για κάθε χρονικό χρονικό διάστημα η παροχή Q_o . Υπολογίζοντας τη μέση τιμή των τεσσάρων τιμών παροχής (τέσσερα διαδοχικά διαστήματα), προέκυπτε μία εκτίμηση της μέσης παροχής Q_o της φλέβας. Για το τυπικό πείραμα 29/8/13-EXP1 είχαμε $\Delta h = 10.00 \text{ cm}$ και προέκυψε $Q_o = 38.05 \text{ cm}^3/\text{s}$.

4.1.6 Αρχικές συνθήκες τυπικού πειράματος

Λαμβάνοντας υπόψη τα μεγέθη που μετρήθηκαν ή υπολογίστηκαν στα προαναφερθέντα βήματα και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.5), (2.6), (2.7), (2.8), (2.11), (2.13), (2.15) και (2.16) του Κεφαλαίου 2 προκύπτουν οι αρχικές συνθήκες για το πείραμα 29/8/13-EXP1, οι οποίες δίνονται στον Πίνακα 4.1:

Πίνακας 4.1 Αρχικές συνθήκες πειράματος 29/8/13-EXP1

Πείραμα	D_o (cm)	C_a (ppt)	T_a (°C)	C_o (ppt)	T_o (°C)	Q_o (cm^3/s)	F_o	Re_o	Ri_o	H (cm)	l_M (cm)
29/8/13-EXP1	1.60	0.20	28.5	27.60	30.0	38.05	3.47	3028	0.27	43.1	5.23

4.1.7 Αξονικές μετρήσεις αλατότητας

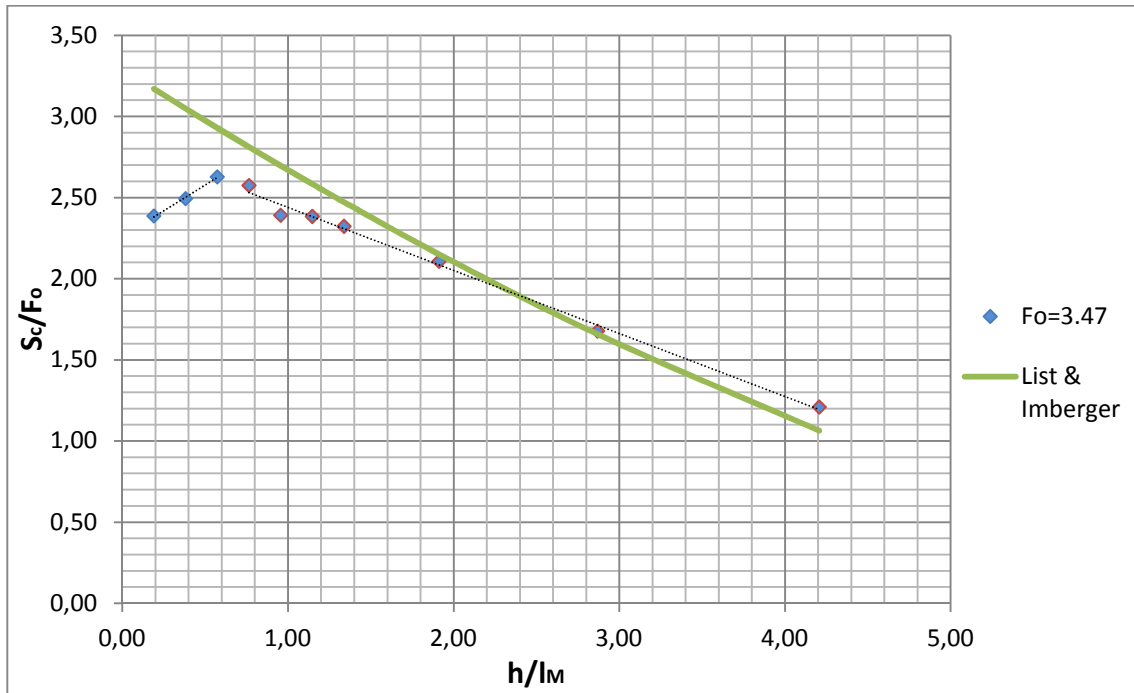
Για το τυπικό πείραμα 29/8/13-EXP1, για το οποίο προέκυψε $F_0=3.47$, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις αλατότητας στον άξονα της φλέβας διαδοχικά στα σημεία που απέχουν $h=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15$ και 22 cm από το οριζόντιο στερεό όριο.

Στον Πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι μετρημένες αξονικές συγκεντρώσεις (C_c) και οι υπολογισμένες με βάση αυτές διαλύσεις (S_c) για το τυπικό πείραμα. Επίσης, παρατίθενται: (α) η αδιαστατοποιημένη απόσταση των αξονικών σημείων από την πηγή (ακροφύσιο) ($(H-h)/l_M$), (β) η αδιαστατοποιημένη απόσταση των αξονικών σημείων από το στερεό όριο (h/l_M), (γ) η αδιαστατοποιημένη διάλυση (S_c/F_0), και (δ) η υπολογισμένη μέση διάλυση της φλέβας (S_{ave}) στα επιμέρους σημεία, με τη χρήση της γενικευμένης σχέσης των List & Imberger, η οποία για να είναι συμβατή με τις μετρημένες τιμές διαιρείται με τον συντελεστή 1.7 (Jirka,2004), και στη συνέχεια αδιαστατοποιείται ομοίως με τον F_0 .

Πίνακας 4.2 Εξαγωγή αδιαστατοποιημένων αξονικών τιμών διάλυσης και εκτίμησή τους κατά List & Imberger για το πείραμα 29/8/13-EXP1 ($F_0=3.47$).

h (cm)	H-h (cm)	C_c (ppt)	S_c	$(H-h)/l_M$	S_c/F_0	h/l_M	List & Imberger	
							S_{ave}	$(S_{ave}/1,7)/F_0$
1	42.10	3.51	8.28	8.05	2.39	0.19	18.71	3.17
2	41.10	3.37	8.65	7.86	2.49	0.38	18.00	3.05
3	40.10	3.20	9.12	7.67	2.63	0.57	17.29	2.93
4	39.10	3.27	8.94	7.48	2.57	0.76	16.60	2.81
5	38.10	3.50	8.30	7.29	2.39	0.96	15.92	2.70
6	37.10	3.51	8.28	7.09	2.38	1.15	15.25	2.58
7	36.10	3.60	8.06	6.90	2.32	1.34	14.59	2.47
10	33.10	3.94	7.32	6.33	2.11	1.91	12.70	2.15
15	28.10	4.91	5.82	5.37	1.68	2.87	9.79	1.66
22	21.10	6.73	4.20	4.03	1.21	4.21	6.27	1.06

Στο Σχ. 4.2 παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες τιμές της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List & Imberger αξονικής διάλυσης για $F_0=3.47$ (29/8/13-EXP1). Παρατηρείται ότι οι μετρημένες τιμές της διάλυσης μειώνονται καθώς αυξάνεται η απόσταση h από το στερεό όριο, ακολουθώντας την θεωρητική πρόβλεψη για ελεύθερα εξελισσόμενη φλέβα. Ωστόσο, κοντά στο στερεό όριο είναι προφανής η αντιστροφή της κλίσης των τιμών διάλυσης, η ο-



Σχήμα 4.2 Αδιαστατοποιημένες τιμές της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List & Imberger αξονικής διάλυσης για το 29/8/13-EXP1.

ποία δείχνει ότι πολύ κοντά στο στερεό όριο η μετρημένη διάλυση είναι σίγουρα μικρότερη από την αντίστοιχη για ελεύθερα εξελισσόμενη φλέβα, και επίσης μικρότερη από τη μετρημένη διάλυση σε λίγο μεγαλύτερη απόσταση από τον οριζόντιο πυθμένα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η απόσταση h_D από το στερεό όριο, πέραν της οποίας το τελευταίο δεν επηρεάζει την αξονική διάλυση της φλέβας, δηλαδή το εύρος της επίδρασης του οριζόντιου πυθμένα. Από την επεξεργασία των δεδομένων του Σχήματος 4.2 προκύπτει ότι, σε αδιάστατους όρους, το εύρος αυτό ισούται με $h_D/l_M = 0.56$ για το τυπικό πείραμα.

4.1.8 Εγκάρσιες ως προς τον άξονα της φλέβας μετρήσεις αλατότητας

Στα πλαίσια της αντιπροσωπευτικής τρίτης φάσης των πειραμάτων ($F_o \approx 3.50$) πάρθηκαν μετρήσεις αλατότητας εγκάρσια στον άξονα της φλέβας σε μια σειρά σημείων. Συγκεκριμένα, σε ύψη $h = 1, 3, 5, 7$ cm από το στερεό όριο, πραγματοποιήθηκαν διαδοχικά εγκάρσιες μετρήσεις σε αποστάσεις $r = 0, 2, 4, 8$ και 12 cm ως προς τον άξονα. Σε ύψος $h = 22$ cm ελήφθησαν μετρήσεις για $r = 0, 1, 2, 3$ και 4 cm. Αντίστοιχες εγκάρσιες μετρήσεις διενεργήθηκαν και στα πειράματα των τριών υπολοίπων φάσεων.

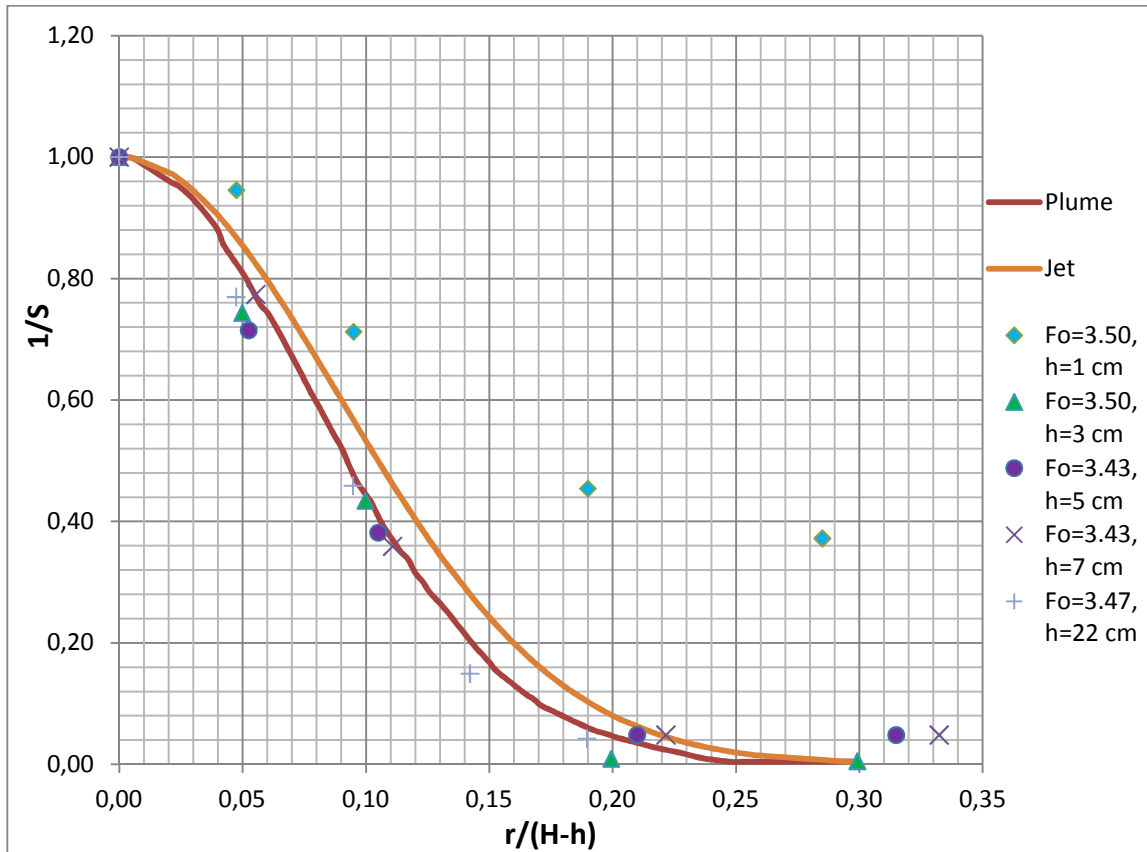
Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται οι σημειακές μετρήσεις της συγκέντρωσης (C_m) και της διάλυσης (S_m) στα εγκάρσια σημεία. Με βάση τις μετρήσεις αυτές προέκυψαν

αδιαστοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης (βλ. Σχήμα 4.3). Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζονται επίσης οι αντίστοιχες κατανομές της μέσης συγκέντρωσης για απλή φλέβα και πλούμιο όπως προσδιορίστηκαν από τη σχέση (2.25) του Κεφαλαίου 2. Το πλάτος b_c ε-

Πίνακας 4.3 Εγκάρσιες μετρήσεις αλατότητας και εξαγωγή αδιαστατοποιημένων τιμών για την τρίτη αντιπροσωπευτική φάση πειραμάτων ($F_o \approx 3.50$).

h (cm)	H-h (cm)	r (cm)	C_m (ppt)	S_m	1/S	r/(H-h)	(H-h)/ l_M	F_o/S_m	r/ l_M	h/ l_M
1	42.10	0	3.13	9.46	1.00	0.00	7.98	0.37	0.00	0.19
1	42.10	2	2.97	10.00	0.95	0.05	7.98	0.35	0.38	0.19
1	42.10	4	2.29	13.28	0.71	0.10	7.98	0.26	0.76	0.19
1	42.10	8	1.53	20.84	0.45	0.19	7.98	0.17	1.52	0.19
1	42.10	12	1.29	25.43	0.37	0.29	7.98	0.14	2.27	0.19
3	40.10	0	3.10	9.56	1.00	0.00	7.60	0.37	0.00	0.57
3	40.10	2	2.35	12.86	0.74	0.05	7.60	0.27	0.38	0.57
3	40.10	4	1.46	22.02	0.43	0.10	7.60	0.16	0.76	0.57
3	40.10	8	0.23	1070.12	0.01	0.20	7.60	0.00	1.52	0.57
3	40.10	12	0.22	1836.38	0.01	0.30	7.60	0.00	2.27	0.57
5	38.10	0	3.55	8.31	1.00	0.00	7.37	0.41	0.00	0.97
5	38.10	2	2.59	11.62	0.71	0.05	7.37	0.30	0.39	0.97
5	38.10	4	1.48	21.77	0.38	0.10	7.37	0.16	0.77	0.97
5	38.10	8	0.36	171.40	0.05	0.21	7.37	0.02	1.55	0.97
5	38.10	12	0.36	172.34	0.05	0.31	7.37	0.02	2.32	0.97
7	36.10	0	3.53	8.35	1.00	0.00	6.99	0.41	0.00	1.35
7	36.10	2	2.78	10.79	0.77	0.06	6.99	0.32	0.39	1.35
7	36.10	4	1.40	23.26	0.36	0.11	6.99	0.15	0.77	1.35
7	36.10	8	0.36	172.76	0.05	0.22	6.99	0.02	1.55	1.35
7	36.10	12	0.36	172.65	0.05	0.33	6.99	0.02	2.32	1.35
22	21.10	0	6.73	4.20	1.00	0.00	4.03	0.83	0.00	4.21
22	21.10	1	5.22	5.45	0.77	0.05	4.03	0.64	0.19	4.21
22	21.10	2	3.19	9.15	0.46	0.09	4.03	0.38	0.38	4.21
22	21.10	3	1.17	28.12	0.15	0.14	4.03	0.12	0.57	4.21
22	21.10	4	0.48	98.73	0.04	0.19	4.03	0.04	0.76	4.21

κτιμήθηκε ως $b_c=0.126(H-h)$ για την περίπτωση απλής φλέβας και ως $b_c=0.112(H-h)$ για την περίπτωση πλουμίου, σύμφωνα με την πειραματική έρευνα των Papanicolaou & List (1987,1988). Η παράθεση των κατανομών τόσο απλής φλέβας όσο και πλουμίου ήταν αναγκαία, καθώς όπως διαπιστώνεται από τα δεδομένα του Πίνακα 4.3 για $h=22$ cm ισχύει $1 < (H-h)/l_M < 5$, που σημαίνει ότι βρισκόμαστε σε περιοχή τυρβώδους ανωστικής φλέβας, ενώ



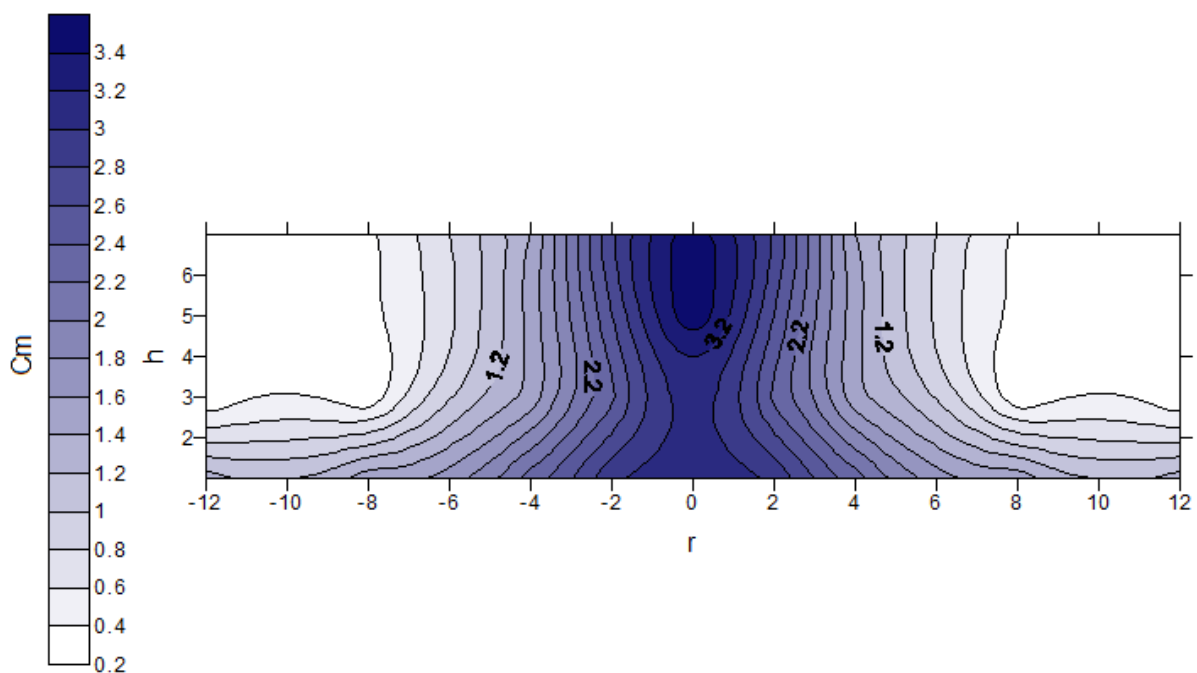
Σχήμα 4.3 Αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης για την τρίτη φάση πειραμάτων ($F_o \approx 3.50$) καθώς και κατανομές για απλή φλέβα και πλούμιο κατά Papanicolaou & List (1988).

από τις αρχικές συνθήκες του αντίστοιχου πειράματος και τις σχέσεις (2.6), (2.7) προκύπτει ότι η M_o είναι επικρατέστερη της B_o και κατά συνέπεια η φλέβα αρχικά συμπεριφέρεται ως απλή. Ωστόσο για $h \leq 7$ cm παρατηρείται ότι $(H-h)/l_M > 5$, γεγονός που σηματοδοτεί ότι η φλέβα έχει ήδη μετατραπεί σε πλούμιο στην περιοχή αυτή. Επομένως, για να είναι δυνατόν να εξαχθούν συμπεράσματα για την επίδραση του στερεού ορίου στα προφίλ τόσο απλής φλέβας όσο και πλουμίου, παρατέθηκαν και οι δύο κατανομές.

Στο Σχήμα 4.3 παρατηρείται ότι πολύ κοντά στο στερεό όριο (για $h=1$ cm) η κατανομή της μέσης χρονικά συγκέντρωσης αποκλίνει σημαντικά από την κατανομή Gauss για πλούμια, δίνοντας μεγαλύτερες τιμές εγκάρσια. Εντούτοις, είναι εμφανές ότι για $h \geq 3$ cm οι αντίστοιχες αποκλίσεις είναι αμελητέες, γεγονός που καταδεικνύει αμελητέα επίδραση του οριζώντιου πυθμένα στις κατανομές συγκεντρώσεων για $h \geq 3$ cm. Επίσης, για $h=22$ cm διαπιστώνεται ότι το προφίλ της μέσης χρονικά συγκέντρωσης βρίσκεται πιο κοντά στην κατανομή Gauss για πλούμια παρά σ' αυτή που αντιστοιχεί σε απλές φλέβες. Αυτό είναι

αναμενόμενο δεδομένης και της τιμής της αδιαστατοποιημένης απόστασης από την πηγή $(H-h)/l_M = 4.03$, που δείχνει ότι σε εκείνη την περιοχή προσεγγίζεται περισσότερο η συμπεριφορά πλουμίου παρά απλής φλέβας.

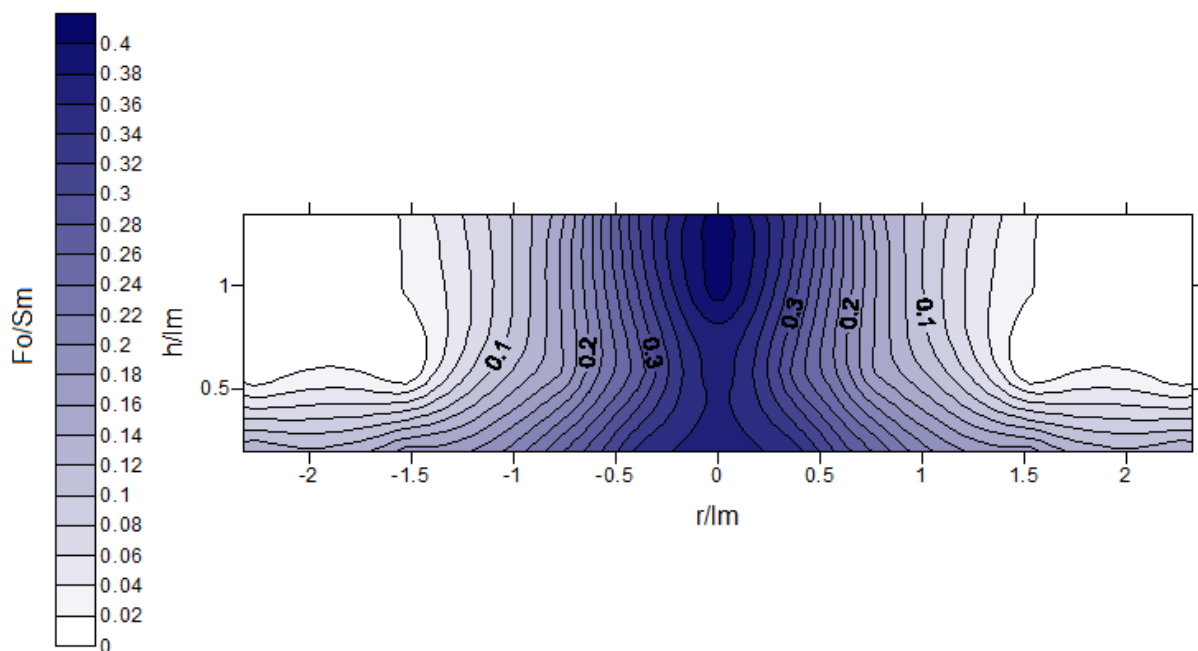
Στο Σχήμα 4.4 δίνεται η κατανομή των μετρημένων συγκεντρώσεων C_m μέχρι ύψος $h=7$ cm από το οριζόντιο στερεό όριο για $F_o \approx 3.50$, με χρήση του προγράμματος Surfer. Όπως φαίνεται και στην κλίμακα χρώματος (αριστερά στο σχήμα), εντονότερη απόχρωση υποδηλώνει υψηλότερη τιμή συγκέντρωσης.



Σχήμα 4.4 Κατανομή μετρημένων συγκεντρώσεων C_m για $F_o \approx 3.50$ μέχρι $h=7$ cm.

Παρατηρείται αυξημένη συγκέντρωση στη γειτονία του σημείου πρόσκρουσης της φλέβας. Επίσης, μπορεί να θεωρηθεί η απόσταση $r=8$ cm περίπου από τον άξονα ως η αρχή του ρεύματος πυκνότητας, το οποίο μετακινείται οριζόντια απομακρυνόμενο από το σημείο πρόσκρουσης. Από το ίδιο σχήμα μπορεί να εκτιμηθεί ότι το ρεύμα πυκνότητας θα έχει πάχος περίπου 2.7 cm.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται η αδιαστατοποιημένη κατανομή F_o/S_m για $F_o \approx 3.50$. Παρατηρείται ομοίως αυξημένη τιμή του μεγέθους κοντά στο στερεό όριο. Το ρεύμα πυκνότητας φαίνεται να ξεκινάει σε αδιαστατοποιημένη απόσταση $r/l_M=1.5$ από τον άξονα της φλέβας, ενώ παρουσιάζει πάχος 0.50 σε αδιάστατους όρους (h/l_M) .



Σχήμα 4.5 Αδιαστατοποιημένη κατανομή F_o/S_m για $F_o \approx 3.50$.

4.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στην Παράγραφο αυτή παρουσιάζονται συγκεντρωτικά αποτελέσματα που αφορούν:

- (α) Αρχικές συνθήκες για όλα τα πειράματα.
- (β) Μετρήσεις πυκνοτήτων για όλα τα πειράματα.
- (γ) Διαγράμματα αδιαστατοποιημένων τιμών της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List & Imberger αξονικής διάλυσης για κάθε F_o .
- (δ) Αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης καθώς και κατανομές με χρήση του προγράμματος Surfer για τις τέσσερις φάσεις των πειραμάτων.

4.2.1 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων

Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες για τα 12 πειράματα που διεξήχθησαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρατηρείται ότι σε όλα τα πειράματα οι Re_o έχουν ικανοποιητικά υψηλές τιμές, σε ένα εύρος 3025-7076, επομένως όλες οι φλέβες που μελετήθηκαν είναι τυρβώδεις.

Πίνακας 4.4 Αρχικές συνθήκες για όλα τα πειράματα.

α/α	Πειράματα	D_o (cm)	C_a (ppt)	T_a (°C)	C_o (ppt)	T_o (°C)	Q_o (cm ³ /s)	F_o	Re_o	Ri_o	H (cm)	I_M (cm)
1	26/8/13-EXP1	0.80	0.20	28.5	27.50	28.8	44.13	22.59	7024	0.04	47.9	17.01
2	26/8/13-EXP2	0.80	0.20	26.7	27.60	28.9	44.46	23.04	7076	0.04	47.9	17.35
3	27/8/13-EXP1	0.80	0.20	27.7	27.70	29.1	44.28	22.77	7047	0.04	47.9	17.15
4	27/8/13-EXP2	0.80	0.20	28.2	27.70	29.3	32.64	16.75	5195	0.06	47.9	12.61
5	28/8/13-EXP1	0.80	0.20	28.7	27.50	29.4	32.45	16.67	5165	0.06	47.9	12.55
6	28/8/13-EXP2	0.80	0.20	26.8	27.60	29.8	32.65	17.04	5196	0.06	47.9	12.83
7	29/8/13-EXP1	1.60	0.20	28.5	27.60	30.0	38.05	3.47	3028	0.27	43.1	5.23
8	30/8/13-EXP1	1.60	0.20	27.7	27.90	29.4	38.59	3.50	3071	0.27	43.1	5.28
9	30/8/13-EXP2	1.60	0.20	27.8	28.00	29.0	38.01	3.43	3025	0.27	43.1	5.17
10	31/8/13-EXP1	1.00	0.20	28.1	28.00	28.2	38.37	11.12	4885	0.08	34.6	10.47
11	31/8/13-EXP2	1.00	0.20	28.2	28.30	28.0	39.01	11.22	4967	0.08	34.6	10.56
12	1/9/13-EXP1	1.00	0.20	27.6	28.00	27.2	38.73	11.17	4931	0.08	34.6	10.52

4.2.2 Μετρήσεις πυκνοτήτων

Στον Πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι μετρήσεις πυκνότητας τόσο για την παρακαμπτήριο γραμμή (Π.Γ) όσο και για τη δεξαμενή διάχυσης (Δ.Δ), με χρήση του οργάνου YSI 30 και των σχέσεων του Παραρτήματος Α, για όλα τα πειράματα.

Στον Πίνακα 4.6 δίνονται οι αντίστοιχες επαληθευτικές μετρήσεις πυκνοτήτων που εξήχθησαν με χρήση της ζυγαριάς ακριβείας και του ογκομετρικού κυλίνδρου (βλ. Παρ. 3.6).

Παρατηρείται ότι η μέθοδος που περιλαμβάνει χρήση ζυγαριάς και ογκομετρικού κυλίνδρου (βλ. Παρ. 4.1.4) οδηγεί γενικά σε εκτίμηση μικρότερων τιμών πυκνότητας τόσο για το διάλυμα της φλέβας όσο και για τον αποδέκτη. Ωστόσο, οι αποκλίσεις ανάμεσα στις δύο μεθόδους κυμαίνονται σε ένα εύρος 1.16%-1.44% για την παρακαμπτήριο γραμμή και σε 0.85%-1.32% για τη δεξαμενή διάχυσης και κατά συνέπεια κρίνονται αμελητέες.

Σημειώνεται ότι οι περαιτέρω υπολογισμοί στην παρούσα εργασία έγιναν με βάση τις τιμές πυκνοτήτων του Πίνακα 4.5, ενώ το ρευστό της φλέβας είχε πυκνότητα μεγαλύτερη από τον αποδέκτη σε ένα εύρος 1.9%-5.5%.

Πίνακας 4.5 Εκτίμηση πυκνοτήτων διαλυμάτων από την παρακαμπτήριο γραμμή (Π.Γ.) και τη δεξαμενή διάχυσης (Δ.Δ.) με το όργανο YSI-30 και τις σχέσεις του Παραρτήματος Α.

YSI - 30		c (ppt)	T (°C)	$\rho_w(T)$ (kg/m ³)	$\rho'(c,T)$ (kg/m ³)	$\Delta\rho$ (kg/m ³)	$\rho(c,T)$ (kg/m ³)
Πείραμα	Διάλυμα						
26/8/13-EXP1	Π.Γ.	27.5	28.8	996.03	1016.54	1.0945	1015.45
	Δ.Δ.	0.2	28.5	996.12	996.27	0.0080	996.27
26/8/13-EXP2	Π.Γ.	27.6	28.9	996.00	1016.58	1.0985	1015.49
	Δ.Δ.	0.2	26.7	996.62	996.77	0.0080	996.77
27/8/13-EXP1	Π.Γ.	27.7	29.1	995.95	1016.59	1.1025	1015.49
	Δ.Δ.	0.2	27.7	996.34	996.50	0.0080	996.49
27/8/13-EXP2	Π.Γ.	27.7	29.3	995.89	1016.53	1.1025	1015.43
	Δ.Δ.	0.2	28.2	996.20	996.35	0.0080	996.35
28/8/13-EXP1	Π.Γ.	27.5	29.4	995.86	1016.34	1.0945	1015.25
	Δ.Δ.	0.2	28.7	996.06	996.21	0.0080	996.21
28/8/13-EXP2	Π.Γ.	27.6	29.8	995.74	1016.29	1.0985	1015.19
	Δ.Δ.	0.2	26.8	996.59	996.74	0.0080	996.74
29/8/13-EXP1	Π.Γ.	27.6	30	995.68	1016.22	1.0985	1015.13
	Δ.Δ.	0.2	28.5	996.12	996.27	0.0080	996.27
30/8/13-EXP1	Π.Γ.	27.9	29.4	995.86	1016.64	1.1104	1015.54
	Δ.Δ.	0.2	27.7	996.34	996.50	0.0080	996.49
30/8/13-EXP2	Π.Γ.	28	29	995.97	1016.85	1.1144	1015.74
	Δ.Δ.	0.2	27.8	996.32	996.47	0.0080	996.46
31/8/13-EXP1	Π.Γ.	28	28.2	996.20	1017.10	1.1144	1015.99
	Δ.Δ.	0.2	28.1	996.23	996.38	0.0080	996.38
31/8/13-EXP2	Π.Γ.	28.3	28	996.26	1017.39	1.1263	1016.27
	Δ.Δ.	0.2	28.2	996.20	996.35	0.0080	996.35
1/9/13-EXP1	Π.Γ.	28	27.2	996.48	1017.42	1.1144	1016.31
	Δ.Δ.	0.2	27.6	996.37	996.52	0.0080	996.52

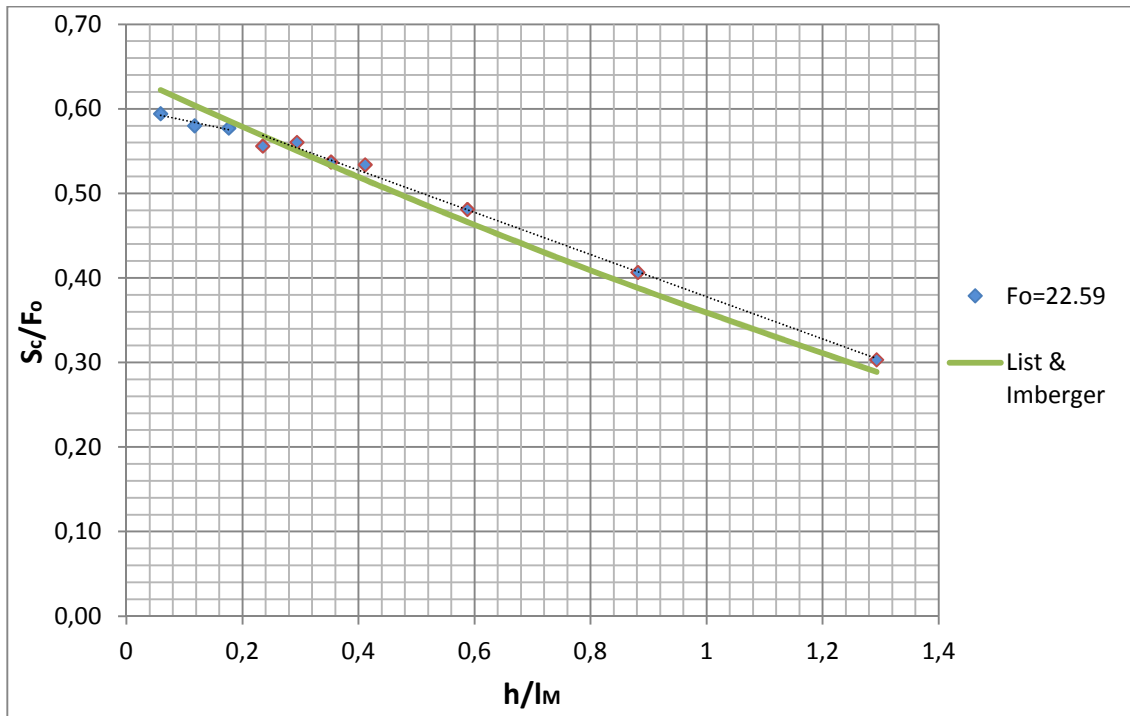
Πίνακας 4.2 Επαληθευτική εκτίμηση πυκνοτήτων δειγμάτων παρακαμπτηρίου γραμμής (Π.Γ.) και δεξαμενής διάχυσης (Δ.Δ.) με χρήση ζυγαριάς ακριβείας και ογκομετρικού κυλίνδρου.

ΖΥΓΑΡΙΑ		Μεικτό βάρος (g)	Απόβαρο (g)	ρ (kg/m ³)
Πείραμα	Δείγμα			
26/8/13-EXP1	Π.Γ.	1493	590	1003.33
	Δ.Δ.	1477	590	985.56
26/8/13-EXP2	Π.Γ.	1492	590	1002.22
	Δ.Δ.	1478	590	986.67
27/8/13-EXP1	Π.Γ.	1493	590	1003.33
	Δ.Δ.	1475	590	983.33
27/8/13-EXP2	Π.Γ.	1491	590	1001.11
	Δ.Δ.	1479	590	987.78
28/8/13-EXP1	Π.Γ.	1492	590	1002.22
	Δ.Δ.	1477	590	985.56
28/8/13-EXP2	Π.Γ.	1492	590	1002.22
	Δ.Δ.	1479	590	987.78
29/8/13-EXP1	Π.Γ.	1493	590	1003.33
	Δ.Δ.	1479	590	987.78
30/8/13-EXP1	Π.Γ.	1491	590	1001.11
	Δ.Δ.	1478	590	986.67
30/8/13-EXP2	Π.Γ.	1491	590	1001.11
	Δ.Δ.	1476	590	984.44
31/8/13-EXP1	Π.Γ.	1492	590	1002.22
	Δ.Δ.	1477	590	985.56
31/8/13-EXP2	Π.Γ.	1494	590	1004.44
	Δ.Δ.	1479	590	987.78
1/9/13-EXP1	Π.Γ.	1492	590	1002.22
	Δ.Δ.	1476	590	984.44

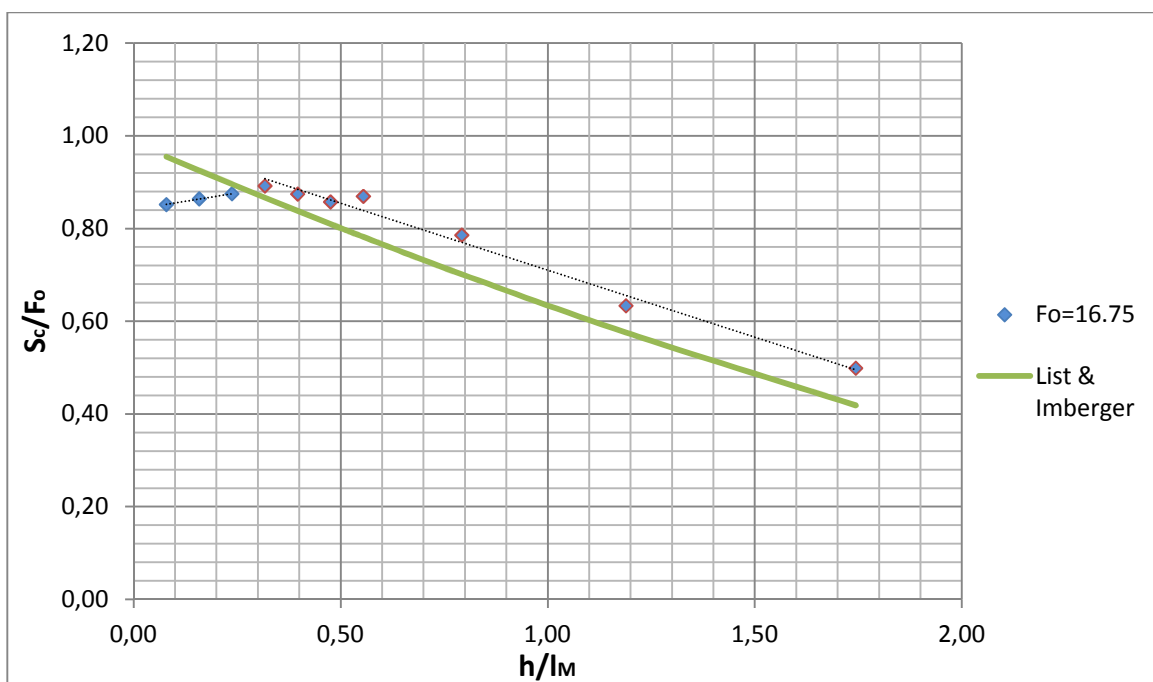
4.2.3 Αξονικές μετρήσεις αλατότητας

Αντίστοιχα με το τυπικό πείραμα 29/8/13-EXP1 (βλ. Παρ. 4.1.7) πάρθηκαν αξονικές μετρήσεις αλατότητας στα πλαίσια τριών ακόμα πειραμάτων, στα οποία προσεγγίστηκαν οι τιμές $F_o=23$, $F_o=17$ και $F_o=11$. Οι αντίστοιχοι με τον Πίνακα 4.2 πίνακες μετρήσεων παρατίθενται στο Παράρτημα Β για κάθε F_o . Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα αδιαστατοποιημένων τιμών της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List &

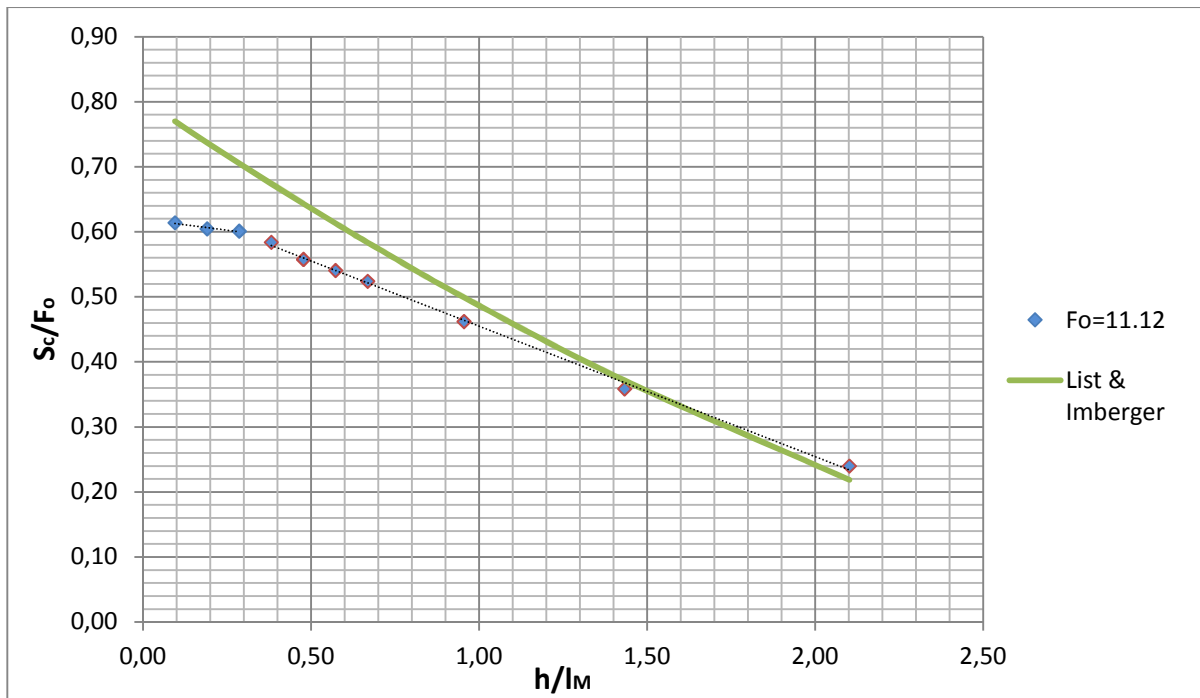
Imberger αξονικής διάλυσης για τα τρία αυτά πειράματα. Για λόγους καλύτερης εποπτείας της επίδρασης των διακυμάνσεων του F_o στην αξονική διάλυση παρατίθεται ξανά και το Σχήμα 4.2.



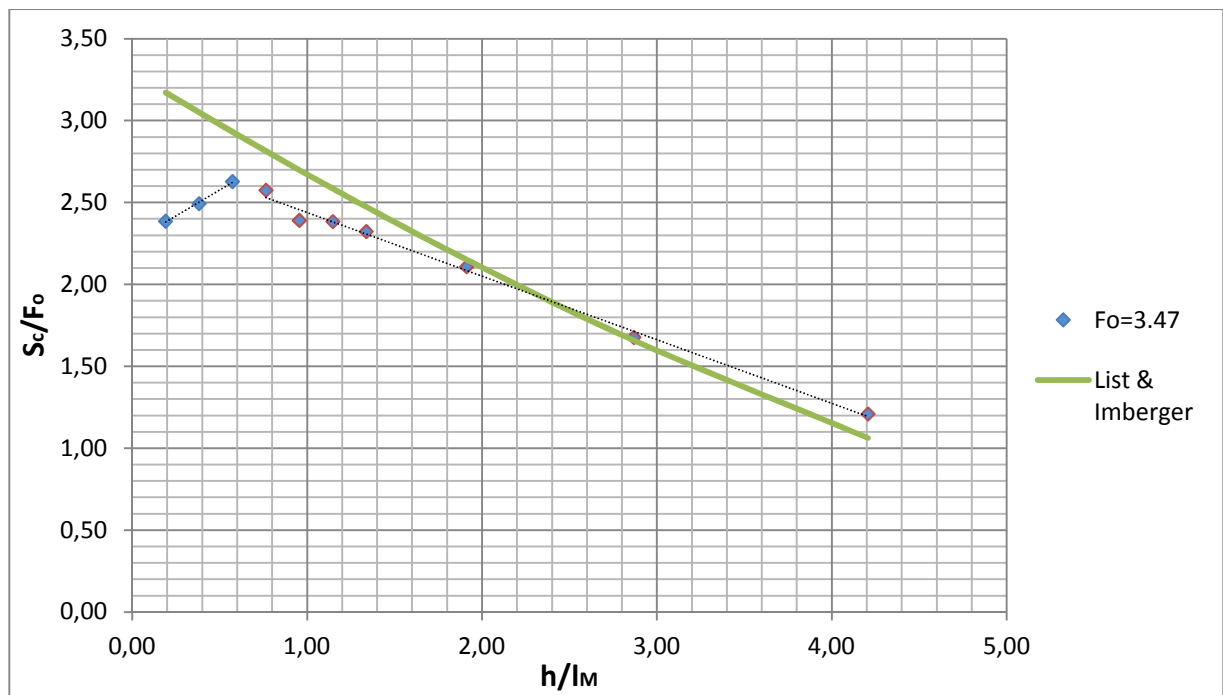
Σχήμα 4.6 Αδιαστατοποιημένες τιμές της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List & Imberger αξονικής διάλυσης για το 26/8/13-EXP1.



Σχήμα 4.7 Αδιαστατοποιημένες τιμές της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List & Imberger αξονικής διάλυσης για το 27/8/13-EXP2.



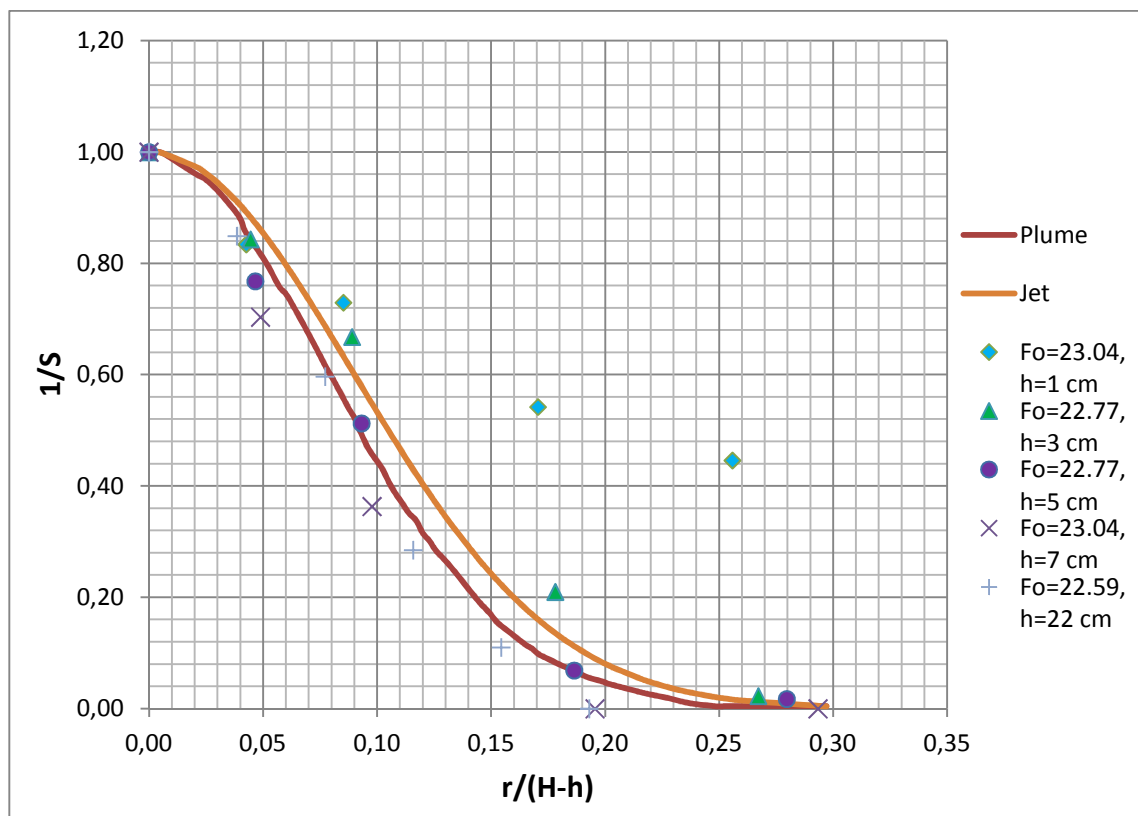
Σχήμα 4.8 Αδιαστατοποιημένες τιμές της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List & Imberger αξονικής διάλυσης για το 31/8/13-EXP1.



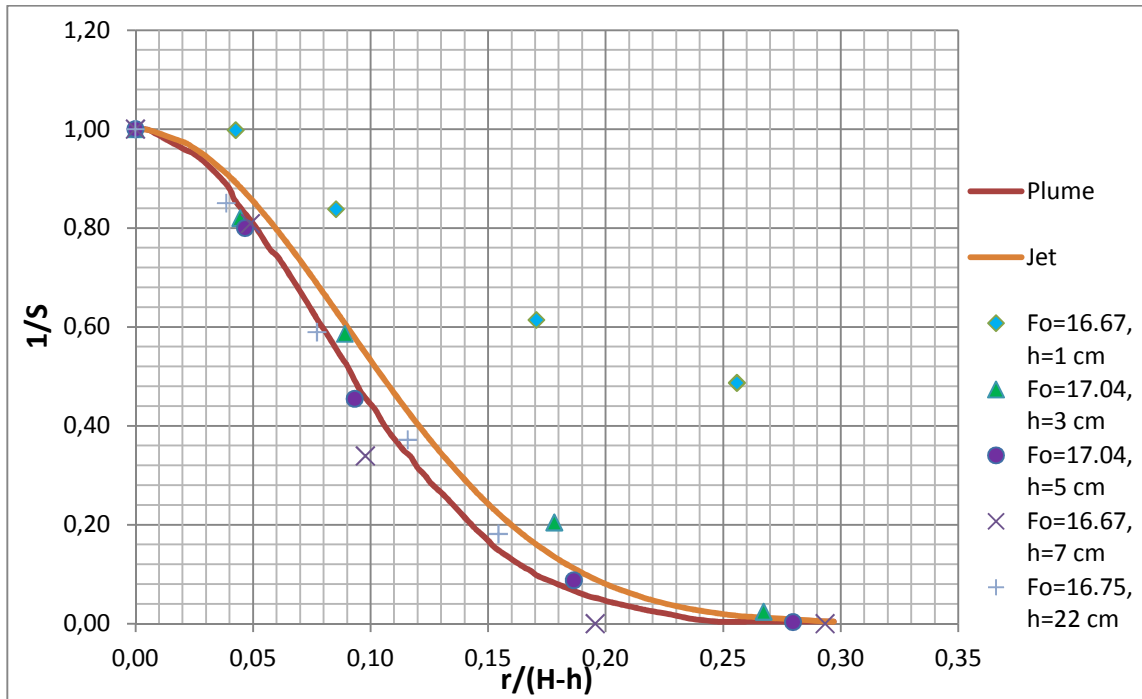
Σχήμα 4.9 Αδιαστατοποιημένες τιμές της μετρημένης και υπολογισμένης κατά List & Imberger αξονικής διάλυσης για το 29/8/13-EXP1.

4.2.4 Εγκάρσιες ως προς τον άξονα της φλέβας μετρήσεις αλατότητας

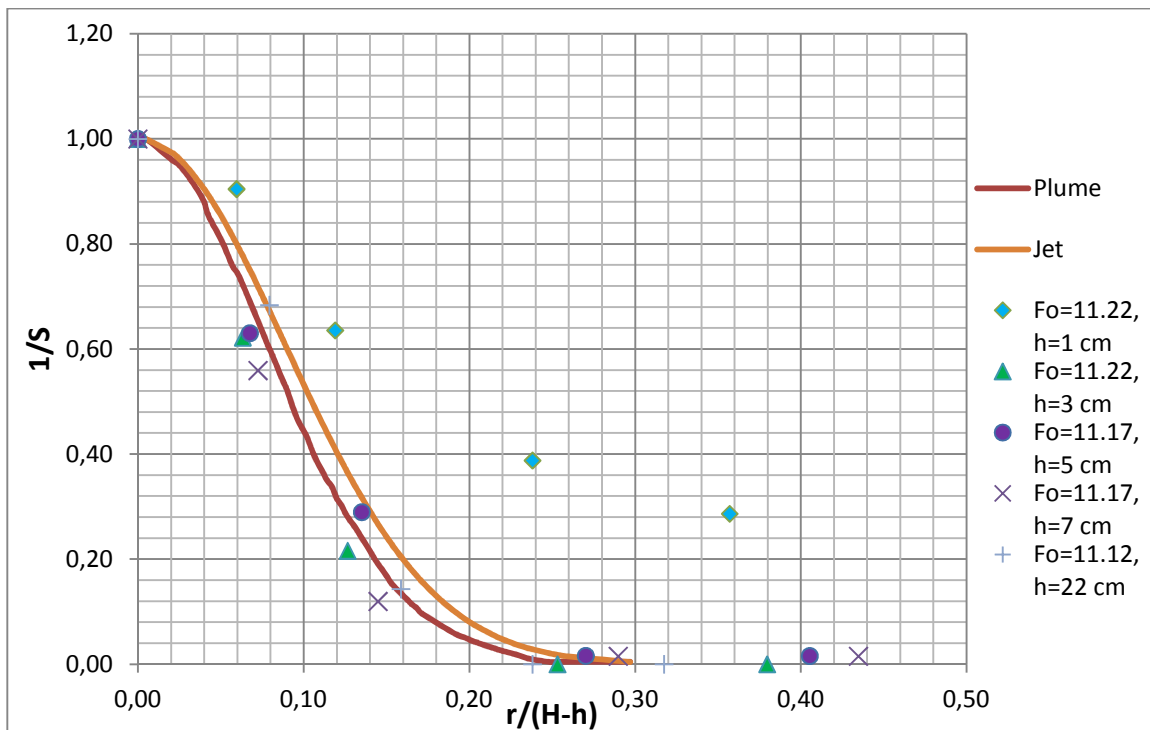
Αντίστοιχα με την αντιπροσωπευτική τρίτη φάση πειραμάτων (βλ. Παρ. 4.1.8) πάρθηκαν εγκάρσιες μετρήσεις αλατότητας και για τις υπόλοιπες φάσεις, στις οποίες προσεγγίστηκαν οι τιμές $F_o=23$, $F_o=17$ και $F_o=11$. Οι αντίστοιχοι με τον Πίνακα 4.3 πίνακες μετρήσεων παρατίθενται στο Παράρτημα Γ για κάθε F_o . Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης καθώς και κατανομές για απλή φλέβα και πλούμιο κατά Papanicolaou & List (1988) για τις τρεις αυτές φάσεις πειραμάτων, καθώς και οι κατανομές που προέκυψαν με το πρόγραμμα Surfer. Για λόγους καλής εποπτείας και σύγκρισης των αποτελεσμάτων παρατίθενται εκ νέου και οι κατανομές που αντιστοιχούν στην τρίτη φάση πειραμάτων.



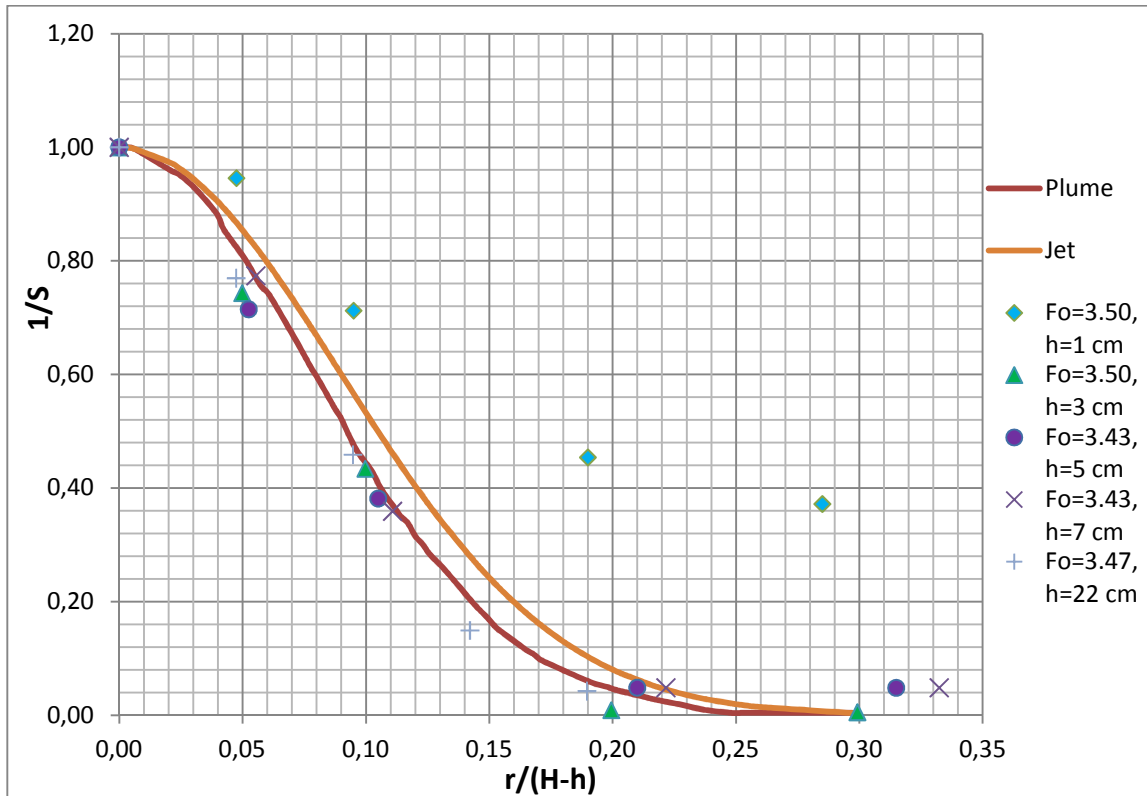
Σχήμα 4.10 Αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης για την πρώτη φάση πειραμάτων ($F_o \approx 23$) καθώς και κατανομές για απλή φλέβα και πλούμιο κατά Papanicolaou & List (1988).



Σχήμα 4.11 Αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης για την δεύτερη φάση πειραμάτων ($Fo \approx 17$) καθώς και κατανομές για απλή φλέβα και πλούμιο κατά Papanicolaou & List (1988).



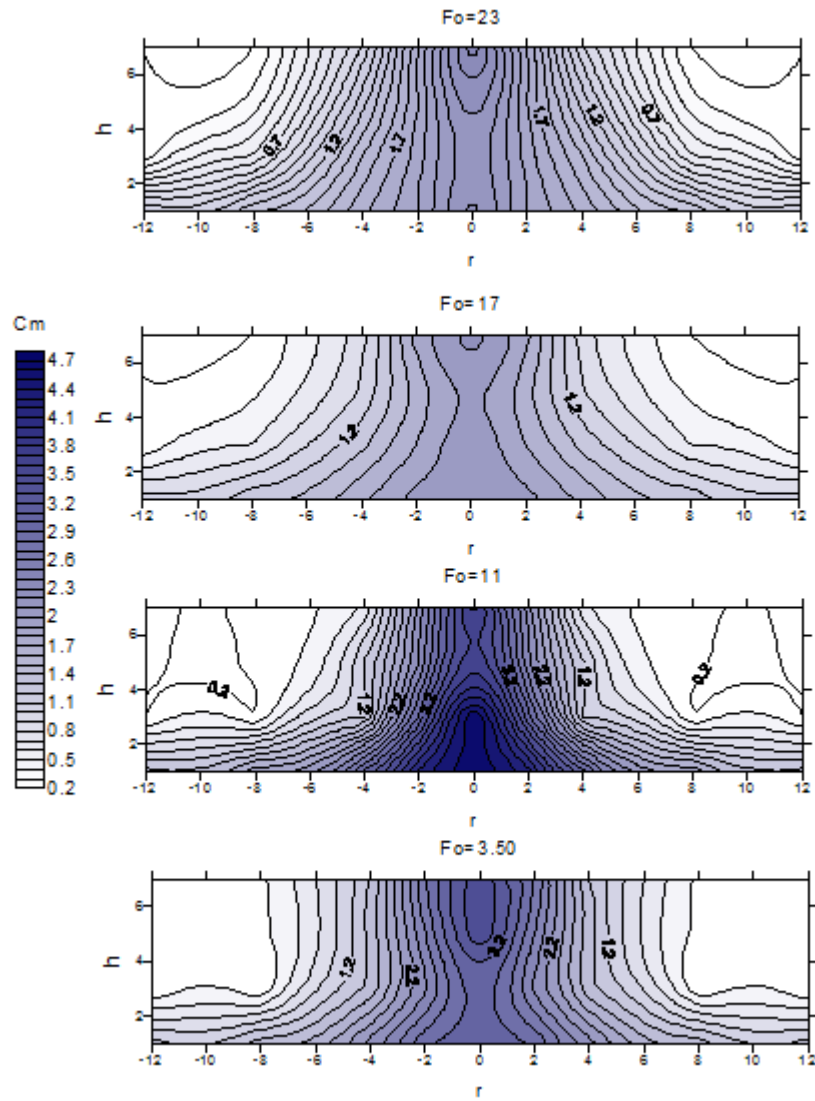
Σχήμα 4.12 Αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης για την τέταρτη φάση πειραμάτων ($Fo \approx 11$) καθώς και κατανομές για απλή φλέβα και πλούμιο κατά Papanicolaou & List (1988).



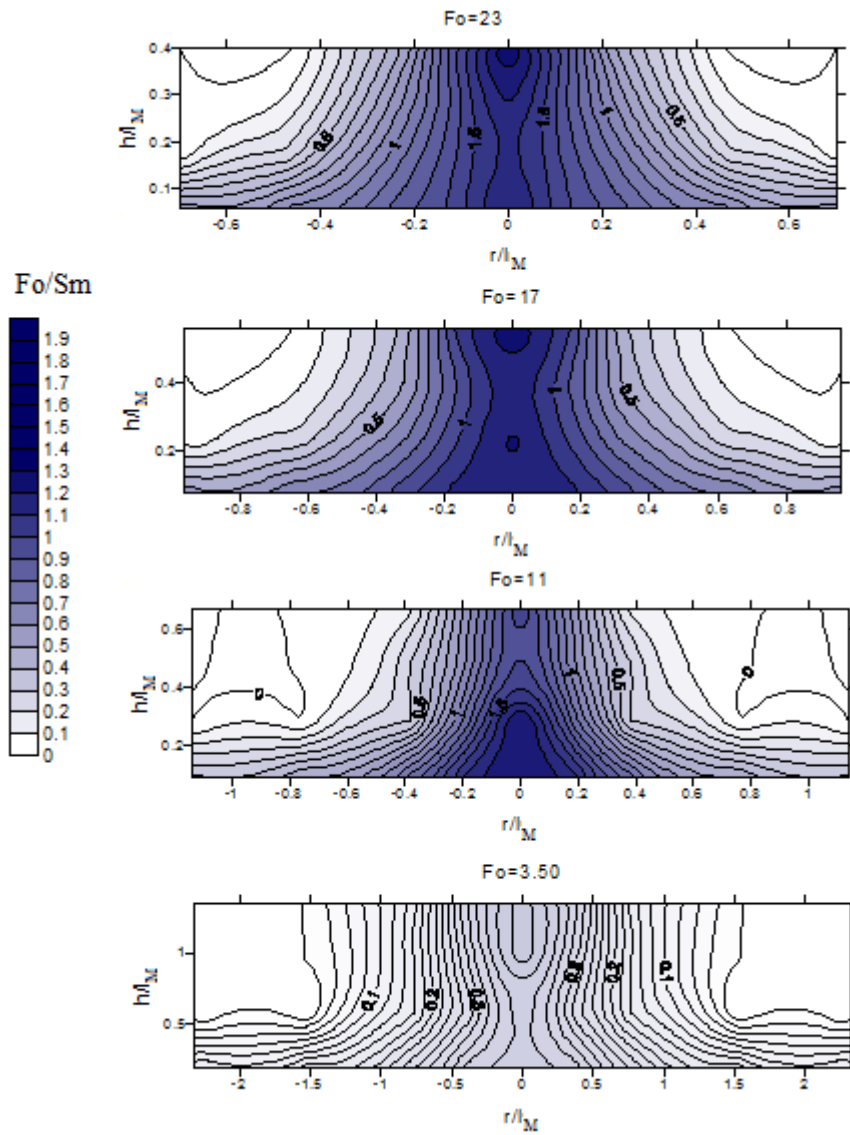
Σχήμα 4.13 Αδιαστατοποιημένες κατανομές μέσης χρονικά συγκέντρωσης για την τρίτη φάση πειραμάτων ($F_o \approx 3.50$) καθώς και κατανομές για απλή φλέβα και πλούμιο κατά Papanicolaou & List (1988).

Ακολούθως παρατίθενται οι κατανομές μετρημένων συγκεντρώσεων C_m για κάθε F_o μέχρι $h=7$ cm, με ενιαία κλίμακα χρώματος για λόγους σύγκρισης όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα Surfer (Σχήμα 4.14).

Τέλος στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι κατανομές του αδιαστατοποιημένου μεγέθους F_o/S_m για τις τέσσερις φάσεις πειραμάτων με ενιαία κλίμακα χρώματος.



Σχήμα 4.14 Κατανομές μετρημένων συγκεντρώσεων C_m για $F_o \approx 23, 17, 11$ και 3.50 μέχρι $h=7$ cm με ενιαία κλίμακα χρώματος.



Σχήμα 4.15 Αδιαστατοποιημένες κατανομές Fo/S_m για $Fo \approx 23, 17, 11$ και 3.50 με ενιαία κλίμακα χρώματος.

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στην Παράγραφο 4.2.3 δίνονται τα διάγραμμα της αξονικής διάλυσης S_c , η οποία αδιαστατοποιείται με τον F_o , ως προς την απόσταση h από το οριζόντιο στερεό όριο, η οποία αδιαστατοποιείται με την κλίμακα l_M . Όπως προαναφέρθηκε και για το τυπικό πείραμα, παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η απόσταση από το στερεό όριο οι μετρημένες τιμές διάλυσης μειώνονται ακολουθώντας την τάση των αντίστοιχων τιμών που προβλέπονται από την θεωρία των List & Imberger. Ωστόσο, στην άμεση γειτονία του στερεού ορίου παρατηρείται αλλαγή κλίσης των μετρημένων τιμών η οποία προκύπτει ως και ανεστραμμένη για $F_o=16.75$ και $F_o=3.47$, ενώ για $F_o=22.59$ και $F_o=11.12$ παρατηρείται πιο ήπια μεταβολή. Η αλλαγή αυτή της κλίσης έχει ως συνέπεια πολύ κοντά στον πυθμένα να μετρώνται τιμές πολύ χαμηλότερες από τις θεωρητικές για ελεύθερα εξελισσόμενες φλέβες, καθώς και από αυτές που λαμβάνονται σε λίγο μεγαλύτερη απόσταση, αλλά πάντα στην άμεση γειτονία του στερεού ορίου.

Η συμπεριφορά αυτή της φλέβας πολύ κοντά στο στερεό όριο μπορεί να αποδοθεί στην αδυναμία της τελευταίας να συμπαρασύρει νερό του αποδέκτη, ενώ παράλληλα ξεκινάει και αναπτύσσεται το ρεύμα πυκνότητας. Το κατακόρυφο εύρος της επιρροής του οριζόντιου πυθμένα μπορεί να αποτυπωθεί ως η απόσταση h_D , πέραν της οποίας δεν παρατηρείται η προαναφερθείσα μεταβολή στις μετρημένες διαλύσεις. Στον Πίνακα 5.1 δίνεται η απόσταση h_D όπως υπολογίστηκε για κάθε F_o της σειράς των πειραμάτων, καθώς και σε αδιάστατους όρους h_D/l_M . Επίσης υπολογίζεται και η αδιαστατοποιημένη απόσταση ακροφυσίου-πυθμένα (H/l_M) για κάθε περίπτωση. Παρατηρείται ότι για συνθήκες ανωστικής φλέβας στο σημείο

Πίνακας 5.1 Εύρος επιρροής h_D του οριζόντιου στερεού ορίου στην αξονική διάλυση κατακόρυφης φλέβας.

Πειράματα	F_o	H/l_M	h_D (cm)	h_D/l_M
26/8/13-EXP1	22.59	2.82	4.28	0.25
27/8/13-EXP2	16.75	3.80	4.23	0.34
31/8/13-EXP1	11.12	3.31	3.17	0.30
29/8/13-EXP1	3.47	8.24	2.96	0.57

πρόσκρουσης ($1 < H/l_M < 5$) το εύρος επιρροής προκύπτει σε αδιάστατους όρους (h_D/l_M) μεταξύ των τιμών 0.25 και 0.34. Για τις ίδιες συνθήκες ($1 < H/l_M < 5$), αλλά για δισδιάστατη φλέβα οι Cavaletti & Davies (2003) εκτίμησαν $h_D/l_M \approx 0.4$, άρα μεγαλύτερο εύρος επιρροής. Παρόμοιο συμπέρασμα προκύπτει και για συνθήκες πλουμίου στο σημείο πρόσκρουσης ($H/l_M > 5$), όπου στην παρούσα εργασία προέκυψε $h_D/l_M = 0.57$, ενώ οι Cavaletti & Davies στα δύο σχετικά πειράματα που διεξήγαγαν εκτίμησαν ότι $h_D/l_M = 0.6-0.7$. Αυτές οι διαφορές ήταν αναμενόμενες, δεδομένου ότι στην περίπτωση της δισδιάστατης φλέβας η ανάπτυξη της περιορίζεται σε μία κατεύθυνση.

Στον Πίνακα 5.2 συνοψίζονται τα αποτελέσματα μετρήσεων διάλυσης για αποστάσεις $h=1$ cm και $h=4$ cm από τον οριζόντιο πυθμένα. Παρατηρείται ότι οι θεωρητικές εκτιμήσεις (υπολογισμοί) για τη διάλυση, που αφορούν ελεύθερα εξελισσόμενες φλέβες), είναι σημαντικά υψηλότερες από τις πειραματικές σε ύψος $h=1$ cm, ενώ η διαφορά αυτή εμφανίζεται μειωμένη σε ύψος $h=4$ cm. Στον ίδιο πίνακα (τελευταία στήλη) περιλαμβάνονται επίσης μετρήσεις για τον τοπικό πυκνομετρικό αριθμό F στον άξονα της φλέβας για $h=4$ cm, ο οποίος προέκυψε από τις σχέσεις της γενικευμένης θεωρίας των List & Imberger (1973).

Πίνακας 5.2 Πειραματικές και θεωρητικές μετρήσεις διάλυσης σε κατακόρυφη φλέβα.

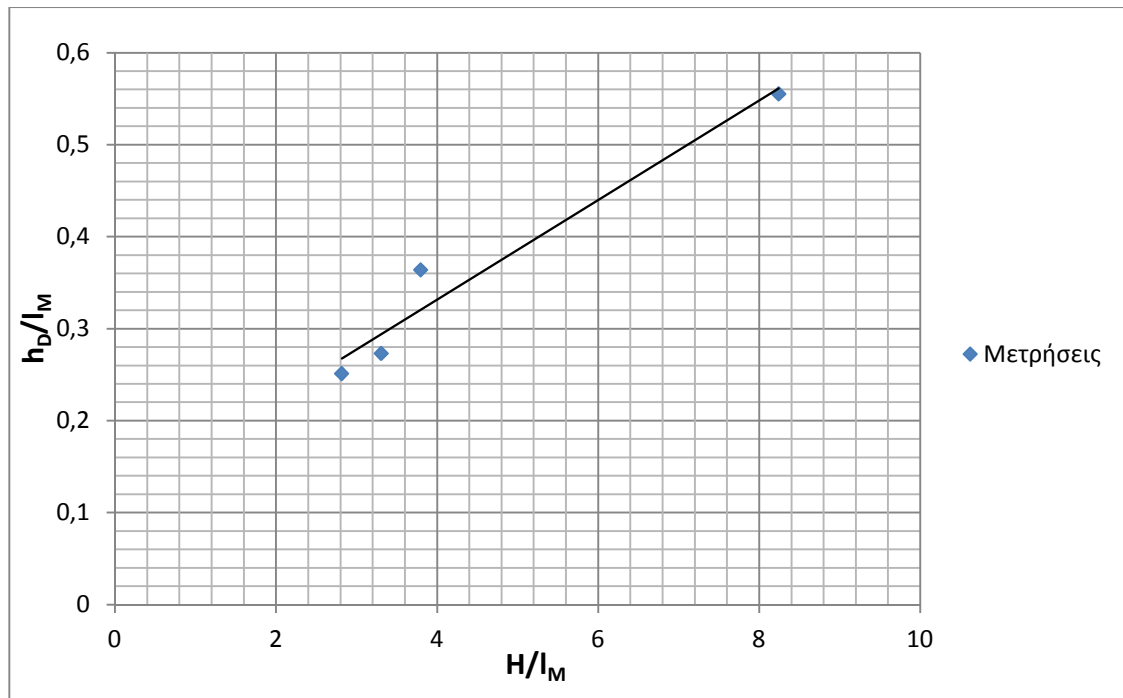
	F_o	C_o (ppt)	C_α (ppt)	$h=1$ cm			$h=4$ cm			
				Μετρήσεις	Υπολογισμοί		Μετρήσεις	Υπολογισμοί		
Πειράματα				C_{imp} (ppt)	S_c	S_c	C_{imp} (ppt)	S_c	S_c	F
26/8/13-EXP1	22.59	27.50	0.20	2.23	13.42	14.05	2.37	12.56	12.83	2.02
27/8/13-EXP2	16.75	27.70	0.20	2.13	14.27	16.00	2.04	14.94	14.52	1.81
31/8/13-EXP1	11.12	28.00	0.20	4.27	6.83	8.56	4.48	6.49	7.49	1.91
29/8/13-EXP1	3.47	27.60	0.20	3.51	8.28	11.00	3.27	8.94	9,76	1.55

Από τα στοιχεία του Πίνακα 5.1 προκύπτει το διάγραμμα του Σχήματος 5.1, στο οποίο απεικονίζεται η συσχέτιση των αδιαστατοποιημένων αποστάσεων h_D/l_M ως προς τις αδιαστατοποιημένες αποστάσεις της πηγής (ακροφύσιο) από το στερεό όριο H/l_M . Φαίνεται ότι η αδιαστατοποιημένη ποσότητα h_D/l_M συσχετίζεται γραμμικά με την H/l_M ως εξής:

$$h_D/l_M = 0.054(H/l_M) + 0.118 \quad (5.1)$$

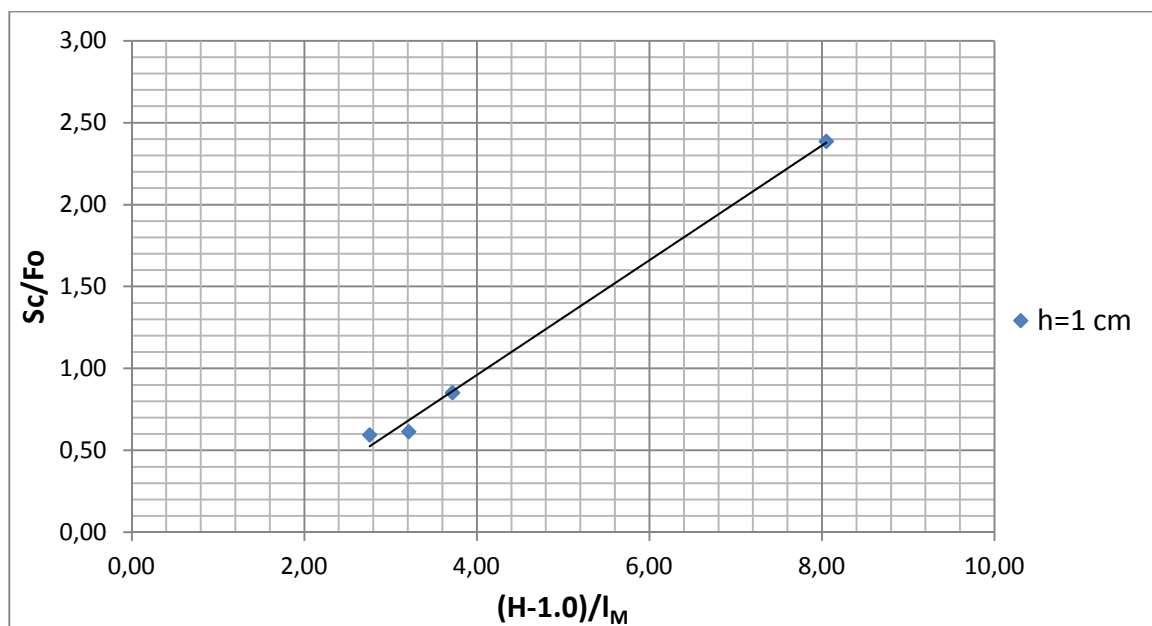
Επίσης, προκύπτει (βλ. Σχ. 5.2) ότι η αδιαστατοποιημένη διάλυση S_c/F_o σε ύψος $h=1$ cm συσχετίζεται γραμμικά με την αδιαστατοποιημένη απόσταση από την πηγή $(H-1.0)/l_M$, ώστε

οι τιμές διάλυσης στο σημείο πρόσκρουσης να μπορούν να εκτιμηθούν με βάση την σχέση (5.2).



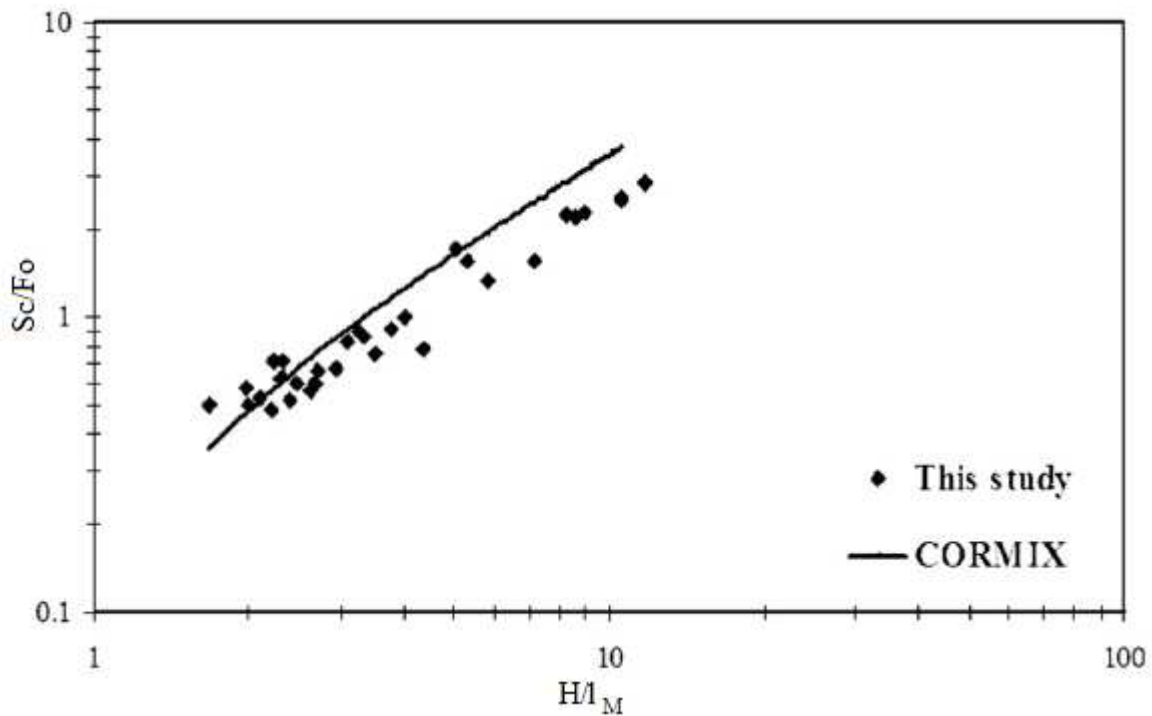
Σχήμα 5.1 Συσχέτιση του αδιαστατοποιημένου εύρους επιρροής του πυθμένα h_D/l_M με την αδιαστατοποιημένη απόσταση πηγής-στερεού ορίου H/l_M .

$$S_c/F_o = 0.349 (H - 1.0)/l_M - 0.434 \quad (5.2)$$



Σχήμα 5.2 Συσχέτιση της αδιαστατοποιημένης αξονικής διάλυσης S_c/F_o για $h=1$ cm με την αδιαστατοποιημένη απόσταση από την πηγή $(H-1.0)/l_M$.

Σε παρόμοια αποτελέσματα για τη διάλυση στο σημείο πρόσκρουσης κατέληξαν και οι Abessi *et al.* (2012), συσχετίζοντας την αδιαστατοποιημένη διάλυση S_c/F_o με το αδιαστατοποιημένο βάθος του αποδέκτη H/l_M . Για βάθη $H \gg l_M$ και τις πειραματικές συνθήκες των Abessi *et al.* (2012), η τροχιά της φλέβας τελικά καταλήγει να έχει κατακόρυφη διεύθυνση. Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα καθώς και η πρόβλεψη των αποτελεσμάτων με χρήση του μοντέλου CORMIX1.



Σχήμα 5.3 Αδιαστατοποιημένη αξονική διάλυση στο σημείο πρόσκρουσης (πηγή: Abessi *et al.*, 2012).

Για την διαταραχή των αδιαστατοποιημένων κατανομών της μέσης χρονικά συγκέντρωσης (βλ. Παρ. 4.2.4) εξάγονται τα εξής:

α) Για $F_o \approx 23$ παρατηρείται σημαντική απόκλιση της κατανομής της μέσης χρονικά συγκέντρωσης από την κατανομή Gauss (για απλή φλέβα) σε ύψος $h=1$ cm με συνέπεια να εμφανίζονται πολύ υψηλότερες τιμές, ενώ προκύπτει πολύ μικρότερη απόκλιση για $h=3$ cm. Για $h \geq 5$ cm οι αποκλίσεις που παρατηρούνται είναι αμελητέες. Επιπλέον, από τα δεδομένα που δίνονται για την ποσότητα $(H-h)/l_M$ στον Πίνακα Γ.1 του Παραρτήματος Γ προκύπτει ότι η φλέβα παραμένει ανωστική μέχρι και το σημείο πρόσκρουσης προσεγγίζοντας περισσότερο χαρακτηριστικά απλής φλέβας (jetlike).

β) Για $F_0 \approx 17$ παρατηρείται σημαντική απόκλιση από την κατανομή Gauss (για πλούμιο) σε ύψος $h=1$ cm (δίνοντας υψηλότερες τιμές), ενώ για $h=3$ cm η απόκλιση είναι πολύ μικρή. Ομοίως για $h \geq 5$ cm δεν παρατηρείται απόκλιση από τις δύο γκαουσιανές. Από τα δεδομένα που δίνονται για την ποσότητα $(H-h)/l_M$ στον Πίνακα Γ.2 του Παραρτήματος Γ προκύπτει ότι η φλέβα παρόλο που παραμένει ανωστική μέχρι και το σημείο πρόκρουσης, εντούτοις ήδη για $h \leq 5$ cm προσεγγίζει περισσότερο χαρακτηριστικά πλουμίου (plumelike).

γ) Για $F_0 \approx 11$ παρατηρείται ομοίως σημαντική απόκλιση από την γκαουσιανή για πλούμιο σε ύψος $h=1$ cm, ενώ για $h \geq 3$ cm οι αποκλίσεις είναι αμελητέες. Από τα στοιχεία του Πίνακα Γ.3 του Παραρτήματος Γ για το μέγεθος $(H-h)/l_M$, συνάγεται ότι η φλέβα είναι ανωστική στο πεδίο ροής της και για $h=1$ cm προσεγγίζει περισσότερο χαρακτηριστικά πλουμίου.

δ) Για $F_0 \approx 3.50$ παρατηρείται αντίστοιχα αξιοσημείωτη απόκλιση από την κατανομή Gauss (για πλούμιο) σε ύψος $h=1$ cm, ενώ για $h \geq 3$ cm δεν παρατηρούνται αποκλίσεις. Επίσης, από τα δεδομένα του Πίνακα Γ.4 προκύπτει ότι για $h \leq 7$ cm, η φλέβα έχει μετατραπεί πλήρως σε πλούμιο.

Από τις αδιαστατοποιημένες κατανομές F_0/S_m που προέκυψαν με χρήση του προγράμματος Surfer (βλ. Σχ. 4.15), φαίνεται ότι για $F_0 \approx 3.50$ και $F_0 \approx 11$, το ρεύμα πυκνότητας ξεκινά να διαμορφώνεται σε αδιαστατοποιημένη απόσταση $r/l_M=1-1.5$ από τον άξονα, με αδιαστατοποιημένο πάχος $h/l_M=0.5$ για $F_0 \approx 3.50$ και $h/l_M=0.2$ για $F_0 \approx 11$. Από τις κατανομές για $F_0 \approx 17$ και $F_0 \approx 23$ δεν είναι εμφανής μια σταθεροποίηση του αντίστοιχου πάχους στο δοθέν αδιαστατοποιημένο εύρος r/l_M , με αποτέλεσμα να μην μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα για το σημείο εκκίνησης του ρεύματος πυκνότητας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε πειραματικά η επίδραση οριζόντιου πυθμένα σε κατακόρυφες τυρβώδεις κυκλικές φλέβες θετικής άνωσης. Συγκεκριμένα για τέσσερις αρχικούς πυκνομετρικούς αριθμούς Froude ($F_o \approx 23$, $F_o \approx 17$, $F_o \approx 11$ και $F_o \approx 3.50$) μελετήθηκε η διαταραχή που προκαλεί η παρουσία του πυθμένα στην αξονική διάλυση των φλεβών καθώς και στις εγκάρσιες κατανομές των μέσων χρονικά συγκεντρώσεων. Επιπλέον, όπου ήταν εφικτό, εκτιμήθηκε το σημείο εκκίνησης του ρεύματος πυκνότητας και το πάχος του τελευταίου σε αδιάστατους όρους. Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι τα ακόλουθα:

- 1) Η παρουσία του οριζόντιου στερεού ορίου (πυθμένας) επηρεάζει την αξονική διάλυση των φλεβών μέχρι ύψους h_D , το οποίο προσδιορίζεται για κάθε F_o .
- 2) Το αδιαστατοποιημένο με την κλίμακα μήκους l_M ύψος h_D συσχετίζεται γραμμικά με την ομοίως αδιαστατοποιημένη κατακόρυφη απόσταση πηγής-οριζόντιου πυθμένα.
- 3) Η διάλυση στο σημείο πρόσκρουσης με το στερεό όριο εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη συγκρινόμενη με την αντίστοιχη διάλυση που αφορά ελεύθερα εξελισσόμενη φλέβα και εκτιμάται θεωρητικά.
- 4) Η αξονική διάλυση στο σημείο πρόσκρουσης συσχετίζεται γραμμικά με την απόσταση πηγής-σημείου πρόσκρουσης. Η γραμμική συσχέτιση προκύπτει αν η αξονική διάλυση αδιαστατοποιηθεί με τον F_o και η απόσταση από την πηγή με την κλίμακα μήκους l_M .
- 5) Η παρουσία του οριζόντιου στερεού ορίου διαταράσσει τις κατανομές των αδιαστατοποιημένων μέσων χρονικά συγκεντρώσεων για ένα ύψος επιρροής, με αποτέλεσμα να καταγράφονται υψηλότερες τιμές συγκέντρωσης από αυτές που προκύπτουν από τις κατανομές Gauss.
- 6) Το ύψος επιρροής των προφίλ συγκεντρώσεων εμφανίζεται, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης, να αυξάνει οριακά ακολουθώντας την αύξηση του F_o . Αυτό υποδηλώνει επίσης ότι όσο περισσότερο η φλέβα προσεγγίζει τη συμπεριφορά πλουμίου το προαναφερθέν ύψος επιρροής μειώνεται οριακά.
- 7) Σε απόσταση $h=1$ cm από τον οριζόντιο πυθμένα παρατηρείται σημαντική διαταραχή της κατανομής μέσης χρονικά συγκεντρώωσης για όλες τις περιπτώσεις F_o που εξετάζονται.

8) Με βάση τις μετρήσεις της παρούσας εργασίας και με τη βοήθεια του προγράμματος Surfer, έγινε εφικτό για τις περιπτώσεις $F_0 \approx 11$ και $F_0 \approx 3.50$ να εξαχθούν σε αδιάστατους όρους (κλίμακα I_M) τόσο μια εκτίμηση για την απόσταση από τον άξονα, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η αρχή του ρεύματος πυκνότητας όσο και για το πάχος του τελευταίου.

Μία ενδιαφέρουσα ερευνητική πρόταση, που θα μπορούσε να συμπεριληφθεί σε μια μελλοντική εργασία, είναι να εξεταστεί και να επιβεβαιωθεί για ένα μεγαλύτερο εύρος F_0 η γραμμική συσχέτιση μεταξύ αδιαστατοποιημένου εύρους επιρροής του στερεού ορίου στην αξονική διάλυση και της αδιαστατοποιημένης απόστασης του τελευταίου από την πηγή (κλίμακα I_M). Επίσης, για να μπορέσουν να εξαχθούν αδιαστατοποιημένες τιμές για την αρχή καθώς και το πάχος του ρεύματος πυκνότητας και για τις περιπτώσεις $F_0 \approx 23$ και $F_0 \approx 17$, θα πρέπει στα πλαίσια μίας μελλοντικής εργασίας να ληφθούν μετρήσεις συγκεντρώσεων σε περισσότερα σημεία εγκάρσια στον άξονα της φλέβας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Νάνου, Α. (2013), Σημειώσεις Τυρβώδεις Ανωστικές φλέβες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
2. Νουτσόπουλος, Γ. – Χριστοδούλου, Γ., 1996. Μαθήματα Μηχανικής Των Ρευστών, Έκδοση ΕΜΠ.
3. Νταρακάς, Ε. (2006), Επεξεργασία βιομηχανικών αποβλήτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
4. Παπακωνσταντής Η., (2009). Τυρβώδεις Κυκλικές Φλέβες Αρνητικής Άνωσης υπό Γωνία σε Ακίνητο Ομογενή Αποδέκτη. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα.
5. Παπανικολάου, Π., (2006). Σημειώσεις Πειραματικής Υδραυλικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
6. Παπανικολάου, Π., (2009). Σημειώσεις Τυρβώδεις Ανωστικές φλέβες, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών.
7. Ταμπακίδης, Χ. (2012), Συγκριτική Μελέτη και Αξιολόγηση των Παραμέτρων Ποιότητας των Υδάτων και των Αστικών Λυμάτων, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Abessi, O., Saeedi, M., Bleninger, T. & Davidson, M. (2012). Surface discharge of negatively buoyant effluent in unstratified stagnant water. *J. of Hydro-Environ. Res.* 6, 181-193.
2. Cavalletti, A. & Davies, P.A. (2003). Impact of vertical, turbulent, planar, negatively buoyant jet with rigid horizontal bottom boundary. *J. Hydraul. Eng ASCE* 129(1), 54-62.
3. E & P Forum. (1994). “ North Sea produced water: Fate and effects in the marine environment” *Rep. No. 2.62/204*, E & P Forum, London.
4. Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. & Brooks, N. H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic/Press.

5. Furnes, G. (1994). "Discharges of produced water from production platforms in the North Sea." *Rep. No. R-064641*, E & P Division, Norsk Hydro, Bergen, Norway.
6. Hossain, M. S. & Rodi, W. (1982). A Turbulence Model for Buoyant Flows and Its Application to Vertical Buoyant Jets. *Turbulent Buoyant Jets and Plumes* (ed. W. Rodi), pp.121-178. Pergamon.
7. Jirka, G. H. (2004). Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single round jet. *Envir. Fluid Mech.* 4, 1–56.
8. Jirka, G. H. (2008). Improved Discharge Configurations for Brine Effluents from Desalination Plants. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 134(1), 116–120.
9. Jirka, G. H. (1982). Turbulent Buoyant Jets in Shallow Fluid Layers. *Turbulent Buoyant Jets and Plumes* (ed. W. Rodi), pp. 69 – 119. Pergamon.
10. Kotsovinos, N. E. (1975). A study of the entrainment and turbulence in a plane buoyant jet. Tech. Rep. KH-R-32. W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Inst. of Technology, California.
11. List, E. J. & Imberger, J. (1973). Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes. *J. Hydraul. Div. ASCE* 99, 1461–1474.
12. List, E. J. (1982). Mechanics of turbulent buoyant jets and plumes. In *Turbulent Buoyant Jets and Plumes* (ed. W. Rodi), pp. 1-68. Pergamon.
13. Maclatchy, M. R. (1999). Radially spreading surface flows. Department of Civil Engineering, The University of British Columbia, Vancouver, Canada.
14. Nikiforakis, I.K., Christodoulou, G.C. & Stamou, A.I. (2013). Spreading of vertical dense jets on a sloping bottom: concentration measurements. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Environmental Science and Technology*, Athens, Greece.
15. Noutsopoulos, G. & Yannopoulos, P. (1987). The round vertical turbulent buoyant jet. *J. Hydraul. Res.* 25, 481–502.
16. Papanicolaou, P. N. & List, J. E. (1987). Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets. *Intl J. Heat Mass Transfer* 30, 2059–2071.
17. Papanicolaou, P. N. & List, J. E. 1988 Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *J. Fluid Mech.* 195, 341–391.
18. Roberts, P. J. W., Ferrier, A. & Daviero, G. 1997 Mixing in inclined dense jets. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 123(8), 693–699.
19. Rodi, W. (1982). *Turbulent Buoyant Jets and Plumes*. Pergamon.

20. Stamou, A.I., Nikiforakis, I.K. (2013). Integrated modeling of single port, steady-state thermal discharges in unstratified coastal waters. *Environ Fluid Mech*, volume 13, issue 4, p.p. 309-336.
21. Streeter, V. L., Wylie, E. B., Bedford, K. W. (1998). *Fluid Mechanics*. 9th Edition, McGraw-Hill.
22. Tsihrintzis, V.A. (1988). Theoretical and experimental investigation of three – dimensional boundary – attached density currents, PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA.
23. Wang, H. & Law, A. W.-K. (2002). Second-order integral model for a round turbulent buoyant jet. *J. Fluid Mech.* 459, 397–428.
24. Wright, S. (1984). Buoyant jets in density stratified cross-flow. *J. Hydraul. Div. ASCE* 110(5), 643-656.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

A. Προσδιορισμός πυκνότητας αλατόνερου από μετρήσεις συγκέντρωσης και θερμοκρασίας

Με τη χρήση του οργάνου YSI 30 εκτιμώνται, όπως προαναφέρθηκε, η αλατότητα και η θερμοκρασία κάθε διαλύματος. Με γνωστές την αλατότητα και την θερμοκρασία είναι εφικτό να εκτιμηθεί με ακρίβεια η πυκνότητα του διαλύματος. Σύμφωνα με τους Streeter *et al.* (1998), η πυκνότητα του νερού (με μηδενική αλατότητα) συναρτήσει της θερμοκρασίας του T (°C) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho_w(T) = 999.9399 + \frac{4.216485}{10^2}T - \frac{7.097451}{10^3}T^2 + \frac{3.509571}{10^5}T^3 - \frac{9.9037785}{10^8}T^4 \quad (A.1)$$

Η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού συγκέντρωσης σε αλάτι (αλατότητας) c (ppt) και θερμοκρασίας T (°C) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\begin{aligned} \rho(c, T) = \rho_w(T) + c \left(0.824493 - \frac{4.0899}{10^3}T + \frac{7.6438}{10^5}T^2 - \frac{8.2467}{10^7}T^3 + \frac{5.3875}{10^9}T^4 \right) \\ + c^{3/2} \left(\frac{-5.72466}{10^3} + \frac{1.0227}{10^4}T - \frac{1.6546}{10^6}T^2 \right) + c^2 \frac{4.8314}{10^4} \end{aligned} \quad (A.2)$$

Η προηγούμενη σχέση είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό της πυκνότητας θαλάσσιου νερού και βασίζεται στις τιμές του πίνακα των Fischer *et al.* (1979). Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι τιμές του πίνακα αυτού, αλλά θεωρείται πιο εύχρηστο ο υπολογισμός να γίνεται με χρήση μιας ρητής σχέσης όπως η σχέση (A.2) (Παπακωνσταντής, 2009, σ.114).

Ωστόσο, η πυκνότητα διαλύματος αλατόνερου με την ίδια αλατότητα και θερμοκρασία με θαλάσσιο νερό είναι μικρότερη, επειδή το θαλάσσιο νερό περιέχει και άλλου είδους προσμίξεις που αυξάνουν την πυκνότητά του. Ο Tsihrintzis (1988) παρουσίασε εμπειρική σχέση υπολογισμού της πυκνότητας Δρ συναρτήσει της συγκέντρωσης (αλατότητας) του διαλύματος, κατά την οποία πρέπει να διορθωθεί η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού, ώστε να προκύψει η πυκνότητα του διαλύματος νερού και NaCl. Όμως τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σχετικά περιορισμένα και η σχέση που προέκυψε (Δρ=0.028+0.047c) ισχύει για αλατότητες μικρότερες από 25 ppt. Ο Παπακωνσταντής (2009), στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής, ανέπτυξε μία μεθοδολογία εκτίμησης της πυκνότητας του αλατόνερου από την πυκνότητα του θαλάσσιου νερού μέσω μιας συστηματικής διόρθωσης της πυκνότητας του θαλάσσιου νερού για μεγάλο εύρος

συγκεντρώσεων. Για το σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν δεδομένα σχετικά με την πυκνότητα διαλύματος νερού και NaCl. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρέχονται από το Salt Institute (<http://www.saltinstitute.org>) για την πυκνότητα διαλύματος νερού και NaCl για διάφορες τιμές της αλατότητας και σε διάφορες θερμοκρασίες (Πίνακας Α.1). Στη συνέχεια θεωρείται ότι η πυκνότητα διαλύματος νερού και NaCl πρακτικά ταυτίζεται με την πυκνότητα διαλύματος νερού με μαγειρικό αλάτι.

Πίνακας Α.1 Πυκνότητα διαλύματος νερού και NaCl για διάφορες τιμές αλατότητας και θερμοκρασίας (πηγή: Salt Institute, <http://www.saltinstitute.org>).

Αλατότητα	Πυκνότητα [Kg/m ³]				
	T=0 °C	T=10 °C	T=20 °C	T=25 °C	T=30 °C
0	999.94	999.69	998.21	997.07	995.68
10	1007.47	1007.07	1005.34	1004.09	1002.61
20	1015.09	1014.42	1012.46	1011.12	1009.57
40	1030.38	1029.20	1026.80	1025.30	1023.61
60	1045.75	1044.08	1041.27	1039.63	1037.81
80	1061.21	1059.07	1055.89	1054.12	1052.19

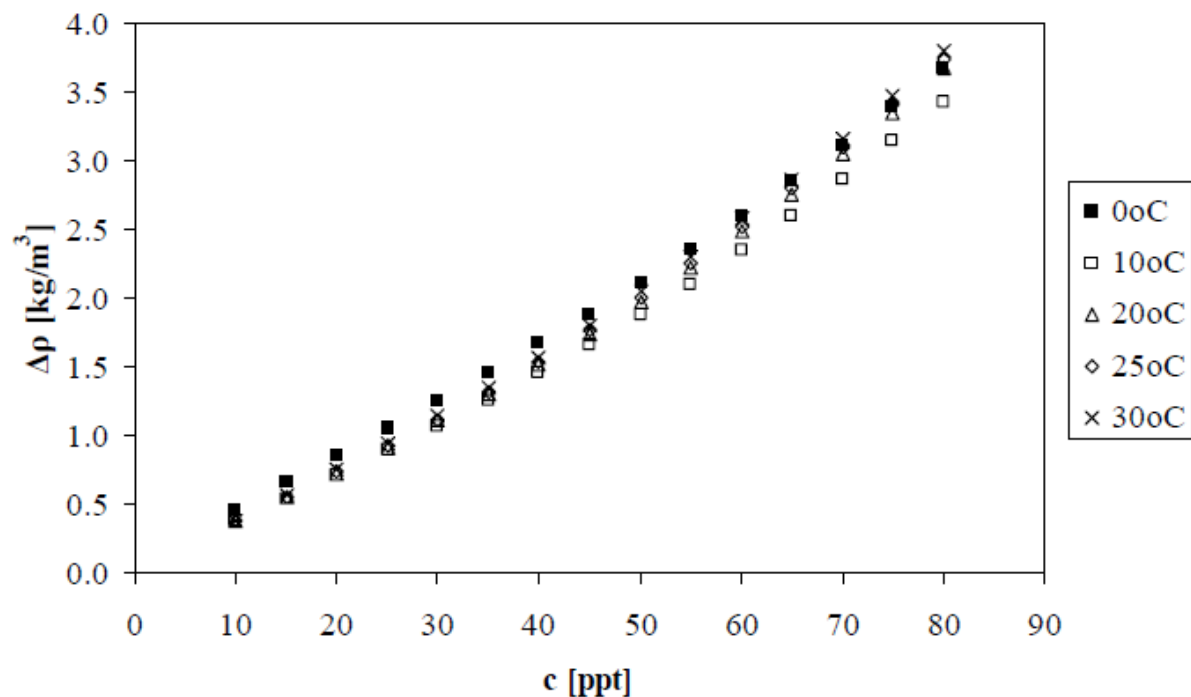
Ο Παπακωνσταντής (2009) υπολόγισε για κάθε θερμοκρασία την πυκνότητα συναρτήσεως της αλατότητας c με βάση τα δεδομένα του Πίνακα Α.1. Προκειμένου η καμπύλη για $c=0$ να διέρχεται ακριβώς από την πυκνότητα του καθαρού νερού αυτής της θερμοκρασίας, υπολόγισε την διαφορά πυκνότητας διαλύματος και καθαρού νερού (διάλυμα με μηδενική αλατότητα στην ίδια θερμοκρασία) για διάφορες τιμές της αλατότητας και χάραξε την καμπύλη που ταιριάζει περισσότερο στα δεδομένα. Η συσχέτιση προέκυψε γραμμική με απόλυτη ακρίβεια (οι συντελεστές συσχέτισης R_c είναι μονάδα). Έτσι η εξίσωση της πυκνότητας προέκυψε από την άθροιση της διαφοράς και της τιμής της πυκνότητας για $c=0$. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα Α.2.

Στη συνέχεια ο Παπακωνσταντής υπολόγισε για διάφορες τιμές της αλατότητας και θερμοκρασίας τις διαφορές της πυκνότητας του διαλύματος νερού και NaCl (όπως προκύπτουν από τις εξισώσεις του Πίνακα Α.2), από την αντίστοιχη πυκνότητα θαλάσσιου νερού που προκύπτει από τη Σχ. Α.2 των Streeter *et al.* (1998) για την ίδια θερμοκρασία και αλατότητα. Η διαδικασία επαναλήφθηκε για όλες τις θερμοκρασίες που υπάρχουν δεδομένα για την πυκνότητα διαλύματος νερού και NaCl. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ένα

διάγραμμα διαφοράς πυκνότητας θαλάσσιου νερού $\Delta\rho$ (kg/m^3) και διαλύματος NaCl, για διάφορες αλατότητες c (ppt) και θερμοκρασίες T ($^{\circ}\text{C}$) (Παπακωνσταντής, 2009, σ.116, Σχ. 4-24).

Πίνακας Α.2 Σχέσεις προσδιορισμού της πυκνότητας διαλύματος νερού και NaCl συναρτήσει της αλατότητας σε διάφορες θερμοκρασίες (πηγή: Παπακωνσταντής 2009).

Θερμοκρασία T [$^{\circ}\text{C}$]	Πυκνότητα ρ [kg/m^3]	R_c
0	$999.94 + 0.766 \cdot c$	1.000
10	$999.69 + 0.7427 \cdot c$	1.000
20	$998.21 + 0.7215 \cdot c$	1.000
25	$997.07 + 0.7136 \cdot c$	1.000
30	$995.68 + 0.7068 \cdot c$	1.000



Σχήμα Α.1 Διαφορά πυκνότητας θαλάσσιου νερού και διαλύματος NaCl για διάφορες αλατότητες και θερμοκρασίες (Παπακωνσταντής, 2009, σ.116, Σχ. 4-24).

Στο διάγραμμα είναι εμφανές ότι οι διαφορές πυκνότητας εξαρτώνται κυρίως από την αλατότητα και όχι από τη θερμοκρασία, αφού όπως φαίνεται για μια συγκεκριμένη αλατότητα η διαφορά (ποσότητα σε kg/m^3 κατά την οποία διαφέρει η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού από αυτήν του διαλύματος NaCl) είναι περίπου ίδια για όλες τις θερμοκρασίες. Κατά συνέπεια κρίθηκε σκόπιμο στα πλαίσια της ίδιας διδακτορικής διατριβής

(Παπακωνσταντής, 2009), να θεωρηθεί μία μέση τιμή ως διαφορά πυκνότητας σε κάθε αλατότητα. Κατόπιν επιχειρήθηκε συσχέτιση της διαφοράς πυκνότητας με την αλατότητα και προέκυψε γραμμική μεταβολή με υψηλή ακρίβεια (Παπακωνσταντής, 2009, σ.117, Σχ. 4-25).

Έτσι, ο Παπακωνσταντής κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι δυνατόν γνωρίζοντας την αλατότητα και τη θερμοκρασία, να υπολογιστεί αρχικά η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού που αντιστοιχεί σ' αυτές τις παραμέτρους, και στη συνέχεια να μειωθεί κατά μια ποσότητα (διόρθωση) ώστε να προκύψει η πυκνότητα του διαλύματος νερού και NaCl. Η διόρθωση αυτή προέκυψε:

$$\Delta\rho = 0.0398c \quad (\text{A. 3})$$

όπου $\Delta\rho$ η διαφορά πυκνότητας σε kg/m^3 , c η αλατότητα σε ppt (kg/m^3 ή gr/l).

Η ποσότητα $\Delta\rho$ αφαιρείται από την πυκνότητα που προκύπτει από τη σχέση (A.2) και προκύπτει η πυκνότητα του διαλύματος.

Αν και η προηγούμενη επεξεργασία έχει μεγάλη σπουδαιότητα και πρακτική σημασία, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό που ενδιαφέρει κυρίως δεν είναι ο ακριβής προσδιορισμός της απόλυτης τιμής της πυκνότητας του διαλύματος αλλά η σχετική διαφορά διαλύματος αλατόνερου και υγρού του αποδέκτη (νερού με πολύ μικρή αλατότητα).

B. Αξονικές μετρήσεις αλατότητας

Πίνακας B.1 Εξαγωγή αδιαστατοποιημένων αξονικών τιμών διάλυσης και εκτίμησή τους κατά List & Imberger για το πείραμα 26/8/13-EXP1 ($F_o=22.59$).

h (cm)	H-h (cm)	C_c (ppt)	S_c	$(H-h)/l_M$	S_c/F_o	h/ l_M	List & Imberger	
							S_{ave}	$(S_{ave}/1.7)/F_o$
1	46.90	2.23	13.42	2.76	0.59	0.06	23.89	0.62
2	45.90	2.28	13.10	2.70	0.58	0.12	23.18	0.60
3	44.90	2.29	13.04	2.64	0.58	0.18	22.49	0.59
4	43.90	2.37	12.56	2.58	0.56	0.24	21.81	0.57
5	42.90	2.36	12.66	2.52	0.56	0.29	21.13	0.55
6	41.90	2.45	12.13	2.46	0.54	0.35	20.47	0.53
7	40.90	2.46	12.06	2.40	0.53	0.41	19.81	0.52
10	37.90	2.71	10.87	2.23	0.48	0.59	17.90	0.47
15	32.90	3.17	9.18	1.93	0.41	0.88	14.90	0.39
22	25.90	4.18	6.85	1.52	0.30	1.29	11.09	0.29

Πίνακας B.2 Εξαγωγή αδιαστατοποιημένων αξονικών τιμών διάλυσης και εκτίμησή τους κατά List & Imberger για το πείραμα 27/8/13-EXP2 ($F_o=16.75$).

h (cm)	H-h (cm)	C_c (ppt)	S_c	$(H-h)/l_M$	S_c/F_o	h/ l_M	List & Imberger	
							S_{ave}	$(S_{ave}/1.7)/F_o$
1	46.90	2.13	14.27	3.72	0.85	0.08	27.20	0.96
2	45.90	2.10	14.47	3.64	0.86	0.16	26.35	0.93
3	44.90	2.08	14.66	3.56	0.88	0.24	25.51	0.90
4	43.90	2.04	14.94	3.48	0.89	0.32	24.68	0.87
5	42.90	2.08	14.65	3.40	0.87	0.40	23.86	0.84
6	41.90	2.11	14.36	3.32	0.86	0.48	23.06	0.81
7	40.90	2.09	14.56	3.24	0.87	0.55	22.27	0.78
10	37.90	2.29	13.16	3.00	0.79	0.79	19.97	0.70
15	32.90	2.79	10.61	2.61	0.63	1.19	16.40	0.58
22	25.90	3.49	8.35	2.05	0.50	1.74	11.92	0.42

Πίνακας Β.3 Εξαγωγή αδιαστατοποιημένων αξονικών τιμών διάλυσης και εκτίμησή τους κατά List & Imberger για το πείραμα 31/8/13-EXP1 ($F_o=11.12$).

h (cm)	H-h (cm)	C_c (ppt)	S_c	$(H-h)/l_M$	S_c/F_o	h/l_M	List & Imberger	
							S_{ave}	$(S_{ave}/1.7)/F_o$
1	33.60	4.27	6.83	3.21	0.61	0.10	14.56	0.77
2	32.60	4.34	6.72	3.11	0.60	0.19	13.94	0.74
3	31.60	4.36	6.68	3.02	0.60	0.29	13.33	0.71
4	30.60	4.48	6.49	2.92	0.58	0.38	12.74	0.67
5	29.60	4.68	6.20	2.83	0.56	0.48	12.16	0.64
6	28.60	4.83	6.01	2.73	0.54	0.57	11.59	0.61
7	27.60	4.97	5.83	2.64	0.52	0.67	11.03	0.58
10	24.60	5.61	5.14	2.35	0.46	0.96	9.44	0.50
15	19.60	7.18	3.99	1.87	0.36	1.43	7.02	0.37
22	12.60	10.62	2.67	1.20	0.24	2.10	4.13	0.22

Πίνακας Β.4 Εξαγωγή αδιαστατοποιημένων αξονικών τιμών διάλυσης και εκτίμησή τους κατά List & Imberger για το πείραμα 29/8/13-EXP1 ($F_o=3.47$).

h (cm)	H-h (cm)	C_c (ppt)	S_c	$(H-h)/l_M$	S_c/F_o	h/l_M	List & Imberger	
							S_{ave}	$(S_{ave}/1.7)/F_o$
1	42.10	3.51	8.28	8.05	2.39	0.19	18.71	3.17
2	41.10	3.37	8.65	7.86	2.49	0.38	18.00	3.05
3	40.10	3.20	9.12	7.67	2.63	0.57	17.29	2.93
4	39.10	3.27	8.94	7.48	2.57	0.76	16.60	2.81
5	38.10	3.50	8.30	7.29	2.39	0.96	15.92	2.70
6	37.10	3.51	8.28	7.09	2.38	1.15	15.25	2.58
7	36.10	3.60	8.06	6.90	2.32	1.34	14.59	2.47
10	33.10	3.94	7.32	6.33	2.11	1.91	12.70	2.15
15	28.10	4.91	5.82	5.37	1.68	2.87	9.79	1.66
22	21.10	6.73	4.20	4.03	1.21	4.21	6.27	1.06

Γ. Εγκάρσιες ως προς τον άξονα της φλέβας μετρήσεις αλατότητας

Πίνακας Γ.1 Εγκάρσιες μετρήσεις αλατότητας και εξαγωγή αδιαστατοποιημένων τιμών για την πρώτη φάση πειραμάτων ($F_o \approx 23$).

h (cm)	H-h (cm)	r (cm)	C_m (ppt)	S_m	1/S	$r/(H-h)$	$(H-h)/l_M$	F_o/S_m	r/l_M	h/l_M
1	46.90	0	2.23	13.50	1.00	0.00	2.70	1.71	0.00	0.06
1	46.90	2	1.89	16.18	0.83	0.04	2.70	1.42	0.12	0.06
1	46.90	4	1.68	18.50	0.73	0.09	2.70	1.25	0.23	0.06
1	46.90	8	1.30	24.90	0.54	0.17	2.70	0.93	0.46	0.06
1	46.90	12	1.11	30.27	0.45	0.26	2.70	0.76	0.69	0.06
3	44.90	0	2.16	14.05	1.00	0.00	2.62	1.62	0.00	0.17
3	44.90	2	1.85	16.66	0.84	0.04	2.62	1.37	0.12	0.17
3	44.90	4	1.51	21.04	0.67	0.09	2.62	1.08	0.23	0.17
3	44.90	8	0.61	66.92	0.21	0.18	2.62	0.34	0.47	0.17
3	44.90	12	0.24	611.59	0.02	0.27	2.62	0.04	0.70	0.17
5	42.90	0	2.26	13.32	1.00	0.00	2.50	1.71	0.00	0.29
5	42.90	2	1.79	17.35	0.77	0.05	2.50	1.31	0.12	0.29
5	42.90	4	1.26	25.98	0.51	0.09	2.50	0.88	0.23	0.29
5	42.90	8	0.34	193.89	0.07	0.19	2.50	0.12	0.47	0.29
5	42.90	12	0.24	765.25	0.02	0.28	2.50	0.03	0.70	0.29
7	40.90	0	2.46	12.12	1.00	0.00	2.36	1.90	0.00	0.40
7	40.90	2	1.79	17.23	0.70	0.05	2.36	1.34	0.12	0.40
7	40.90	4	1.02	33.36	0.36	0.10	2.36	0.69	0.23	0.40
7	40.90	8	0.20	-	0.00	0.20	2.36	0.00	0.46	0.40
7	40.90	12	0.20	-	0.00	0.29	2.36	0.00	0.69	0.40
22	25.90	0	4.18	6.85	1.00	0.00	1.52	3.30	0.00	1.29
22	25.90	1	3.58	8.07	0.85	0.04	1.52	2.80	0.06	1.29
22	25.90	2	2.58	11.48	0.60	0.08	1.52	1.97	0.12	1.29
22	25.90	3	1.34	24.04	0.28	0.12	1.52	0.94	0.18	1.29
22	25.90	4	0.64	62.16	0.11	0.15	1.52	0.36	0.24	1.29

Πίνακας Γ.2 Εγκάρσιες μετρήσεις αλατότητας και εξαγωγή αδιαστατοποιημένων τιμών για την δεύτερη φάση πειραμάτων ($F_0 \approx 17$).

h (cm)	H-h (cm)	r (cm)	C_m (ppt)	S_m	1/S	r/(H-h)	(H-h)/ l_M	F_0/S_m	r/ l_M	h/ l_M
1	46.90	0	2.07	14.60	1.00	0.00	3.74	1.14	0.00	0.08
1	46.90	2	2.07	14.63	1.00	0.04	3.74	1.14	0.16	0.08
1	46.90	4	1.77	17.42	0.84	0.09	3.74	0.96	0.32	0.08
1	46.90	8	1.35	23.77	0.61	0.17	3.74	0.70	0.64	0.08
1	46.90	12	1.11	29.98	0.49	0.26	3.74	0.56	0.96	0.08
3	44.90	0	2.15	14.02	1.00	0.00	3.50	1.22	0.00	0.23
3	44.90	2	1.80	17.10	0.82	0.04	3.50	1.00	0.16	0.23
3	44.90	4	1.35	23.92	0.59	0.09	3.50	0.71	0.31	0.23
3	44.90	8	0.60	68.51	0.20	0.18	3.50	0.25	0.62	0.23
3	44.90	12	0.25	584.72	0.02	0.27	3.50	0.03	0.93	0.23
5	42.90	0	2.03	14.95	1.00	0.00	3.34	1.14	0.00	0.39
5	42.90	2	1.67	18.68	0.80	0.05	3.34	0.91	0.16	0.39
5	42.90	4	1.03	32.88	0.45	0.09	3.34	0.52	0.31	0.39
5	42.90	8	0.36	170.73	0.09	0.19	3.34	0.10	0.62	0.39
5	42.90	12	0.21	4741.30	0.00	0.28	3.34	0.00	0.93	0.39
7	40.90	0	2.28	13.12	1.00	0.00	3.26	1.27	0.00	0.56
7	40.90	2	1.88	16.23	0.81	0.05	3.26	1.03	0.16	0.56
7	40.90	4	0.91	38.71	0.34	0.10	3.26	0.43	0.32	0.56
7	40.90	8	0.20	-	0.00	0.20	3.26	0.00	0.64	0.56
7	40.90	12	0.20	-	0.00	0.29	3.26	0.00	0.96	0.56
22	25.90	0	3.49	8.35	1.00	0.00	2.05	2.00	0.00	1.74
22	25.90	1	3.00	9.83	0.85	0.04	2.05	1.70	0.08	1.74
22	25.90	2	2.14	14.18	0.59	0.08	2.05	1.18	0.16	1.74
22	25.90	3	1.42	22.49	0.37	0.12	2.05	0.74	0.24	1.74
22	25.90	4	0.80	46.09	0.18	0.15	2.05	0.36	0.32	1.74

Πίνακας Γ.3 Εγκάρσιες μετρήσεις αλατότητας και εξαγωγή αδιαστατοποιημένων τιμών για την τέταρτη φάση πειραμάτων ($F_0 \approx 11$).

h (cm)	H-h (cm)	r (cm)	C_m (ppt)	S_m	1/S	r/(H-h)	(H-h)/ l_M	F_0/S_m	r/ l_M	h/ l_M
1	33.60	0	4.70	6.24	1.00	0.00	3.18	1.80	0.00	0.09
1	33.60	2	4.27	6.90	0.90	0.06	3.18	1.63	0.19	0.09
1	33.60	4	3.06	9.82	0.64	0.12	3.18	1.14	0.38	0.09
1	33.60	8	1.95	16.08	0.39	0.24	3.18	0.70	0.76	0.09
1	33.60	12	1.49	21.77	0.29	0.36	3.18	0.52	1.14	0.09
3	31.60	0	4.79	6.13	1.00	0.00	2.99	1.83	0.00	0.28
3	31.60	2	3.05	9.85	0.62	0.06	2.99	1.14	0.19	0.28
3	31.60	4	1.19	28.35	0.22	0.13	2.99	0.40	0.38	0.28
3	31.60	8	0.20	-	0.00	0.25	2.99	0.00	0.76	0.28
3	31.60	12	0.20	-	0.00	0.38	2.99	0.00	1.14	0.28
5	29.60	0	3.73	7.87	1.00	0.00	2.81	1.42	0.00	0.48
5	29.60	2	2.43	12.48	0.63	0.07	2.81	0.90	0.19	0.48
5	29.60	4	1.22	27.15	0.29	0.14	2.81	0.41	0.38	0.48
5	29.60	8	0.26	483.55	0.02	0.27	2.81	0.02	0.76	0.48
5	29.60	12	0.26	490.81	0.02	0.41	2.81	0.02	1.14	0.48
7	27.60	0	3.90	7.52	1.00	0.00	2.62	1.49	0.00	0.67
7	27.60	2	2.27	13.44	0.56	0.07	2.62	0.83	0.19	0.67
7	27.60	4	0.64	62.77	0.12	0.14	2.62	0.18	0.38	0.67
7	27.60	8	0.26	488.71	0.02	0.29	2.62	0.02	0.76	0.67
7	27.60	12	0.26	487.41	0.02	0.43	2.62	0.02	1.14	0.67
22	12.60	0	10.62	2.67	1.00	0.00	1.20	4.17	0.00	2.10
22	12.60	1	7.32	3.90	0.68	0.08	1.20	2.85	0.10	2.10
22	12.60	2	1.69	18.61	0.14	0.16	1.20	0.60	0.19	2.10
22	12.60	3	0.20	-	0.00	0.24	1.20	0.00	0.29	2.10
22	12.60	4	0.20	-	0.00	0.32	1.20	0.00	0.38	2.10

Πίνακας Γ.4 Εγκάρσιες μετρήσεις αλατότητας και εξαγωγή αδιαστατοποιημένων τιμών για την τρίτη φάση πειραμάτων ($F_0 \approx 3.50$).

h (cm)	H-h (cm)	r (cm)	C_m (ppt)	S_m	1/S	r/(H-h)	(H-h)/ l_M	F_0/S_m	r/ l_M	h/ l_M
1	42.10	0	3.13	9.46	1.00	0.00	7.98	0.37	0.00	0.19
1	42.10	2	2.97	10.00	0.95	0.05	7.98	0.35	0.38	0.19
1	42.10	4	2.29	13.28	0.71	0.10	7.98	0.26	0.76	0.19
1	42.10	8	1.53	20.84	0.45	0.19	7.98	0.17	1.52	0.19
1	42.10	12	1.29	25.43	0.37	0.29	7.98	0.14	2.27	0.19
3	40.10	0	3.10	9.56	1.00	0.00	7.60	0.37	0.00	0.57
3	40.10	2	2.35	12.86	0.74	0.05	7.60	0.27	0.38	0.57
3	40.10	4	1.46	22.02	0.43	0.10	7.60	0.16	0.76	0.57
3	40.10	8	0.23	1070.12	0.01	0.20	7.60	0.00	1.52	0.57
3	40.10	12	0.22	1836.38	0.01	0.30	7.60	0.00	2.27	0.57
5	38.10	0	3.55	8.31	1.00	0.00	7.37	0.41	0.00	0.97
5	38.10	2	2.59	11.62	0.71	0.05	7.37	0.30	0.39	0.97
5	38.10	4	1.48	21.77	0.38	0.10	7.37	0.16	0.77	0.97
5	38.10	8	0.36	171.40	0.05	0.21	7.37	0.02	1.55	0.97
5	38.10	12	0.36	172.34	0.05	0.31	7.37	0.02	2.32	0.97
7	36.10	0	3.53	8.35	1.00	0.00	6.99	0.41	0.00	1.35
7	36.10	2	2.78	10.79	0.77	0.06	6.99	0.32	0.39	1.35
7	36.10	4	1.40	23.26	0.36	0.11	6.99	0.15	0.77	1.35
7	36.10	8	0.36	172.76	0.05	0.22	6.99	0.02	1.55	1.35
7	36.10	12	0.36	172.65	0.05	0.33	6.99	0.02	2.32	1.35
22	21.10	0	6.73	4.20	1.00	0.00	4.03	0.83	0.00	4.21
22	21.10	1	5.22	5.45	0.77	0.05	4.03	0.64	0.19	4.21
22	21.10	2	3.19	9.15	0.46	0.09	4.03	0.38	0.38	4.21
22	21.10	3	1.17	28.12	0.15	0.14	4.03	0.12	0.57	4.21
22	21.10	4	0.48	98.73	0.04	0.19	4.03	0.04	0.76	4.21