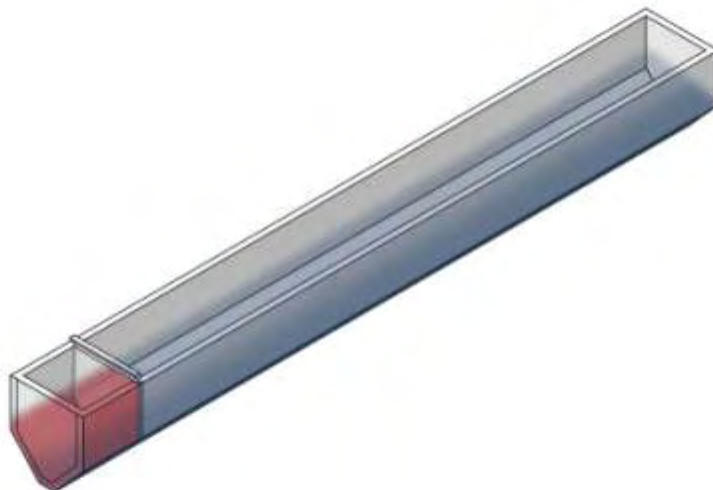




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

**« ΡΕΥΜΑΤΑ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ
ΔΕΞΑΜΕΝΗ ΤΡΑΠΕΖΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΘΥΡΙΔΑ »**



ΒΑΡΔΑΚΩΣΤΑΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ-ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ
ΚΕΜΕΝΤΣΕΤΣΙΔΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Κεραμάρης Ευαγγελος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού
2019

© 2019 Κεμεντσετσίδης Σταύρος και Βαρδακώστας Σπυρίδων-Εμμανουήλ

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων των συγγραφέων (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας ανήκουν αποκλειστικά στους συγγραφείς.

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μας, Επίκουρο Καθηγητή κ. Ευάγγελο Κεραμάρη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μας. Επίσης, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μας, τον Καθηγητή κ. Βασίλειο Κανακούδη και τον Καθηγητή κ. Θεόδωρο Καρακασίδη για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα θέλαμε να δώσουμε στον συνάδελφο και φίλο Κυριαζόπουλο Φίλιππο με την συνεργασία του οποίου εκτελέστηκαν τα πειράματα και η εργασία κατέστη δυνατή. Ακόμη, θα θέλαμε να απευθύνουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειες μας, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε μια δεξαμενή σύνθετης διατομής (τραπεζοειδούς διατομής στο κατώτερο τμήμα της και ορθογωνικής στο άνω τμήμα της). Σκοπός της έρευνας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των ρευμάτων βαρύτητας, με μεγάλη πυκνομετρική διαφορά, η μέτρηση των οποίων καταγράφεται με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας ενώ καταγράφεται ακόμη η εμπρόσθια ταχύτητα (ταχύτητα μετώπου) με την οποία διαδίδονται στο ρευστό.

Ένα κανάλι (δεξαμενή) διαχωρίζεται με μία κατακόρυφη θυρίδα σε δύο τμήματα που περιέχουν υγρά διαφορετικής πυκνότητας, νερό (w) και αλατισμένο νερό (sw). Το άνοιγμα της θυρίδας προκαλεί ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας. Το βαρύτερο υγρό κινείται στον πυθμένα της δεξαμενής ενώ αντίστοιχα το ελαφρύτερο στην ελεύθερη επιφάνεια. Τα περισσότερα από αυτά τα πειράματα είναι για ρευστά με μικρές διαφορετικές πυκνότητες (ρεύματα Boussinesq) που αντιπροσωπεύουν τις περισσότερες γεωφυσικές ροές. Μικρός αριθμός εργασιών έχει πραγματοποιηθεί για ρευστά με μεγάλες διαφορές πυκνότητας (ρεύματα μη-Boussinesq).

Ο λόγος για τον οποίο μελετάμε πυκνότητες της τάξεως των 1050kg/m^3 έως και 1090kg/m^3 είναι για να προσομοιάσουμε υγρά απόβλητα των οποίων η διάδοση καθιστά περιβαλλοντικό πρόβλημα. Η απελευθέρωση ρύπων μέσα σε ποτάμια, οι πετρελαιοκηλίδες στον ωκεανό και οι εκροές εγκαταστάσεων αφαλάτωσης είναι παραδείγματα ανθρωπογενών ρευμάτων βαρύτητας τα οποία προκαλούν αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι να συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της διάδοσης και της διαδικασίας ανάμειξης ενός πυκνού ρεύματος βαρύτητας. Πραγματοποιήθηκαν είκοσι πειράματα για πυκνότητες που κυμαίνονται μεταξύ 0.5% και 0.9% ($\rho_w=1000\text{kg/m}^3$, $\rho_{sw}=1050$ ή 1060 ή 1070 ή 1080 ή 1090kg/m^3). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αυτά ερευνητών που πραγματοποίησαν παρόμοια πειράματα (Shin et al. 2004, Monaghan et al. 2009, Keramaris et al. 2010) με μικρότερο λόγο πυκνοτήτων. Από τις συγκρίσεις προέκυψε ότι τα ρεύματα βαρύτητας μεγάλου λόγου πυκνοτήτων διαφέρουν αξιοσημείωτα στην ταχύτητα διάδοσης και στο σχήμα με τα πιο συνήθη μέτωπα με λόγο πυκνοτήτων κοντά στη μονάδα

(ρεύματα Boussinesq). Το κύριο συμπέρασμα αυτής της μελέτης είναι πως το σχήμα της δεξαμενής έχει σημαντικό ρόλο στην διάδοση των βαρυτικών ρευμάτων. Η ύπαρξη τραπεζοειδούς διατομής αυξάνει την ταχύτητα των βαρυτικών ρευμάτων σε σύγκριση με αντίστοιχες τριγωνικές ή ορθογωνικές διατομές.

Abstract

In this thesis, experiments were carried out in a tank of complex cross section (trapezoidal cross section at its lower part and rectangular in its upper part). The purpose of this research is to study the behavior of gravity currents with a high density difference measured by a high-definition digital video while recording the velocity of the front with which it propagates in the fluid.

A tank is separated by a vertical port in two sections containing liquids of different density, water (w) and salted water (sw). Opening the port causes flow due to density difference. The heavier fluid moves to the bottom of the tank while lighter flows on the free surface. Most of these experiments are for fluids with small density differences (Boussinesq streams) that represent most geophysical flows. A small number of work has been done for fluids with large density differences (non-Boussinesq streams).

The reason we are considering densities of 1050Kg/m³ up to 1090Kg/m³ is to simulate liquid waste whose spreading is an environmental problem. The release of pollutants into rivers, oil spills in the ocean and the outflow of desalinations plants are examples of man-made gravity currents that cause negative environmental impacts

The aim of this study is to contribute to a better understanding of the propagation and process of mixing a dense gravity current. Twenty experiments were performed for densities ranging between 0.5% and 0.9% ($\rho_w = 1000\text{Kg/m}^3$ $\rho_{sw} = 1050$ or 1060 or 1070 or 1080 or 1090Kg/m^3)

The results are compared with those of similar experiments (Shin et al., 2004, Monaghan et al., 2009, Keramaris et al., 2010, Keramaris et al. 2018) with a lower ratio of densities. The comparisons revealed that gravity currents of a high density ratio differ remarkably in propagation velocity and shape with common fronts with a density ratio close to the unit (Boussinesq currents). The main conclusion of this study is that the shape of the tank has an important role in the propagation of gravity currents. The presence of the trapezoidal cross-section increases the velocity of gravity currents compared to corresponding triangular or rectangular cross-sections.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	2
1. 1.1 Εισαγωγικά.....	2
2. 1.2 Η δομή ενός ρεύματος βαρύτητας.....	3
3. 1.3 Είδη ρευμάτων βαρύτητας στη φύση	4
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική αναφορά.....	6
Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη.....	11
4. 3.1 Αναλυτική περιγραφή της κατασκευής.....	11
5. 3.2 Επίτευξη κατάλληλων πυκνότητων	12
6. 3.3 Εκτέλεση των πειραμάτων	13
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	15
7. 4.1 Σύγκριση ρευμάτων βαρύτητας στην τραπεζοειδή διατομή 15	
8. 4.2 Σύγκριση ρευμάτων βαρύτητας στην σύνθετη διατομή	19
9. 4.3 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα σύνθετης και τραπεζοειδούς διατομής	24
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....	31
Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία	33
Κεφάλαιο 7 Παράρτημα.....	35

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται εισαγωγικές πληροφορίες σχετικά με τη δομή και το υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας και περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές ενότητες της.

1.1 Εισαγωγικά

Τα ρεύματα βαρύτητας, γνωστά επίσης ως ρεύματα πυκνότητας είναι ροές που εμφανίζονται τόσο σε φυσικές όσο και σε ανθρωπογενείς καταστάσεις. Αυτά τα ρεύματα εκδηλώνονται κυρίως ως οριζόντιες ροές και συνήθως δημιουργούνται από μια διαφορά πυκνότητας ακόμη και ελαχίστου ποσοστού (μερικές μόνο εκατοστιαίες μονάδες) ενώ μπορούν να διανύσουν μεγάλη απόσταση. Τα ρεύματα βαρύτητας δημιουργούνται είτε από πεπερασμένη απελευθέρωση ενός υγρού είτε από συνεχή απελευθέρωση. Στην πρώτη περίπτωση η οποία είναι και η πιο συνήθης στη φύση, συμβαίνει σε τρεις φάσεις. Στην πρώτη φάση η διάδοση του ρεύματος βαρύτητας είναι τυρβώδους μορφής. Η ροή εμφανίζει κυματοειδή σχέδια και αναμένεται μεγάλη ανάμιξη μεταξύ του ρεύματος και του περιβάλλοντος. Σε αυτή τη φάση ο ρυθμός μετάδοσης του ρεύματος είναι περίπου σταθερός με το χρόνο. Καθώς το υγρό μειώνεται εξαιτίας της εξάπλωσης του ρεύματος στο περιβάλλον, το μέτωπο του ρεύματος μειώνεται μέχρις ότου η ροή γίνει στρωτή. Σε αυτή τη φάση, υπάρχει πολύ λίγη ανάμιξη και εξαφανίζεται η κυματιστή δομή της ροής. Από αυτή τη φάση και μετά ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται με το χρόνο και το ρεύμα σταδιακά επιβραδύνεται. Τέλος, καθώς το ρεύμα εξαπλώνεται ακόμη περισσότερο, γίνεται τόσο λεπτό ώστε οι ιζώδεις δυνάμεις μεταξύ του παρασυρόμενου υγρού και του περιβάλλοντος καθώς και των ορίων καθορίζουν τη ροή. Σε αυτή τη φάση δεν γίνεται πλέον ανάμιξη και ο ρυθμός μετάδοσης επιβραδύνεται ακόμη περισσότερο. Το όριο που αναφέρεται παραπάνω μπορεί να είναι κεκλιμένο, αλλά θεωρείται συχνά οριζόντιο. Παραδείγματα αυτών των ροών είναι οι χιονοστιβάδες, οι εκρήξεις ηφαιστείων και φραγμάτων, οι πετρελαιοκηλίδες στον ωκεανό, οι καταιγίδες σκόνης, οι καταβυθιστικοί άνεμοι, οι εισβολές αλατιού σε εκροές ποταμών και οι πυροκλαστικές ροές.

1.2 Η δομή ενός ρεύματος βαρύτητας

Τα ρεύματα βαρύτητας μπορούν να εμφανιστούν τόσο στα υγρά όσο και στα αέρια που βρίσκονται σε κίνηση ή σε κατάσταση ηρεμίας. Παρόλο που η ανατομία τους μπορεί να περιγραφεί με μεγάλη λεπτομέρεια, δεν είναι δυνατόν να οριστεί ένα καθολικό προφίλ, καθώς είναι ιδιαίτερα περίπλοκο και εξαρτάται από διάφορους φυσικούς παράγοντες (Simpson, 1982). Το βασικό σχήμα έχει συζητηθεί σε πολλές μελέτες και συνήθως εντοπίζονται δύο τμήματα. Στο εμπρόσθιο άκρο σχηματίζεται μια οξεία διαχωριστική γραμμή μεταξύ των δύο ρευστών, όπου εμφανίζεται το λεγόμενο μέτωπο του ρεύματος. Αυτό το μέτωπο, το οποίο βρίσκεται συνήθως χαμηλότερα υψομετρικά από την ακόλουθη ροή, προωθείται στο περιβάλλον υγρό και ακολουθείται από το σώμα του ρεύματος. Η μετωπική ζώνη χαρακτηρίζεται από μια τρισδιάστατη ασταθή ροή που προκύπτει από διατμητικές και βαρυτικές αστάθειες, κυματισμούς Kelvin-Helmholtz και ένα πολύπλοκο μοτίβο μετατόπισης λοβών και σχισμών, αντίστοιχα (Simpson, 1969, Simpson, 1972). Οι λοβοί και οι σχισμές πιστεύεται ότι προκαλούνται από τη βαρυτική αστάθεια του λιγότερο πυκνού υγρού που υπερχειλίζεται από το μέτωπο του ρεύματος, το οποίο διαδίδεται κατά μήκος μίας βάσης ή ενός ορίου γενικότερα χωρίς ολίσθηση. Χρησιμοποιώντας μια τεχνική σκιαγράφησης, ο Simpson (1972) εντόπισε την χρονική εξέλιξη του σχηματισμού τους και παρατηρήθηκε ότι οι σχισμές μπορούν να εμφανιστούν αλλά να μην εξαφανιστούν, απορροφώντας συνεχώς τις γειτονικές τους. Από την άλλη πλευρά, οι κυματισμοί Kelvin-Helmholtz είναι, στη βασική μορφή, στροβιλισμοί υγρού που δημιουργούνται κατά την επαφή του ρεύματος βαρύτητας με το περιβάλλον υγρό καθώς η αντίθετη κίνηση επάγει τη διάτμηση της ταχύτητας. Αυτοί παραμένουν σχεδόν σταθεροί στη δομή του ρεύματος βαρύτητας, ξεθωριάζουν όμως λόγω της συνεχούς συσσώρευσης του περιβάλλοντος υγρού.

Συνεπώς το προφίλ του μετώπου ενός ρεύματος βαρύτητας και ο ρυθμός διάδοσης του είναι πολύ ευαίσθητα σε οποιαδήποτε αντίθετη ή επακόλουθη ροή στο περιβάλλον. Τα ρεύματα βαρύτητας επηρεάζονται από το ανάγλυφο της επιφάνειας στην οποία ρέουν, την εισχώρηση του περιβάλλοντος υγρού και σε αρκετές περιπτώσεις από τα σωματίδια τα οποία μεταφέρουν.

1.3 Είδη ρευμάτων βαρύτητας στη φύση

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή ένα ακόμη παράδειγμα ρεύματος βαρύτητας εντοπίζεται στο μέτωπο από ένα θαλασσινό αεράκι. Αυτά τα μέτωπα σχηματίζονται κοντά στην ακτή, και πολλά από αυτά διαδίδονται μέχρι και διακόσια χιλιόμετρα στην ενδοχώρα. Αυτά έχουν πολύ σημαντικές επιδράσεις στην εξάπλωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αλλά και την διανομή των εντόμων.

Ένα παράδειγμα ρεύματος βαρύτητας που είναι ευδιάκριτο στο ανθρώπινο μάτι είναι οι χιονοστιβάδες, οι οποίες αποτελούν σοβαρό κίνδυνο. Πρόκειται για ρεύματα τα οποία δημιουργούνται από τμήματα χιονιού. Έχουν γίνει πολλές έρευνες για να μειωθεί η ζημιά που προκαλείται από τις χιονοστιβάδες και αυτές έχουν καθιερωθεί αποκλειστικά για αυτού του είδους τα ρεύματα βαρύτητας.

Ένα βιομηχανικό πρόβλημα το οποίο έχει απασχολήσει πολύ πρόσφατα είναι η τυχαία απελευθέρωση πυκνού αερίου, το οποίο ενδέχεται να είναι επιβλαβές ή εύφλεκτο. Σημαντικά ατυχήματα έχουν συμβεί στην προκύπτουσα εξάπλωση, τα οποία συνήθως ενεργοποιούνται ως ένα κύμα βαρύτητας. Έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα, τόσο σε πειραματικό όσο και θεωρητικό υπόβαθρο, η οποία έχει βασιστεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα, καταδεικνύοντας πιθανές μεθόδους περιορισμού τέτοιων απελευθερώσεων.

Στον ωκεανό, όγκοι νερού με μικρότερη πυκνότητα από το περιβάλλον αλμυρό νερό, ρέουν στην επιφάνεια ως ρεύματα βαρύτητας. Τα τελευταία δεν είναι τόσο ευδιάκριτα σε έναν απλό παρατηρητή ως ατμοσφαιρικά ρεύματα βαρύτητας, αλλά οι σειρές από αφρό και θαλάσσια υπολείμματα στην επιφάνεια υποδεικνύουν την παρουσία τους. Αυτές οι σειρές δημιουργούνται από την ένωση των ροών σε εκείνο το σημείο και αυτό είναι ευρέως γνωστό στους ψαράδες, καθώς αυτά τα κύματα έχουν σημαντική επίδραση στη μετακίνηση των ψαριών. Ρεύματα βαρύτητας γλυκού νερού διαδίδονται επίσης κατά μήκος της επιφάνειας σε εκβολές ποταμών αλλά και στα γνωστά φιόρδ, πάνω από το θαλασσινό νερό που έχει μεγαλύτερη πυκνότητα.

Οι πετρελαιοκηλίδες είναι ένα παράδειγμα ενός ανθρωπογενούς περιβαλλοντικού προβλήματος. Μια διαρροή πετρελαίου από ένα δεξαμενόπλοιο δημιουργεί ένα ρεύμα βαρύτητας από ρευστό μικρότερης πυκνότητας στην επιφάνεια της θάλασσας. Είναι σημαντικό να γίνει αντιληπτή η εξέλιξη αυτής της ροής και να βρεθούν πιθανές μέθοδοι τόσο για τον περιορισμό της όσο και για την εξάλειψη της.

Ακόμη και στα σπίτια, προβλήματα με κύματα βαρύτητας είναι αρκετά συχνά. Εάν η πόρτα, ενός θερμού εσωτερικά σπιτιού, παραμείνει ανοιχτή για μερικά δευτερόλεπτα σε μία κρύα σχετικά ημέρα, είναι εύκολο να εντοπίσουμε το ρεύμα βαρύτητας που σχηματίζει ο ‘κρύος’ αέρας που ρέει κατά μήκος του πατώματος μέσα στο σπίτι.

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική αναφορά

Αρχικά ο Benjamin (1968) μελέτησε ρεύματα βαρύτητας παρουσία θυρίδας και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η ροή έχει μικρή διασπορά και επικρατεί η αδράνεια. Ο Simpson (1997) μελέτησε ρεύματα βαρύτητας με εργαστηριακά πειράματα και με αριθμητικά μοντέλα. Το βαρύτερο υγρό διαδίδεται προς το μέρος της δεξαμενής με το ελαφρύτερο υγρό κατά μήκος του πυθμένα της δεξαμενής και το ελαφρύτερο υγρό διαδίδεται κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Η διάδοση των μετώπων ρευμάτων βαρύτητας υψηλής πυκνότητας έχει μελετηθεί πειραματικά (ανταλλαγή ροής) και με προσομοίωση υπολογιστή. Είναι γνωστό ότι τα μέτωπα μη Boussinesq εμφανίζονται σε ορισμένα προβλήματα ασφάλειας (χημικές διαρροές και πυρκαγιές) και για αυτό το λόγο οι Grobelbauer, H.P., Fannelop, T.K and Britter, R.E. (1993) ερευνήσαν με αυτό τον τρόπο επτά συνδυασμούς αερίων. Υπάρχει καλή συμφωνία για περιπτώσεις χωρίς προβλήματα σύγκλισης, δηλαδή για μέτωπα βαρέων αερίων με μικρό λόγο πυκνότητας.

Οι Shin et al. (2004) περιέγραψαν μια νέα θεωρία και πειράματα στα ρεύματα βαρύτητας με θυρίδα η οποία συνιστούσε ότι η διάλυση λόγω τύρβης και ανάμειξης μεταξύ του ρεύματος και του περιβάλλοντος υγρού είναι ασήμαντη όταν ο αριθμός Reynolds είναι πολύ υψηλός. Οι Shin et al. παρείχαν μια εναλλακτική θεωρία η οποία προβλέπει την ταχύτητα του ρεύματος και το βάθος με βάση τη ροή διατήρησης ενέργειας. Ένα σχετικό παράδειγμα το οποίο έχει μελετηθεί πειραματικά είναι η ροή ενός ρεύματος βαρύτητας που ρέει κάτω από χαράδρα σε οριζόντια επιφάνεια. Υπάρχει πολύ λιγότερη έρευνα για τα ρεύματα βαρύτητας που ρέουν κατά μήκος κοιλάδων.

Οι Antenucci et al. (2005) μελέτησαν μία σταθερή ροή κατά μήκος καναλιού διατομής σχήματος V σε μία δεξαμενή για να μοντελοποιήσουν τη διασπορά παθογόνων. Ρεύματα σταθερής ροής κατά μήκος ελικοειδών καναλιών έχουν ερευνηθεί με τη χρήση ρευμάτων με αλατόνερο για τη προσομοίωση ρευμάτων θολότητας (Keevil et al., 2006).

Οι Lowe, R.J., Rottman, J.W and Linden, P.F. (2005) πραγματοποίησαν πειράματα σε κανάλι ορθογωνικής διατομής με κατακόρυφη θυρίδα χρησιμοποιώντας ως δύο ρευστά νερό και διάλυμα ιωδιούχου νατρίου είτε νερό και διάλυμα χλωριούχου

νατρίου με τη διαφορά πυκνότητας να κυμαίνεται μεταξύ του 0.61 και του 1. Μια υδραυλική θεωρία αναπτύχθηκε για να μοντελοποιήσει τα πειράματα. Η θεωρία υποθέτει ότι ένα ελαφρύ ρεύμα βαρύτητας μεταδίδεται σε μια κατεύθυνση κατά μήκος της κορυφής του καναλιού και ένα βαρύ ρεύμα βαρύτητας μεταδίδεται στην αντίθετη κατεύθυνση κατά μήκος του πυθμένα του καναλιού. Οι Maxworth και Nokes (2007) ερεύνησαν πειραματικά τα ρεύματα βαρύτητας που διαμορφώθηκαν από την απελευθέρωση ενός ρευστού από εσωκλειόμενη θυρίδα σε κεκλιμένο ανοιχτό κανάλι. Η ταχύτητα μετώπου του ρεύματος βαρύτητας αυξανόταν με τον χρόνο. Η οπτικοποίηση της ροής και οι μετρήσεις ταχύτητας έδειξαν ότι κατά την διάρκεια της φάσης της επιτάχυνσης το μέτωπο τροφοδοτούνταν από ένα ακολουθούμενο ρεύμα το οποίο είχε επίδραση στο μέτωπο του ρεύματος. Αυτό εξήγησε την εκτεταμένη περίοδο επιτάχυνσης που παρατηρήθηκε σε αυτά τα πειράματα σε σύγκριση με τις προβλέψεις ενός μοντέλου που αναπτύχθηκε από τους Beghin et al. (1981). Αυτό το μοντέλο προσαρμόστηκε για να εξηγήσει την αύξηση της κίνησης του μετώπου. Επιτεύχθηκε καλή συμφωνία μεταξύ πειραμάτων και μοντέλου.

Οι Takagi και Huppert (2007) εξέτασαν Νευτώνια ρεύματα βαρύτητας με ιζώδες που διαδίδονται κατά μήκος οριζόντιων και κεκλιμένων καναλιών με ημικυκλικά και σχήματος V όρια. Οι μαθηματικές εξισώσεις συγκρίνονται με δεδομένα από εργαστηριακά πειράματα. Γεωλογικές εφαρμογές των αποτελεσμάτων ακόμη ερευνώνται.

Επίσης οι Takagi και Huppert (2008) έκαναν χρήση ενός μοντέλου ακανόνιστης ροής Stokes σε άκαμπτες επιφάνειες για να αποκτήσουν μια ποικιλία διαφορετικών ποσοστών διάδοσης από ρεύματα βαρύτητας με ιζώδες, τα οποία δημιουργούνται θεωρώντας διαφορετικές στιγμές έναρξης στην πηγή μέσα στο κανάλι που αλλάζει σχήμα κατά μήκος της ροής. Ακόμη η θέση του ρεύματος μέσα είτε σε ένα εξαιρετικά στενό είτε ένα κανάλι σχήματος V, το οποίο διευρύνεται ομαλά κατά μήκος της ροής, μελετάται και φαίνεται να είναι ανάλογη με την ισχύ του χρόνου.

Έχουν πραγματοποιηθεί μερικές έρευνες σε μοντέλα ρευμάτων βαρύτητας σε δεξαμενή ορθογώνιας διατομής στο πυθμένα της οποίας υπάρχει βλάστηση καθώς η τελευταία είναι ιδιαίτερα σημαντική. Οι Zhang και Nepf (2008) διερεύνησαν μια ροή ανταλλαγής μεταξύ περιοχών με βλάστηση και άνευ βλάστησης σε επιφανειακά ύδατα με διαφορές στην πυκνότητα του νερού. Μια εργαστηριακή έρευνα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση τυχαίας σειράς άκαμπτων, αναδύμενων κυλίνδρων

αντιπροσωπευτικών του θόλου. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι το ρεύμα βαρύτητας σε μήκος καναλιού χωρίς βλάστηση κινείται με σταθερή ταχύτητα που καθορίζεται από την αρχική αδρανειακή κατάσταση ενώ η ταχύτητα του κατά μήκος κατά μήκος καναλιού με βλάστηση καθορίζεται από την αντίσταση του θόλου και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2008) πραγματοποίησαν πειράματα σε δεξαμενή με προκαθορισμένα όρια στην οποία ο πυθμένας καλύπτεται από υλικό τύπου γρασιδιού διαφορετικής αναλογίας βύθισης με πυκνότητες που κυμαίνονται από 0.08 έως 0.30. Ερευνήθηκαν οι επιδράσεις του λόγου πυκνότητας, του λόγου βύθισης και της κλίσης του πυθμένα στην κίνηση του ρεύματος.

Οι Κεραμάρης και άλλοι (2009) πραγματοποίησαν πειράματα σε ανοικτή δεξαμενή για την επίδραση της βλάστησης στην κίνηση διδιάστατων ρευμάτων βαρύτητας. Η βλάστηση προσομοιώθηκε με συστοιχία ράβδων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακή δεξαμενή στην οποία μια μετακινούμενη θυρίδα διαχωρίζει τα δύο υγρά (νερό και αλατισμένο νερό) με διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho=0,1\%$, $\Delta\rho=0,2\%$ και $\Delta\rho=0,3\%$. Μετά το άνοιγμα της θυρίδας το δημιουργούμενο ρεύμα βαρύτητας καταγράφηκε με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας. Μελετήθηκε η κίνηση του ρεύματος (διανυθείσα απόσταση, ταχύτητα μετώπου, ύψος μετώπου) για ράβδους πάνω από την επιφάνεια του νερού (μη βυθισμένη βλάστηση) και για βυθισμένες ράβδους (βυθισμένη βλάστηση).

Μερικές πειραματικές μελέτες πραγματοποιήθηκαν για ρεύματα βαρύτητας σε λεκάνη. Οι Monaghan et al. (2009a) διερεύνησαν την κίνηση ρευμάτων με αλατόνερο που διαδίδονται οριζόντια σε δεξαμενή ορθογώνιας διατομής στο ανώτερο και διατομής σχήματος V στο κατώτερο τμήμα της με πειράματα ανταλλαγής ροής και ένα μοντέλο προσομοίωσης. Η ύπαρξη της λεκάνης καταδεικνύει τρεις σημαντικές διαφορές στα ρεύματα βαρύτητας συγκριτικά με αυτά τα οποία ρέουν κατά μήκος επίπεδη βάσης. Αυτές είναι: α) το μέτωπο του ρεύματος είναι κατά προσέγγιση παραβολικό, β) για επαρκώς μεγάλη διάρκεια χρόνου η ταχύτητα του ρεύματος στο τμήμα διατομής σχήματος V διαφέρει από αυτή στην επίπεδη βάση και γ) το πλάτος του ρεύματος βαρύτητας στο τμήμα διατομής σχήματος V μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Χρησιμοποίησαν το μοντέλο προσομοίωσης για την πρόβλεψη της επίπτωσης που έχει η αλλαγή της κλίσης της λεκάνης. Το αποτέλεσμα

είναι ότι για ρεύματα ίσου όγκου, όσο πιο απότομη η λεκάνη τόσο πιο γρήγορη είναι η ροή.

Επίσης οι Monaghan et al. (2009b) στο επιστημονικό τους άρθρο επέκτειναν προηγούμενες μελέτες από ρεύματα βαρύτητας με αλατόνερο σε με υψηλούς αριθμούς Reynolds τα οποία ρέουν κατά μήκος δεξαμενής με λεκάνη σε σχήμα V. Χρησιμοποίησαν πειράματα και ένα μοντέλο box (απλούστερη προσέγγιση μοντελοποίησης ενός ρεύματος βαρύτητας πεπερασμένου όγκου) ώστε να εξακριβώσουν τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής. Το μέτωπο της ροής είναι κατά προσέγγιση παραβολικό. Τα αποτελέσματα μπορούν να περιγραφούν με αξιοσημείωτη ακρίβεια μέσω του μοντέλου box χρησιμοποιώντας μία γενίκευση της εξίσωσης για καθίζησης του ιζήματος από ένα τυρβώδες μέσο.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2009) μελέτησαν την επίδραση της αντίστασης, λόγω βλάστησης σε ρεύματα βαρύτητας μέσω πειραμάτων σε δεξαμενή με θυρίδα. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ αλατόνερου και διαυγούς νερού κυμάνθηκε μεταξύ του 0.1% και 0.3%. Η κίνηση του ρεύματος βαρύτητας παρακολούθηθηκε με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας, μετρήθηκε η εμπρόσθια ταχύτητα και καταγράφηκε το ύψος του εμπρόσθιου τμήματος.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2010) διερεύνησαν την κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας αλατόνερου σε σύνθετη διατομή η οποία αποτελούνταν από τραπεζοειδές σχήμα στο κάτω τμήμα της και ορθογώνια διατομή στο άνω σχήμα της. Αυτό θεωρείται περισσότερο ρεαλιστικό μοντέλο των λεκανών που εμφανίζονται στην φύση. Τα πειράματα εκτελούνται για ίδια στάθμη αλατόνερου και καθαρού νερού και στις δύο πλευρές του θυροφράγματος. Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ του θαλασσινού νερού και του διαυγές νερού κυμαίνεται μεταξύ 0.1% και 0.4% και για αυτόν τον λόγο μελετάται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας.

Το πρόβλημα της θερμικής μεταφοράς σε ένα υγρό μέσω ενός πορώδες μέσου μελετήθηκε από τον Kumar (2012) ώστε να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις του κατακόρυφου μαγνητικού πεδίου και της κάθετης περιστροφής. Πρόσφατα, ο Banyal (2013) διερεύνησε την θερμική αστάθεια ενός ρευστού το οποίο θερμαίνεται για να αντλήσει έτσι την απαραίτητη συνθήκη για την έναρξη της αστάθειας ως στατική μεταφορά.

Οι Nogueira et al. (2013) μελέτησαν τα ρεύματα βαρύτητας που παράγονται από την απελευθέρωση ολόκληρης της στάθμης αλατόνευρου μετά την αφαίρεση κατακόρυφης θυρίδας σε δεξαμενή γλυκού νερού για να διερευνηθεί η επίδραση της αρχικής πυκνότητας του μείγματος αλατόνευρου στην ίδια την θυρίδα και την τραχύτητα του πυθμένα στην κινηματική του ρεύματος βαρύτητας. Η χρονική εξέλιξη της θέσης και της ταχύτητας του μετώπου αναλύθηκε σε σχέση με τις διάφορες φάσεις του ρεύματος. Η εξέλιξη του ύψους του ρεύματος βαρύτητας αξιολογήθηκε επίσης. Η τραχύτητα του πυθμένα του καναλιού έπαιξε σημαντικό ρόλο στην κινηματική του ρεύματος, ιδιαίτερα μειώνοντας την ταχύτητα του μετώπου λόγω της τριβής στον πυθμένα. Η ανάλυση των αριθμών Froude, οι οποίοι υπολογίζονται από την αρχική και την τρέχουσα μειωμένη βαρύτητα, επέτρεψε να καθοριστούν οι σημαντικές μεταβλητές αλλά και η δυναμική του ρεύματος σε κάθε φάση της ανάπτυξης του.

Πρόσφατα, οι Longo και Di Federico (2014) παρουσίασαν μια νέα φόρμουλα για να αναλύσουν την αξονοσυμμετρική διάδοση των μονοφασικών ρευμάτων βαρύτητας που προκαλούνται από την απελευθέρωση ενός όγκου ρευστού σε ένα πορώδες πεδίο. Τα θεωρητικά αποτελέσματα συγκρίθηκαν με δύο σύνολα πειραματικών δεδομένων, το ένα με γλυκό νερό και το άλλο έχοντας αέρα ως ρευστό περιβάλλοντος. Γενικά, τα πειραματικά προφίλ ρεύματος συνέπιπταν με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Η λύση πρώτης τάξης έδειξε αξιοσημείωτη βελτίωση έναντι της λύσης μηδενικής τάξης στην ερμηνεία της τρέχουσας συμπεριφοράς κοντά στο σημείο έγχυσης.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2016) πραγματοποίησαν πειράματα εργαστηριακών δεξαμενών με βλάστηση για τη διερεύνηση της επίδρασης της διατομής στην κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για ορθογώνια και σύνθετη (άνω ορθογώνια και κατώτερη τραπεζοειδής) διατομή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διαφορετική διατομή επηρεάζει σημαντικά την κίνηση και την ταχύτητα του μετώπου των ρευμάτων βαρύτητας.

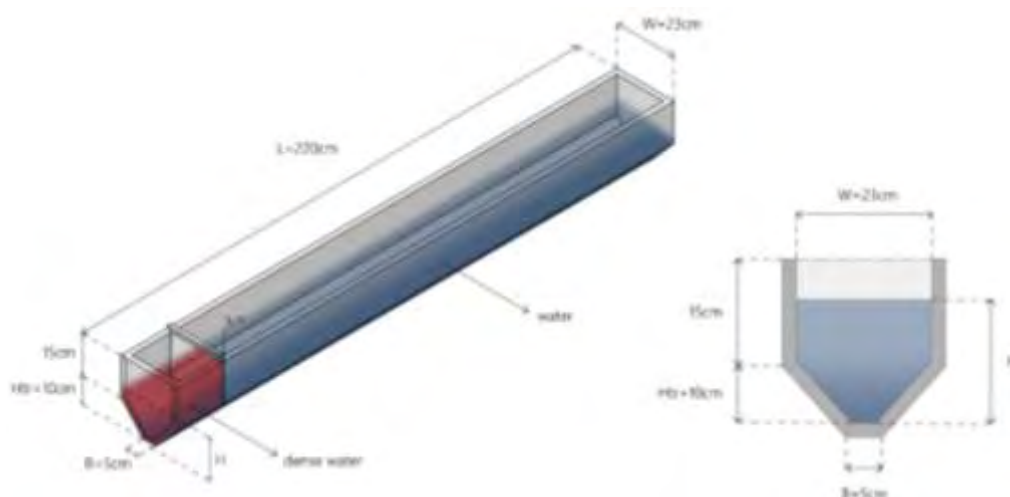
Ο Κεραμάρης (2017) μελέτησε την επίδραση ενός διαπερατού υλικού (εύκαμπτου και άκαμπτου) στον πυθμένα εργαστηριακής δεξαμενής σχετικά με την κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας. Το διαπερατό υλικό στον πυθμένα προσομοιώνεται με γρασίδι στην περίπτωση του εύκαμπτου υλικού και στη συνέχεια με δέσμες ράβδων για την προσομοίωση του άκαμπτου υλικού και πραγματοποιήθηκαν πειράματα για ίσα ύψη βλάστησης και διαφορές πυκνότητας της τάξεως του 2%, 4% και 6%.

Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαστάσεις της δεξαμενής, της θυρίδας αλλά και ο τρόπος με τον οποίο επιτεύχθηκαν οι κατάλληλες πυκνότητες με τη χρήση πυκνομέτρου. Τέλος, αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο λειτούργησε κάθε πείραμα και ο τρόπος που καταγράφηκαν τα ρεύματα βαρύτητας.

3.1 Αναλυτική περιγραφή της κατασκευής

Η πειραματική διάταξη συνίσταται σε μια γυάλινη δεξαμενή πλάτους 23cm στο άνω και 5cm στο κάτω μέρος της, μήκους 2.2m και βάρους 25cm. Η δεξαμενή χωρίζεται σε δύο μέρη από ένα κατακόρυφο θυρόφραγμα. Το τελευταίο έχει τις ίδιες διαστάσεις σε πλάτος και ύψος ενώ το πάχος του είναι 2cm. Στο πέρας της δεξαμενής υπάρχει κυκλική εγκοπή στην οποία τοποθετήθηκε σφαιρική κάνουλα μονής ροής για απορροή του νερού και τον καθαρισμό της δεξαμενής. Στην έξοδο της κάνουλας συνδέθηκε πλαστικός σωλήνας του οποίου η άκρη τοποθετήθηκε στο σύστημα αποχέτευσης του εργαστηρίου. Η δεξαμενή τοποθετήθηκε επί τραπέζιου στο οποίο όμως παρατηρήθηκε, με τη χρήση αλφαδιού, πως η επιφάνεια απέκλινε ως προς την οριζοντίωση.



Εικόνα 3.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση γυάλινης δεξαμενής 220 εκ. σε μήκος, πλάτους 23εκ. στο άνω και 5εκ. στο κάτω μέρος της χωρίζεται σε δύο ρεζερβουάρ από μια αδιάβροχη πύλη (θυρόφραγμα) ίδιων διαστάσεων σε πλάτος και 25 εκ. σε ύψος. Το θυρόφραγμα μπορεί να ανοίγει για να ενώνονται τα δύο ρεζερβουάρ.

Για την διόρθωση του επιμέρους προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν κομμάτια μοριοσανίδας ίσων διαστάσεων που τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να

επιτυγχάνεται η οριζοντίωση ενώ διασφαλίστηκε η σταθερότητα της κατασκευής μέσω πλαστικών πιαστρών.

Για την αποτύπωση των ρευμάτων βαρύτητας τοποθετήθηκαν προβολείς και 2 κάμερες υψηλής ευκρίνειας, μία στη θέση του θυροφράγματος για την καταγραφή της αρχικής διείδυσης του ρεύματος και μια κάμερα κατέγραφε συνεχόμενα τα ρεύματα από την στιγμή που άνοιγε η θυρίδα μέχρι το πέρας της δεξαμενής. Επίσης, για την καλύτερη αποτύπωση του ρεύματος βαρύτητας, τοποθετήθηκε λευκό ύφασμα πίσω από την δεξαμενή, προσομοιώνοντας έτσι κάποιου είδους φόντο.

Προκειμένου να καταγραφεί η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται κατά μήκος της δεξαμενής το υγρό με την μεγαλύτερη πυκνότητα, αναμιγνύεται σε αυτό ροδαμίνη, στοιχείο που προσδίδει χρώμα στο υγρό. Οι χρωστικές ροδαμίνης είναι διαλυτές στο νερό και είναι γενικά τοξικές. Για αυτό το λόγο μετά το τέλος κάθε πειράματος η δεξαμενή και τα όργανα μετρήσεων καθαρίζονταν προσεκτικά.

Τα πειράματα χωρίστηκαν σε τέσσερα σετ ανάλογα με το αρχικό υψόμετρο και σε καθένα από τα τέσσερα αυτά σετ πραγματοποιήθηκαν πέντε επιμέρους πειράματα με βάση τη πυκνότητα του αλατόνευρου.

3.2 Επίτευξη κατάλληλων πυκνοτήτων

Βασικός πυλώνας της μελέτης υπήρξε η επίτευξη των επιθυμητών πυκνοτήτων σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Όπως αναφέρθηκε τα πειράματα χωρίστηκαν σε τέσσερα σετ με πέντε επιμέρους πειράματα σε έκαστο σετ. Στο πρώτο σετ πειραμάτων μελετήθηκαν τα ρεύματα βαρύτητας πέντε διαφορετικών πυκνοτήτων αλατόνευρου με αρχικό υψόμετρο τα 5cm, στη μέση δηλαδή του υψομέτρου της τραπεζοειδούς διατομής. Καθώς το υψόμετρο αυτό ήταν πολύ μικρότερο της διάστασης του πυκνόμετρου (όργανο μέτρησης πυκνότητας) προχωρήσαμε σε τοποθέτηση αλατόνευρου σε δοκιμαστικό σωλήνα του ενός λίτρου. Εκεί, με τη βοήθεια του πυκνόμετρου, καταφέραμε να δημιουργήσουμε επαρκές αλατόνευρο ίδιας πυκνότητας το οποίο στη συνέχεια αδειάζαμε στο αριστερό τμήμα της δεξαμενής. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε αρκετές φορές μέχρις ότου το υψόμετρο του αλατόνευρου έφτασε τα 5cm.

Με τον ίδιο τρόπο πραγματοποιήθηκε και η επίτευξη των επιθυμητών πυκνοτήτων στο δεύτερο σετ πειραμάτων με αρχικό υψόμετρο τα 10cm, όπου βρίσκεται η κορυφή

της τραπεζοειδούς διατομής. Η μοναδική διαφορά του δεύτερου από το πρώτο σετ ήταν ότι χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικός σωλήνας δύο λίτρων καθώς ο σωλήνας του ενός λίτρου χρειαζόταν διπλάσιες επαναλήψεις.

Στο τρίτο σετ πειραμάτων, στο οποίο το αρχικό υψόμετρο βρισκόταν στη μέση της τετραγωνικής διατομής (17.5cm), προσεγγίσαμε τις επιθυμητές πυκνότητες με διαφορετικό τρόπο. Το υψόμετρο αυτό ήταν αρκετό για να μπορέσει να τοποθετηθεί το πυκνόμετρο εντός της δεξαμενής και να μας δώσει ένδειξη. Με αυτό τον τρόπο καταφέραμε να κάνουμε την ίδια διαδικασία που κάναμε στο δοκιμαστικό σωλήνα με τη διαφορά ότι τώρα φτιάχναμε το αλατόνερο μέσα στην ίδια τη δεξαμενή.

Στο τέταρτο σετ πειραμάτων εργαστήκαμε με τον ίδιο τρόπο όπως και στο τρίτο. Το αρχικό υψόμετρο ήταν τα 25cm, στην κορυφή δηλαδή της δεξαμενής και έτσι καταφέραμε να δημιουργήσουμε αλατόνερο μέσα στην ίδια τη δεξαμενή χωρίς τη χρήση δοκιμαστικού σωλήνα.

Οι ακριβείς πυκνότητες αλατόνερου για κάθε στάθμη είναι:

		ρ (kg/m ³)				
H (cm)	5	1050	1060	1070	1080	1090
	10	1050	1060	1070	1080	1090
	17.5	1050	1060	1070	1080	1090
	25	1050	1060	1070	1080	1090

Εικόνα 3.2.1 Πίνακας πυκνοτήτων που επιτεύχθηκαν στην πειραματική διάταξη

3.3 Εκτέλεση των πειραμάτων

Πριν από κάθε πείραμα, η πύλη είναι κλειστή. Κάθε δεξαμενή i γεμίζει με ένα νερό ομοιογενούς πυκνότητας ρ_i . Όταν ανοίγει η θυρίδα δύο αντίθετα ρεύματα βαρύτητας απελευθερώνονται στην ελεύθερη επιφάνεια και στον αδιαπέρατο πυθμένα. Το ρεύμα βαρύτητας που ερευνάται είναι αυτό που δημιουργείται από το υγρό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα.

Αφότου γίνεται ακριβής μέτρηση για την πυκνότητα του αλατόνερου σε κάθε σετ, μέσω των τρόπων που αναφέρθηκαν, στη συνέχεια γίνεται πλήρωση σε καθαρό νερό πυκνότητας $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$ του δεύτερου τμήματος της δεξαμενής μέχρι ότου η στάθμη φτάσει στο υψόμετρο το αριστερό τμήμα της δεξαμενής όπου βρίσκεται το αλατόνερο. Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου προκειμένου να γίνει ορατό

το ρεύμα βαρύτητας γίνεται προσθήκη ροδαμίνης (κόκκινης χρωστικής ουσίας) στο αλατόνερο.

Πριν από κάθε πείραμα γίνεται έλεγχος για τυχόν διαρροή κάτω από το θυρόφραγμα η οποία μπορεί να αλλοιώσει το αποτέλεσμα και τη διάδοση του ρεύματος και εφόσον υπάρχει το πείραμα πραγματοποιείται εξ'αρχής. Για τον λόγο αυτό γίνεται χρήση μονωτικού υλικού το οποίο κόβεται στις επιθυμητές διαστάσεις ώστε να έχει ακριβής εφαρμογή στην εγκοπή κάτω από το θυρόφραγμα. Τοποθετείται κάμερα υψηλής ευκρίνειας στο ύψος της δεξαμενής στη θέση του θυροφράγματος με μοναδικό σκοπό την καταγραφή της αρχής της διάδοσης του ρεύματος ενώ μπαίνουν σε λειτουργία οι προβολείς.

Εφόσον όλοι οι έλεγχοι έχουν πραγματοποιηθεί και η καταγραφή του βίντεο ξεκινήσει γίνεται στιγμιαία αφαίρεση του θυροφράγματος και η δεύτερη κάμερα βιντεοσκοπεί κατά μήκος της δεξαμενής το ρεύμα βαρύτητας που διαδίδεται έως ότου το μέτωπο του φτάσει στο πέρας της δεξαμενής. Η διάρκεια δt που χρειάζεται το μέτωπο του ρεύματος για την απόσταση αυτή και το προφίλ της ταχύτητας του αποτυπώνονται.

Στο μεταβατικό στάδιο πριν την πραγματοποίηση επόμενου πειράματος η δεξαμενή καθαρίζεται με καθαρό νερό και ανοίγεται η κάνουλα στην έξοδο της δεξαμενής προκειμένου το νερό του πειράματος που περιέχει αλάτι και ροδαμίνη να απορρεύσει στην αποχέτευση.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή για κάθε πείραμα.

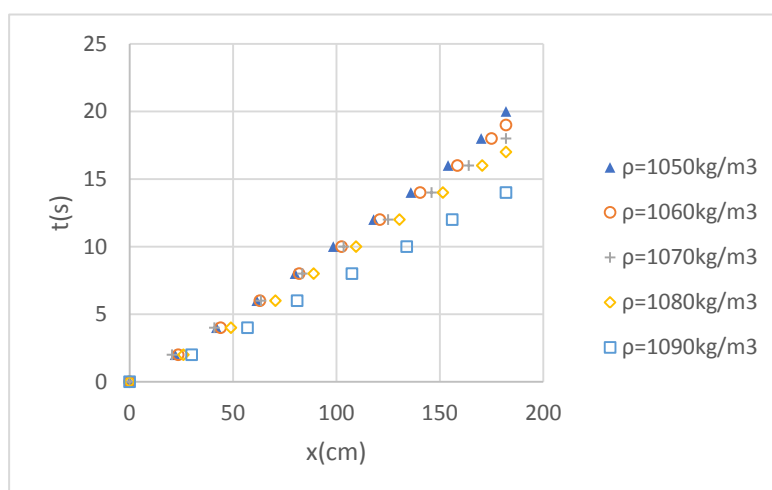
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα συγκριτικά διαγράμματα των ρευμάτων βαρύτητας των πειραμάτων. Στο πρώτο υπο-κεφάλαιο παρουσιάζονται οι διαφορές μεταξύ ρευμάτων ίδιας πυκνότητας σε δύο διαφορετικές αρχικές στάθμες στην τραπεζοειδή διατομή ενώ στο δεύτερο υπο-κεφάλαιο για δύο διαφορετικές στάθμες στην σύνθετη διατομή. Ακόμη, παρουσιάζονται αδιαστατοποιημένα διαγράμματα όλων των πειραμάτων της εργασίας αλλά και παρόμοιων μελετών από τους Monaghan et al. (2009), Shin et al. (2004) αλλά και Κεραμάρης (2010, 2018) με στόχο την εύρεση συνάφειας μεταξύ των πειραμάτων.

4.1 Σύγκριση ρευμάτων βαρύτητας στην τραπεζοειδή διατομή

Στα σχήματα 4.1.1 και 4.1.3 παρουσιάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος. Όπως παρατηρείται το ρεύμα με τη μέγιστη διαφορά ($\Delta\rho/\rho_v=90\%$) ταξιδεύει γρηγορότερα από τα υπόλοιπα όπως προκύπτει και στα δύο πρώτα σετ πειραμάτων με αρχικό υψόμετρο $H_0=5\text{cm}$ και $H_0=10\text{cm}$.

Στο πρώτο σετ πειραμάτων με αρχικό υψόμετρο $H_0=5\text{cm}$: η απόσταση που καλύπτεται από την αρχή της μέτρησης μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι 182cm. Την απόσταση αυτή καλύπτει σε χρόνο $T=14\text{sec}$ το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ ενώ την αντίστοιχη απόσταση καλύπτει το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ σε χρόνο $T=20\text{sec}$.



Σχήμα 4.1.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος τραπεζοειδούς διατομής με $H_0=5\text{cm}$

Παρατηρείται μια γραμμικότητα κατά τη διάρκεια διάδοσης των μετώπων των ρευμάτων ενώ είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη η διαφορά της πυκνότητας τόσο

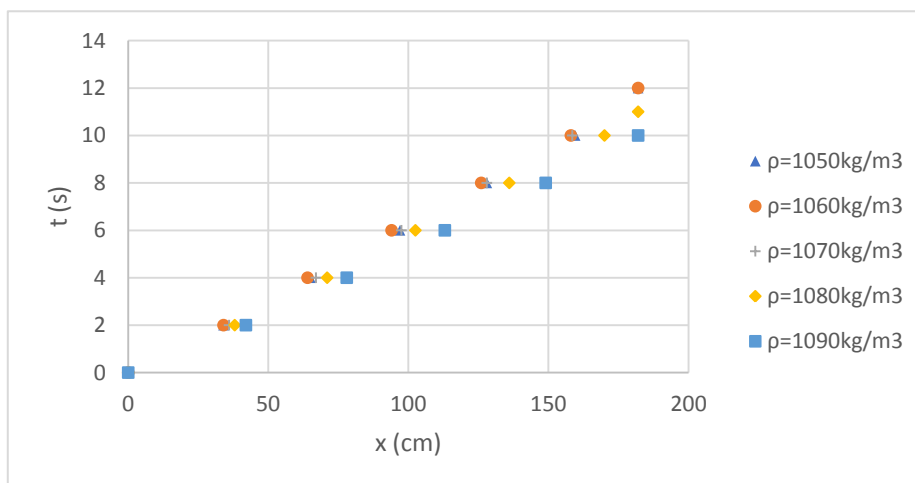
μικρότερος ο χρόνος t που χρειάζεται κάθε ρεύμα έως το πέρας της δεξαμενής
 Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν ως εξής:

1050kg/m ³ h=5cm		1060kg/m ³ h=5cm		1070kg/m ³ h=5cm		1080kg/m ³ h=5cm		1090kg/m ³ h=5cm	
x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	2	23,5	2	20,5	2	26	2	30	2
42	4	44	4	41	4	49	4	57	4
61,5	6	63	6	63,5	6	70,5	6	81	6
80	8	82	8	83,5	8	89	8	107,5	8
98,5	10	102,5	10	103,5	10	109,5	10	134	10
118	12	121	12	125	12	130,5	12	156	12
136	14	140,5	14	146	14	151,5	14	182	14
154	16	158,5	16	164	16	170,5	16		
170	18	175	18	182	18	182	17		
182	20	182	19						

Εικόνα 4.1.2 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος $H_0=5\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες

Όπως φαίνεται στην παραπάνω εικόνα ο χρόνος t που χρειάστηκαν τα ρεύματα βαρύτητας είναι μικρότερος όταν αυξάνεται σε αυτά η διαφορά πυκνότητας.

Στο δεύτερο σετ πειραμάτων με αρχικό υψόμετρο $H_0=10\text{cm}$, η απόσταση που καλύπτεται από την αρχή της μέτρησης μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι 182cm. Την απόσταση αυτή καλύπτει σε χρόνο $T=10\text{sec}$ το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ ενώ την αντίστοιχη απόσταση καλύπτει το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ σε χρόνο $T=12\text{sec}$.



Σχήμα 4.1.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος τραπεζοειδούς διατομής με $H_0=10\text{cm}$

Παρατηρείται μια γραμμικότητα κατά τη διάρκεια διάδοσης των μετώπων των ρευμάτων ενώ είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη η διαφορά της πυκνότητας τόσο μικρότερος ο χρόνος t . Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν ως εξής:

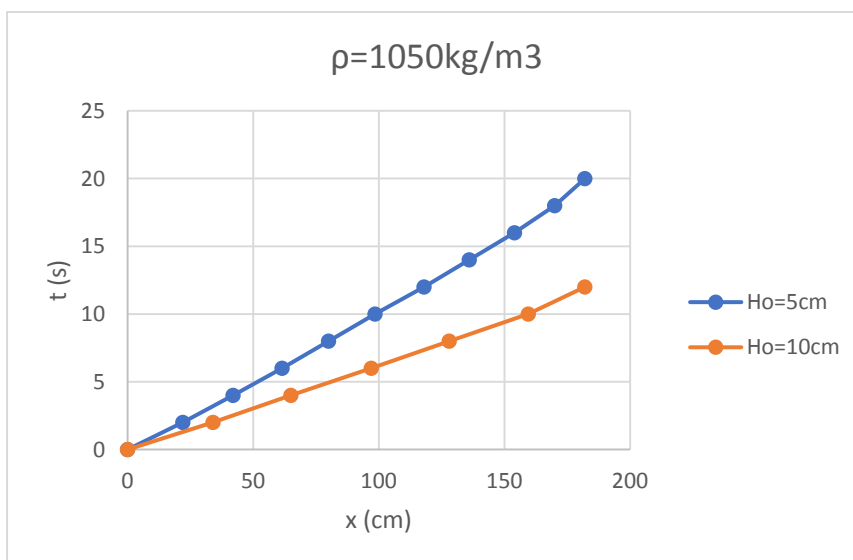
1050kg/m ³ h=10cm		1060kg/m ³ h=10cm		1070kg/m ³ h=10cm		1080kg/m ³ h=10cm		1090kg/m ³ h=10cm	
x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	2	34	2	36	2	38	2	42	2
65	4	64	4	67	4	71	4	78	4
97	6	94	6	97,5	6	102,5	6	113	6
128	8	126	8	128	8	136	8	149	8
159,5	10	158	10	158,5	10	170	10	182	10
182	12	182	12	182	11	182	11		

Εικόνα 4.1.4 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος $H_0=10\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες

Παρατηρείται πως η διαφορά δt μεταξύ του ρεύματος με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας και αυτού με τη μικρότερη είναι μικρή. Συμπεραίνουμε πως σημαντικό ρόλο έχει και το αρχικό ύψος από το οποίο δημιουργούνται τα ρεύματα βαρύτητας.

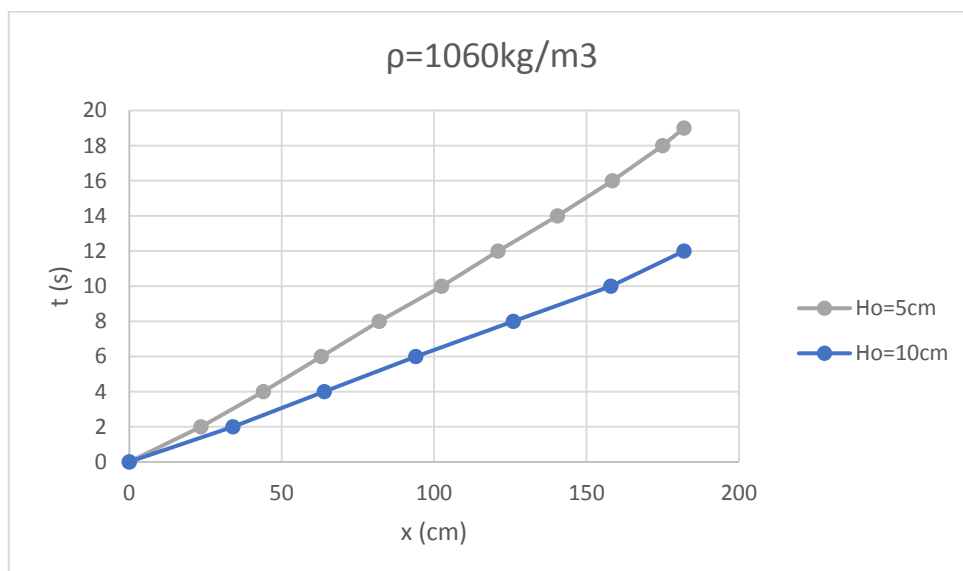
Στην συνέχεια συγκρίνοντας τα ρεύματα εκάστοτε πυκνότητας και για τα δύο αρχικά υψόμετρα ταυτοχρόνως έγινε αντιληπτή μία απόκλιση στους χρόνους διάδοσης των ρευμάτων έως το πέρας της δεξαμενής. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε διαφορά της τάξεως των 8sec, στα ρεύματα με την μικρότερη διαφορά πυκνότητας ($\Delta\rho/\rho_v=50\%$), έως και 4sec στα ρεύματα με διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho/\rho_v=90\%$.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορές των δύο αρχικών υψομέτρων για κάθε πυκνότητα:



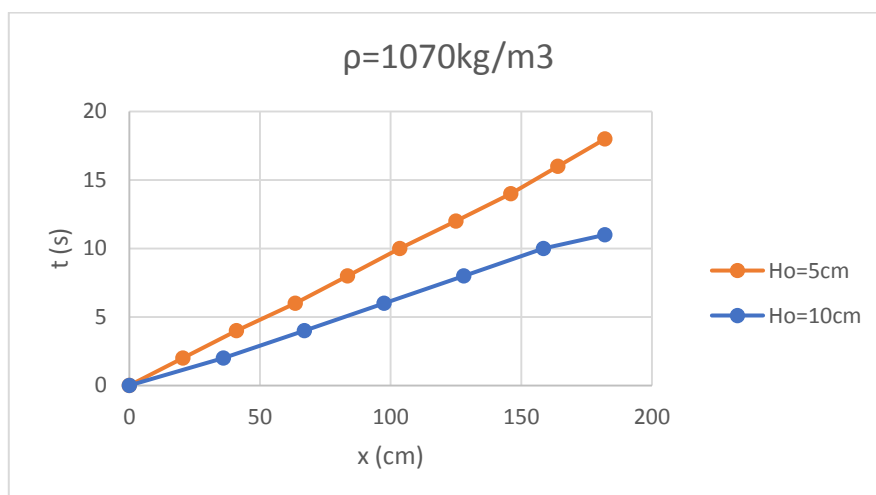
Σχήμα 4.1.5 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ για $H_0=5\text{cm}, 10\text{cm}$

Η διαφορά δt στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως των 8sec.



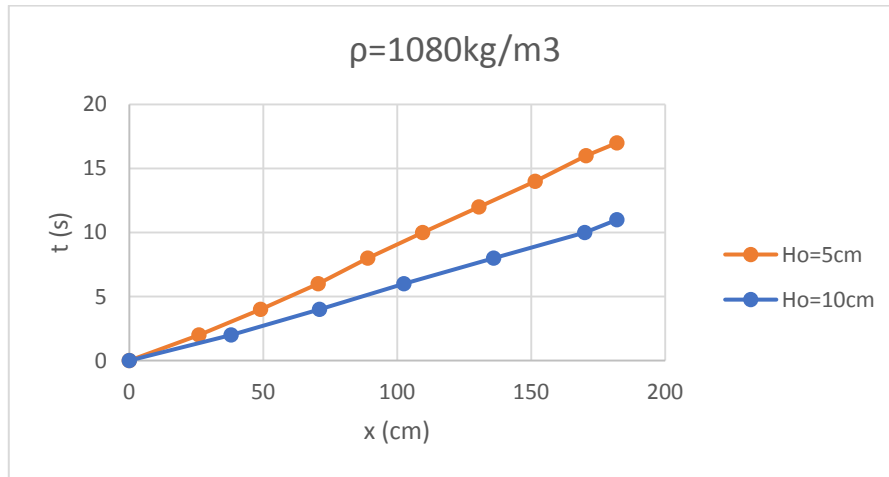
Σχήμα 4.1.6 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ για $H_0=5\text{cm}, 10\text{cm}$

Η διαφορά δt στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως των 7sec.



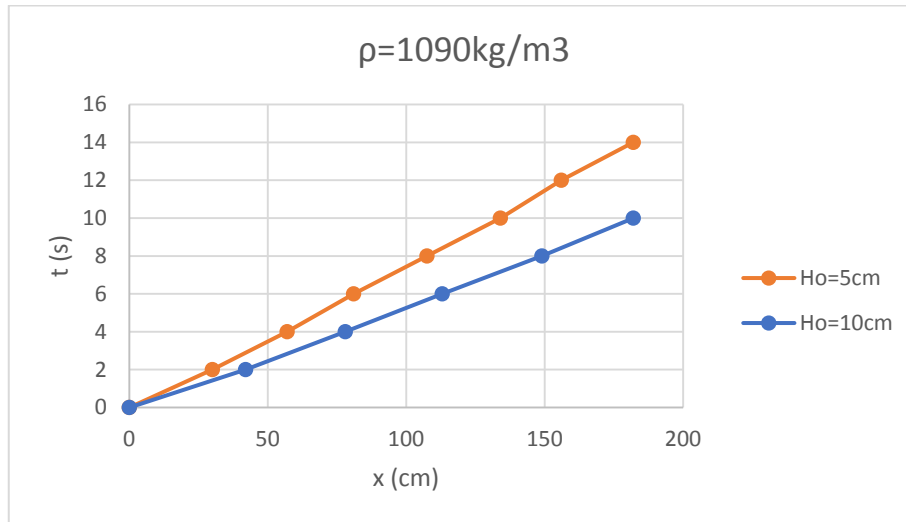
Σχήμα 4.1.7 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ για $H_0=5\text{cm}, 10\text{cm}$

Η διαφορά δt στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως των 7sec.



Σχήμα 4.1.8 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ για $H_0=5\text{cm}, 10\text{cm}$

Η διαφορά Δt στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως των 6sec.



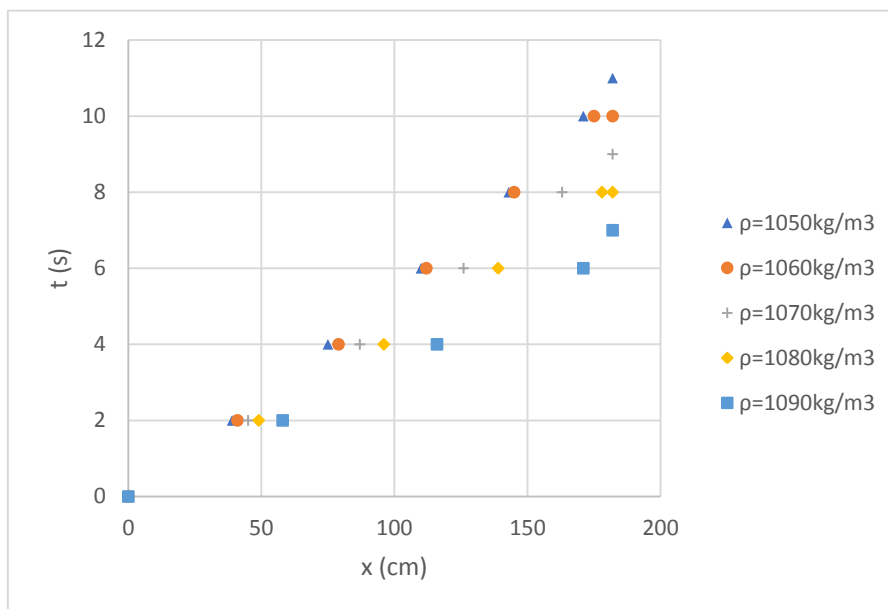
Σχήμα 4.1.9 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ για $H_0=5\text{cm}, 10\text{cm}$

Η διαφορά Δt στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως των 4sec.

4.2 Σύγκριση ρευμάτων βαρύτητας στην σύνθετη διατομή

Στα δύο τελευταία σεντ πειραμάτων με αρχικό υψόμετρο $H_0=17.5\text{cm}$ και $H_0=25\text{cm}$ παρατηρείται το ίδιο φαινόμενο με τα πειράματα στην τραπεζοειδή διατομή. Στα σχήματα 4.2.1 και 4.2.3 παρουσιάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος όπου το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ ταξιδεύει γρηγορότερα από τα υπόλοιπα.

Στο τρίτο σετ πειραμάτων με αρχικό υψόμετρο $H_0=17.5\text{cm}$, η απόσταση που καλύπτεται από την αρχή της μέτρησης μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι 182cm . Την απόσταση αυτή καλύπτει σε χρόνο $T=7\text{sec}$ το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ ενώ την αντίστοιχη απόσταση καλύπτει το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ σε χρόνο $T=11\text{sec}$.



Σχήμα 4.2.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος σύνθετης διατομής με $H_0=17.5\text{cm}$

Παρατηρείται μια γραμμικότητα κατά τη διάρκεια διάδοσης των μετώπων των ρευμάτων ενώ είναι εμφανές ότι όσο μεγαλύτερη η διαφορά της πυκνότητας τόσο μικρότερος ο χρόνος t . Στην περίπτωση της σύνθετους διατομής είναι ακόμη εμφανές πως ο χρόνος μετάβασης των ρευμάτων βαρύτητας από το θυρόφραγμα έως το πέρας της δεξαμενής είναι σαφώς μικρότερος από αυτών στην τραπεζοειδή. Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν ως εξής:

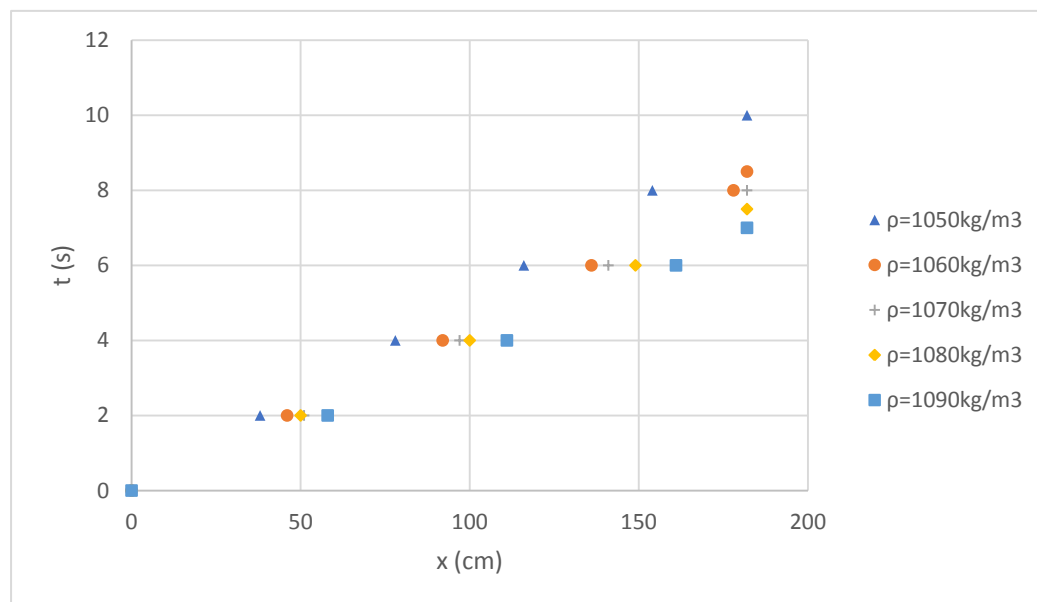
1050kg/m3 h=17,5cm		1060kg/m3 h=17,5cm		1070kg/m3 h=17,5cm		1080kg/m3 h=17,5cm		1090kg/m3 h=17,5cm	
x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	2	41	2	45	2	49	2	58	2
75	4	79	4	87	4	96	4	116	4
110	6	112	6	126	6	139	6	171	6
143	8	145	8	163	8	178	8	182	7
171	10	175	10	182	9	182	8		
182	11	182	10						

Εικόνα 4.2.2 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος $H_0=17.5\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες

Παρατηρείται πως η διαφορά Δt μεταξύ του ρεύματος με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας και αυτού με τη μικρότερη είναι της τάξεως των 4sec . Το ρεύμα

βαρύτητας είναι πλέον πολύ ταχύτερο από ότι σε όλες τις περιπτώσεις στην τραπεζοειδή διατομή.

Στο τέταρτο σετ πειραμάτων με αρχικό υψόμετρο $H_0=25\text{cm}$, στην ίδια απόσταση (182cm) το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ χρειάστηκε χρόνο $T=7\text{sec}$ ενώ το ρεύμα με $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ χρειάστηκε χρόνο $T=10\text{sec}$.



Σχήμα 4.2.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος σύνθετης διατομής με αρχικό ύψος $H_0=25\text{cm}$

Σε αυτό το σετ πειραμάτων είναι πασιφανής πλέον η επίδραση του αρχικού ύψους το νερού στην ταχύτητα διάδοσης του μετώπου των ρευμάτων βαρύτητας. Εξακολουθεί να παρατηρείται μια γραμμικότητα μεταξύ του χρόνου t και της απόστασης x .

Αναλυτικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν ως εξής:

1050kg/m3 h=25cm		1060kg/m3 h=25cm		1070kg/m3 h=25cm		1080kg/m3 h=25cm		1090kg/m3 h=25cm	
x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)	x(cm)	t(sec)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	2	46	2	51	2	50	2	58	2
78	4	92	4	97	4	100	4	111	4
116	6	136	6	141	6	149	6	161	6
154	8	178	8	182	8	182	7,5	182	7
182	10	182	8,5						

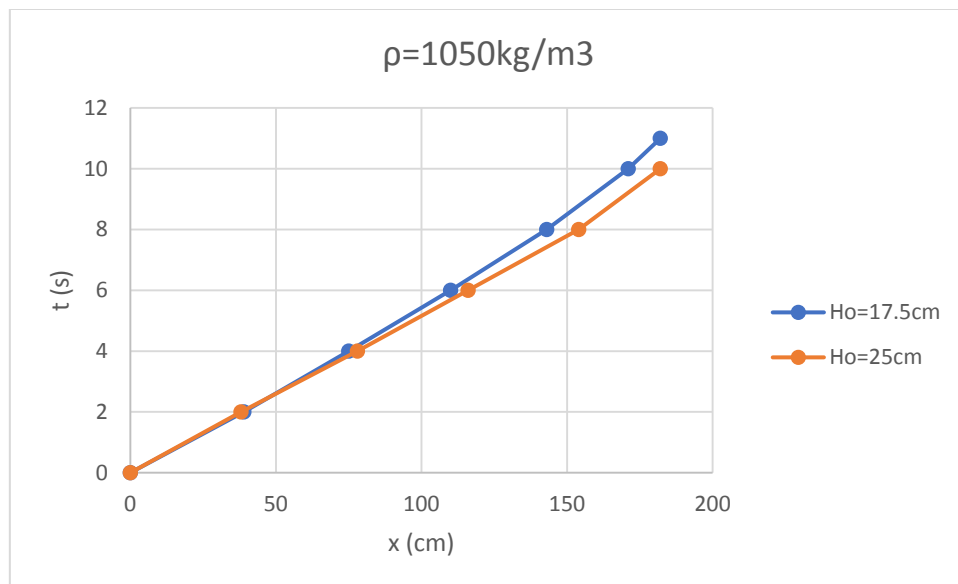
Εικόνα 4.2.4 Δεδομένα χρονικής εξέλιξης με αρχικό ύψος $H_0=25\text{cm}$ για τις διάφορες πυκνότητες

Οι χρόνοι t που χρειάζονται τα ρεύματα βαρύτητας στο τελευταίο σετ πειραμάτων με την υψηλότερη αρχική στάθμη (κορυφή της σύνθετης διατομής) είναι σημαντικά μικρότεροι από αυτούς στην περίπτωση της τραπεζοειδούς διατομής. Καταφαίνεται

και πάλι η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση των ρευμάτων, με το ρεύμα με τη μεγαλύτερη εξ' αυτών να κινείται ταχύτερα από τα υπόλοιπα.

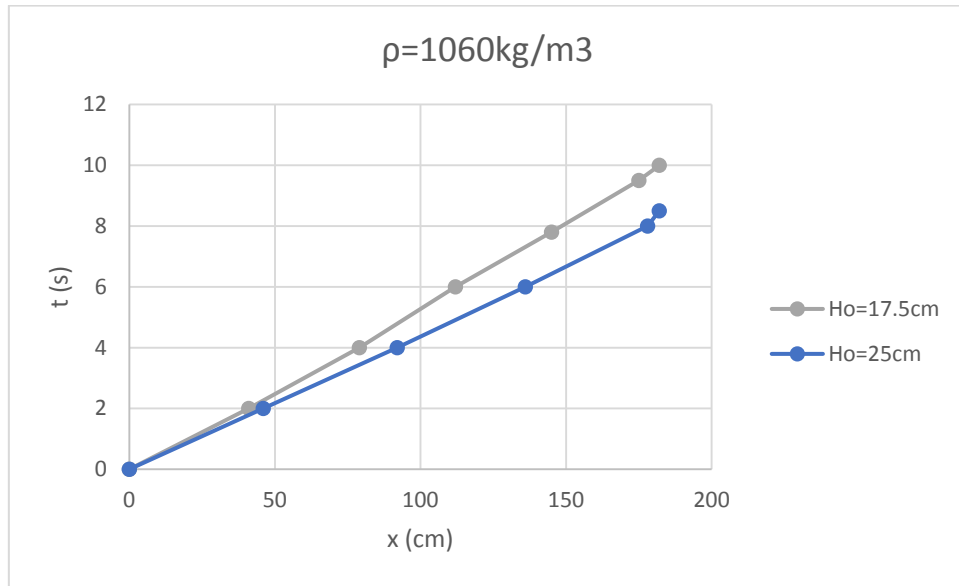
Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με το προηγούμενο κεφάλαιο και κάνοντας σύγκριση τα ρεύματα εκάστοτε πυκνότητας και για τα δύο αρχικά υψόμετρα ταυτοχρόνως παρατηρήθηκε επίσης απόκλιση στους χρόνους διάδοσης των ρευμάτων έως το πέρας της δεξαμενής. Στην περίπτωση αυτή βέβαια η διαφορά ήταν πολύ μικρή, της τάξεως του 1.5sec, στα ρεύματα με τις μικρότερες διαφορές πυκνότητας έως και μερικών χιλιοστών στο ρεύμα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ($\Delta\rho/\rho\nu=90\%$).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορές των δύο αρχικών υψομέτρων για κάθε πυκνότητα:



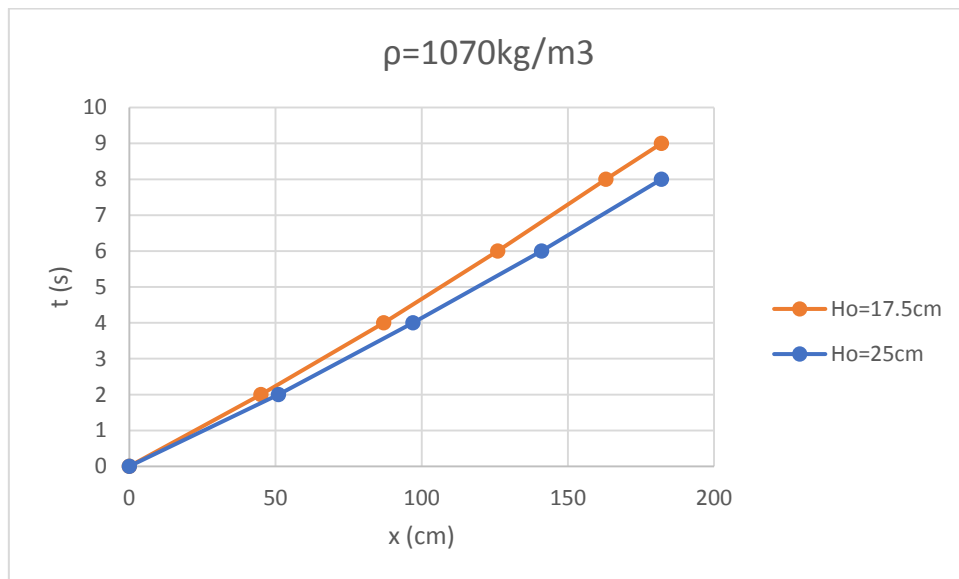
Σχήμα 4.2.5 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η διαφορά δι στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως του 1sec.



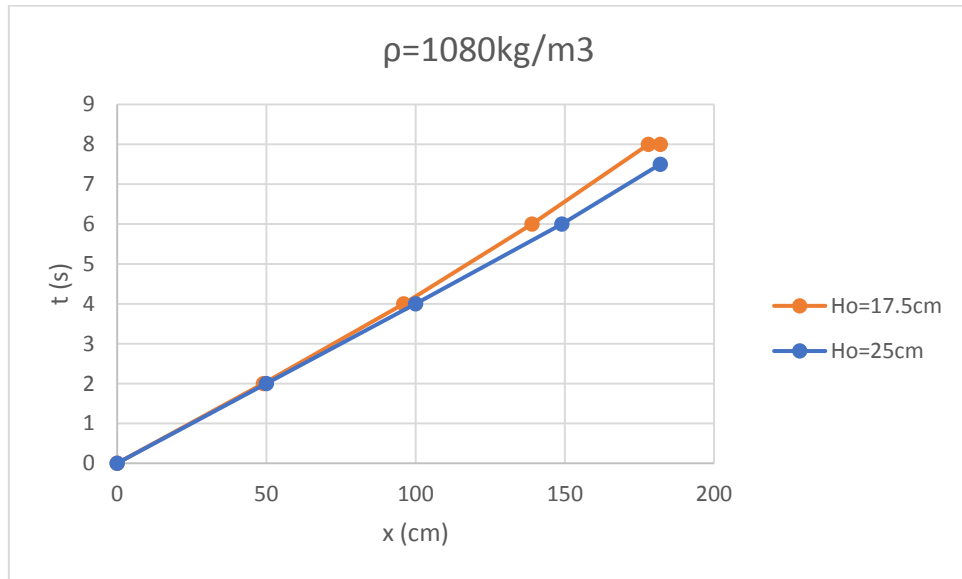
Σχήμα 4.2.6 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ για $H_o=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η διαφορά δι στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως των 1.5sec.



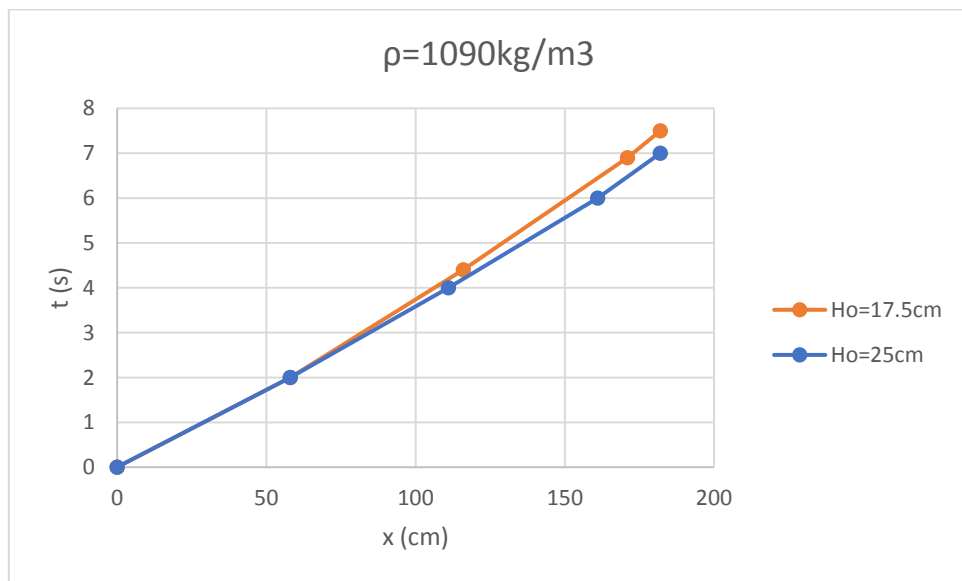
Σχήμα 4.2.7 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ για $H_o=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η διαφορά δι στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως του 1sec.



Σχήμα 4.2.8 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

Η διαφορά δt στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι της τάξεως των 0.5sec.



Σχήμα 4.2.9 Χρονική εξέλιξη του μετώπου ρεύματος πυκνότητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ για $H_0=17.5\text{cm}, 25\text{cm}$

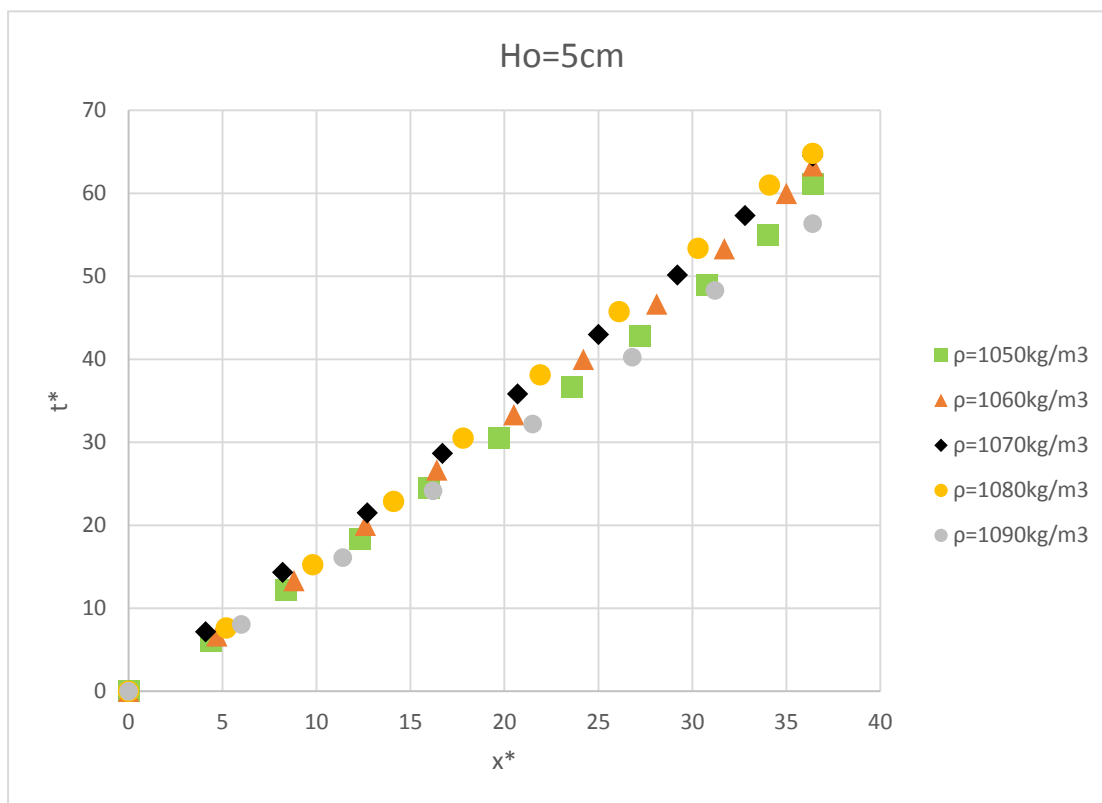
Η διαφορά δt στο πέρας της δεξαμενής για τα δύο υψόμετρα είναι ελαχίστων χιλιοστών του δευτερολέπτου.

4.3 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα σύνθετης και τραπεζοειδούς διατομής

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται οι αδιάστατες αποστάσεις x^* έναντι του αδιάστατου χρόνου t^* για τα διαφορετικά αρχικά ύψη και για τις διαφορετικές

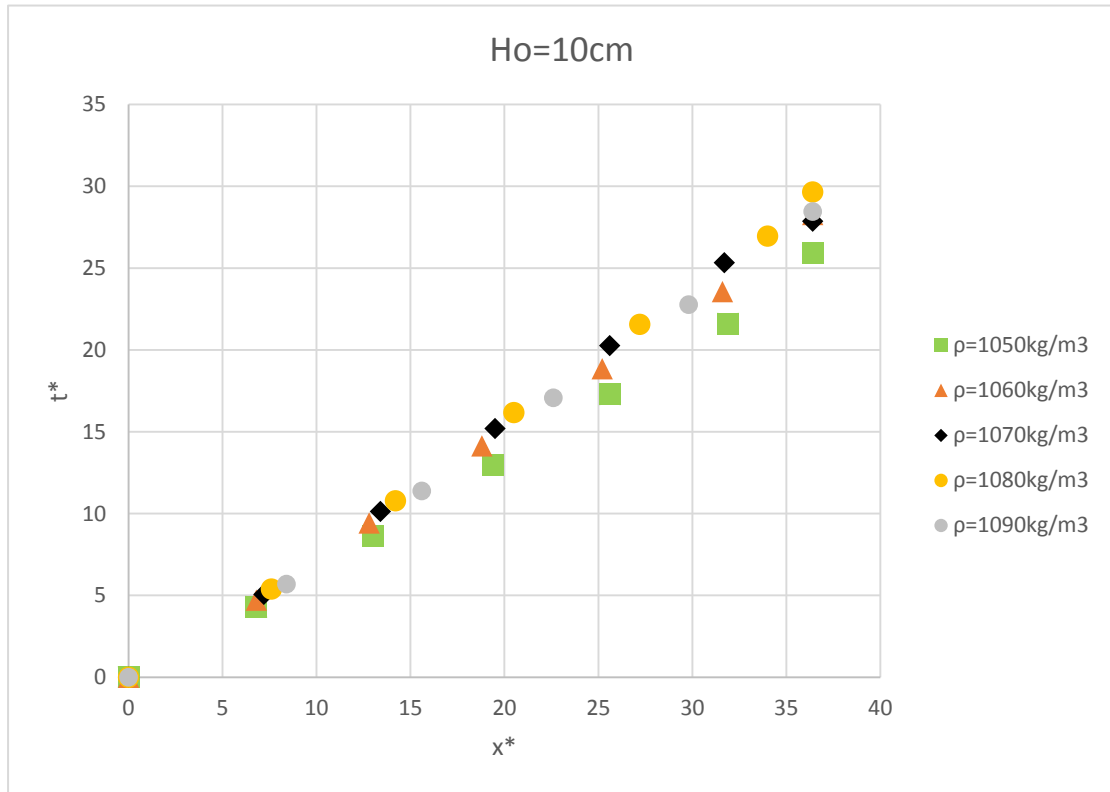
πυκνότητες. Η απόσταση x γίνεται αδιάστατη μέσω του τύπου $x^* = \frac{x}{H}$ όπου H η αρχική στάθμη νερού και ο χρόνος t με την παράμετρο

$$\sqrt{\frac{g(1-\gamma)}{H}} \text{ και τον τύπο } t^* = t \sqrt{\frac{g(1-\gamma)}{H}}, \text{ όπου } \gamma = \frac{\rho_w}{\rho_{sw}}.$$



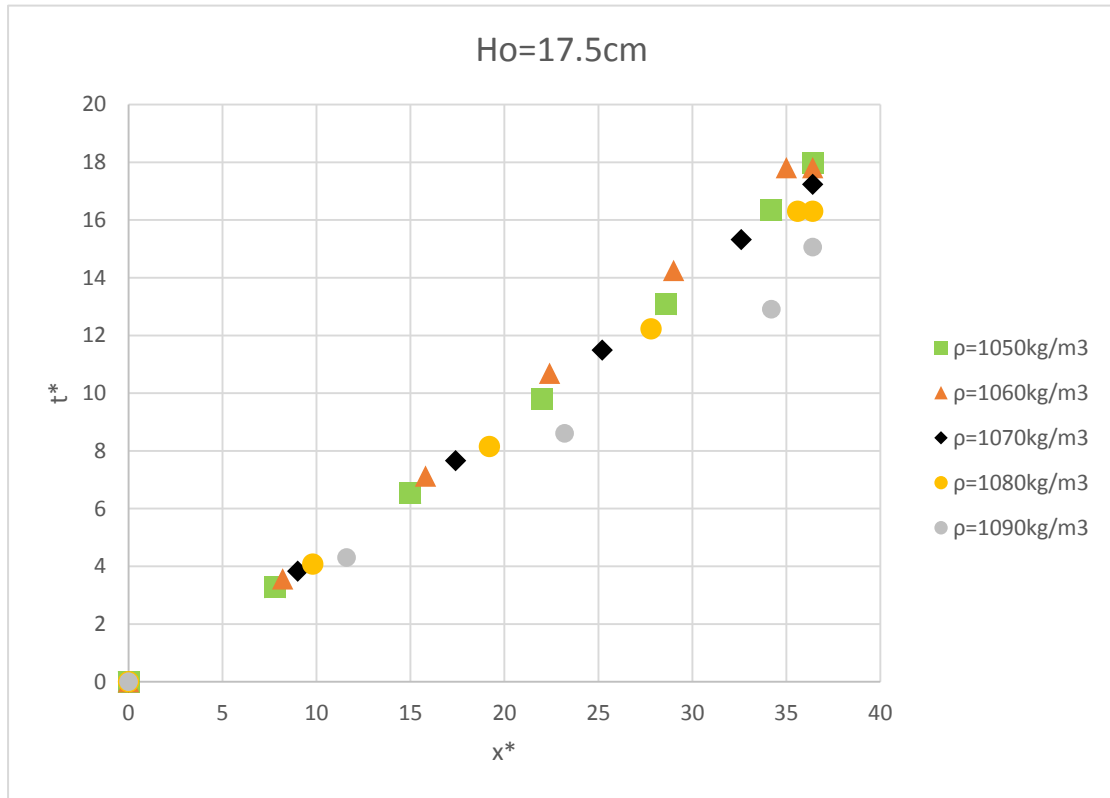
Σχήμα 4.3.1 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_0=5\text{cm}$

Στο σχήμα 4.3.1 εξετάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος βαρύτητας. Το ρεύμα με τη μεγαλύτερη διαφορά ($\rho=0.9\%$) ταξιδεύει ταχύτερα από τα υπόλοιπα.



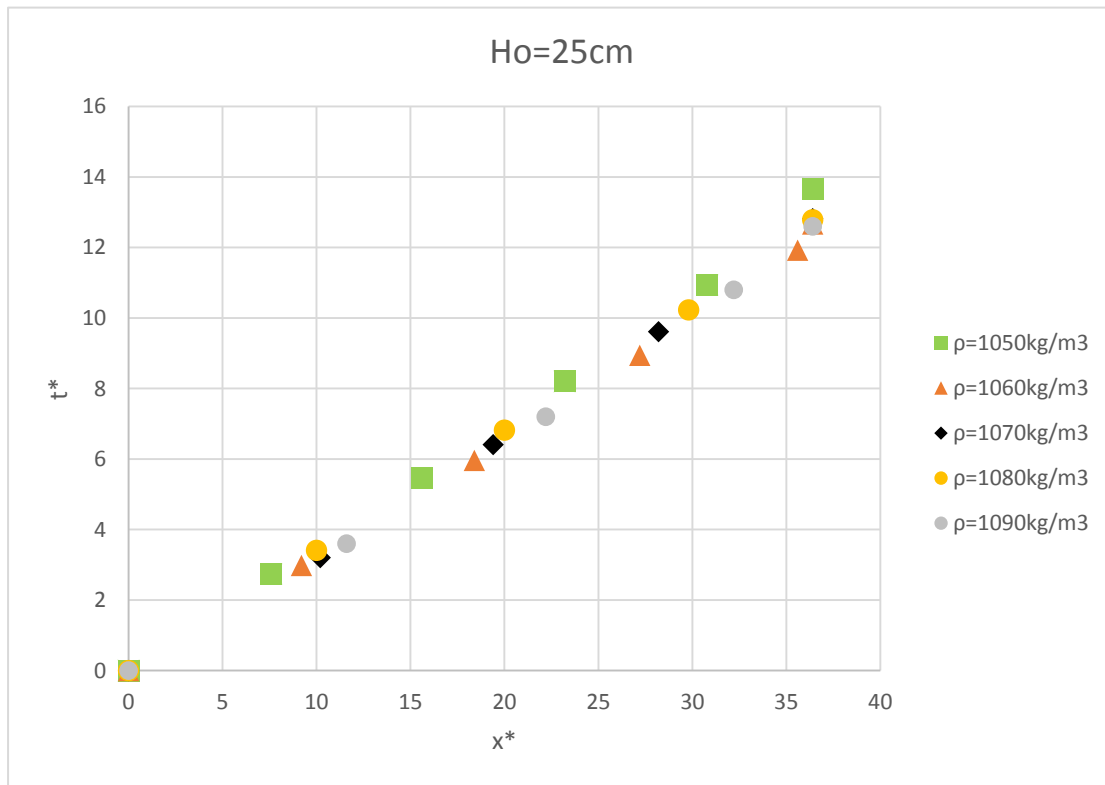
Σχήμα 4.3.2 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_0=10\text{cm}$

Στο σχήμα 4.3.2 εξετάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση του ρεύματος, αυτή τη φορά στην περίπτωση με αρχικό ύψος $H=10\text{cm}$. Το ρεύμα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας και σε αυτή την περίπτωση όπως και στην προηγούμενη ($H=5\text{cm}$) κινείται ταχύτερα και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ρεύματος βαρύτητας αυξάνεται με την αυξανόμενη διαφορά πυκνότητας.



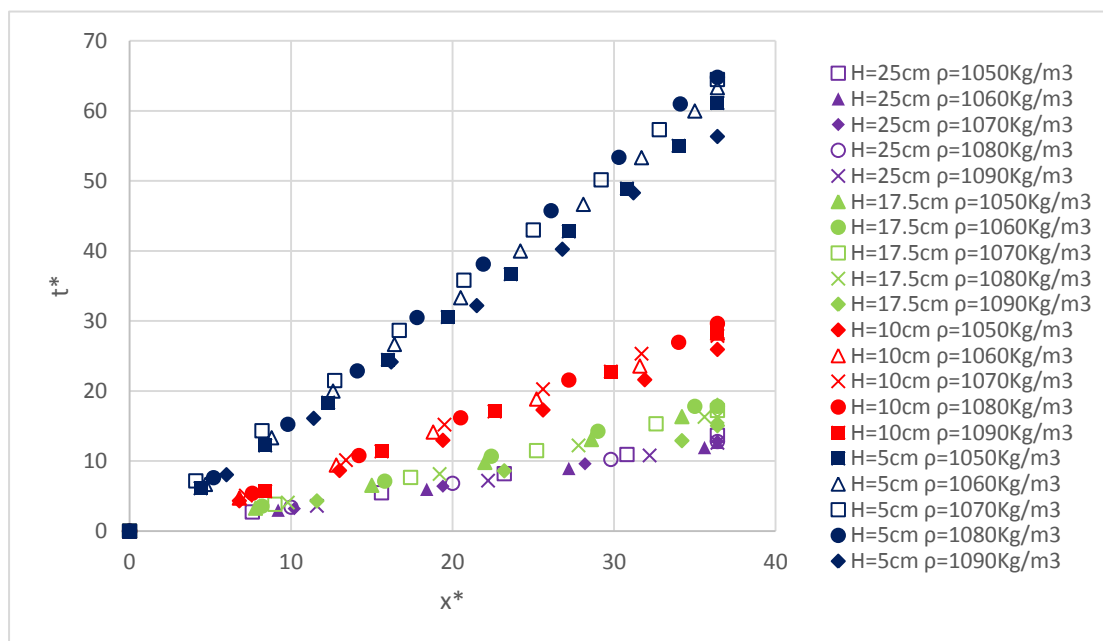
Σχήμα 4.3.3 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_o=17.5\text{cm}$

Στο σχήμα 4.3.3 εξετάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στη κίνηση του ρεύματος, αυτή τη φορά στην περίπτωση με αρχικό ύψος $H=17.5\text{cm}$. Είναι εμφανές πως το ρεύμα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας διαδίδεται γρηγορότερα. Ο αδιάστατος χρόνος είναι μικρότερος και από τις δύο περιπτώσεις στην τραπεζοειδή διατομή.



Σχήμα 4.3.4 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή με $H_0=25\text{cm}$

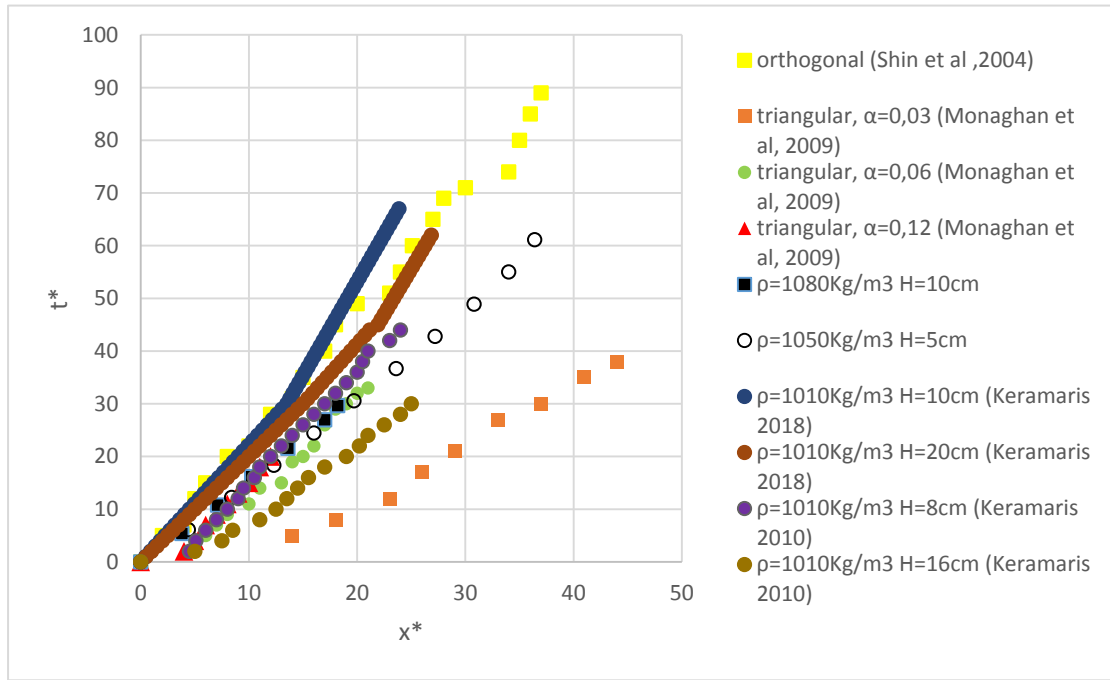
Στο σχήμα 4.3.5 εξετάζεται η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στη κίνηση του ρεύματος, αυτή τη φορά στην περίπτωση με αρχικό ύψος $H=25\text{cm}$. Η ανάλυση του διαγράμματος καταδεικνύει το ίδιο πράγμα με όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις. Το ρεύμα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινείται ταχύτερα ενώ ο αδιάστατος χρόνος είναι μικρότερος και από τις δύο περιπτώσεις στην τραπεζοειδή διατομή ενώ ακόμη όσο μεγαλύτερο είναι το αρχικό υψόμετρο τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του μετώπου του ρεύματος.



Σχήμα 4.3.5 Χρονική εξέλιξη του μετώπου του ρεύματος πυκνότητας σε αδιάστατη μορφή (συνολικά)

Στο σχήμα 4.3.5 τοποθετήθηκαν όλα τα αδιαστατοποιημένα διαγράμματα που προέκυψαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν και αυτά ομαδοποιήθηκαν με βάση το αρχικό υψόμετρο. Είναι προφανές πως τα ρεύματα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινούνται ταχύτερα αλλά ακόμη, έχει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα του ρεύματος το αρχικό υψόμετρο. Τα ρεύματα με το μεγαλύτερο H κινούνται ταχύτερα.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα μεταξύ πειραμάτων των Monaghan et al (2009), Κεραμάρης (2010), Κεραμάρης (2018) και δυο ενδεικτικών μετρήσεων σε διαφορετικό ύψος στάθμης και διαφορετικής πυκνότητας. Επίσης, περιλαμβάνεται η χρονική ανάπτυξη του μετώπου του ρεύματος από τα πειράματα των Shin et al. (2004), για οριζόντια ορθογωνική διατομή. Δείχνεται ότι η κίνηση του ρεύματος εξαρτάται από το σχήμα της λεκάνης. Το ρεύμα κινείται ταχύτερα μέσα στο τραπεζοειδές τμήμα, το οποίο συμφωνεί με τα αναλυτικά ευρήματα των Monaghan et al (2009).



Σχήμα 4.3.6 Συγκριτικό διάγραμμα χρονικής εξέλιξης του μετώπου σε αδιάστατη μορφή (συνολικά)

Το Σχήμα 4.3.6 περιλαμβάνει μετρήσεις μοντέλου-box των Monaghan et al. (2009) για τριγωνικές λεκάνες (η κλίση της λεκάνης είναι 12ο, 23ο και 41ο προς τον οριζόντιο άξονα με τα αντίστοιχα βάθη της λεκάνης να είναι 0.03 m, 0.06 m και 0.12 m) μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματά μας για την τραπεζοειδή διατομή (με πλευρική κλίση 1: 1) και τα αποτελέσματα για την ορθογωνικής διατομής (Shin et al., 2004). Η επίδραση της γεωμετρίας της λεκάνης και η απότομη κλίση των πλευρών στην κίνηση είναι σημαντικές. Όπως παρατηρείται, υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων αυτών των μελετών.

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση ρευμάτων βαρύτητας σε δεξαμενή με θυρίδα. Η δεξαμενή είναι σύνθετης διατομής (τραπεζοειδούς διατομής στο κατώτερο τμήμα της και ορθογωνικής στο άνω τμήμα της). Η μετακινούμενη θυρίδα διαχωρίζει δύο υγρά (καθαρό νερό και αλατόνερο με διαφορά πυκνότητας 50‰ 60‰ 70‰ 80‰ και 90‰ ($\rho_n=1000 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{αλ.ν}}=1050, 1060, 1070, 1080, 1090 \text{ kg/m}^3$)).

Το κύριο συμπέρασμα που προέκυψε από αυτή τη μελέτη είναι ότι η διατομή της δεξαμενής διακατέχει σημαντικό ρόλο στην διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Συγκεκριμένα, η παρουσία του τραπεζίου στο κάτω μέρος της σύνθετης διατομής έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της ταχύτητας των ρευμάτων βαρύτητας σε σχέση με την ορθογωνική διατομή. Άλλα συμπεράσματα αυτής της μελέτης είναι:

- Το ρεύμα βαρύτητας διαδίδεται με μέτωπο παραβολικού τύπου. Το ρεύμα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας (0.9%) διαδίδεται γρηγορότερα συγκριτικά με τα υπόλοιπα και στις δύο περιπτώσεις (Τραπεζοειδής διατομή και σύνθετη διατομή). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ρεύματος βαρύτητας αυξάνεται αναλογικά με την αύξηση της διαφοράς πυκνότητας.
- Η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας είναι εντονότερη στην περίπτωση της σύνθετης διατομής σε σχέση με την τραπεζοειδή. Το ρεύμα βαρύτητας με την μεγαλύτερη αρχική στάθμη κινείται γρηγορότερα σε όλες τις περιπτώσεις
- Κατά το άνοιγμα της θυρίδας και καθ'όλη τη διάρκεια της διάδοσης του ρεύματος βαρύτητας έως το πέρας της δεξαμενής παρατηρούνται κυματισμοί Kelvin-Helmholtz. Αυτοί είναι στη βασική μορφή, στροβιλισμοί υγρού που δημιουργούνται κατά την επαφή του ρεύματος βαρύτητας με το περιβάλλον υγρό. Αυτοί οι σχηματισμοί παραμένουν σχεδόν σταθεροί στη δομή του ρεύματος βαρύτητας, ξεθωριάζουν όμως λόγω της συνεχούς συσσώρευσης του περιβάλλοντος υγρού.
- Το προφίλ του μετώπου ενός ρεύματος βαρύτητας και ο ρυθμός διάδοσης του είναι πολύ ευαίσθητα σε οποιαδήποτε αντίθετη ή επακόλουθη ροή στο περιβάλλον.
- Η αδιάστατη απόσταση x^* απεικονίζεται έναντι του αδιάστατου χρόνου t^* και στις δύο περιπτώσεις (Τραπεζοειδής και σύνθετη διατομή). Η επίδραση της διατομής στην κίνηση του ρεύματος είναι ξεκάθαρη. Ακόμη, αποτελέσματα από μελέτες των Monaghan et al. (2009a, 2009b) για τριγωνικές λεκάνες υποδεικνύει την εξάρτηση της κίνησης του ρεύματος από τη γεωμετρία της λεκάνης.

- Υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του Monaghan et al. (2009), Shin et al. (2004) αλλά και του Κεραμάρη (2010, 2018) με την παρούσα μελέτη αναλογικά των αρχικών σταθμών Η και των διαφορετικών πυκνοτήτων.

Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία

Antenucci, J. P., J. D. Brooks and M. R. Hipsey (2005). A simple model for quantifying cryptosporidium transport, dilution and potential risks in reservoirs, *J. Am Water Works Assoc.* 97, 86-93.

Banyal, A. S. (2013). A mathematical theorem on the onset of stationary convection in couple stress fluid, *J. Appl. Fluid Mech.* 6(2), 191-196.

Keevil, G. M., J. Peakall, J. Best and K. J. Amos (2006). Flow structure in sinuous submarine channels: velocity and turbulence structure of an experimental channel, *Mar.Geol.* 229, 241- 257.

Keramaris, E. and P. Prinos (2008). Gravity currents over a vegetated bed, *Proc. of International Conference on Fluvial Hydraulics, RiverFlow 1*, 305-310, Cesme-Izmir, Turkey.

Keramaris, E. and P. Prinos (2010). Gravity Currents in a Valley of Trapezoidal Shape, *Proc. of International Conference on Fluvial Hydraulics, RiverFlow 599-604*, Braunschweig, Germany.

Kumar, K., V. Singh and S. Sharma (2015). On the onset of convection in a dusty couple-stress fluid with variable gravity through a porous medium in hydromagnetics, *J. Appl. Fluid Mech.* 8(1), 55-63.

Kumar, P. (2012). Thermosolutal magneto-rotatory convection in couple-stress fluid through porous medium, *J. Appl. Fluid Mech.* 5(4), 45-52.

Monaghan, J. J., C. A. Meriaux, H. E. Huppert and J. Mansour (2009). Particulate gravity currents along V-shaped valleys, *J. Fluid Mech.* 631, 419-440.

Monaghan, J. J., C. A. Meriaux, H. E. Huppert and J. M. Monaghan (2009). High Reynolds number gravity currents along V-shaped valleys. *European Journal of Mechanics B/Fluids* 28, 651-659

Oldham, C. E. and J. J. Sturman (2001). The effect of emergent vegetation on convective flushing in shallow wetlands: Scaling and experiments, *Limnol. Oceanogr.* 46(6), 1486-1493.

Shin, J. O., S. B. Dalziel and P. F. Linden (2004). Gravity currents produced by lock-exchange, *J. Fluid Mech.* 521, 1-34.

Simpson, J. E. (1997). Gravity Currents in the Environment and the Laboratory, Cambridge Univ. Press, New York.

Takagi, D. and H. E. Huppert (2007). The effect of confining boundaries on viscous gravity currents, J. Fluid Mech. 577, 495-505.

Takagi, D. and H. E. Huppert (2008). Viscous gravity currents inside confining channels and fractures. Phys. Of Fluids 20, 023104-1-6.

Zemach, T. and M. Ungarish (2013). Gravity currents in non-rectangular cross-section channels: analytical and numerical solutions of the one-layer shallow-water model for high Reynolds-number propagation. Phys. Fluids 25(026601), 1–24.

Zhang, X. and H. M. Nepf (2008). Density-driven exchange flow between open water and an aquatic canopy, Water Resources Research 44, 1-12.

Marino, B.M., Thomas, L.P., 2009. Front condition for gravity currents in channels of nonrectangular symmetric cross-section shapes, J. of Fluid Eng., Vol 131, 051201-1-6.

Κεφάλαιο 7 Παράρτημα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται εικόνες από την δεξαμενή, το θυρόφραγμα, το δοκιμαστικό σωλήνα που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη των πυκνοτήτων αλλά και της ροδαμίνης, το υλικό που προσδίδει χρώμα στα ρεύματα βαρύτητας στο πείραμα. Στο τέλος παρουσιάζονται 3 στιγμιότυπα για κάθε πείραμα. Το πρώτο στιγμιότυπο αποτυπώνει την αρχή της κίνησης κάθε ρεύματος βαρύτητας, το δεύτερο στιγμιότυπο την κίνηση στην μέση της απόστασης και το τρίτο στο πέρας της δεξαμενής.



Εικόνα 7.1 Γυάλινη δεξαμενή 220 εκ. σε μήκος, πλάτους 23εκ. στο άνω και 5εκ. στο κατώτερο μέρος.



Εικόνα 7.2 Προφίλ γυάλινης δεξαμενής 220 εκ. σε μήκος.



Εικόνα 7.3 Έξοδος γυάλινης δεξαμενής 220 εκ. σε μήκος.



Εικόνα 7.4 Θυρόφραγμα ύψους 25εκ σύνθετης διατομής.



Εικόνα 7.5 Προφίλ εξόδου γυάλινης δεξαμενής 220εκ. σε μήκος.



Εικόνα 7.6 Δοκιμαστικός σωλήνας στον οποίο έγινε η επίτευξη των πυκνοτήτων



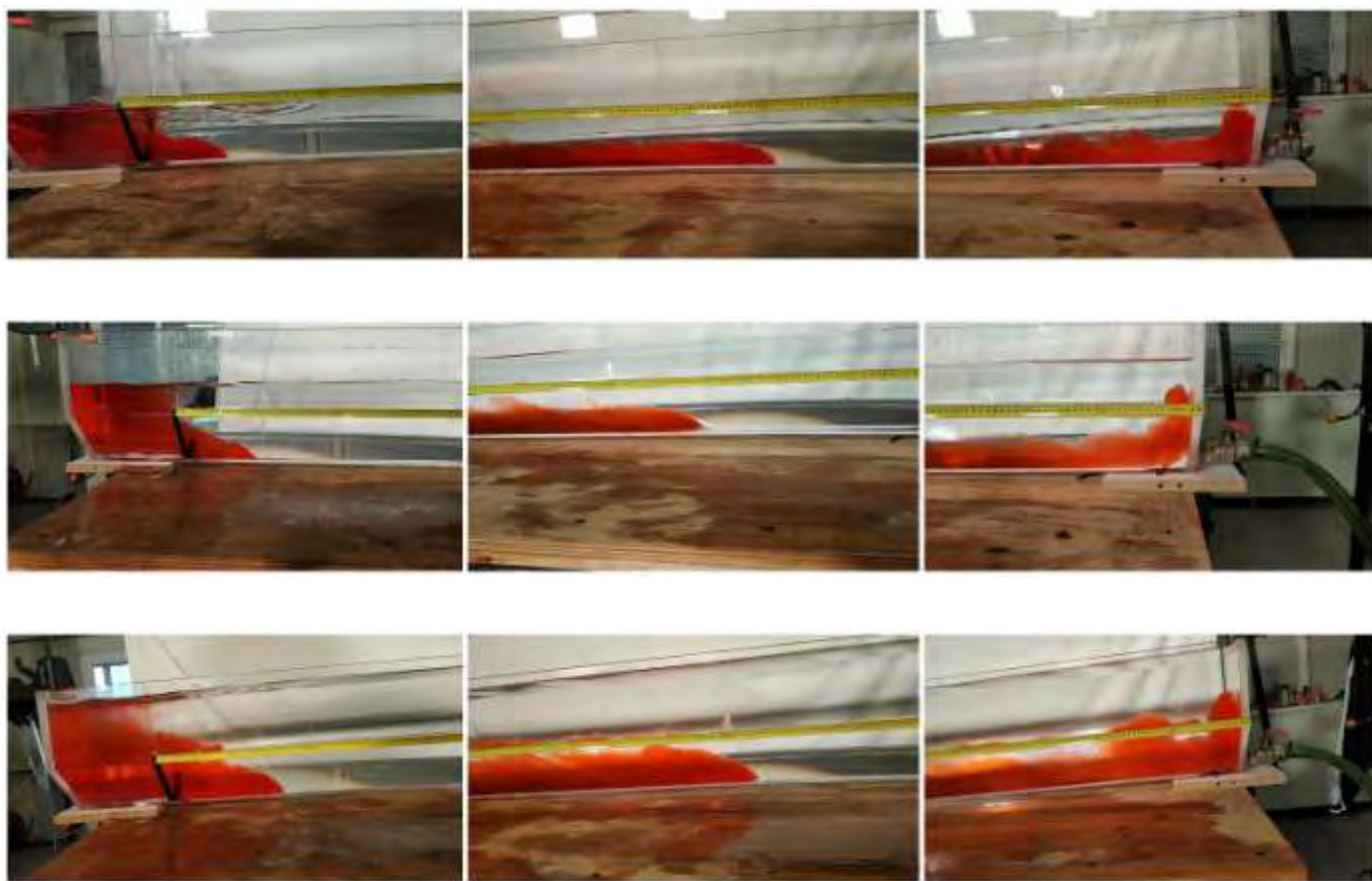
Εικόνα 7.7 Ροδαμίνη, υλικό που προσδίδει χρώμα στα ρεύματα βαρύτητας των πειραμάτων.





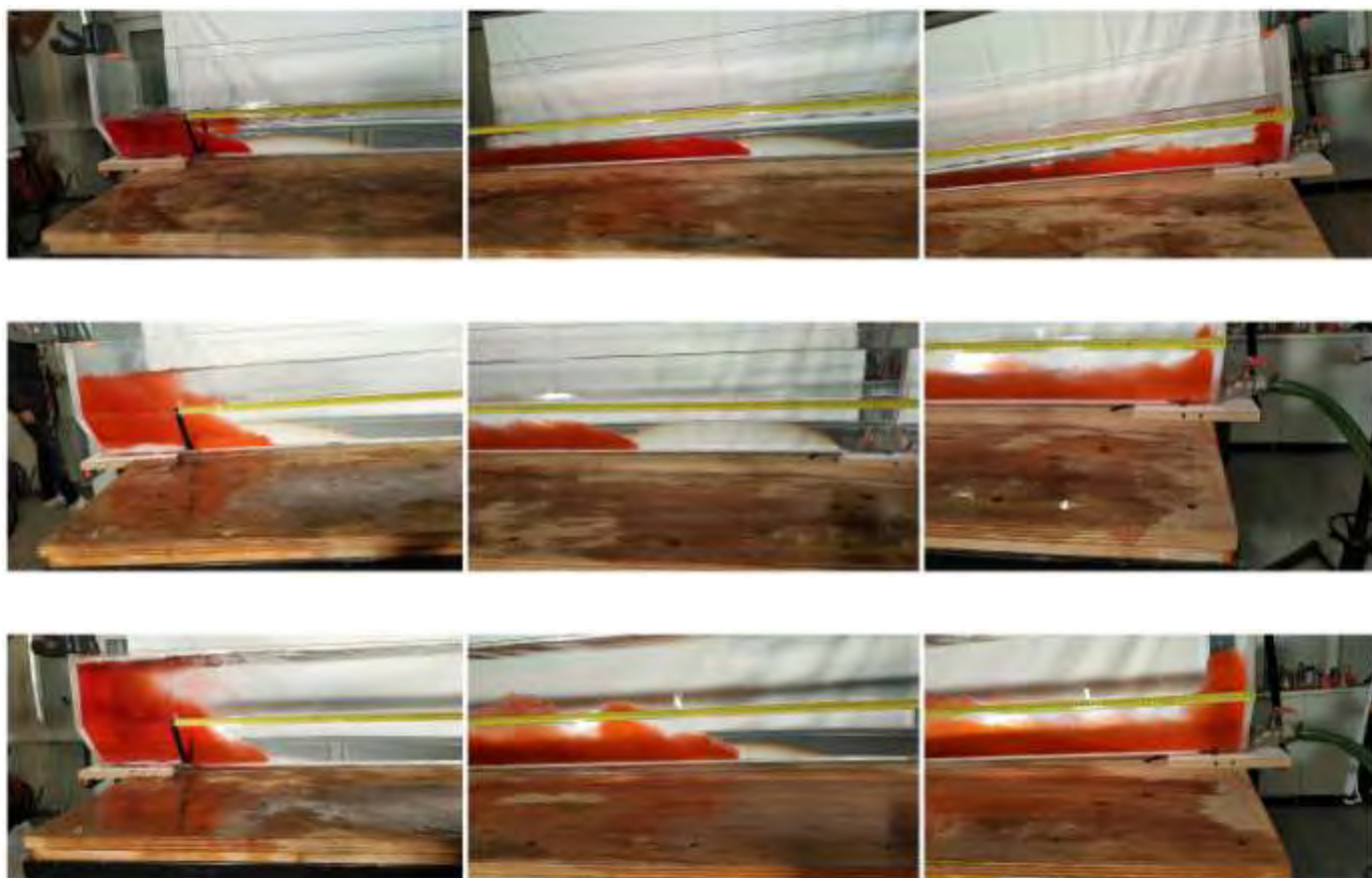
Εικόνα 7.7 Στιγμιότυπα εκτέλεσης πειραμάτων πυκνότητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ για Ho 5, 10, 17.5 και 25 εκατοστών





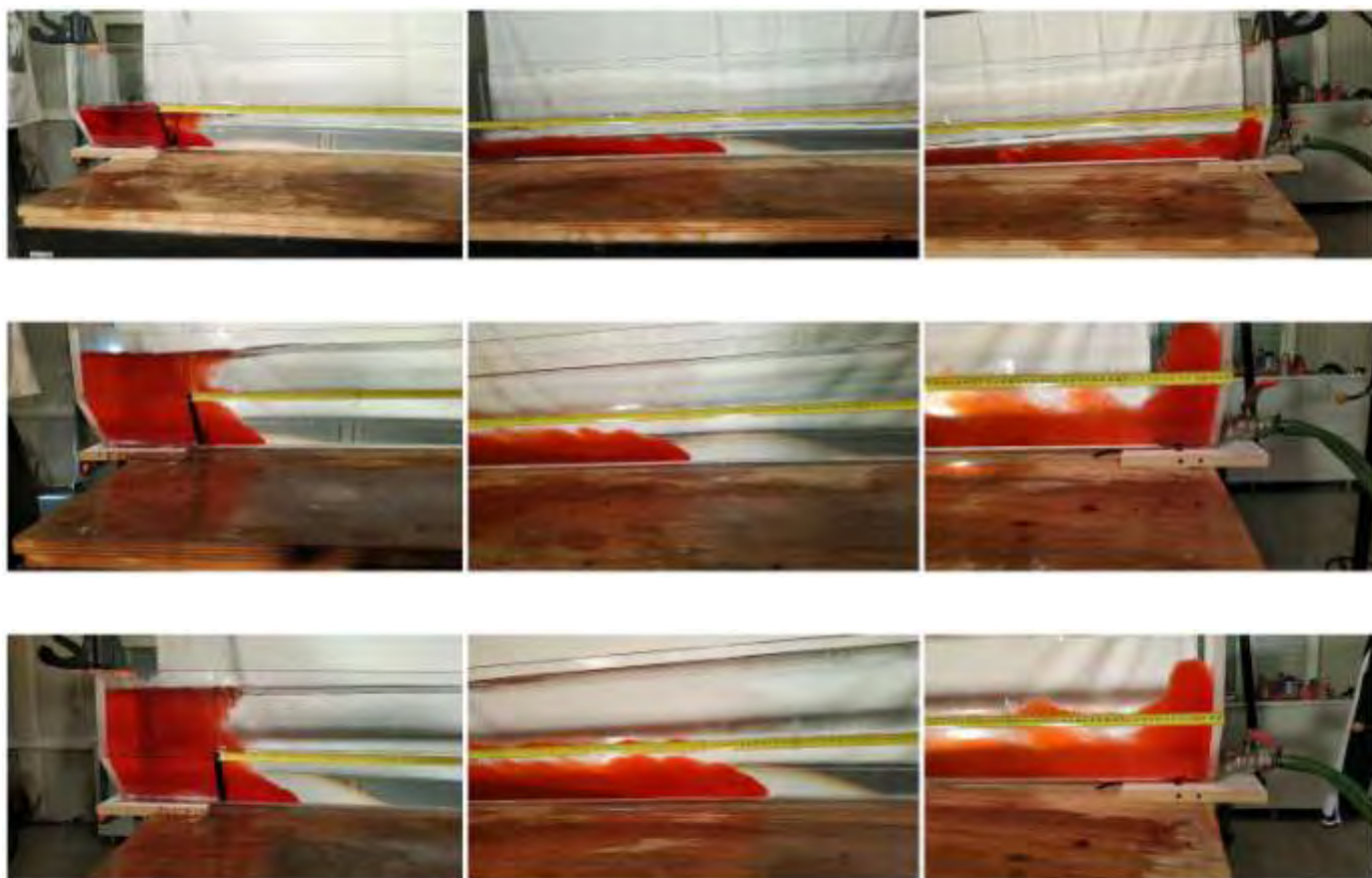
Εικόνα 7.8 Στιγμιότυπα εκτέλεσης πειραμάτων πυκνότητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ για H_0 5, 10, 17.5 και 25 εκατοστών





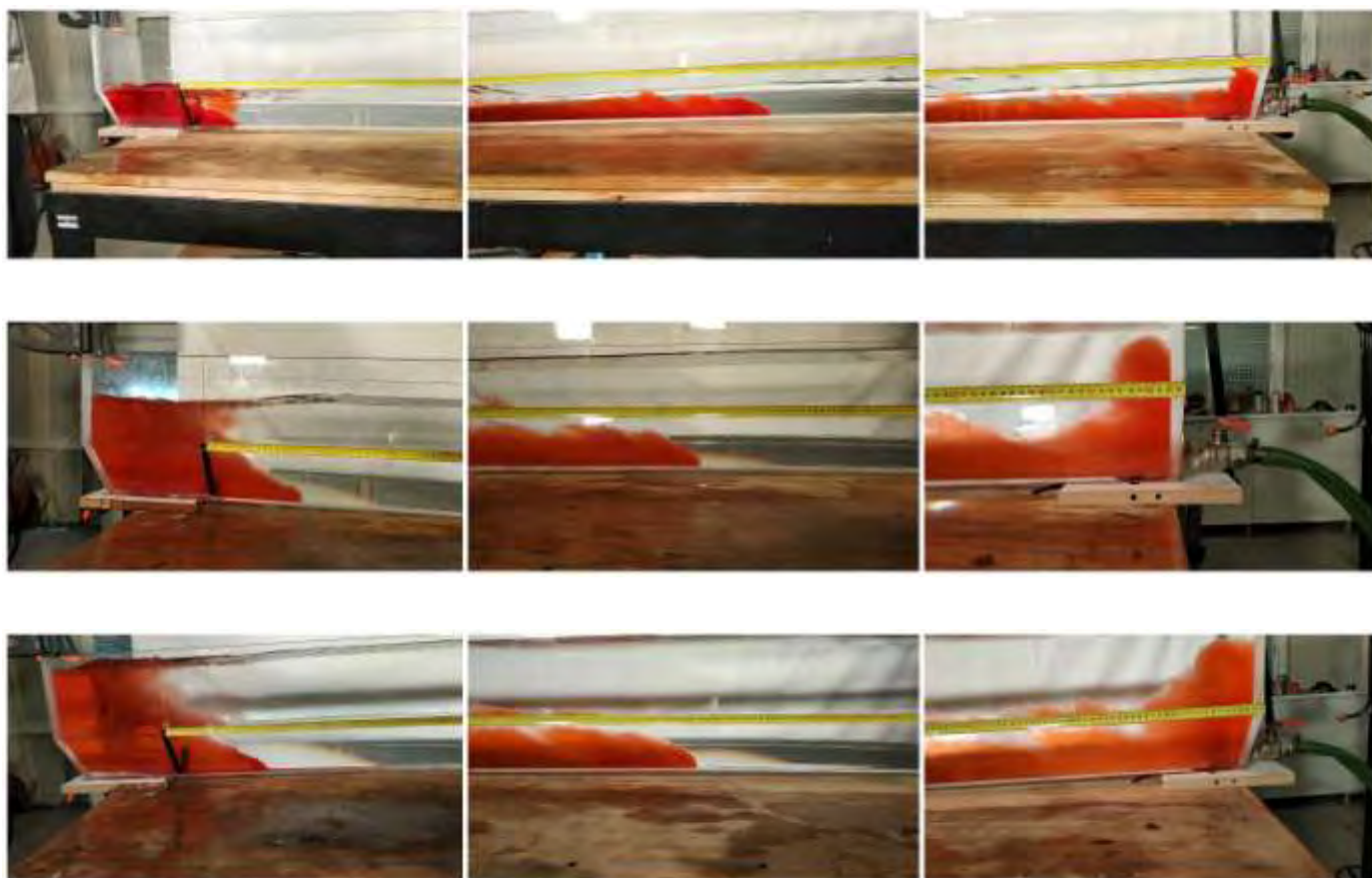
Εικόνα 7.9 Στιγμιότυπα εκτέλεσης πειραμάτων πυκνότητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ για H_0 5, 10, 17.5 και 25 εκατοστών





Εικόνα 7.10 Στιγμιότυπα εκτέλεσης πειραμάτων πυκνότητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ για H_0 5, 10, 17.5 και 25 εκατοστών





Εικόνα 7.11 Στιγμιότυπα εκτέλεσης πειραμάτων πυκνότητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ για H_0 5, 10, 17.5 και 25 εκατοστών