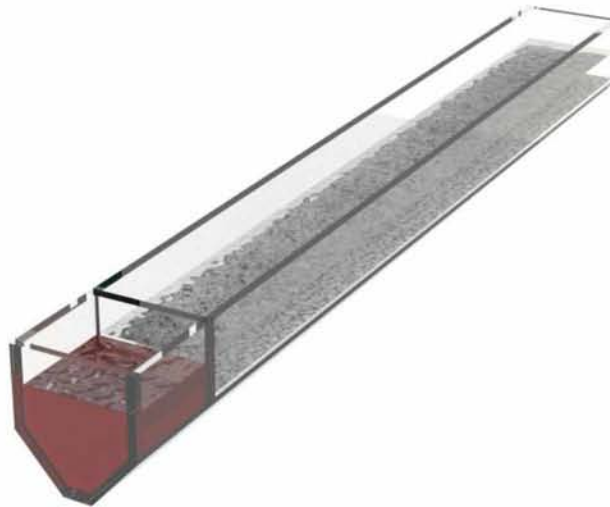




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**Πολυτεχνική Σχολή**  
**Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών**

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΛΙΚΩΔΟΥΣ ΠΥΘΜΕΝΑ ΣΕ ΡΕΥΜΑΤΑ  
ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ**  
**EXPERIMENTAL STUDY OF GRAVEL BED IN GRAVITY CURRENTS  
WITH LARGE SALINITY**



**ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ & ΣΑΓΙΑΝΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

Επιβλέπων Καθηγητής : Κεραμάρης Ευάγγελος

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού  
Βόλος 2020



© 2020 Βασιλείου Χριστίνα και Σαγιάννης Κωνσταντίνος

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.



## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Κεραμάρης Ευάγγελος  
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Κανακούδης Βασίλειος  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Καρακασίδης Θεόδωρος  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

:



## Ευχαριστίες

Στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Ευάγγελο Κεραμάρη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, για την άψογη συνεργασία, καθοδήγηση, βοήθεια καθώς και την έμπρακτη υποστήριξη του όλο αυτό το διάστημα. Επιπλέον, είμαστε ευγνώμονες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής τον κ. Κανακούδη Βασίλειο και τον κ. Καρακασίδη Θεόδωρο, Καθηγητές του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μας και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα θέλαμε να δώσουμε και στους συναδέλφους μας Σταύρο Κεμεντσετσίδα και Σπύρο Βαρδακώστα, των οποίων η βοήθεια ήταν καθοριστική για την διεκπεραίωση της εργασίας. Τέλος, θα θέλαμε να απευθύνουμε ένα τεράστιο ευχαριστώ στις οικογένειες μας και στους φίλους μας, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη τους, τόσο σε πρακτικό όσο και σε ψυχολογικό επίπεδο, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μας.





## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε μια γυάλινη δεξαμενή σύνθετης διατομής η οποία αποτελείται από μια ορθογώνια άνω διατομή και από μια χαμηλότερη τραπεζοειδή. Σκοπός της έρευνας είναι η μελέτη του χαλικώδους πυθμένα σε ρεύματα βαρύτητας με μεγάλη αλατότητα, όπου η διάδοσή τους καταγράφεται με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας.

Η δεξαμενή χωρίζεται σε δύο μέρη με ένα κατακόρυφο θυρόφραγμα, το οποίο διαχωρίζει το καθαρό νερό με τον χαλικώδη πυθμένα από το αλατισμένο νερό με τον ομαλό πυθμένα με αποτέλεσμα με το άνοιγμα της θυρίδας να δημιουργείται ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας. Τα ύψη που μελετήθηκαν είναι τέσσερα:  $H=5\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ ,  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$  και οι πυκνότητες του αλατόνερου είναι πέντε:  $1050\text{ kg/m}^3$ ,  $1060\text{ kg/m}^3$ ,  $1070\text{ kg/m}^3$ ,  $1080\text{ kg/m}^3$  και  $1090\text{ kg/m}^3$ . Επιλέχθηκαν αυτές οι συγκεκριμένες πυκνότητες με στόχο την προσομοίωση των υγρών αποβλήτων τα οποία είναι επιβλαβή για το περιβάλλον. Χαρακτηριστικά παραδείγματα ρευμάτων βαρύτητας στο περιβάλλον είναι η έκλυση ρύπων σε ποτάμια, οι χιονοστιβάδες, το θαλασσινό αεράκι καθώς και οι πετρελαιοκηλίδες.

Στόχος των πειραμάτων είναι να μελετηθεί η επίδραση του χαλικώδους πυθμένα και η αντίστοιχη συμπεριφορά των ρευμάτων βαρύτητας. Από την σύγκριση με πειράματα συμφοιτητών μας στην ίδια δεξαμενή αλλά με την απουσία χαλικώδους πυθμένα, προέκυψε ότι το στρώμα των χαλικιών καθυστερεί την διάδοση των ρευμάτων και περισσότερο από όλα το ρεύμα με την μικρότερη διαφορά πυκνότητας στο μικρότερο ύψος.

Το βασικό συμπέρασμα της μελέτης αυτής είναι ότι το σχήμα της δεξαμενής διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Ειδικότερα, η τραπεζοειδής διατομή στο κάτω τμήμα της σύνθετης διατομής αυξάνει την ταχύτητα των ρευμάτων σε σύγκριση με την ορθογωνική στο πάνω τμήμα. Επιπλέον τα χαλίκια επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ταχύτητα αλλά και την απόσταση που διανύουν τα ρεύματα.



## Abstract

In this thesis experiments on a composite cross-sectional glass tank consisting of a rectangular upper cross section and a lower trapezoidal were performed. The purpose of the research is to study the gravel bed in gravity currents with large salinity, where their propagation is recorded with high-definition digital video.

The tank is separated in two parts by a vertical gate, which separates the fresh water with the gravel bed from the salt water with the smooth bottom. When the gate opens a flow is created due to density difference. The heights of our case study are four:  $H=5\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ ,  $H=17.5\text{cm}$  and  $H=25\text{cm}$  and the salinity densities are five:  $1050\text{ kg/m}^3$ ,  $1060\text{ kg/m}^3$ ,  $1070\text{ kg/m}^3$ ,  $1080\text{ kg/m}^3$  and  $1090\text{ kg/m}^3$ . These specific densities have been chosen in order to simulate liquid wastes that affect the environment. Typical examples of gravity currents in the natural environment are: the release of pollutants into rivers, avalanches, sea breeze and oil spills.

The goal of the experiments is to study the effects of the gravel bed and the corresponding behavior of gravity currents. Compared to our colleagues' experiments in the same tank without gravel bed, we observe that the gravel bed reduces the propagation of currents and mainly reduces the current with the smallest density difference at the lowest height.

The main conclusion of this study is that the shape of the tank plays a key role in the propagation of gravity currents. More specifically, the trapezoidal cross section at the bottom of the composite cross section increases the velocity of the currents compared to the rectangular section at the top. In addition, the gravel bed affects significantly the velocity and the distance traveled by the currents.



## Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	15
1.1 Δομή και διάδοση ρευμάτων βαρύτητας .....	15
1.2 Φυσική ερμηνεία ρευμάτων βαρύτητας .....	16
Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική αναφορά.....	19
Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη.....	27
3.1 Περιγραφή κατασκευής .....	27
3.2 Προετοιμασία πειραμάτων .....	28
3.3 Εκτέλεση πειραμάτων.....	28
3.4 Παρουσίαση μετρήσεων .....	29
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	36
4.1 Ρεύματα βαρύτητας στην τραπεζοειδή διατομή .....	36
4.2 Ρεύματα βαρύτητας στην σύνθετη διατομή.....	45
4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειράματα χωρίς χαλικώδη πυθμένα.....	53
4.4 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα σύνθετης και τραπεζοειδούς διατομής .....	56
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....	61
Κεφάλαιο 6 Βιβλιογραφία.....	64
Κεφάλαιο 7 Παράρτημα .....	66



## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3.4.1 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος $H=5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	30
Πίνακας 3.4.2 Ταχύτητες μετώπου για ύψος $H=5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	31
Πίνακας 3.4.3 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος $H=10\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	32
Πίνακας 3.4.4 Ταχύτητες μετώπου για ύψος $H=10\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	33
Πίνακας 3.4.5 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος $H=17.5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	34
Πίνακας 3.4.6 Ταχύτητες μετώπου για ύψος $H=17.5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	34
Πίνακας 3.4.7 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος $H=25\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	35
Πίνακας 3.4.8 Ταχύτητες μετώπου για ύψος $H=25\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες.....	35





## Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1.1 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1050\text{ kg/m}^3$ .....	36
Διάγραμμα 4.1.2 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1060\text{ kg/m}^3$ .....	37
Διάγραμμα 4.1.3 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1070\text{ kg/m}^3$ .....	37
Διάγραμμα 4.1.4 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1080\text{ kg/m}^3$ .....	37
Διάγραμμα 4.1.5 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1090\text{ kg/m}^3$ .....	38
Διάγραμμα 4.1.6 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί .....	38
Διάγραμμα 4.1.7 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλικώδη πυθμένα .....	39
Διάγραμμα 4.1.8 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=10\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1050\text{ kg/m}^3$ .....	39
Διάγραμμα 4.1.9 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=10\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1060\text{ kg/m}^3$ .....	40
Διάγραμμα 4.1.10 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=10\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1070\text{ kg/m}^3$ .....	40
Διάγραμμα 4.1.11 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=10\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1080\text{ kg/m}^3$ .....	40
Διάγραμμα 4.1.12 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=10\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1090\text{ kg/m}^3$ .....	41
Διάγραμμα 4.1.13 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=10\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί .....	41
Διάγραμμα 4.1.14 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος $H=10\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλικώδη πυθμένα .....	42
Διάγραμμα 4.1.15 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=5\text{cm}$ και $H=10\text{cm}$ .....	42
Διάγραμμα 4.1.16 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=5\text{cm}$ και $H=10\text{cm}$ .....	43
Διάγραμμα 4.1.17 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=5\text{cm}$ και $H=10\text{cm}$ .....	43
Διάγραμμα 4.1.18 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=5\text{cm}$ και $H=10\text{cm}$ .....	44
Διάγραμμα 4.1.19 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=5\text{cm}$ και $H=10\text{cm}$ .....	44



Διάγραμμα 4.2.1 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=17.5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1050\text{ kg/m}^3$ .....	45
Διάγραμμα 4.2.2 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=17.5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1060\text{ kg/m}^3$ .....	45
Διάγραμμα 4.2.3 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=17.5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1070\text{ kg/m}^3$ .....	46
Διάγραμμα 4.2.4 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=17.5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1080\text{ kg/m}^3$ .....	46
Διάγραμμα 4.2.5 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=17.5\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1090\text{ kg/m}^3$ .....	46
Διάγραμμα 4.2.6 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=17.5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί.....	47
Διάγραμμα 4.2.7 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=17.5\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλκώδη πυθμένα .....	47
Διάγραμμα 4.2.8 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=25\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1050\text{ kg/m}^3$ .....	48
Διάγραμμα 4.2.9 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=25\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1060\text{ kg/m}^3$ .....	48
Διάγραμμα 4.2.10 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=25\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1070\text{ kg/m}^3$ .....	49
Διάγραμμα 4.2.11 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=25\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1080\text{ kg/m}^3$ .....	49
Διάγραμμα 4.2.12 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=25\text{cm}$ με πυκνότητα $\rho=1090\text{ kg/m}^3$ .....	49
Διάγραμμα 4.2.13 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=25\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί.....	50
Διάγραμμα 4.2.14 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος $H=25\text{cm}$ για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλκώδη πυθμένα .....	50
Διάγραμμα 4.2.15 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1050\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=17.5\text{cm}$ και $H=25\text{cm}$	51
Διάγραμμα 4.2.16 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1060\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=17.5\text{cm}$ και $H=25\text{cm}$ .....	51
Διάγραμμα 4.2.17 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1070\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=17.5\text{cm}$ και $H=25\text{cm}$	52
Διάγραμμα 4.2.18 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1080\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=17.5\text{cm}$ και $H=25\text{cm}$	52
Διάγραμμα 4.2.19 Ρεύμα πυκνότητας $\rho=1090\text{kg/m}^3$ σε αρχικά ύψη $H=17.5\text{cm}$ και $H=25\text{cm}$	53
Διάγραμμα 4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος $H=5\text{cm}$ .....	53





Διάγραμμα 4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος $H=10\text{cm}$ .....	54
Διάγραμμα 4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος $H=17.5\text{cm}$ .....	55
Διάγραμμα 4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος $H=25\text{cm}$ .....	55
Διάγραμμα 4.4.1 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για $H=5\text{cm}$ .....	56
Διάγραμμα 4.4.2 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για $H=10\text{cm}$ .....	57
Διάγραμμα 4.4.3 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για $H=17.5\text{cm}$ .....	57
Διάγραμμα 4.4.4 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για $H=25\text{cm}$ .....	58
Διάγραμμα 4.4.5 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για όλα τα ύψη και όλες τις πυκνότητες.....	58
Διάγραμμα 4.4.6 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για $H=5\text{cm}$ .....	59
Διάγραμμα 4.4.7 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για $H=10\text{cm}$ .....	60
Διάγραμμα 4.4.8 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για $H=17.5\text{cm}$ .....	60
Διάγραμμα 4.4.9 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για $H=25\text{cm}$ .....	61

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 3.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm, πλάτους 23cm στο άνω και 5cm στο κάτω μέρος και βάθους 25cm με χαλκώδη πυθμένα. Θυρόφραγμα ίδιων διαστάσεων την χωρίζει σε δύο μέρη. ....	27
Εικόνα 3.4.1 Δεξαμενή με ύψος υγρών H=5cm.....	31
Εικόνα 3.4.2 Δεξαμενή με ύψος υγρών H=10cm.....	32
Εικόνα 3.4.3 Δεξαμενή με ύψος υγρών H=17.5cm.....	33
Εικόνα 3.4.4 Δεξαμενή με ύψος υγρών H=25cm.....	35
Εικόνα 7.1 Γυάλινη δεξαμενή μήκους 205cm , πλάτους 5cm στο κάτω μέρος και 23cm στο άνω.....	66
Εικόνα 7.2 Προφίλ γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm.....	66
Εικόνα 7.3 Θυρόφραγμα σύνθετης διατομής ύψους 25cm.....	67
Εικόνα 7.4 Έξοδος γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm.....	67
Εικόνα 7.5 Προφίλ εξόδου γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm.....	67
Εικόνα 7.6 Προφίλ στρώματος χαλκίου πάχους 2cm.....	68
Εικόνα 7.7 Δοκιμαστικός σωλήνας που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη.....	68
των κατάλληλων πυκνοτήτων.....	68
Εικόνα 7.8 Ροδαμίνη: το υλικό που προσδίδει κόκκινο χρώμα στο αλατισμένο νερό.....	68
Εικόνα 7.9 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	69
Εικόνα 7.10 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	69
Εικόνα 7.11 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	69
Εικόνα 7.12 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	70
Εικόνα 7.13 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	70
Εικόνα 7.14 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	70
Εικόνα 7.15 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	71
Εικόνα 7.16 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	71
Εικόνα 7.17 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	71
Εικόνα 7.18 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	72
Εικόνα 7.19 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	72
Εικόνα 7.20 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	72
Εικόνα 7.21 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	73
Εικόνα 7.22 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	73
Εικόνα 7.23 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ για H=5cm.....	73
Εικόνα 7.24 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ για H=10cm.....	74







Εικόνα 7.60 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	86
Εικόνα 7.61 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	86
Εικόνα 7.62 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	86
Εικόνα 7.63 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	87
Εικόνα 7.64 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	87
Εικόνα 7.65 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	87
Εικόνα 7.66 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	88
Εικόνα 7.67 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	88
Εικόνα 7.68 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ για $H=25\text{cm}$ .....	88





## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

### 1.1 Δομή και διάδοση ρευμάτων βαρύτητας

Τα ρεύματα βαρύτητας, τα οποία ονομάζονται και ρεύματα πυκνότητας ή ρεύματα πλευστότητας, παράγονται από την μεταβολή πυκνότητας μεταξύ δύο υγρών και εμφανίζονται τόσο στις φυσικές όσο και στις βιομηχανικές ροές. Οι διαφορές πυκνότητας μπορεί να οφείλονται στις μεταβολές της αλατότητας, της θερμοκρασίας ή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (Benjamin 1968, Simpson 1997). Τα υγρά αυτά μπορεί να είναι αέρια ή υγρά ή ρευστοποιημένα σωματίδια και τα ρεύματα μπορεί να είναι κατά μήκος οριζόντιων ή επικλινών επιφανειών. Κατά κύριο λόγο τα ρεύματα εξαπλώνονται λόγω της οριζόντιας διαφοράς πυκνότητας και η εξάπλωση αυτή είναι σημαντική για πολλές γεωφυσικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Τα ρεύματα βαρύτητας προέρχονται είτε από ροές πεπερασμένων όγκων είτε από συνεχείς ροές και αποτελούνται από δύο μέρη, μία κεφαλή (head) και ένα σώμα (body). Η κεφαλή, η οποία είναι η αιχμή του ρεύματος, είναι μια περιοχή στην οποία μετατοπίζονται οι μεγαλύτεροι όγκοι υγρού περιβάλλοντος ενώ το σώμα είναι ο όγκος της ροής που την ακολουθεί. Η τρέχουσα κεφαλή χαρακτηρίζεται από μια τρισδιάστατη ασταθή ροή, η οποία προκύπτει από δύο τρόπους που εμφανίζονται στις διαδικασίες ανάμιξης: την αστάθεια Kelvin-Helmholtz και ένα πολύπλοκο μοτίβο σχισμών (Simpson 1969, Simpson 1972, Allen 1971). Οι κυματισμοί Kelvin-Helmholtz δημιουργούνται στην διεπιφάνεια, στο πίσω μέρος της κεφαλής, και παραμένουν σχεδόν σταθεροί στο σώμα, ασθενούν όμως λόγω της συνεχούς ανάμειξης με το περιβάλλον υγρό. Οι σχισμές δημιουργούνται από τη βαρυτική αστάθεια του λιγότερο πυκνού υγρού που υπερχειλίζεται από το μέτωπο του ρεύματος, το οποίο διαδίδεται χωρίς ολίσθηση κατά μήκος ενός ορίου. Το προπορευόμενο μέτωπο «ελέγχει» τη ροή πίσω από αυτό, δηλαδή παρέχει μια οριακή συνθήκη για τη ροή. Σε αυτή τη φάση ο ρυθμός μετάδοσης του ρεύματος είναι περίπου σταθερός με το χρόνο. Για πολλά ρεύματα που παρατηρούνται στη φύση, η κεφαλή κινείται σε έναν αριθμό Froude περίπου ίσο με 1. Καθώς το κινητήριο υγρό εξαντλείται εξαιτίας της εξάπλωσης του ρεύματος στο περιβάλλον, η κεφαλή μειώνεται μέχρι η ροή να γίνει στρωτή. Τότε υπάρχει ελάχιστη ανάμιξη και εξαφανίζεται η κυματιστή δομή της ροής. Από αυτή τη φάση και έπειτα ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται με το χρόνο και το ρεύμα σταδιακά επιβραδύνεται. Τέλος, καθώς το ρεύμα εξαπλώνεται, δεν γίνεται πλέον ανάμειξη και ο ρυθμός μετάδοσης του επιβραδύνεται ακόμα περισσότερο.

Η εξάπλωση ενός ρεύματος βαρύτητας εξαρτάται από τις οριακές συνθήκες και διακρίνεται δύο περιπτώσεις συνήθως ανάλογα με το αν η αρχική απελευθέρωση έχει το ίδιο



πλάτος με το περιβάλλον ή όχι. Στην περίπτωση που τα πλάτη είναι τα ίδια, αποκτά κανείς αυτό που συνήθως αναφέρεται ως ροή "lock-exchange". Αυτό αναφέρεται στην ροή που διαδίδεται κατά μήκος των τοιχωμάτων και στις δύο πλευρές και διατηρεί ουσιαστικά ένα σταθερό πλάτος ενώ διαδίδεται. Στην περίπτωση αυτή η ροή είναι ουσιαστικά δισδιάστατη. Ένα τέτοιο περιβάλλον θα έχει ως αποτέλεσμα το ύψος της κεφαλής να αυξάνεται καθώς το ρεύμα προχωρά και επομένως ο ρυθμός διάδοσης να αυξάνεται με το χρόνο. Στην άλλη περίπτωση, η ροή απλώνεται ακτινωτά από την πηγή σχηματίζοντας μια "αξονική συμμετρική" ροή και η γωνία εξάπλωσης εξαρτάται από τις συνθήκες απελευθέρωσης.

Όταν ένα ρεύμα βαρύτητας συναντά ένα συμπαγές όριο, μπορεί είτε να ξεπεράσει το όριο αυτό ρέοντας από πάνω του ή γύρω του είτε να ανακλάται επί αυτού. Το πραγματικό αποτέλεσμα της σύγκρουσης εξαρτάται κυρίως από το ύψος και το πλάτος του εμποδίου. Αν το εμπόδιο είναι ρηχό ή αποτελεί κομμάτι του ρεύματος βαρύτητας θα ξεπεράσει το εμπόδιο με τη ροή του πάνω από αυτό. Παρομοίως, εάν το πλάτος του εμποδίου είναι μικρό, το ρεύμα βαρύτητας θα ρέει γύρω του. Αν το εμπόδιο δεν μπορεί να ξεπεραστεί, με την προϋπόθεση ότι η ροή την συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι τυρβώδης, το ρεύμα θα διαχυθεί κατακόρυφα επάνω ή κάτω, ανάλογα με τη διαφορά πυκνότητας, κατά μήκος του εμποδίου. Η παραπάνω διαδικασία είναι γνωστή ως "sloshing".

## **1.2 Φυσική ερμηνεία ρευμάτων βαρύτητας**

Τα ρεύματα βαρύτητας εμφανίζονται στο περιβάλλον είτε με φυσικό τρόπο, για παράδειγμα στην ατμόσφαιρα, στον ωκεανό, στα φυσικά φαινόμενα, είτε σε τεχνητά φαινόμενα που δημιουργεί ο άνθρωπος. Διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο τόσο στην γεωφυσική όσο και στη μηχανική, καθώς επηρεάζουν τη βιομηχανική ασφάλεια και το περιβάλλον.

Στην ατμόσφαιρα, χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι εκροές ρευμάτων από καταιγίδες και οι διαρροές από πυκνά αέρια. Η διαρροή πυκνών αερίων που προκαλείται από τυχαία απελευθέρωση ενός υγροποιημένου αερίου αποτελεί ένα σημαντικό πρόβλημα καθώς υπάρχουν πολλά παραδείγματα αποθήκευσης επιβλαβών υγρών όπως για παράδειγμα το προπάνιο, το χλώριο που χρησιμοποιείται για την αποστείρωση πισινών και το φυσικό αέριο. Τα τοξικά και εύφλεκτα αυτά αέρια αποθηκεύονται σε δοχεία υπό πίεση. Στην περίπτωση διαρροής, το απελευθερωμένο υγρό εξατμίζεται και παράγει ψυχρό αέριο, το οποίο είναι πυκνότερο από τον αέρα λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του. Λόγω των πολλαπλών κινδύνων που δημιουργούν οι διαρροές αυτές, ειδικότερα σε κατοικημένες περιοχές, έχει πραγματοποιηθεί





σημαντική έρευνα για τον περιορισμό τέτοιων απελευθερώσεων. Επιπλέον κατά την διάρκεια μιας καταιγίδας, κύματα ψυχρού πυκνού αέρα φτάνουν στο έδαφος και εξαπλώνονται σαν ρεύματα βαρύτητας τα οποία απομακρύνονται από την καταιγίδα. Αυτά τα ρεύματα μπορούν να κινηθούν μέχρι και 100 km μακριά από την καταιγίδα, σε ύψος μέχρι 1 km και με ταχύτητα 20 m/s. Αυτά τα κύματα ψυχρού αέρα μπορούν να αποτελέσουν σοβαρό κίνδυνο για τα αεροσκάφη, καθώς παρατηρείται μια ξαφνική αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου όταν τα αεροσκάφη πετάνε μέσα από την αιχμή του ρεύματος βαρύτητας.

Στον ωκεανό παρατηρούνται διάφορες μορφές ρευμάτων βαρύτητας όπως για παράδειγμα οι υποβρύχιες ροές θραυσμάτων, τα ρεύματα θολότητας, το θαλασσινό αεράκι καθώς και ρεύματα στις εκβολές ποταμών. Σε μια ζεστή μέρα ο ήλιος θερμαίνει τη στεριά περισσότερο από τη θάλασσα με αποτέλεσμα ο αέρας σε χαμηλά υψόμετρα πάνω από τη στεριά να είναι θερμότερος από αυτόν πάνω από τη θάλασσα. Από την διαφορά θερμοκρασίας και πυκνότητας δημιουργείται το θαλασσινό αεράκι, το οποίο αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό της παράκτιας μετεωρολογίας παγκοσμίως.

Ρεύματα βαρύτητας σχηματίζονται επίσης και σε εκβολές ποταμών όπου όγκοι γλυκού νερού με μικρότερη πυκνότητα από το αλμυρό νερό ρέουν στην επιφάνεια. Τα ρεύματα θολότητας σχηματίζονται όταν το νερό ολισθαίνει με κλίση στον ωκεανό και ανεβαίνει από το έδαφος. Όσο αυξάνεται η αναταραχή αυξάνεται το υλικό και η ταχύτητα του ρεύματος βαρύτητας. Τα ρεύματα θολότητας μπορούν να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις με υψηλές ταχύτητες.

Τα ρεύματα βαρύτητας εμφανίζονται και στα φυσικά φαινόμενα όπως για παράδειγμα στις αμμοθύελλες, στις χιονοστιβάδες και στις εκρήξεις ηφαιστείων. Οι χιονοστιβάδες αποτελούν σοβαρό κίνδυνο για τις κατοικημένες ορεινές περιοχές με αποτέλεσμα να έχουν γίνει αντικείμενο πολλών ερευνών. Μια χιονοστιβάδα είναι ρεύμα βαρύτητας χιονιού και η συμπεριφορά της εξαρτάται από την ισορροπία μεταξύ των σωματιδίων που έχουν ανυψωθεί από το έδαφος και εκείνων που έχουν απορροφηθεί. Οι μεγάλες χιονοστιβάδες κινούνται με ταχύτητες μέχρι και 100 km/h και είναι σχεδόν ασταμάτητες. Εξίσου επικίνδυνες είναι και οι εκρήξεις ηφαιστείων. Η λάβα από την έκρηξη χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλή θερμοκρασία, και ως εκ τούτου χαμηλό ιξώδες, και περιέχει μεγάλες ποσότητες διαλυμένου αερίου. Με την έκρηξη, διαχέεται στην επιφάνεια με σημαντική ορμή με αποτέλεσμα ο καπνός που απελευθερώνεται να αναμειγνύεται με τον περιβάλλοντα αέρα μέχρις ότου οι πυκνότητες τους να εξισωθούν. Στη συνέχεια σχηματίζεται ένα είδος οριζόντιου ρεύματος βαρύτητας του οποίου η πυκνότητα μεταβάλλεται συνεχώς καθώς πέφτει τέφρα. Αυτή η τέφρα μπορεί να αποτελέσει τη βάση μιας λασπώδους ροής, ή μιας καταιγίδας.



Η έκλυση ρύπων σε ποτάμια, η διαρροή πετρελαίου στον ωκεανό, οι εκροές τόσο από τα εργοστάσια αφαλάτωσης όσο και από σταθμούς παραγωγής ενέργειας είναι μερικά παραδείγματα ρευμάτων βαρύτητας που προκαλούνται από ανθρώπινες δραστηριότητες και προκαλούν σε μεγάλο βαθμό αρνητικές συνέπειες στο περιβάλλον. Η εξάπλωση μιας πετρελαιοκηλίδας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον άνεμο και τις παλίρροιες, αλλά καθώς η πυκνότητα του πετρελαίου είναι κατά 20% μικρότερη από του νερού, επηρεάζεται σημαντικά και από την ροή βαρύτητας. Στους παράκτιους σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται απευθείας ψύξη του νερού της θάλασσας. Το νερό αντλείται από τη θάλασσα, μέσω των συμπυκνωτών του σταθμού, όπου λαμβάνει θερμότητα και επιστρέφει στη θάλασσα από την έξοδο ψύξης. Όταν το νερό ψύξης φεύγει από την έξοδο, τείνει να ανεβαίνει στην επιφάνεια και να εξαπλώνεται οριζόντια. Από μια συγκεκριμένη απόσταση και έπειτα, το αποφορτισμένο αυτό νερό συμπεριφέρεται σαν ρεύμα βαρύτητας.



## Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική αναφορά

Η πρώτη θεωρητική προσπάθεια να περιγραφεί ο ρυθμός εξάπλωσης ενός ρεύματος βαρύτητας χρησιμοποιώντας τη θεωρία ροής έγινε από τον von Kármán (1940). Έδειξε ότι ένα βαθιά βυθισμένο βαρύ υγρό ρεύμα πυκνότητας  $\rho_1$  θα μετακινηθεί σε ένα ελαφρύτερο περιβάλλον πυκνότητας  $\rho_0$  με μέση εμπρόσθια ταχύτητα  $u_F = \sqrt{2 * g * h_F}$ , όπου  $g = \frac{g^*(\rho_1 - \rho_0)}{\rho_0}$  είναι η μειωμένη βαρύτητα και  $h_F$  είναι το ύψος του ρεύματος. Το έργο του von Kármán (1940) εξελίχθηκε λίγα χρόνια αργότερα από τον Benjamin (1968). Ο Benjamin κατέληξε στο ίδιο συμπέρασμα με μια πιο ακριβή ανάλυση όμως χρησιμοποιώντας τη θεωρία των υδραυλικών αλμάτων. Επίσης απέδειξε ότι οι διαφορές πυκνότητας μπορεί να οφείλονται στις μεταβολές της αλατότητας, της θερμοκρασίας ή της συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων.

Μετά από πειραματικές παρατηρήσεις, οι Huppert and Simpson (1980) περιέγραψαν την εξάπλωση ενός ρεύματος βαρύτητας σε τρεις φάσεις: μία αρχική φθίνουσα φάση όπου το ρεύμα κινείται με σχεδόν σταθερή ταχύτητα, ακολουθούμενη από μια αδρανειακή φάση στην οποία το ρεύμα κινείται κάτω από την ισορροπία της πλευστότητας και των αδρανειακών δυνάμεων και τελικά μια ιξώδης φάση όπου κυριαρχούν τα ιξώδη αποτελέσματα και η ισορροπία πλευστότητας. Οι Peters and Venart (2000) ανέφεραν ότι οι ιξώδεις επιδράσεις κυριαρχούν στη ροή νωρίτερα όταν ο πυθμένας είναι τραχύς, σε σύγκριση με πειράματα λείου πυθμένα. Επίσης οι Britter and Linden (1980) αναπαρήγαγαν ρεύματα βαρύτητας με κλίση και βρήκαν μια κρίσιμη γωνία, η οποία είναι συνήθως μικρότερη από μια μοίρα, πάνω από την οποία η δύναμη πλευστότητας είναι αρκετά μεγάλη ώστε να εξουδετερώνει την τριβή του πυθμένα, δημιουργώντας έτσι σταθερή ροή.

Ο O'Donnell (1993) μελέτησε ρεύματα βαρύτητας στις εκβολές των ποταμών όπου συναντώνται το αλμυρό νερό και το γλυκό νερό. Διαχώρισε τα μέτωπα των εκβολών σε τρεις κατηγορίες οι οποίες είναι τα μέτωπα παλιρροϊκής διείσδυσης, τα μέτωπα παλιρροιακής ανάμειξης και τα μέτωπα διάτμησης. Διευκρίνισε όμως ότι τα πραγματικά μέτωπα συχνά παρουσιάζουν χαρακτηριστικά δύο ή και των τριών κατηγοριών μαζί.

Οι Hallworth et al. (1993) ανέπτυξαν μια μέθοδο για να μελετήσουν την παραμόρφωση σε ρεύματα θολότητας. Έδειξαν ότι το ποσοστό του περιβάλλοντος υγρού στα ρεύματα βαρύτητας εξαρτάται μόνο από τον αρχικό όγκο και την απόσταση από τη θέση απελευθέρωσης. Οι Hallworth et al. (1996) παρατήρησαν ότι τα ασταθή ρεύματα βαρύτητας έχουν μια ξεχωριστή εσωτερική δομή σε σύγκριση με τα σταθερά ρεύματα βαρύτητας. Σχετικά με την είσοδο στην περιοχή της κεφαλής, υποστηρίζουν ότι κατά τη διάρκεια της καθίζησης η κεφαλή παραμένει αδιάλυτη. Ακολούθως, όταν η ανακλώμενη οπή φθάσει στο μέτωπο, ο



όγκος της κεφαλής μειώνεται καθώς το ρεύμα εξελίσσεται προς τα κάτω λόγω του μικτού υγρού που παραμένει πίσω στην ουρά.

Ο Simpson (1997) παρουσίασε μια συνολική ανασκόπηση των ρευμάτων βαρύτητας. Οι “lock-exchange” ροές μελετήθηκαν εκτενώς τόσο με εργαστηριακά πειράματα όσο και με αριθμητική μοντελοποίηση. Αυτές οι ροές μπορούν εύκολα να παραχθούν σε εργαστηριακή δεξαμενή, εγκαθιστώντας ένα αφαιρούμενο θυρόφραγμα και οι δύο δεξαμενές που προκύπτουν γεμίζονται με υγρά διαφορετικής πυκνότητας. Όταν αφαιρεθεί το θυρόφραγμα, η οριζόντια κλίση δημιουργεί μια ροή ανταλλαγής με αποτέλεσμα το βαρύτερο ρευστό να διαδίδεται προς το μέρος της δεξαμενής με το ελαφρύτερο ρευστό κατά μήκος του πυθμένα της δεξαμενής και το ελαφρύτερο υγρό διαδίδεται κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας προς την αντίθετη κατεύθυνση.

Οι Oldham and Sturman (2001) διερεύνησαν τις επιδράσεις της σχετικά πυκνής αναδύμενης βλάστησης στην εκροή ρηχών υγροτόπων με μικρούς αριθμούς Reynolds χρησιμοποιώντας πειράματα σε δεξαμενή εργαστηριακής μεταφοράς και σε υγροτόπους.

Οι Shin et al. (2004) περιέγραψαν μια νέα θεωρία στα ρεύματα βαρύτητας που παράγονται από την ανταλλαγή βάρους, σύμφωνα με την οποία η διαλυτότητα λόγω τύρβης και ανάμειξης μεταξύ του ρεύματος και του περιβάλλοντος υγρού είναι ασήμαντη όταν ο αριθμός Reynolds είναι αρκετά υψηλός. Επιπρόσθετα παρείχαν μια εναλλακτική θεωρία που προβλέπει την ταχύτητα του ρεύματος και το βάθος με βάση τη ροή εξοικονόμησης ενέργειας.

Οι Antenucci et al. (2005) μελέτησαν μία σταθερή ροή κατά μήκος καναλιού διατομής σχήματος V σε μία δεξαμενή για να μοντελοποιήσουν τη διασπορά παθογόνων παραγόντων. Οι Tanino et al. (2005) διεξήγαγαν πειράματα για να διερευνήσουν τη διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας μέσω μιας τυχαίας σειράς άκαμπτων, αναδύμενων κυλίνδρων, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν υδρόβια φυτά. Καθώς αυξάνεται η αντίσταση, το προφίλ του παραγόμενου μετώπου κυμαίνεται από το κλασικό προφίλ ενός ανεμπόδιστου ρεύματος βαρύτητας σε ένα τριγωνικό προφίλ. Το ρεύμα βαρύτητας επιβραδύνεται με το χρόνο καθώς το μέτωπο μειώνεται. Δύο καθεστώτα κυριαρχούν που σχετίζονται με τους γραμμικούς και μη γραμμικούς νόμους. Έχουν αναπτυχθεί εμπειρικά κριτήρια για την πρόβλεψη του τρέχοντος συστήματος από τον αριθμό Reynolds του κυλίνδρου και την πυκνότητα της παράταξης. Οι Lowe et al. (2005) πραγματοποίησαν πειράματα σε κανάλι ορθογωνικής διατομής με κατακόρυφη θυρίδα χρησιμοποιώντας ως δύο ρευστά είτε νερό και διάλυμα ιωδιούχου νατρίου, είτε νερό και διάλυμα χλωριούχου νατρίου με τη διαφορά πυκνότητας να κυμαίνεται μεταξύ του 0.61 και του 1. Αναπτύχθηκε μια υδραυλική θεωρία η οποία 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 Birman et al. (2006) διεξήγαγαν προσομοιώσεις Navier-Stokes με μεταβλητές δύο διαστάσεων προκειμένου να ερευνήσουν τις επιπτώσεις μιας κλίσης στην κλασσική “lock-exchange” ροή. Οι προσομοιώσεις πλήρους απελευθέρωσης έδειξαν ότι η ροή διέρχεται από μια αρχικά σχεδόν σταθερή φάση που χαρακτηρίζεται από μια σταθερή εμπρόσθια ταχύτητα. Αυτή η σχεδόν σταθερή εμπρόσθια ταχύτητα έχει μέγιστη γωνία κλίσης γύρω στις  $40^\circ$ . Η ροή στη συνέχεια υφίσταται μετάβαση σε μια δεύτερη φάση με μεγαλύτερη, ασταθή εμπρόσθια ταχύτητα. Αυτά τα υπολογιστικά αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν με πειραματικές παρατηρήσεις της ροής σε σωλήνα κυκλικής διατομής. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι για τα αρχικά στάδια απαιτείται ένα μοντέλο στρωματοποίησης τριών επιπέδων, λόγω της έντονης ανάμιξης στο κεντρικό τμήμα της διατομής.

Οι Takagi and Huppert (2007) εξέτασαν Νευτώνια ρεύματα βαρύτητας που διαδίδονται κατά μήκος οριζόντιων και κεκλιμένων καναλιών με όρια σχήματος ημικυκλικού και V και συνέκριναν τις μαθηματικές εξισώσεις με δεδομένα από τα εργαστηριακά πειράματα. Οι Maxworth and Nokes (2007) διερεύνησαν πειραματικά τα ρεύματα βαρύτητας που διαμορφώθηκαν από την απελευθέρωση ενός βαρέος ρευστού από εσωκλειόμενη θυρίδα σε κεκλιμένο ανοιχτό κανάλι. Η ταχύτητα μετώπου του ρεύματος βαρύτητας αυξανόταν με τον χρόνο. Τελικά η οπτικοποίηση της ροής και οι μετρήσεις ταχύτητας έδειξαν ότι κατά την διάρκεια της φάσης της επιτάχυνσης το μέτωπο τροφοδοτούνταν από ένα ρεύμα το οποίο είχε επίδραση στο μέτωπο.

Στη συνέχεια, οι Takagi and Huppert (2008) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο ακανόνιστης ροής Stokes σε άκαμπτες επιφάνειες για να αποκτήσουν μια ποικιλία ποσοστών διάδοσης από ρεύματα βαρύτητας με ιζώδες, τα οποία δημιουργούνται θεωρώντας διαφορετικές στιγμές έναρξης μέσα στο κανάλι που αλλάζει σχήμα κατά μήκος της ροής. Ακόμη, η θέση του ρεύματος μέσα σε ένα κανάλι, το οποίο είναι ομαλό σε όλο το μήκος, μελετάται και προκύπτει ότι είναι ανάλογη με τον χρόνο. Οι Zhang and Nepf (2008) διερεύνησαν μια ροή ανταλλαγής μεταξύ περιοχών με και χωρίς βλάστηση σε επιφανειακά ύδατα με διαφορές στην πυκνότητα του νερού. Πραγματοποιήθηκε η εργαστηριακή έρευνα με τη χρήση τυχαίας σειράς άκαμπτων, αναδυόμενων κυλίνδρων. Η πρώτη περιοχή με βλάστηση έχει την μεγαλύτερη πυκνότητα. 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 στην περιοχή με βλάστηση κατά μήκος του καναλιού καθορίζεται από την αντίσταση των κυλίνδρων και μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Τα



μοντέλα ρευμάτων βαρύτητας σε δεξαμενή στο πυθμένα της οποίας υπάρχει βλάστηση αποτελούν αντικείμενο αρκετών ερευνών καθώς η βλάστηση είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Ακόμα, οι Keramaris and Prinos (2008) πραγματοποίησαν πειράματα σε δεξαμενή με προκαθορισμένα όρια στην οποία ο πυθμένας καλύπτεται από γρασίδι διαφορετικής αναλογίας βύθισης με πυκνότητες που κυμαίνονται από 0.08 έως 0.30. Αναλύονται οι επιδράσεις του λόγου πυκνότητας, του λόγου βύθισης και της κλίσης του πυθμένα στην κίνηση του ρεύματος. Τα βασικά συμπεράσματα είναι ότι αφενός ο λόγος  $h_v/H$  ( $h_v$ = height of vegetation,  $H$  = water depth) επηρεάζει την κίνηση του ρεύματος βαρύτητας και αφετέρου ότι η επίδραση της τραχύτητας της βλάστησης δεν είναι σημαντική κοντά στο θυρόφραγμα.

Οι Jamali et al. (2008) πραγματοποίησαν πειράματα σε ρεύματα βαρύτητας που οφείλονται στη διαφορετική θερμοκρασία στην περιοχή της βλάστησης και στην περιοχή του νερού. Η περιοχή του νερού είχε μεγαλύτερη πυκνότητα από την περιοχή με την βλάστηση. Το κύριο συμπέρασμα της έρευνας ήταν ότι η ταχύτητα μετώπου μειώνεται με το χρόνο στην περιοχή της βλάστησης.

Ένα χρόνο μετά, οι Keramaris et al. (2009) πραγματοποίησαν πειράματα σε ανοικτή δεξαμενή για την επίδραση της βλάστησης στην κίνηση διδιάστατων ρευμάτων βαρύτητας, όπου η βλάστηση προσομοιώθηκε με συστοιχία ράβδων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακή δεξαμενή στην οποία μια μετακινούμενη θυρίδα διαχωρίζει το νερό από το 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 με σκοπό να μελετηθούν η διανυθείσα απόσταση, η ταχύτητα μετώπου και το ύψος μετώπου για ράβδους πάνω από την επιφάνεια του νερού (μη βυθισμένη βλάστηση) και για βυθισμένες ράβδους (βυθισμένη βλάστηση). Επιπλέον οι Keramaris and Prinos (2009) μελέτησαν την επίδραση της αντίστασης, λόγω βλάστησης σε ρεύματα βαρύτητας μέσω πειραμάτων σε δεξαμενή με θυρίδα με την διαφορά πυκνότητας μεταξύ αλατόνευρου και διαυγούς νερού να κυμαίνεται μεταξύ του 0.1% και 0.3%. Η κίνηση του ρεύματος βαρύτητας παρακολούθηθηκε με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας με αποτέλεσμα να μετρηθεί η εμπρόσθια ταχύτητα και να καταγραφεί το ύψος του εμπρόσθιου τμήματος.

Ένα εξίσου σημαντικό πεδίο έρευνας είναι οι πειραματικές μελέτες για τα ρεύματα βαρύτητας σε λεκάνη. Οι Monaghan et al. (2009a) διερεύνησαν την κίνηση ρευμάτων με αλατόνευρο που διαδίδονται οριζόντια σε δεξαμενή ορθογώνιας διατομής στο ανώτερο και διατομής σχήματος V στο κατώτερο τμήμα της με πειράματα ανταλλαγής ροής καθώς και με ένα μοντέλο προσομοίωσης. Η ύπαρξη της λεκάνης παρουσιάζει τρεις σημαντικές διαφορές στα ρεύματα βαρύτητας συγκριτικά με αυτά τα οποία ρέουν κατά μήκος επίπεδη βάσης. Αρχικά





έδειξαν ότι το μέτωπο του ρεύματος είναι κατά προσέγγιση παραβολικό, στη συνέχεια ότι για επαρκώς μεγάλη διάρκεια χρόνου η ταχύτητα του ρεύματος στο τμήμα διατομής σχήματος V διαφέρει από αυτή στην επίπεδη βάση και τέλος ότι το πλάτος του ρεύματος βαρύτητας στο τμήμα διατομής σχήματος V μειώνεται με την πάροδο του χρόνου. Παράλληλα χρησιμοποιήσαν μοντέλο προσομοίωσης για την πρόβλεψη της επίπτωσης που έχει η αλλαγή της κλίσης της λεκάνης, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα ότι για ρεύματα ίσου όγκου, όσο πιο απότομη η λεκάνη τόσο πιο γρήγορη είναι η ροή. Στη συνέχεια οι Monaghan et al. (2009b) επέκτειναν προηγούμενες μελέτες ρευμάτων βαρύτητας με αλατόνερο με υψηλούς αριθμούς Reynolds τα οποία ρέουν κατά μήκος δεξαμενής με λεκάνη σε σχήμα V. Χρησιμοποίησαν πειράματα και ένα box-model, όπου το μέτωπο της ροής είναι κατά προσέγγιση παραβολικό, ώστε να εξακριβώσουν τα κύρια χαρακτηριστικά της ροής. Τα αποτελέσματα μπορούν να περιγραφούν με αξιοσημείωτη ακρίβεια μέσω του box-model χρησιμοποιώντας μία γενίκευση της εξίσωσης για καθίζησης του ιζήματος από ένα τυρβώδες μέσο.

Οι Κεραμάρης και Πρίνος (2010) διερεύνησαν την κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας αλατόνερου σε σύνθετη διατομή, η οποία προσεγγίζει πιο ρεαλιστικά της λεκάνης που εμφανίζονται στη φύση. Η διατομή αποτελείται από τραπεζοειδές σχήμα στο κάτω τμήμα της και ορθογώνια διατομή στο άνω σχήμα της. Τα πειράματα εκτελέστηκαν για ίδια στάθμη αλατόνερου και καθαρού νερού και στις δύο πλευρές του θυροφράγματος και η διαφορά πυκνότητας μεταξύ τους κυμάνθηκε από 0.1% μέχρι 0.4%. Στο πείραμα αυτό μελετήθηκε η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας, η οποία καταγράφηκε σε ένα ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας και μετρήθηκε η εμπρόσθια ταχύτητα. Ο αρχικός αριθμός Reynolds, με βάση το ύψος της κοιλάδας και τη μειωμένη βαρύτητα, είναι μεγαλύτερος από 10000 για όλες τις περιπτώσεις που υποδηλώνει ότι τα ρεύματα βαρύτητας είναι τυρβώδη. Τα κύρια συμπεράσματα αυτής της έρευνας είναι ότι το ρεύμα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ταξιδεύει ταχύτερα από τα άλλα, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα του ρεύματος αυξάνεται με την αυξανόμενη διαφορά πυκνότητας και ότι η επίδραση της διαφοράς πυκνότητας είναι πιο έντονη στην περίπτωση σύνθετης διατομής από ότι είναι στο τραπεζοειδές τμήμα.

Το 2012 ο Kumar μελέτησε το πρόβλημα της θερμικής μεταφοράς σε ένα υγρό μέσω ενός πορώδες μέσου με σκοπό να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις του κατακόρυφου μαγνητικού πεδίου και της κάθετης περιστροφής. Επιπλέον, 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 αλατό-



νερου μετά την αφαίρεση κατακόρυφης θυρίδας σε δεξαμενή γλυκού νερού. Σκοπός του πειράματος ήταν να διερευνηθεί η επίδραση της αρχικής πυκνότητας του μείγματος αλατόνερου στην ίδια την θυρίδα και η τραχύτητα του πυθμένα στην κίνηση του ρεύματος βαρύτητας. Αξιολογήθηκαν η χρονική εξέλιξη της θέσης και της ταχύτητας του μετώπου σε σχέση με τις διάφορες φάσεις του ρεύματος και η εξέλιξη του ύψους του ρεύματος. Η τραχύτητα του πυθμένα του καναλιού μείωσε σημαντικά την ταχύτητα του μετώπου λόγω της τριβής που αναπτύχθηκε. Η δυναμική του ρεύματος σε κάθε φάση της ανάπτυξης του αλλά και σημαντικές μεταβλητές καθορίστηκαν από την ανάλυση των αριθμών Froude.

Έπειτα, οι Longo και Di Federico (2014) ανέλυσαν την αξονοσυμμετρική διάδοση των μονοφασικών ρευμάτων βαρύτητας που προκαλούνται από την απελευθέρωση ενός όγκου ρευστού σε ένα πορώδες πεδίο. Συνέκριναν τα θεωρητικά τους αποτελέσματα με αποτελέσματα δύο πειραματικών δεδομένων, εκ των οποίων το ένα ήταν με γλυκό νερό και το άλλο περιείχε αέρα ως ρευστό περιβάλλοντος. Τελικά κατέληξαν στο γεγονός ότι τα αριθμητικά αποτελέσματα συνέπιπταν με τα πειραματικά. Το 2015 οι Kumar et al. μελέτησαν την εμφάνιση της μεταφοράς σε ένα πορώδες κορεσμένο μέσο υπό την επίδραση ποικίλων τιμών βαρύτητας, των αιωρούμενων σωματιδίων και του ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου.

Οι Keramaris and Prinos (2016) πραγματοποίησαν πειράματα σε εργαστηριακή δεξαμενή με βλάστηση για τη διερεύνηση της επίδρασης της διατομής και της αντίστασης της βλάστησης στην κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε σύνθετη διατομή, η οποία είναι ορθογώνια στο άνω μέρος της και τραπεζοειδής στο κάτω. Για την προσομοίωση της βλάστησης, ο πυθμένας καλύφθηκε με εύκαμπτη βλάστηση (ύψος βλάστησης,  $h_v = 2,0\text{cm}$ ) με διαφορετικό λόγο  $\frac{h_v}{H}$  ( $h_v =$  ύψος βλάστησης,  $H =$  βάθος νερού). Η δεξαμενή είχε τις εξής διαστάσεις: πλάτος  $W = 23\text{cm}$ , ύψος  $H = 25\text{cm}$  και μήκος  $L = 5\text{m}$ , ενώ το τραπεζοειδές τμήμα είχε τις εξής διαστάσεις: πλάτος πυθμένα  $B = 5\text{cm}$ , ύψος  $H_{tr} = 10\text{cm}$  και πλευρική κλίση 1: 1. Η δεξαμενή ήταν χωρισμένη σε δύο μέρη με ένα αφαιρούμενο κατακόρυφο θυρόφραγμα, το οποίο αφαιρείται απότομα στην αρχή του κάθε πειράματος. Το μέρος της δεξαμενής χωρίς βλάστηση γεμίστηκε με  $H = 4, 6, 8, 12, 14, 16\text{ cm}$  αλατόνερου πυκνότητας  $\rho_{sw}$ , ενώ το μέρος με τη βλάστηση γεμίστηκε σε αντίστοιχο ύψος με καθαρό νερό πυκνότητας  $\rho_w$  ( $\rho_w < \rho_{sw}$ ). Η διαφορά πυκνότητας μεταξύ αλμυρού και καθαρού νερού κυμάνθηκε μεταξύ 0,1% και 0,4% ( $\rho_w = 1000\text{kg/m}^3$ ,  $\rho_{sw} = 1010, 1020, 1030, 1040\text{ kg/m}^3$ ). Πραγματοποιήθηκαν και για τις τέσσερις πυκνότητες αντίστοιχα, δώδεκα πειράματα στο εσωτερικό της τραπεζοειδούς διατομής για  $\frac{H}{H_{tr}} = 0,4, 0,6, 0,8$  και δώδεκα πάνω από την τραπεζοειδή διατομή για  $\frac{H}{H_{tr}} = 1,2, 1,4$  ή  $1,6$ . Με την απομάκρυνση του θυροφράγματος, το βαρύτερο ρευστό



διαδίδεται προς το ελαφρύτερο κατά μήκος του πυθμένα της δεξαμενής και το ελαφρύτερο ρευστό διαδίδεται κατά μήκος της ελεύθερης επιφάνειας προς την αντίθετη κατεύθυνση. Για καλύτερη απεικόνιση της ροής, το αλατόνερο αναμειχθηκε με ροδαμίνη. Ο αρχικός αριθμός Reynolds είναι μεγαλύτερος από 10000 για όλες τις περιπτώσεις, το οποίο υποδηλώνει ότι τα ρεύματα είναι τυρβώδη. Η κίνηση του ρεύματος βαρύτητας καταγράφηκε με ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας, μέσω του οποίου προσδιορίστηκαν η ταχύτητα και η εμπρόσθια θέση συναρτήσει του χρόνου. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η διαφορετική διατομή επηρεάζει σημαντικά την κίνηση καθώς και την ταχύτητα του μετώπου των ρευμάτων βαρύτητας. Η παρουσία τραπεζοειδούς διατομής αυξάνει την ταχύτητα των ρευμάτων βαρύτητας σε σύγκριση με τριγωνική ή ορθογωνική διατομή.

Ο Keramaris (2017) μελέτησε την επίδραση ενός διαπερατού υλικού, είτε εύκαμπτου είτε 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 περίπτωση του άκαμπτου με δέσμες ράβδων. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν πειράματα για ίσα ύψη βλάστησης και διαφορές πυκνότητας της τάξεως του 2%, 4% και 6%.

Τέλος, οι Βαρδακώστας και Κεμεντσεισίδης (2019) πραγματοποίησαν πειράματα σε γυάλινη δεξαμενή σύνθετης διατομής με θυρίδα όπου μελέτησαν την επίδραση της διαφοράς πυκνότητας στην κίνηση ρευμάτων βαρύτητας. Η δεξαμενή αποτελούνταν από τραπεζοειδή διατομή στο κάτω τμήμα της και ορθογωνική στο άνω τμήμα της και είχε τις εξής διαστάσεις: πλάτος 23cm στο άνω και 5cm στο κάτω μέρος της, μήκος 2,05m και βάθος 25cm. Η δεξαμενή χωρίστηκε σε δύο μέρη από ένα κατακόρυφο θυρόφραγμα, το οποίο είχε τις ίδιες διαστάσεις σε πλάτος και ύψος με τη δεξαμενή ενώ το πάχος του ήταν 2cm. Το θυρόφραγμα διαχώριζε καθαρό νερό πυκνότητας  $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$  από αλατόνερο, αναμειγμένο με ροδαμίνη, με πυκνότητες  $\rho_{sw}= 1050, 1060, 1070, 1080, 1090 \text{ kg/m}^3$ . Πραγματοποιήθηκαν συνολικά είκοσι πειράματα, όπου πιο συγκεκριμένα μελετήθηκαν τέσσερα ύψη:  $H=5\text{cm}$ ,  $H=10\text{cm}$ ,  $H=17,5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$  και σε κάθε ύψος οι πέντε πυκνότητες  $\rho_{sw}$ . Με την απότομη απομάκρυνση του θυροφράγματος, προκλήθηκε ροή λόγω διαφοράς πυκνότητας με αποτέλεσμα το βαρύτερο υγρό να κινήθηκε στον πυθμένα της δεξαμενής ενώ αντίστοιχα το ελαφρύτερο στην ελεύθερη επιφάνεια. Η ανάμιξη τους καταγράφηκε σε ψηφιακό βίντεο υψηλής ευκρίνειας, από το οποίο μετρήθηκε η ταχύτητα του μετώπου. Το κύριο συμπέρασμα των πειραμάτων ήταν ότι η διατομή της δεξαμενής διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας και επιπλέον ότι η αύξηση της ταχύτητας είναι ανάλογη με την αύξηση της διαφοράς πυκνότητας.



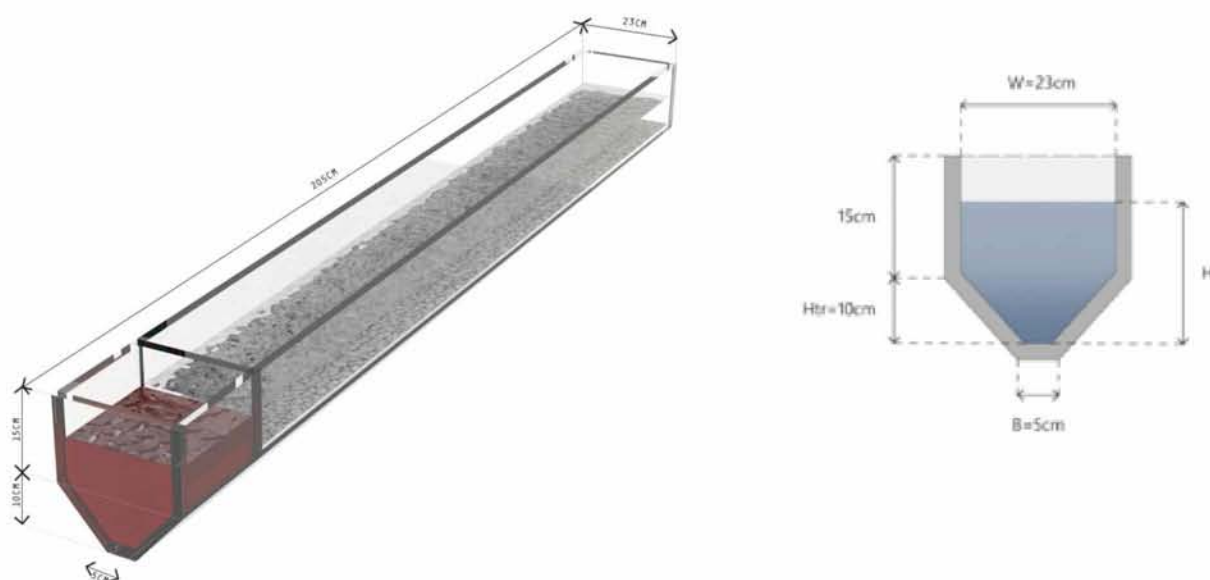
Τα ρεύματα βαρύτητας έχουν ερευνηθεί εκτενώς σε 2D διαμόρφωση πειραματικά και αριθμητικά. Αντιθέτως για τα ρεύματα βαρύτητας 3D ανάμειξης δεν έχουν διαμορφωθεί τόσες έρευνες και πειράματα. (Özgökmen et al 2004a, Chang et al., 2005, Ilıcak 2014 και Ottolenghi et al., 2016a, b & 2017).

## Κεφάλαιο 3 Πειραματική διάταξη

### 3.1 Περιγραφή κατασκευής

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε μια γυάλινη δεξαμενή σύνθετης διατομής, η οποία αποτελείται από μια ορθογώνια άνω διατομή και από μια χαμηλότερη τραπεζοειδή. Η δεξαμενή έχει μήκος 2.05 m, βάθος 25cm και πλάτος 23cm στο άνω μέρος και 5cm στο κάτω μέρος της. Η δεξαμενή χωρίζεται σε δύο μέρη με ένα κατακόρυφο θυρόφραγμα, το οποίο έχει το ίδιο πλάτος και ύψος με την δεξαμενή ενώ το πάχος του είναι 2cm. Για την μελέτη του χαλικώδους πυθμένα τοποθετήθηκε, στο ένα μόνο μέρος της δεξαμενής, στρώμα χαλικιού πάχους 2cm.

Στο πέρας της δεξαμενής υπάρχει μια σφαιρική κάνουλα μονής ροής με σκοπό να βοηθήσει στην απορροή του νερού και στην διευκόλυνση καθαρισμού της δεξαμενής. Η κάνουλα είναι συνδεδεμένη με πλαστικό σωλήνα, ο οποίος καταλήγει στο σύστημα αποχέτευσης του εργαστηρίου. Η δεξαμενή είναι τοποθετημένη και ασφαλισμένη πάνω σε τραπέζι, του οποίου η επιφάνεια δεν αποκλίνει ως προς την οριζοντίωση.



Εικόνα 3.1.1 Τρισδιάστατη απεικόνιση γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm, πλάτους 23cm στο άνω και 5cm στο κάτω μέρος και βάθους 25cm με χαλικώδη πυθμένα. Θυρόφραγμα ίδιων διαστάσεων την χωρίζει σε δύο μέρη.





Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν δύο κάμερες υψηλής ευκρίνειας και μεγάλοι προβολείς. Η μία κάμερα τοποθετήθηκε ακριβώς στη θέση του θυροφράγματος, προκειμένου να καταγράψει την αρχική κίνηση του ρεύματος, και ταυτόχρονα η δεύτερη κατέγραφε συνεχόμενα και σταθερά τα ρεύματα από την θυρίδα μέχρι το πέρας της δεξαμενής. Με σκοπό να αποτυπωθούν καλύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια τα ρεύματα βαρύτητας, τοποθετήθηκε λευκό ύφασμα πίσω από την δεξαμενή.

### **3.2 Προετοιμασία πειραμάτων**

Το υγρό με την μεγαλύτερη πυκνότητα χρωματίζεται με ροδαμίνη, προκειμένου να καταγραφεί εμφανώς η ανάμειξη με το άλλο υγρό αλλά και η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται κατά μήκος της δεξαμενής. Οι χρωστικές ροδαμίνης είναι διαλυτές στο νερό και προσδίδουν στο υγρό ένα έντονο κόκκινο χρώμα, συγχρόνως όμως είναι και αρκετά τοξικές. Κατά συνέπεια, μετά από κάθε πείραμα, η δεξαμενή και τα όργανα μετρήσεων έπρεπε να καθαριστούν προσεκτικά. Στον πυθμένα του δεξιού τμήματος της δεξαμενής απλώσαμε μια ομοιόμορφη στρώση πάχους 2cm χαλικιού.

Εκτελέσθηκαν τέσσερα σετ πειραμάτων για ύψη 5cm, 10cm, 17.5cm και 25cm. Σε κάθε υψόμετρο εκτελέσθηκαν πέντε επιμέρους πειράματα με αντίστοιχες πυκνότητες αλατόνευρου  $1050 \text{ kg/m}^3$ ,  $1060 \text{ kg/m}^3$ ,  $1070 \text{ kg/m}^3$ ,  $1080 \text{ kg/m}^3$  και  $1090 \text{ kg/m}^3$ , οι οποίες προσομοιώνουν πυκνότητες υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον. Για την επίτευξη της εκάστοτε αλατότητας χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικός σωλήνας 1 lt και πυκνόμετρο. Αρχικά ο δοκιμαστικός σωλήνας γεμίστηκε με νερό πυκνότητας  $1000 \text{ kg/m}^3$  και στην συνέχεια προστέθηκε αλάτι έως ότου το πυκνόμετρο δείξει την επιθυμητή πυκνότητα. Στη συνέχεια ο σωλήνας αδειάστηκε στο αριστερό τμήμα της δεξαμενής. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε αρκετές φορές μέχρι το αλατόνερο να φτάσει στο εκάστοτε ύψος της δεξαμενής που θα μελετηθεί. Επιπλέον μετρήθηκε η πυκνότητα του νερού και βρέθηκε ίση με  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

### **3.3 Εκτέλεση πειραμάτων**

Στην αρχή το θυρόφραγμα παραμένει κλειστό διαχωρίζοντας το αριστερό τμήμα της δεξαμενής, το οποίο περιέχει το αλατόνερο που παρασκευάστηκε αναμειγμένο με ροδαμίνη, από το δεξί τμήμα με τον χαλικώδη πυθμένα που περιέχει το καθαρό νερό. Οι στάθμες και των δύο υγρών πρέπει να βρίσκονται στο ίδιο ακριβώς ύψος. Έπειτα, γίνεται έλεγχος για





διαρροές κάτω από το θυρόφραγμα και εφόσον αυτές διαπιστωθούν, τοποθετείται σε εκείνο το σημείο μονωτικό υλικό το οποίο κόβεται στις κατάλληλες διαστάσεις. Στη συνέχεια, ενεργοποιούνται οι προβολείς και η κάμερα που βρίσκεται στη θέση του θυροφράγματος. Σηκώνοντας στιγμιαία το θυρόφραγμα, το αλατόνερο συναντά το καθαρό νερό και τον χαλικώδη πυθμένα. Το ρεύμα βαρύτητας που μελετάται είναι αυτό που δημιουργείται από το υγρό με τη μεγαλύτερη πυκνότητα, δηλαδή το αλατόνερο με την ροδαμίνη. Η δεύτερη κάμερα μετακινείται παράλληλα με το ρεύμα βαρύτητας και βιντεοσκοπείται ολόκληρη η διαδρομή του από την αρχή έως το πέρας της δεξαμενής.

Όταν το ρεύμα βαρύτητας ολοκληρώσει την πορεία του, κλείνουν οι κάμερες και ανοίγει η κάνουλα προκειμένου να αδειάσει η δεξαμενή. Στη συνέχεια καθαρίζονται η δεξαμενή και τα χαλίκια, τα οποία έχουν χρωματιστεί από τη ροδαμίνη, και επανατοποθετούνται καθώς έχουν χάσει την ομοιομορφία τους από την ανάμιξη των υγρών. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για τέσσερα ύψη :

- Στη μέση της τραπεζοειδούς διατομής ( 5cm )
- Στην κορυφή της τραπεζοειδούς διατομής ( 10cm )
- Στη μέση της τετραγωνικής διατομής ( 17.5cm )
- Στην κορυφή της δεξαμενής ( 25cm )

Σε κάθε ύψος πραγματοποιούνται πέντε πειράματα για πυκνότητες  $1050 \text{ kg/m}^3$ ,  $1060 \text{ kg/m}^3$ ,  $1070 \text{ kg/m}^3$ ,  $1080 \text{ kg/m}^3$  και  $1090 \text{ kg/m}^3$ .

### **3.4 Παρουσίαση μετρήσεων**

Σε αυτό το υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα της απόστασης, της ταχύτητας και του χρόνου όπως αυτά συλλέχθηκαν από τα πειράματα. Η απόσταση από το θυρόφραγμα μέχρι το πέρας της δεξαμενής είναι 182 cm. Μετρήθηκαν η απόσταση που διήνυσε το αλατόνερο μέχρι να σταματήσει καθώς και ο χρόνος διαδρομής. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ταχύτητα του μετώπου για κάθε πυκνότητα.

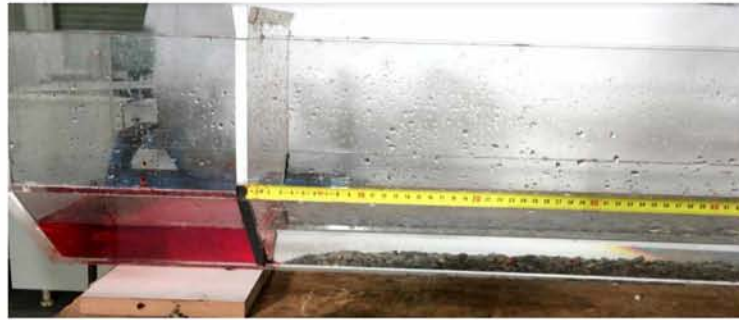
Στο πρώτο σετ πειραμάτων, το ύψος των υγρών βρίσκεται στο μέσο της τραπεζοειδούς διατομής, δηλαδή στα  $H=5\text{cm}$ . Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για αυτό το ύψος και για όλες τις πυκνότητες παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.



$\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ h=5cm		$\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ h=5cm		$\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ h=5cm		$\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ h=5cm		$\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ h=5cm	
x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)
17	2	13	2	8	2	10	2	10	2
19	4	19	4	13	4	12,5	4	20	4
24	6	29	6	21	6	23,5	6	30	6
29,5	8	39,5	8	32	8	36	8	42	8
35,5	10	45	10	36	10	41,5	10	51,5	10
40	12	49,5	12	43	12	50	12	56,5	12
44	14	55,5	14	53	14	55	14	63	14
48,5	16	61,5	16	59	16	61	16	68	16
55	18	64	18	62	18	64	18	69,5	18
60	20	65,5	20	64,5	20	66	20	70	2
62,5	22	68	22	66	22	67	22	71	22
65	24	70	24	68	24	69	24	72	24
67	26	71,5	26	72	26	70	26	73	26
69	28	72	28	75	28	70,5	28	75	28
69,5	30			77	30	71	30	78	30
70	32			81	32	71,5	32	79	32
				83	34	73,5	34	80	34
						74	36	81	36
						75	38	81,5	38
						75,5	40	82	40
						76	42	82,5	42
						77	44	83	44
						78	46		
						79	48		
						80	50		
						81	52		
						82,5	54		
						84	56		
						85	58		
						87	60		
						88	62		

Πίνακας 3.4.1 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος H=5cm για όλες τις πυκνότητες



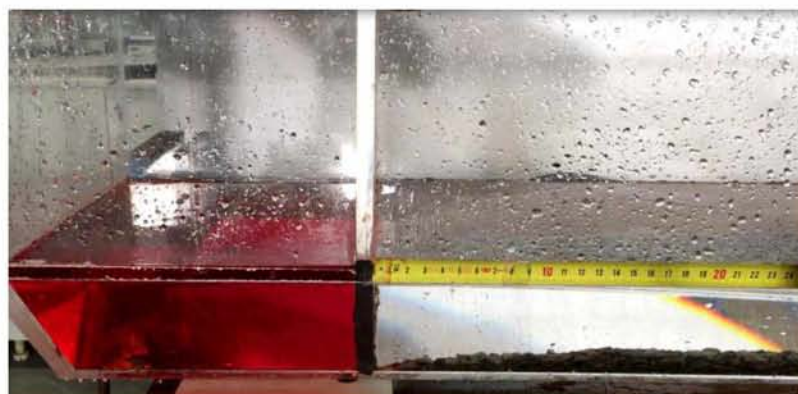


Εικόνα 3.4.1 Δεξαμενή με ύψος υγρών H=5cm

$u(\text{cm/s})$ $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ $h=5\text{cm}$
1	3	2,5	1,25	5
2,5	5	4	5,5	5
2,75	5,25	5,5	6,25	6
3	2,75	2	2,75	4,75
2,25	2,25	3,5	4,25	2,5
2	3	5	2,5	3,25
2,25	3	3	3	2,5
3,25	1,25	1,5	1,5	0,75
2,5	0,75	1,25	1	0,25
1,25	1,25	0,75	0,5	0,5
1,25	1	1	1	0,5
1	0,75	2	0,5	0,5
1	0,25	1,5	0,25	1
0,25		1	0,25	1,5
0,25		2	0,25	0,5
		1	1	0,5
			0,25	0,5
			0,5	0,25
			0,25	0,25
			0,25	0,25
			0,5	0,25
			0,5	
			0,5	
			0,5	
			0,75	
			0,75	
			0,5	
			1	
			0,5	

Πίνακας 3.4.2 Ταχύτητες μετώπου για ύψος H=5cm για όλες τις πυκνότητες

Στο δεύτερο σετ πειραμάτων, το ύψος των υγρών βρίσκεται στην κορυφή της τραπέζοειδούς διατομής, δηλαδή στα  $H=10\text{cm}$ . Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για αυτό το ύψος και για όλες τις πυκνότητες παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.



Εικόνα 3.4.2 Δεξαμενή με ύψος υγρών  $H=10\text{cm}$

$\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$		$\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$		$\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$		$\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$		$\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$	
x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)
18	2	10	2	9	2	10	2	11	2
36	4	27	4	25	4	32,5	4	30	4
53,5	6	53	6	49	6	54	6	53	6
67	8	63	8	66	8	69,5	8	72,5	8
84,5	10	81	10	90	10	94	10	94,5	10
98	12	100	12	105	12	112	12	115,5	12
108	14	114,5	14	120	14	125,5	14	129	14
121	16	127	16	134	16	147	16	140	16
132	18	134,5	18	143,5	18	156	18	154,5	18
145	20	148,5	20	150	20	167,5	20	164	20
153,5	22	150	22	159,5	22	175	22	171	22
160	24	157	24	168	24	180	24	177	24
167	26	164	26	174	26	182	26	180	26
172	28	170	28	180	28			182	28
180	30	173	30	181	30				
182	32	180	32	182	32				
		182	34						

Πίνακας 3.4.3 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος  $H=10\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες



$u(\text{cm/s})$ $\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1060\text{kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ $h=10\text{cm}$
9	8,5	8	11,25	9,5
8,75	13	12	10,75	11,5
6,75	5	8,5	7,75	9,75
8,75	9	12	12,25	11
6,75	9,5	7,5	9	10,5
5	7,25	7,5	6,75	6,75
6,5	6,25	7	10,75	5,5
5,5	3,75	4,75	4,5	7,25
6,5	7	3,25	5,75	4,75
4,25	0,75	4,75	3,75	3,5
3,25	3,5	4,25	2,5	3
3,5	3,5	3	1	1,5
2,5	3	3		1
4	1,5	0,5		
1	3,5	0,5		
	1			

Πίνακας 3.4.4 Ταχύτητες μετώπου για ύψος  $H=10\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες

Στο τρίτο σετ πειραμάτων, το ύψος των υγρών βρίσκεται στα  $H=17.5\text{cm}$ . Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για αυτό το ύψος και για όλες τις πυκνότητες παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.



Εικόνα 3.4.3 Δεξαμενή με ύψος υγρών  $H=17.5\text{cm}$



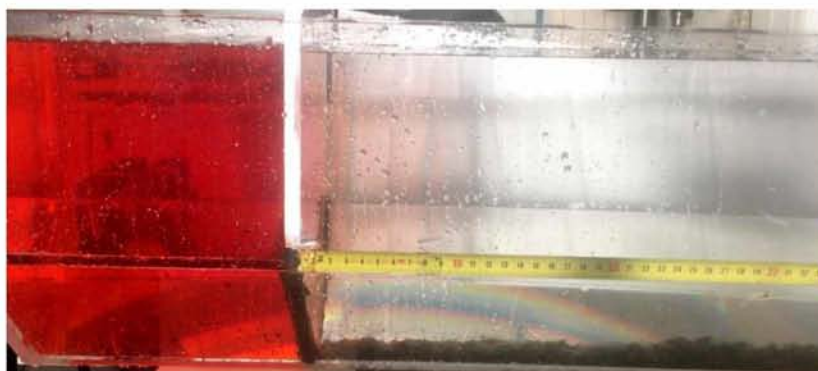
$\rho=1050 \text{ kg/m}^3$ $h=17.5\text{cm}$		$\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$		$\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$		$\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$		$\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$	
x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)
30,5	2	29,5	2	35	2	22	2	33,5	2
52,5	4	60	4	70,5	4	68	4	74,5	4
77	6	89,5	6	100	6	96	6	115	6
101,5	8	119	8	130,5	8	125,5	8	150	8
125	10	149	10	158	10	159	10	180	10
146,5	12	170	12	180	12	180	12	182	11
169	14	180	13	182	13	182	13		
180	15	182	14						
182	16								

Πίνακας 3.4.5 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος  $H=17.5\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες

$u(\text{cm/s})$ $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$ $h=17,5\text{cm}$
11	15,25	17,75	23	20,5
12,25	14,75	14,75	14	20,25
12,25	14,75	15,25	14,75	17,5
11,75	15	13,75	16,75	15
10,75	10,5	11	10,5	2
11,25	10	2	2	
11	2			
2				

Πίνακας 3.4.6 Ταχύτητες μετώπου για ύψος  $H=17.5\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες

Στο τέταρτο σετ πειραμάτων, το ύψος των υγρών βρίσκεται στην κορυφή της δεξαμενής, δηλαδή στα  $H=25\text{cm}$ . Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για αυτό το ύψος και για όλες τις πυκνότητες παρουσιάζονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.



Εικόνα 3.4.4 Δεξαμενή με ύψος υγρών  $H=25\text{cm}$

$\rho=1050\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$		$\rho=1060\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$		$\rho=1070\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$		$\rho=1080\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$		$\rho=1090\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$	
x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)	x (cm)	t (s)
14	2	23,5	2	41	2	25	2	57	2
46,5	4	58	4	53,5	4	64	4	73,5	4
79,5	6	92	6	90,5	6	104	6	117	6
109	8	128	8	124,5	8	139,5	8	157	8
147,5	10	155	10	166,5	10	180	10	180	9
172,5	12	180	11	182	11	182	11	182	10
180	13	182	12						
182	14								

Πίνακας 3.4.7 Δεδομένα πειραμάτων για ύψος  $H=25\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες

$u(\text{cm/s})$ $\rho=1050\text{kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1060\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1070\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1080\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$	$u(\text{cm/s})$ $\rho=1090\text{ kg/m}^3$ $h=25\text{cm}$
16,25	17,25	6,25	19,5	8,25
16,5	17	18,5	20	21,75
14,75	18	17	17,75	20
19,25	13,5	21	20,25	23
12,5	25	15,5	2	2
7,5	2			
2				

Πίνακας 3.4.8 Ταχύτητες μετόπου για ύψος  $H=25\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες



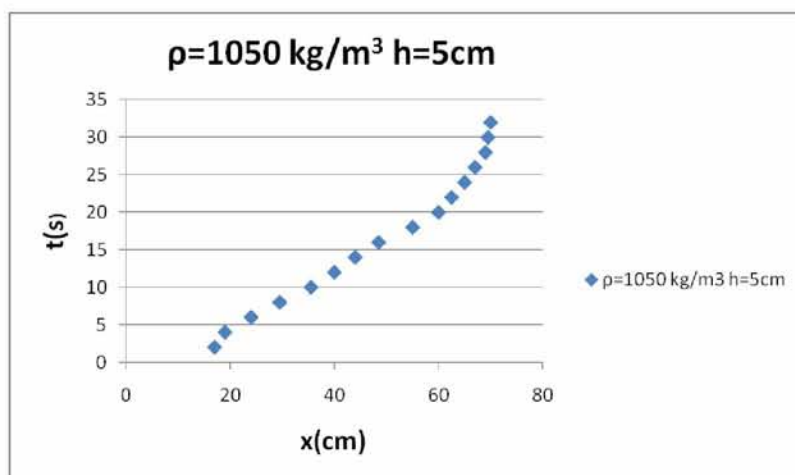
## Κεφάλαιο 4 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα των ρευμάτων βαρύτητας των πειραμάτων. Στο πρώτο υποκεφάλαιο αναλύονται τα διαγράμματα στην τραπεζοειδή διατομή ενώ στο δεύτερο υποκεφάλαιο στην σύνθετη διατομή. Στη συνέχεια, στο τρίτο υποκεφάλαιο παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα ανάμεσα σε παρόμοια μελέτη από τους Βαρδακώστα και Κεμεντσετσίδη (2019) και τέλος στο τέταρτο υποκεφάλαιο αναλύονται τα αδιαστατοποιημένα διαγράμματα όλων των πειραμάτων καθώς και παρόμοιων μελετών από τους Monaghan et al. (2009a, 2009b) και Keramaris and Prinos (2010).

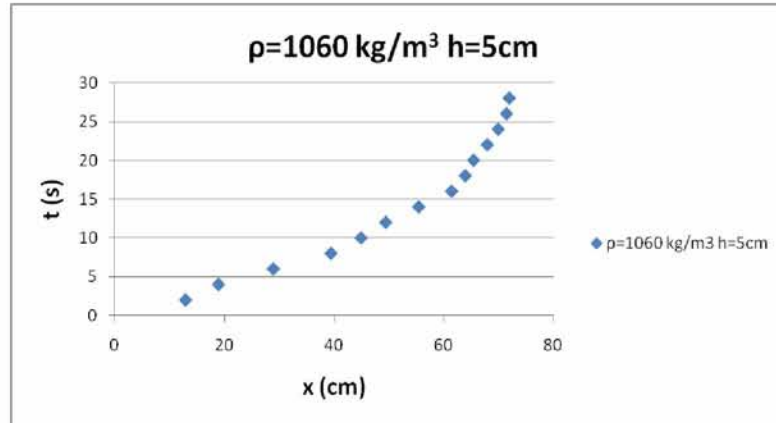
### 4.1 Ρεύματα βαρύτητας στην τραπεζοειδή διατομή

Η τραπεζοειδής διατομή περιλαμβάνει τα ύψη  $H=5\text{cm}$  και  $H=10\text{cm}$ . Σε κάθε ύψος πραγματοποιήθηκαν πέντε ξεχωριστά πειράματα για τις πέντε διαφορετικές πυκνότητες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της κάθε πυκνότητας ξεχωριστά στο εκάστοτε ύψος αλλά και συνολικά διαγράμματα με όλες τις πυκνότητες μαζί.

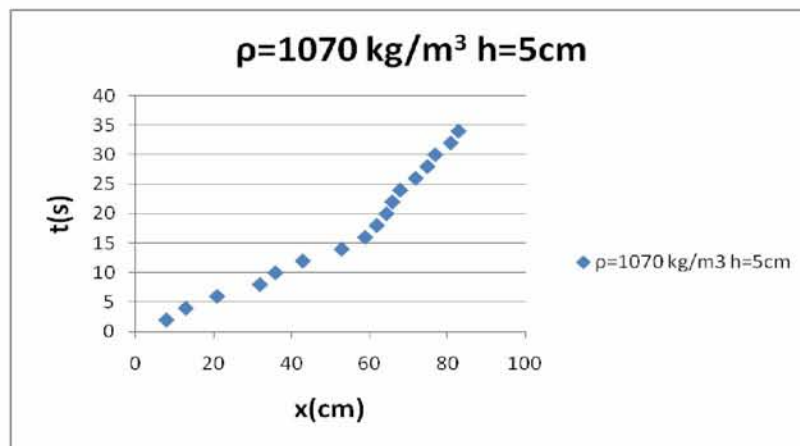
Στο πρώτο σετ πειραμάτων με  $H=5\text{cm}$  προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



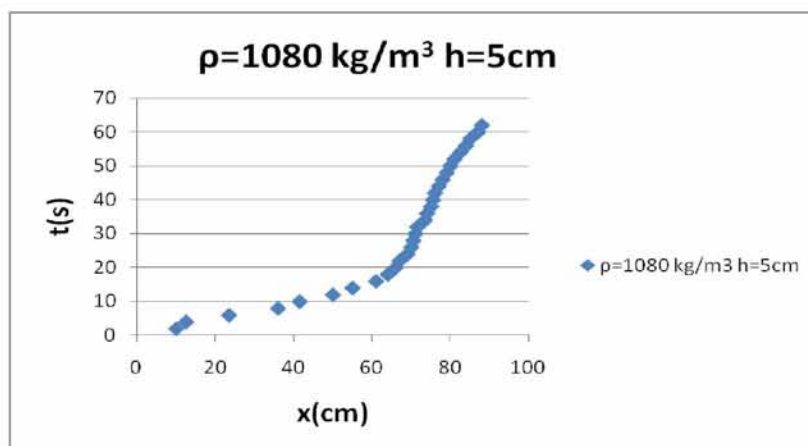
Διάγραμμα 4.1.1 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



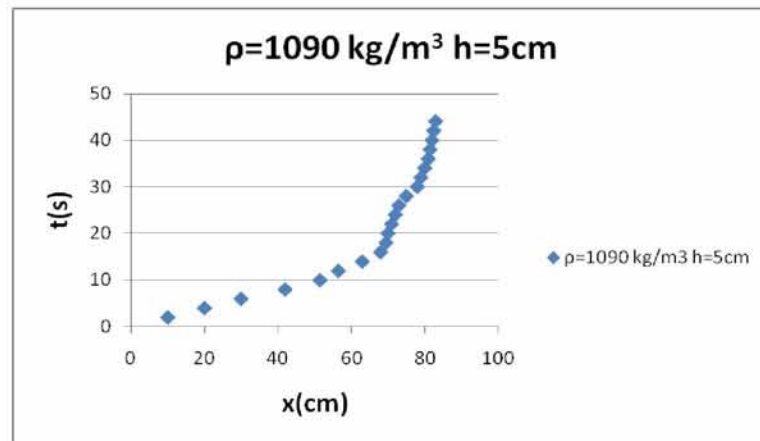
Διάγραμμα 4.1.2 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$



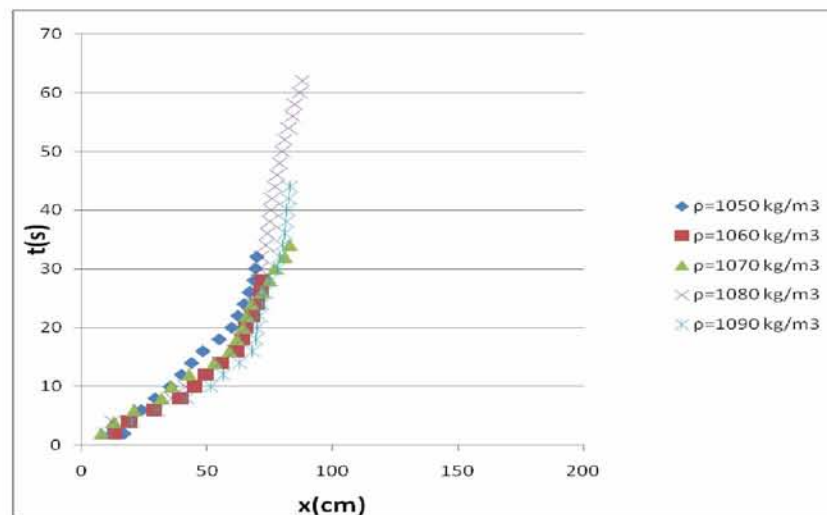
Διάγραμμα 4.1.3 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.1.4 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.1.5 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1090\text{ kg/m}^3$

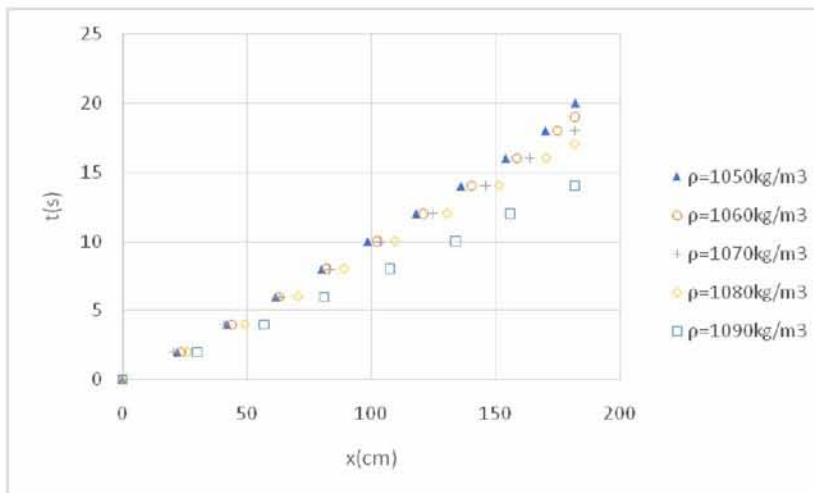


Διάγραμμα 4.1.6 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=5\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=50\%$  διανύει απόσταση  $x=70\text{cm}$  σε χρόνο  $T=32\text{sec}$  ενώ το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=60\%$  διανύει απόσταση  $x=72\text{cm}$  σε χρόνο  $T=28\text{sec}$ . Επιπλέον στη συνέχεια, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=70\%$  διανύει απόσταση  $x=83\text{cm}$  σε χρόνο  $T=34\text{sec}$ , σε αντίθεση με το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  το οποίο διανύει απόσταση  $x=88\text{cm}$  σε χρόνο  $T=62\text{sec}$ . Τέλος, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  διανύει απόσταση  $x=83\text{cm}$  σε χρόνο  $T=44\text{sec}$ . Κατά συνέπεια παρατηρείται ότι το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  διανύει την μεγαλύτερη απόσταση από όλα τα ρεύματα βαρύτητας σε αυτό το ύψος. Επίσης παρατηρείται ότι δεν υπάρχει κάποια γραμμικότητα κατά τη διάρκεια διάδοσης των μετώπων των ρευμάτων και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του χαλικώδους πυθμένα.



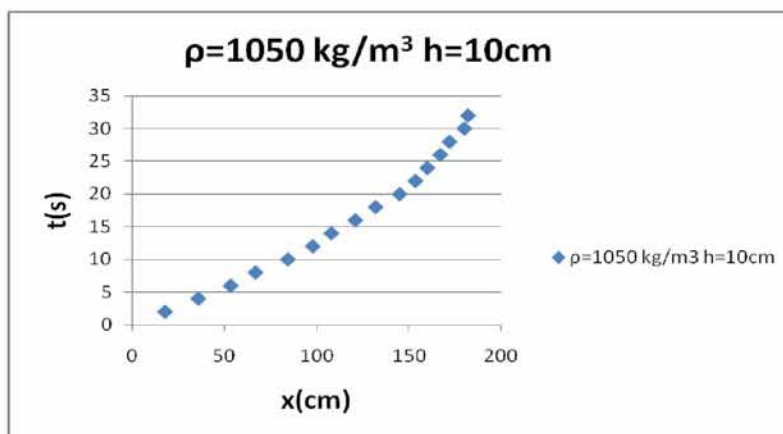
Σε αντίστοιχα πειράματα που διεξήχθησαν στην ίδια δεξαμενή από τους Βαρδακώστα και Κεμεντσεσίδη (2019) χωρίς την παρουσία χαλικώδους πυθμένα προέκυψε το εξής διάγραμμα για όλες τις πυκνότητες μαζί. Τα πειράματά τους ακολούθησαν την ίδια ακριβώς διαδικασία με τα ίδια ύψη και τις ίδιες πυκνότητες, με μόνη διαφορά την απουσία του χαλικώδους πυθμένα.



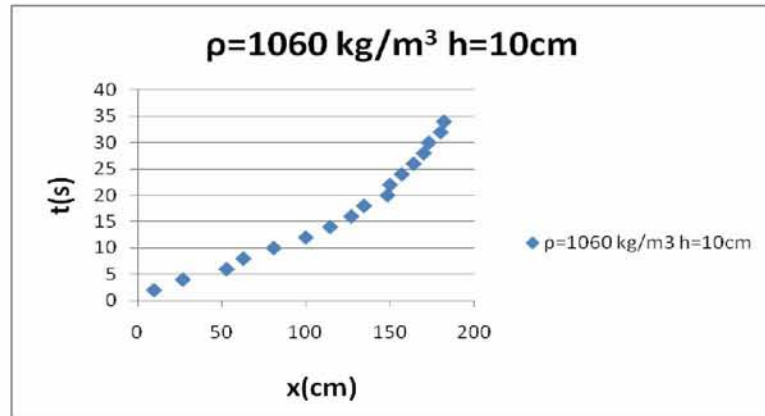
Διάγραμμα 4.1.7 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=5\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλικώδη πυθμένα

Με σύγκριση των δύο διαγραμμάτων, γίνεται αντιληπτή η σημαντική επιρροή του χαλικώδους πυθμένα στην πορεία και διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Στο δεύτερο διάγραμμα η διάδοση είναι γραμμική και όλα τα ρεύματα καλύπτουν ολόκληρη την απόσταση μέχρι και το πέρας της δεξαμενής (182cm), με το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  να την καλύπτει σε μικρότερο χρόνο, σε αντίθεση με το πρώτο διάγραμμα στο οποίο κανένα ρεύμα δεν καλύπτει ολόκληρη την απόσταση.

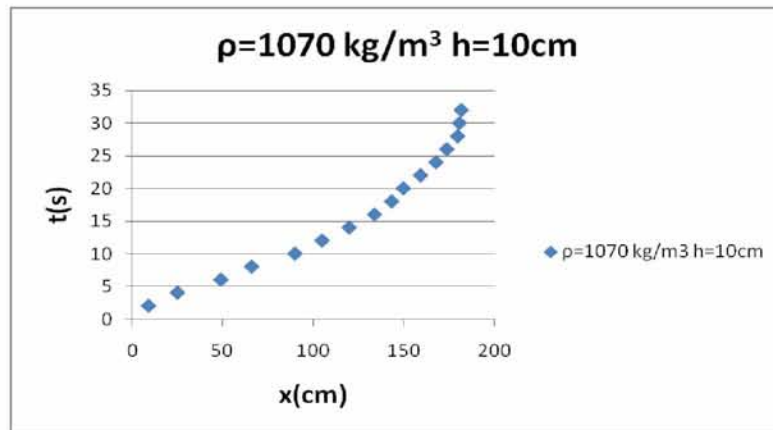
Στο δεύτερο σετ πειραμάτων με  $H=10\text{cm}$  προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



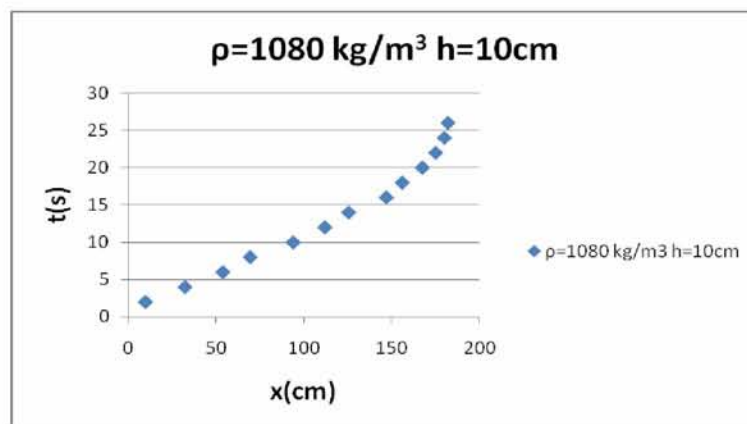
Διάγραμμα 4.1.8 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=10\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



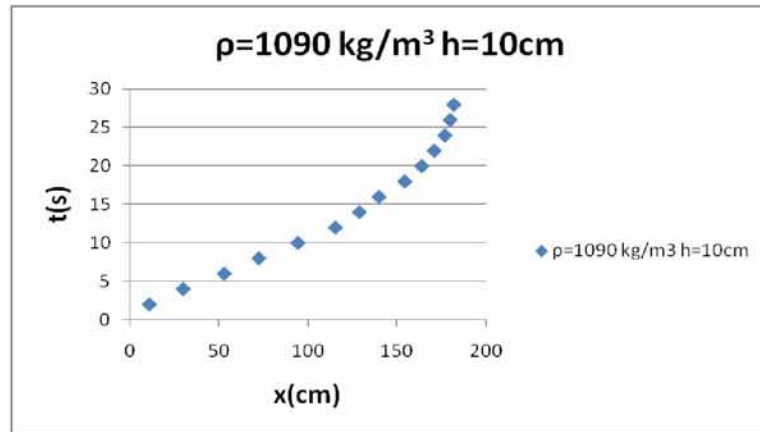
Διάγραμμα 4.1.9 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=10\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$



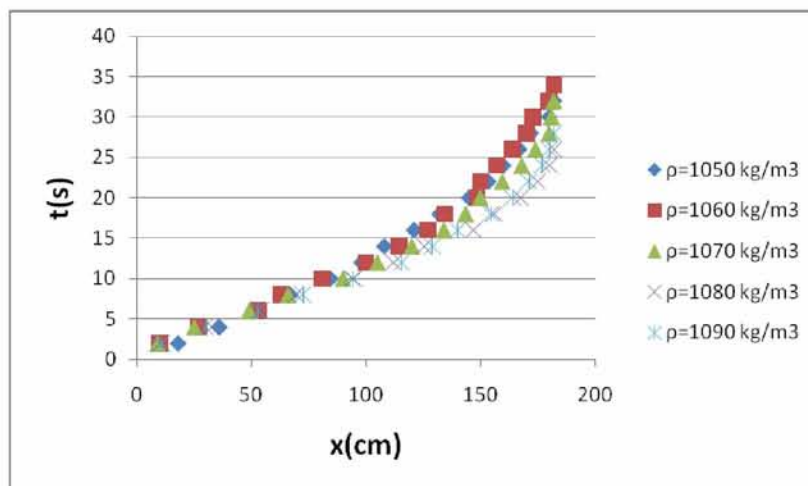
Διάγραμμα 4.1.10 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=10\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.1.11 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=10\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.1.12 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=10\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1090\text{ kg/m}^3$

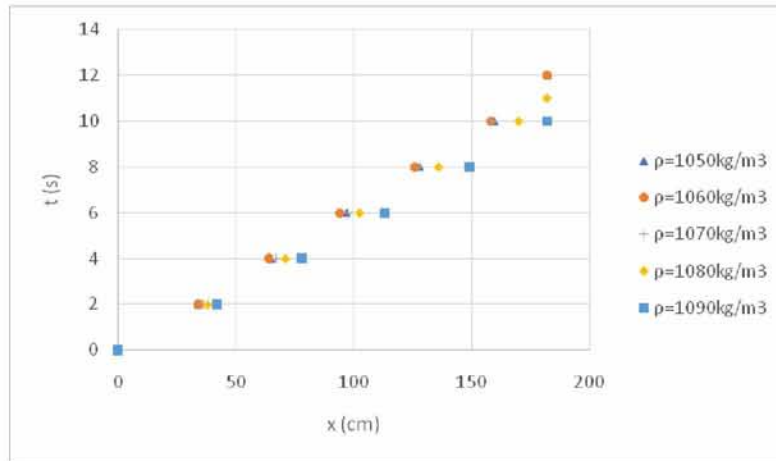


Διάγραμμα 4.1.13 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=10\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=50\%$  διανύει απόσταση  $x=182\text{cm}$  σε χρόνο  $T=32\text{sec}$ , ομοίως και το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=70\%$ . Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=60\%$  διανύει την ίδια απόσταση σε χρόνο  $T=34\text{sec}$ , σε αντίθεση με το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  και με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  που διανύει την ίδια απόσταση σε χρόνο  $T=26\text{sec}$  και  $T=28\text{sec}$  αντίστοιχα. Επομένως, και σε αυτό το ύψος, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  διανύει την συνολική απόσταση στον μικρότερο χρόνο. Παρατηρούμε ότι για  $H=10\text{cm}$  όλα τα ρεύματα βαρύτητας διανύουν ολόκληρη την απόσταση μέχρι το πέρας της δεξαμενής αντίθετα με το προηγούμενο ύψος.

Στα αντίστοιχα πειράματα που διεξήχθησαν στην ίδια δεξαμενή χωρίς την παρουσία χαλικώδους πυθμένα (Βαρδακώστας, Κεμεντσετσίδης, 2019) προέκυψε το εξής διάγραμμα για όλες τις πυκνότητες μαζί.

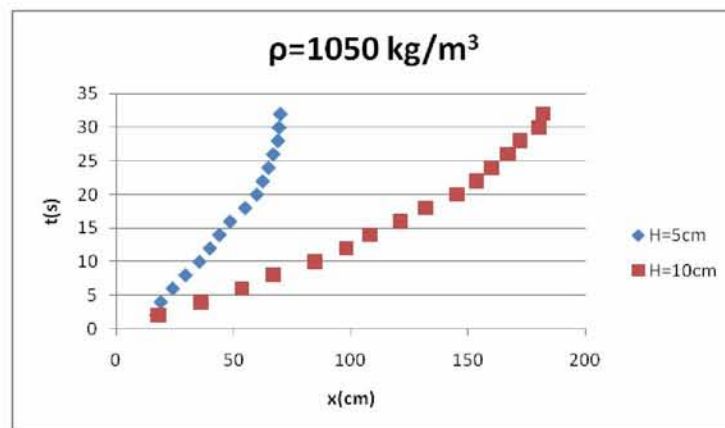




Διάγραμμα 4.1.14 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε τραπεζοειδή διατομή σε ύψος  $H=10\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλικώδη πυθμένα

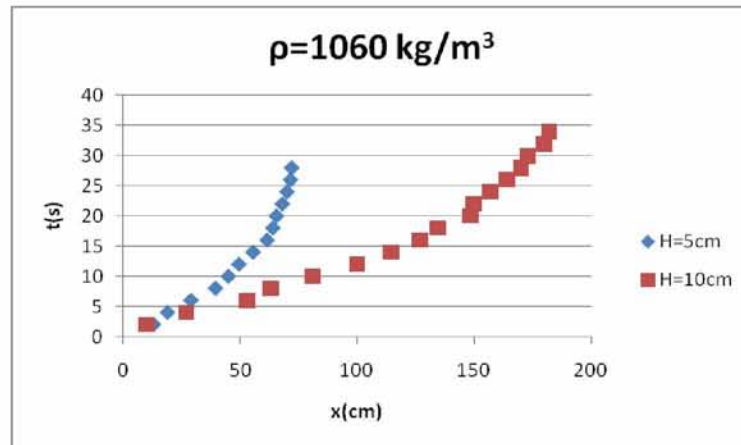
Με σύγκριση των δύο διαγραμμάτων, παρατηρείται ότι, και στα δύο πειράματα, όλα τα ρεύματα βαρύτητας διανύουν και τα 182cm της δεξαμενής. Στο πρώτο διάγραμμα, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  καλύπτει την απόσταση στον μικρότερο χρόνο, ενώ στο δεύτερο είναι το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ . Η επιρροή του χαλικώδους πυθμένα είναι εμφανής στο εύρος των χρόνων διαδρομής. Στο παρόν πείραμα, το ρεύμα καλύπτει την απόσταση σε ελάχιστο χρόνο  $T=26\text{sec}$  σε αντίθεση με το άλλο πείραμα όπου ο ελάχιστος χρόνος είναι  $T=10\text{sec}$ .

Για να διαπιστωθεί ο ρόλος που διαδραματίζει το αρχικός ύψος των ρευμάτων βαρύτητας στην διάδοση τους, σχεδιάστηκαν τα παρακάτω συνδυαστικά διαγράμματα.



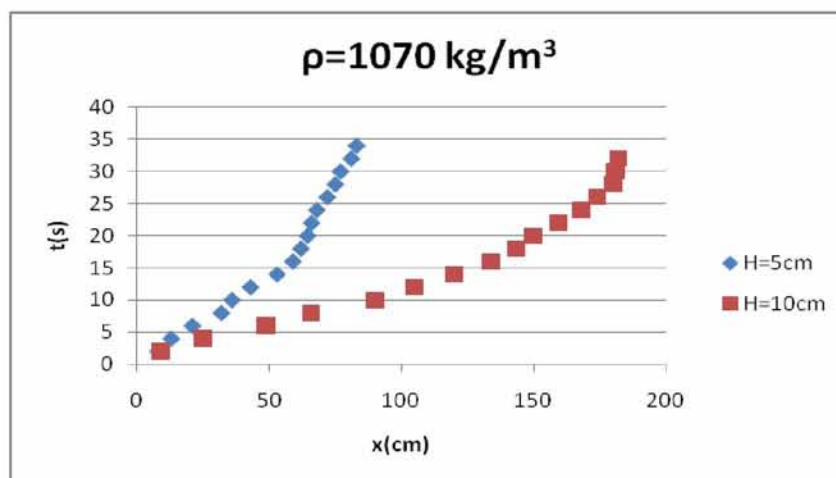
Διάγραμμα 4.1.15 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=5\text{cm}$  και  $H=10\text{cm}$

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι το ρεύμα βαρύτητας διανύει διαφορετικές αποστάσεις στον ίδιο χρόνο  $T=32\text{sec}$ . Στην πρώτη περίπτωση διανύει μόλις 70cm ενώ στην δεύτερη αντίστοιχα 182cm. Αυτό είναι αποτέλεσμα, τόσο της διαφοράς ύψους, όσο και του χαλικώδους πυθμένα, ο οποίος «δυσκολεύει» το ρεύμα να κινηθεί.



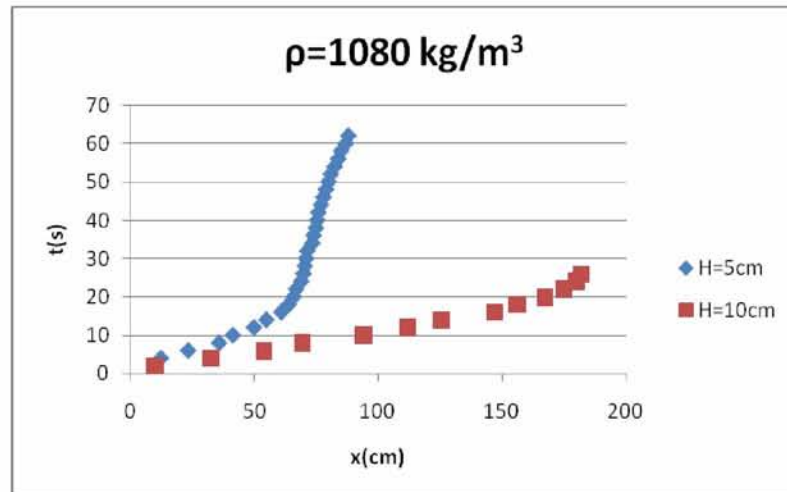
Διάγραμμα 4.1.16 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=5\text{cm}$  και  $H=10\text{cm}$

Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ρεύμα, στο πρώτο ύψος, διανύει απόσταση 72cm σε χρόνο  $T=28\text{sec}$  ενώ στο δεύτερο ύψος αντίστοιχα απόσταση 182cm σε χρόνο  $T=34\text{sec}$ .



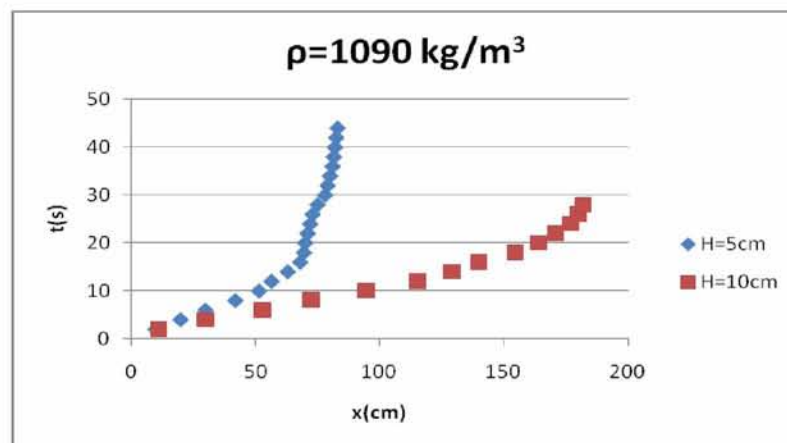
Διάγραμμα 4.1.17 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=5\text{cm}$  και  $H=10\text{cm}$

Στο διάγραμμα αυτό το ρεύμα στο πρώτο ύψος διανύει απόσταση 72cm σε χρόνο  $T=34\text{sec}$ , σε αντίθεση με το δεύτερο ύψος όπου σε μόλις 2sec λιγότερα, δηλαδή  $T=32\text{sec}$ , έχει διανύσει απόσταση 182cm.



Διάγραμμα 4.1.18 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=5\text{cm}$  και  $H=10\text{cm}$

Από το διάγραμμα αυτό είναι εμφανές ότι στο πρώτο πείραμα το ρεύμα καλύπτει απόσταση 88cm σε χρόνο  $T=62\text{sec}$ , το οποίο έρχεται σε μεγάλη αντίθεση με το δεύτερο πείραμα όπου διανύει απόσταση 182cm σε χρόνο  $T=26\text{sec}$ . Επομένως, ο χαλικώδης πυθμένας σε συνδυασμό με το χαμηλό ύψος καθυστερεί ιδιαίτερα το ρεύμα με αποτέλεσμα να διανύει σχεδόν την μισή απόσταση σε παραπάνω από τον διπλάσιο χρόνο.



Διάγραμμα 4.1.19 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=5\text{cm}$  και  $H=10\text{cm}$

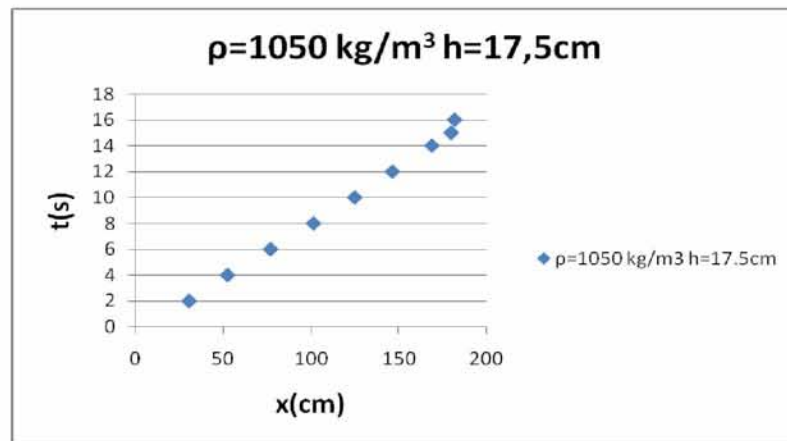
Παρομοίως και σε αυτό το διάγραμμα, στο μικρότερο ύψος το ρεύμα διανύει απόσταση 83cm σε χρόνο  $T=44\text{sec}$ , εν αντιθέσει με το μεγαλύτερο ύψος όπου διανύει απόσταση 182cm σε χρόνο  $T=28\text{sec}$ .



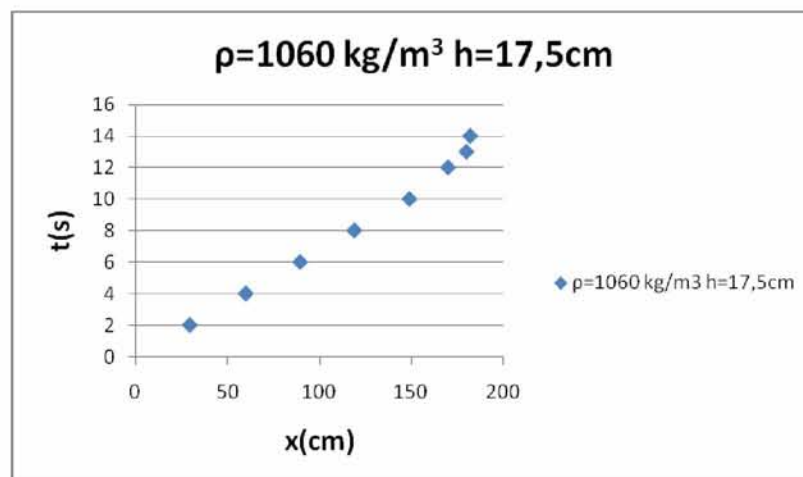
## 4.2 Ρεύματα βαρύτητας στην σύνθετη διατομή

Η σύνθετη διατομή περιλαμβάνει τα ύψη  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$ . Σε κάθε ύψος πραγματοποιήθηκαν πέντε ξεχωριστά πειράματα για τις πέντε διαφορετικές πυκνότητες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της κάθε πυκνότητας ξεχωριστά στο εκάστοτε ύψος αλλά και συνολικά διαγράμματα με όλες τις πυκνότητες μαζί.

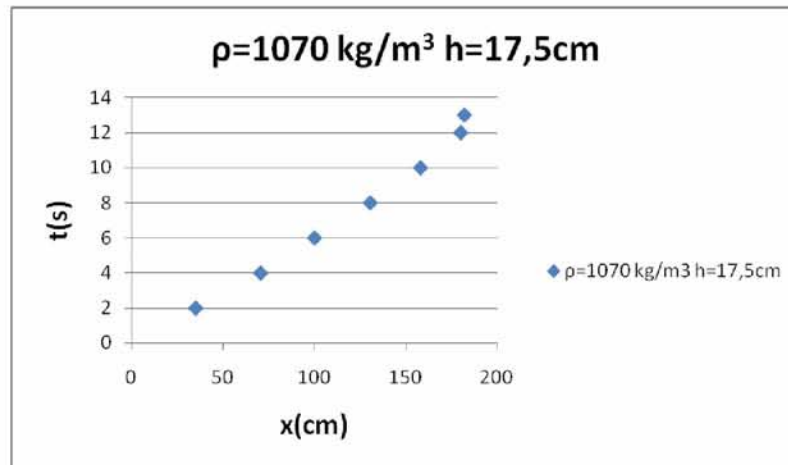
Στο τρίτο σετ πειραμάτων με  $H=17.5\text{m}$  προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



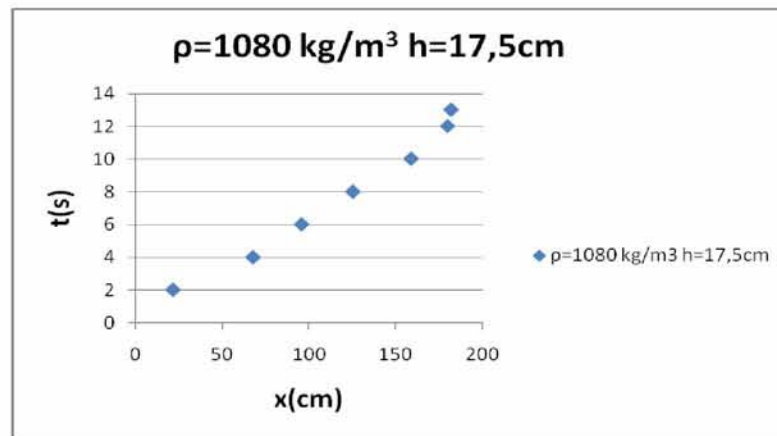
Διάγραμμα 4.2.1 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=17.5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



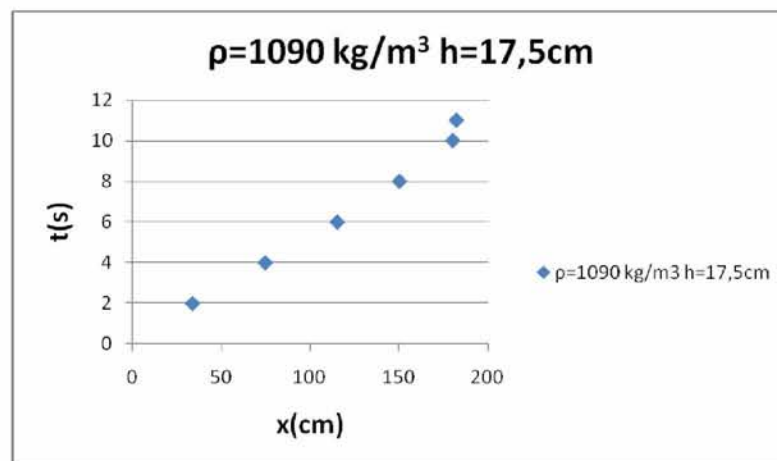
Διάγραμμα 4.2.2 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=17.5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1060\text{ kg/m}^3$



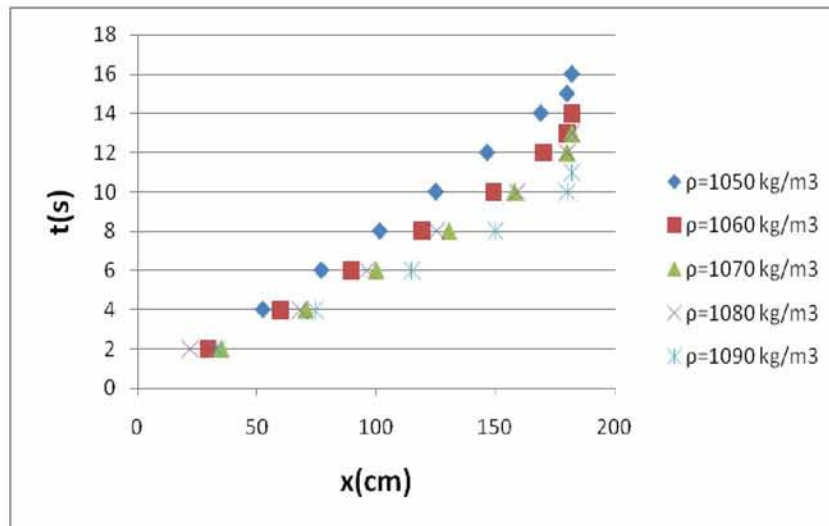
Διάγραμμα 4.2.3 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=17.5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.2.4 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=17.5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



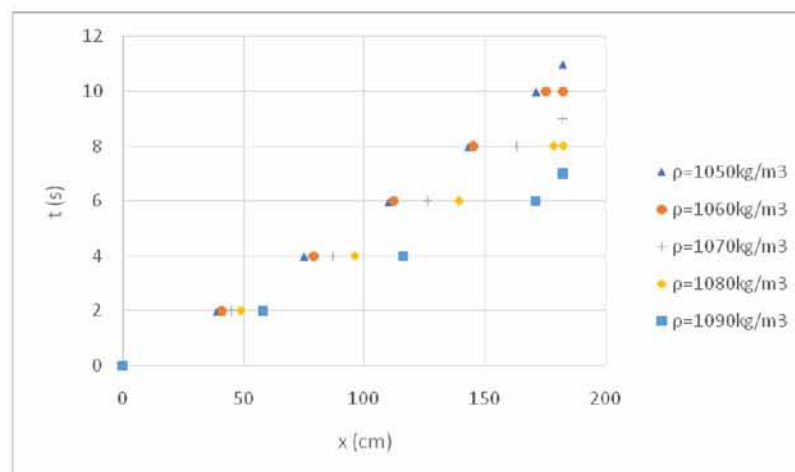
Διάγραμμα 4.2.5 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=17.5\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.2.6 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=17.5\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα, σε αυτό το ύψος όλα τα ρεύματα διανύουν ολόκληρο το μήκος της δεξαμενής, δηλαδή και τα 182cm. Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=50\%$  χρειάζεται  $T=16\text{sec}$ , ενώ το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=60\%$  χρειάζεται  $T=14\text{sec}$ . Τα ρεύματα με  $\Delta\rho/\rho_v=70\%$  και  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  καλύπτουν την απόσταση αυτή στον ίδιο χρόνο  $T=13\text{sec}$ . Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  καταναλώνει τον λιγότερο χρόνο από όλα τα υπόλοιπα με  $T=11\text{sec}$ . Επομένως σε αυτό το ύψος και με το χαλικώδη πυθμένα το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας φτάνει πιο γρήγορα στο πέρας της δεξαμενής.

Στα αντίστοιχα πειράματα που διεξήχθησαν στην ίδια δεξαμενή χωρίς την παρουσία χαλικώδους πυθμένα (Βαρδακώστας, Κεμεντσετσίδης, 2019) προέκυψε το εξής διάγραμμα για όλες τις πυκνότητες μαζί.



Διάγραμμα 4.2.7 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=17.5\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλικώδη πυθμένα

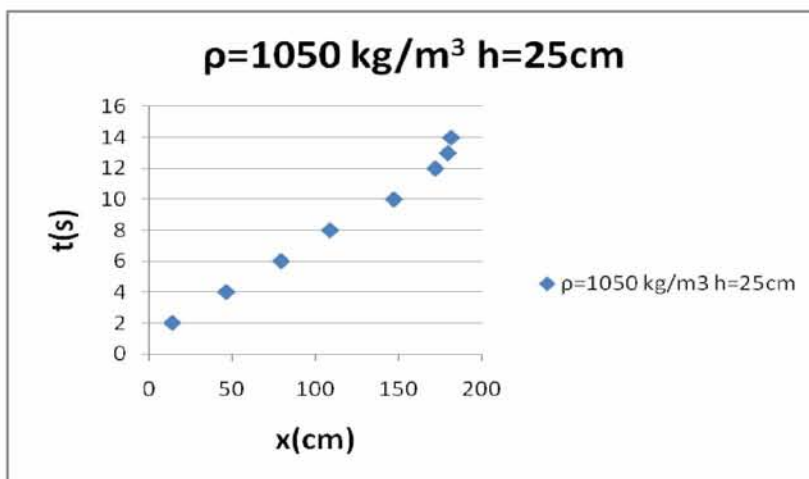
Με σύγκριση των δύο διαγραμμάτων, γίνεται αντιληπτή η σημαντική επιρροή του χαλικώδους πυθμένα στην πορεία και διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Στο δεύτερο διάγραμ-



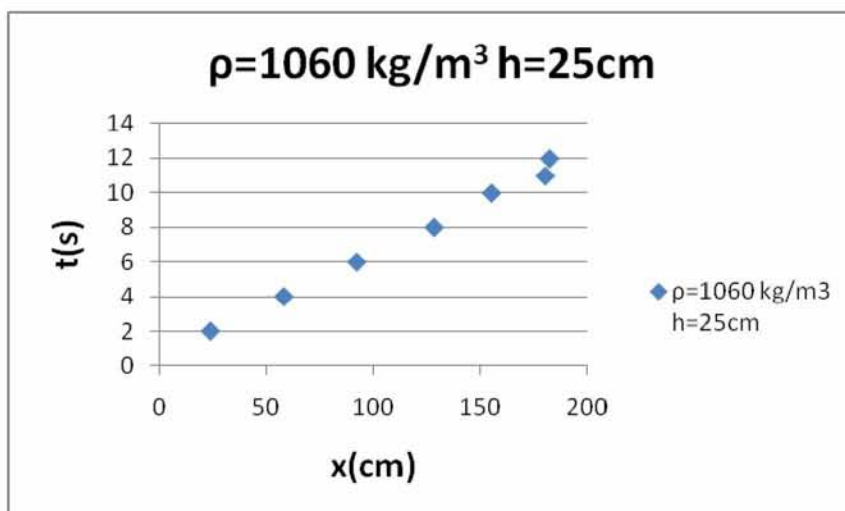


μα η διάδοση γίνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα όπου το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  να φτάνει στο πέρας σε μόλις  $T=7\text{sec}$ , εν αντιθέσει με το πρώτο διάγραμμα όπου θέλει  $T=11\text{sec}$ .

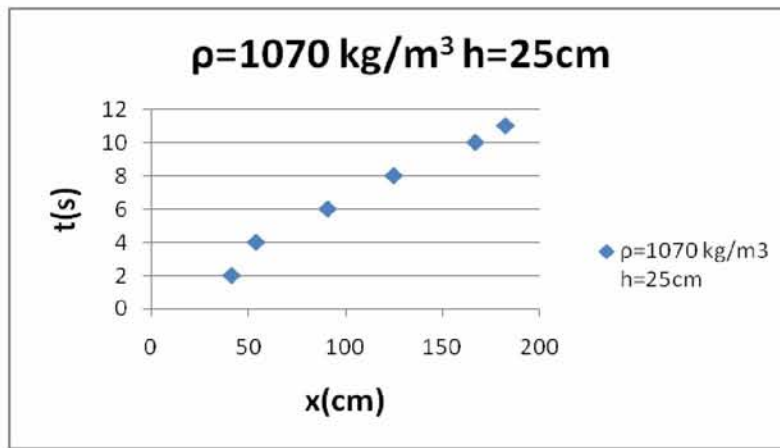
Στο τέταρτο και τελευταίο σετ πειραμάτων με  $H=25\text{cm}$  προκύπτουν τα εξής διαγράμματα:



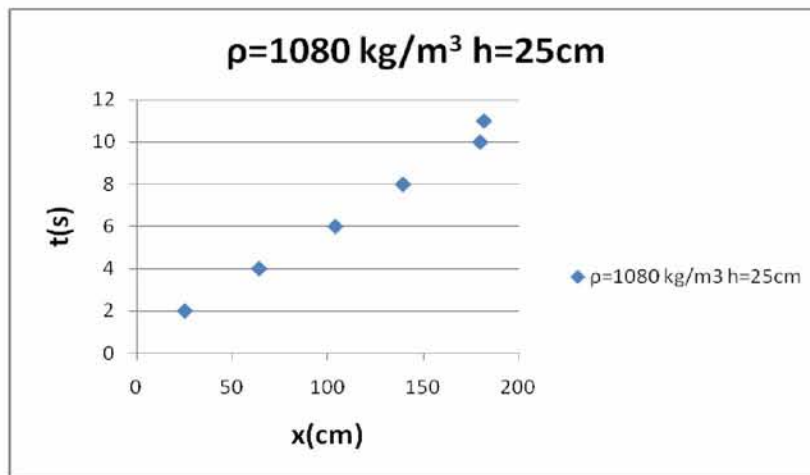
Διάγραμμα 4.2.8 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=25\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



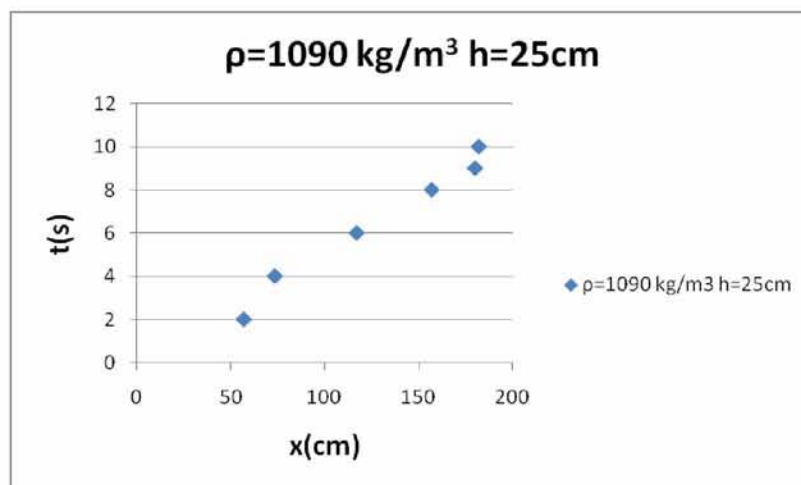
Διάγραμμα 4.2.9 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=25\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1060\text{ kg/m}^3$



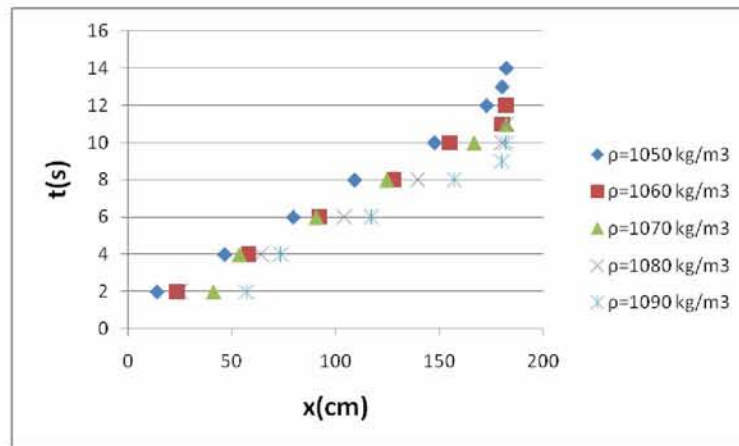
Διάγραμμα 4.2.10 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=25\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.2.11 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=25\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



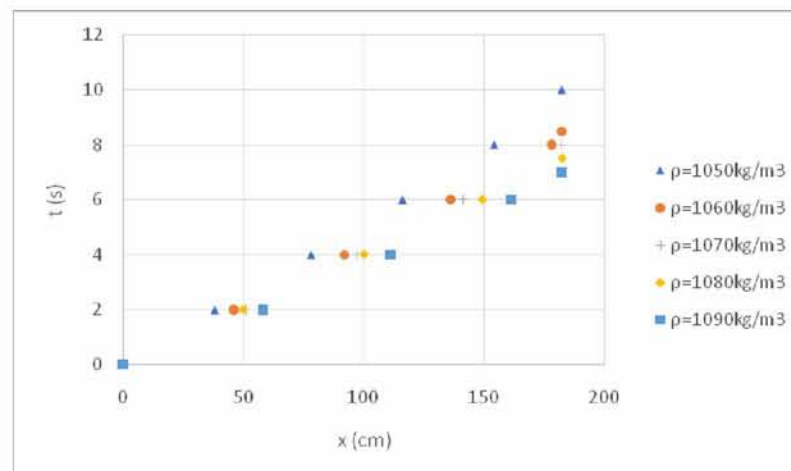
Διάγραμμα 4.2.12 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=25\text{cm}$  με πυκνότητα  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$



Διάγραμμα 4.2.13 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=25\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω διαγράμματα, σε αυτό το ύψος όλα τα ρεύματα διανύουν ολόκληρο το μήκος της δεξαμενής, δηλαδή και τα 182cm. Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=50\%$  χρειάζεται  $T=14\text{sec}$ , ενώ το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=60\%$  χρειάζεται  $T=12\text{sec}$ . Τα ρεύματα με  $\Delta\rho/\rho_v=70\%$  και  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  καλύπτουν την απόσταση αυτή στον ίδιο χρόνο  $T=11\text{sec}$ , όπως και στο προηγούμενο ύψος. Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  καταναλώνει τον λιγότερο χρόνο από όλα τα υπόλοιπα με  $T=10\text{sec}$ . Επομένως σε αυτό το ύψος και με το χαλικώδη πυθμένα το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας φτάνει πιο γρήγορα στο πέρας της δεξαμενής. Είναι εμφανές ότι σε αυτό το ύψος που είναι το μεγαλύτερο, ο χρόνος μετάβασης των ρευμάτων βαρύτητας είναι ο μικρότερος από όλα τα υπόλοιπα ύψη.

Στα αντίστοιχα πειράματα που διεξήχθησαν στην ίδια δεξαμενή χωρίς την παρουσία χαλικώδους πυθμένα (Βαρδακώστας, Κεμεντσετσίδης, 2019) προέκυψε το εξής διάγραμμα για όλες τις πυκνότητες μαζί.

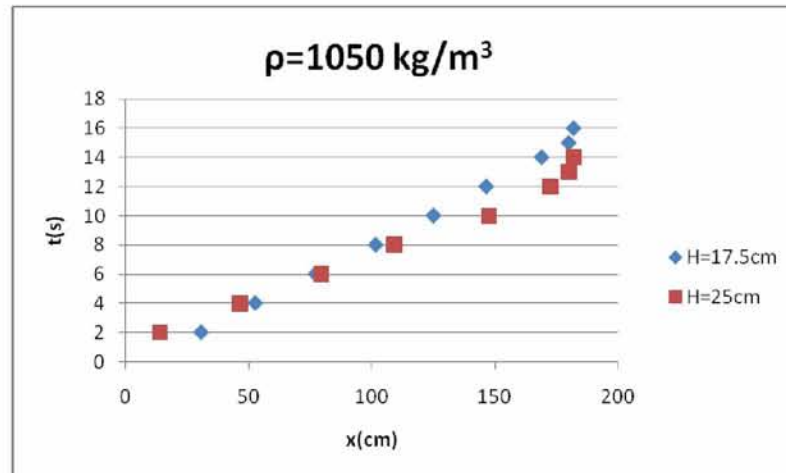


Διάγραμμα 4.2.14 Χρονική εξέλιξη ρεύματος σε σύνθετη διατομή σε ύψος  $H=25\text{cm}$  για όλες τις πυκνότητες μαζί χωρίς χαλικώδη πυθμένα



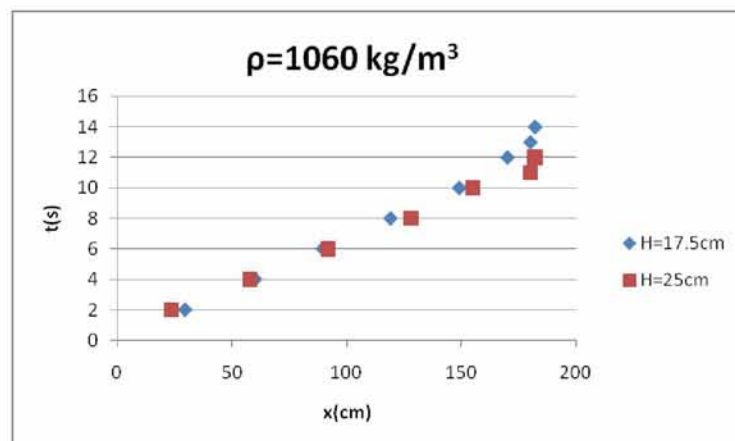
Με σύγκριση των δύο διαγραμμάτων, γίνεται αντιληπτή η σημαντική επιρροή του χαλικώδους πυθμένα στην πορεία και διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Στο δεύτερο διάγραμμα η διάδοση γίνεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα, όπου το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  να φτάνει στο πέρας σε μόλις  $T=7\text{sec}$ , εν αντιθέσει με το πρώτο διάγραμμα όπου θέλει  $T=10\text{sec}$ .

Για να διαπιστώσουμε τον ρόλο που διαδραματίζει το αρχικό ύψος των ρευμάτων βαρύτητας στην διάδοσή τους, σχεδιάστηκαν τα παρακάτω συνδυαστικά διαγράμματα.



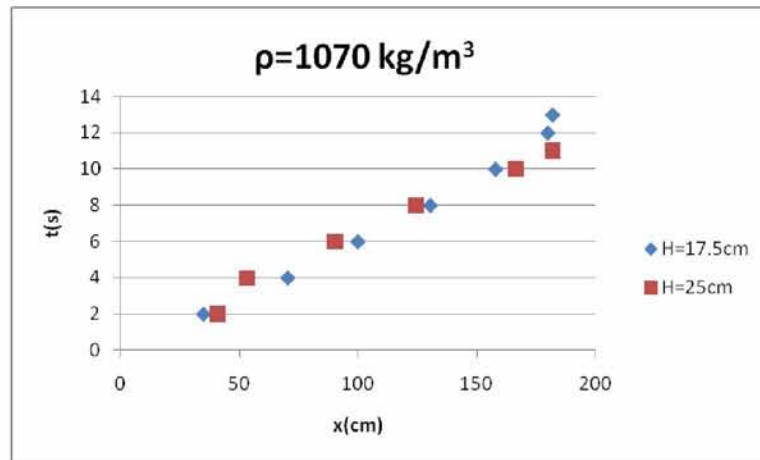
Διάγραμμα 4.2.15 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1050\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$

Στο διάγραμμα αυτό παρατηρείται ότι το ρεύμα βαρύτητας, και στα δύο ύψη, διανύει ολόκληρη την απόσταση αλλά σε διαφορετικούς χρόνους. Στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος που χρειάζεται είναι  $T=16\text{sec}$ , ενώ στην δεύτερη αντίστοιχα ο χρόνος είναι  $T=14\text{sec}$ . Αυτό είναι αποτέλεσμα, τόσο της διαφοράς ύψους, όσο και του χαλικώδους πυθμένα, ο οποίος «δυσκολεύει» το ρεύμα να κινηθεί.

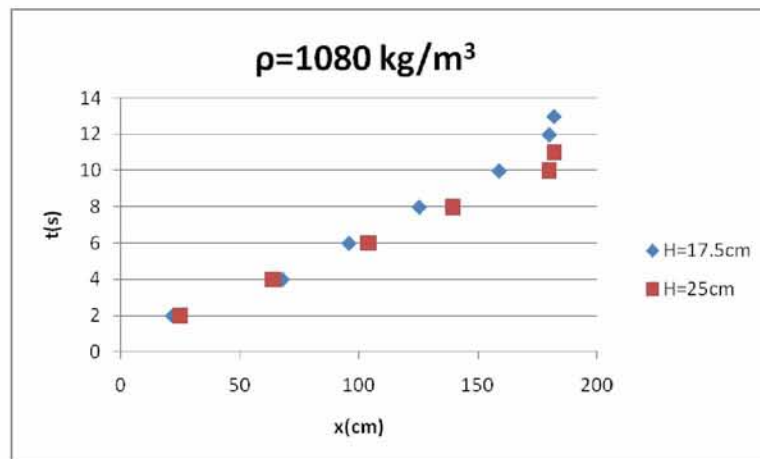


Διάγραμμα 4.2.16 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1060\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$

Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρούμε ότι το ρεύμα και στα δύο ύψη διανύει ολόκληρη την απόσταση. Στο πρώτο ύψος την καλύπτει σε χρόνο  $T=14\text{sec}$ , ενώ στο δεύτερο σε χρόνο  $T=12\text{sec}$ .

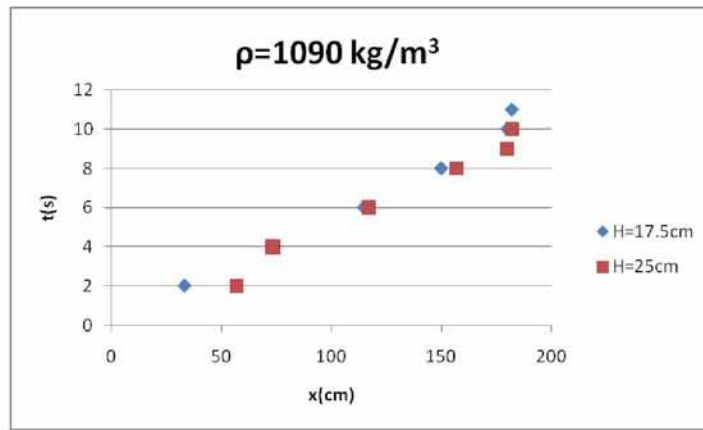


Διάγραμμα 4.2.17 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1070\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$



Διάγραμμα 4.2.18 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1080\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$

Σε αυτά τα διαγράμματα το ρεύμα έχει ακριβώς την ίδια συμπεριφορά και στα δύο ύψη. Παρατηρούμε ότι διανύει ολόκληρη την απόσταση, στο πρώτο ύψος σε χρόνο  $T=13\text{sec}$ , ενώ στο δεύτερο σε χρόνο  $T=11\text{sec}$ .



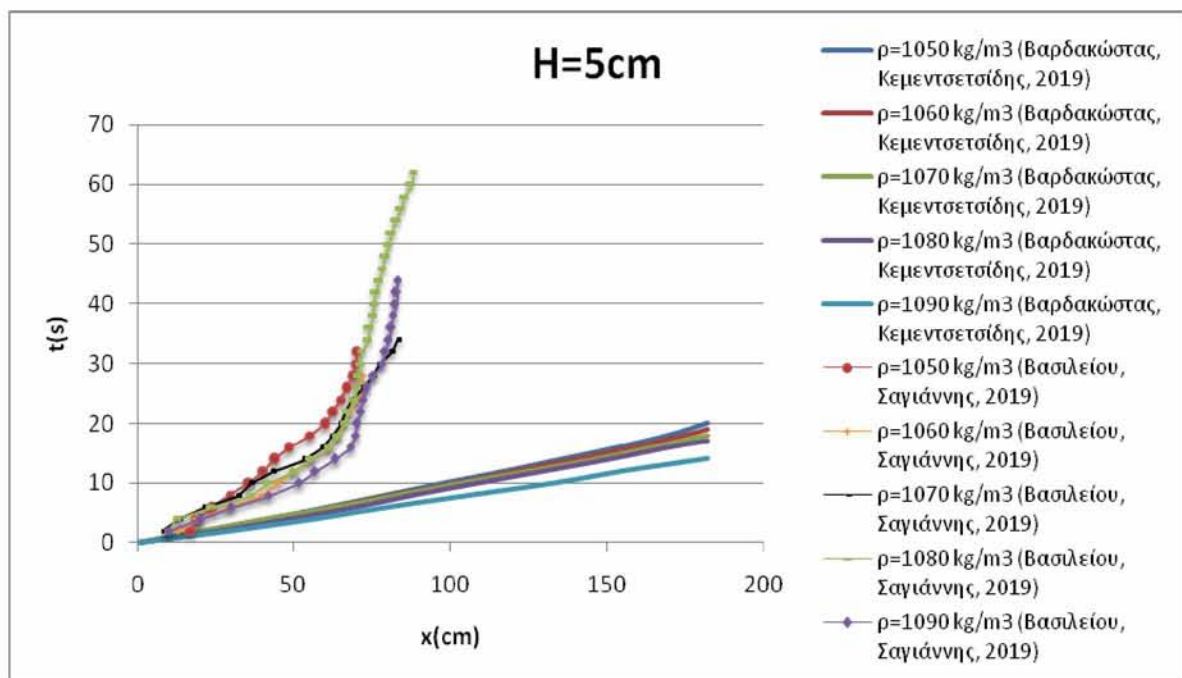
Διάγραμμα 4.2.19 Ρεύμα πυκνότητας  $\rho=1090\text{kg/m}^3$  σε αρχικά ύψη  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$

Σε αυτό το διάγραμμα παρατηρείται ότι το ρεύμα και στα δύο ύψη διανύει ολόκληρη την απόσταση. Στο πρώτο ύψος την καλύπτει σε χρόνο  $T=11\text{sec}$ , ενώ στο δεύτερο σε χρόνο  $T=10\text{sec}$ .

### 4.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με πειράματα χωρίς χαλικώδη πυθμένα

Στο υποκεφάλαιο αυτό, θα συγκριθούν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας σε κάθε ύψος με τα αποτελέσματα των πειραμάτων χωρίς χαλικώδη πυθμένα (Βαρδακώστας και Κεμεντσεσίδης, 2019).

- Για το ύψος  $H=5\text{cm}$ :

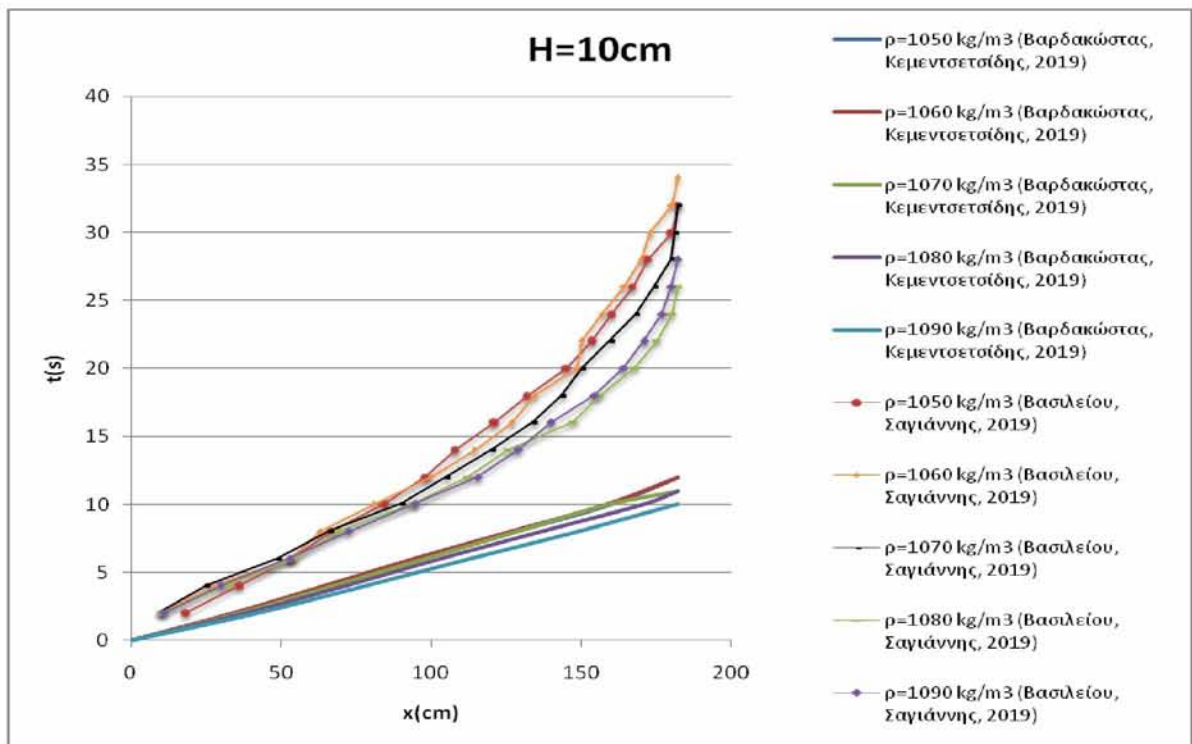


Διάγραμμα 4.3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος  $H=5\text{cm}$



Από το διάγραμμα είναι φανερή η διαφορά στα αποτελέσματα των πειραμάτων. Στα αποτελέσματα των Βαρδακώστα και Κεμεντσετσίδη (2019) υπάρχει γραμμικότητα και ομοιομορφία και παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη η διαφορά της πυκνότητας τόσο μικρότερος ο χρόνος  $t$  που χρειάζεται κάθε ρεύμα έως το πέρας της δεξαμενής. Σε αντίθεση, στα αποτελέσματα του χαλικώδους πυθμένα δεν υπάρχει γραμμικότητα, τα ρεύματα δεν διανύουν ολόκληρη την απόσταση μέχρι το πέρας της δεξαμενής και επιπλέον δεν ισχύει η αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ διαφοράς πυκνότητας και χρόνου.

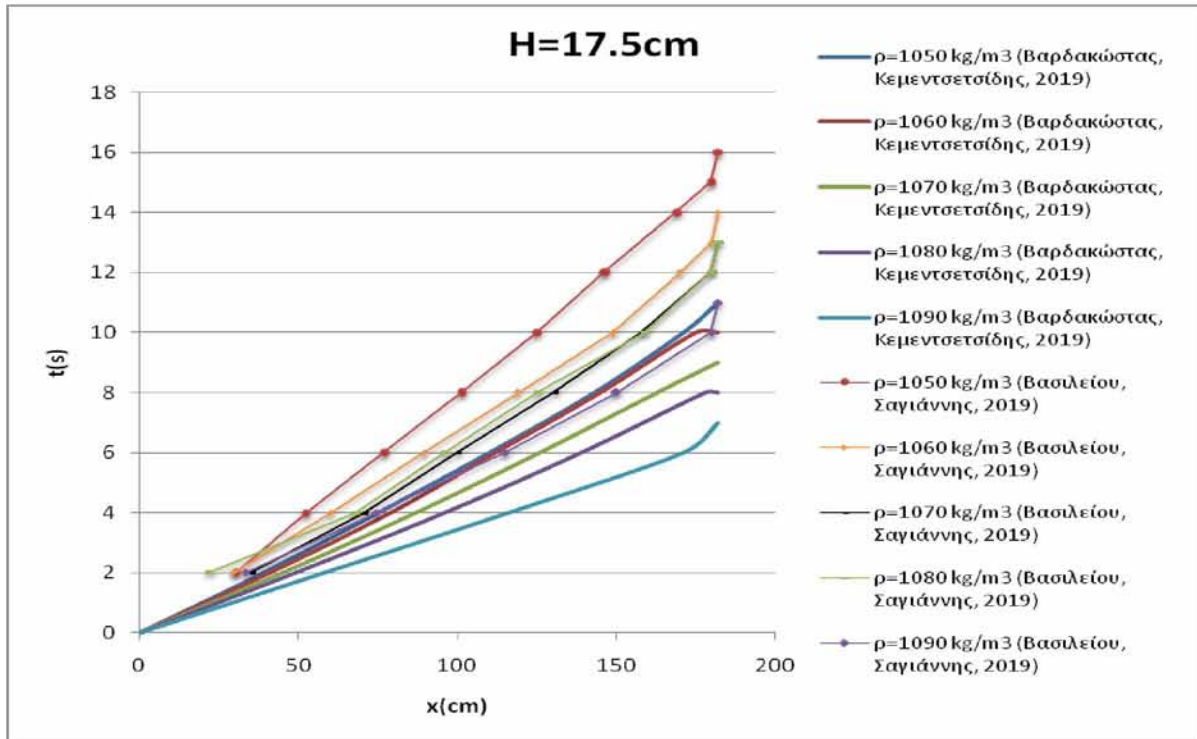
- Για το ύψος  $H=10\text{cm}$ :



Διάγραμμα 4.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος  $H=10\text{cm}$

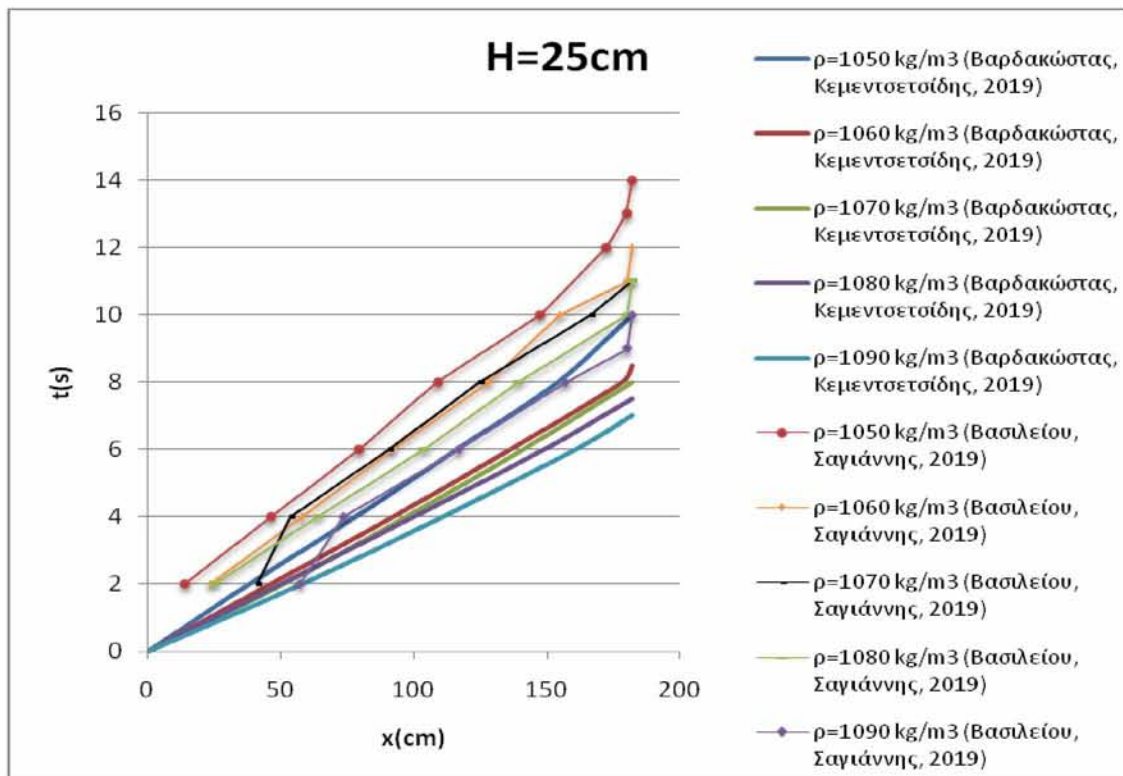
Τα ρεύματα βαρύτητας, και στις δύο περιπτώσεις, διανύουν ολόκληρη την απόσταση μέχρι το πέρας της δεξαμενής όμως οι χρόνοι διαδρομής διαφέρουν αισθητά. Χωρίς χαλικώδη πυθμένα, τα ρεύματα χρειάζονται έως και 12sec για να καλύψουν την απόσταση, ενώ με χαλικώδη πυθμένα χρειάζονται έως και 34sec.

- Για το ύψος  $H=17.5\text{cm}$ :



Διάγραμμα 4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος  $H=17.5\text{cm}$

- Για το ύψος  $H=25\text{cm}$ :



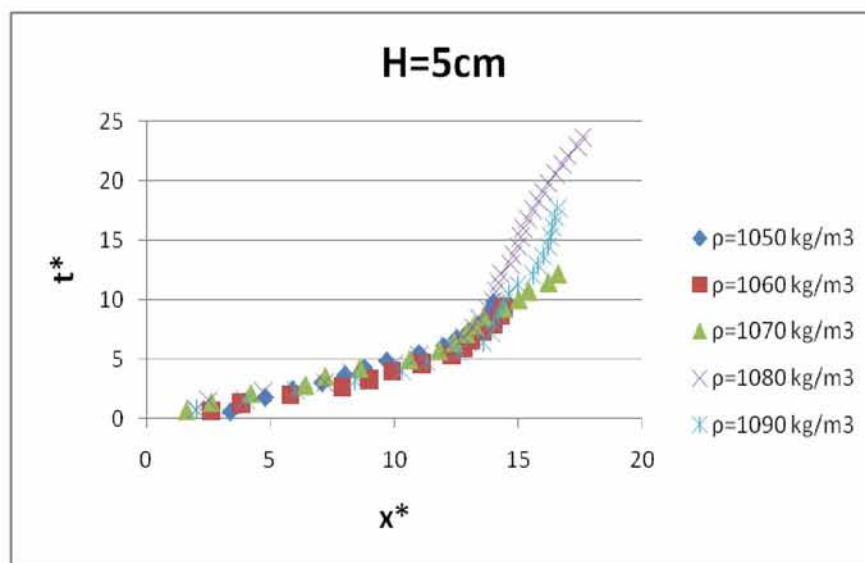
Διάγραμμα 4.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων για το ύψος  $H=25\text{cm}$

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται μια σύγκλιση στα αποτελέσματα. Το ρεύμα με την μικρότερη διαφορά πυκνότητας των πειραμάτων χωρίς χαλικώδη πυθμένα διανύει την ίδια απόσταση στον ίδιο χρόνο με το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας των πειραμάτων με χαλικώδη πυθμένα. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι το ύψος διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διάδοση του ρεύματος.

#### 4.4 Αδιαστατοποιημένα διαγράμματα σύνθετης και τραπεζοειδούς διατομής

Στα παρακάτω διαγράμματα 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 αντίστοιχα ο χρόνος  $t$  μέσω του τύπου  $t^* = t \sqrt{\frac{g(1-\gamma)}{H}}$ , όπου  $\gamma = \frac{\rho_w}{\rho_{sw}}$ .

- Για το ύψος  $H=5\text{cm}$  :

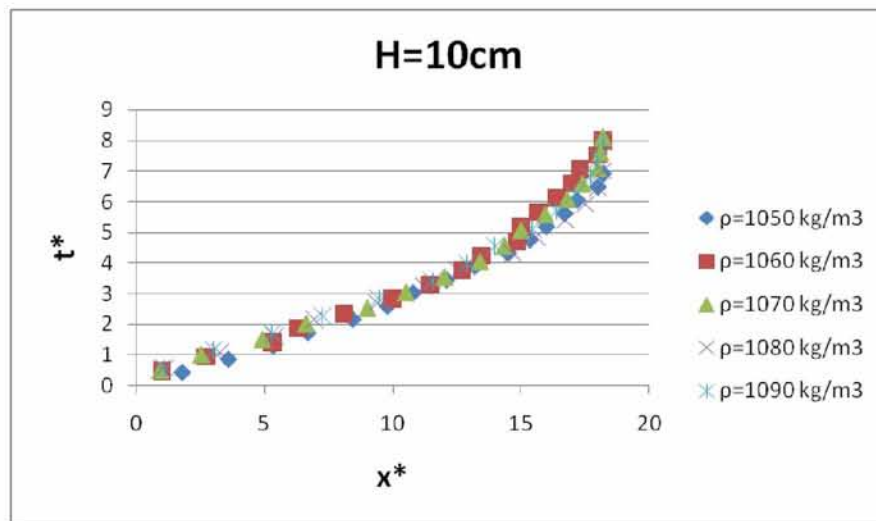


Διάγραμμα 4.4.1 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για  $H=5\text{cm}$

Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  διανύει την μεγαλύτερη απόσταση στον μεγαλύτερο χρόνο. Την μικρότερη απόσταση την διανύει το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ . Επίσης τα ρεύματα με  $\Delta\rho/\rho_v=70\%$  και  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  καλύπτουν την ίδια ακριβώς απόσταση με το πρώτο ρεύμα όμως να την καλύπτει σε μικρότερο χρονικό διάστημα.



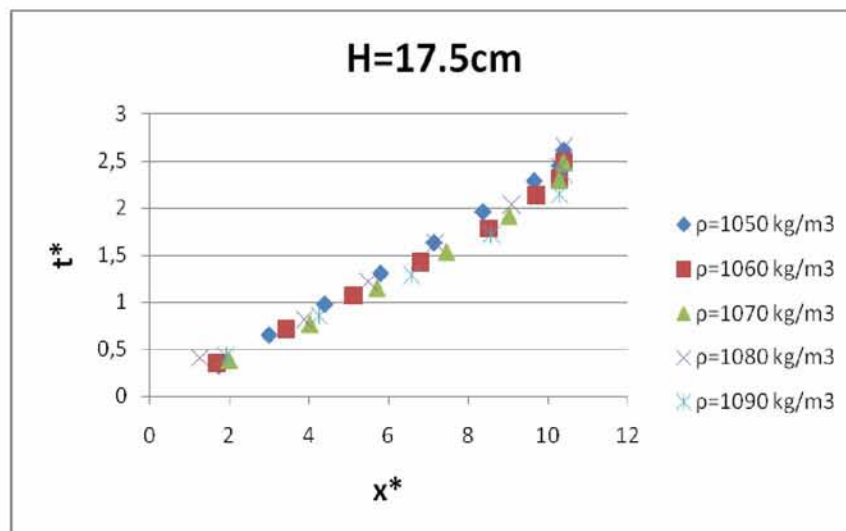
- Για το ύψος  $H=10\text{cm}$  :



Διάγραμμα 4.4.2 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για  $H=10\text{cm}$

Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα, όλα τα ρεύματα καλύπτουν την ίδια απόσταση. Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho\nu=50\%$  την διανύει στον μικρότερο χρόνο.

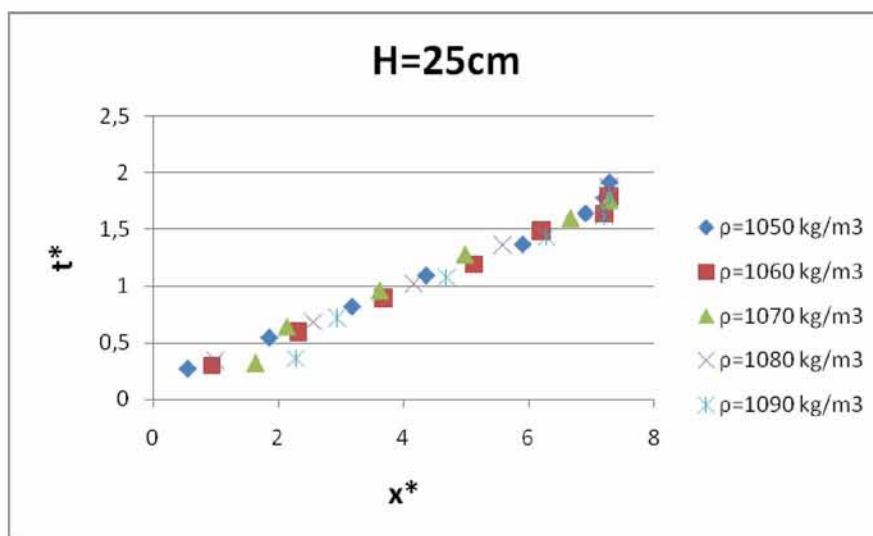
- Για το ύψος  $H=17.5\text{cm}$  :



Διάγραμμα 4.4.3 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για  $H=17.5\text{cm}$

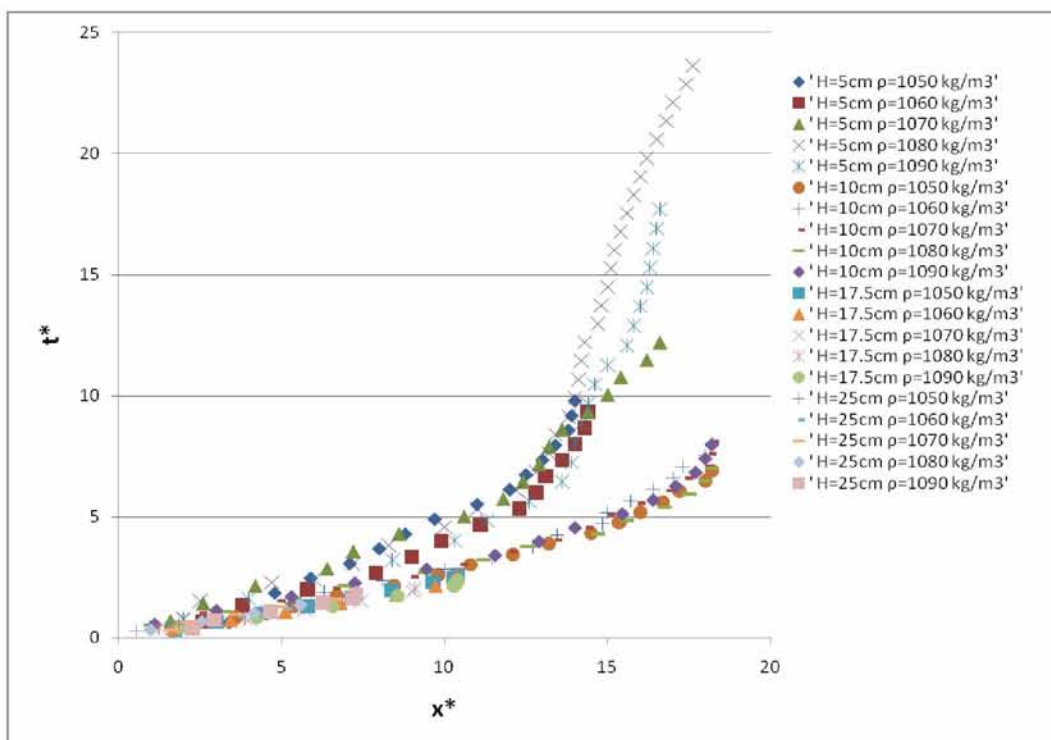
Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα, όλα τα ρεύματα καλύπτουν την ίδια απόσταση. Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho\nu=90\%$  την διανύει στον μικρότερο χρόνο.

- Για το ύψος  $H=25\text{cm}$  :



Διάγραμμα 4.4.4 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για  $H=25\text{cm}$

Όπως είναι εμφανές από το διάγραμμα, όλα τα ρεύματα καλύπτουν την ίδια απόσταση. Το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho=70\%$  την διανύει στον μικρότερο χρόνο.

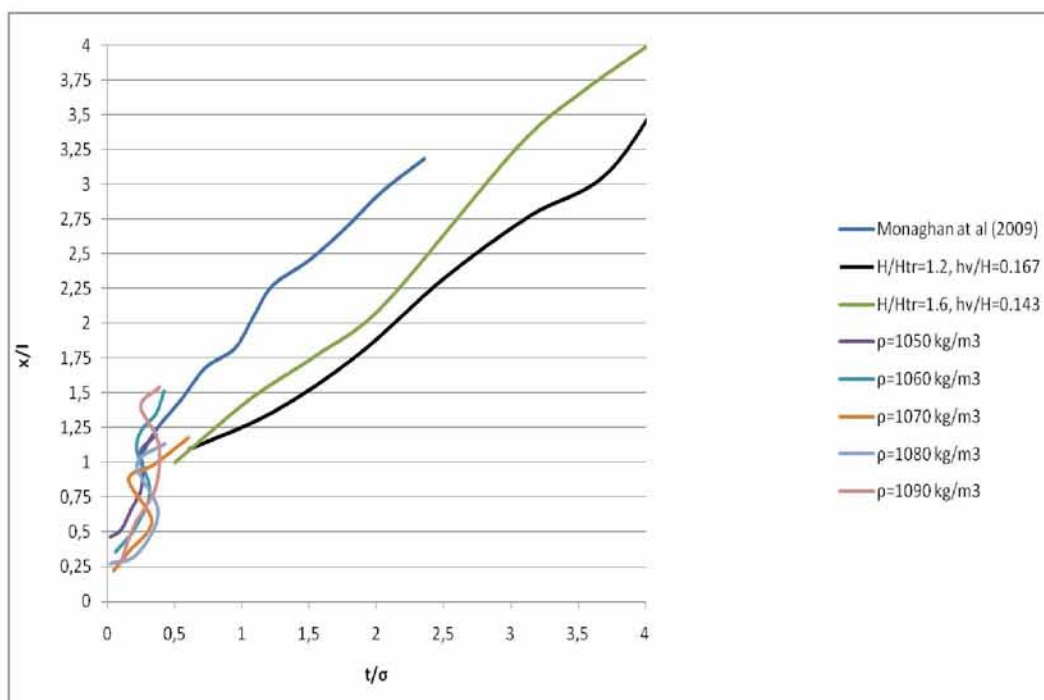


Διάγραμμα 4.4.5 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή για όλα τα ύψη και όλες τις πυκνότητες

Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι τα ρεύματα με τη μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας κινούνται ταχύτερα από τα υπόλοιπα. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν το αρχικό υψόμετρο αλλά και ο χαλικώδης πυθμένας.

Στη συνέχεια, απεικονίζονται οι αποστάσεις  $x$ , οι οποίες αδιαστατοποιούνται με την παράμετρο  $l$  και οι χρόνοι  $t$ , οι οποίοι αδιαστατοποιούνται με την παράμετρο  $\sigma$ . Η παράμετρος  $l$  είναι ίση με  $l = \frac{2 \cdot V}{a \cdot w}$ , όπου  $V = L_1 \cdot w \cdot (H_0 + \frac{1}{2} \cdot a)$  ( $L_1$ = απόσταση μεταξύ θυροφράγματος και υπόλοιπης δεξαμενής,  $w$  = πλάτος ρεύματος,  $H_0$  = ύψος του νερού over the valley,  $a$  = βάθος). Η παράμετρος  $\sigma$  είναι ίση με  $\sigma = \frac{1}{Fr} \cdot \sqrt{\frac{2}{a \cdot g'}}$ , όπου  $Fr = \frac{u}{\sqrt{h \cdot g'}}$  ( $u$ = ταχύτητα,  $h$  = ύψος του ρεύματος και  $g' = g \cdot \frac{\rho_{sw} - \rho_w}{\rho_{sw}}$  με  $g=9.81 \text{ m/s}^2$ ). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αποτελέσματα πειραμάτων σε δεξαμενή ίδιας διατομής χωρίς χαλικώδη πυθμένα από τους Monaghan et al. (2009a, 2009b) και Keramaris and Prinos (2010).

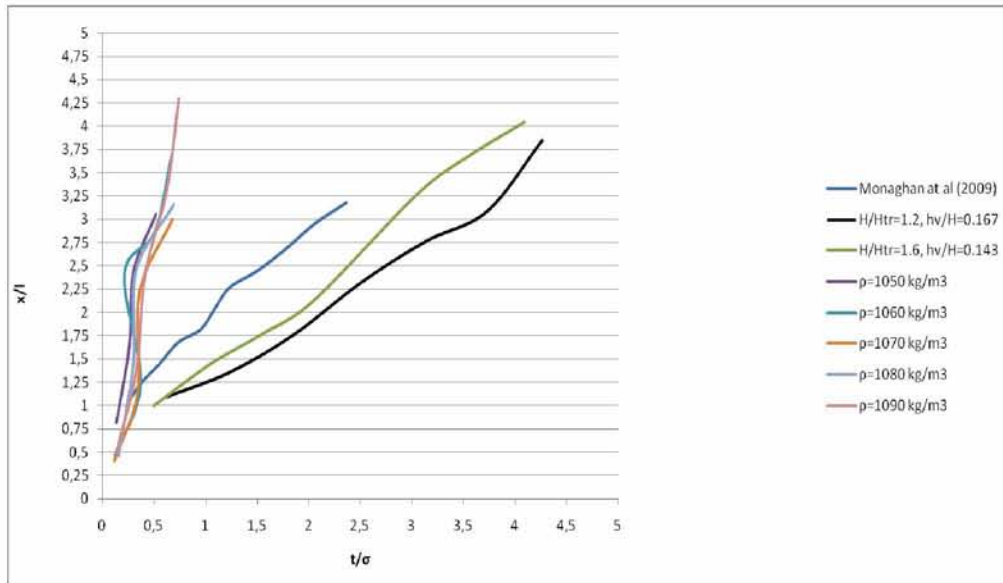
- Για το ύψος  $H=5\text{cm}$  :



Διάγραμμα 4.4.6 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για  $H=5\text{cm}$



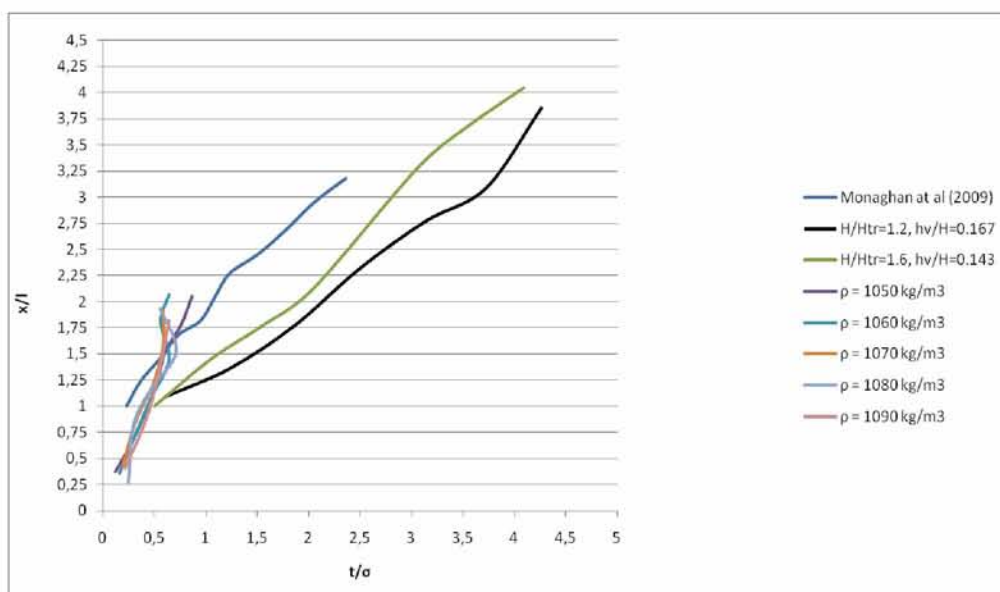
- Για το ύψος  $H=10\text{cm}$  :



Διάγραμμα 4.4.7 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για  $H=10\text{cm}$

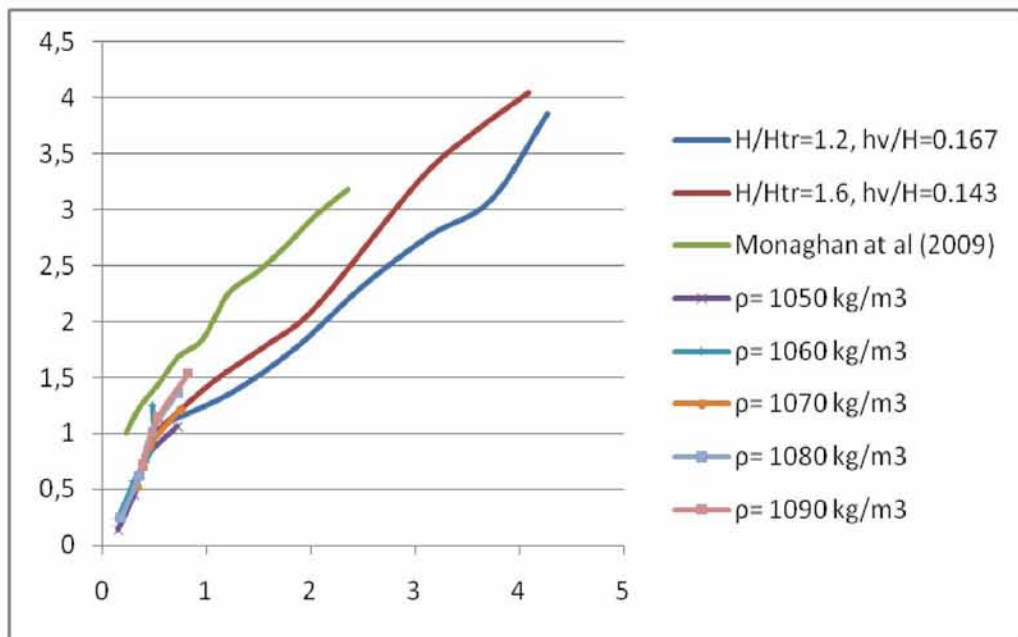
Από τα διαγράμματα είναι φανερό ότι στα χαμηλά ύψη δεν υπάρχει καμία σύγκλιση στα αποτελέσματα. Αρχικά, στο ύψος  $H=5\text{cm}$  παρατηρείται μια έντονη μη γραμμικότητα στα αποτελέσματα του χαλικώδους πυθμένα, η οποία δεν έρχεται σε καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Monaghan et al. (2009a, 2009b) και Keramaris and Prinos (2010), ενώ στο ύψος  $H=10\text{cm}$  παρατηρείται αξιοσημείωτη διαφορά στην κλίση των καμπυλών. Αυτά τα γεγονότα οφείλονται στο γεγονός ότι για μικρά ύψη (5 ή 10 cm) το μέτωπο του κύματος δεν ολοκληρώνει την κίνησή του αλλά σταματάει περίπου στο μέσον της δεξαμενής.

- Για το ύψος  $H=17.5\text{cm}$  :



Διάγραμμα 4.4.8 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για  $H=17.5\text{cm}$

- Για το ύψος  $H=25\text{cm}$  :



Διάγραμμα 4.4.9 Χρονική εξέλιξη ρεύματος βαρύτητας σε αδιαστατοποιημένη μορφή με παραμέτρους για  $H=25\text{cm}$

Στα μεγαλύτερα ύψη τα αποτελέσματα του χαλικώδους πυθμένα συγκλίνουν σε κάποια σημεία υπάρχει καλή συμφωνία με τα αποτελέσματα των Monaghan et al. (2009a, 2009b) και Keramaris and Prinos (2010). Λόγω του ύψους και της διατομής της δεξαμενής, έχουν απαλειφθεί η έντονη μη γραμμικότητα και οι απότομες κλίσεις.



## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δεξαμενή σύνθετης διατομής με θυρόφραγμα, η οποία ήταν ορθογωνικής διατομής στο άνω τμήμα της και τραπεζοειδής με χαλίκια στο κάτω. Σκοπός της εργασίας ήταν να μελετηθεί η επίδραση της αντίστασης του στρώματος χαλικιών στα ρεύματα βαρύτητας. Το θυρόφραγμα διαχωρίζει το αλατόνερο από το καθαρό νερό, το οποίο βρίσκεται στο μέρος της δεξαμενής με το στρώμα χαλικιών. Το καθαρό νερό έχει πυκνότητα  $1000 \text{ kg/m}^3$ , σε αντίθεση με το αλατόνερο το οποίο σε κάθε σετ πειραμάτων έχει αντίστοιχες πυκνότητες  $1050 \text{ kg/m}^3$ ,  $1060 \text{ kg/m}^3$ ,  $1070 \text{ kg/m}^3$ ,  $1080 \text{ kg/m}^3$  και  $1090 \text{ kg/m}^3$ , οι οποίες προσομοιώνουν πυκνότητες υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον.

Το βασικό και πιο σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα πειράματα είναι ότι το σχήμα της δεξαμενής διαδραματίζει κυρίαρχο ρόλο στην διάδοση των ρευμάτων βαρύτητας. Ειδικότερα, η τραπεζοειδής διατομή στο κάτω τμήμα της σύνθετης διατομής αυξάνει την ταχύτητα των ρευμάτων σε σύγκριση με την ορθογωνική στο πάνω τμήμα. Επιπλέον τα χαλίκια καθυστερούν τη διάδοση των ρευμάτων επηρεάζοντας εμφανώς την ταχύτητα τους και παράλληλα σε συνδυασμό με χαμηλά ύψη επηρεάζουν ιδιαίτερα και την απόσταση που διανύουν.

Πιο συγκεκριμένα, ο χαλικώδης πυθμένας έχει μεγαλύτερη επιρροή σε συνδυασμό με το χαμηλότερο ύψος  $H=5\text{cm}$  όπου το ρεύμα διανύει σχεδόν την μισή δεξαμενή μέχρι να σταματήσει. Απεναντίας, σύμφωνα με τα πειράματα στη δεξαμενή χωρίς χαλικώδη πυθμένα (Βαρδακώστας, Κεμεντσετσίδης, 2019), το ρεύμα διανύει ολόκληρη την απόσταση μέχρι το πέρας στο μισό χρόνο από τον χρόνο που χρειάζεται στον χαλικώδη πυθμένα για να διανύσει την μισή διαδρομή.

Τα ρεύματα με τις μεγαλύτερες διαφορές πυκνότητας φτάνουν γρηγορότερα σε σχέση με τα υπόλοιπα. Πιο συγκεκριμένα στο μικρότερο ύψος  $H=5\text{cm}$  το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=80\%$  διανύει την μεγαλύτερη απόσταση όπως και το ύψος  $H=10\text{cm}$  όπου καλύπτει την ίδια απόσταση με τα υπόλοιπα ρεύματα αλλά στον μικρότερο χρόνο. Ωστόσο στα δύο μεγαλύτερα ύψη  $H=17.5\text{cm}$  και  $H=25\text{cm}$  όπου όλα τα ρεύματα καλύπτουν και τα  $182\text{cm}$  της δεξαμενής, το ρεύμα με  $\Delta\rho/\rho_v=90\%$  καταναλώνει τον μικρότερο χρόνο.

Άλλο ένα συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το ρεύμα με την μεγαλύτερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho/\rho_v=90\%$ ) στο μεγαλύτερο ύψος ( $H=25\text{cm}$ ) είναι πιο γρήγορο από όλα τα ρεύματα βαρύτητας από όλα τα ύψη και από όλες τις διαφορές πυκνότητας. Παράλληλα το ρεύμα με την μικρότερη διαφορά πυκνότητας ( $\Delta\rho/\rho_v=50\%$ ) στο μικρότερο ύψος ( $H=5\text{cm}$ ) διανύει την μικρότερη απόσταση από όλα καθώς φτάνει μετά βίας τα  $70\text{cm}$  από τα  $182\text{cm}$  της





δεξαμενής. Συγχρόνως συμπεραίνουμε ότι η ταχύτητα διάδοσης του ρεύματος είναι ανάλογη με την διαφορά πυκνότητας του. Αναλυτικότερα, όσο μεγαλώνει η διαφορά ανάμεσα στο καθαρό και το αλατισμένο νερό, τόσο μεγαλώνει και η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το ρεύμα.

Τέλος, από την απεικόνιση της αδιάστατης απόστασης  $x^*$  έναντι του αδιάστατου χρόνου  $t^*$ , για τις περιπτώσεις της τραπεζοειδούς και της σύνθετης διατομής, είναι φανερή η επίδραση της διατομής στην πορεία του ρεύματος καθώς στα μικρότερα ύψη οι χρόνοι διαδρομής είναι εμφανώς μεγαλύτεροι. Επίσης σχεδιάστηκαν η αδιάστατη απόσταση  $x/l$  έναντι του αδιάστατου χρόνου  $t/s$  μαζί με τα αποτελέσματα των Monaghan et al. (2009) και Keramaris and Prinos (2010). Παρατηρήθηκε ότι ο χαλικώδης πυθμένας, ειδικά σε συνδυασμό με μικρά ύψη, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κίνηση των ρευμάτων βαρύτητας με αποτέλεσμα να υπάρχουν διαφορές μεταξύ της παρούσας μελέτης και των μελετών των Monaghan et al. (2009a, 2009b) και Keramaris and Prinos (2010). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για μικρά ύψη (5 ή 10cm) το μέτωπο του κύματος δεν ολοκληρώνει την κίνησή του αλλά σταματάει περίπου στο μέσον της δεξαμενής. Σε μεγαλύτερα ύψη (17.5 ή 25 cm) υπάρχει καλή συμφωνία μεταξύ της παρούσας μελέτης και των μελετών των Monaghan et al. (2009a, 2009b) και Keramaris and Prinos (2010).



## 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 Prinos P., (2009), Lock-exchange experiments: effect of vegetation drag on gravity currents in “33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment”,
- Keramaris, E. and Prinos P. (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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Κεμεντσετσίδης Σ. και Βαρδακώστας Σ., (2019), Ρεύματα βαρύτητας υψηλής πυκνότητας σε δεξαμενή τραπεζοειδούς διατομής με θυρίδα, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Κεραμάρης Ε., Πρίνος Π., Γαλανίδου Α., Κατωγιάννη Μ. (2009). Ρεύματα βαρύτητας σε πυθμένα με βλάστηση συστοιχίας ράβδων, Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου ΕΥΕ & ΕΕΔΥΠ, Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων σε συνθήκες κλιματικών αλ-λαγών, 603-610, Βόλος Ελλάδα.

#### Ηλεκτρονική βιβλιογραφία

- [https://www.insa.nic.in/writereaddata/UpLoadedFiles/PINSA/Vol65A\\_1999\\_1\\_Art01.pdf](https://www.insa.nic.in/writereaddata/UpLoadedFiles/PINSA/Vol65A_1999_1_Art01.pdf)
- <file:///C:/Users/user/Downloads/1-s2.0-S0377042701005519-main.pdf>
- [https://pdfs.semanticscholar.org/e66f/f582ef91c5602982c80cab4123227adedc\\_bf.pdf](https://pdfs.semanticscholar.org/e66f/f582ef91c5602982c80cab4123227adedc_bf.pdf)
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01810835/document>
- <http://www.cs.technion.ac.il/~unga/course/GCIbook.pdf>
- [https://www.researchgate.net/profile/James\\_ODonnell2/publication/225255407\\_Surface\\_Fronts\\_in\\_Estuaries\\_A\\_Review/links/0c96052174be2db0fc000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/James_ODonnell2/publication/225255407_Surface_Fronts_in_Estuaries_A_Review/links/0c96052174be2db0fc000000.pdf)

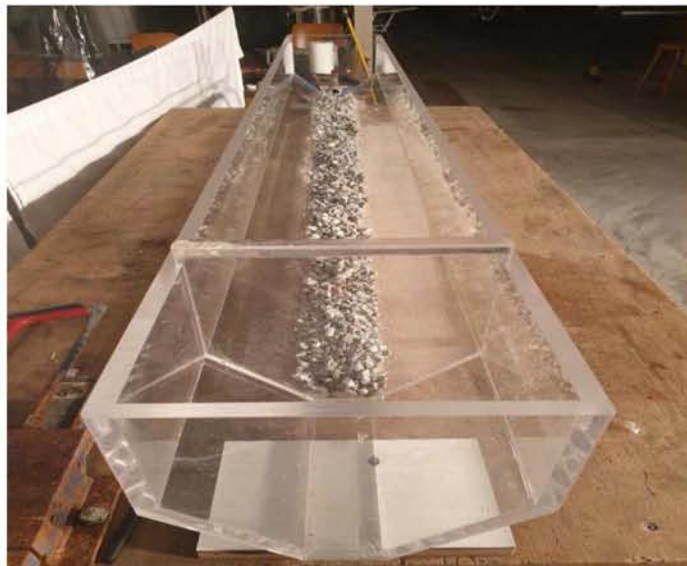


## Κεφάλαιο 7 Παράρτημα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται εικόνες από την δεξαμενή με τον χαλικώδη πυθμένα, το θυρόφραγμα, το δοκιμαστικό σωλήνα και τη ροδαμίνη, η οποία προσδίδει κόκκινο χρώμα στο αλατισμένο νερό. Επιπλέον παρουσιάζονται τρία στιγμιότυπα από κάθε πείραμα. Αρχικά, στο πρώτο στιγμιότυπο αποτυπώνεται η κίνηση του ρεύματος βαρύτητας στην αρχή, στο δεύτερο στιγμιότυπο η κίνηση στην μέση της απόστασης και στο τρίτο η κίνηση στο πέρας της δεξαμενής.



Εικόνα 7.1 Γυάλινη δεξαμενή μήκους 205cm , πλάτους 5cm στο κάτω μέρος και 23cm στο άνω



Εικόνα 7.2 Προφίλ γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm



Εικόνα 7.3 Θυρόφραγμα σύνθετης διατομής ύψους 25cm



Εικόνα 7.4 Έξοδος γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm



Εικόνα 7.5 Προφίλ εξόδου γυάλινης δεξαμενής μήκους 205cm



Εικόνα 7.6 Προφίλ στρώματος χαλικιού πάχους 2cm



Εικόνα 7.7 Δοκιμαστικός σωλήνας που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη των κατάλληλων πυκνοτήτων



Εικόνα 7.8 Ροδαμίνη: το υλικό που προσδίδει κόκκινο χρώμα στο αλατισμένο νερό



Στη συνέχεια παραθέτουμε τα στιγμιότυπα για το ύψος  $H=5\text{cm}$  :

- Για πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.9 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$

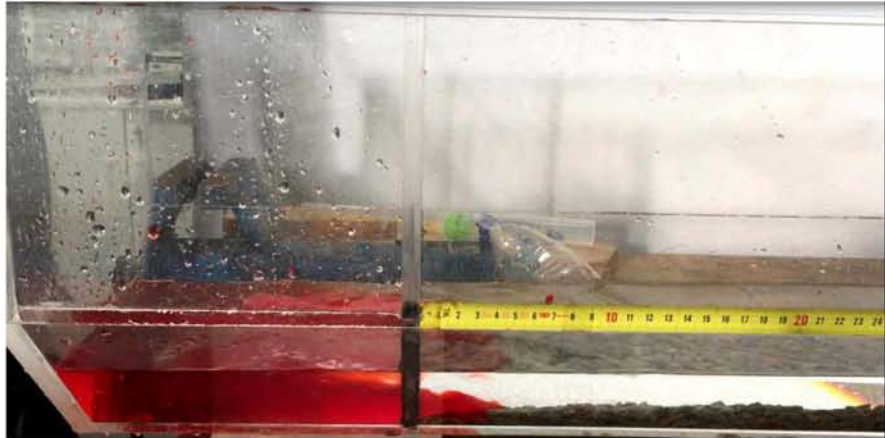


Εικόνα 7.10 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$

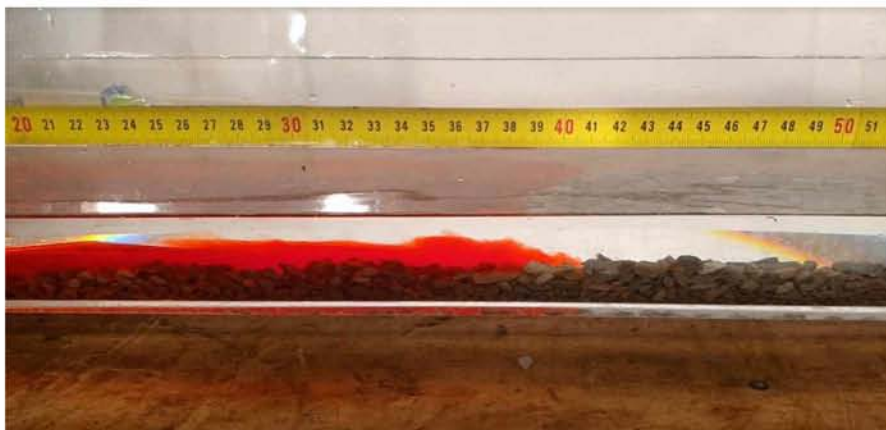


Εικόνα 7.11 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.12 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Εικόνα 7.13 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Εικόνα 7.14 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



- Για πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.15 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



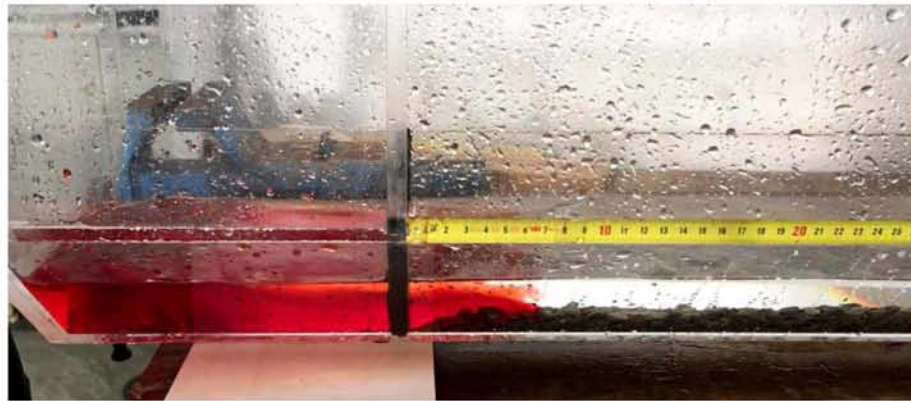
Εικόνα 7.16 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Εικόνα 7.17 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



- Για πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.18 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Εικόνα 7.19 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Εικόνα 7.20 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.21 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Εικόνα 7.22 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Εικόνα 7.23 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=5\text{cm}$



Στιγμιότυπα για το ύψος  $H=10\text{cm}$  :

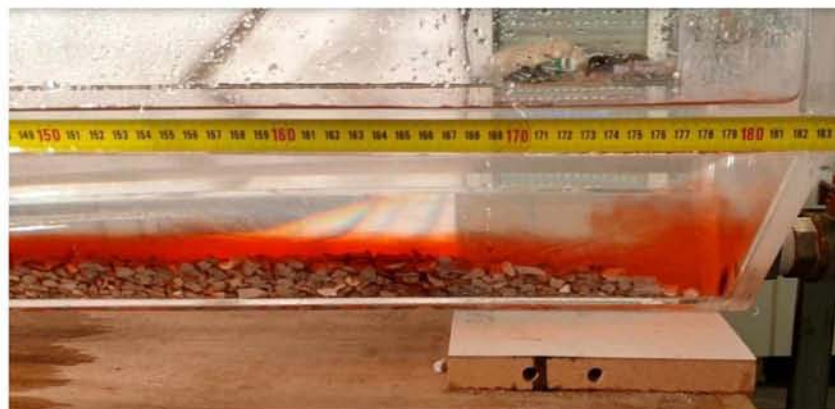
- Για πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.24 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



Εικόνα 7.25 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



Εικόνα 7.26 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



- Για πυκνότητα  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.27 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$

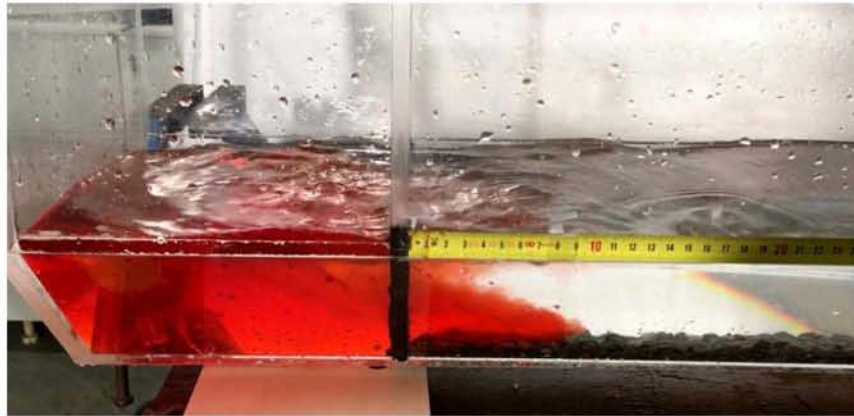


Εικόνα 7.28 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



Εικόνα 7.29 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.30 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



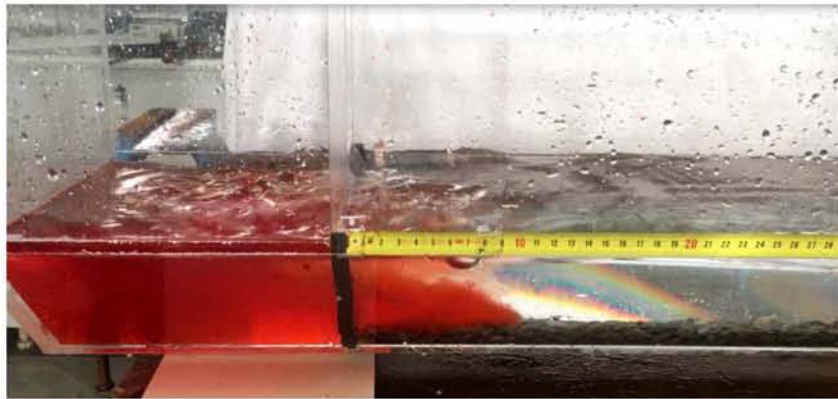
Εικόνα 7.31 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



Εικόνα 7.32 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



- Για πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.33 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



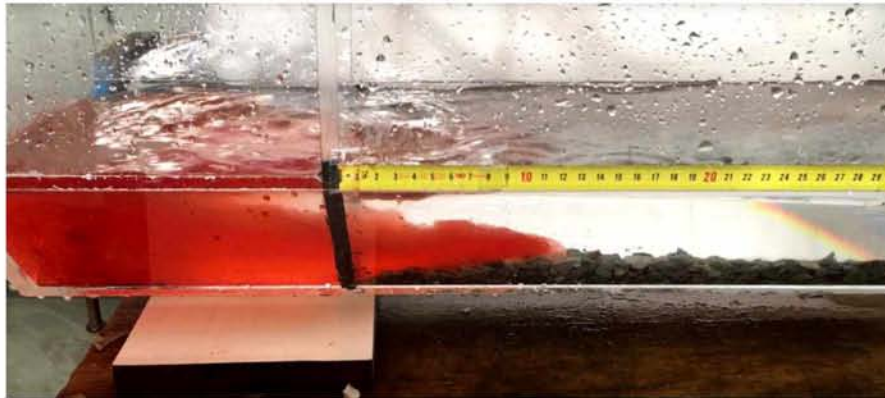
Εικόνα 7.34 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



Εικόνα 7.35 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



- Για πυκνότητα  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.36 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



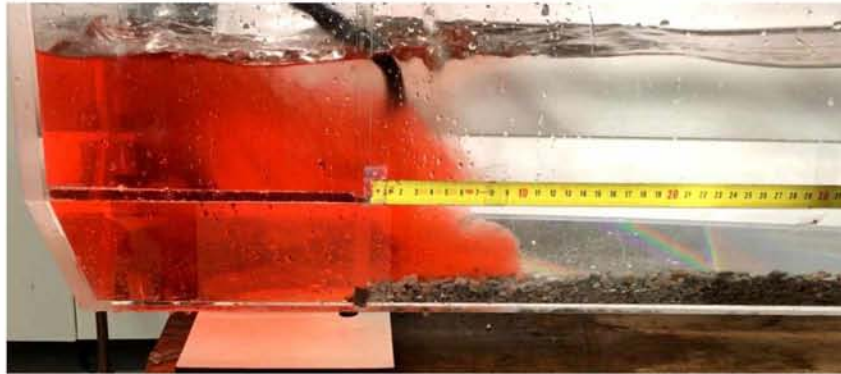
Εικόνα 7.37 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$



Εικόνα 7.38 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=10\text{cm}$

Στιγμιότυπα για το ύψος  $H=17.5\text{cm}$  :

- Για πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.39 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.40 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.41 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.42 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.43 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.44 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



- Για πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.45 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.46 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.47 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.48 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$

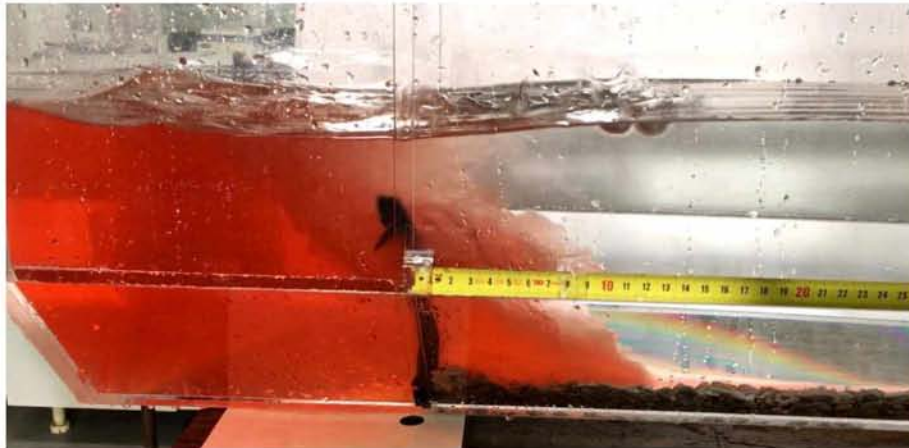


Εικόνα 7.49 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.50 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.51 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Εικόνα 7.52 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$

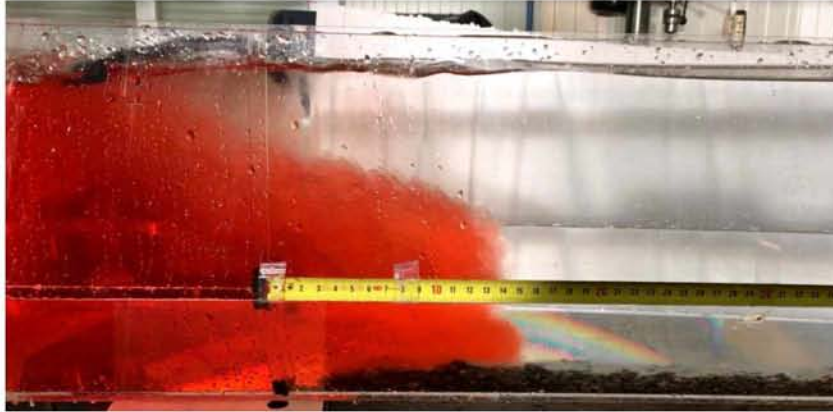


Εικόνα 7.53 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=17.5\text{cm}$



Στιγμιότυπα για το ύψος  $H=25\text{cm}$  :

- Για πυκνότητα  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.54 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$

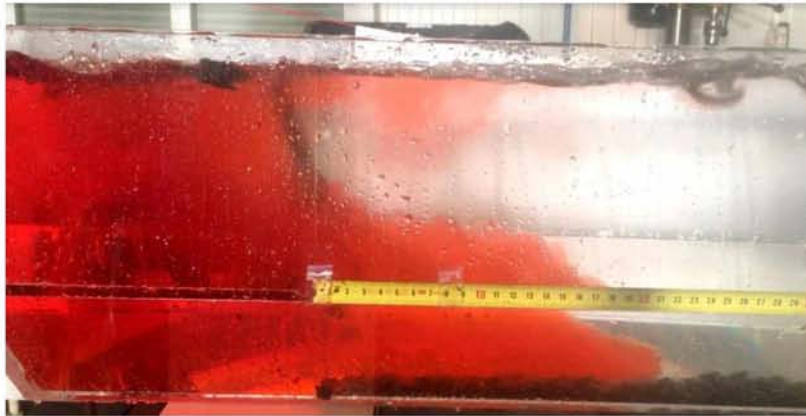


Εικόνα 7.55 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.56 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1050\text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.57 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.58 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.59 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1060 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.60 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.61 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.62 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1070 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



- Για πυκνότητα  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.63 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.64 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.65 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1080 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$

- Για πυκνότητα  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$



Εικόνα 7.66 Αρχή κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.67 Μέση κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$



Εικόνα 7.68 Τέλος κίνησης ρεύματος βαρύτητας  $\rho=1090 \text{ kg/m}^3$  για  $H=25\text{cm}$