



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ
ΤΥΡΒΩΔΩΝ ΦΛΕΒΩΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ

Ευγενία Λ. Μυλωνάκου

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων: Ηλίας Γ. Παπακωνσταντής, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΔΙΑΣΤΑΤΩΝ
ΤΥΡΒΩΔΩΝ ΦΛΕΒΩΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ**

Ευγενία Λ. Μυλωνάκου

Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Επιβλέπων: Ηλίας Γ. Παπακωνσταντής, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2018

Copyright © Ευγενία Α. Μυλωνάκου, 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το πειραματικό μέρος εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ.

Θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσω τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω βαθύτατες ευχαριστίες στον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Ηλία Παπακωνσταντή, Λέκτορα ΕΜΠ. Ο τρόπος διδασκαλίας των μαθημάτων του τόσο σε προπτυχιακό όσο και σε μεταπτυχιακό επίπεδο, καθώς και το ανθρώπινο ενδιαφέρον του για τους φοιτητές του με ενέπνευσαν στο να τον ακολουθήσω στην εκπόνηση της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Αφιέρωνε πάντα πολύ χρόνο στην επίλυση των εκάστοτε αποριών μου και παρείχε με πολλή προθυμία τις γνώσεις του, δείχνοντας παράλληλα κατανόηση και υπομονή στις εκάστοτε ελλείψεις και αδυναμίες μου.

Επιπλέον, ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Ιωάννη Πατσέλη, τεχνικό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, για τη συμβολή του στην επίλυση πρακτικών προβλημάτων που αφορούσαν στην πειραματική εγκατάσταση.

Ευχαριστίες εκφράζονται, επίσης, στον κ. Παναγιώτη Παπανικολάου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ, για το ενδιαφέρον του και τη βοήθειά του κατά την εξέλιξη των πειραμάτων, αλλά και στην κ. Αικατερίνη Νάνου, Επίκουρη Καθηγήτρια που αποτελεί μέλος της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου Αλέξανδρο Κιουλέπογλου για τη συμμετοχή του στην εκπόνηση τριών πειραμάτων καθώς επίσης και για τη συμβολή του στην κατάστρωση των αλγορίθμων σε λογισμικό Matlab.

Ευχαριστώ τους δικούς μου ανθρώπους, ιδιαιτέρως τη Γεωργία και τον Κωνσταντίνο, που με στήριξαν τόσο κατά τη διάρκεια των σπουδών όσο και κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Στον πνευματικό μου πατέρα, γέροντα Πολύκαρπο εκφράζω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη που φώτισε το δρόμο μου και ενθάρρυνε την ολοκλήρωση της φοίτησής μου στο παρόν μεταπτυχιακό πρόγραμμα.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη μου σε ολόκληρη την οικογένειά μου, ιδιαίτερα στους γονείς μου, Λεωνίδα και Αρχόντω, καθώς και στον παππού και στην γιαγιά μου, Σταύρο και Ευγενία Κανελλάκη, οι οποίοι μου συμπαραστέκονται σε κάθε στάδιο της ζωής μου. Χάρη στην στήριξη όλων σε κάθε επίπεδο ολοκλήρωσα τις σπουδές μου. Τους ευχαριστώ για την ενθάρρυνση, την επιμονή και την υπομονή τους στην εκπλήρωση των στόχων μου. Κυρίως τους ευχαριστώ για την έμπρακτη αυταπάρνηση και θυσιαστική αγάπη τους στην εκάστοτε επιλογή μου.

Στους γονείς μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	vii
EXTENDED ABSTRACT	ix
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	7
2.1 Γενικά	7
2.2 Κυκλικές Φλέβες Αρνητικής Άνωσης	7
2.2.1 Κατακόρυφες Φλέβες Αρνητικής Άνωσης	7
2.2.2 Κεκλιμένες Φλέβες Αρνητικής Άνωσης	8
2.3 Διδιάστατες Φλέβες Αρνητικής Άνωσης	10
2.4 Αντικείμενο Παρούσας Εργασίας	12
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	13
3.1 Το Υπό Μελέτη Πρόβλημα	13
3.2 Διαστατική Ανάλυση	14
4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	19
4.1 Γενικά	19
4.2 Δεξαμενές	20
4.2.1 Κύρια Δεξαμενή	20
4.2.2 Δεξαμενή Προετοιμασίας Διαλύματος	21
4.2.3 Δεξαμενή Τροφοδοσίας	22
4.3 Στόμιο Παροχέτευσης Φλέβας	23
4.4 Παροχόμετρα	24
4.5 Εξοπλισμός Οπτικής Καταγραφής	29
4.6 Βοηθητικά Όργανα Μέτρησης	30
4.6.1 Πυκνόμετρο	30

4.6.2 Όργανο Μέτρησης Αλατότητας	31
4.7 Υπολογισμός Πυκνότητας Διαλύματος	31
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	33
5.1 Γενικά	33
5.2 Περιγραφή Εκτέλεσης Πειραμάτων	33
5.3 Στιγμιότυπα Πειραμάτων	37
5.4 Αρχικές Συνθήκες Πειραμάτων	40
5.5 Προσδιορισμός Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών	45
5.6 Μεθοδολογία Διόρθωσης Αποστάσεων	46
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	49
6.1 Οπτικές Παρατηρήσεις	49
6.2 Αρχικό Τερματικό Ύψος	52
6.3 Τελικό Τερματικό Ύψος	58
6.4 Οριζόντια Θέση Τερματικού Ύψους	69
6.5 Οριζόντια Θέση Σημείου Επιστροφής	78
6.6 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Αποτελεσμάτων	87
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	89
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	97

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται τυρβώδεις διδιάστατες φλέβες αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό διάφορες γωνίες μέσα σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη. Η υπό μελέτη ροή συναντάται στην πράξη κατά τη διάθεση υγρών αποβλήτων από μονάδες αφαλάτωσης στη θάλασσα. Τα απόβλητα αυτά (αλμόλουπα) παροχετεύονται μέσω διαχυτήρων από τον πυθμένα προς την ελεύθερη επιφάνεια του αποδέκτη και προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερη αραιώση επιδιώκεται η επιμήκυνση της τροχιάς της φλέβας. Για το λόγο αυτό η παροχέτευση γίνεται υπό γωνία ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

Πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση της ροής ρευστού που εκρέει μέσα σε αποδέκτη μικρότερης πυκνότητας, υπό γωνία με κατεύθυνση από τον πυθμένα προς τα πάνω. Τα πειράματα εκπονήθηκαν σε δεξαμενή διαστάσεων 3.0m x 1.5m x 1.0m που ήταν γεμάτη με καθαρό νερό. Φλέβα αλατόνερου παροχετεύονταν υπό γωνία προς τα πάνω από διδιάστατη σχισμή διαστάσεων 20 cm x 0.2 cm. Το διάλυμα αλατόνερου ήταν χρωματισμένο έτσι ώστε η ροή της φλέβας μέσα στον αποδέκτη να είναι ορατή. Τα πειράματα βιντεοσκοπούσαν με ψηφιακή βιντεοκάμερα. Στη μπροστινή, κρυστάλλινη όψη της δεξαμενής είχε χαραχθεί πλέγμα προκειμένου να διευκολύνεται η διαδικασία της μέτρησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τροχιάς της φλέβας.

Διεξήχθησαν συνολικά 84 πειράματα τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης για 9 γωνίες παροχέτευσης: 15°, 30°, 45°, 50°, 60°, 75°, 80°, 85° και 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Η διαφορά πυκνότητας του υγρού της φλέβας και του αποδέκτη κυμάνθηκε από 0.65% έως 1.40% και ο πυκνομετρικός αριθμός Froude F_o από 15 έως 56.

Η φλέβα καθώς εκρέει στον αποδέκτη κινείται ανοδικά. Φτάνει ένα μέγιστο ύψος (αρχικό τερματικό ύψος ανόδου) και επιστρέφει στον πυθμένα. Όταν αποκατασταθούν μόνιμες συνθήκες στη ροή, το τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας (τελικό τερματικό ύψος ανόδου) είναι μικρότερο σε σχέση με το αρχικό.

Σε επόμενο στάδιο γίνεται η επεξεργασία του οπτικού υλικού. Με χρήση αλγορίθμων στο λογισμικό Matlab το βίντεο μετατρέπεται σε ένα σύνολο στιγμιοτύπων (frames). Επίσης παράγεται μια μέση εικόνα από μεγάλο αριθμό στιγμιοτύπων. Οι εικόνες υφίστανται κατάλληλη επεξεργασία στο λογισμικό Gimp έτσι ώστε να βελτιωθεί η ευκρίνειά τους. Στη συνέχεια εισάγονται στο Autocad όπου γίνεται η μέτρηση των

γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ροής. Το αρχικό τερματικό ύψος μετρήθηκε σε ένα στιγμιότυπο, ενώ τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μετρήθηκαν στη μέση εικόνα. Τέλος, οι μετρημένες αποστάσεις διορθώθηκαν από σφάλματα που οφείλονται στη θέση της κάμερας και του πλέγματος καθώς και στη διάθλαση από το νερό, οπότε προέκυψαν τα τελικά αποτελέσματα. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλέβας που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Το αρχικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας.
- Το τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας.
- Η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου έως τη θέση που αντιστοιχεί στο τελικό τερματικό ύψος.
- Η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου έως τη θέση επιστροφής του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου.

Ακολουθώντας τη διαστατική ανάλυση έγινε αδιαστατοποίηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ροής. Παρουσιάστηκαν γραφήματα όπου κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό αδιαστατοποιημένο ως προς το πλάτος της σχισμής w συσχετίστηκε με τον όρο $F_o^{4/3}$ (F_o ο πυκνομετρικός αριθμός Froude). Προέκυψε γραμμική συσχέτιση, γεγονός που επαλήθευσε τη διαστατική ανάλυση. Από τα πειράματα προσδιορίστηκαν για κάθε γωνία εκροής οι σταθερές αναλογίας C_i , που αντιπροσωπεύουν κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό αδιαστατοποιημένο ως προς την κλίμακα μήκους l_m . Επιπλέον έγιναν συσχετίσεις μεταξύ των αδιάστατων γεωμετρικών χαρακτηριστικών (δηλαδή των σταθερών C_i) και της γωνίας εκροής θ_0 και προέκυψαν εξισώσεις υπολογισμού των αδιάστατων γεωμετρικών χαρακτηριστικών συναρτήσει τη γωνίας παροχέτευσης.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο αρχικό τερματικό ύψος της φλέβας παρατηρείται κατά την παροχέτευση υπό γωνία 85° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ το μέγιστο τελικό τερματικό ύψος παρατηρείται κατά την παροχέτευση υπό γωνία 80° . Η μέγιστη οριζόντια απόσταση, από το στόμιο, της θέσης που αντιστοιχεί στο τελικό τερματικό ύψος εμφανίζεται κατά την εκροή φλέβας υπό γωνία 45° , ενώ το ίδιο συμβαίνει και με την οριζόντια απόσταση, από το στόμιο, της θέσης επιστροφής του άνω ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TWO-DIMENSIONAL TURBULENT NEGATIVELY BUOYANT JETS

By

Evgenia L. Mylonakou

EXTENDED ABSTRACT

In the present postgraduate diploma thesis, the flow of two-dimensional negatively buoyant jets discharged in a homogeneous and stationary ambient is investigated. Such flows are formed when desalination brines are disposed through diffusers upwards from the bottom to the free surface of the seawater. The jets are usually discharged at an angle to the horizontal, as it is crucial to elongate the jet trajectory in order to achieve the maximum dilution.

An experimental investigation of the flow of dense fluid discharged upwards at an angle to the horizontal was conducted. Experiments were carried out in a 3.0m x 1.5m x 1.0m tank filled with tap water. Jets of saltwater were discharged upwards from a two-dimensional slot being 20 cm x 0.2 cm. To visualize the jet flow, the saltwater was colored using food dye. The jet flow was recorded using a digital video camera. In the front glass panel of the tank a grid has been drawn to measure geometrical characteristics of the flow. In total, 84 experiments of turbulent negatively buoyant jets were conducted for nine discharge angles: 15°, 30°, 45°, 50°, 60°, 75°, 80°, 85° and 90° to the horizontal. The density difference between jet fluid and ambient ranged between 0.65% and 1.40%, while the densimetric Froude number ranged between 15 and 56.

The jet rises and reaches a maximum height (initial terminal height of rise), and then it returns to the bottom. When steady state flow is established, the terminal height of rise (final terminal height) is lower than the initial one.

The next part of the study includes the processing of the video clip. A set of video frames is extracted from the video clip, using Matlab software. An average image is

also obtained from a large number of instantaneous frames. The images are appropriately processed in Gimp software so that their clarity is improved. Finally, they are imported into Autocad, where the characteristics of the jet trajectory are measured. The initial terminal height was measured in a frame corresponding to a specific time, while the rest characteristics were measured in the average image. Then, the measured distances are corrected from errors caused by the camera position, the position of the grid and the refraction from water. The following geometrical characteristics were obtained:

- The initial terminal rise height of the jet Z_i .
- The final terminal rise height of the jet Z_f .
- The horizontal distance X_z from the center of the nozzle to the position where the final terminal height is observed.
- The horizontal distance X_i from the center of the nozzle to the position where the upper (outer) jet boundary returns to the nozzle level.

Following dimensional analysis, the geometrical characteristics were normalized by the slot width w and were linearly related to $F_o^{4/3}$ (F_o being the densimetric Froude number), confirming the dimensional analysis. Indicative graphs are presented in Figures 1, 2, 3, and 4. The obtained constants of proportionality are the geometrical characteristics normalized by the length scale l_M ($l_M = wF_o^{4/3}$).

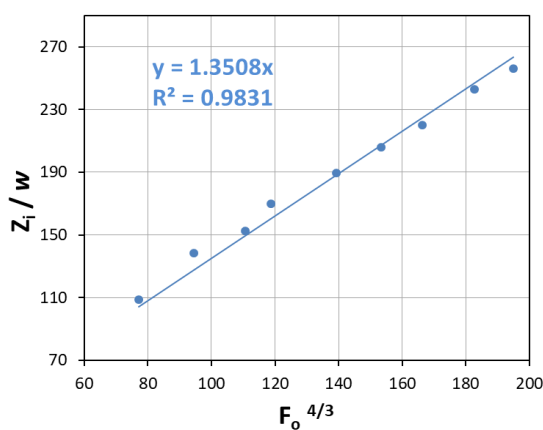


Figure 1: Variation of Z_i/w with $F_o^{4/3}$ for the discharge angle of 75 deg.

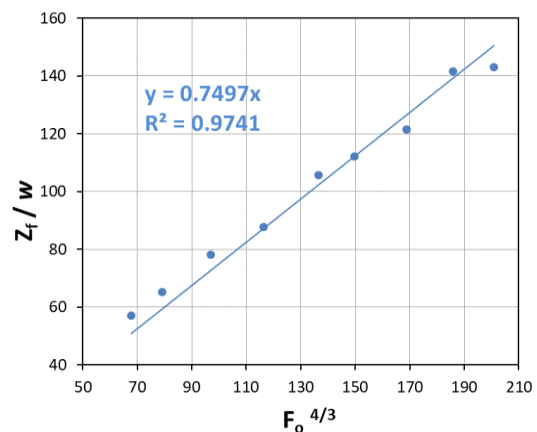


Figure 1: Variation of Z_f/w with $F_o^{4/3}$ for the discharge angle of 45 deg.

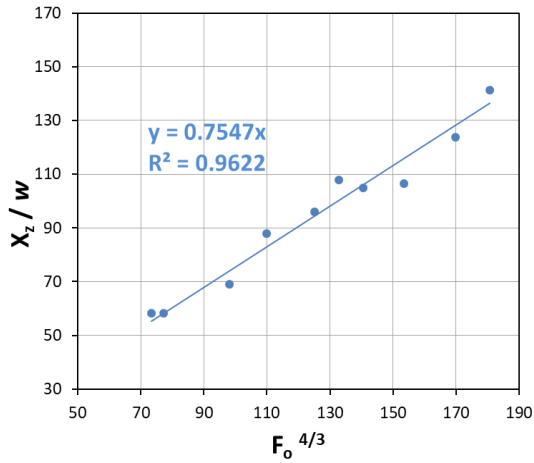


Figure 3: Variation of X_z/w with $F_o^{4/3}$ for the discharge angle of 60 deg.

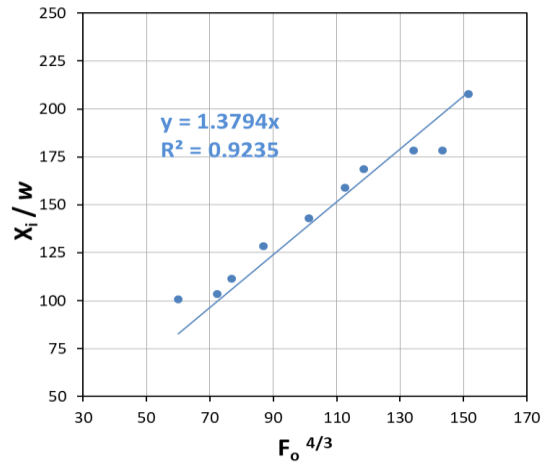


Figure 4: Variation of X_i/w with $F_o^{4/3}$ for the discharge angle of 80 deg.

The geometrical characteristics normalized by the length scale l_M are plotted against discharge angle θ_o , as shown in Figures 5, 6, 7 and 8. Fitting curves are also shown in Figures 5-8.

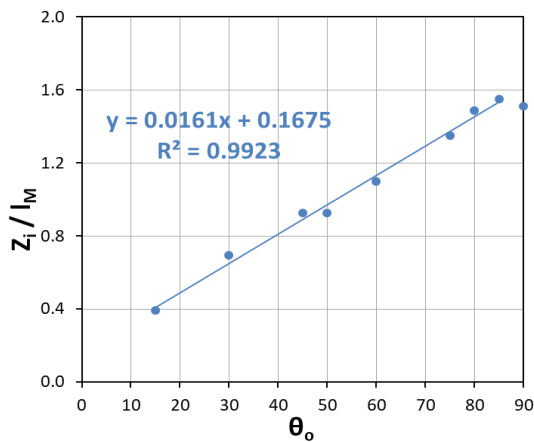


Figure 5: Variation of Z_i/l_M with discharge angle.

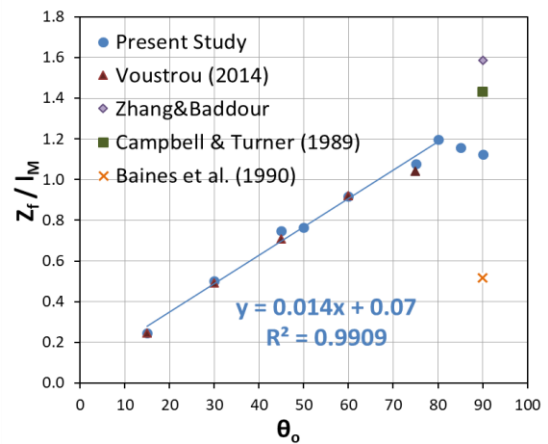


Figure 6: Variation of Z_i/l_M with discharge angle and comparison with previous data.

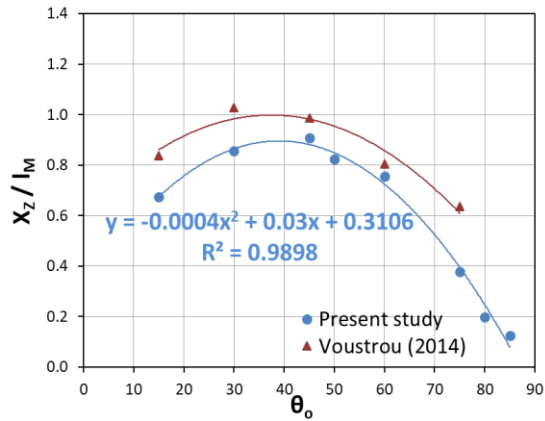


Figure 7: Variation of X_z/l_M with discharge angle and comparison with previous data.

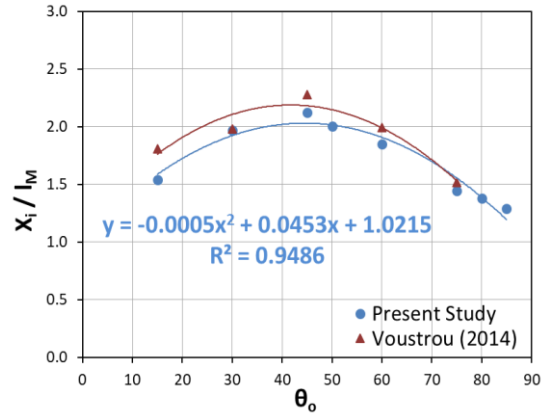


Figure 8: Variation of X_i/l_M with discharge angle and comparison with previous data.

It was also found that the maximum initial terminal rise height is observed when the jet is discharged at an angle of 85° to the horizontal, while the maximum final terminal rise height is observed when the jet is discharged at an angle of 80° . The maximum horizontal distance from the center of the nozzle to the position corresponding to the final terminal height is observed for a discharge angle of 45° and the same is found regarding the maximum horizontal distance from the center of the nozzle to the position where the upper (outer) jet boundary returns to the nozzle level.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες για πόσιμο νερό καθώς και η παρατηρούμενη έλλειψη αυτού αναδεικνύουν τα τελευταία χρόνια τη σπουδαιότητα της λειτουργίας των μονάδων αφαλάτωσης. Από το θαλασσινό νερό, μετά από κατάλληλη επεξεργασία στις μονάδες αφαλάτωσης, παράγεται πόσιμο νερό. Οι μονάδες αφαλάτωσης στα ελληνικά νησιά λειτουργούν με τη μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis, RO). Το θαλασσινό νερό υπόκειται σε μια αρχική επεξεργασία απομάκρυνσης άμμου, πέτρας και άλλων υλικών, ενώ σε επόμενο στάδιο, το φιλτραρισμένο νερό οδηγείται σε ημιπερατές μεμβράνες, όπου υπό μεγάλη πίεση (περίπου 70 atm) κατακρατείται το αλάτι. Τα βασικά συστήματα μιας μονάδας αφαλάτωσης είναι:

- Το αντλιοστάσιο και οι αγωγοί μέσω των οποίων αντλείται αλλά και επιστρέφεται το θαλασσινό νερό.
- Η εγκατάσταση αρχικής επεξεργασίας.
- Το σύστημα των μεμβρανών.
- Η εγκατάσταση τελικής επεξεργασίας αφαλατωμένου πλέον νερού και η δεξαμενή γλυκού νερού.

Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από μονάδες αφαλάτωσης σε διάφορα νησιά της χώρας μας.



Σχήμα 1-1: Μονάδα Αφαλάτωσης (Πηγή: Εφημερίδα «Καθημερινή»).



Σχήμα 1-2: Μονάδα Αφαλάτωσης σε Τέλενδο & Ψέριμο
(Πηγή: <http://www.enikonomia.gr>).



Σχήμα 1-3: Μονάδα Αφαλάτωσης στην Κύπρο
(Πηγή: <https://energypress.gr>).



Σχήμα 1-4: Μονάδα Αφαλάτωσης στην Πάφο (Πηγή: <http://mesogeos.gr>).



Σχήμα 1-5: Μονάδα Αφαλάτωσης στην Πάφο (Πηγή: <http://www.sigmalive.com>).



Σχήμα 1-6: Μονάδα Αφαλάτωσης στην Πάτμο (Πηγή: Εφημερίδα «Καθημερινή»).



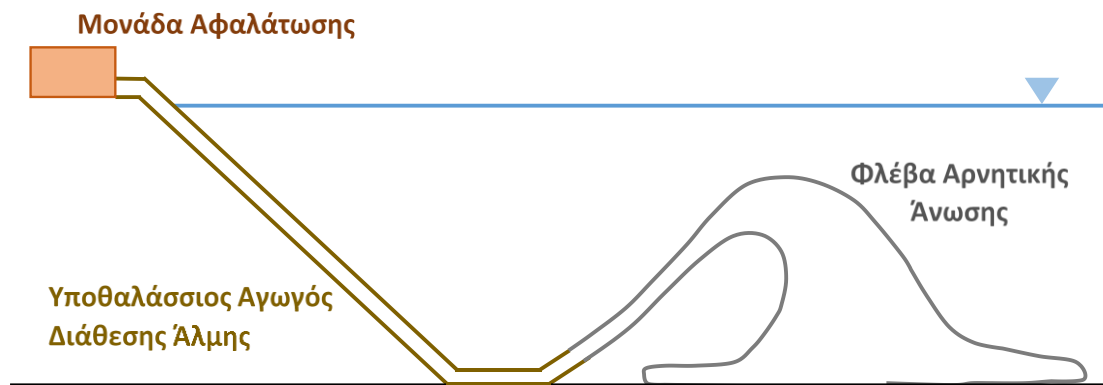
Σχήμα 1-7: Μονάδα Αφαλάτωσης σε Αρκούς (Πηγή: <http://kataskevesktirion.gr>).



Σχήμα 1-8: Μονάδα Αφαλάτωσης στη Μήλο (Πηγή: <http://ita-sa.gr>).

Από τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης δημιουργείται και αποβάλλεται το λεγόμενο αλμόλοιπο (άλμη), το οποίο έχει διπλάσια αλατότητα από αυτήν της θάλασσας. Έτσι, κατά την επιστροφή της άλμης στη θάλασσα ελλοχεύει ο κίνδυνος να προκληθούν βλάβες στη χλωρίδα και την πανίδα του θαλάσσιου περιβάλλοντος και γενικώς να διαταραχθεί η ισορροπία του οικοσυστήματος. Προκειμένου να προστατευτεί η θαλάσσια ζωή του πυθμένα, καθίσταται αναγκαίος ο βέλτιστος σχεδιασμός διάθεσης των αποβλήτων (άλμης).

Η διάθεση των αποβλήτων στους θαλάσσιους αποδέκτες πραγματοποιείται μέσω διαχυτήρων που κείνται στον πυθμένα και εκρέουν πυκνό διάλυμα προς την ελεύθερη επιφάνεια. Προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη αραιώση προτιμάται η ροή να είναι τυρβώδης και υπό γωνία, έτσι ώστε η τροχιά της να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μεγαλύτερη συμπαράσυρση περιβάλλοντος ρευστού και συνεπώς μεγαλύτερη αραιώση. Χαρακτηριστικό είναι το Σχήμα 1-8, όπου απεικονίζεται η ροή της φλέβας που δημιουργείται κατά τη διάθεση του αλμόλοιπου στη θάλασσα.



Σχήμα 1-8: Απεικόνιση της ροής φλέβας άλμης κατά τη διάθεσή της στη θάλασσα.

Για τον ίδιο λόγο επιλέγονται διαχυτήρες πολλαπλών (κυκλικών) στομιών, όπου η ροή μετά από ορισμένη κατακόρυφη απόσταση ομοιάζει με ροή ρευστού που παροχετεύεται από διδιάστατη σχισμή.

Η εκροή γίνεται από τον πυθμένα με φορά προς την ελεύθερη επιφάνεια. Η πυκνότητα της άλμης όπως προαναφέρθηκε είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αποδέκτη. Συνεπώς, η συνισταμένη δύναμη του βάρους της φλέβας και της άνωσης είναι προς τα κάτω δηλαδή αντίθετη από την κατακόρυφη συνιστώσα της ορμής (ποσότητας κίνησης), γι' αυτό η ροή χαρακτηρίζεται ως φλέβα αρνητικής άνωσης.

Η συμπεριφορά φλέβας βαρύτερου ρευστού που εκρέει σε ελαφρύτερο αποδέκτη, έχει περιγραφεί για κυκλικές φλέβες αναλυτικά σε προηγούμενες εργασίες (Παπακωνσταντής 2009). Μόλις ξεκινήσει η εκροή υπερτερούν οι δυνάμεις ποσότητας κίνησης (ορμής). Το υγρό της φλέβας αναμιγνύεται με το υγρό του αποδέκτη, οπότε μειώνεται η αλατότητά του. Η ροή ανέρχεται και φτάνει σε ένα αρχικό τερματικό ύψος. Μέχρι το αρχικό τερματικό ύψος κυριαρχούν οι δυνάμεις ποσότητας κίνησης, ενώ από το σημείο αυτό και μετά κυριαρχούν οι ανωστικές δυνάμεις, γι' αυτό η φλέβα επιστρέφει στον πυθμένα και αρχίζει να εξαπλώνεται ως ρεύμα πυκνότητας. Η ροή μονιμοποιείται και η φλέβα φτάνει σε ένα τελικό τερματικό ύψος που είναι μικρότερο από το αρχικό, λόγω της αλληλεπίδρασης της καθοδικής με την ανοδική ροή της φλέβας. Επειδή η παροχέτευση γίνεται υπό γωνία, το τελικό

τερματικό ύψος παρατηρείται σε οριζόντια απόσταση από το στόμιο, ενώ η φλέβα επιστρέφει στο επίπεδο παροχέτευσης σε απόσταση από το στόμιο. στιγμιότυπο

Στην παρούσα εργασία διερευνώνται πειραματικά τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς διδιάστατων τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης που εκρέουν υπό γωνία από σχισμή σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Συγκεκριμένα προσδιορίζονται:

- Το αρχικό τερματικό ύψος Z_i .
- Το τελικό τερματικό ύψος του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας Z_f που παρατηρείται στη μόνιμη κατάσταση.
- Η οριζόντια απόσταση X_z από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση που παρατηρείται το τελικό τερματικό ύψος.
- Η οριζόντια απόσταση X_i από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης.

Τα δεδομένα που προκύπτουν είναι χρήσιμα για το σχεδιασμό συστημάτων διάθεσης υγρών αποβλήτων βαρύτερων από τον αποδέκτη, αλλά και για την επαλήθευση μοντέλων προσομοίωσης τέτοιων ροών.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Γενικά

Πλούσιο βιβλιογραφικό υλικό συναντάται στις τυρβώδεις φλέβες θετικής άνωσης. Οι Fischer et al. (1979) συνοψίζουν στοιχεία από τη μελέτη κυκλικών και διδιάστατων φλεβών θετικής άνωσης. Ο Kotsovinos (1975) επικεντρώθηκε σε διδιάστατες φλέβες θετικής άνωσης, ενώ οι Papanicolaou & List (1988) διερεύνησαν πειραματικά τη ροή κυκλικών φλεβών θετικής άνωσης με έμφαση στην περιοχή του πλουμίου. Έκτοτε έχουν διεξαχθεί πολλές εργασίες.

Από την άλλη, οι φλέβες αρνητικής άνωσης έχουν μελετηθεί κυρίως τα τελευταία χρόνια λόγω της αυξανόμενης ανάγκης για πόσιμο νερό και κατ' επέκταση της λειτουργίας μονάδων αφαλάτωσης. Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση των εργασιών που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα και αφορούν σε φλέβες αρνητικής άνωσης.

2.2 Κυκλικές Φλέβες Αρνητικής Άνωσης

2.2.1 Κατακόρυφες Φλέβες Αρνητικής Άνωσης

Ο Turner (1966) μελέτησε πειραματικά φλέβες αρνητικής άνωσης που εκτοξεύονται κατακόρυφα προς την ελεύθερη επιφάνεια ακίνητου αποδέκτη και προσδιόρισε το τελικό τερματικό ύψος ανόδου. Θεωρητική διερεύνηση της ροής βαρύτερης φλέβας που παροχετεύεται κατακόρυφα από τον πυθμένα προς την ελεύθερη επιφάνεια ελαφρύτερου αποδέκτη πραγματοποίησε ο Abraham (1967) και προσδιόρισε το τελικό τερματικό ύψος της τροχιάς της φλέβας σε μόνιμη κατάσταση. Ο Δημητρίου (1978) ασχολήθηκε πειραματικά με κατακόρυφες κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη και έδωσε αποτελέσματα τόσο για το τελικό τερματικό ύψος της ροής, όσο και για το αρχικό Z_i (τερματικό ύψος που φτάνει η φλέβα στην έναρξη της ροής). Επιπλέον μελέτησε τις κατανομές συγκέντρωσης και ταχυτήτων στο πεδίο ροής. Οι Baines et al. (1990) μελέτησαν τόσο κυκλικές όσο και διδιάστατες φλέβες αρνητικής άνωσης. Πειράματα για κατακόρυφες φλέβες πραγματοποιήθηκαν επίσης από τους Zhang & Baddour (1998). Οι Bloomfield & Kerr (1998) προσδιόρισαν

πειραματικά το αρχικό και τελικό τερματικό ύψος κυκλικής φλέβας αρνητικής άνωσης που εκτοξεύεται κατακόρυφα προς την ελεύθερη επιφάνεια ακίνητου ομογενή και στρωματωμένου αποδέκτη. Οι Papanicolaou & Kokkalis (2008) πραγματοποίησαν πειράματα φλεβών αρνητικής άνωσης που εκτοξεύονται από την ελεύθερη επιφάνεια προς τον πυθμένα ομογενή αποδέκτη. Μελέτησαν τη ροή φλέβας νερού σε αλατόνερο καθώς και τη ροή φλέβας θερμού νερού σε κρύο νερό και προσδιόρισαν το τερματικό βάθος της ροής.

2.2.2 Κεκλιμένες Φλέβες Αρνητικής Άνωσης

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει εντατική διερεύνηση κεκλιμένων φλεβών, καθώς στόχος είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης τροχιάς της φλέβας και κατ' έγκταση μεγαλύτερης αραιώσης. Η διερεύνηση έχει επικεντρωθεί σε κυκλικές φλέβες.

Οι Zeitoun et al. (1970) μελέτησαν φλέβες βαρύτερου ρευστού που εκτοξεύονται υπό γωνίες 30° , 45° , 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ακίνητο, ομογενή αποδέκτη. Προσδιόρισαν το τερματικό ύψος ανόδου Z_f σε μόνιμη κατάσταση, την ελάχιστη αραιώση στο σημείο αυτό και την οριζόντια απόσταση X_i από το κέντρο του στομίου έως τη θέση επιστροφής του άνω ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Εκτιμήθηκε πως η μέγιστη τροχιά, συνεπώς και η μέγιστη αραιώση, παρατηρείται κατά την εκροή της φλέβας υπό γωνία $\theta_0 = 60^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Οι Roberts et al. (1997) με δεδομένο πως η μέγιστη αραιώση επιτυγχάνεται για εκροή υπό γωνία 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, μελέτησαν περαιτέρω φλέβες που παροχετεύονται με γωνία 60° . Παρόμοια μελέτη είχε πραγματοποιηθεί στο παρελθόν από τους Roberts & Toms (1987). Οι Roberts et al. (1997) έδωσαν αποτελέσματα για το τερματικό ύψος Z_f της φλέβας, για τη θέση επιστροφής του άξονα της φλέβας στον πυθμένα και για την αντίστοιχη αραιώση.

Πειραματική διερεύνηση κυκλικών κεκλιμένων φλεβών αρνητικής άνωσης πραγματοποίησε ο Lindberg (1994) για γωνίες εκροής $\theta_0 = 30^\circ$, 45° , 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο που προσδιόρισε γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής.

Κεκλιμένες φλέβες αρνητικής άνωσης που εκτοξεύονται υπό διάφορες γωνίες σε ακίνητο ομογενή και γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη μελέτησαν οι Bloomfield & Kerr (2002) οι οποίοι προσδιόρισαν το μέγιστο ύψος ανόδου της φλέβας, ενώ έκαναν

το διαχωρισμό μεταξύ αρχικού τερματικού ύψους και τελικού τερματικού ύψους που παρατηρείται σε ροή υπό μόνιμες συνθήκες. Μελετώντας μεγάλο εύρος γωνιών παροχέτευσης και μάλιστα γωνιών μεταξύ 60° και 90° διαπίστωσαν ότι το μέγιστο αρχικό τερματικό ύψος ανόδου παρατηρείται κατά την κατακόρυφη εκτόξευση φλέβας, ενώ το μέγιστο τελικό τερματικό ύψος παρατηρείται κατά την παροχέτευση φλέβας υπό γωνία 80° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Ωστόσο, τα πειράματα εκπονήθηκαν σε δεξαμενή μικρών διαστάσεων και κατά την εκροή χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πλέγμα προκειμένου η ροή να γίνει τυρβώδης.

Οι Cirollina et al. (2005) μελέτησαν πειραματικά τη ροή βαρύτερων κυκλικών φλεβών σε ελαφρύτερο αποδέκτη υπό γωνίες 30° , 45° , 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, δίνοντας αποτελέσματα για γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς της φλέβας. Ο Kikkert (2006) δημοσίευσε αποτελέσματα που αφορούν γεωμετρικά χαρακτηριστικά και κατανομές συγκέντρωσης κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό διάφορες γωνίες μεταξύ 0° και 75° ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη. Στα πειράματα έγινε χρήση των τεχνικών LA (Light Attenuation) και LIF (Laser Induced Fluorescence). Οι Nemlioglu and Roberts (2006) χρησιμοποιώντας την τεχνική 3D-LIF πραγματοποίησαν πειράματα ροής κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης παροχετευομένων υπό γωνίες 15° , 30° , 45° , 60° , 75° και 90° . Παρουσίασαν αποτελέσματα για το τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας, για την οριζόντια θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης, καθώς και την αξονική αραίωση στη θέση αυτή.

Ολοκληρωμένη διερεύνηση κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης πραγματοποίησε ο Παπακωνσταντής (2009). Εκπονήθηκε μεγάλο πλήθος πειραμάτων για γωνίες παροχέτευσης $\theta_0=45^\circ$, 60° , 75° , 80° , 85° και 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Προσδιορίστηκαν τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλέβας: το αρχικό τερματικό ύψος, το τελικό τερματικό ύψος του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας που παρατηρείται στη μόνιμη κατάσταση, η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση που παρατηρείται το τελικό τερματικό ύψος και η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής του άνω ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης. Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις συγκέντρωσης και προέκυψαν αποτελέσματα

για τις κατανομές της συγκέντρωσης στη θέση του τερματικού ύψους, την αξονική αραιώση στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας καθώς και αποτελέσματα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του άξονα της φλέβας. Σημαντικό μέρος των αποτελεσμάτων έχει δημοσιευτεί στις εργασίες Parakonstantis et al. (2011a, 2011b). Τέλος, ο Παπακωνσταντής (2009) ασχολήθηκε με την προσομοίωση της ροής κεκλιμένων κυκλικών φλεβών αρνητικής σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη με χρήση ολοκληρωματικών μοντέλων από την οποία προέκυψε ικανοποιητική πρόβλεψη των περισσότερων χαρακτηριστικών της ροής με εφαρμογή μειωμένου συντελεστή συμπαράσυρσης.

Οι Lai & Lee (2012) μελέτησαν πειραματικά τη ροή κυκλικής φλέβας αρνητικής άνωσης πραγματοποιώντας πειράματα για διάφορες γωνίες παροχέτευσης μεταξύ 15° και 60° με χρήση της τεχνικής LIF. Παρουσίασαν αποτελέσματα για γεωμετρικά χαρακτηριστικά, κατανομές συγκέντρωσης και ταχύτητας. Οι Abessi & Roberts (2015) ασχολήθηκαν με την πειραματική διερεύνηση κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης που εκτοξεύονται υπό γωνία ως προς το οριζόντιο επίπεδο, δίνοντας αποτελέσματα για τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής και για τις αραιώσεις τόσο στο σημείο του τελικού τερματικού ύψους όσο και στο σημείο επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης.

Πειράματα ροής κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης παροχετευομένων υπό διάφορες γωνίες πραγματοποίησαν επίσης οι Crowe et al. (2016). Πρόσφατα η Τσατσάρα (2016) πραγματοποίησε πειράματα για γωνίες παροχέτευσης μεταξύ 15° και 70° και σχετική είναι η εργασία Parakonstantis & Tsatsara (2018).

2.3 Διδιάστατες Φλέβες Αρνητικής Άνωσης

Περιορισμένες εργασίες έχουν παρουσιαστεί για διδιάστατες φλέβες αρνητικής άνωσης. Οι περισσότερες από αυτές αφορούν κατακόρυφη εκροή και ειδικότερα εστιάζουν στον προσδιορισμό του τερματικού ύψους ανόδου της φλέβας σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη.

Οι Campbell & Turner (1989) μελέτησαν την εξέλιξη της ροής βαρύτερων αποβλήτων που εισρέουν σε αποδέκτη. Εκπόνησαν πειράματα όπου προσομοίωσαν το βαρύτερο

ρευστό των αποβλήτων με αλατόνερο και το υγρό του αποδέκτη με καθαρό νερό. Χρησιμοποίησαν τόσο κυκλικά όσο και διδιάστατα στόμια εκροής και προσδιόρισαν το τερματικό ύψος της φλέβας. Οι Baines et al. (1990) μελέτησαν τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά τη διδιάστατη ροή φλέβας αρνητικής άνωσης. Οπτικοποίησαν τη ροή και μελέτησαν την εξέλιξή της. Όπως και οι Campbell & Turner (1989), οι Baines et al. (1990) συσχέτισαν το τερματικό ύψος ανόδου κατάλληλα αδιαστατοποιημένο με τον όρο $F_o^{4/3}$ (F_o ο πυκνομετρικός αριθμός Froude). Η σταθερά αναλογίας (αδιάστατο τερματικό ύψος) των Baines et al. (1990) προέκυψε τρεις φορές περίπου μικρότερη από αυτή που προσδιόρισαν οι Campbell & Turner (1989).

Οι Zhang & Baddour (1997) μελέτησαν τη ροή φλέβας βαρύτερου ρευστού (αλατόνερου) που παροχετεύεται κατακόρυφα προς τα πάνω από διδιάστατο στόμιο (σχισμή) σε στάσιμο ομογενή αποδέκτη. Εκπόνησαν πειράματα σε δεξαμενή 150 cm x 15 cm και βάθους 120 cm. Το στόμιο εκροής ήταν μια σχισμή μήκους 15 cm και πλάτους που κυμαινόταν από 0.12 cm έως 4 cm. Από την οπτικοποίηση της ροής παρατηρήθηκε η ύπαρξη στροβίλων τύρβης στη ροή της φλέβας, οι οποίοι εμφανίζονταν να είναι «ασταθείς» (unstable fronts) για μεγάλους πυκνομετρικούς αριθμούς F_o . Επίσης, παρουσίασαν διαστατική ανάλυση της υπό μελέτη ροής και κατέληξαν στη σχέση $Z_f = σταθ. \cdot b_o F_o^{4/3}$, όπου Z_f το τελικό τερματικό ύψος, b_o το ημιπλάτος της σχισμής εκροής και F_o ο πυκνομετρικός αριθμός Froude (βλ. Κεφάλαιο 3). Διαπίστωσαν ότι η προηγούμενη σχέση ισχύει για πυκνομετρικούς αριθμούς $F_o > 7$. Η σταθερά προέκυψε από τα πειράματα ίση με 1.59.

Η Βούστρου (2014) μελέτησε πειραματικά τη ροή διδιάστατων φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνίες $\theta_o = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη. Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκαν το τερματικό ύψος, η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου έως της θέση όπου εμφανίζεται το τελικό τερματικό ύψος και η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου έως τη θέση επιστροφής του άνω ορίου στο επίπεδο παροχέτευσης. Επιπλέον, η Βούστρου (2014) παρουσίασε μετρήσεις συγκέντρωσης και αποτελέσματα αραίωσης τόσο στη θέση όπου εμφανίζεται το μέγιστο ύψος ανόδου του άξονα όσο και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο

Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ. Μέρος των αποτελεσμάτων δημοσιεύτηκε στην εργασία Voustrou et al. (2015).

Στον Πίνακα 2-1 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών μελετών που έχουν εκπονηθεί μέχρι σήμερα για διδιάστατες φλέβες αρνητικής άνωσης και αφορούν στις τιμές του τελικού τερματικού ύψους της φλέβας, αδιαστατοποιημένου ως προς την κλίμακα μήκους l_M η οποία ορίζεται ως $l_M = w F_o^{4/3}$, όπου w το πλάτος της σχισμής και F_o ο πυκνομετρικός αριθμός Froude (βλ. Κεφάλαιο 3).

Πίνακας 2-1: Αποτελέσματα τερματικού ύψους διδιάστατων φλεβών αρνητικής άνωσης.

	θ_0	Βούστρου (2014)	Zhang & Baddour (1997)	Baines et al. (1990)	Campbell & Turner (1989)
Z_f / l_M	15	0.25	-	-	-
	30	0.49	-	-	-
	45	0.71	-	-	-
	50	-	-	-	-
	60	0.92	-	-	-
	75	1.04	-	-	-
	90	-	-	1.59	0.52

* Τα αποτελέσματα έχουν προσαρμοσθεί κατάλληλα ώστε η κλίμακα μήκους l_M να ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (3-3) του Κεφαλαίου 3.

2.4 Αντικείμενο Παρούσας Εργασίας

Από την παραπάνω διερεύνηση προκύπτει ότι ενώ οι κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης έχουν μελετηθεί επαρκώς, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση διδιάστατων φλεβών αρνητικής άνωσης. Στην παρούσα εργασία διερευνώνται πειραματικά διδιάστατες φλέβες αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό διάφορες γωνίες μεταξύ 15° και 90° για μεγάλο εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude με στόχο να προκύψουν πειραματικά δεδομένα για τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής. Τα αποτελέσματα αδιαστατοποιούνται κατάλληλα και συγκρίνονται με άλλα διαθέσιμα αποτελέσματα. Επίσης μελετάται η συσχέτιση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ροής με τη γωνία παροχέτευσης και προτείνονται σχέσεις υπολογισμού.

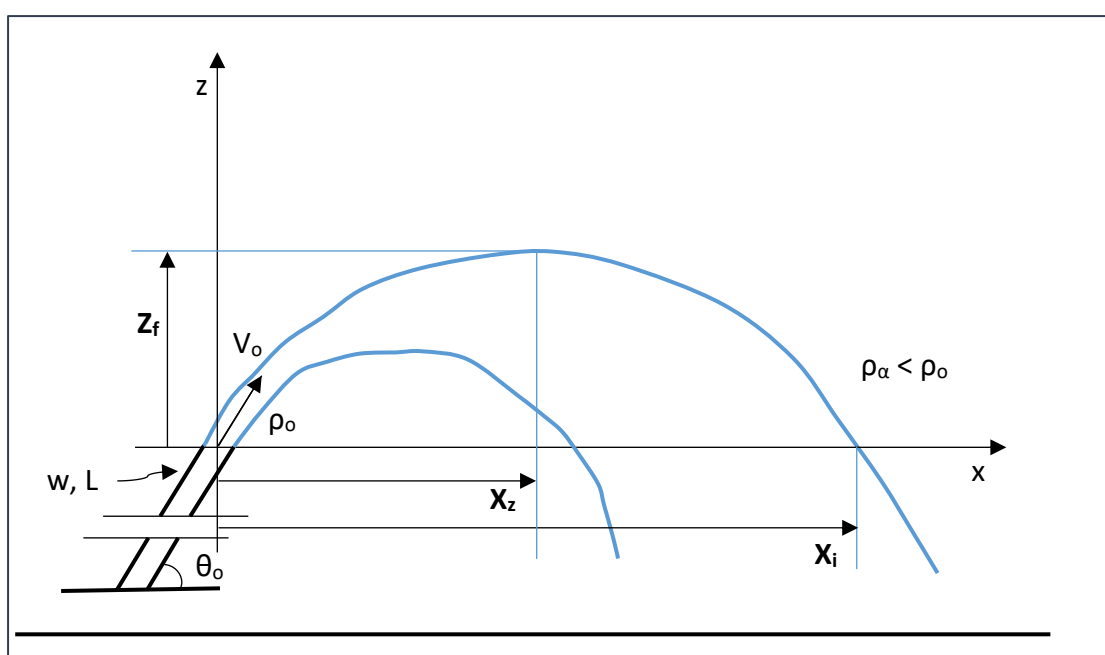
3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

3.1 Το Υπό Μελέτη Πρόβλημα

Το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι το εξής:

Ρευστό πυκνότητας ρ_0 , εκρέει υπό γωνία θ_0 ως προς το οριζόντιο επίπεδο από σχισμή πλάτους w και μήκους L , με ταχύτητα V_0 , μέσα σε ακίνητο, ομογενή αποδέκτη πυκνότητας $\rho_\alpha < \rho_0$.

Στο Σχήμα 3-1 δίνεται σκαρίφημα της υπό μελέτη ροής σε μόνιμες συνθήκες.



Σχήμα 3-1: Διδιάστατη φλέβα αρνητικής άνωσης υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη.

Το διάλυμα της φλέβας αποτελείται από αλατόνερο, ενώ ο αποδέκτης από καθαρό νερό. Συνεπώς η φλέβα έχει μεγαλύτερη πυκνότητα (ρ_0) από την πυκνότητα (ρ_α) του υγρού του αποδέκτη. Κατά την εκροή από τη σχισμή κυριαρχούν οι δυνάμεις ποσότητας κίνησης (ορμής), που οφείλονται στην αρχική ταχύτητα V_0 , οπότε η φλέβα κινείται ανοδικά. Η κίνηση αυτή είναι επιβραδυνόμενη, καθώς η συνολική δύναμη (συνισταμένη άνωσης και βάρους) είναι προς τα κάτω και αντιτίθεται στις δυνάμεις ποσότητας κίνησης. Καθώς ανυψώνεται η φλέβα, αναμιγνύεται με το υγρό του αποδέκτη (συμπαράσυρση) οπότε μειώνεται η πυκνότητά της. Η κατακόρυφη

συνιστώσα της ορμής μηδενίζεται και η φλέβα φτάνει στο αρχικό τερματικό ύψος (Z_i). Από το σημείο αυτό και μετά υπερτερούν οι ανωστικές δυνάμεις (βαρυτικές), αντιστρέφεται η ροή (γίνεται καθοδική) και η κίνηση γίνεται επιταχυνόμενη. Τώρα η κίνηση οφείλεται και στις ανωστικές δυνάμεις αλλά και στην οριζόντια συνιστώσα της ποσότητας κίνησης. Η αλληλεπίδραση της ανοδικής με την καθοδική ροή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του αρχικού τερματικού ύψους της φλέβας. Μετά την αποκατάσταση μόνιμης ροής, το τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις γύρω από μια μέση τιμή που ορίζεται ως τελικό τερματικό ύψος Z_f . Το τελικό τερματικό ύψος παρατηρείται σε οριζόντια απόσταση X_z από το στόμιο. Η φλέβα επιστρέφει στο επίπεδο παροχέτευσης σε απόσταση X_i από το στόμιο λόγω της οριζόντιας συνιστώσας της ορμής. Όλες οι αποστάσεις μετρώνται ως προς σύστημα συντεταγμένων με αρχή στο κέντρο του στομίου παροχέτευσης της φλέβας. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν παραπάνω θα προσδιορισθούν από πειράματα που περιγράφονται παρακάτω. Προηγουμένως θα παρουσιαστούν χρήσιμες συσχετίσεις των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με βασικές παραμέτρους της ροής, όπως προκύπτουν με χρήση διαστατικής ανάλυσης.

3.2 Διαστατική Ανάλυση

Η διαστατική ανάλυση αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη των τυρβωδών ανωστικών φλεβών. Προϋποθέτει τη γνώση των παραμέτρων που διέπουν τη ροή καθώς και των διαστάσεων αυτών. Η διαστατική ανάλυση βασίζεται στην ομοιογένεια των διαστάσεων μεταξύ δυο μελών μιας εξίσωσης και παρόλο που δεν οδηγεί σε ακριβή ποσοτικό συσχετισμό των μεταβλητών, αποτελεί πολύτιμο οδηγό για την περαιτέρω μελέτη του φαινομένου.

Τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη ροή των φλεβών είναι η ογκομετρική παροχή q_0 , η ειδική ποσότητα κίνησης (ειδική ορμή) M_0 και η ειδική άνωση B_0 . Ειδικότερα, οι βασικές παράμετροι των διδιάστατων φλεβών ορίζονται ως εξής (Fischer et al. 1979):

Πίνακας 3-1: Βασικές Παράμετροι της ροής τυρβωδών ανωστικών φλεβών

Μέγεθος	Ορισμός
Ογκομετρική παροχή	$q_o = w V_o$
Ειδική ποσότητα κίνησης	$M_o = w V_o^2$
Ειδική άνωση	$B_o = w V_o g \frac{\Delta\rho_o}{\rho_\alpha}$

όπου:

- w είναι το πλάτος της σχισμής του στομίου,
- V_o είναι η ταχύτητα εκροής της φλέβας από το στόμιο,
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας και
- $\Delta\rho_o$ η διαφορά πυκνότητας των ρευστών της φλέβας και του αποδέκτη στην εκροή: $\Delta\rho_o = \rho_o - \rho_\alpha$, όπου ρ_α η πυκνότητα του αποδέκτη και ρ_o η πυκνότητα της φλέβας.

Η ροή χαρακτηρίζεται ως στρωτή ή τυρβώδης ανάλογα με τον αριθμό Reynolds, ο οποίος για διδιάστατες φλέβες μήκους L και πλάτους w ορίζεται ως εξής:

$$Re_o = \frac{V_o 4 R_h}{\nu} = \frac{V_o 2 (L w)}{(L + w)\nu} \quad (3-1)$$

όπου ν η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού ($\nu \approx 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Ο πυκνομετρικός αριθμός F_o αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για τη μελέτη των ανωστικών φλεβών και ορίζεται ως εξής:

$$F_o = \frac{V_o}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho_o}{\rho_\alpha} w}} \quad (3-2)$$

Επιπλέον, για τις διδιάστατες φλέβες ορίζεται η κλίμακα μήκους l_M ως εξής:

$$l_M = M_o B_o^{-2/3} = w F_o^{4/3} \quad (3-3)$$

Για την παρουσίαση της διαστατικής ανάλυσης του υπό μελέτη φαινομένου ακολουθούμε τη διαστατική ανάλυση για κυκλικές κεκλιμένες φλέβες

(Παπακωνσταντής 2009) και τη διαστατική ανάλυση για διδιάστατες κατακόρυφες φλέβες (Zhang & Baddour 1997).

Όπως προαναφέρθηκε, οι τρεις βασικές παράμετροι της ροής είναι η ογκομετρική παροχή, η ειδική ποσότητα κίνησης και η ειδική άνωση. Με τη βοήθεια των παραμέτρων αυτών περιγράφονται οι ιδιότητες της ροής της φλέβας (Fischer et al. 1979). Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής συσχετίζονται μόνο με τις βασικές αυτές παραμέτρους, εφόσον η ροή είναι τυρβώδης και οι δυνάμεις συνεκτικότητας θεωρούνται αμελητέες. Οπότε για το τελικό τερματικό ύψος Z_f έχουμε:

$$Z_f = f(q_o, M_o, B_o, \theta_o) \quad (3-4)$$

Οι Campbell & Turner (1989) εφαρμόζοντας διαστατική ανάλυση στη σχέση (3-4), κατέληξαν στην παρακάτω σχέση για εκροή υπό συγκεκριμένη γωνία θ_o :

$$Z_f = \text{σταθ.} \cdot M_o B_o^{-2/3} = \text{σταθ.} \cdot w F_o^{4/3} \quad (3-5)$$

Η σχέση (3-5) μπορεί να γραφεί και ως :

$$\frac{Z_f}{w} = \text{σταθ.} \cdot F_o^{4/3} \quad (3-6)$$

ή λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό της κλίμακας μήκους l_M ως:

$$\frac{Z_f}{l_M} = \text{σταθ.} \quad (3-7)$$

Η σταθερά στις σχέσεις (3-6) και (3-7) είναι συνάρτηση της γωνίας παροχέτευσης.

Παρόμοιες σχέσεις διατυπώνονται για όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής όπως φαίνεται στον Πίνακα 3-2. Οι σταθερές C_i για τις διάφορες γωνίες θ_o θα προσδιορισθούν από τα πειράματα.

Πίνακας 3-2: Σχέσεις προσδιορισμού των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της διδιάστατης φλέβας με βάση τη διαστατική ανάλυση.

Παράμετρος	Σύμβολο	Αδιαστατοποίηση ως προς w	Αδιαστατοποίηση ως προς l_M
Αρχικό τερματικό ύψος	Z_i	$\frac{Z_i}{w} = C_1(\theta_o) F_o^{4/3}$	$\frac{Z_i}{l_M} = C_1(\theta_o)$
Τελικό τερματικό ύψος	Z_f	$\frac{Z_f}{w} = C_2(\theta_o) F_o^{4/3}$	$\frac{Z_f}{l_M} = C_2(\theta_o)$
Οριζόντια θέση τελικού τερματικού ύψους	X_z	$\frac{X_z}{w} = C_3(\theta_o) F_o^{4/3}$	$\frac{X_z}{l_M} = C_3(\theta_o)$
Οριζόντια θέση επιστροφής άνω ορίου της φλέβας	X_i	$\frac{X_i}{w} = C_4(\theta_o) F_o^{4/3}$	$\frac{X_i}{l_M} = C_4(\theta_o)$

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1 Γενικά

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 4-1. Τα κυριότερα τμήματά της είναι τα εξής (Παπακωνσταντής 2009) :

1. Κύρια δεξαμενή, όπου διεξάγονται τα πειράματα.
2. Δεξαμενή προετοιμασίας του διαλύματος της φλέβας.
3. Δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας.
4. Αντλία ανακυκλοφορίας του διαλύματος της φλέβας.
5. Διδιάστατο στόμιο από το οποίο παροχετεύεται διάλυμα στην κύρια δεξαμενή.
6. Παροχόμετρο με το οποίο ρυθμίζεται η παροχή της φλέβας.
7. Ψηφιακή βιντεοκάμερα και προβολείς για την καταγραφή του πειράματος.



Σχήμα 4-1: Η εργαστηριακή εγκατάσταση.

4.2 Δεξαμενές

4.2.1 Κύρια Δεξαμενή

Η κύρια δεξαμενή στην οποία εκτελούνται τα πειράματα έχει διαστάσεις κάτοψης 3.0m x 1.5m και βάθος 1.0m. Έχει χαλύβδινο σκελετό και βρίσκεται σε ύψος περίπου 90cm από το έδαφος. Η εμπρόσθια (κύρια) πλευρά της (3.0m x 1.0m) αποτελείται από κρύσταλλο ώστε να επιτρέπεται η οπτική παρατήρηση της ροής. Επάνω σε αυτήν έχει χαραχθεί πλέγμα διαστάσεων 10 cm x 5 cm προκειμένου να διευκολύνεται η τοποθέτηση της κάμερας και να είναι δυνατή η μέτρηση των αποστάσεων κατά την επεξεργασία των πειραμάτων. Η μια πλαϊνή πλευρά της (1.5m x 1.0m) είναι επίσης διαφανής ώστε να επιτρέπει την παρατήρηση και αποτελείται από Plexiglass, ενώ οι άλλες δυο πλευρές αποτελούνται από χάλυβα. Στο Σχήμα 4-2 εικονίζεται η κύρια δεξαμενή.



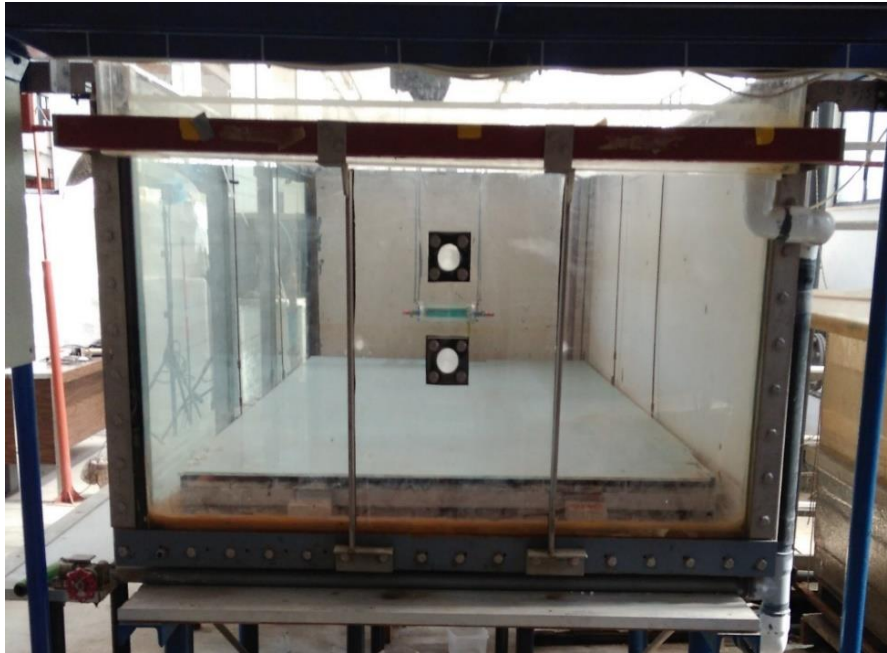
Σχήμα 4-2: Η κύρια δεξαμενή

Στη δεξαμενή έχει τοποθετηθεί νέος πυθμένας, του οποίου η άνω επιφάνεια απέχει 10cm από τον παλιό-αρχικό πυθμένα. Ο νέος πυθμένας είναι οριζόντιος, κατασκευασμένος από plexiglass και έχει πάχος 5cm. Βέβαια, οι μετρήσεις που

πραγματοποιήθηκαν βασίστηκαν στο χαραγμένο πλέγμα επάνω στην κύρια όψη της δεξαμενής, το οποίο έχει ως αφετηρία μετρήσεων των κατακόρυφων αποστάσεων τον αρχικό πυθμένα.

Στον παλαιό πυθμένα της δεξαμενής υπάρχει οπή που εξυπηρετεί την εκκένωσή της και μέσω σωλήνα PVC διοχετεύεται το νερό στην αποχέτευση.

Η κύρια δεξαμενή φέρει υπερχειλιστή κατά μήκος της πλάγιας πλευράς της σε ύψος 1m από τον πυθμένα. Ο υπερχειλιστής είναι λεπτής στέψης και επιτρέπει την ομοιόμορφη υπερχείλιση της δεξαμενής. Μέσω καναλιού το υπερχειλίζον νερό διοχετεύεται σε πλαστικό σωλήνα και καταλήγει στην αποχέτευση. Στο Σχήμα 4-3 φαίνεται η πλευρική όψη της δεξαμενής και το κανάλι υπερχείλισης.



Σχήμα 4-3: Πλευρική όψη κύριας δεξαμενής και υπερχειλιστής

4.2.2 Δεξαμενή Προετοιμασίας Διαλύματος

Η δεξαμενή προετοιμασίας (Σχήμα 4-4) διαλύματος (αλατόνερου) αποτελείται από πλαστικό υλικό και έχει χωρητικότητα 1 m³. Εδώ αναμιγνύεται νερό με αλάτι και το διάλυμα χρωματίζεται με ειδική ουσία (food dye). Η δεξαμενή έχει μια οπή κοντά στον πυθμένα η οποία οδηγεί μέσω σωλήνα το υγρό στην αποχέτευση. Από μια δεύτερη οπή εξάγεται διάλυμα το οποίο μέσω αντλίας και σωλήνα επανέρχεται στην

επιφάνεια της δεξαμενής ώστε να επιτυγχάνεται ανακυκλοφορία και κατ' επέκταση ομογενοποίηση του διαλύματος.



Σχήμα 4-4: Δεξαμενή Προετοιμασίας Διαλύματος, Αντλία ανακυκλοφορίας και Δικλείδες

4.2.3 Δεξαμενή Τροφοδοσίας

Αφού ομογενοποιηθεί το διάλυμα της φλέβας, με δικλείδα διακόπτεται η ανακυκλοφορία του στη δεξαμενή προετοιμασίας και μέσω αντλίας και σωλήνα, διοχετεύεται στη δεξαμενή τροφοδοσίας, η οποία βρίσκεται σε ύψος περίπου 4m επάνω από τη δεξαμενή προετοιμασίας διαλύματος (Σχήμα 4-5).

Η δεξαμενή τροφοδοσίας παροχετεύει το διάλυμα της φλέβας είτε στην κύρια δεξαμενή είτε σε ογκομετρικό κύλινδρο. Είναι κατασκευασμένη από plexiglass και έχει χωρητικότητα 300 lt. Επιπλέον, φέρει σύστημα υπερχειλίσης μέσω του οποίου το πλεονάζον διάλυμα διοχετεύεται πίσω στην δεξαμενή προετοιμασίας μέσω

κατακόρυφου πλαστικού σωλήνα. Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται σταθερή η στάθμη της δεξαμενής τροφοδοσίας και κατ' επέκταση διατηρείται σταθερή η παροχή τροφοδοσίας της φλέβας στην κύρια δεξαμενή.



Σχήμα 4-5: Δεξαμενή Προετοιμασίας Διαλύματος (κάτω) και Δεξαμενή Τροφοδοσίας (επάνω)

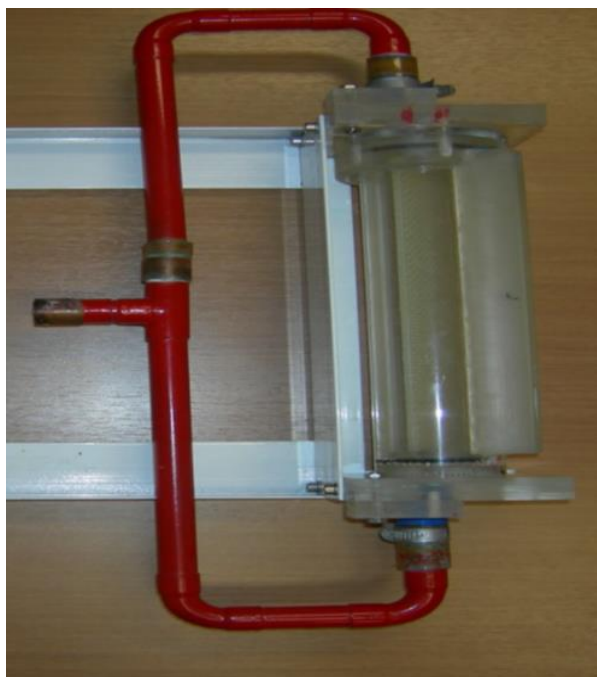
Τέλος, υπάρχει σπή και χαλκοσωλήνας που εξυπηρετούν την εκκένωσή της, διοχετεύοντας το διάλυμα, όχι στην αποχέτευση όπως συμβαίνει με τις άλλες δυο δεξαμενές, αλλά στη δεξαμενή προετοιμασίας.

4.3 Στόμιο Παροχέτευσης Φλέβας

Το διάλυμα της φλέβας (αλατόνερο) παροχετεύεται στο εσωτερικό της κύριας δεξαμενής μέσω στομίου. Το στόμιο (Σχήμα 4-6) αποτελείται μια διδιάστατη σχισμή διαστάσεων 20cm x 0.2cm. Επιπλέον, φέρει κύλινδρο, ο οποίος περιστρέφεται,

επιτρέποντας έτσι τη ρύθμιση της γωνίας εκροής της φλέβας από 0° ως 90°. Στα άκρα του κυλίνδρου υπάρχει χαραγμένη διαβάθμιση ανά 5°. Πρόκειται για το ίδιο στόμιο που χρησιμοποίησε η Βούστρου (2014) στα πειράματά της.

Στην παρούσα εργασία εκπονήθηκαν πειράματα για γωνίες 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 80°, 85°, 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 4-6: Διδιάστατο στόμιο εκροής διαλύματος.

4.4 Παροχόμετρα

Στην παρούσα πειραματική διάταξη υπάρχουν δύο παροχόμετρα (Σχήμα 4-7(α)). Το ένα μετρά παροχές από 40 lt/h έως 400 lt/h και το άλλο μετρά παροχές από 200 lt/h έως 1600 lt/h. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο το δεύτερο ροόμετρο (μεγάλο ροόμετρο).

Στο παροχόμετρο (ροόμετρο) υπάρχει εξαερωτής, πλαστικός σωλήνας μικρής διαμέτρου που επιτρέπει την εξαγωγή του αέρα. Όπως είναι προφανές, κατά τη διεξαγωγή του πειράματος, η ύπαρξη αέρα (φουσαλίδες) κατά την εκροή της φλέβας στην κύρια δεξαμενή πρέπει να αποφευχθεί. Η παροχή ρυθμίζεται μέσω δικλείδας, ενώ το ροόμετρο φέρει πλωτήρα του οποίου η θέση ισορροπίας διαβάζεται πάνω σε ειδική κλίμακα μέτρησης της παροχής (Σχήμα 4-7(β)).

Το διάλυμα της φλέβας φτάνει από τη δεξαμενή τροφοδοσίας μέσω χαλκοσωλήνα στην κύρια δεξαμενή και σε ογκομετρικό κύλινδρο (Σχήμα 4-8). Με δικλείδα επιτρέπεται η παροχέτευση διαλύματος είτε στον ογκομετρικό κύλινδρο, όπου είναι δυνατό να ρυθμιστεί η παροχή και να ληφθεί δείγμα διαλύματος, είτε στην κύρια δεξαμενή για τη διεξαγωγή πειράματος.

(α)



(β)

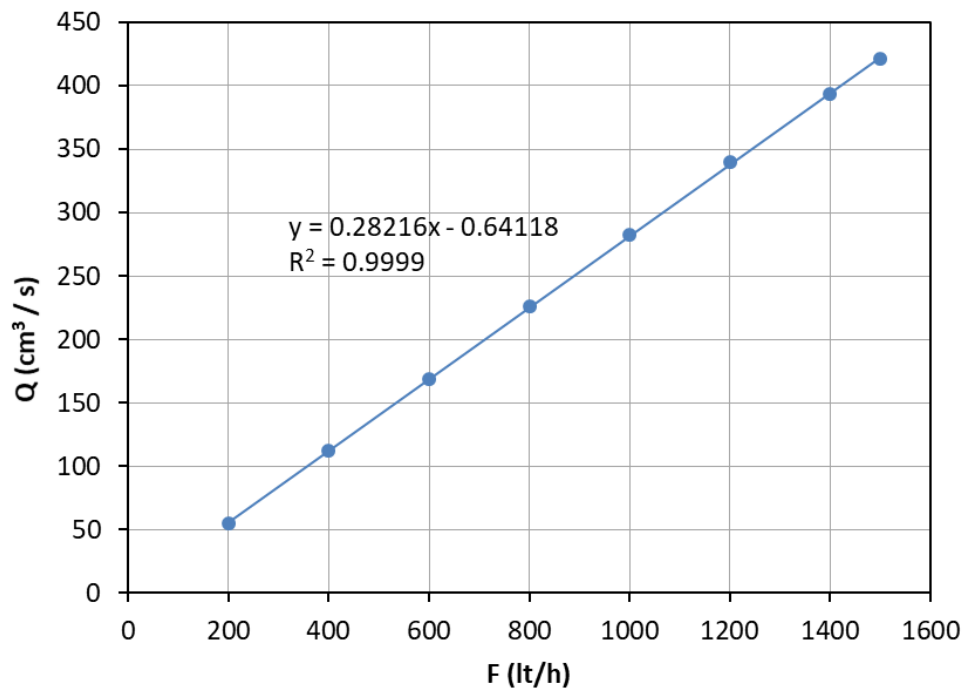


Σχήμα 4-7 (α): Παροχόμετρο μικρό (αριστερά) και παροχόμετρο μεγάλο (δεξιά),
(β): Παροχόμετρα και δικλείδες ρύθμισης παροχής.

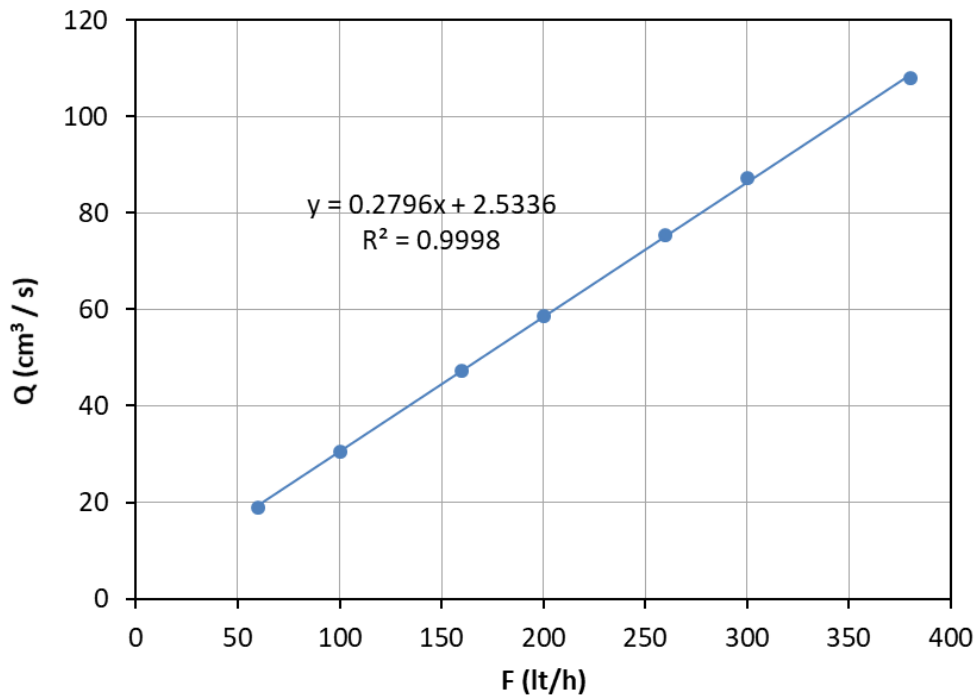


Σχήμα 4-8: Ογκομετρικός Κύλινδρος.

Πριν την εκκίνηση των πειραμάτων έγινε βαθμονόμηση και των δυο ροομέτρων. Παροχετεύοντας διάλυμα στον ογκομετρικό κύλινδρο με σταθερή παροχή (F η ένδειξη ροομέτρου) μετρήθηκε ο χρόνος Δt που απαιτείται για να ανέβει η στάθμη του κυλίνδρου κατά ΔH . Από τη διάμετρο του κυλίνδρου και τη μεταβολή της στάθμης υπολογίσθηκε ο όγκος του διαλύματος V και στη συνέχεια η αντίστοιχη παροχή Q . Για κάθε ένδειξη F έγιναν 5 - 6 διαφορετικές μετρήσεις, από τις οποίες προέκυψε μια μέση παροχή Q . Όπως φαίνεται στα Σχήματα 4-9 και 4-10, προέκυψε με μεγάλη ακρίβεια ($R^2 \approx 1$) γραμμική συσχέτιση της ένδειξης του οργάνου $F(\text{lt/h})$ με τη μέση παροχή $Q(\text{cm}^3/\text{s})$ που προέκυψε από μετρήσεις.



Σχήμα 4-9: Διάγραμμα Βαθμονόμησης Παροχής (Μεγάλο Ροόμετρο).



Σχήμα 4-10 : Διάγραμμα Βαθμονόμησης Παροχής (Μικρό Ροόμετρο).

Από τη γραμμική συσχέτιση προέκυψαν οι εξής εξισώσεις για το μεγάλο και για το μικρό ροόμετρο αντίστοιχα:

$$Q = 0.28216 F - 0.64118 \quad \& \quad Q = 0.2796 F + 2.5336$$

όπου F η ένδειξη του ροομέτρου (lt/h) και Q η παροχή σε cm³/s.

Στον Πίνακα 4-1 για ένα τυχαίο σύνολο πειραμάτων παρατίθενται οι ενδείξεις του ροομέτρου (έχοντας μετατρέψει τα lt/h σε cm³/s) καθώς και οι παροχές Q^{calibr} (cm³/s) που προέκυψαν με εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης βαθμονόμησης του οργάνου. Παρατηρείται ότι η απόκλιση τους είναι της τάξης του 1%.

Πίνακας 4-1: Σύγκριση ένδειξης Ροομέτρου με Βαθμονομημένη Παροχή

Ημερομηνία	θ _ο	F (cm ³ /s)	Q ^{calibr} (cm ³ /s)	ΔQ (%)
10/07/17_EXP1	60	175.00	177.12	1.21
11/07/17_EXP1	60	219.44	222.27	1.29
11/07/17_EXP2	60	291.67	295.63	1.36
13/07/17_EXP1	60	125.00	126.33	1.06
17/07/17_EXP1	60	222.22	225.09	1.29

4.5 Εξοπλισμός Οπτικής Καταγραφής

Για την οπτική καταγραφή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή βιντεοκάμερα SONY HD του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής (Σχήμα 4-11) με ταχύτητα καταγραφής 25 fps (frames per second). Μετά την τοποθέτησή της σε τρίποδο, ρυθμίζεται τόσο η οριζοντίωσή της, όσο και η εστίασή της στο κέντρο του πλέγματος της εμπρόσθιας όψης της κύριας δεξαμενής. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται 2 προβολείς (Σχήμα 4-12) των 1000W για το φωτισμό της δεξαμενής και τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται οι σκιάσεις στο εσωτερικό της κύριας δεξαμενής.



Σχήμα 4-11: Βιντεοκάμερα

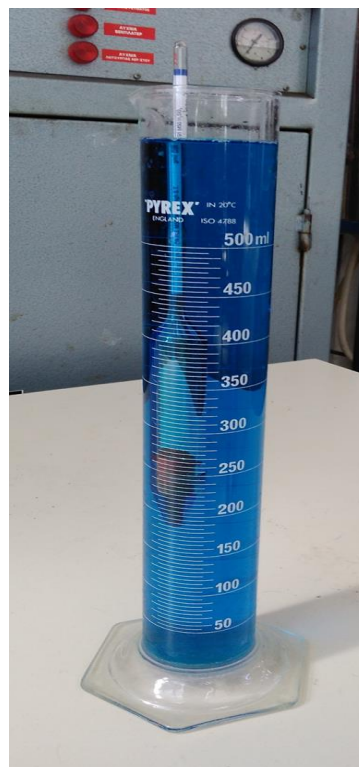
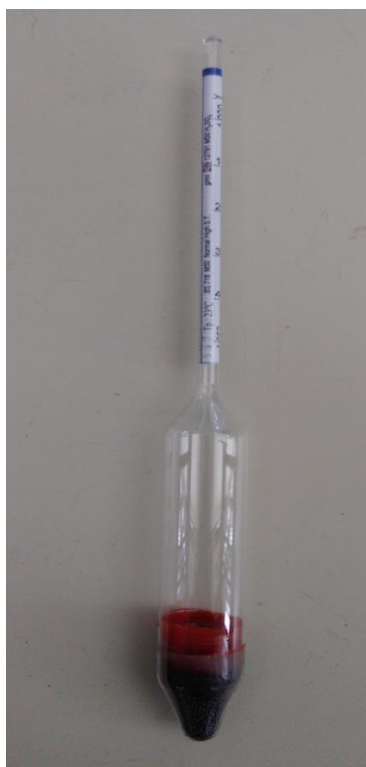


Σχήμα 4-12: Προβολέας

4.6 Βοηθητικά Όργανα Μέτρησης

4.6.1 Πυκνόμετρο

Το όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της πυκνότητας των διαλυμάτων ονομάζεται πυκνόμετρο (υδρόμετρο). Το πυκνόμετρο του εργαστηρίου (Σχήμα 4-13) έχει τα εξής χαρακτηριστικά: DIN 12791 M50 H₂SO₄ T 23° C. Το όργανο βυθίζεται στον ογκομετρικό κύλινδρο που περιέχει το αλατόνερο και αφού ισορροπήσει διαβάζεται η ένδειξη στη θέση της ελεύθερης επιφάνεια του υγρού. Η ένδειξη αυτή αποτελεί την πυκνότητα του διαλύματος.



Σχήμα 4-13: Πυκνόμετρο

Κάθε πυκνόμετρο είναι βαθμονομημένο ώστε να μετρά πυκνότητες διαλυμάτων σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, εν προκειμένω στους 23 °C. Επειδή, όμως, στην πράξη η θερμοκρασία των διαλυμάτων συνήθως διαφέρει από αυτήν την τιμή, για λόγους ακριβείας και επαλήθευσης, η τιμή της πυκνότητας υπολογίζεται από συγκεκριμένη μεθοδολογία (παράγραφος 4.7) που παρουσιάσθηκε σε προηγούμενη εργασία (Παπακωνσταντής 2009). Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί πως οι διαφορές των τιμών της πυκνότητας που προκύπτουν από τη μέτρηση με το πυκνόμετρο και από τον υπολογισμό μέσω της μεθοδολογίας είναι πρακτικά αμελητέα.

4.6.2 Όργανο Μέτρησης Αλατότητας

Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση τόσο της αλατότητας όσο και της θερμοκρασίας του εκάστοτε διαλύματος είναι το YSI 30, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4-14. Είναι φορητό και φέρει ψηφιακή οθόνη ένδειξης των μετρήσεων. Επιπλέον, φέρει καλώδιο, το άκρο του οποίου καταλήγει σε ειδικό αισθητήρα για τη μέτρηση της αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας. Το YSI 30 μετρά μέση αλατότητα σε ppt (kg/m³) και μέση θερμοκρασία σε °C ομογενών διαλυμάτων με ακρίβεια 0.1 ppt και 0.1 °C για την αλατότητα και τη θερμοκρασία, αντίστοιχα.



Σχήμα 4-14: Όργανο Μέτρησης Αλατότητας (YSI 30)

4.7 Υπολογισμός Πυκνότητας Διαλύματος

Όπως προαναφέρθηκε (παράγραφος 4.6.1), το πυκνόμετρο είναι βαθμονομημένο στους 23 °C. Παρακάτω παρουσιάζεται μεθοδολογία υπολογισμού της πυκνότητας αλατόνευρου (Παπακωνσταντής 2009) με βάση την αλατότητα και τη θερμοκρασία η οποία εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία.

Η πυκνότητα νερού μηδενικής αλατότητας (S), μπορεί να υπολογιστεί συναρτήσει της θερμοκρασίας του (T °C) ως εξής, σύμφωνα με τους Streeter et.al (1998):

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

Η πυκνότητα θαλάσσιου νερού αλατότητας S (ppt) και θερμοκρασίας (T °) μπορεί να προσδιορισθεί με χρήση του πίνακα Fischer et al. (1979) ή εναλλακτικά από τη σχέση:

$$\rho(S, T) = \rho_W(T) + S \left(0.824493 - \frac{4.0899}{10^3} T + \frac{7.6438}{10^5} T^2 - \frac{8.2467}{10^7} T^3 + \frac{5.3875}{10^9} T^4 \right) + S^{3/2} \left(-\frac{5.72466}{10^3} + \frac{1.0227}{10^4} T - \frac{1.6546}{10^6} T^2 \right) + S^2 \frac{4.8314}{10^4} \quad (4-2)$$

Οι σχέσεις (4-1) και (4-2) παρέχουν την πυκνότητα θαλάσσιου νερού με αλατότητα S και θερμοκρασία T, οπότε για να προσδιοριστεί στη συνέχεια η πυκνότητα αλατόνευρου αφαιρείται η ποσότητα $\Delta\rho_0 = 0.0398S$ (Παπακωνσταντής 2009). Αυτή η διαδικασία εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό της πυκνότητας τόσο του διαλύματος της φλέβας όσο και του διαλύματος του αποδέκτη και βρέθηκε πολύ καλή συμφωνία με μετρήσεις που λήφθηκαν με το πυκνόμετρο (βλ. παράγραφο 4.6.1).

5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

5.1 Γενικά

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας προκειμένου να προσδιορισθούν τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς της φλέβας, εκπονήθηκαν πειράματα οπτικοποίησης της ροής (flow visualization) βαρύτερης φλέβας σε ελαφρύτερο αποδέκτη. Διάλυμα χρωματισμένου αλατόνερου παροχετεύεται υπό διάφορες γωνίες και με διαφορετική κάθε φορά παροχή, από τον πυθμένα προς την ελεύθερη επιφάνεια ακίνητου και ομογενή αποδέκτη.

Αποδέκτης είναι το νερό της κύριας δεξαμενής της πειραματικής εγκατάστασης. Η εκροή της φλέβας στον αποδέκτη γίνεται από σχισμή πλάτους $w = 0.2 \text{ cm}$ και μήκους $L = 20 \text{ cm}$. Ο λόγος των διαστάσεων της σχισμής είναι:

$$\frac{L}{w} = \frac{20 \text{ cm}}{0.2 \text{ cm}} = 100$$

που μπορεί να θεωρηθεί επαρκής για την επίτευξη διδιάστατης ροής.

5.2 Περιγραφή Εκτέλεσης Πειραμάτων

Η εκτέλεση κάθε πειράματος ήταν αποτέλεσμα ενός συνδυασμού βημάτων, τα οποία κατά χρονική σειρά είναι τα εξής:

- *Πλήρωση (γέμισμα) κύριας δεξαμενής:*

Η διαδικασία πλήρωσης της δεξαμενής με νερό διαρκεί περίπου 1 ώρα.

- *Καθορισμός παροχής της φλέβας:*

Σε φύλλο επεξεργασίας Excel, έχει δημιουργηθεί πίνακας με τις παραμέτρους του πειράματος (ημερομηνία, παροχή, θερμοκρασία και αλατότητα διαλύματος, θερμοκρασία και αλατότητα αποδέκτη, πυκνομετρικός αριθμός Froude, αριθμός Reynolds). Στο στάδιο αυτό προσδιορίζεται η αναγκαία παροχή εκροής της φλέβας στον αποδέκτη ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός πυκνομετρικός αριθμός Froude. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκαν πειράματα με εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude από 15 έως 55 με βήμα 5 περίπου. Ωστόσο στο

πείραμα δεν είναι δυνατόν να επιτευχθεί ακριβώς ο αριθμός Froude που είχε καθορισθεί, αφού μπορεί να υπάρξει μεταβολή της παροχής σχεδιασμού της φλέβας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η αλατότητα του αποδέκτη ήταν 0.1-0.2 ppt, ενώ του διαλύματος της φλέβας ήταν μεταξύ 10-20 ppt έτσι ώστε η διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho_o/\rho_a$ μεταξύ του αποδέκτη και του διαλύματος της φλέβας να είναι μεγαλύτερη από 0.65%. Για δεδομένη διαφορά πυκνότητας $\Delta\rho_o/\rho_a$, δίνονται διάφορες τιμές στην παροχή Q και ελέγχεται η τιμή του πυκνομετρικού αριθμού F_o που προκύπτει. Με βάση τον επιθυμητό αριθμό F_o και μετά από δοκιμές προκύπτει η παροχή σχεδιασμού Q.

- *Προετοιμασία διαλύματος αλατόνευρου:*

Κατά τη διάρκεια πλήρωσης της κύριας δεξαμενής παρασκευάζεται το διάλυμα της φλέβας. Η δεξαμενή προετοιμασίας του διαλύματος γεμίζει με νερό, ενώ παράλληλα και σταδιακά διοχετεύεται μαγειρικό αλάτι. Γίνεται ανάδευση του διαλύματος, ενώ ταυτόχρονα λειτουργεί αντλία, η οποία αντλεί διάλυμα από τον πυθμένα της δεξαμενής και το επαναφέρει στην επιφάνειά της με εύκαμπτο σωλήνα. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται ανακυκλοφορία του διαλύματος και διευκολύνεται η διάλυση του άλατος στο νερό. Με το όργανο YSI μετριέται η αλατότητα του διαλύματος σε διάφορα σημεία της δεξαμενής, τόσο κοντά στην επιφάνεια όσο και βαθύτερα, στον πυθμένα. Διοχετεύεται σταδιακά μαγειρικό αλάτι και η ανάδευση συνεχίζεται ταυτόχρονα με τη λειτουργία της αντλίας μέχρι να επιτευχθεί επιθυμητή τιμή αλατότητας.

Σε ένα δοχείο αποσπάται ποσότητα από το διάλυμα. Σε αυτό προστίθεται μια κουταλιά μαγειρικής βαφής (food dye) σε μορφή σκόνης χρώματος μπλε, έτσι ώστε κατά τη διοχέτευσή της στον αποδέκτη (κύρια δεξαμενή) η φλέβα να είναι ορατή. Αφού διαλυθεί πλήρως η βαφή στο διάλυμα του δοχείου, το διάλυμα διοχετεύεται στη δεξαμενή προετοιμασίας. Η διαδικασία χρωματισμού και ομογενοποίησης ολόκληρου του διαλύματος της φλέβας διαρκεί περίπου 45 λεπτά. Κλείνοντας την κατάλληλη δικλείδα, διακόπτεται η ανακυκλοφορία στη δεξαμενή προετοιμασίας και η αντλία διοχετεύει το διάλυμα στη δεξαμενή τροφοδοσίας.

- *Ρύθμιση παροχής της φλέβας:*

Εφόσον η δεξαμενή διεξαγωγής των πειραμάτων (κύρια δεξαμενή) πληρωθεί με νερό και υπερχειλίσει, κλείνουν οι αντίστοιχες δικλείδες τροφοδοσίας. Έχοντας, επιπλέον, υπερχειλίσει και η δεξαμενή τροφοδοσίας της φλέβας, ξεκινά η διαδικασία ρύθμισης της παροχής της φλέβας (αλατόνευρο) στον αποδέκτη. Μετά το πέρας ενός πειράματος γίνεται παροχέτευση διαλύματος αλατόνευρο μέσα στην κύρια δεξαμενή και ρυθμίζεται στο παροχόμετρο η παροχή σχεδιασμού. Η κύρια δεξαμενή είναι ήδη χρωματισμένη από το προηγούμενο πείραμα, οπότε δεν δημιουργεί πρόβλημα η παροχέτευση χρωματισμένου διαλύματος προκειμένου να ρυθμιστεί η παροχή του επόμενου πειράματος. Όταν όμως πρόκειται για το πρώτο πείραμα της ημέρας, προκειμένου να παραμείνει το νερό του αποδέκτη διαυγές, το διάλυμα διοχετεύεται σε ογκομετρικό κύλινδρο που βρίσκεται δίπλα στην κύρια δεξαμενή και ρυθμίζεται η παροχή. Κατά τη ρύθμιση λαμβάνεται υπόψη ότι η ρυθμισμένη στον ογκομετρικό κύλινδρο παροχή είναι κάπως διαφορετική από την παροχή που θα διοχετευτεί τελικά στην κύρια δεξαμενή με το ίδιο άνοιγμα της δικλείδας ρύθμισης της παροχής.

- *Μέτρηση αλατότητας και θερμοκρασίας φλέβας και αποδέκτη:*

Με το όργανο YSI 30 μετριοούνται η θερμοκρασία και η αλατότητα του νερού του αποδέκτη. Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών T_a και S_a αντίστοιχα, που αναγράφονται στην οθόνη του οργάνου καταγράφονται στο φύλλο επεξεργασίας excel. Έπειτα, συλλέγεται σε ένα δοχείο δείγμα από το διάλυμα αλατόνευρο και μετριοούνται και καταγράφονται οι τιμές αλατότητας S_o και θερμοκρασίας T_o της φλέβας.

- *Χρονική Αναμονή για να επέλθει ηρεμία στον αποδέκτη:*

Για να έλθει σε κατάσταση ηρεμίας (ακίνησια νερού) ο αποδέκτης χρειάζεται περίπου 1 ώρα. Παράλληλα προετοιμάζεται η κάμερα και ο φωτισμός. Συγκεκριμένα, η κάμερα τοποθετείται σε τρίποδο, οριζοντιώνεται και ρυθμίζεται έτσι ώστε να εστιάζει στο μέσο της δεξαμενής. Παραπλεύρως της δεξαμενής, τοποθετούνται 2 προβολείς φωτισμού σε κατάλληλο ύψος και γωνία έτσι ώστε να αποφεύγονται οι σκιάσεις στο εσωτερικό της κεντρικής δεξαμενής.

- *Παροχέτευση φλέβας αλατόνευρο στον αποδέκτη:*

Εφόσον έχει ηρεμήσει το νερό του αποδέκτη, γίνεται εκκίνηση παροχέτευσης της φλέβας μέσα στην κύρια δεξαμενή, ενώ η διαδικασία καταγράφεται από την κάμερα.

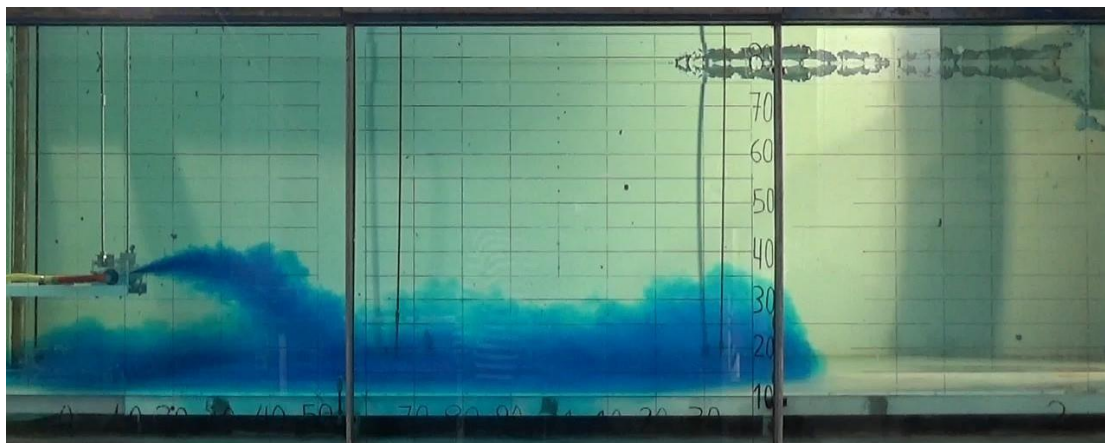
Η «βαρύτερη» φλέβα εισέρχεται με αρχική ταχύτητα στον «ελαφρύτερο αποδέκτη». Το μπλε της χρώμα την καθιστά ευδιάκριτη τόσο στον παρατηρητή όσο και στην οθόνη της κάμερας. Αφού φτάσει σε ένα μέγιστο ύψος αρχίζει να πέφτει προς τον πυθμένα, δημιουργώντας έτσι μια καμπύλη τροχιά. Μετά από δευτερόλεπτα, το υψηλότερο σημείο της είναι χαμηλότερο από το αρχικό μέγιστο ύψος. Η εκροή διαλύματος στη δεξαμενή συνεχίζεται μέχρι το ρεύμα πυκνότητας που εξαπλώνεται στον πυθμένα να φτάσει στο ύψος του στομίου.

- *Μέτρηση αλατότητας και θερμοκρασίας φλέβας και αποδέκτη:*

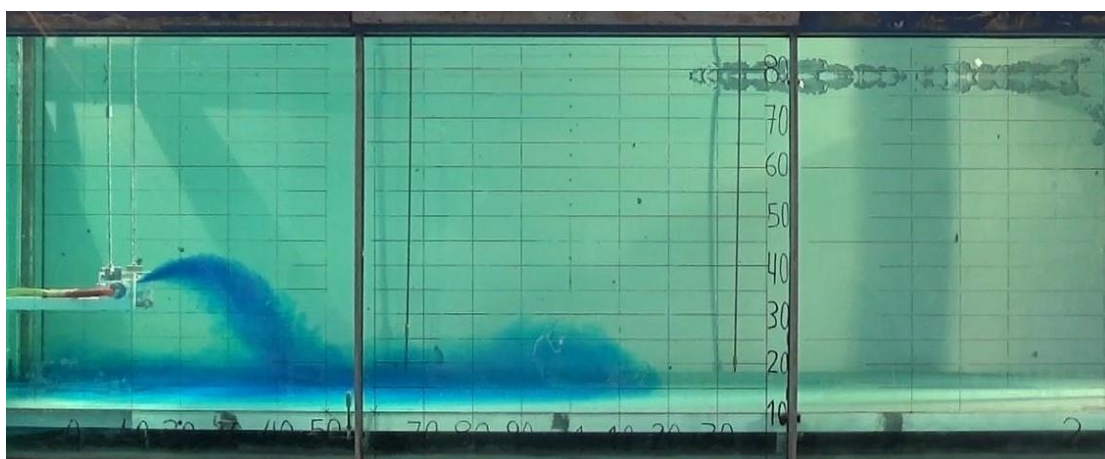
Αφού ολοκληρωθεί το πείραμα (και διακοπεί η εκροή φλέβας στον αποδέκτη), επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις αλατότητας και θερμοκρασίας των διαλυμάτων και καταγράφονται στο Excel, για λόγους επιβεβαίωσης των τιμών που είχαν ληφθεί πριν το πείραμα.

5.3 Στιγμιότυπα Πειραμάτων

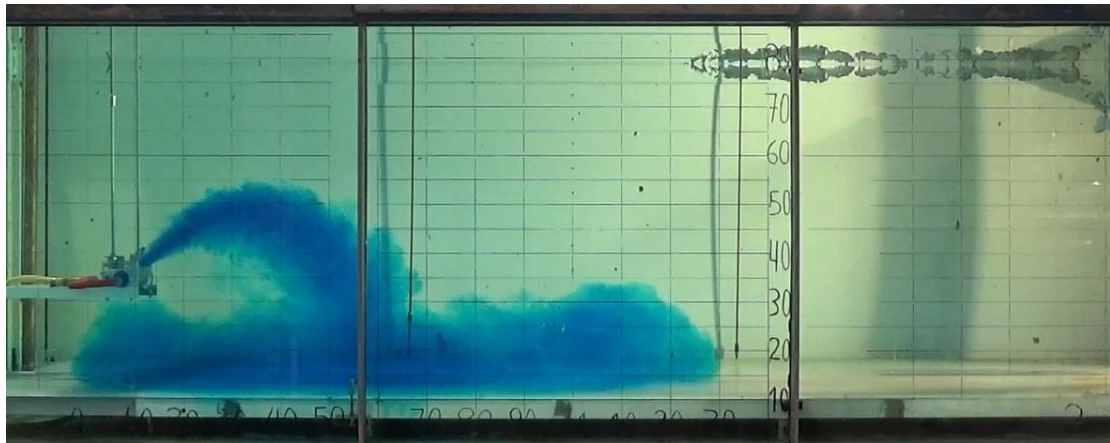
Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από τη διεξαγωγή πειραμάτων διδιάστατων φλεβών αρνητικής άνωσης για διάφορες γωνίες παροχέτευσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Για κάθε στιγμιότυπο δίδονται η γωνία εκροής της φλέβας ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η χρονική στιγμή (s) στην οποία λήφθηκε το συγκεκριμένο στιγμιότυπο και η ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος. Όλα τα στιγμιότυπα που ακολουθούν απεικονίζουν ροή σε μόνιμες συνθήκες (steady state).



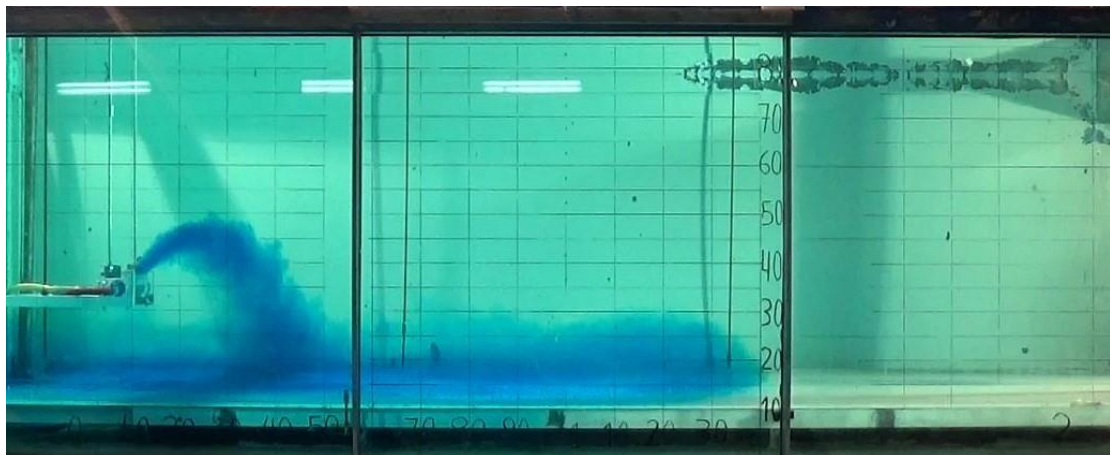
Σχήμα 5-1: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t=55.28$ s) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=15^\circ$ (πείραμα 15/12/17_EXR1).



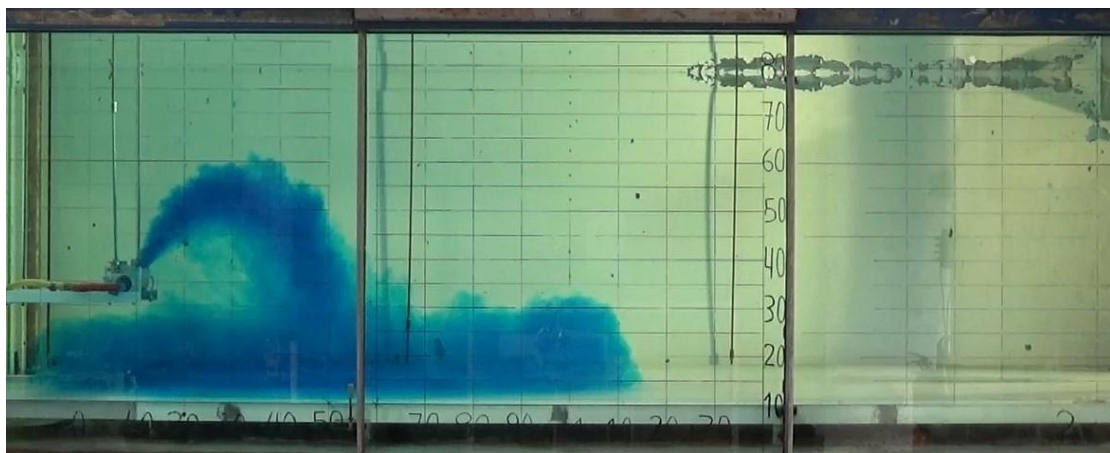
Σχήμα 5-2: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t=39$ s) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=30^\circ$ (πείραμα 18/09/17_EXR1).



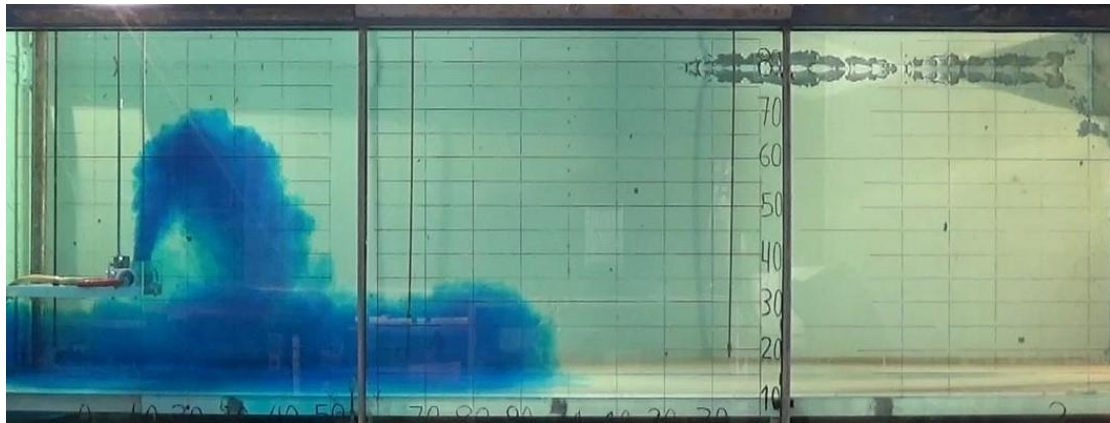
Σχήμα 5-3: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t = 44.08 \text{ s}$) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0 = 45^\circ$ (πείραμα 14/12/17_EXP1).



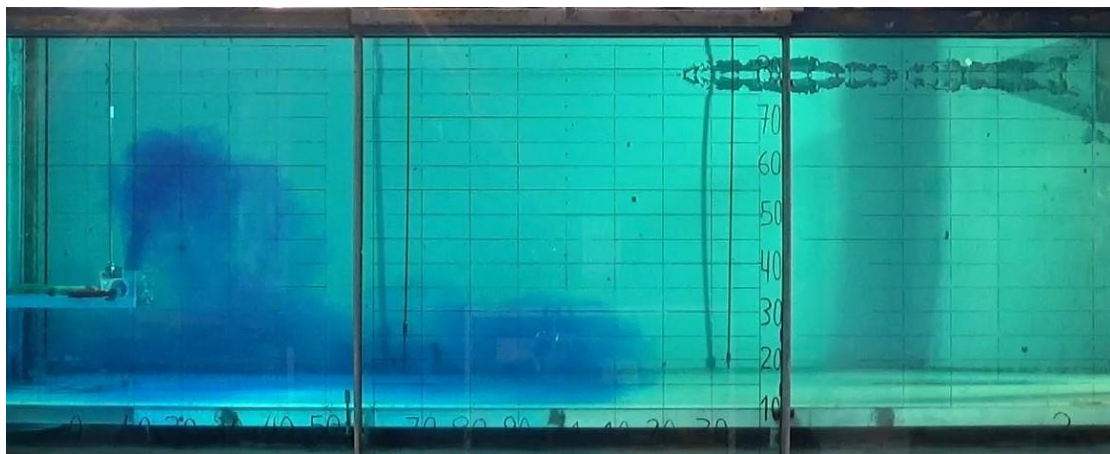
Σχήμα 5-4: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t = 61.56 \text{ s}$) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0 = 50^\circ$ (πείραμα 19/10/17_EXP3).



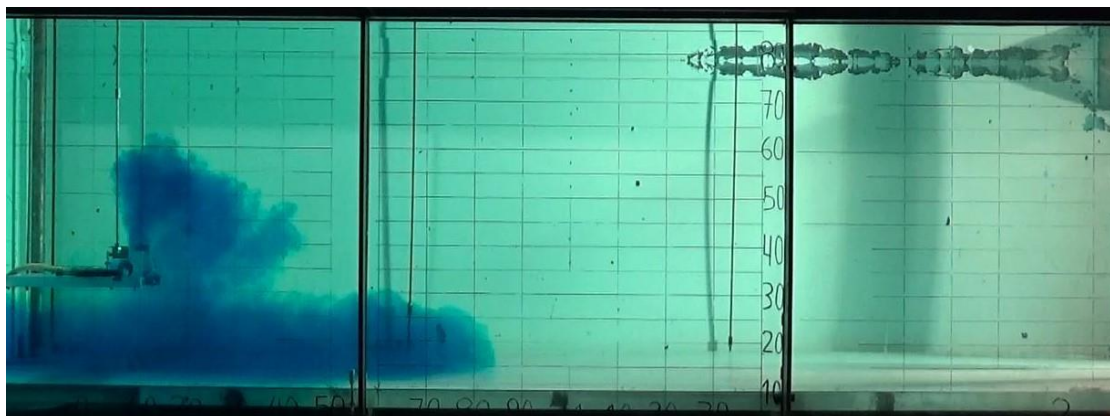
Σχήμα 5-5: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t = 39.88 \text{ s}$) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0 = 60^\circ$ (πείραμα 24/01/18_EXP1).



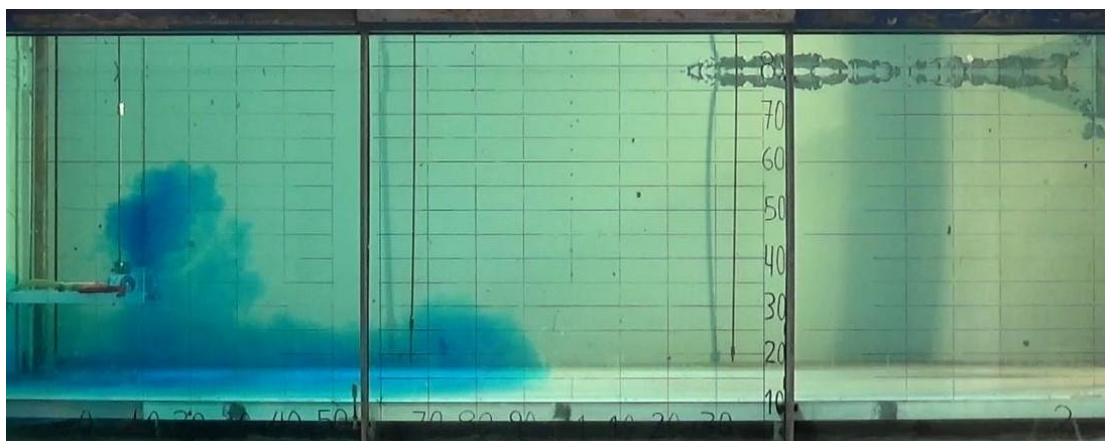
Σχήμα 5-6: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t=49.48\text{ s}$) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=75^\circ$ (πείραμα 24/11/17_EXP1).



Σχήμα 5-7: Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t=59.20\text{ s}$) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=80^\circ$ (πείραμα 06/02/18_EXP1).



Σχήμα 5-8 :Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t=41.84\text{ s}$) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=85^\circ$ (πείραμα 31/01/18_EXP3).



Σχήμα 5-9 :Χαρακτηριστικό στιγμιότυπο ροής ($t= 55.2 \text{ s}$) διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=90^\circ$ (πείραμα 07/03/18_EXP1).

5.4 Αρχικές Συνθήκες Πειραμάτων

Οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων παρατίθενται στους επόμενους πίνακες.

Πίνακας 5-1: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 15° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_0	$\Delta\rho_0/\rho_\alpha$ [%]	$Q \text{ (cm}^3/\text{s)}$	F_0	Re_0
1	15/12/17_EXP1	15	0.73	168.65	35.24	1670
2	15/12/17_EXP2	15	0.77	196.87	39.92	1949
3	15/12/17_EXP3	15	0.77	222.27	45.19	2201
4	15/12/17_EXP4	15	0.76	147.49	30.11	1460
5	16/12/17_EXP1	15	0.75	250.48	51.72	2480
6	16/12/17_EXP2	15	0.74	267.41	55.54	2648

Πίνακας 5-2: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 30° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_0	$\Delta\rho_0/\rho_\alpha$ [%]	Q (cm ³ /s)	F ₀	Re ₀
1	18/09/17_EXP1	30	1.04	131.97	23.14	1307
2	09/10/17_EXP1	30	1.01	253.30	44.97	2508
3	11/10/17_EXP1	30	0.98	208.16	37.62	2061
4	11/10/17_EXP2	30	0.99	154.55	27.75	1530
5	18/10/17_EXP1	30	0.96	84.01	15.34	832
6	19/10/17_EXP1	30	0.87	123.51	23.66	1223
7	22/01/18_EXP1	30	0.89	105.17	19.85	1041
8	23/01/18_EXP1	30	0.90	222.27	41.71	2201

Πίνακας 5-3: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 45° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_0	$\Delta\rho_0/\rho_\alpha$ [%]	Q (cm ³ /s)	F ₀	Re ₀
1	13/12/17_EXP1	45	0.65	210.98	46.83	2089
2	13/12/17_EXP2	45	0.72	126.33	26.57	1251
3	13/12/17_EXP3	45	0.72	112.22	23.61	1111
4	13/12/17_EXP4	45	0.71	146.08	30.91	1446
5	14/12/17_EXP1	45	0.73	191.23	39.95	1893
6	14/12/17_EXP2	45	0.72	168.65	35.42	1670
7	14/12/17_EXP3	45	0.72	239.19	50.35	2368
8	25/01/18_EXP1	45	0.93	230.73	42.77	2284
9	25/01/18_EXP2	45	0.93	288.57	53.37	2857

Πίνακας 5-4: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 50° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_ο	Δρ_ο/ρ_α [%]	Q (cm³/s)	F_ο	Re_ο
1	19/10/17_EXP2	50	0.89	134.80	25.48	1335
2	19/10/17_EXP3	50	0.90	140.44	26.44	1390
3	20/10/17_EXP1	50	0.76	137.62	28.23	1363
4	20/10/17_EXP2	50	0.75	117.87	24.25	1167
5	20/10/17_EXP3	50	0.75	140.44	28.95	1390
6	24/10/17_EXP1	50	0.76	209.57	42.83	2075
7	24/10/17_EXP2	50	0.78	225.09	45.61	2229
8	25/10/17_EXP1	50	0.76	247.66	50.68	2452
9	25/10/17_EXP2	50	0.77	140.44	28.65	1390
10	25/10/17_EXP3	50	0.76	174.30	35.75	1726
11	19/01/18_EXP1	50	0.91	174.30	32.69	1726
12	19/01/18_EXP2	50	0.90	205.34	38.53	2033
13	04/05/18_EXP1	50	1.40	281.52	42.53	2787
14	04/05/18_EXP2	50	1.40	267.41	40.39	2648

Πίνακας 5-5: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_ο	Δρ_ο/ρ_α [%]	Q (cm³/s)	F_ο	Re_ο
1	10/07/17_EXP1	60	1.03	177.12	31.18	1754
2	11/07/17_EXP1	60	1.12	222.27	37.43	2201
3	11/07/17_EXP2	60	1.15	295.63	49.30	2927
4	13/07/17_EXP1	60	0.75	126.33	26.05	1251
5	17/07/17_EXP1	60	1.06	225.09	39.11	2229
6	17/07/17_EXP2	60	1.04	143.26	25.07	1418
7	23/01/18_EXP2	60	0.90	179.94	33.93	1782
8	24/01/18_EXP1	60	0.91	218.03	40.81	2159
9	24/01/18_EXP2	60	0.93	235.81	43.61	2335
10	24/01/18_EXP3	60	0.92	253.30	47.04	2508

Πίνακας 5-6: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 75° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_0	$\Delta\rho_0/\rho_\alpha$ [%]	Q (cm ³ /s)	F ₀	Re ₀
1	21/11/17_EXP1	75	0.99	168.65	30.28	1670
2	24/11/17_EXP1	75	0.72	219.44	46.30	2173
3	24/11/17_EXP2	75	0.71	161.60	34.13	1600
4	12/12/17_EXP1	75	0.75	196.87	40.54	1949
5	12/12/17_EXP2	75	0.75	253.30	52.16	2508
6	12/12/17_EXP3	75	0.75	126.33	26.04	1251
7	12/12/17_EXP4	75	0.75	210.98	43.60	2089
8	25/01/18_EXP3	75	0.93	194.05	35.96	1921
9	30/01/18_EXP1	75	0.94	270.23	49.70	2676

Πίνακας 5-7: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 80° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_0	$\Delta\rho_0/\rho_\alpha$ [%]	Q (cm ³ /s)	F ₀	Re ₀
1	06/02/18_EXP1	80	0.89	227.91	43.18	2257
2	06/02/18_EXP2	80	0.89	208.16	39.44	2061
3	07/02/18_EXP1	80	0.89	168.65	31.92	1670
4	07/02/18_EXP2	80	0.89	182.76	34.59	1810
5	07/02/18_EXP3	80	0.89	189.82	35.91	1879
6	07/02/18_EXP4	80	0.88	218.03	41.41	2159
7	08/02/18_EXP1	80	0.86	134.80	25.94	1335
8	08/02/18_EXP2	80	0.86	112.22	21.55	1111
9	08/02/18_EXP3	80	0.87	148.90	28.46	1474
10	08/02/18_EXP4	80	0.87	129.15	24.78	1279

Πίνακας 5-8: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 85° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_ο	Δρ_ο/ρ_α [%]	Q (cm³/s)	F_ο	Re_ο
1	31/01/18_EXP1	85	0.93	165.83	30.75	1642
2	31/01/18_EXP2	85	0.93	196.87	36.52	1949
3	31/01/18_EXP3	85	0.93	225.09	41.67	2229
4	01/02/18_EXP1	85	0.92	129.15	24.03	1279
5	01/02/18_EXP2	85	0.92	182.76	33.97	1810
6	03/02/18_EXP1	85	0.91	154.55	28.86	1530
7	03/02/18_EXP2	85	0.91	217.47	40.61	2153
8	05/02/18_EXP1	85	0.88	119.28	22.75	1181
9	05/02/18_EXP2	85	0.90	185.58	34.99	1837
10	05/02/18_EXP3	85	0.89	143.26	27.10	1418

Πίνακας 5-9: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με γωνία παροχέτευσης 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο.

α/α	Ημερομηνία	θ_ο	Δρ_ο/ρ_α [%]	Q (cm³/s)	F_ο	Re_ο
1	05/03/18_EXP1	90	0.93	253.30	46.79	2508
2	05/03/18_EXP2	90	0.92	223.68	41.57	2215
3	05/03/18_EXP3	90	0.92	199.69	37.17	1977
4	05/03/18_EXP4	90	0.90	163.01	30.65	1614
5	07/03/18_EXP1	90	0.89	168.65	31.96	1670
6	07/03/18_EXP2	90	0.88	144.67	27.58	1432
7	07/03/18_EXP3	90	0.86	95.29	18.38	943
8	07/03/18_EXP4	90	0.86	163.01	31.42	1614

5.5 Προσδιορισμός Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών

Η παροχέτευση της φλέβας αλατόνευρου μέσα στον αποδέκτη καταγράφεται μέσω της κάμερας. Το ψηφιακό αυτό υλικό (βίντεο) μεταφέρεται από την κάμερα στον υπολογιστή. Στο λογισμικό Matlab χρησιμοποιώντας κατάλληλο αλγόριθμο εξαγωγής στιγμιοτύπων, εξάγονται από το βίντεο στιγμιότυπα (frames), δηλαδή το βίντεο μετατρέπεται σε ένα σύνολο από εικόνες. Συγκεκριμένα, μέσω του αλγορίθμου εξάγονται 25 στιγμιότυπα (frames) ανά δευτερόλεπτο.

Από το βίντεο προσδιορίζεται η χρονική στιγμή, στην οποία η φλέβα φτάνει στο αρχικό τερματικό ύψος Z_i . Έπειτα, προσδιορίζεται το στιγμιότυπο που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και αποθηκεύεται ως αρχείο εικόνας (μορφής jpg). Στο λογισμικό Gimp η εικόνα δέχεται την κατάλληλη επεξεργασία (προσαρμογή φωτεινότητας και αντίθεσης χρωμάτων) προκειμένου να είναι όσο το δυνατόν πιο ευκρινή τα όρια της φλέβας.

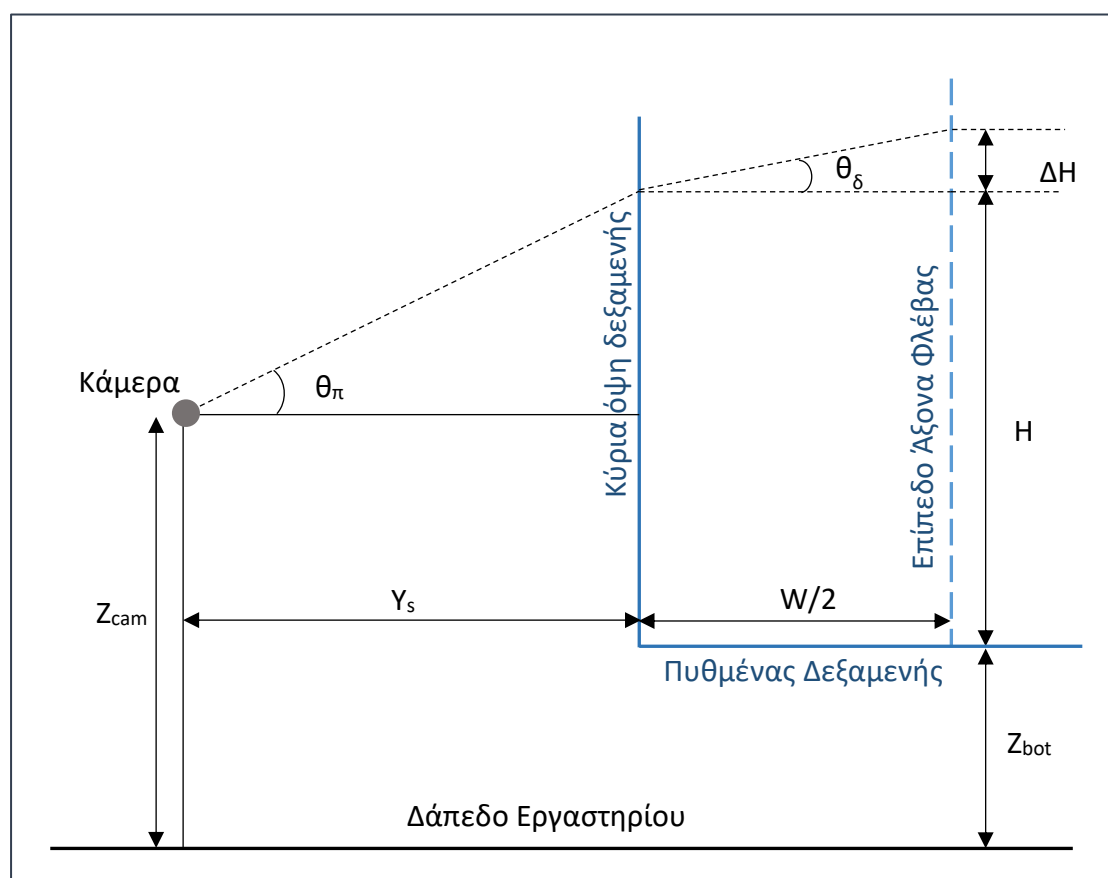
Η επεξεργασμένη εικόνα εισάγεται στο Autocad. Με τη βοήθεια του πλέγματος που είναι χαραγμένο πάνω στη μπροστινή όψη της δεξαμενής προσδιορίζεται η κλίμακα της φωτογραφίας. Μετριέται η κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο του στομίου έως το μέγιστο ύψος της φλέβας και η τιμή αυτή καταγράφεται στο φύλλο επεξεργασίας του excel.

Στο λογισμικό Matlab καταστρώθηκε αλγόριθμος που προσδιορίζει τη μέση εικόνα (average image) πολλών στιγμιοτύπων. Στον αλγόριθμο αυτόν εισάγονται στιγμιότυπα από τη στιγμή που η ροή της φλέβας φαίνεται να έχει μονιμοποιηθεί (έχει μειωθεί δηλαδή το αρχικό τερματικό ύψος ανόδου) μέχρι τη στιγμή που το ρεύμα πυκνότητας έχει φτάσει στο επίπεδο του στομίου. Η μέση εικόνα που προκύπτει υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία στο Gimp. Μετά την εισαγωγή της στο Autocad, ρυθμίζεται η κλίμακά της και μετριούνται η οριζόντια απόσταση X_z από το στόμιο έως τη θέση που αντιστοιχεί στο τελικό τερματικό ύψος και η οριζόντια απόσταση X_i από το στόμιο έως τη θέση επιστροφής του άνω ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Οι παραπάνω τιμές καταγράφονται στο φύλλο επεξεργασίας του excel. Όλες οι μετρήσεις γίνονται ως προς το κέντρο του στομίου.

Είναι φανερό ότι, το αρχικό τερματικό ύψος Z_i προσδιορίζεται από ένα μεμονωμένο στιγμιότυπο (frame), ενώ τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά προσδιορίζονται από τη μέση εικόνα (average image), η οποία είναι αντιπροσωπευτική της μόνιμης ροής.

5.6 Μεθοδολογία Διόρθωσης Αποστάσεων

Στις κατακόρυφες και οριζόντιες αποστάσεις που μετρήθηκαν στο Autocad υπεισέρχονται σφάλματα που οφείλονται: α) στο ότι το πλέγμα των μετρήσεων είναι χαραγμένο στην κύρια όψη της δεξαμενής, που βρίσκεται σε απόσταση από εκεί όπου εξελίσσεται η ροή της φλέβας, β) στο φαινόμενο της διάθλασης, και γ) στη θέση της κάμερας (Παπακωνσταντής 2009). Η μεθοδολογία διόρθωσης κατακόρυφων και οριζόντιων αποστάσεων έχει παρουσιασθεί σε προηγούμενη εργασία (Παπακωνσταντής 2009) και δίνεται συνοπτικά στη συνέχεια.



Σχήμα 5-10: Διόρθωση κατακόρυφων αποστάσεων (Παπακωνσταντής 2009).

Με τη βοήθεια του Σχήματος 5-10 περιγράφεται η μεθοδολογία διόρθωσης των κατακόρυφων αποστάσεων.

Έχουμε:

$$\tan(\theta_{\pi}) = \frac{H + Z_{bot} - Z_{cam}}{Y_s} \Rightarrow \theta_{\pi} = \tan^{-1}\left(\frac{H + Z_{bot} - Z_{cam}}{Y_s}\right)$$

Από τον νόμο του Snell προσδιορίζεται η γωνία θ_{δ} ως εξής:

$$n_{\alpha} \sin(\theta_{\pi}) = n_w \sin(\theta_{\delta}) \Rightarrow \theta_{\delta} = \sin^{-1}\left(\frac{n_{\alpha} \sin(\theta_{\pi})}{n_w}\right)$$

όπου n_{α} , n_w οι συντελεστές διάθλασης του νερού και του αέρα αντίστοιχα.

Η διόρθωση που αφορά στην κατακόρυφη απόσταση είναι:

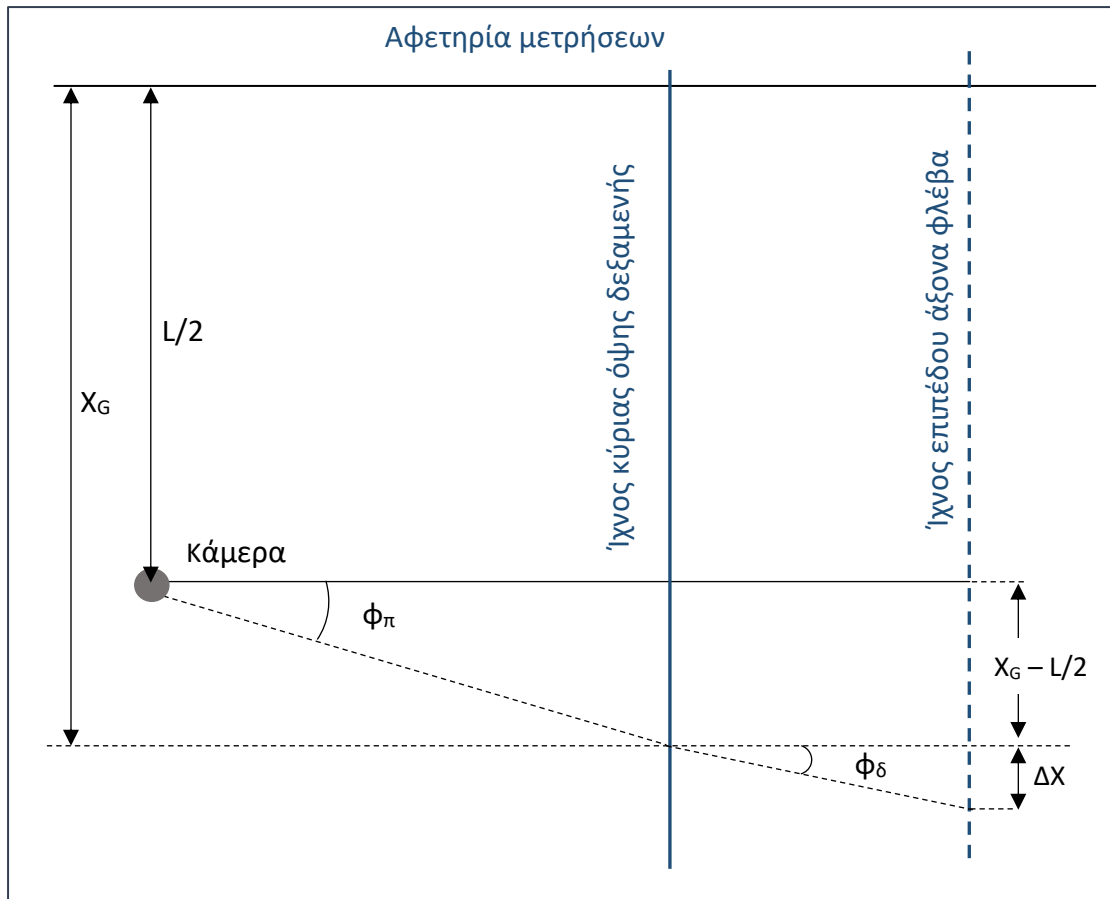
$$\frac{\Delta H}{\frac{W}{2}} = \tan(\theta_{\delta}) \Rightarrow \Delta H = \frac{W}{2} \tan(\theta_{\delta})$$

όπου W το πλάτος της δεξαμενής.

Η τιμή του μετρούμενου ύψους H επάνω στο πλέγμα της κύριας όψης της δεξαμενής διορθώνεται και η τελική τιμή του είναι:

$$H' = H + \Delta H .$$

Με όμοιο τρόπο διορθώνεται και η μετρούμενη οριζόντια απόσταση. Στο Σχήμα 5-11 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σχετική μεθοδολογία.



Σχήμα 5-11: Διόρθωση οριζόντιων αποστάσεων (Παπακωνσταντής 2009).

Έχουμε:
$$\tan(\varphi_{\pi}) = \frac{X_G - L/2}{Y_S} \Rightarrow \varphi_{\pi} = \tan^{-1}\left(\frac{X_G - L/2}{Y_S}\right)$$

Από τον νόμο του Snell προσδιορίζεται η γωνία θ_{δ} ως εξής:

$$n_{\alpha} \sin(\varphi_{\pi}) = n_w \sin(\varphi_{\delta}) \Rightarrow \varphi_{\delta} = \sin^{-1}\left(\frac{n_{\alpha} \sin(\varphi_{\pi})}{n_w}\right)$$

όπου n_{α} , n_w οι συντελεστές διάθλασης του νερού και του αέρα αντίστοιχα.

Η διόρθωση που αφορά στην οριζόντια απόσταση είναι:

$$\frac{\Delta X}{\frac{W}{2}} = \tan(\varphi_{\delta}) \Rightarrow \Delta X = \frac{W}{2} \tan(\varphi_{\delta})$$

όπου W το πλάτος της δεξαμενής.

Η τιμή της μετρούμενης οριζόντιας απόστασης X επάνω στο πλέγμα της κύριας όψης της δεξαμενής διορθώνεται και η τελική τιμή της είναι: $X'_G = X_G + \Delta X$.

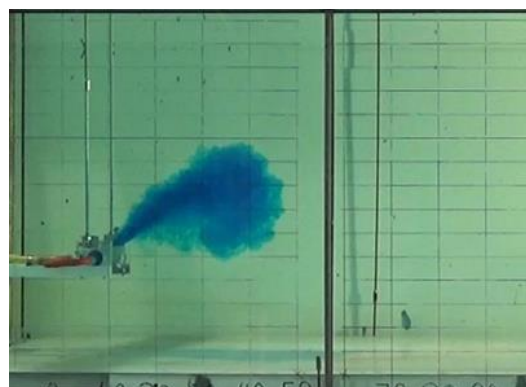
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

6.1 Οπτικές παρατηρήσεις

Από την οπτικοποίηση της ροής (flow visualization) προκύπτουν παρατηρήσεις σχετικές με τη ροή της φλέβας μέσα στον αποδέκτη. Παρατίθενται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από ένα πείραμα με γωνία εκροής $\theta_0 = 45^\circ$.



(α)



(β)



(γ)

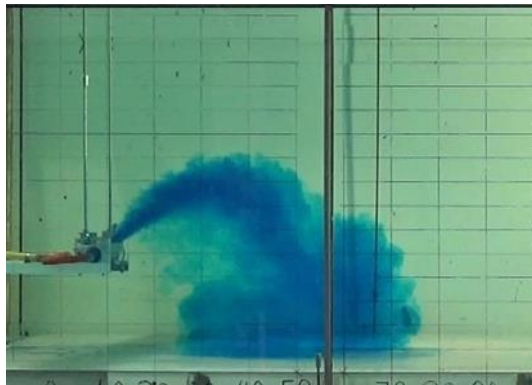


(δ)

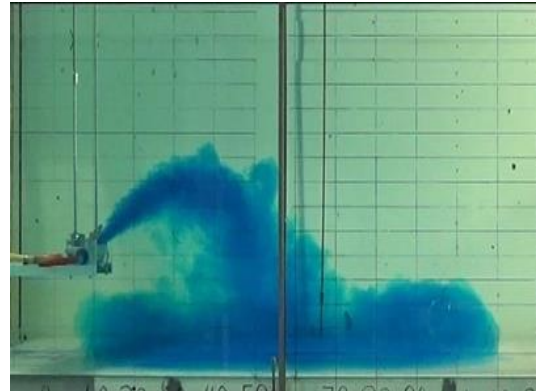
Σχήμα 6-1: Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0 = 45^\circ$. (α) $t = 3.6$ s, (β) $t = 9.16$ s, (γ) $t = 14.52$ s, (δ) $t = 21.64$ s, (ε) $t = 24.04$ s, (στ) 36.08 s από την έναρξη της εκροής (πείραμα 14/12/17_EXP1).

Κατά την εκκίνηση της παροχέτευσης της φλέβας στον αποδέκτη, η ροή παρουσιάζει ανοδική πορεία (Σχήμα 6-1(α)). Οι δυνάμεις ποσότητας κίνησης υπερτερούν των ανωστικών δυνάμεων. Η φλέβα ανυψώνεται σταδικά μέχρι το αρχικό τερματικό ύψος Z_i (Σχήμα 6-1(β)). Μετά από τη χρονική αυτή στιγμή (εν προκειμένω $t = 9.16$ s), η φορά της ροής αντιστρέφεται, και η φλέβα κινείται καθοδικά λόγω της αρνητικής άνωσης

(Σχήμα 6-1(γ)) και προσκρούει στον πυθμένα (Σχήμα 6-1(δ)) όπου εξαπλώνεται υπό τη μορφή ρεύματος πυκνότητας. Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής σε επόμενες χρονικές στιγμές φαίνονται στα Σχήματα 6-2α και 6-2β. Το Σχήμα 6-2β εικονίζει τη ροή σε μόνιμη κατάσταση.



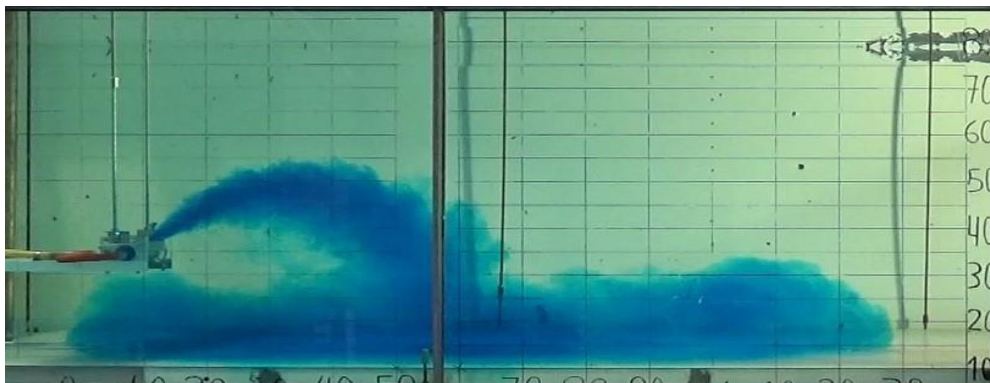
(α)



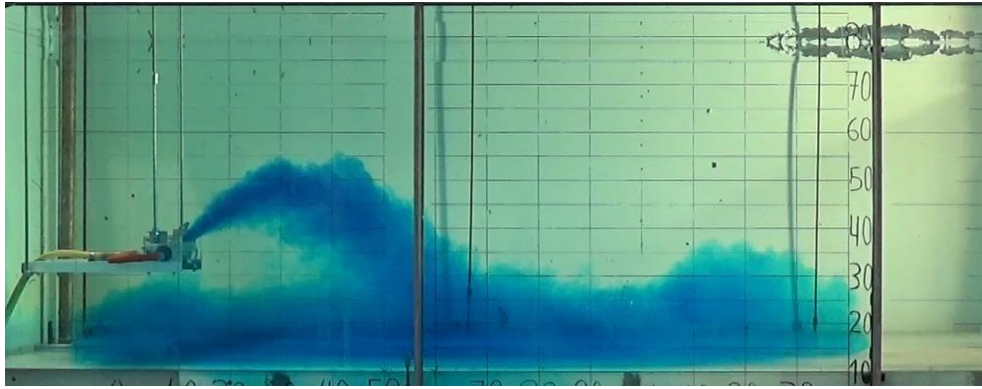
(β)

Σχήμα 6-2: Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=45^\circ$. (α) $t=24.04$ s, (β) $t=36.08$ s από την έναρξη της ροής (πείραμα 14/12/17_EXP1).

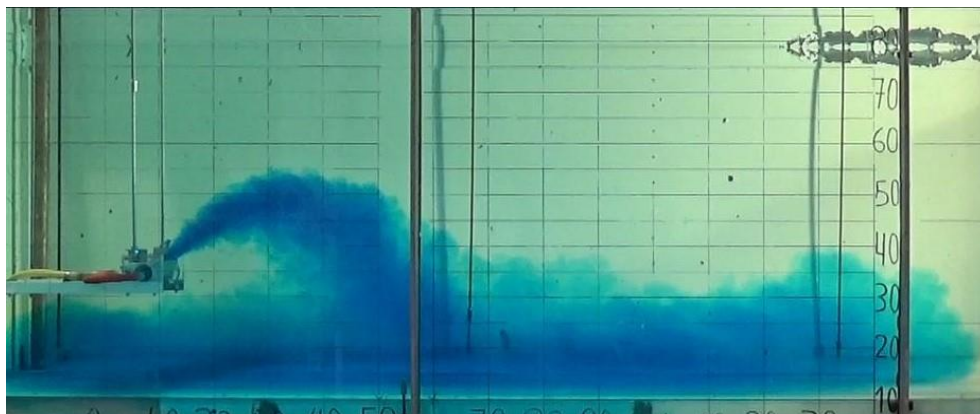
Περισσότερα στιγμιότυπα που εικονίζουν τη ροή φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνία 45° σε μόνιμες συνθήκες δίνονται στο Σχήμα 6-3.



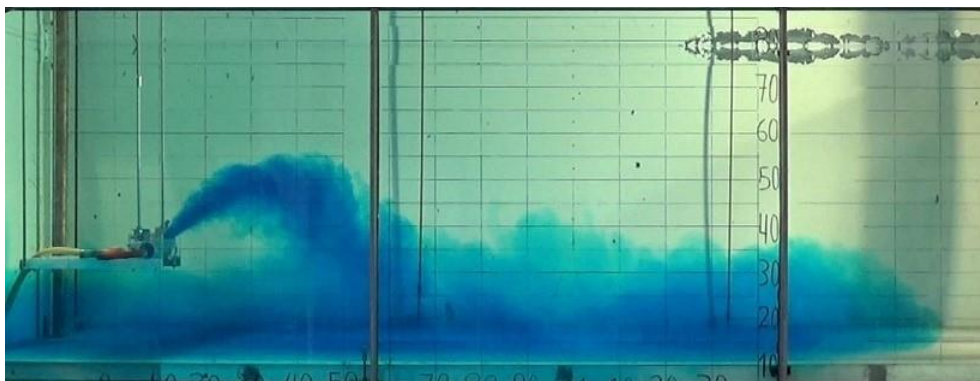
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Σχήμα 6-3: Χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της ροής διδιάστατης φλέβας αρνητικής άνωσης για γωνία εκροής $\theta_0=45^\circ$ (α) $t=43.44$ s, (β) $t= 50.28$ s, (γ) $t=58.12$ s, (δ) $t= 70.52$ s από την έναρξη της εκροής (πείραμα 14/12/17_EXP1).

Το τερματικό ύψος της φλέβας στη μόνιμη κατάσταση (Σχήμα 6-3) μειώθηκε σε σχέση με το αρχικό τερματικό ύψος Z_i (Σχήμα 6-1β). Ωστόσο, το τερματικό ύψος δεν είναι σταθερό, αλλά παρουσιάζει διακυμάνσεις όπως φαίνεται στα παραπάνω στιγμιότυπα (Σχήματα 6-3 (α), (β), (γ), (δ)) γύρω από μια μέση τιμή που την ορίζουμε

ως τελικό τερματικό ύψος Z_f . Επιπλέον, στην περιοχή του τελικού τερματικού ύψους Z_f παρατηρείται αποκόλληση μαζών που αποσπώνται από τη φλέβα και κινούνται προς τον πυθμένα. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί και στις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης (Parakonstantis et al. 2011a, Kikkert et al. 2007). Ταυτόχρονα παρατηρείται η ύπαρξη στροβίλων, γεγονός που επαληθεύει ότι η ροή είναι τυρβώδης.

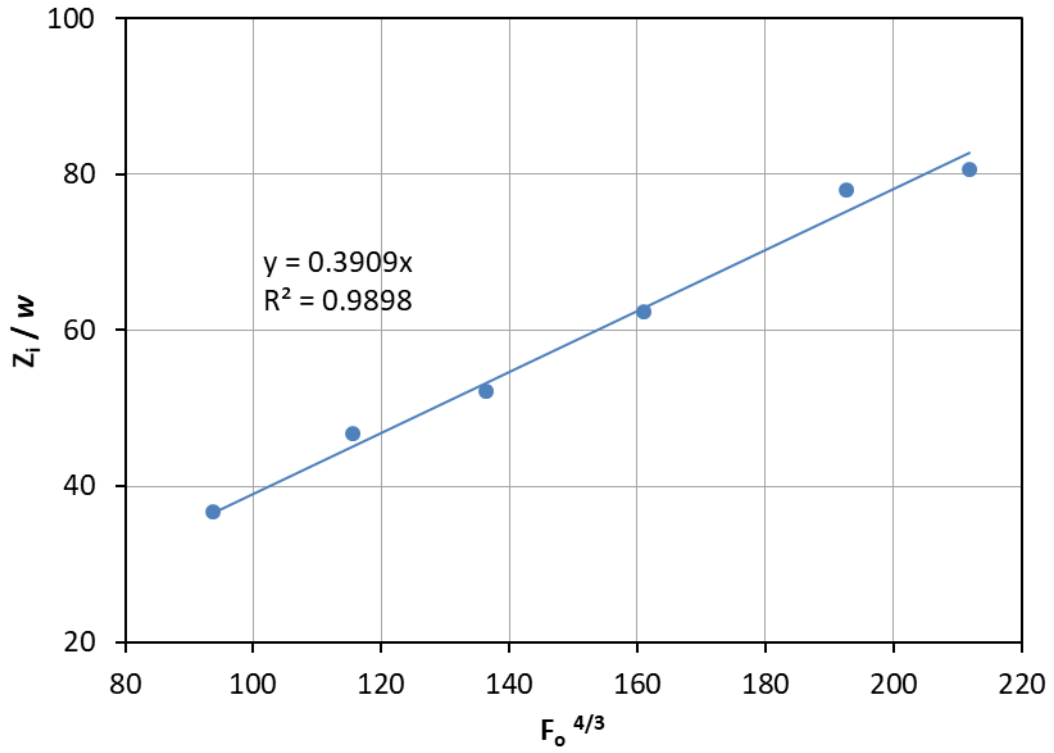
Την οπτικοποίηση της ροής ακολούθησαν οι επεξεργασίες των δεδομένων στον υπολογιστή (η διαδικασία επεξεργασίας περιγράφεται λεπτομερώς στις παραγράφους 5.5 και 5.6). Τελικά, για κάθε γωνία παροχέτευσης προσδιορίστηκαν τα εξής γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής:

- Το αρχικό τερματικό ύψος Z_i
- Το τελικό τερματικό ύψος του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας Z_f που παρατηρείται στη μόνιμη κατάσταση
- Η οριζόντια απόσταση X_z από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση που παρατηρείται το τελικό τερματικό ύψος
- Η οριζόντια απόσταση X_i από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης.

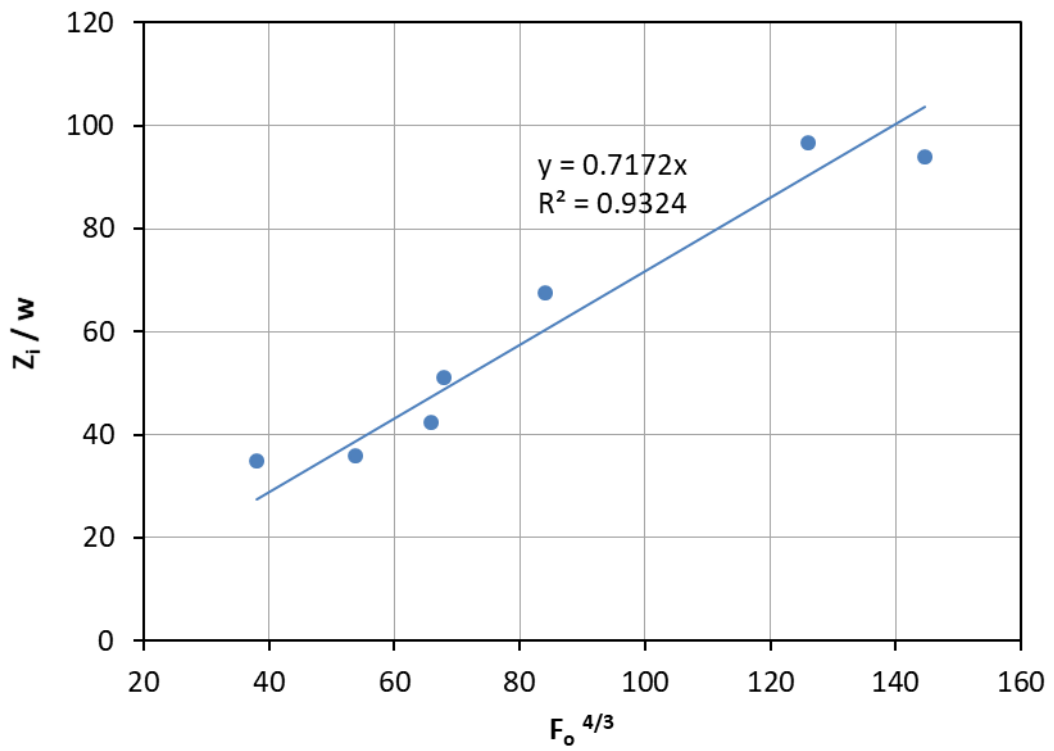
Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων και λεπτομερείς συγκρίσεις τους με διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα.

6.2 Αρχικό Τερματικό Ύψος

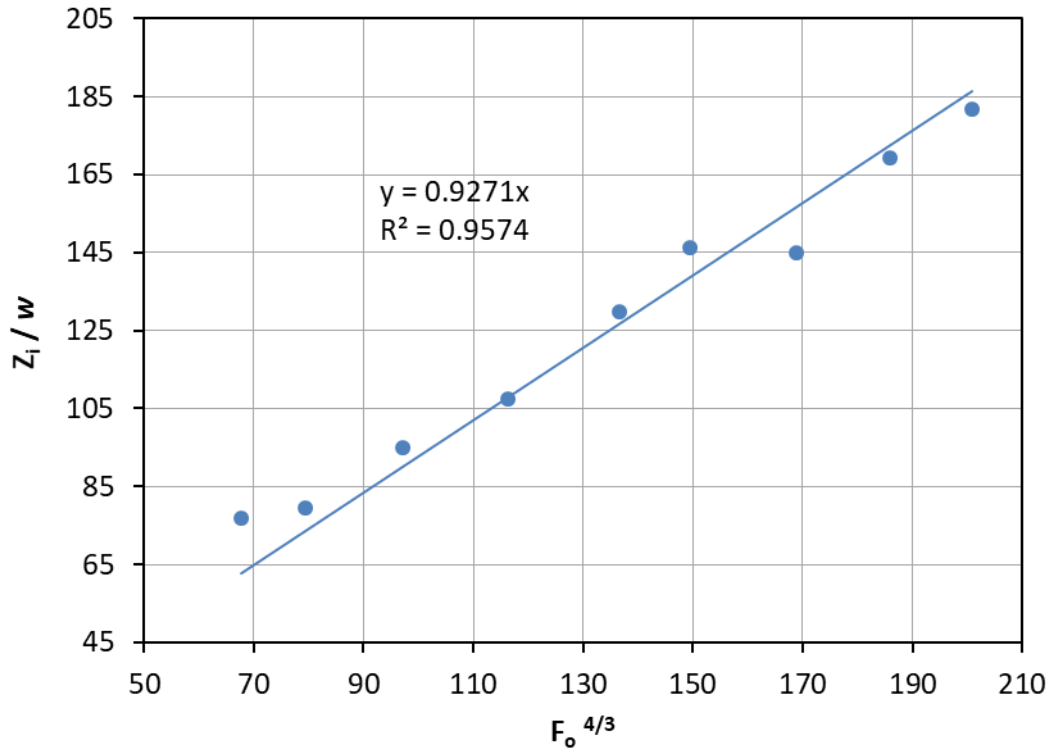
Στα Σχήματα 6-4 έως 6-12 παρουσιάζεται η μεταβολή του αδιάστατου αρχικού τερματικού ύψους Z_i/w με τον όρο $F_o^{4/3}$ για όλες τις γωνίες παροχέτευσης θ_o . Όπως φαίνεται, προκύπτει γραμμική μεταβολή του αδιάστατου αρχικού τερματικού ύψους Z_i/w με τον όρο $F_o^{4/3}$ σε όλες τις γωνίες. Η ακρίβεια των γραμμικών συσχετίσεων είναι ικανοποιητική αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 σε όλες τις περιπτώσεις είναι κοντά στη μονάδα. Συνεπώς επαληθεύεται η συσχέτιση που προέκυψε από τη διαστατική ανάλυση (Πίνακας 3-2). Για κάθε γωνία εκροής θ_o προσδιορίστηκε η σταθερά $C_1 (= Z_i/l_M)$ και οι τιμές της συνοψίζονται στον Πίνακα 6-1.



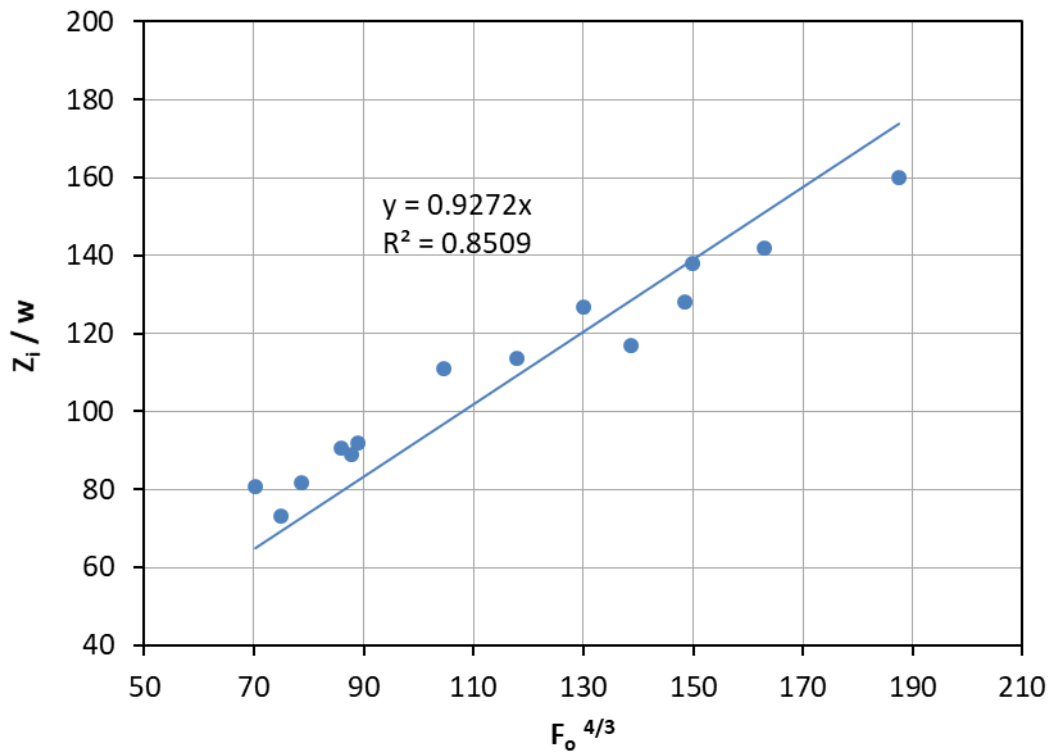
Σχήμα 6-4: Μεταβολή Z_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_0 = 15^\circ$.



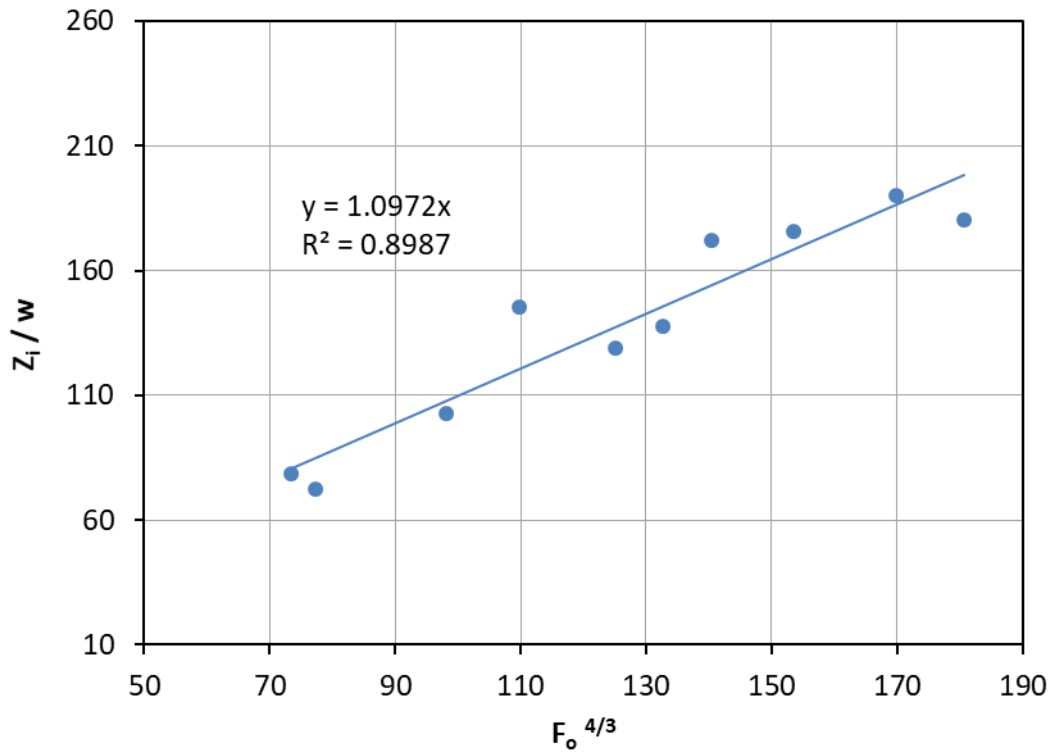
Σχήμα 6-5: Μεταβολή Z_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_0 = 30^\circ$.



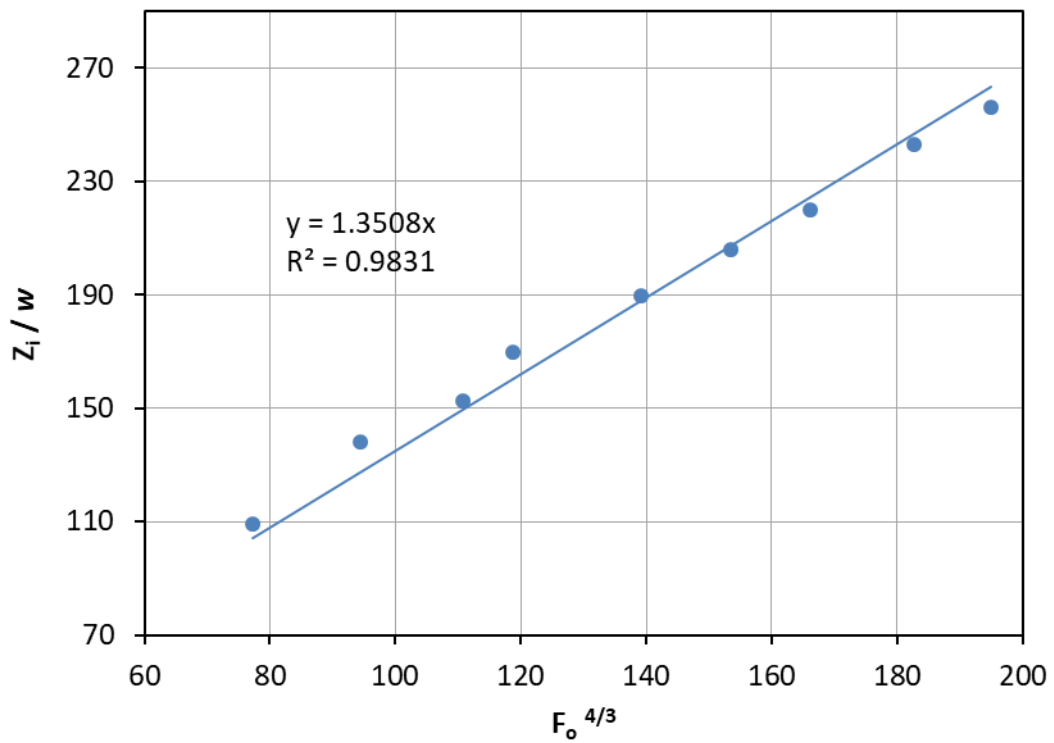
Σχήμα 6-6: Μεταβολή Z_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 45^\circ$.



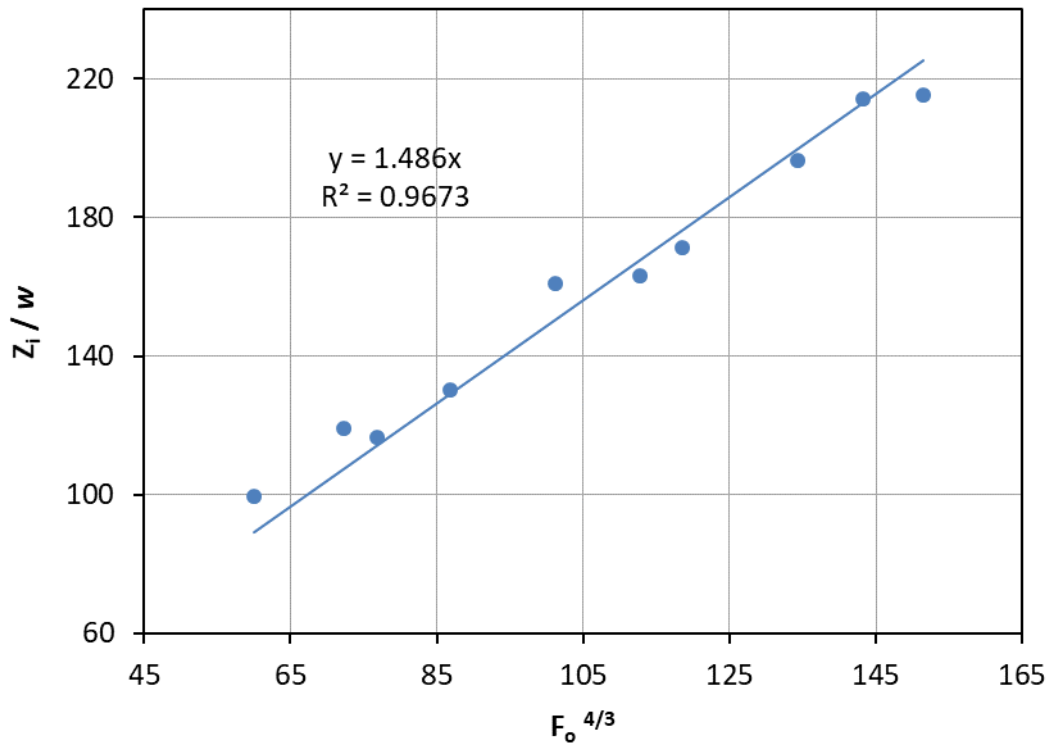
Σχήμα 6-7: Μεταβολή Z_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 50^\circ$.



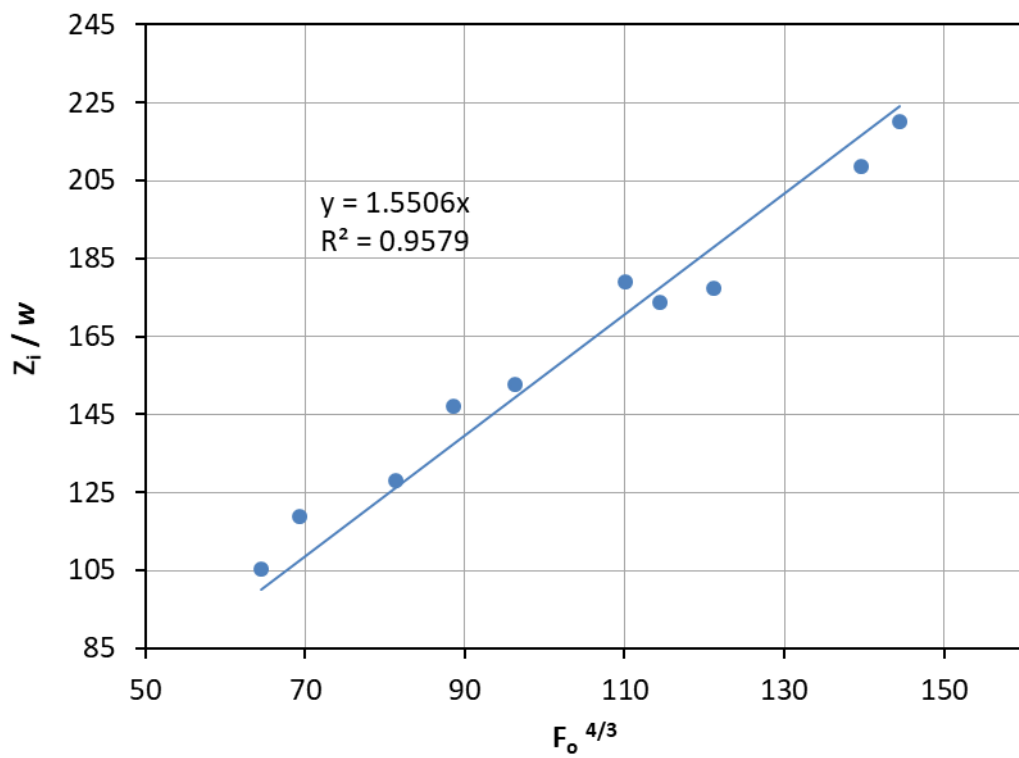
Σχήμα 6-8: Μεταβολή Z_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_0 = 60^\circ$.



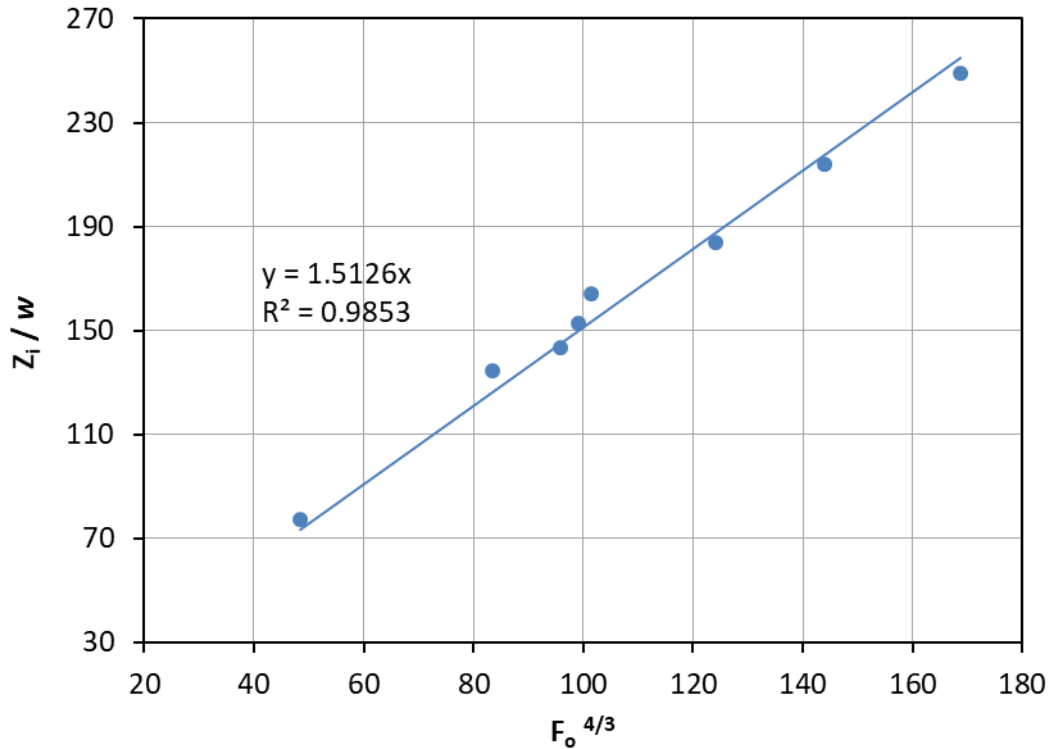
Σχήμα 6-9: Μεταβολή Z_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_0 = 75^\circ$.



Σχήμα 6-10: Μεταβολή Z_i / w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 80^\circ$.



Σχήμα 6-11: Μεταβολή Z_i / w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 85^\circ$.



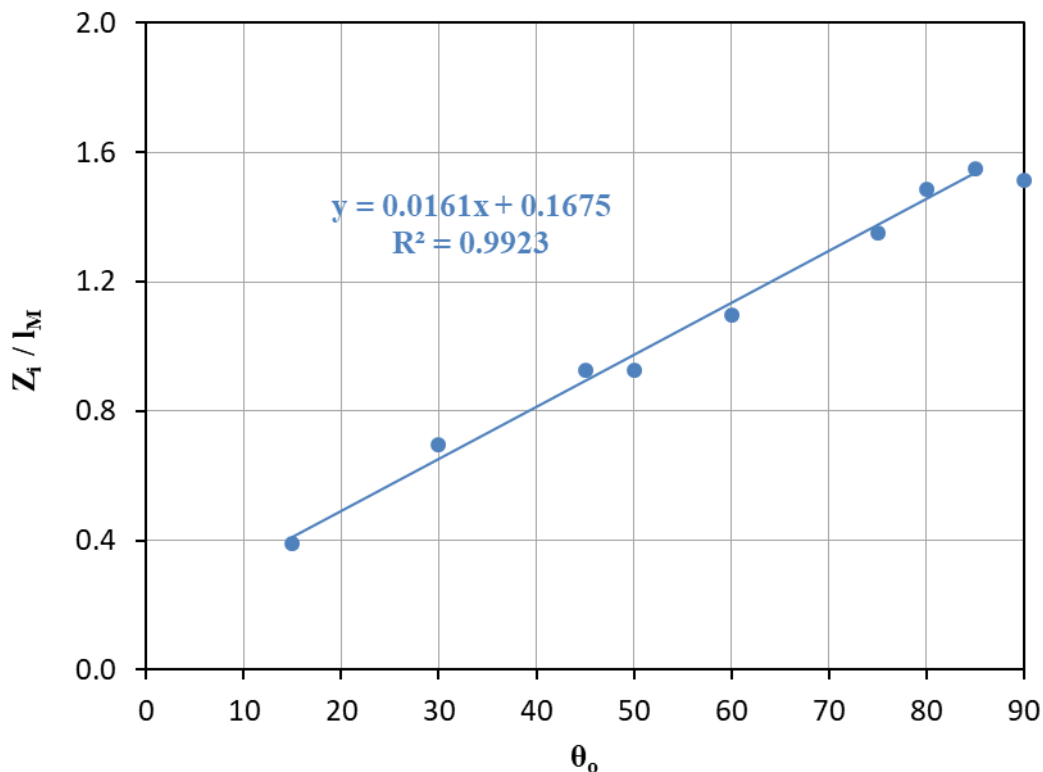
Σχήμα 6-12: Μεταβολή Z_i / w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 90^\circ$.

Πίνακας 6-1: Αποτελέσματα αδιάστατου αρχικού τερματικού ύψους

θ_o (deg)	$C_1=Z_i / l_M$
15	0.39
30	0.72
45	0.93
50	0.93
60	1.10
75	1.35
80	1.49
85	1.55
90	1.51

Η σταθερά C_1 , δηλ. το αδιάστατο αρχικό τερματικό ύψος Z_i/l_M παριστάνεται γραφικά ως προς τη γωνία παροχέτευσης θ_o στο Σχήμα 6-13. Παρατηρείται πως το αδιάστατο αρχικό τερματικό ύψος Z_i/l_M αυξάνεται συνεχώς έως τη γωνία $\theta_o=85^\circ$, όπου παίρνει τη μέγιστη τιμή του, ενώ παρουσιάζει πτώση στη γωνία $\theta_o= 90^\circ$. Η πτώση αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση της ανοδικής με την καθοδική ροή που είναι εντονότερη κατά την κατακόρυφη εκροή. Το αδιάστατο ύψος Z_i/l_M συσχετίσθηκε

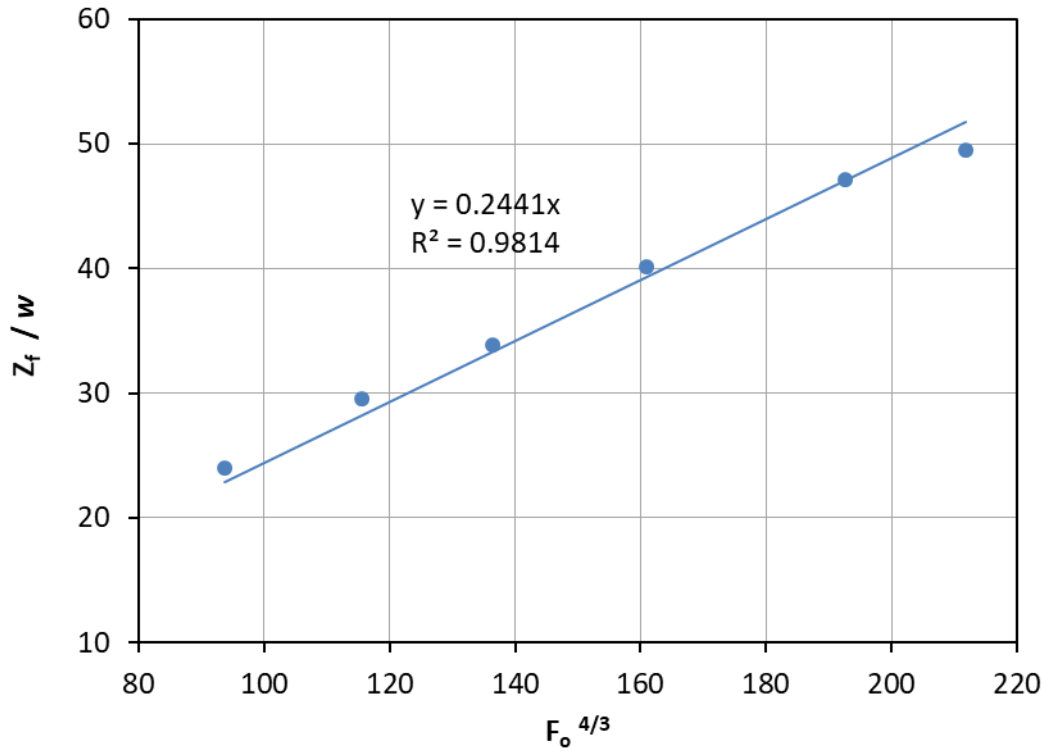
γραμμικά με τη γωνία θ_0 ($15^\circ \leq \theta_0 \leq 85^\circ$) με μεγάλη ακρίβεια και προσδιορίστηκε η συνάρτηση $C_1(\theta_0)$.



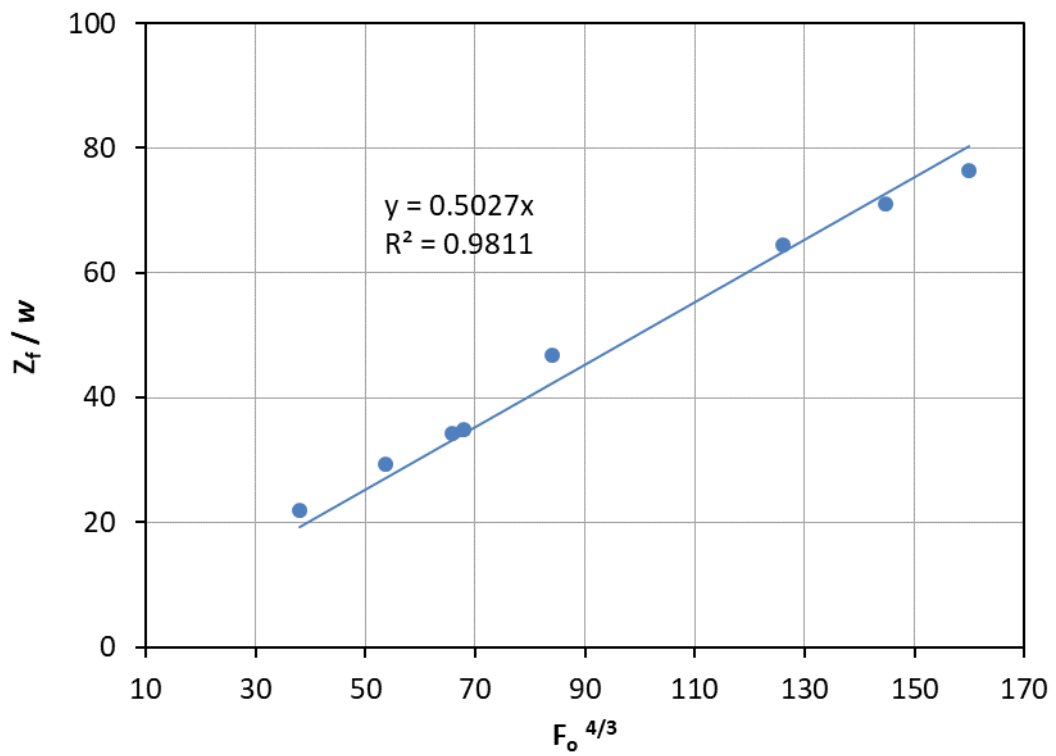
Σχήμα 6-13: Μεταβολή Z_i / I_M με τη γωνία θ_0 .

6.3 Τελικό Τερματικό Ύψος

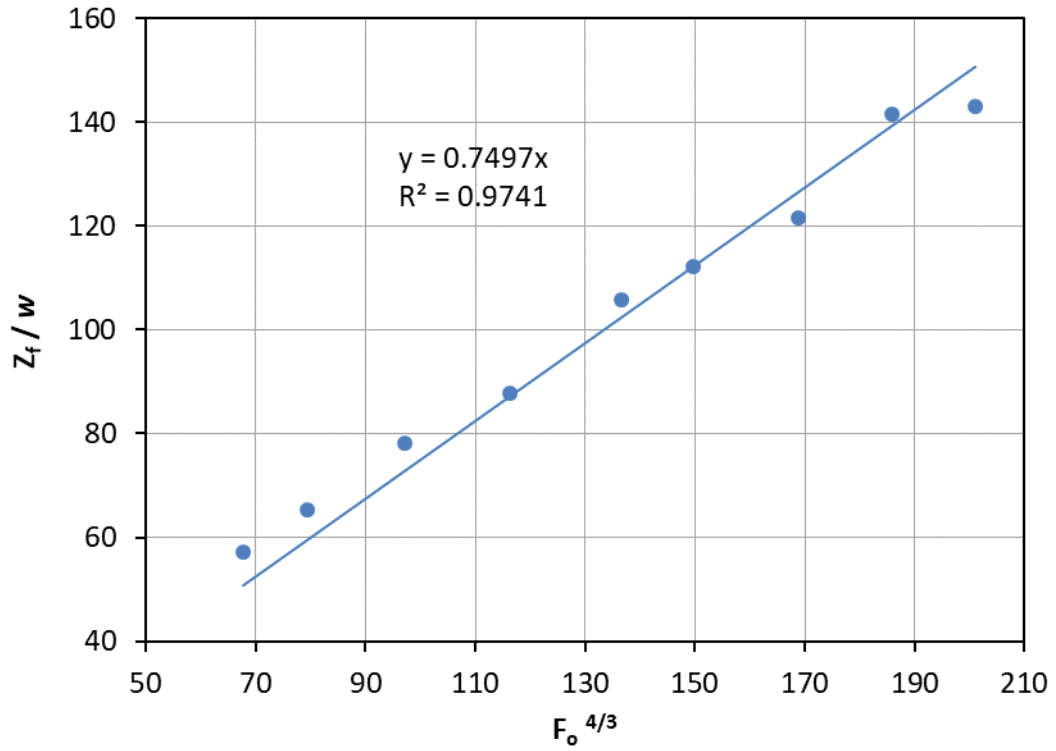
Στα Σχήματα 6-14 έως 6-22 παρουσιάζεται η μεταβολή του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f/w με τον όρο $F_0^{4/3}$ για όλες τις γωνίες παροχέτευσης θ_0 . Όπως φαίνεται, προκύπτει γραμμική μεταβολή του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f/w με τον όρο $F_0^{4/3}$ σε όλες τις γωνίες. Η ακρίβεια των γραμμικών συσχετίσεων είναι ικανοποιητική αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 σε όλες τις περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Συνεπώς επαληθεύεται η συσχέτιση που προέκυψε από τη διαστατική ανάλυση (Πίνακας 3-2).



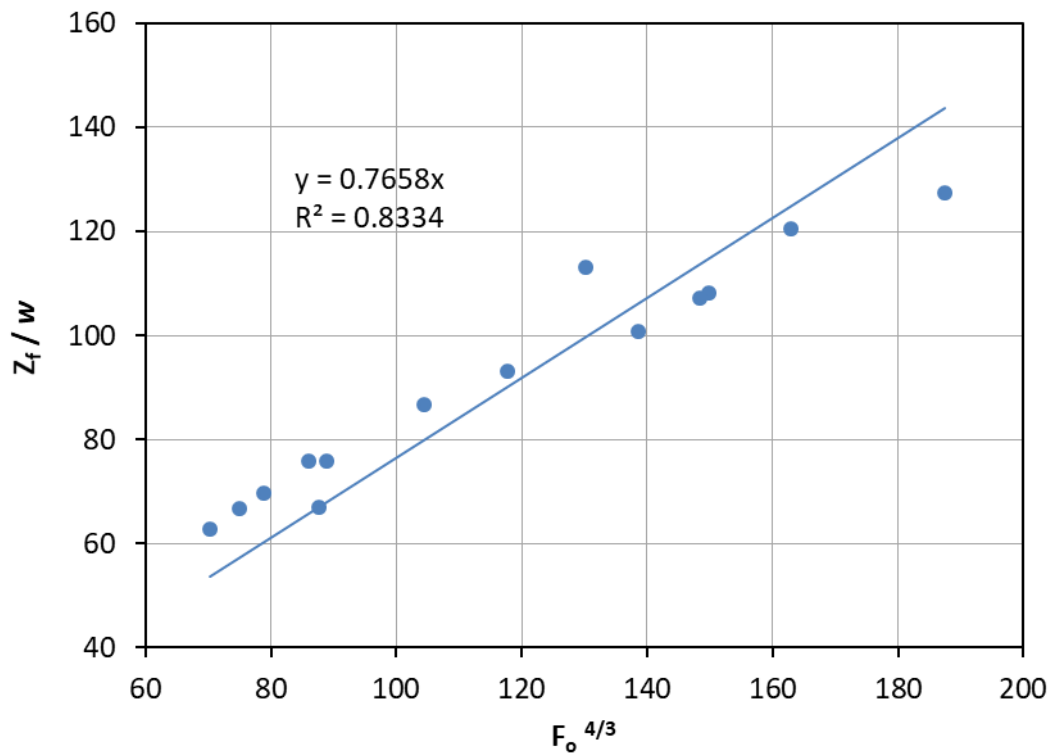
Σχήμα 6-14: Μεταβολή Z_f/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 15^\circ$.



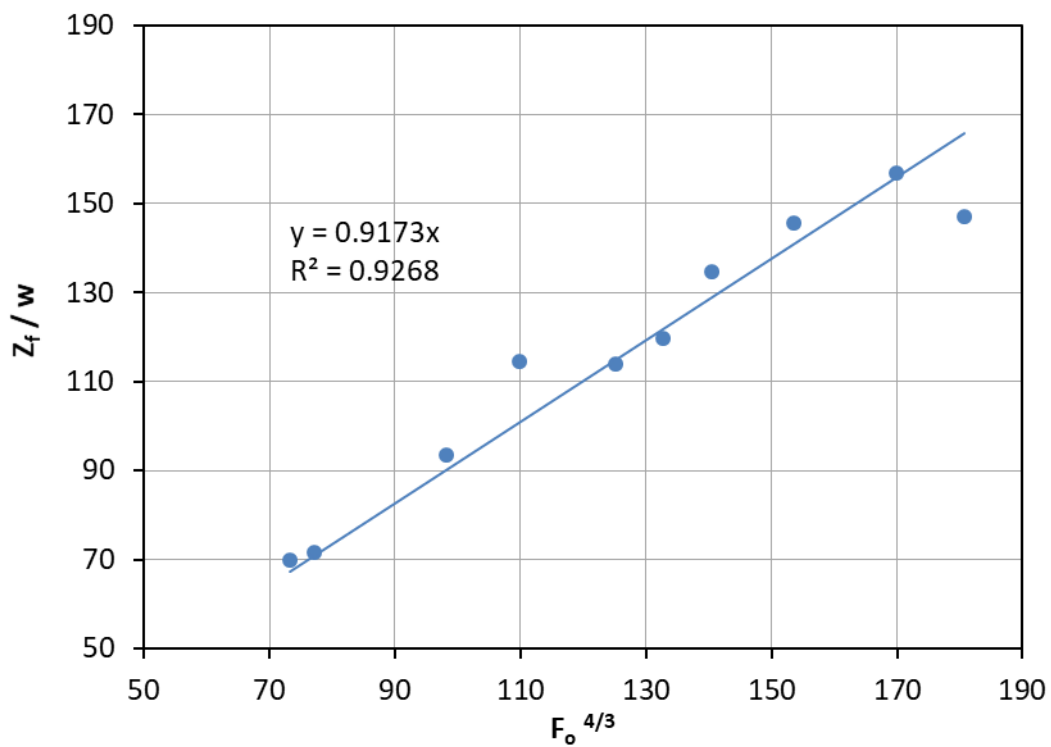
Σχήμα 6-15: Μεταβολή Z_f/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 30^\circ$.



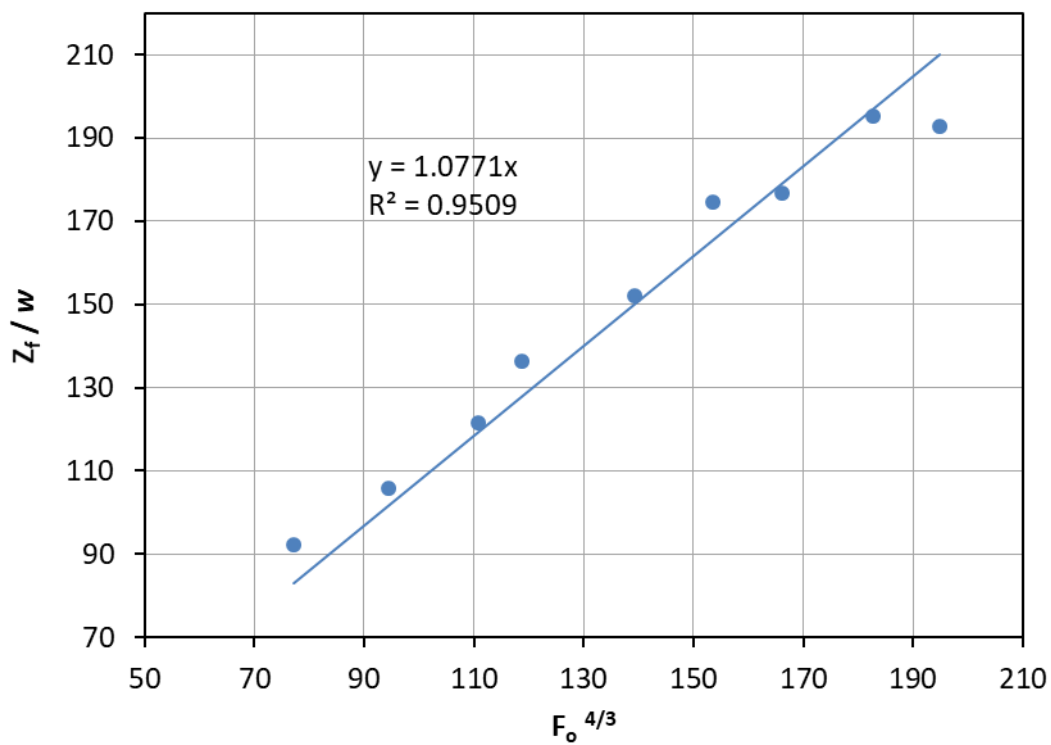
Σχήμα 6-16: Μεταβολή Z_f/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 45^\circ$.



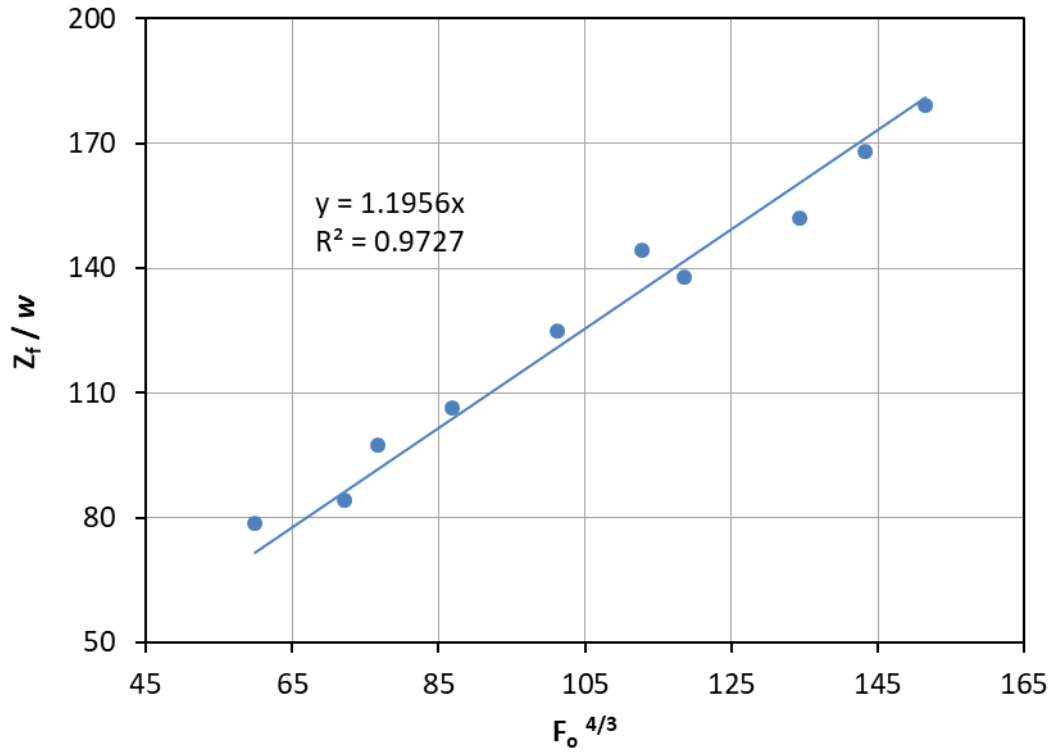
Σχήμα 6-17: Μεταβολή Z_f/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 50^\circ$.



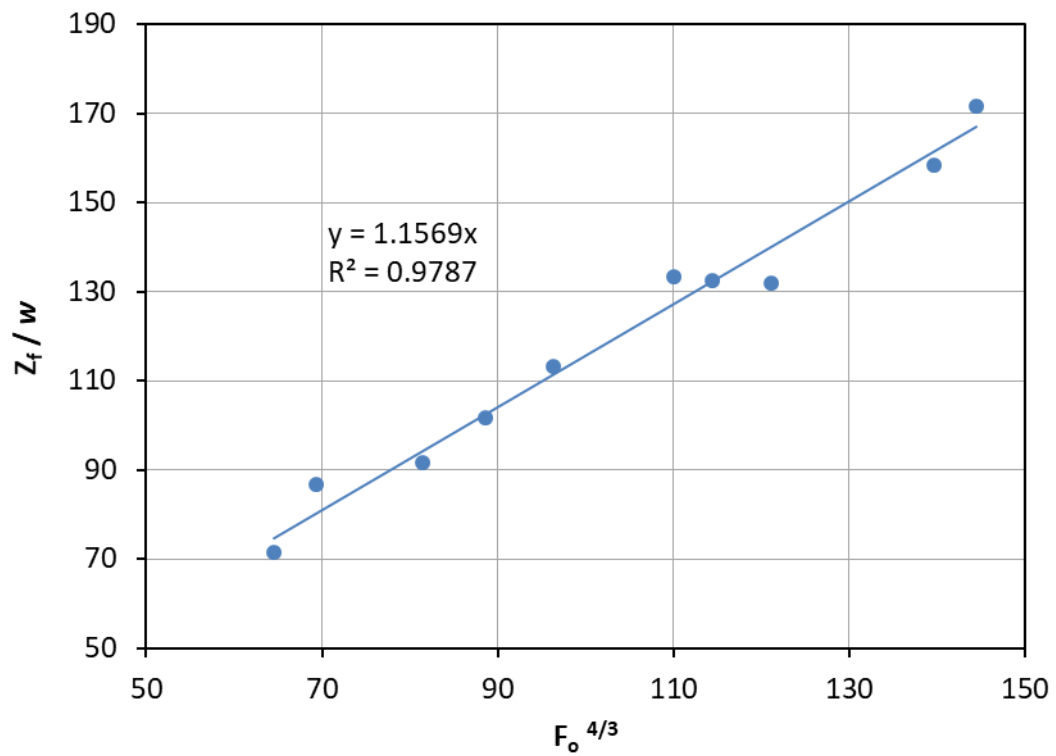
Σχήμα 6-18: Μεταβολή Z_f / w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 60^\circ$.



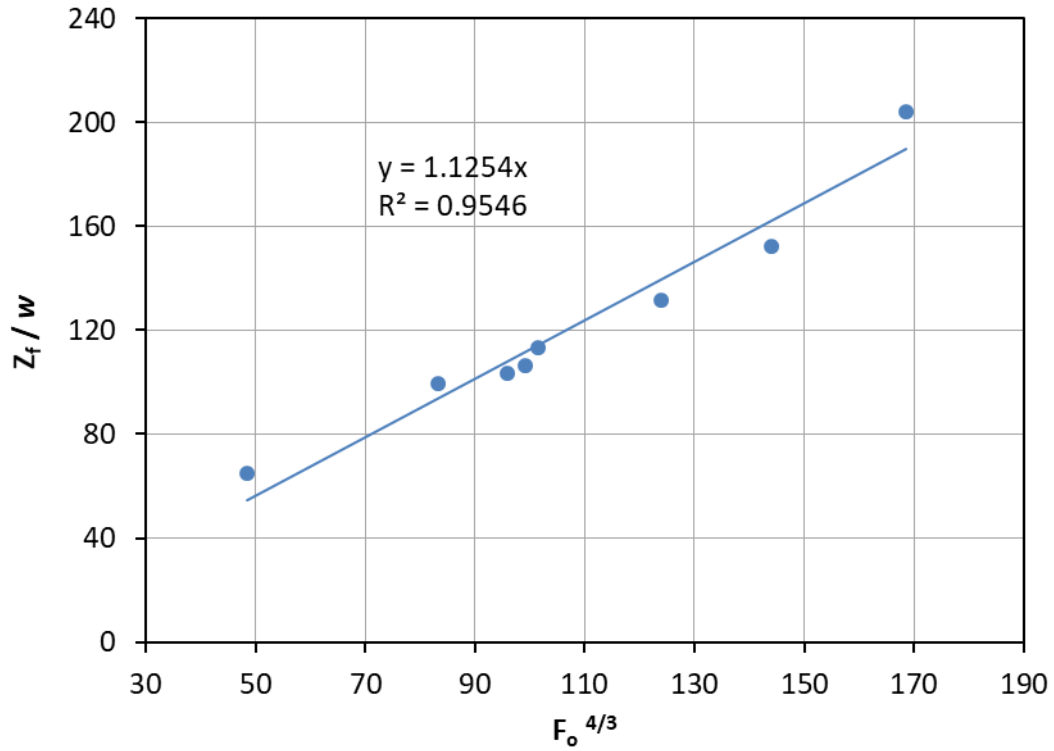
Σχήμα 6-19: Μεταβολή Z_f / w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 75^\circ$.



Σχήμα 6-20: Μεταβολή Z_f/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 80^\circ$.

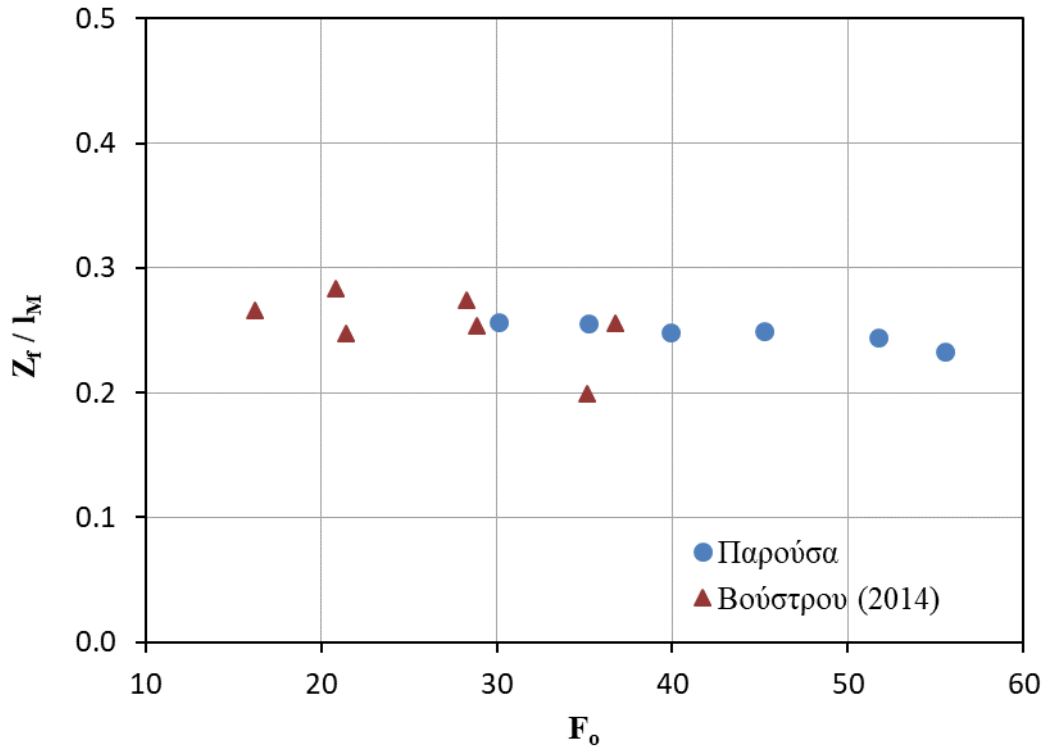


Σχήμα 6-21: Μεταβολή Z_f/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 85^\circ$.

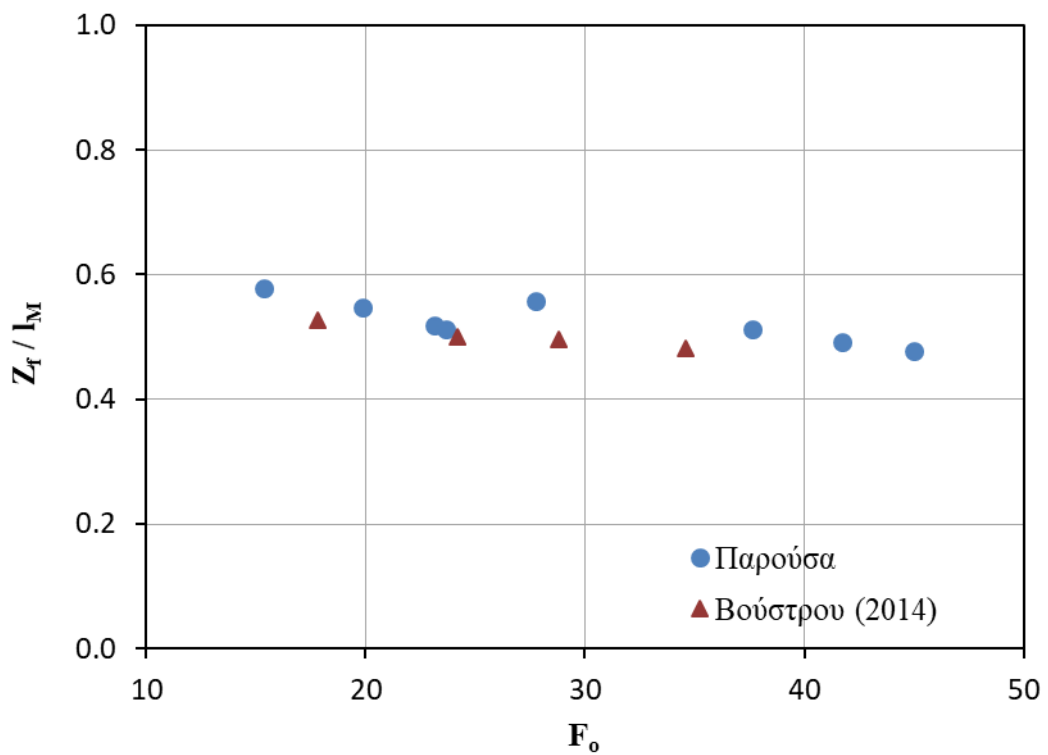


Σχήμα 6-22: Μεταβολή Z_f/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 90^\circ$.

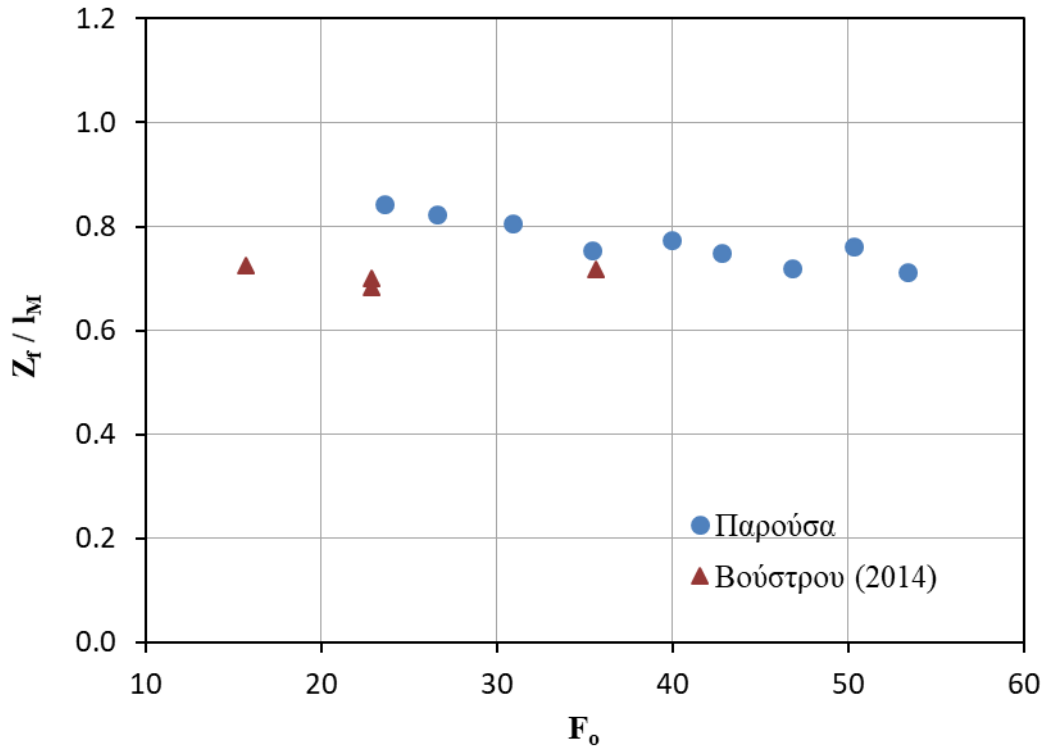
Ακολουθούν γραφήματα (Σχήμα 6-23 έως Σχήμα 6-27) με τη μεταβολή του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f/l_M συναρτήσει του πυκνομετρικού αριθμού F_o . Στα γραφήματα αυτά εικονίζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με αυτά άλλων διαθέσιμων εργασιών για λόγους σύγκρισης.



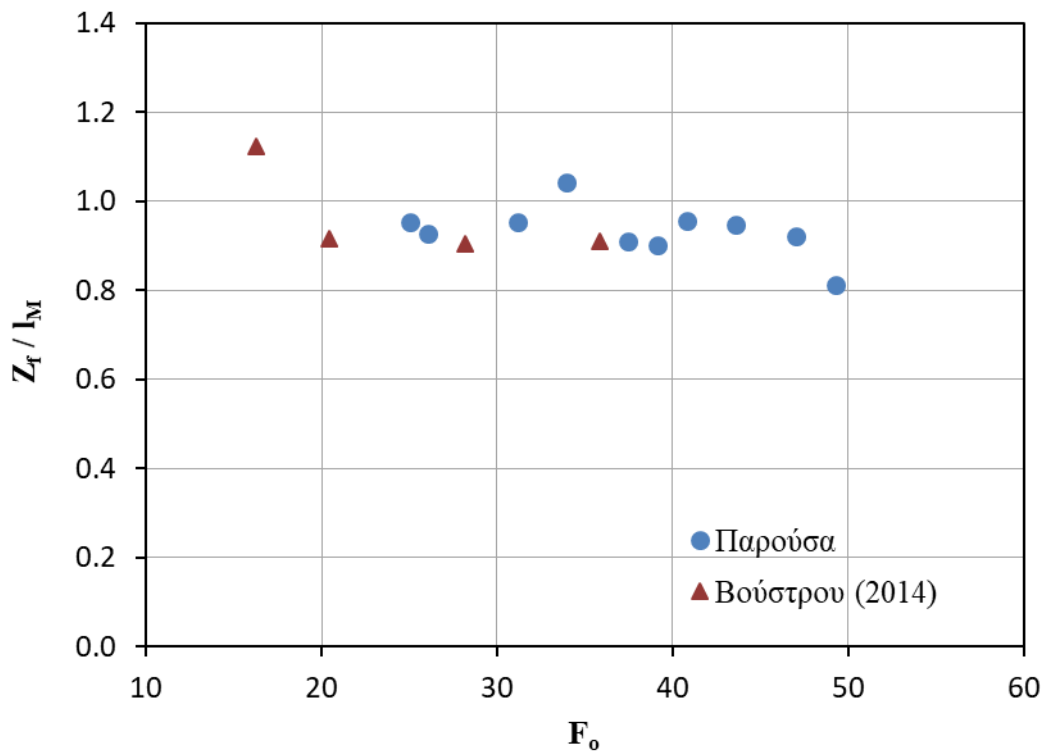
Σχήμα 6-23: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f / l_M για γωνία $\theta_0 = 15^\circ$.



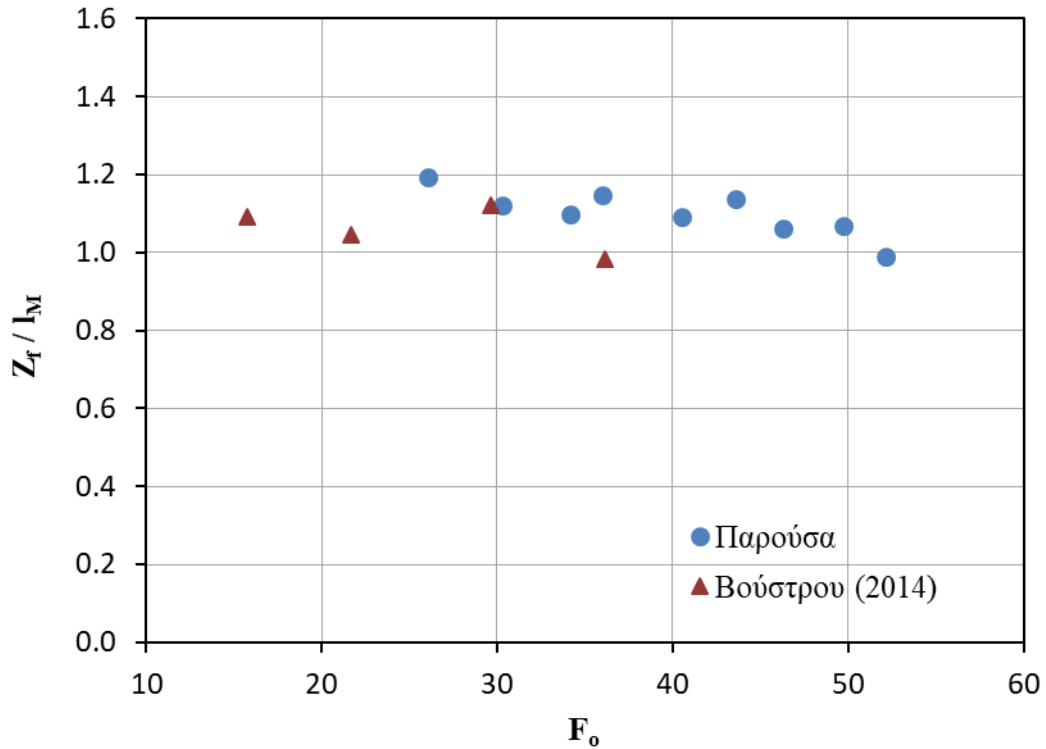
Σχήμα 6-24: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f / l_M για γωνία $\theta_0 = 30^\circ$.



Σχήμα 6-25: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f/l_M για γωνία $\theta_0 = 45^\circ$.



Σχήμα 6-26: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f/l_M για γωνία $\theta_0 = 60^\circ$.



Σχήμα 6-27: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f/l_M για γωνία $\theta_0 = 75^\circ$.

Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της Βούστρου (2014). Βέβαια στην παρούσα εργασία μελετήθηκε για κάθε γωνία παροχέτευσης θ_0 μεγαλύτερο εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude, ενώ στη Βούστρου (2014) οι αριθμοί F_o ήταν γενικά μικρότεροι.

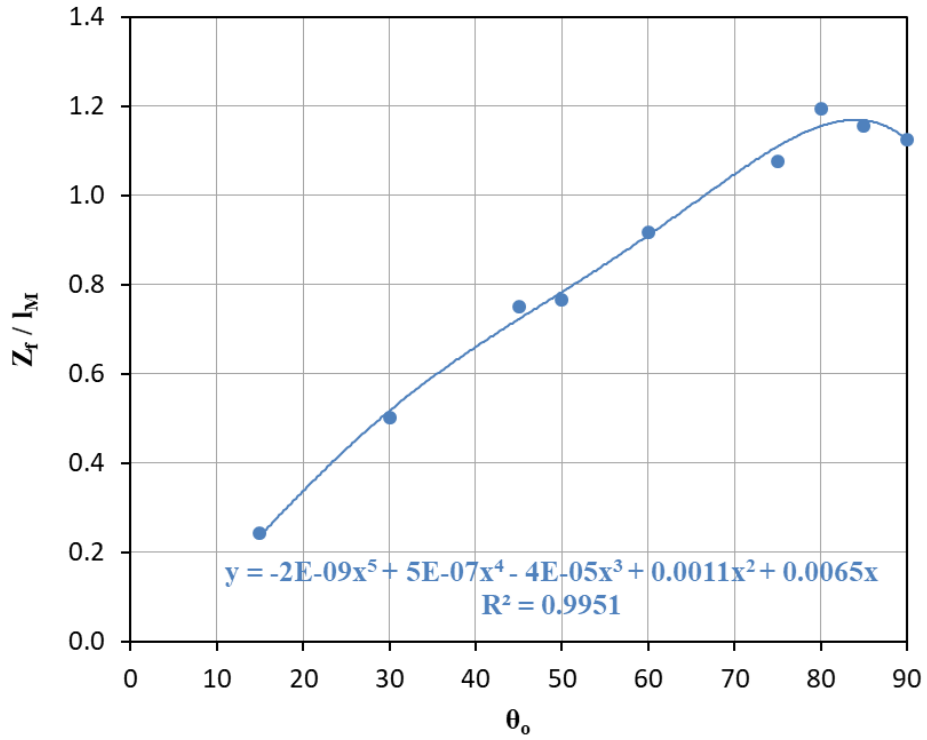
Για κάθε γωνία εκροής θ_0 προσδιορίσθηκε η σταθερά $C_2 (=Z_f/l_M)$ και οι τιμές της συνοψίζονται στον Πίνακα 6-2. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται οι σταθερές C_2 που παρουσιάστηκαν από άλλους ερευνητές για κεκλιμένες και κατακόρυφες διδιάστατες φλέβες. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα για κεκλιμένες φλέβες είναι περιορισμένα, ενώ για κατακόρυφες φλέβες έχουν παρουσιαστεί περισσότερα, π.χ. Zhang & Baddour (1997), Baines et al. (1990), Campbell & Turner (1989).

Πίνακας 6-2 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f / I_M .

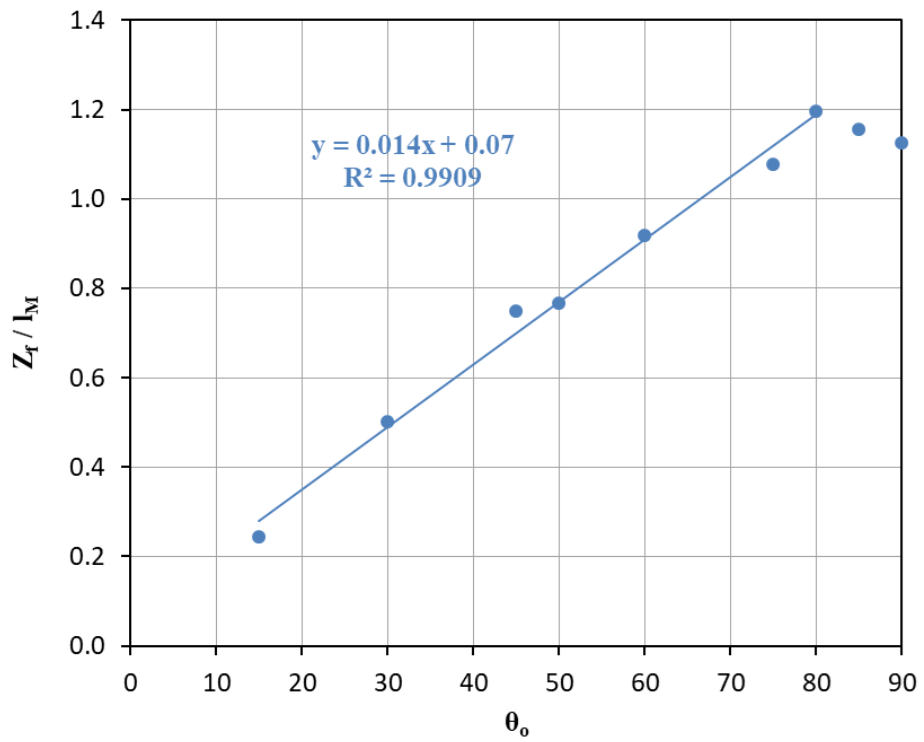
	θ_o (deg)	Παρούσα	Βούστρου (2014)	Zhang & Baddour (1997)	Baines et al. (1990)	Campbell & Turner (1989)
Z_f / I_M	15	0.24	0.25	-	-	-
	30	0.50	0.49	-	-	-
	45	0.75	0.71	-	-	-
	50	0.77	-	-	-	-
	60	0.92	0.92	-	-	-
	75	1.08	1.04	-	-	-
	80	1.20	-	-	-	-
	85	1.16	-	-	-	-
	90	1.13	-	-	1.59	0.52

Από τον Πίνακα 6-2 παρατηρείται πως η τιμή του τελικού τερματικού ύψους είναι σε συμφωνία με τις τιμές της Βούστρου (2014) για τις γωνίες που μπορεί να γίνει σύγκριση. Για κατακόρυφη εκροή η τιμή που προέκυψε στην παρούσα εργασία είναι εντός του εύρους των τιμών της βιβλιογραφίας. Ειδικότερα, η τιμή του Z_f είναι περίπου διπλάσια από αυτή των Baines et al. (1990) και περίπου 30% μικρότερη από αυτή των Zhang & Baddour (1997). Είναι προφανές ότι η κατακόρυφη φλέβα παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις στην τιμή του τελικού τερματικού ύψους Z_f , γεγονός που δικαιολογεί τις διαφορές στη βιβλιογραφία.

Η σταθερά C_2 , δηλ. το αδιάστατο τελικό τερματικό ύψος Z_f/I_M παρουσιάζεται γραφικά ως προς τη γωνία παροχέτευσης θ_o στα Σχήματα 6-28 και 6-29. Παρατηρείται πως το αδιάστατο τελικό τερματικό ύψος Z_f/I_M αυξάνεται συνεχώς έως τη γωνία $\theta_o=80^\circ$, όπου παίρνει τη μέγιστη τιμή του, ενώ παρουσιάζει πτώση από $\theta_o=80^\circ$ έως $\theta_o=90^\circ$. Η πτώση αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση της ανοδικής με την καθοδική ροή που είναι εντονότερη καθώς προσεγγίζεται η κατακόρυφη εκροή. Το αδιάστατο ύψος Z_f/I_M συσχετίζεται με τη γωνία θ_o ($15^\circ \leq \theta_o \leq 90^\circ$) με πολυωνυμική συνάρτηση $C_2(\theta_o)$ 5^{ου} βαθμού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-28. Ωστόσο, για γωνίες θ_o έως 80° προκύπτει με μεγάλη ακρίβεια γραμμική συσχέτιση (Σχήμα 6-29) και προσδιορίζεται η συνάρτηση $C_2(\theta_o)$, η οποία καλύπτει όλο το εύρος των γωνιών που παρουσιάζουν πρακτικό ενδιαφέρον.

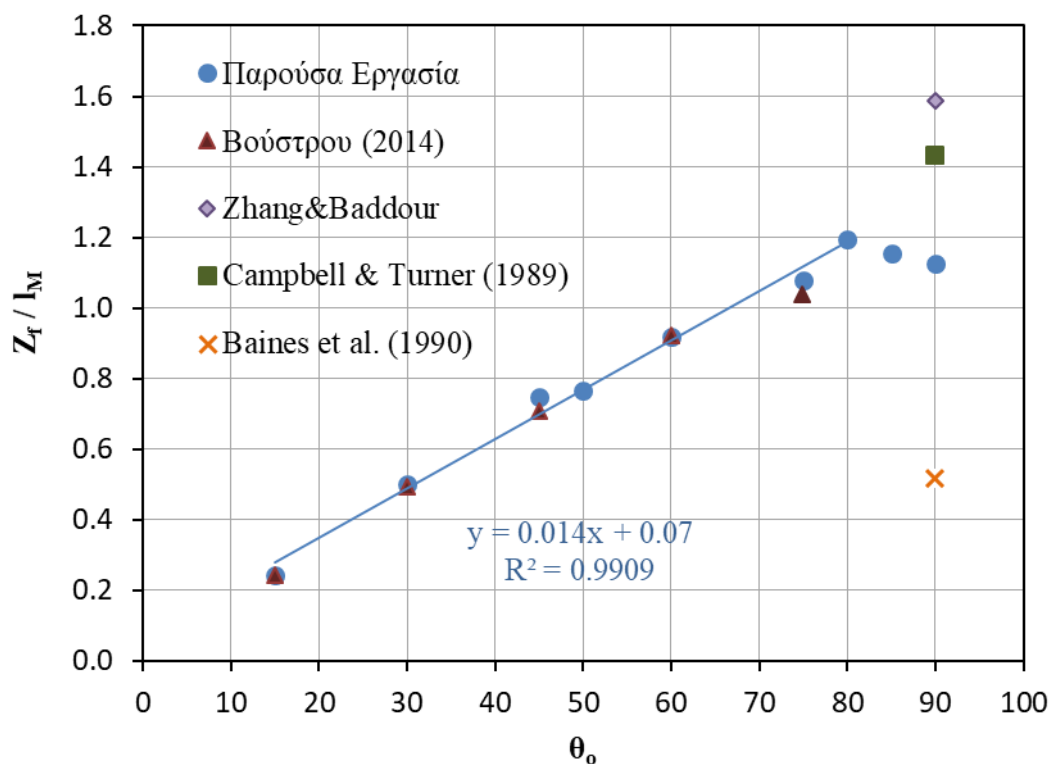


Σχήμα 6-28: Μεταβολή Z_f / I_M με τη γωνία θ_0 .



Σχήμα 6-29: Μεταβολή Z_f / I_M με τη γωνία θ_0 .

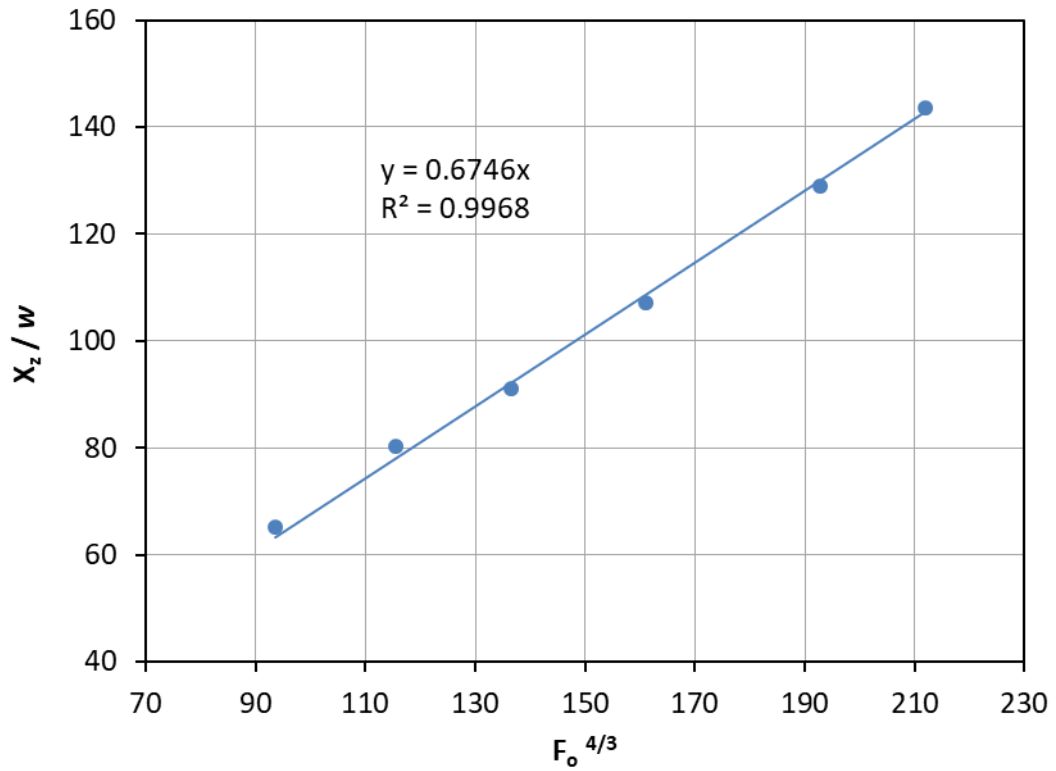
Στο Σχήμα 6-30 παρουσιάζεται γραφικά η τιμή της σταθεράς $C_2 (=Z_f/l_M)$ της παρούσας εργασίας και άλλων εργασιών της βιβλιογραφίας ως προς τη γωνία θ_0 . Είναι προφανές ότι η γραμμική συσχέτιση μεταξύ Z_f/l_M και θ_0 υποστηρίζεται και από τα πειράματα της Βούστρου (2014).



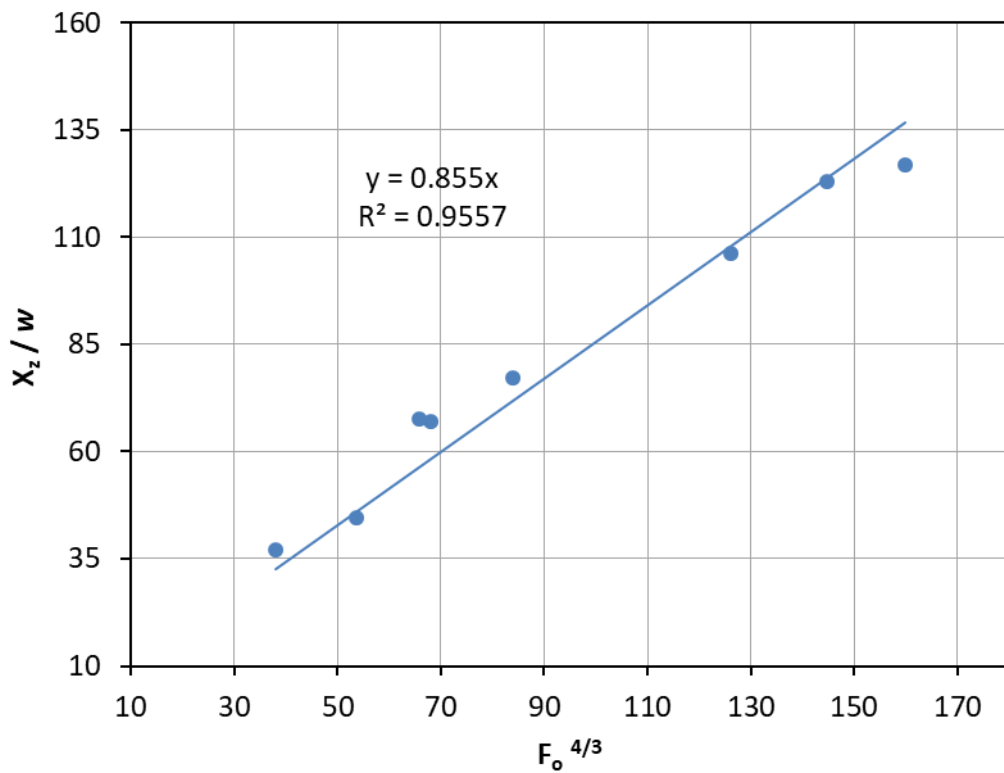
Σχήμα 6-30: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους Z_f/l_M συναρτήσει της γωνίας θ_0 .

6.4 Οριζόντια Θέση Τερματικού Ύψους

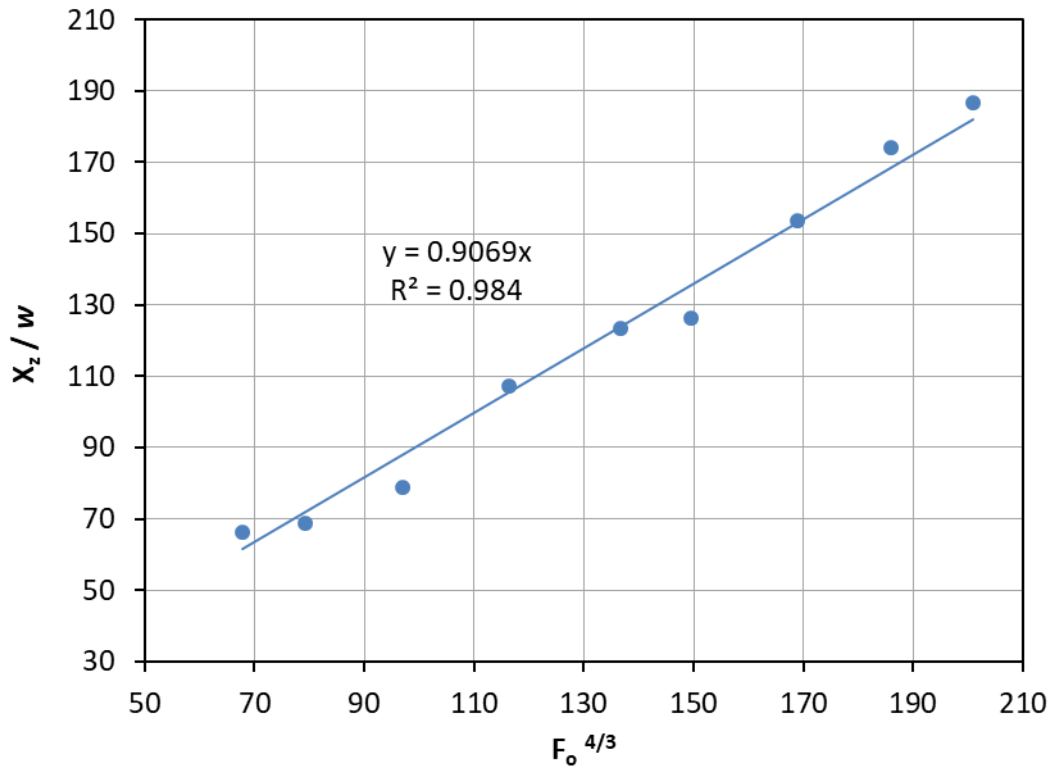
Στα Σχήματα 6-31 έως 6-38 παρουσιάζεται μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/w , από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση που αντιστοιχεί στο τελικό τερματικό ύψος, με τον όρο $F_0^{4/3}$ για όλες τις γωνίες παροχέτευσης θ_0 . Όπως φαίνεται, προκύπτει γραμμική μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/w με τον όρο $F_0^{4/3}$ σε όλες τις γωνίες. Η ακρίβεια των γραμμικών συσχετίσεων είναι ικανοποιητική αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 σε όλες τις περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Συνεπώς επαληθεύεται η συσχέτιση που προέκυψε από τη διαστατική ανάλυση (Πίνακας 3-2).



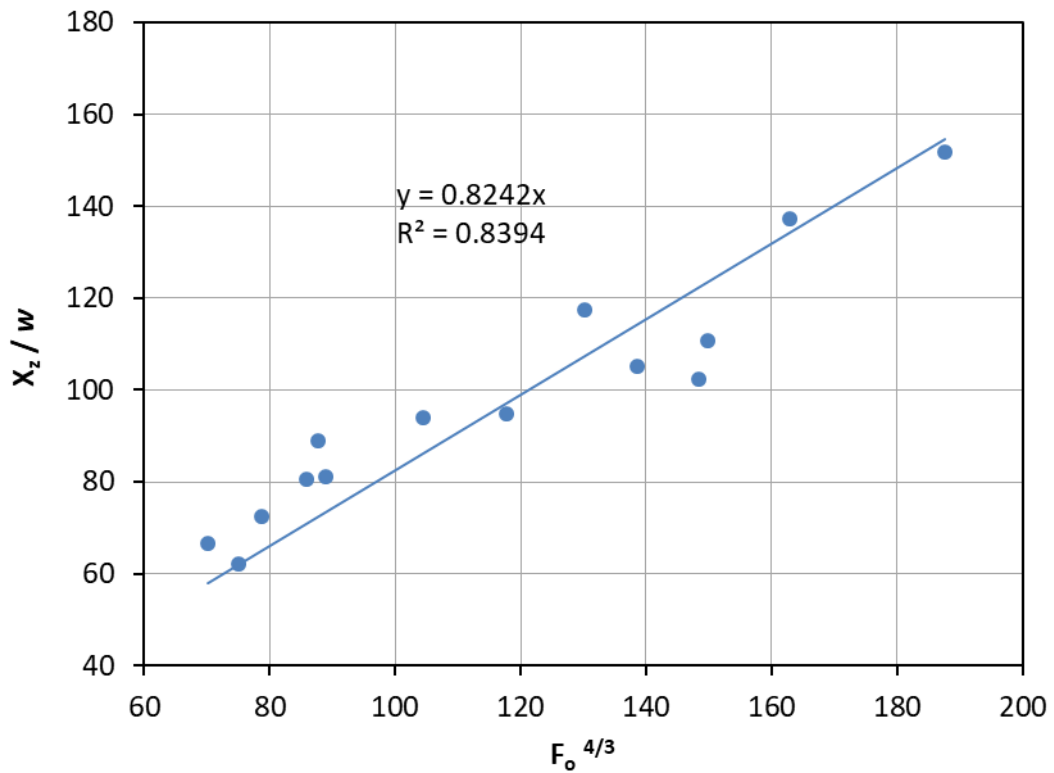
Σχήμα 6-31: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 15^\circ$.



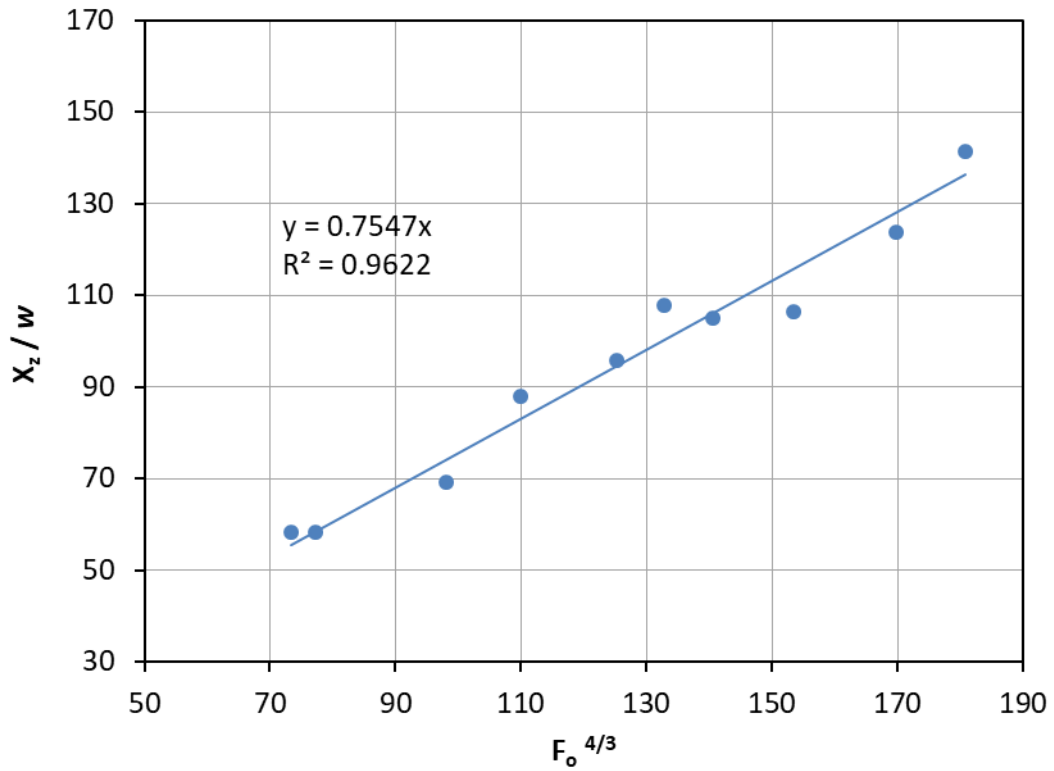
Σχήμα 6-32: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 30^\circ$.



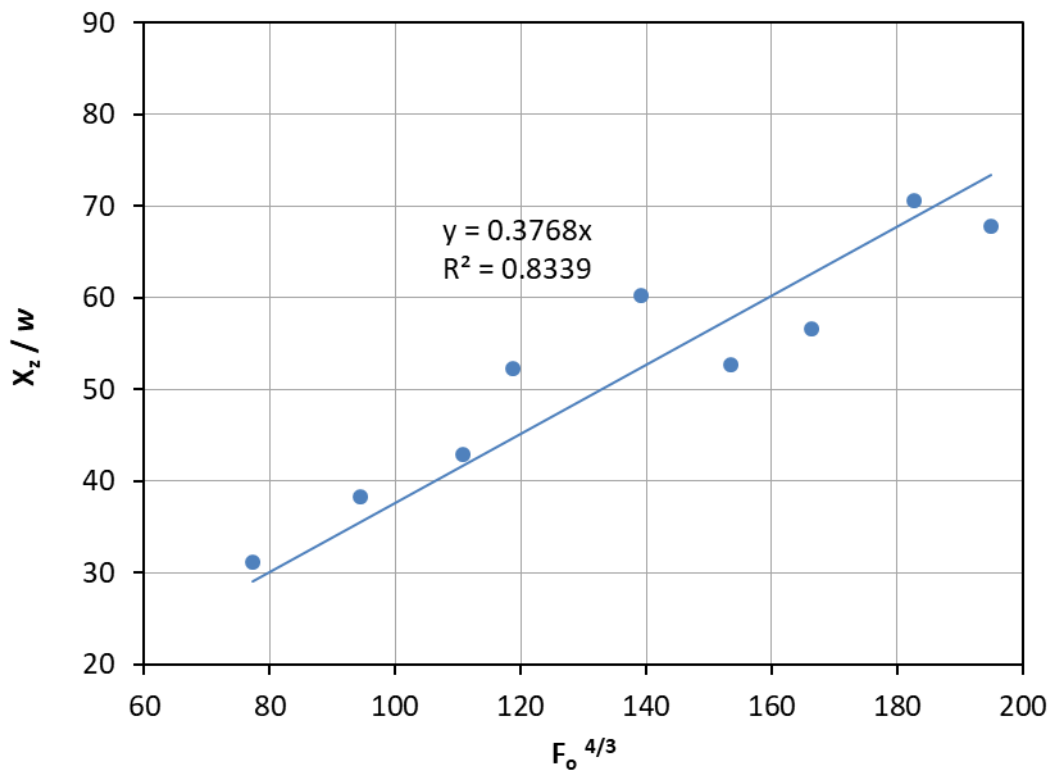
Σχήμα 6-33: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 45^\circ$.



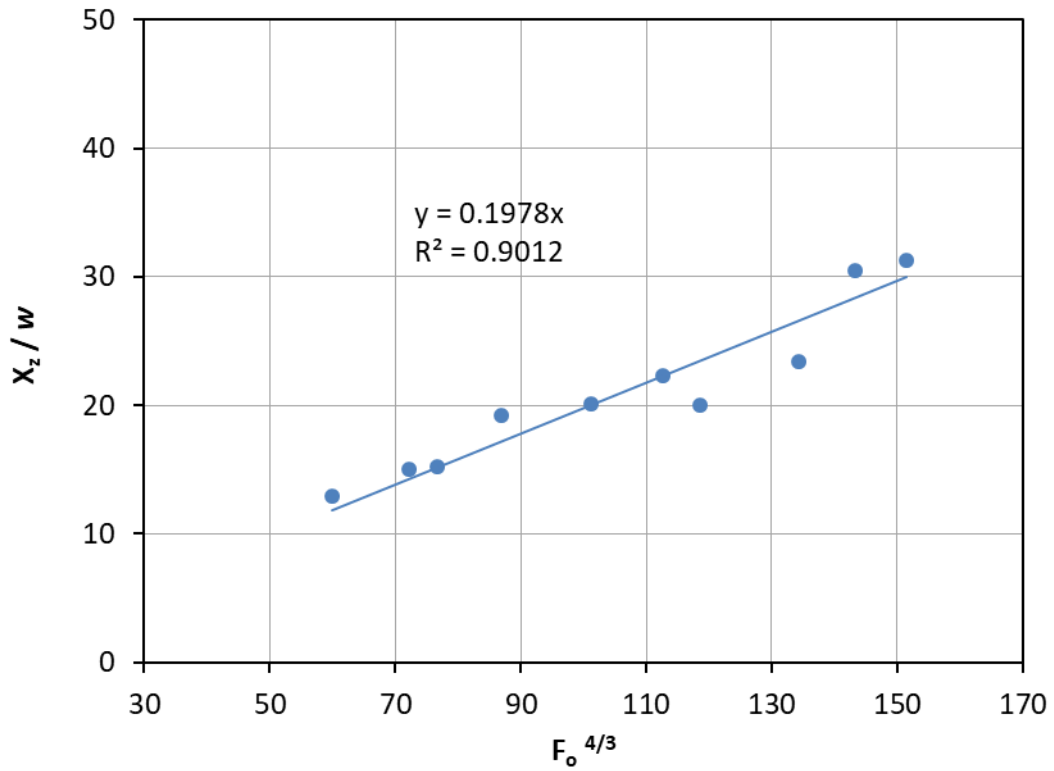
Σχήμα 6-34: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 50^\circ$.



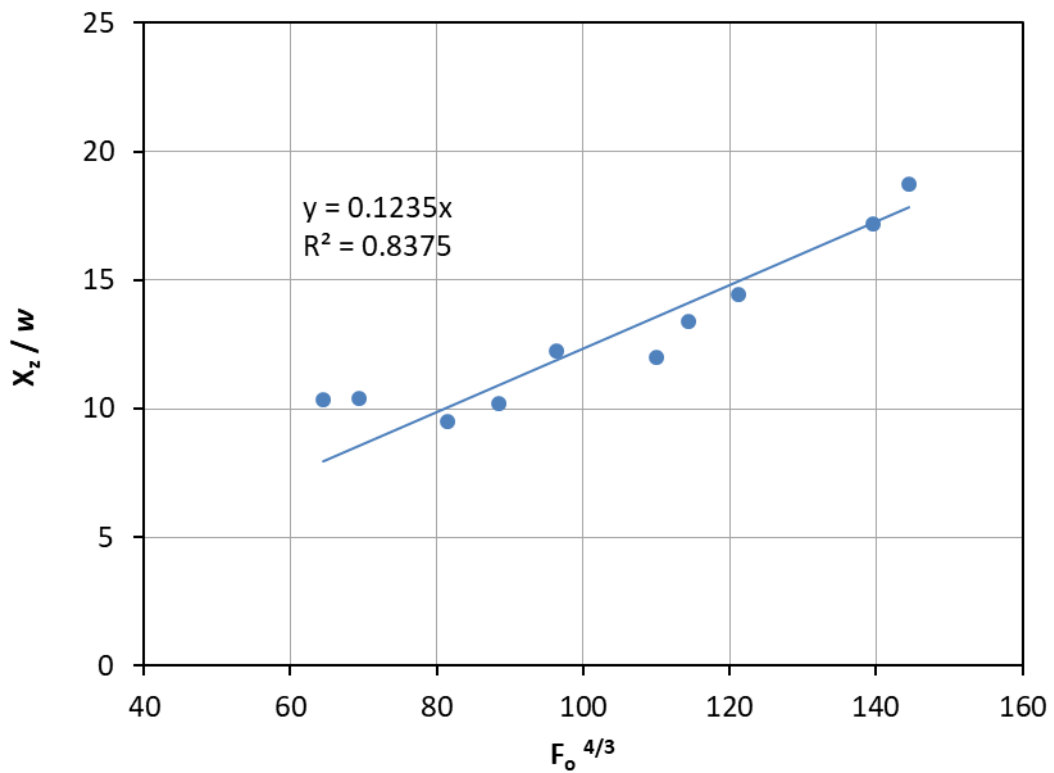
Σχήμα 6-35: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 60^\circ$.



Σχήμα 6-36: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 75^\circ$.

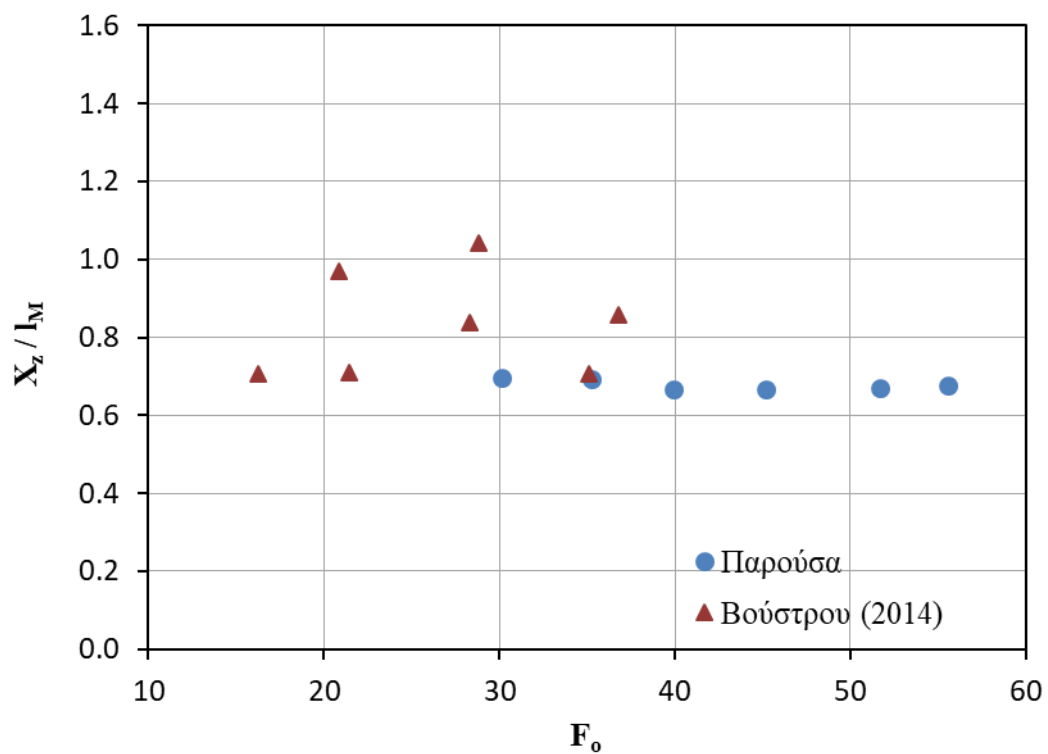


Σχήμα 6-37: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 80^\circ$.

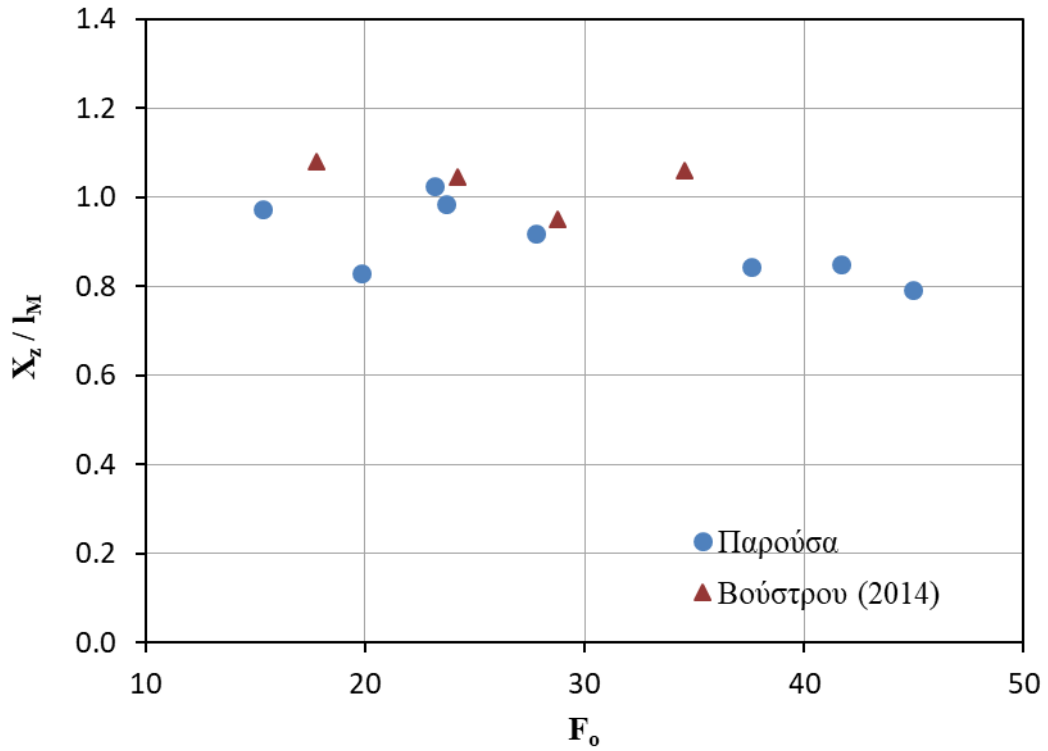


Σχήμα 6-38: Μεταβολή X_z/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 85^\circ$.

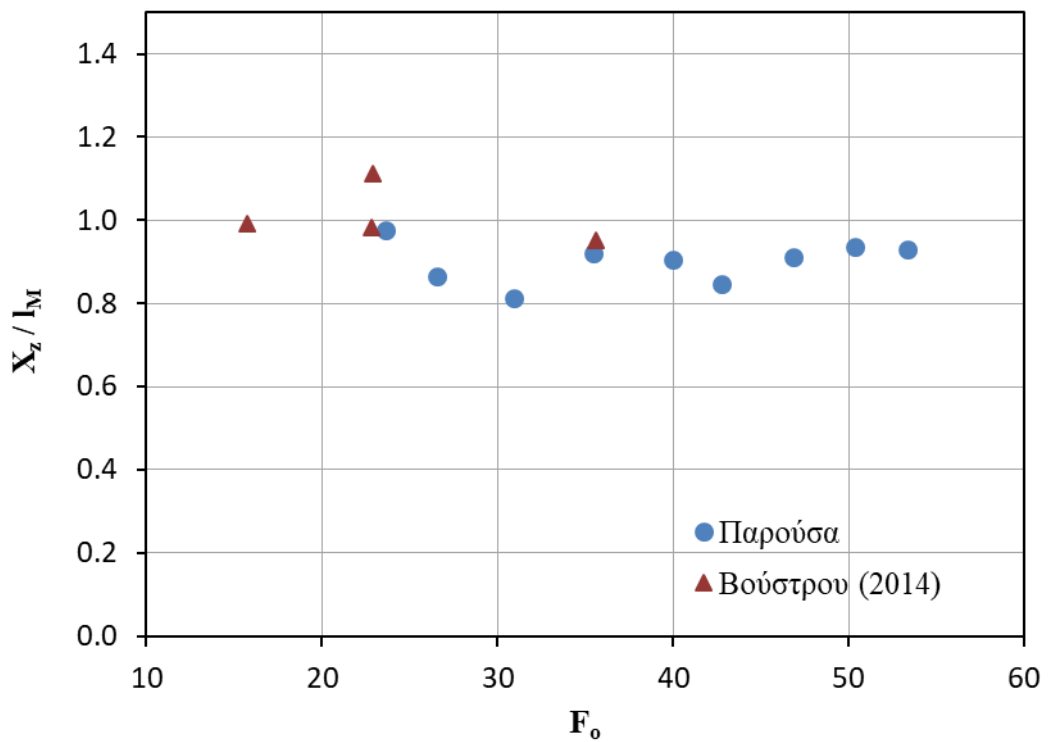
Ακολουθούν γραφήματα (Σχήμα 6-39 έως Σχήμα 6-43) με τη μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/l_M συναρτήσει του πυκνομετρικού αριθμού F_o . Στα γραφήματα αυτά εικονίζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με αυτά της Βούστρου (2014) για λόγους σύγκρισης.



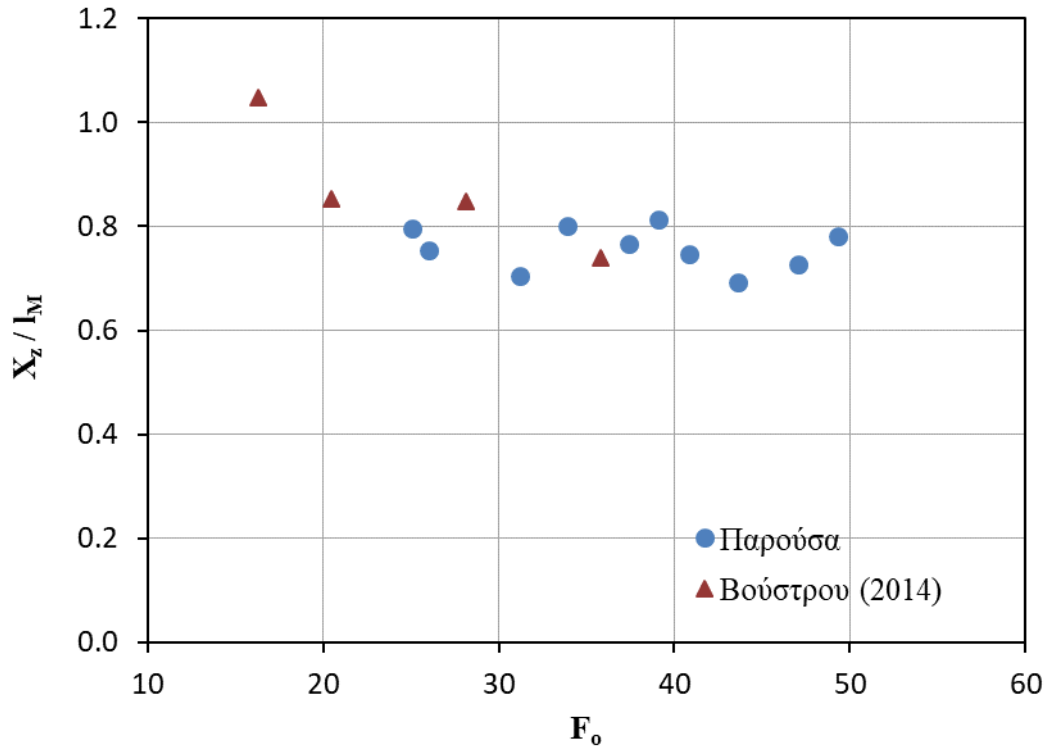
Σχήμα 6-39: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/l_M για γωνία $\theta_o=15^\circ$.



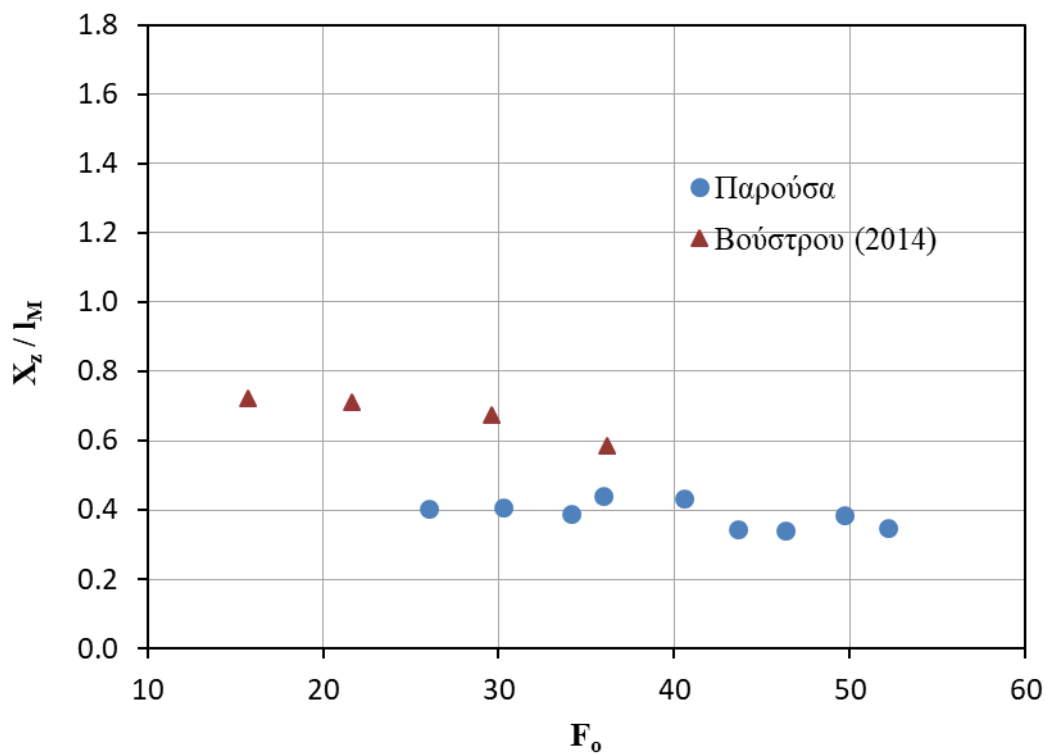
Σχήμα 6-40: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/l_M για γωνία $\theta_0 = 30^\circ$.



Σχήμα 6-41: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/l_M για γωνία $\theta_0 = 45^\circ$.



Σχήμα 6-42: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/l_M για γωνία $\theta_0 = 60^\circ$.



Σχήμα 6-43 Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_z/l_M για γωνία $\theta_0 = 75^\circ$.

Είναι φανερό ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι γενικά σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της Βούστρου (2014). Παρατηρείται, επίσης, πως οι τιμές των οριζόντιων αποστάσεων των δυο εργασιών αποκλίνουν περισσότερο από ότι οι κατακόρυφες. Αυτό μπορεί να οφείλεται κατά ένα μέρος στην όχι καλή ευκρίνεια της μέσης εικόνας (που προκύπτει από πολλά στιγμιότυπα). καθώς και στο ό,τι η κορυφή της καμπύλης της φλέβας δεν είναι σημειακή, αλλά το τελικό τερματικό ύψος Z_f αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών X_z . Επίσης οι αποκλίσεις μπορεί να εξηγούνται και από το γεγονός ότι η Βούστρου (2014) μελέτησε μικρότερους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude από αυτούς της παρούσας εργασίας.

Στον Πίνακα 6-3 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της σταθεράς $C_3 (= X_z/I_M)$ για κάθε γωνία θ_0 που προέκυψαν τόσο από την παρούσα εργασία όσο και από τη μελέτη της Βούστρου (2014).

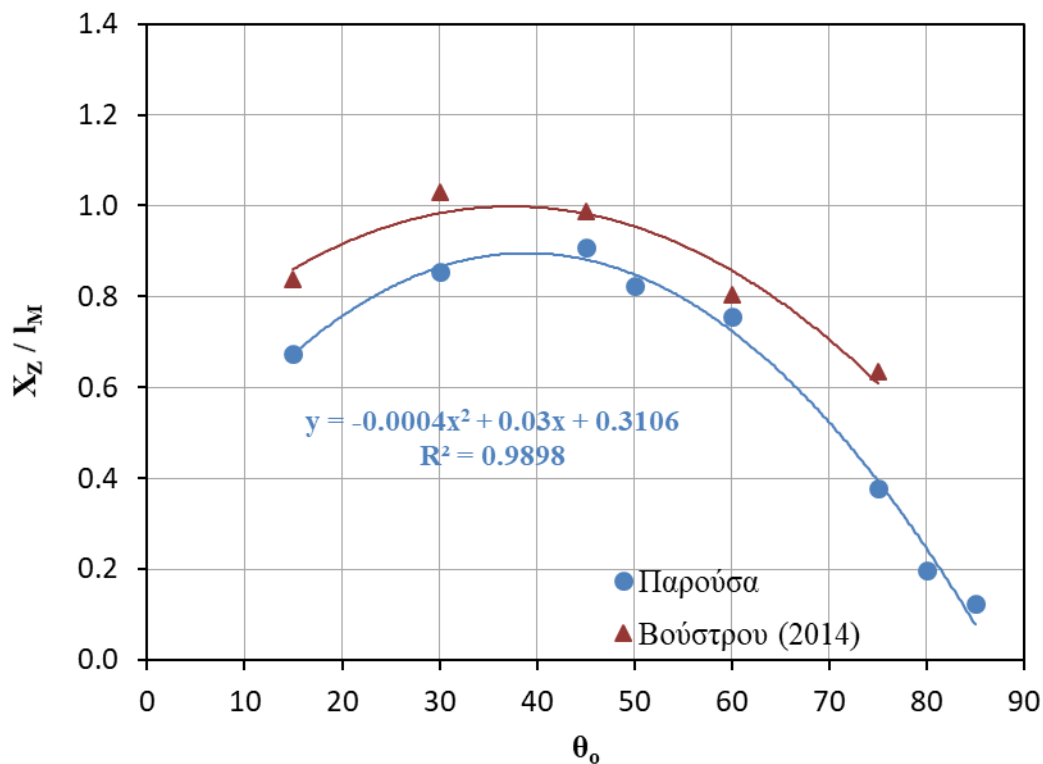
Πίνακας 6-3 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αδιάστατης οριζόντια απόστασης X_z/I_M .

	θ_0 (deg)	Παρούσα	Βούστρου (2014)
X_z / I_M	15	0.67	0.84
	30	0.86	1.03
	45	0.91	0.99
	50	0.82	-
	60	0.75	0.80
	75	0.38	0.64
	80	0.20	-
	85	0.12	-

Από τον Πίνακα 6-3 παρατηρείται πως οι τιμές της αδιάστατης οριζόντια απόστασης X_z/I_M είναι γενικά μικρότερες κατά 6-20% από αυτές της Βούστρου (2014). Η μέγιστη απόκλιση είναι 40% και παρατηρείται στη γωνία παροχέτευσης $\theta_0=75^\circ$. Επιπλέον μέγιστο X_z/I_M παρουσιάζεται για $\theta_0= 45^\circ$, ενώ σύμφωνα με Βούστρου (2014) εμφανίζεται για $\theta_0= 30^\circ$ αν και οι τιμές στις γωνίες 30° και 45° είναι πολύ κοντά

Η σταθερά C_3 , δηλ. η αδιάστατη οριζόντια απόσταση X_z/I_M από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση που αντιστοιχεί στο τελικό τερματικό ύψος, παριστάνεται γραφικά ως προς τη γωνία παροχέτευσης θ_0 στο Σχήμα 6-44. Παρατηρείται πως η

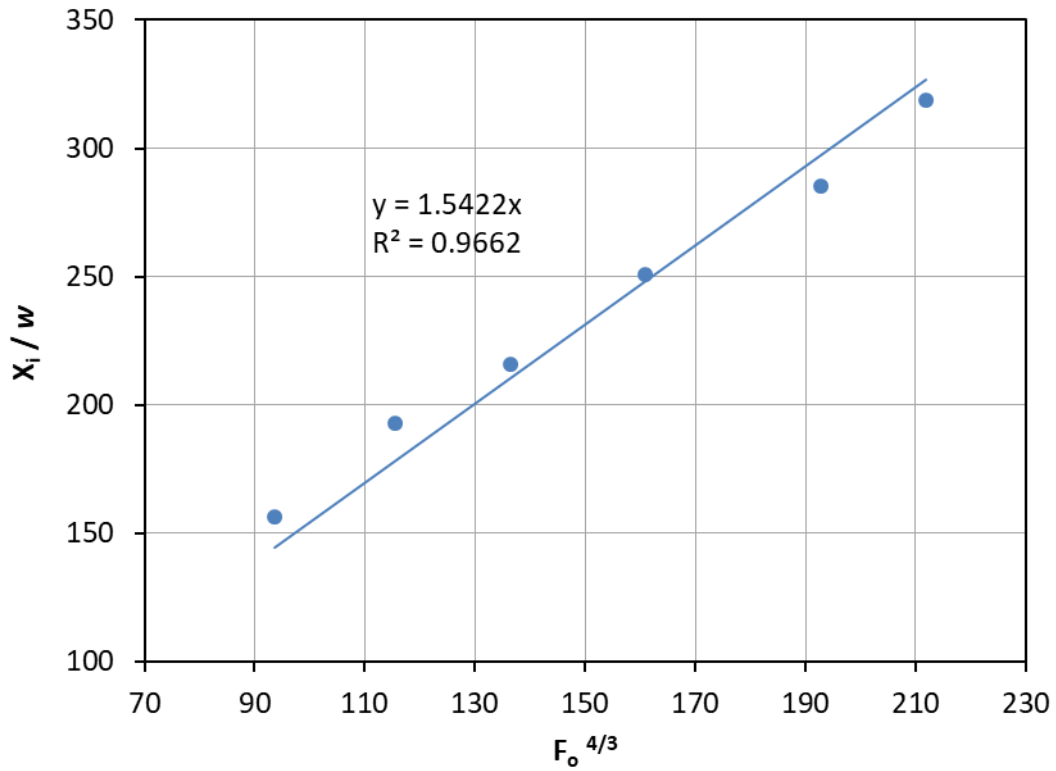
αδιάστατη οριζόντια απόσταση X_z/I_M αυξάνεται συνεχώς έως τη γωνία $\theta_0=45^\circ$, όπου παίρνει τη μέγιστη τιμή της, ενώ παρουσιάζει πτώση έως τη γωνία $\theta_0=85^\circ$. Η αδιάστατη οριζόντια απόσταση X_z/I_M συσχετίσθηκε με τη γωνία θ_0 ($15^\circ \leq \theta_0 \leq 85^\circ$) με μεγάλη ακρίβεια με πολυωνυμική καμπύλη δευτέρου βαθμού και προσδιορίστηκε η συνάρτηση $C_3(\theta_0)$.



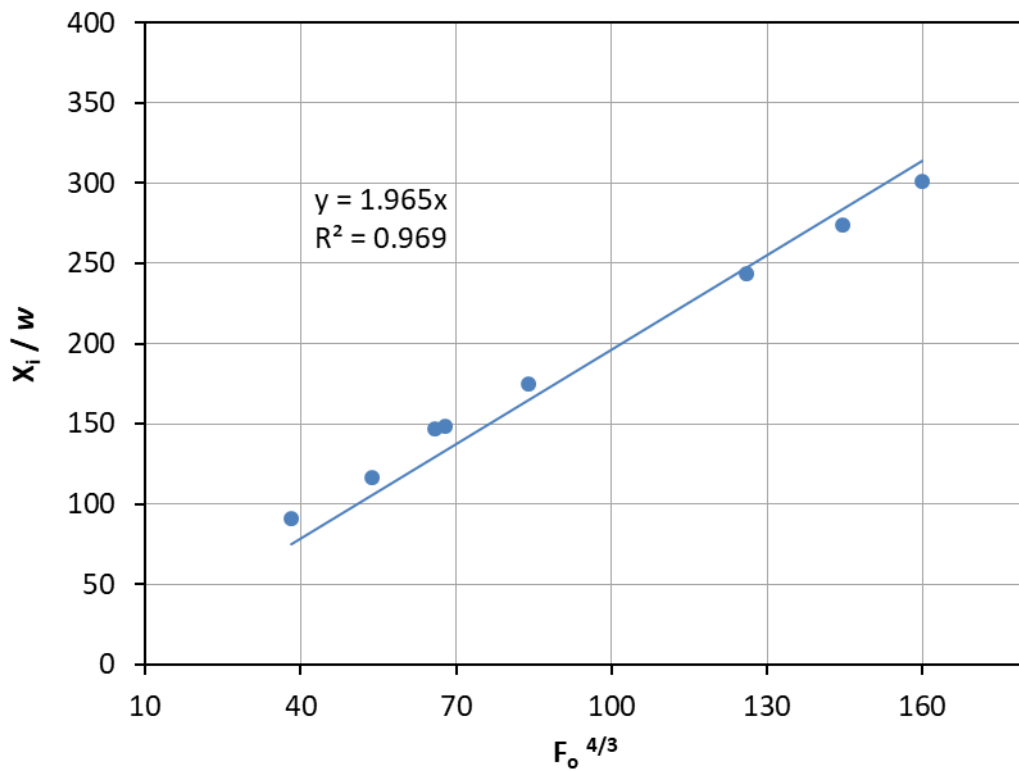
Σχήμα 6-44: Μεταβολή X_z / I_M με τη γωνία θ_0 .

6.5 Οριζόντια Θέση Σημείου Επιστροφής

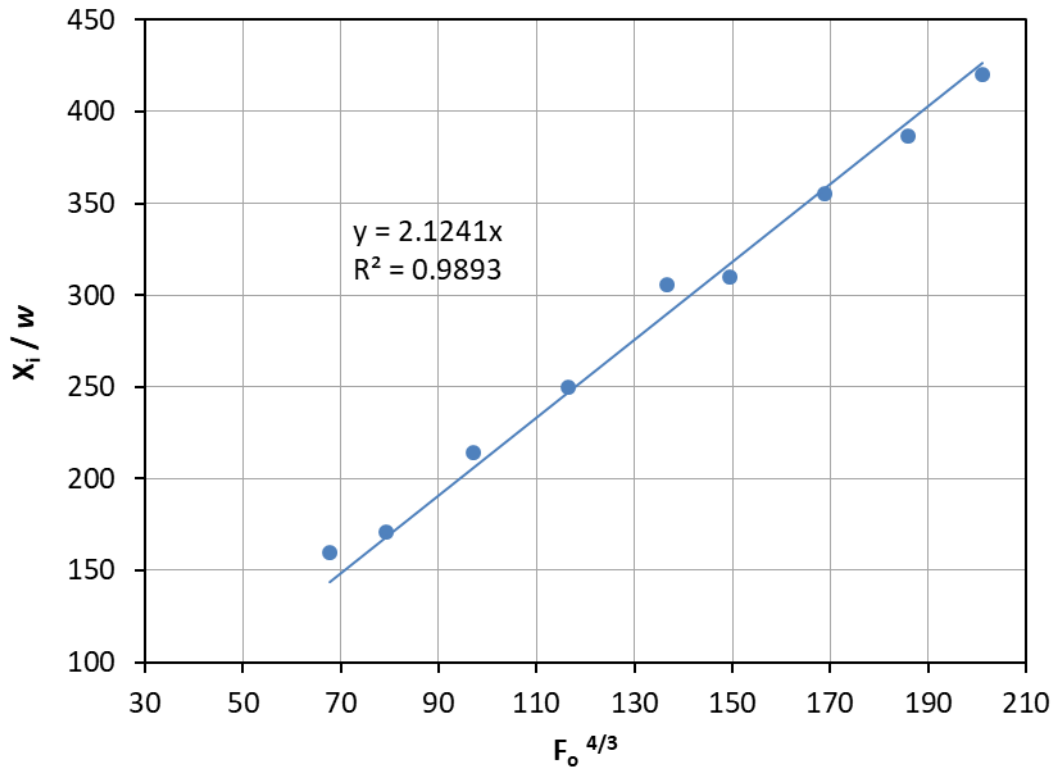
Στα Σχήματα 6-45 έως 6-52 παρουσιάζεται μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i/w από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης με τον όρο $F_0^{4/3}$ για όλες τις γωνίες παροχέτευσης θ_0 . Όπως φαίνεται, προκύπτει γραμμική μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i/w με τον όρο $F_0^{4/3}$ σε όλες τις γωνίες. Η ακρίβεια των γραμμικών συσχετίσεων είναι ικανοποιητική, αφού ο συντελεστής συσχέτισης R^2 σε όλες τις περιπτώσεις είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Συνεπώς επαληθεύεται η συσχέτιση που προέκυψε από τη διαστατική ανάλυση (Πίνακας 3-2).



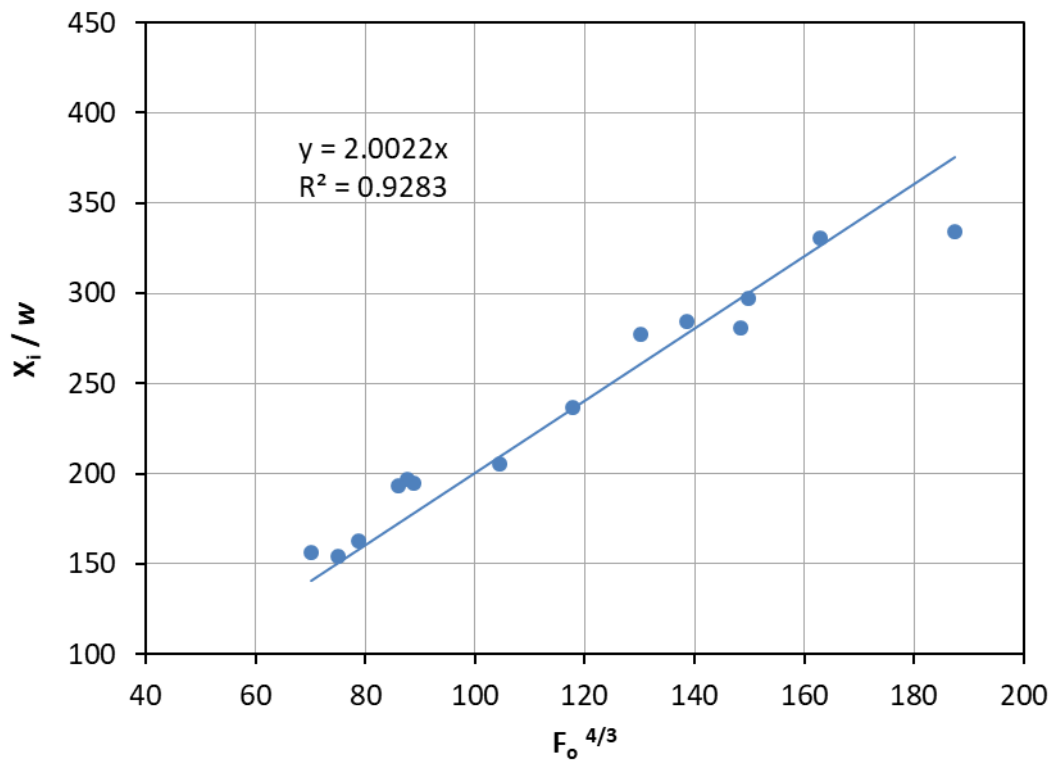
Σχήμα 6-45: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_0 = 15^\circ$.



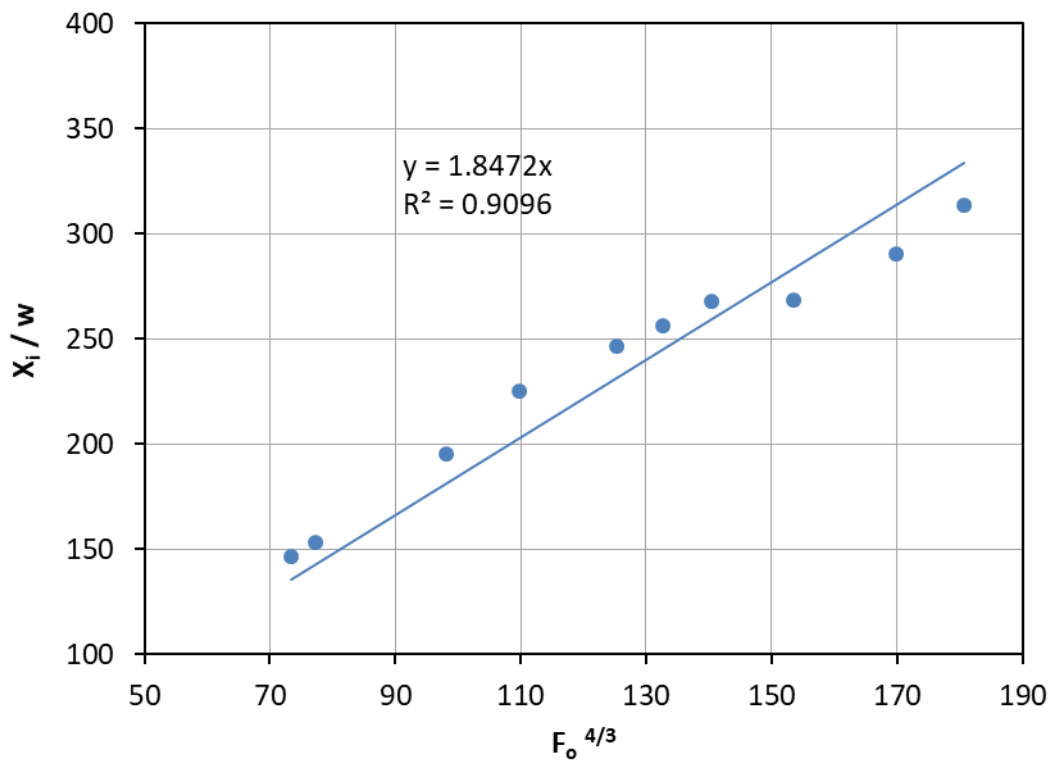
Σχήμα 6-46: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_0 = 30^\circ$.



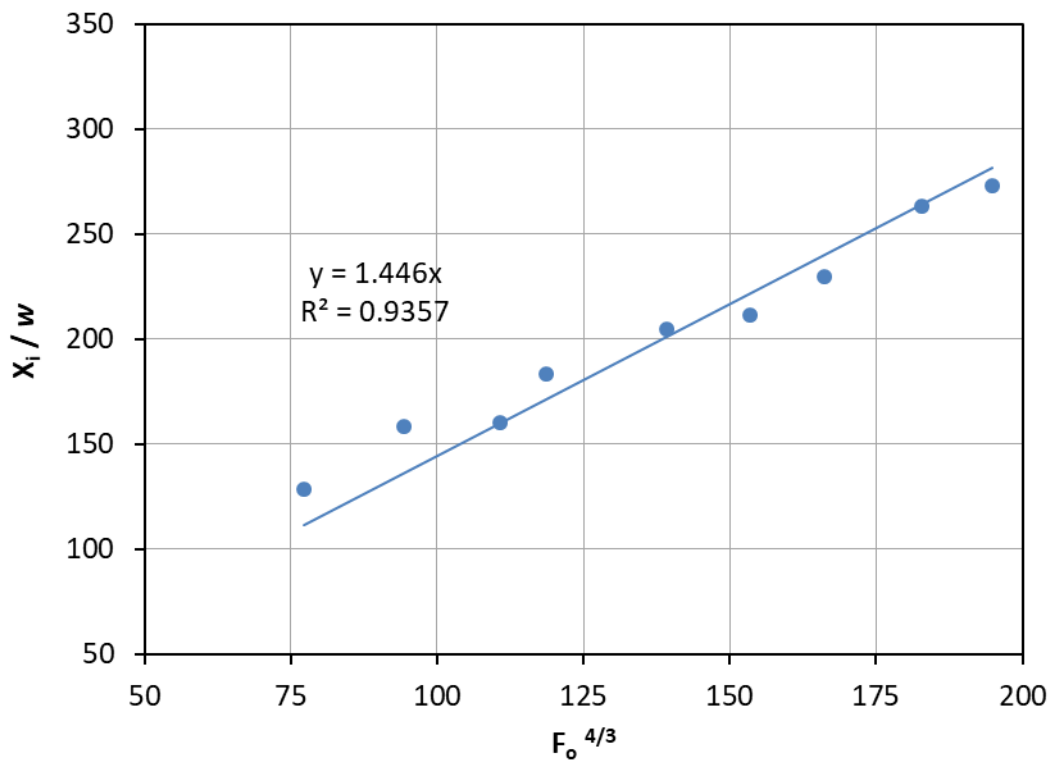
Σχήμα 6-47: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 45^\circ$.



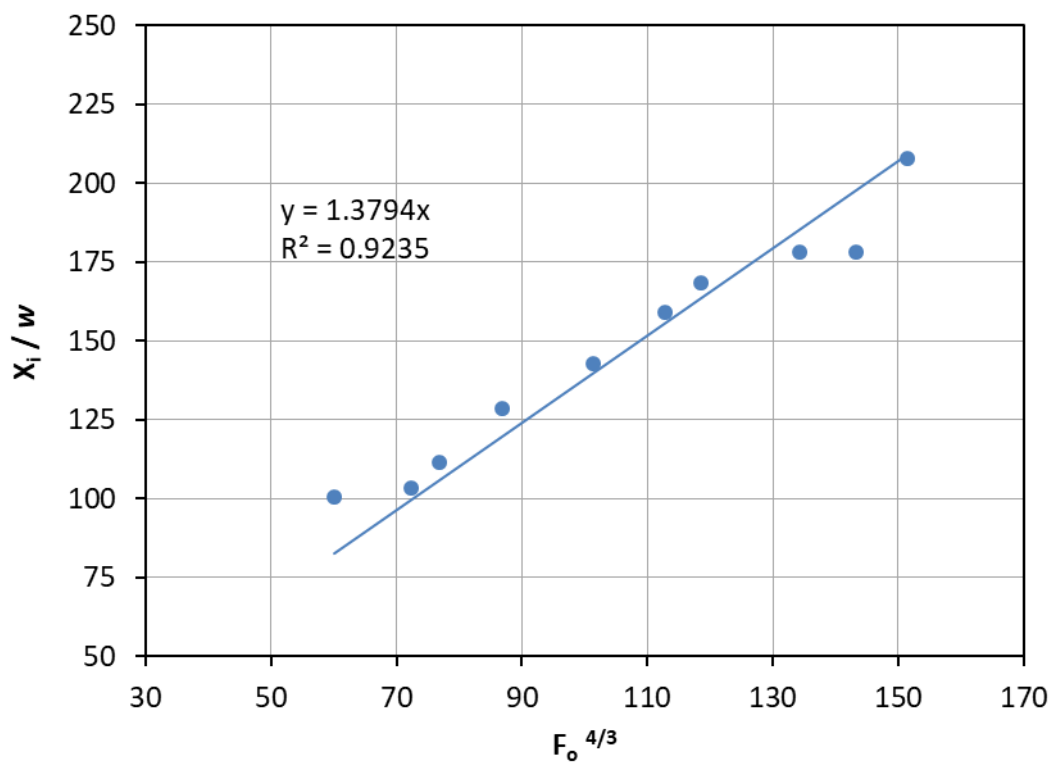
Σχήμα 6-48: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 50^\circ$.



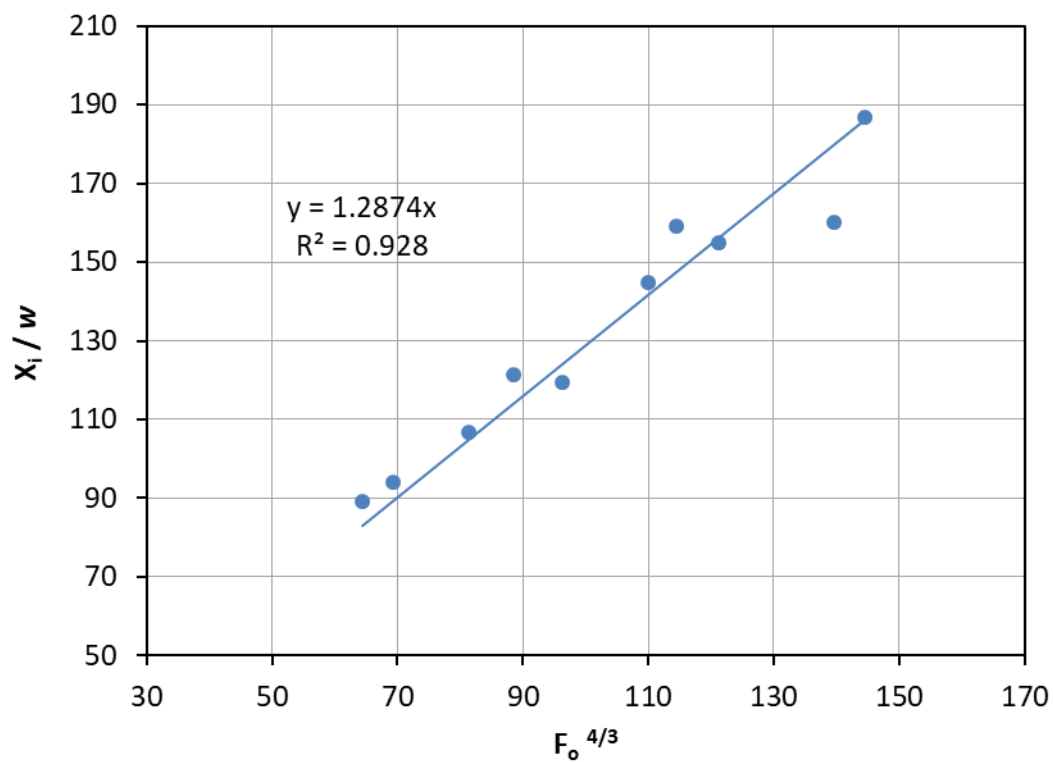
Σχήμα 6-49: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 60^\circ$.



Σχήμα 6-50: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 75^\circ$.

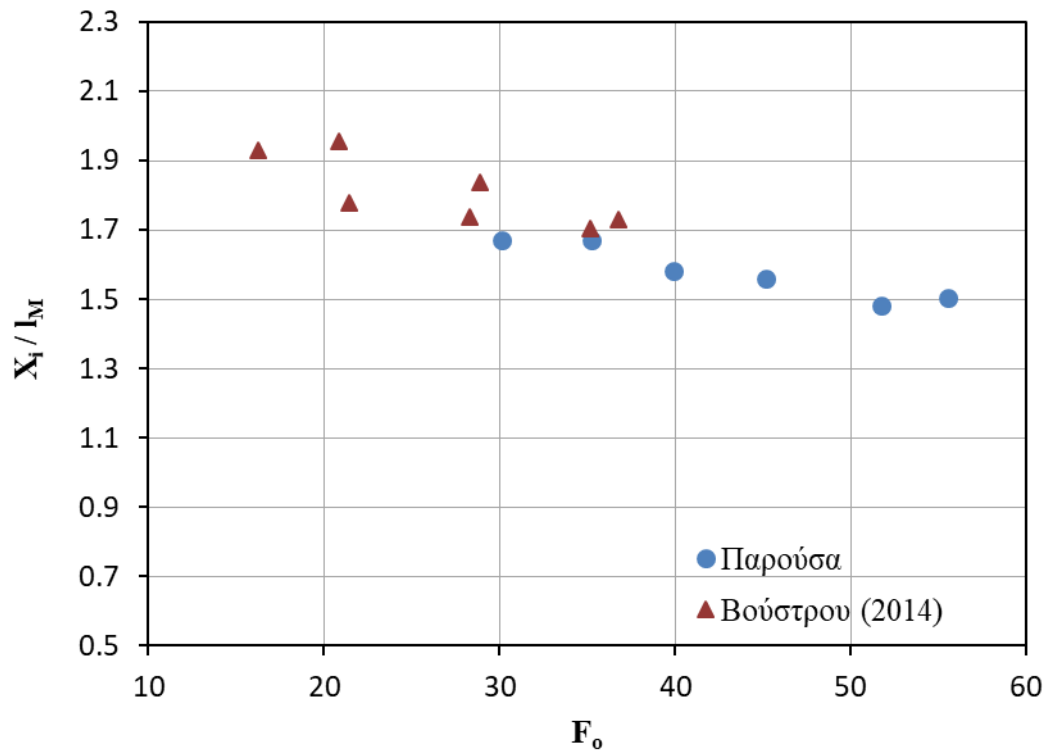


Σχήμα 6-51: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 80^\circ$.

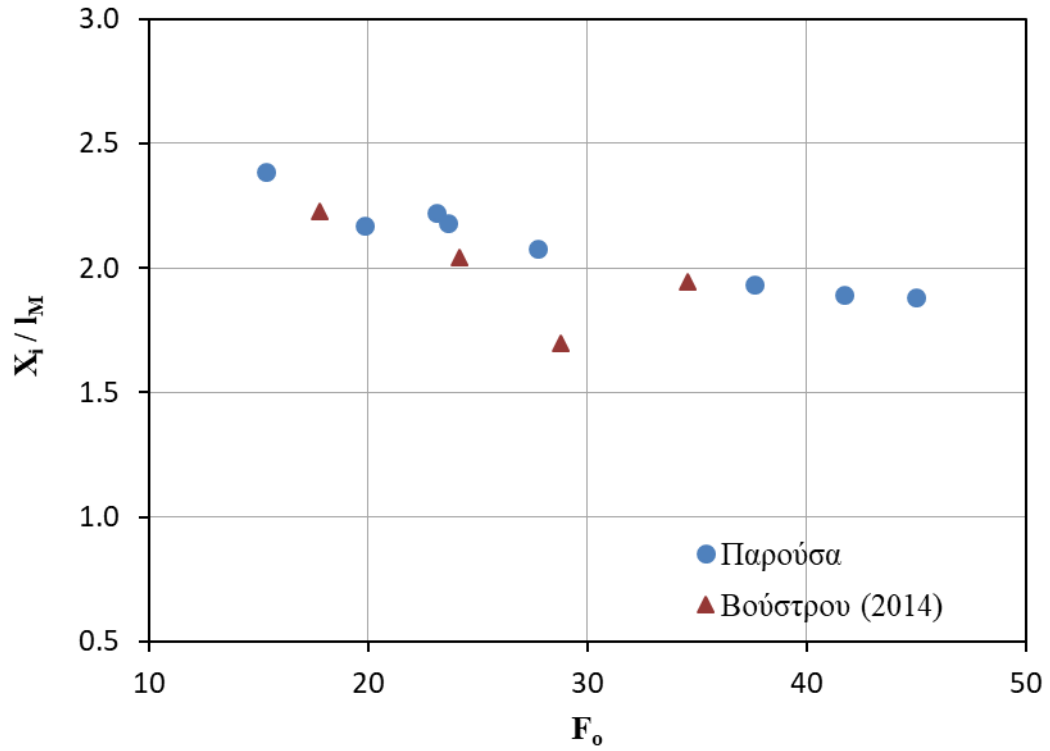


Σχήμα 6-52: Μεταβολή X_i/w με $F_o^{4/3}$ για γωνία $\theta_o = 85^\circ$.

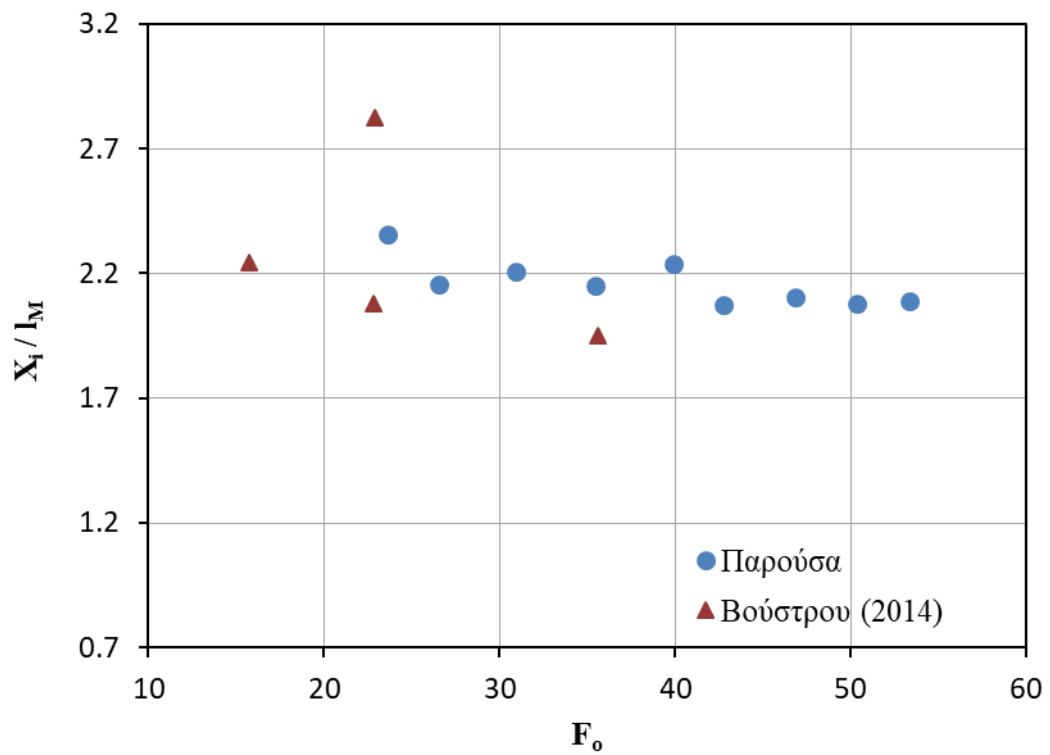
Ακολουθούν γραφήματα (Σχήμα 6-53 έως Σχήμα 6-57) με τη μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης χ_i/l_M συναρτήσει του πυκνομετρικού αριθμού F_o . Στα γραφήματα αυτά εικονίζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μαζί με αυτά της Βούστρου (2014).



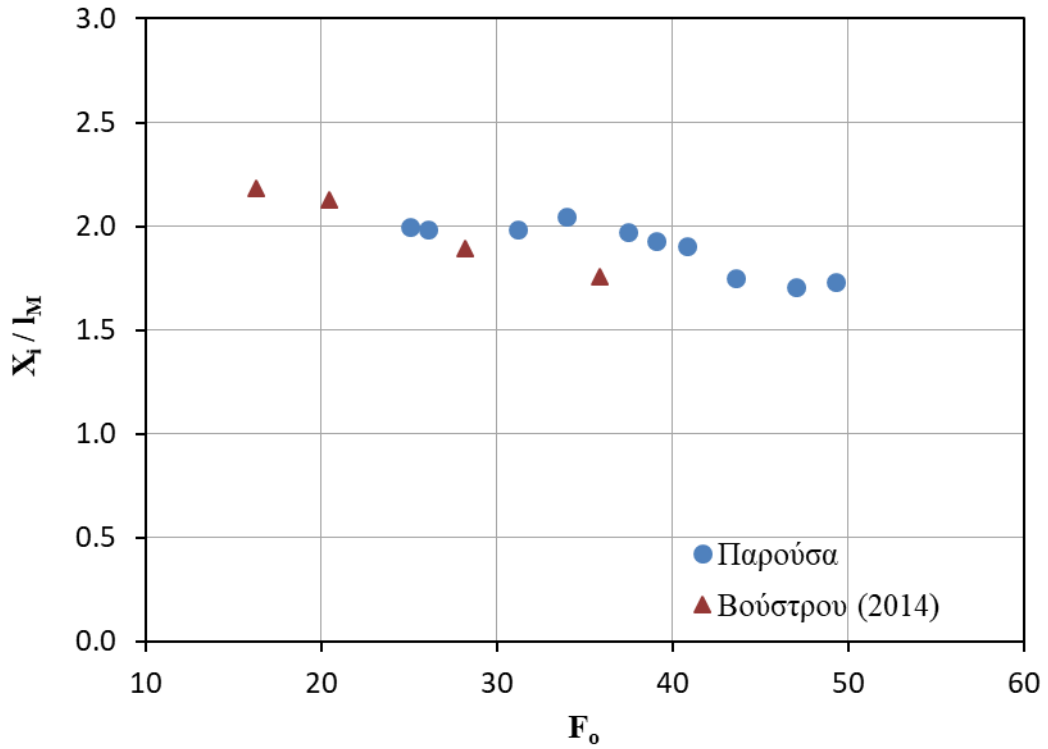
Σχήμα 6-53: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης χ_i/l_M για γωνία $\theta_0= 15^\circ$.



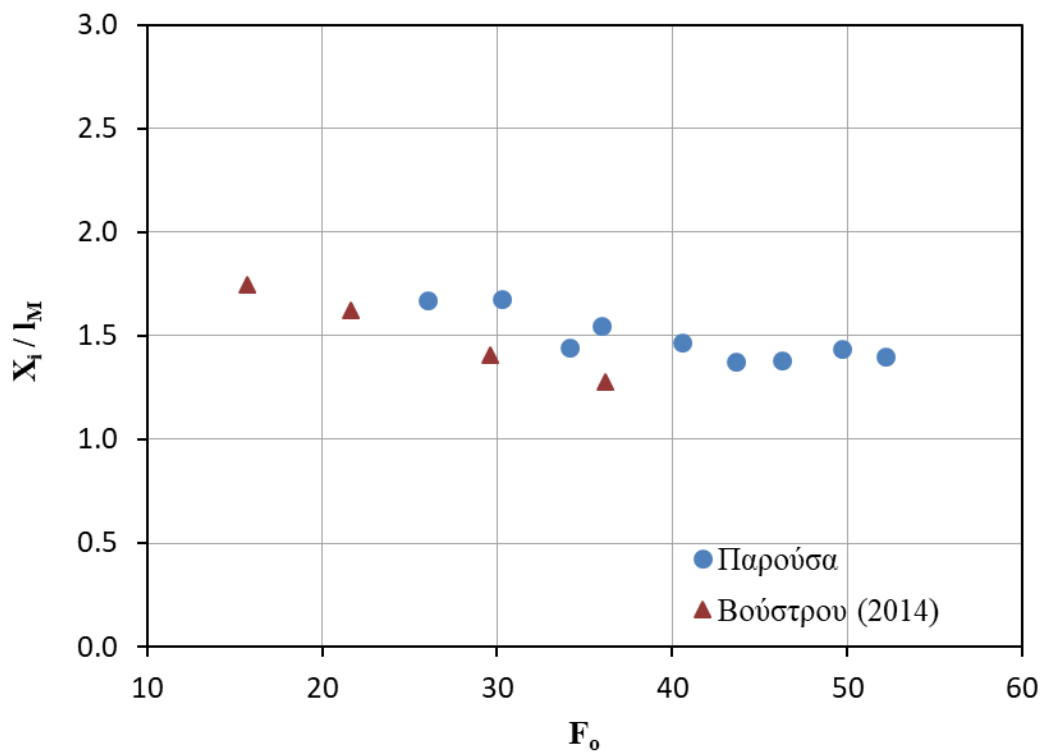
Σχήμα 6-54: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i/l_M για γωνία $\theta_0 = 30^\circ$.



Σχήμα 6-55: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i/l_M για γωνία $\theta_0 = 45^\circ$.



Σχήμα 6-56: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i/L_M για γωνία $\theta_0 = 60^\circ$.



Σχήμα 6-57: Σύγκριση αποτελεσμάτων αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i/L_M για γωνία $\theta_0 = 75^\circ$.

Παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της Βούστρου (2014).

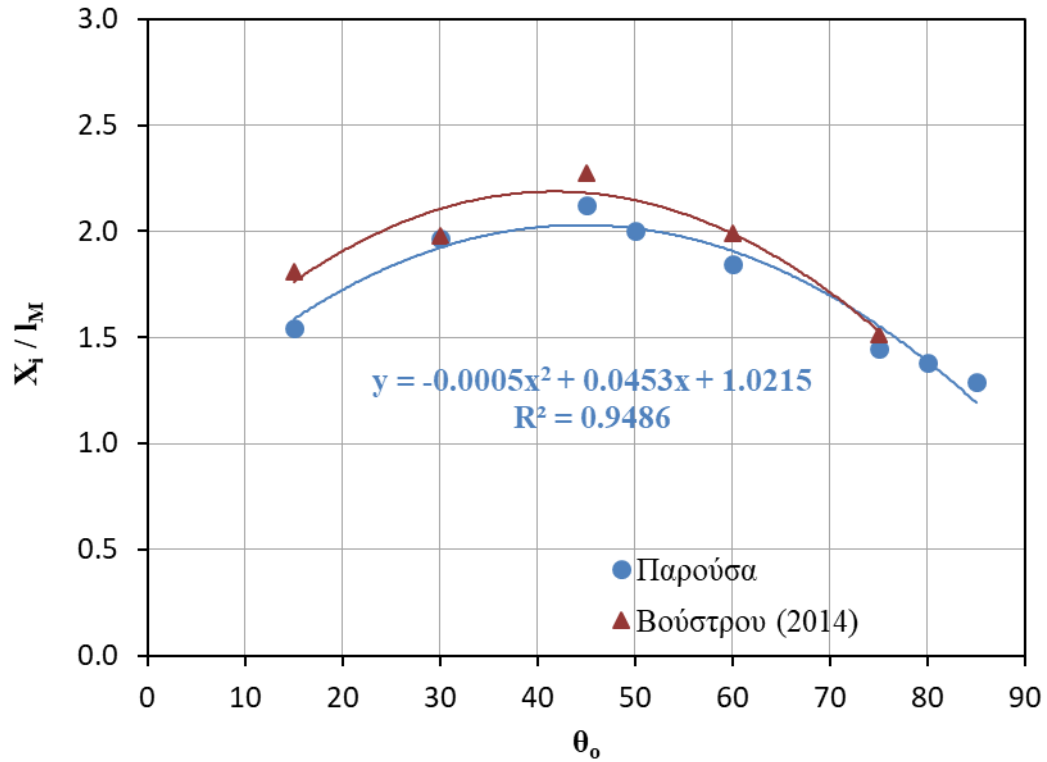
Στον Πίνακα 6-4 παρατίθενται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα της σταθεράς $C_4 (= X_i/I_M)$ για κάθε γωνία θ_0 που προέκυψαν τόσο από την παρούσα εργασία όσο και από τη μελέτη της Βούστρου (2014).

Πίνακας 6-4 : Συγκεντρωτικά αποτελέσματα αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i / I_M .

	θ_0 (deg)	Παρούσα	Βούστρου (2014)
X_i / I_M	15	1.54	1.76
	30	1.96	1.91
	45	2.12	2.15
	50	2.00	-
	60	1.85	1.87
	75	1.45	1.39
	80	1.38	-
	85	1.29	-

Από τον Πίνακα 6-4 παρατηρείται πως οι τιμές της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης X_i/I_M είναι αρκετά κοντά με αυτές της Βούστρου (2014) με αποκλίσεις από 1.1- 12%. Μέγιστο X_i/I_M παρουσιάζεται στη $\theta_0= 45^\circ$ σε αμφότερες τις μελέτες.

Η σταθερά C_4 , δηλ. η αδιάστατη οριζόντια απόσταση X_i/I_M από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης παριστάνεται γραφικά ως προς τη γωνία παροχέτευσης θ_0 στο Σχήμα 6-58. Παρατηρείται πως η αδιάστατη οριζόντια απόσταση X_i/I_M αυξάνεται συνεχώς έως τη γωνία $\theta_0=45^\circ$, όπου παίρνει τη μέγιστη τιμή της, ενώ παρουσιάζει πτώση έως τη γωνία $\theta_0= 85^\circ$. Η αδιάστατη οριζόντια απόσταση X_i/I_M συσχετίστηκε με μεγάλη ακρίβεια με τη γωνία θ_0 ($15^\circ \leq \theta_0 \leq 85^\circ$) με καμπύλη δευτέρου βαθμού και προσδιορίστηκε η συνάρτηση $C_4(\theta_0)$.



Σχήμα 6-58: Μεταβολή X_i / I_M με τη γωνία θ_0 .

6.6 Συγκεντρωτικοί Πίνακες Αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 6-5 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής για κάθε γωνία θ_0 αδιαστατοποιημένα ως προς I_M .

Πίνακας 6-5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τα αδιάστατα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής διδιάστατων φλεβών αρνητικής άνωσης.

θ_0 (deg)	$C_i (\theta_0)$			
	$C_1=Z_i / I_M$	$C_2=Z_f / I_M$	$C_3=X_z / I_M$	$C_4=X_i / I_M$
15	0.39	0.24	0.67	1.54
30	0.70	0.50	0.86	1.96
45	0.93	0.75	0.91	2.12
50	0.93	0.77	0.82	2.00
60	1.10	0.92	0.75	1.85
75	1.35	1.08	0.38	1.45
80	1.49	1.20	0.20	1.38
85	1.55	1.16	0.12	1.29
90	1.51	1.13	-	-

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι εξισώσεις (fitting curves) όλων των διαγραμμάτων που παρουσιάστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο.

Πίνακας 6-6: Εξισώσεις συσχέτισης (fitting curves) αδιάστατων γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τη γωνία παροχέτευσης θ_o .

$C_1 = Z_i / I_M$	$C_1 = 0.0161\theta_o + 0.1675$	$\theta_o = 15^\circ \text{ έως } 85^\circ$
$C_2 = Z_f / I_M$	$C_2 = 0.014\theta_o + 0.07$	$\theta_o = 15^\circ \text{ έως } 80^\circ$
	$C_2 = -2 * 10^{-9} \theta_o^5 + 5 * 10^{-7} \theta_o^4 - 4 * 10^{-5} \theta_o^3 + 0.0011 \theta_o^2 + 0.0065 \theta_o$	$\theta_o = 15^\circ \text{ έως } 90^\circ$
$C_3 = X_z / I_M$	$C_3 = -0.0004 \theta_o^2 + 0.03 * \theta_o + 0.3106$	$\theta_o = 15^\circ \text{ έως } 85^\circ$
$C_4 = X_i / I_M$	$C_4 = -0.0005 \theta_o^2 + 0.0453 * \theta_o + 1.0215$	$\theta_o = 15^\circ \text{ έως } 85^\circ$

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική διερεύνηση από την οποία διαπιστώθηκε πως η έρευνα έχει επικεντρωθεί στις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης, ενώ περιορισμένες είναι οι εργασίες που έχουν εκπονηθεί σε διδιάστατες φλέβες αρνητικής άνωσης που διοχετεύονται υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η πειραματική διερεύνηση διδιάστατων φλεβών αρνητικής άνωσης με στόχο να παρουσιαστούν νέα πειραματικά δεδομένα χρήσιμα στο σχεδιασμό συστημάτων διάθεσης βαρύτερων αποβλήτων αλλά και στην προσομοίωση τέτοιων ροών.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 84 πειράματα οπτικοποίησης της ροής (flow visualization) για γωνίες παροχέτευσης 15° , 30° , 45° , 50° , 60° , 75° , 80° , 85° , 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και μελετήθηκε μεγάλο εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude ($15 < F_o < 56$). Μετά από επεξεργασία του οπτικού υλικού προέκυψαν τα εξής τέσσερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής:

- Το αρχικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας.
- Το τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας.
- Η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου έως τη θέση που παρατηρείται το τελικό τερματικό ύψος ανόδου.
- Η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου έως τη θέση επιστροφής του άνω (εξωτερικού) ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε μεγαλύτερο εύρος γωνιών παροχέτευσης από αυτό που έχει ήδη μελετηθεί στο παρελθόν. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η ροή φλέβας από σχισμή που εκρέει υπό γωνία $\theta_o = 50^\circ$, 80° , 85° και 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Οι γωνίες $\theta_o = 15^\circ$, 30° , 45° , 60° , 75° για τις οποίες έχουν παρουσιαστεί περιορισμένα αποτελέσματα, μελετήθηκαν για μεγαλύτερο εύρος πυκνομετρικού αριθμού F_o (από 15 έως 56). Επιπλέον, προέκυψαν πειραματικά δεδομένα για το αρχικό τερματικό ύψος Z_i διδιάστατης φλέβας, για το οποίο δεν υπήρχαν.

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση είναι τα εξής:

- 1) Για κάθε γωνία παροχέτευσης, κάθε γεωμετρικό χαρακτηριστικό της τροχιάς της φλέβας αδιαστατοποιημένο ως προς το πλάτος της σχισμής w συσχετίζεται γραμμικά με τον όρο $F_o^{4/3}$ (F_o ο πυκνομετρικός αριθμός Froude), γεγονός που επαληθεύει τη συσχέτιση που προέκυψε από τη διαστατική ανάλυση των διδιάστατων φλεβών αρνητικής άνωσης.
- 2) Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αδιαστατοποιημένα ως προς την κλίμακα μήκους l_M (σταθερές $C_i(\theta_o)$) είναι γενικά σε συμφωνία με αυτά άλλων ερευνητών.
- 3) Το αρχικό τερματικό ύψος της φλέβας, αδιαστατοποιημένο ως προς την κλίμακα μήκους l_M , αυξάνεται γραμμικά με τη γωνία εκροής θ_o για γωνίες στο διάστημα 15° ως 85° και παρουσιάζει μέγιστη τιμή $Z_i/l_M = 1.55$ στη γωνία $\theta_o = 85^\circ$. Μικρότερη τιμή προέκυψε για την κατακόρυφη φλέβα.
- 4) Το τελικό τερματικό ύψος της φλέβας, αδιαστατοποιημένο ως προς την κλίμακα μήκους l_M , αυξάνεται γραμμικά με τη γωνία εκροής θ_o για γωνίες στο διάστημα 15° ως 80° και παρουσιάζει μέγιστη τιμή $Z_f/l_M = 1.20$ στη γωνία $\theta_o = 80^\circ$. Για γωνίες από 80° ως 90° το αδιάστατο ύψος Z_f/l_M μειώνεται.
- 5) Η μείωση του τερματικού ύψους των κατακόρυφων φλεβών οφείλεται στην αλληλεπίδραση της καθοδικής με την ανοδική ροή, η οποία εντείνεται όσο η εκροή τείνει να γίνει κατακόρυφη.
- 6) Η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση που παρατηρείται το τελικό τερματικό ύψος ανόδου, αδιαστατοποιημένη με την κλίμακα l_M , αυξάνεται με τη γωνία θ_o στο διάστημα 15° ως 45° και μειώνεται στο διάστημα 45° ως 85° . Παρουσιάζει μέγιστη τιμή $X_z/l_M = 0.91$ στη γωνία $\theta_o = 45^\circ$. Η μεταβολή της απόστασης X_z/l_M με τη γωνία θ_o προσεγγίζεται ικανοποιητικά με πολυωνυμική καμπύλη δευτέρου βαθμού.
- 7) Η οριζόντια απόσταση από το κέντρο του στομίου παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης, αδιαστατοποιημένη με την κλίμακα l_M , αυξάνεται με τη γωνία θ_o στο διάστημα 15° ως 45° και μειώνεται στο διάστημα 45° ως 85° . Παρουσιάζει μέγιστη τιμή $X_i/l_M = 2.21$ στη γωνία $\theta_o = 45^\circ$. Η μεταβολή της απόστασης X_i/l_M με τη γωνία θ_o προσεγγίζεται ικανοποιητικά με πολυωνυμική καμπύλη δευτέρου βαθμού .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Βούστρου, Μ.Κ. (2014) Πειραματική μελέτη δισδιάστατων κεκλιμένων τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης. Διατριβή Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
- Δημητρίου, Ι.Δ. (1978) Τυρβώδης διάχυσις κατακόρυφων υδατίνων φλεβών αρνητικής ανώσεως. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Παπακωνσταντής, Η.Γ. (2009) Τυρβώδεις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Τσατσάρα, Ε. (2016) Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση κεκλιμένων τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΔΠΜΣ "Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων", ΕΜΠ, Αθήνα.

Διεθνής

- Abessi, O., Roberts, P.J.W. (2015) Effect of nozzle orientation on dense jets in stagnant environments. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 141(8).
- Abraham, G. (1967) Jets with negative buoyancy in homogeneous fluid. *Journal of Hydraulic Research* 5, 235-248.
- Baines, W.D., Turner, J.S., Campbell, I.H. (1990) Turbulent fountains in an open chamber. *Journal of Fluid Mechanics* 212, 557–592.
- Bloomfield, L.J., Kerr, R.C. (1998) Turbulent fountains in a stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics* 358, 335-356.
- Bloomfield, L.J., Kerr, R.C. (2002) Inclined turbulent fountains. *Journal of Fluid Mechanics* 451, 283-294.
- Campbell, I.H., Turner, J.S. (1989) Fountains in Magma Chambers. *Journal of Petrology* 30(4), 885–923.

- Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F., Nicosia, S. (2005) Benchscale investigation of inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 131(11), 1017–1022.
- Crowe, A.T., Davidson, R.I., Nokes, R.I. (2016) Velocity measurements in inclined negatively buoyant jets. *Environmental Fluid Mechanics* 16(3), 503–520.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., Brooks, N.H. (1979) *Mixing in inland and coastal waters*. Academic.
- Kikkert, G.A. (2006) Buoyant jets with two and three dimensional trajectories. PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Kikkert, G.A., Davidson M.J., Nokes, R.I. (2007) Inclined Negatively Buoyant Discharges. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 133(5), 545-554.
- Kotsovinos, N.E. (1975) A study of the entrainment and turbulence in a plane buoyant jet. Tech. Rep. KH-R-32. W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, California.
- Lai, C.C.K., Lee, J.H.W. (2012) Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *Journal of Hydro-environment Research* 6, 9–28.
- Lindberg, W.R. (1994) Experiments on negatively buoyant jets, with or without cross-flow. In *Recent Research Advances in the Fluid Mechanics of Turbulent Jets and Plumes* (ed. P. A. Davies & M. J. Valente Neves), 131-145. Kluwer.
- Nemlioglu, S., Roberts, P.J.W. (2006) Experiments on dense jets using 3D laser-induced fluorescence (3DLIF). In *4th International Conference on Marine Waste Water Disposal and Marine Environment*.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou G.C, Papanicolaou, P.N. (2011a) Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics. *Journal of Hydraulic Research* 49(1), 3 – 12.
- Papakonstantis, I.G., Christodoulou G.C, Papanicolaou P.N (2011b) Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *Journal of Hydraulic Research* 49(1), 13 – 22.

- Papanicolaou, P.N., Kokkalis, T.J. (2008) Vertical buoyancy preserving and non-preserving fountains, in a homogeneous calm ambient. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 51, 4109-4120.
- Papanicolaou, P.N., List, J.E. (1988) Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *Journal of Fluid Mechanics* 195, 341–391.
- Papanicolaou, P.N., Papakonstantis, I.G., Christodoulou, G.C. (2008) On the entrainment coefficient in negatively buoyant jets. *Journal of Fluid Mechanics* 614, 447-470.
- Papakonstantis, I.G., Tsatsara, E.I. (2018) Trajectory Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. *Environmental Processes*, pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40710-018-0307-6>.
- Roberts, P.J.W., Ferrier, A., Daviero, G. (1997) Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 123(8), 693–699.
- Roberts, P.J.W., Toms, G. (1987) Inclined dense jets in flowing current. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 113(3), 323-341.
- Turner, J.S. (1966) Jets and plumes with negative or reversing buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics* 26, 779-792.
- Voustrou, M.K., Yannopoulos, P.C., Christodoulou, G.C. (2015) Experiments on plane negatively buoyant jets. In 36th IAHR (International Association for Hydro-Environment Engineering and Research) World Congress.
- Zeitoun, M.A., McIlhenny, W.F., Reid, R.O. (1970) Conceptual designs of outfall systems for desalting plants. Research and Development Progress Report No 550, Office of Saline Water, US Dept. of Interior, Washington, DC, USA, 139.
- Zhang, H., Baddour, R.E. (1997) Maximum vertical penetration of plane turbulent negatively buoyant jets. *Journal of Engineering Mechanics* 123, 973–977.
- Zhang, H., Baddour, R.E. (1998) Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large Froude numbers. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE* 124, 550–553.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στους παρακάτω πίνακες Π.1, Π.2, Π.3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Παρατίθενται για κάθε πείραμα οι συντεταγμένες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ροής ως προς το κέντρο του στομίου, μετά τη διόρθωση του οπτικού σφάλματος (βλ. παράγραφο 5.6).

Πίνακας Π.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς της φλέβας για γωνίες παροχέτευσης 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 80°, 85°, 90°.

Ημερομηνία	θ_0	F_0	Re_0	Z_i (m)	Z_f (m)	X_z (m)	X_i (m)
15/12/17_EXP1	15°	35.24	1670	0.093	0.059	0.160	0.386
15/12/17_EXP2		39.92	1949	0.105	0.068	0.182	0.432
15/12/17_EXP3		45.19	2201	0.125	0.080	0.214	0.502
15/12/17_EXP4		30.11	1460	0.073	0.048	0.130	0.313
16/12/17_EXP1		51.72	2480	0.156	0.094	0.258	0.571
16/12/17_EXP2		55.54	2648	0.161	0.099	0.287	0.637
18/09/17_EXP1	30°	23.14	1307	0.085	0.068	0.135	0.293
09/10/17_EXP1		44.97	2508	0.207	0.153	0.254	0.602
11/10/17_EXP1		37.62	2061	0.193	0.129	0.213	0.487
11/10/17_EXP2		27.75	1530	0.135	0.094	0.155	0.349
18/10/17_EXP1		15.34	832	0.070	0.044	0.074	0.182
19/10/17_EXP1		23.66	1223	0.102	0.070	0.134	0.296
22/01/18_EXP1		19.85	1041	0.072	0.059	0.089	0.233
23/01/18_EXP1		41.71	2201	0.188	0.142	0.246	0.548
13/12/17_EXP1	45°	46.83	2089	0.290	0.243	0.307	0.711
13/12/17_EXP2		26.57	1251	0.159	0.131	0.137	0.342
13/12/17_EXP3		23.61	1111	0.154	0.114	0.132	0.319
13/12/17_EXP4		30.91	1446	0.190	0.156	0.158	0.429
14/12/17_EXP1		39.95	1893	0.260	0.211	0.247	0.611
14/12/17_EXP2		35.42	1670	0.215	0.176	0.214	0.500
14/12/17_EXP3		50.35	2368	0.338	0.283	0.348	0.774
25/01/18_EXP1		42.77	2284	0.292	0.224	0.253	0.620
25/01/18_EXP2		53.37	2857	0.364	0.286	0.374	0.841

Συνέχεια Πίνακα Π-1.

Ημερομηνία	θ_0	F_0	Re_0	Z_i (m)	Z_f (m)	X_z (m)	X_i (m)
19/10/17_EXP2	50°	25.48	1335	0.146	0.133	0.124	0.308
19/10/17_EXP3		26.44	1390	0.163	0.139	0.145	0.325
20/10/17_EXP1		28.23	1363	0.181	0.152	0.161	0.386
20/10/17_EXP2		24.25	1167	0.162	0.126	0.133	0.312
20/10/17_EXP3		28.95	1390	0.184	0.152	0.162	0.389
24/10/17_EXP1		42.83	2075	0.276	0.216	0.222	0.595
24/10/17_EXP2		45.61	2229	0.284	0.241	0.275	0.662
25/10/17_EXP1		50.68	2452	0.320	0.255	0.304	0.668
25/10/17_EXP2		28.65	1390	0.178	0.134	0.178	0.394
25/10/17_EXP3		35.75	1726	0.227	0.186	0.190	0.473
19/01/18_EXP1		32.69	1726	0.222	0.173	0.188	0.411
19/01/18_EXP2		38.53	2033	0.253	0.226	0.235	0.554
04/05/18_EXP1		42.53	2787	0.256	0.215	0.205	0.562
04/05/18_EXP2		40.39	2648	0.234	0.201	0.211	0.569
10/07/17_EXP1	60°	31.18	1754	0.206	0.187	0.138	0.390
11/07/17_EXP1		37.43	2201	0.258	0.228	0.192	0.494
11/07/17_EXP2		49.30	2927	0.360	0.294	0.283	0.627
13/07/17_EXP1		26.05	1251	0.144	0.143	0.116	0.306
17/07/17_EXP1		39.11	2229	0.275	0.240	0.216	0.512
17/07/17_EXP2		25.07	1418	0.157	0.140	0.117	0.293
23/01/18_EXP2		33.93	1782	0.291	0.229	0.176	0.450
24/01/18_EXP1		40.81	2159	0.344	0.269	0.210	0.536
24/01/18_EXP2		43.61	2335	0.352	0.291	0.213	0.537
24/01/18_EXP3		47.04	2508	0.381	0.313	0.247	0.581
21/11/17_EXP1	75°	30.28	1670	0.276	0.211	0.077	0.317
24/11/17_EXP1		46.30	2173	0.440	0.353	0.113	0.460
24/11/17_EXP2		34.13	1600	0.305	0.243	0.086	0.320
12/12/17_EXP1		40.54	1949	0.379	0.304	0.121	0.409
12/12/17_EXP2		52.16	2508	0.512	0.386	0.136	0.546
12/12/17_EXP3		26.04	1251	0.218	0.184	0.062	0.258
12/12/17_EXP4		43.60	2089	0.412	0.349	0.105	0.422
25/01/18_EXP3		35.96	1921	0.339	0.272	0.105	0.367
30/01/18_EXP1		49.70	2676	0.486	0.390	0.141	0.527

Συνέχεια Πίνακα Π-1.

Ημερομηνία	θ_0	F_0	Re_0	Z_i (m)	Z_f (m)	X_z (m)	X_i (m)
06/02/18_EXP1	80°	43.18	2257	0.431	0.358	0.063	0.416
06/02/18_EXP2		39.44	2061	0.393	0.304	0.047	0.357
07/02/18_EXP1		31.92	1670	0.322	0.250	0.040	0.286
07/02/18_EXP2		34.59	1810	0.326	0.289	0.045	0.318
07/02/18_EXP3		35.91	1879	0.343	0.276	0.040	0.337
07/02/18_EXP4		41.41	2159	0.428	0.336	0.061	0.356
08/02/18_EXP1		25.94	1335	0.233	0.195	0.030	0.223
08/02/18_EXP2		21.55	1111	0.199	0.157	0.026	0.201
08/02/18_EXP3		28.46	1474	0.260	0.213	0.038	0.257
08/02/18_EXP4		24.78	1279	0.238	0.169	0.030	0.207
31/01/18_EXP1	85°	30.75	1642	0.305	0.226	0.024	0.239
31/01/18_EXP2		36.52	1949	0.355	0.264	0.029	0.310
31/01/18_EXP3		41.67	2229	0.440	0.343	0.037	0.373
01/02/18_EXP1		24.03	1279	0.238	0.173	0.021	0.188
01/02/18_EXP2		33.97	1810	0.358	0.267	0.024	0.290
03/02/18_EXP1		28.86	1530	0.294	0.203	0.020	0.243
03/02/18_EXP2		40.61	2153	0.417	0.317	0.034	0.320
05/02/18_EXP1		22.75	1181	0.210	0.143	0.021	0.178
05/02/18_EXP2		34.99	1837	0.347	0.265	0.027	0.318
05/02/18_EXP3		27.10	1418	0.256	0.183	0.019	0.214
05/03/18_EXP1	90°	46.79	2508	0.498	0.408	-	-
05/03/18_EXP2		41.57	2215	0.428	0.304	-	-
05/03/18_EXP3		37.17	1977	0.368	0.264	-	-
05/03/18_EXP4		30.65	1614	0.287	0.207	-	-
07/03/18_EXP1		31.96	1670	0.328	0.227	-	-
07/03/18_EXP2		27.58	1432	0.269	0.199	-	-
07/03/18_EXP3		18.38	943	0.154	0.130	-	-
07/03/18_EXP4		31.42	1614	0.305	0.213	-	-

