



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

**Πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση
κεκλιμένων τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης**

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Η. ΤΣΑΤΣΑΡΑ

Επιβλέπων: Η. Παπακωνσταντής, Λέκτορας ΕΜΠ

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Ιούνιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ
ΚΕΚΛΙΜΕΝΩΝ ΤΥΡΒΩΔΩΝ ΦΛΕΒΩΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ**

ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Η. ΤΣΑΤΣΑΡΑ

Επιβλέπων: Η. Παπακωνσταντής, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούνιος 2016

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ στα πλαίσια του Διεπιστημονικού – Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα Ηλία Παπακωνσταντή, Λέκτορα ΕΜΠ. Η διδασκαλία του σε μαθήματα του κύκλου σπουδών του μεταπτυχιακού καταρχήν κέντρισε το ενδιαφέρον μου στο αντικείμενο της Περιβαλλοντικής Υδραυλικής. Το καλοκαίρι του 2015 με χαρά δέχθηκε να αναλάβει την επίβλεψη της μεταπτυχιακής εργασίας μου και πρότεινε το θέμα που τελικά εκπονήθηκε. Οι γνώσεις και η εμπειρία του πάνω αντικείμενο ήταν καθοριστικές, καθώς επίσης η καθοδήγηση του αδιάκοπη και υπομονετική σε όλη την πορεία της εργασίας. Εκτιμώ ιδιαίτερα την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή, τη βοήθειά του στα πολύωρα πειράματα, αλλά και την ενθάρρυνση που μου πρόσφερε σε περιόδους κούρασης.

Στην πορεία για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας, πολύτιμη ήταν η βοήθεια του Παναγιώτη Παπανικολάου, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ και τον ευχαριστώ για τις χρήσιμες συμβουλές και την υποστήριξη που μου παρείχε.

Ευχαριστίες απευθύνονται στον Διευθυντή του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής κ. Γεώργιο Χριστοδούλου, Καθηγητή ΕΜΠ, για την προθυμία του να μας εξασφαλίσει υλικά και εξαρτήματα απαραίτητα για την εκπόνηση των πειραμάτων.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον τεχνικό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής Γιάννη Πατσέλη, καθώς και τον Μανώλη Λασηθιωτάκη για την προθυμία τους στη διευθέτηση τεχνικών προβλημάτων που προέκυπταν.

Ολοκληρώνοντας θα ήθελα να απευθύνω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, στην αδελφή μου και στον Βαγγέλη μου, για την ανεκτίμητη ηθική υποστήριξη και την κατανόησή τους.

Αφιερώνω την μεταπτυχιακή εργασία στους γονείς μου.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Περιεχόμενα	iii
Περίληψη.....	1
Extended abstract.....	3
1 Εισαγωγή	13
1.1 Γενικά.....	13
1.2 Τυρβώδεις ανωστικές φλέβες.....	15
1.3 Κύριες παράμετροι της ροής.....	16
1.4 Το υπό μελέτη πρόβλημα	17
2 Προηγούμενες εργασίες και στόχοι παρούσας εργασίας	21
2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	21
2.2 Στόχοι εργασίας.....	29
3 Πειραματική διάταξη	33
3.1 Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης.....	33
3.2 Δεξαμενή διεξαγωγής πειραμάτων	34
3.3 Δεξαμενή παρασκευής διαλύματος.....	35
3.4 Δεξαμενή τροφοδοσίας.....	36
3.5 Σύστημα ρύθμισης και μέτρησης της παροχής	36
3.6 Σύστημα παροχέτευσης φλέβας.....	38
3.7 Σύστημα οπτικής καταγραφής.....	38
3.8 Σύστημα μέτρησης της αγωγιμότητας – αλατότητας.....	39
3.8.1 Περιγραφή συστήματος μέτρησης.....	39
3.8.2 Βαθμονόμηση του οργάνου MSCTI.....	41
3.8.3 Σύστημα ανάρτησης και μετακίνησης του οργάνου μέτρησης συγκέντρωσης....	42
3.9 Πρόσθετα όργανα μέτρησης.....	43
4 Πειράματα	45
4.1 Κατηγορίες πειραμάτων.....	45
4.2 Πειράματα μέτρησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ροής.....	46

4.2.1	Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων	46
4.2.2	Αρχικές συνθήκες πειραμάτων.....	48
4.3	Πειράματα μέτρησης συγκεντρώσεων	50
4.3.1	Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων	50
4.3.2	Αρχικές συνθήκες πειραμάτων.....	52
4.4	Διαδικασία προσδιορισμού πειραματικών δεδομένων	55
4.4.1	Προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φλέβας (Πειράματα Κατηγορίας Α).....	55
4.4.2	Μετρήσεις συγκέντρωσης (Πειράματα Κατηγορίας Β).....	57
5	Αποτελέσματα μετρήσεων γεωμετρικών χαρακτηριστικών	59
5.1	Γενικά.....	59
5.2	Ύψος ανόδου φλέβας.....	61
5.3	Οριζόντια θέση τελικού τερματικού ύψους ανόδου	70
5.4	Οριζόντια θέση του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης	77
6	Αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης	85
6.1	Γενικά.....	85
6.2	Κατακόρυφη κατανομή μέσης συγκέντρωσης και έντασης τύρβης στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου	87
6.3	Μέγιστο ύψος άξονα φλέβας	96
6.4	Οριζόντια απόσταση άξονα φλέβας από στόμιο παροχέτευσης στη θέση επιστροφής.....	99
6.5	Αξονική αραιώση στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης	103
7	Υπολογιστική διερεύνηση της ροής κεκλιμένων φλεβών αρνητικής άνωσης	109
7.1	Γενικά.....	109
7.2	Ολοκληρωματικό μοντέλο – Σενάρια επίλυσης.....	110
7.3	Μεταβολή συντελεστή συμπαράσυρσης α & σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά αποτελέσματα.....	115
8	Ανακεφαλαίωση & συμπεράσματα	125
8.1	Ανακεφαλαίωση.....	125
8.2	Συμπεράσματα	127

Βιβλιογραφία.....	131
Ελληνική βιβλιογραφία	131
Διεθνής βιβλιογραφία	131
Παράρτημα	135

Περίληψη

Οι φλέβες αρνητικής άνωσης είναι τυρβώδεις ροές που δημιουργούνται στα επιφανειακά νερά (θάλασσα, λίμνες, ποτάμια) κατά τη διάθεση του αλμόλοιπου, του απόβλητου των μονάδων αφαλάτωσης. Το αλμόλοιπο έχει συγκέντρωση αλατότητας που φθάνει τη διπλάσια από εκείνη του θαλάσσιου νερού και μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα που ζουν στον πυθμένα, αν δεν αραιωθεί επαρκώς κατά τη διοχέτευσή του. Η παγκόσμια ανάπτυξη των μονάδων αφαλάτωσης ως λύση του προβλήματος της λειψυδρίας σε συνδυασμό με την ανάγκη για περιορισμό των περιβαλλοντικών τους επιπτώσεων, ώθησε την έρευνα των τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης.

Αρκετοί ερευνητές έχουν παρουσιάσει αποτελέσματα των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών των φλεβών αρνητικής άνωσης, ιδιαίτερα των κεκλιμένων ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη τροχιά και κατά συνέπεια μεγαλύτερη αραιώση, προσπαθώντας ταυτόχρονα να καταστρώσουν αναλυτικές σχέσεις ή μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης των ροών αυτών. Οι περισσότερες εργασίες εστιάζονται στις γωνίες 30° , 45° , 60° και κάποιες παρουσιάζουν μεταξύ τους σημαντικές ασυμφωνίες.

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε πειραματικά το κοντινό πεδίο της ροής κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Για πρώτη φορά παρουσιάζονται δεδομένα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το πεδίο συγκεντρώσεων των φλεβών αρνητικής άνωσης που εκτοξεύονται υπό γωνίες 35° και 50° , καθώς και πειραματικές τιμές αραιώσεων γωνίας 70° . Τα δεδομένα για τις υπόλοιπες γωνίες συμπληρώνουν τα περιορισμένα αποτελέσματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και συνεισφέρουν στη διερεύνηση της συμπεριφοράς των φλεβών και της επίδρασης της αρχικής γωνίας παροχέτευσης στα χαρακτηριστικά της ροής. Η διεξαγωγή των 102 συνολικά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε σε πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ.

Τέλος, διερευνήθηκε υπολογιστικά η συμπεριφορά των κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης που εκτοξεύονται υπό γωνία. Πραγματοποιήθηκε προσομοίωση φλέβας αρνητικής άνωσης με διάφορες αρχικές γωνίες παροχέτευσης με χρήση ολοκληρωματικού μοντέλου, το οποίο βασίζεται σε κατανομές ταχύτητας και συγκέντρωσης Gauss. Συγκρίθηκαν τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας και προηγούμενων εργασιών με τις προβλέψεις του μοντέλου, εφαρμόζοντας διάφορες σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή συμπαράσυρσης.

Extended abstract

Introduction – Work objectives

Desalination industry provides an effective solution to the growing problem of water scarcity, which is caused by the depletion and degradation of natural water resources. However, desalination process leads to the production of brine effluent. The brine effluent is denser than the ambient fluid and it may have a serious impact on the marine ecosystem due to its excessive salinity and other chemical substances or heavy metals. Such effluents are usually disposed through the proper outfall system into the seawater. The dense effluent is discharged upwards and preferably at an angle to the horizontal. In that way, inclined negatively buoyant jets are formed and rapid mixing and high dilution rates are achieved.

The number and scale of desalination plants is increasing, therefore proper design of the disposal system is required, in order to minimize the impact on the ambient quality and subsequently on the environment. Previous experimental studies have focused on the geometrical parameters and dilution of inclined dense jets, particularly of those discharged at an angle of 30° , 45° and 60° to the horizontal (e.g. Zeitoun et al. 1970, Roberts & Toms 1987, Roberts et al. 1997, Lindberg 1994, Cipollina et al. 2005, Shao & Law 2010, Abessi & Roberts 2014, Nikiforakis 2015). Papakonstantis (2009) presented a comprehensive study for angles between 45° and 90° . However, limited results have been reported regarding the trajectory and especially the concentration field and turbulent characteristics of dense jets inclined at angles of 15° , 52° , 70° and 75° (e.g. Kikkert 2006, Nemlioglou & Roberts 2006, Lai & Lee 2012, Oliver 2012, Crowe et al. 2015) and no results have been reported for the angles 35° and 50° . Moreover, several inconsistencies are found among the published data, particularly for dilution.

In this study a large number of experiments (102) was conducted, in a large tank in order to avoid boundary effects, regarding the flow of round dense jets discharged at an angle in a calm and homogeneous ambient with horizontal bottom. Inclination angles of 15° , 30° , 35° , 50° and 70° were investigated and data obtained regarding the geometrical characteristics and dilution in the near field, through flow visualizations and concentration measurements. Results are presented for the vertical distribution of the time averaged and RMS concentration at the location of the terminal height. Lastly, computational investigation of inclined round dense jets is performed using an integral model that was developed in previous research. In an attempt to predict more accurately the characteristics of the flow, different assumptions were made for the variation of the entrainment coefficient.

Experimental set up

All the experiments were conducted at the Applied Hydraulics Laboratory at NTUA, in a tank with dimensions 3.0 m x 1.5 m x 0.9 m (Figure 1). The front of the tank consists of a glass panel where a grid 10 cm x 5 cm has been drawn. Round pipes of diameters $D=4, 6$ and 8 mm were used to discharge the jet upwards at various angles. The height of the jet exit was 5-20 cm above the bottom. The tank was initially filled with tap water and left to rest. The jet fluid was saltwater, colored with red or blue food dye. The initial salinity and temperature of the jet fluid and ambient water were measured with a portable instrument (YSI Model 30). Initial densities were determined both by densimeter as well as from the measured salinity and temperature using proper equations. The discharge was measured using a calibrated Venturi meter combined with a differential manometer. Measurements of salinity/concentration were carried out using a Micro-scale Conductivity and Temperature Instrument (MSCTI), which was daily calibrated by sampling saltwater solutions of known salinity. The instrument was moved using a 3D traversing system, driven through a control panel (Papakonstantis, 2009).



Figure 1: Experimental set-up at the Applied Hydraulics Laboratory, NTUA

Experiments and processing

The flow near the source is momentum-driven and rises like a jet. Its momentum is reduced due to the negative buoyancy, attaining initially a maximum height. The downflow interacts with the upflow, reducing the initial terminal height to the final terminal height of rise at steady state. After the reversal of the flow, the buoyancy acts in the direction of motion and thus the downflow is accelerated. Subsequently, the jet returns on the bottom

at a horizontal distance from the source and impinges at an angle to the horizontal. Moreover, chunks of fluid are observed around and beyond the region of the terminal height in the inner edge of the jet flow, which separate from the main flow and descent almost vertically to the bottom.

The experiments performed in the present study concern: (a) geometrical characteristics of inclined dense jets in the near field (b) concentration measurements at characteristic positions in the jet flow.

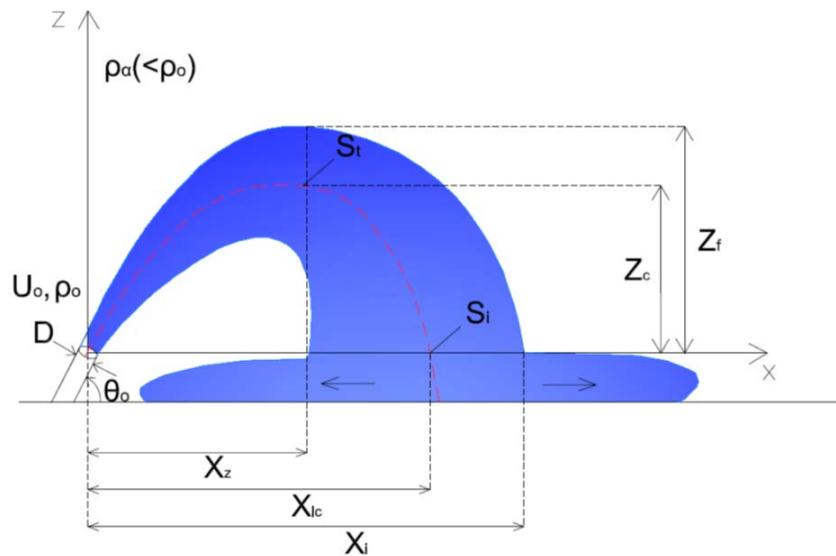


Figure 2: Important parameters of an inclined dense jet flow

The first experimental set includes flow visualization. The jet fluid was colored and the jet trajectory was being recorded by means of a digital camera with image resolution 1920 x 1080 pixels at video rates of 25 fps. In total 46 experiments were performed for source inclinations of 15°, 30°, 35°, 50° and 70° and a wide range of initial Froude numbers ($F_0=13-70$) and density differences ($\Delta\rho/\rho=2-3.2\%$) was studied. The experiments data were obtained for the following parameters at each angle (Figure 2):

- the initial terminal height of rise, Z_{max} , i.e. the maximum height of rise of the upper boundary at the initiation of the flow
- the final terminal height of rise, Z_f , i.e. the maximum height of rise of the upper boundary at steady state
- the horizontal position of the terminal height of rise, X_z
- the horizontal distance from the nozzle to the location where the jet upper boundary returns at discharge level, X_i .

The parameter Z_{max} is determined from a single video frame for each experiment, whereas the distance X_i as an average of the distances observed in selected frames. In order to determine the position of the final terminal height (Z_f, X_z), the technique of the average

image was used. An average image for each experiment was obtained from 1000-2500 video frames (40-100 sec) by means of an algorithm developed in Matlab software. The coordinates of the terminal height from an image were determined using the software AutoCAD and corrected properly (Papakonstantis, 2009). The obtained values of Z_{max} , Z_f , X_z , and X_i were normalized by the jet pipe diameter D and were plotted against the initial densimetric Froude number F_o for each discharge angle. A linear correlation was found for each angle, confirming the theoretical relations that have been developed based on dimensional analysis, and the constants (dimensionless geometrical parameters) were determined for each angle. The experimental results were compared with those of other works for the same and different angles and good agreement was found (Figure 3). Furthermore, based on the experimental results of the present study and Papakonstantis (2009) for angles of 45° , 60° and 75° , the trend for the above geometric characteristics of an inclined dense jet are presented ($15^\circ \leq \theta_o \leq 75^\circ$).

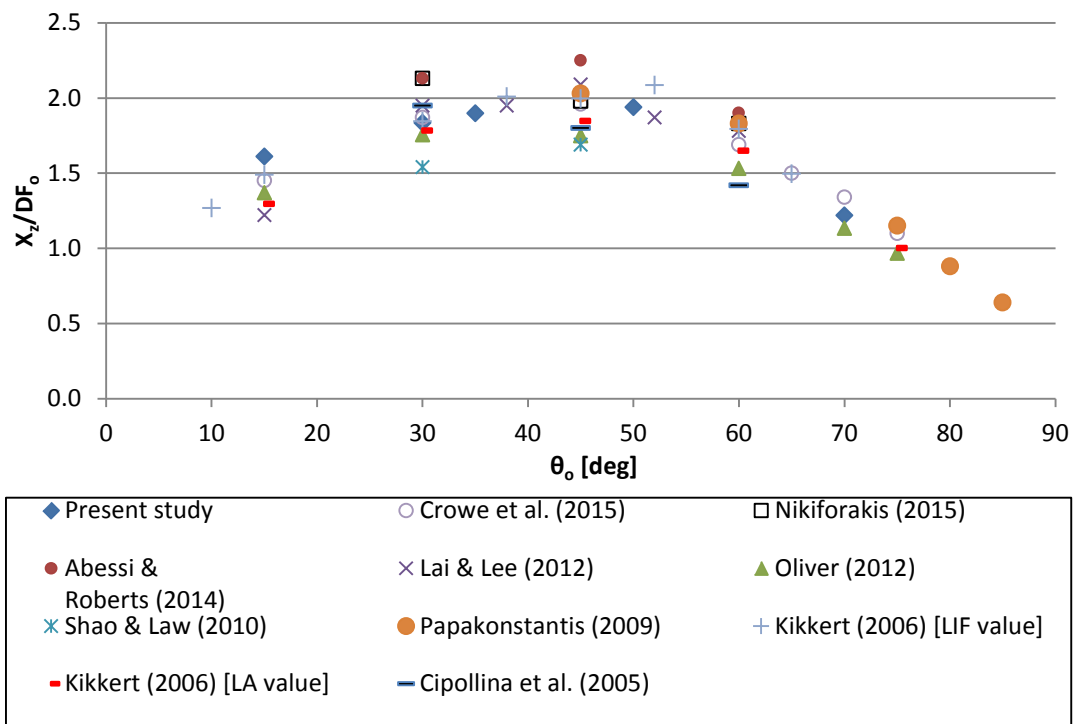


Figure 3: Dimensionless horizontal distance of terminal height location from the source, for all discharge angles

The second experimental set includes concentration/salinity measurements for source inclinations of 35° , 50° and 70° by means of the Micro Scale Conductivity and Temperature Instrument (MSCTI). A wide range of initial Froude numbers ($F_o=18-49$) and density differences ($\Delta\rho/\rho=2.7-4\%$) was studied. Concentration measurements were conducted at the location of the terminal height (vertical direction) and at the region where the jet

returns at the level of the nozzle (horizontal direction). From these experiments data for each angle were obtained, regarding the following parameters (Figure 2):

- the maximum height of rise of the jet axis, Z_c
- the horizontal distance from the nozzle to the location where the jet axis returns at discharge level, X_{ic}
- the centerline dilution at the terminal height, S_t
- the centerline dilution at the return point, S_i .

A total number of 34 experiments were carried out at the location of the terminal height including measurements along the vertical direction, in order to determine the distribution of the mean (time-averaged) concentration and the turbulent intensity of the concentration. At a certain point, the mean concentration value was calculated as the average value from a time series of 4000 concentration values covering a time duration of 40 sec. The results of all the experiments regarding the mean concentration or the turbulent intensity are plotted in the same non-dimensional diagram for the same angle, showing that there is no dependence on the initial Froude number for a certain discharge angle. It also seems that the distribution of the dimensionless mean concentration follows a Gaussian distribution from the outer jet boundary to the jet axis and that the maximum turbulent intensity is observed above the jet axis (Figure 4). The scatter of values is expectable, given the number of experiments and the difficulty to accurately determine the position of the terminal height. Furthermore, the data obtained for the parameters Z_c and S_t confirm theoretical relationships obtained from dimension analysis and the determined constants (dimensionless height and dilution respectively) were found to lie within the range of the experimental data of previous works. Finally, a number of 22 experiments were carried out including concentration measurements along the horizontal at the region where the jet returns at the nozzle level. The constants for the parameters X_{ic} and S_i (Figure 5) were determined for each angle and found to be in satisfactory agreement with the experimental values of most previous works for nearby angles.

The geometrical characteristics and dilution normalized by DF_o and F_o respectively, are summarized in Table 1.

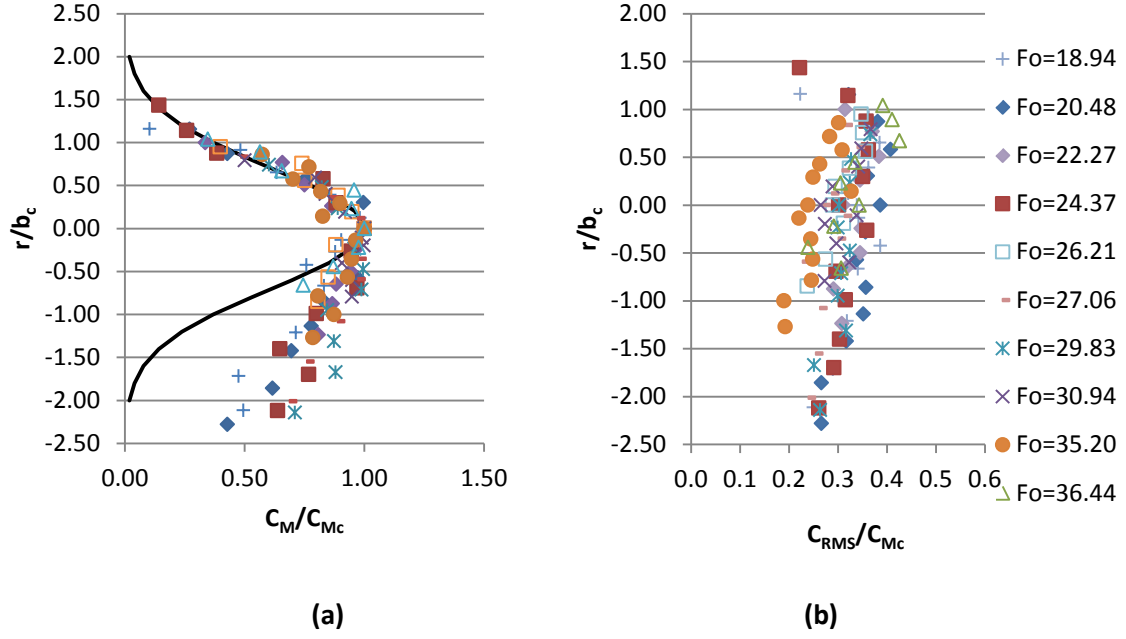


Figure 4: (a) Mean (time-averaged) and (b) RMS concentration profiles at centerline maximum height of 70° dense jet

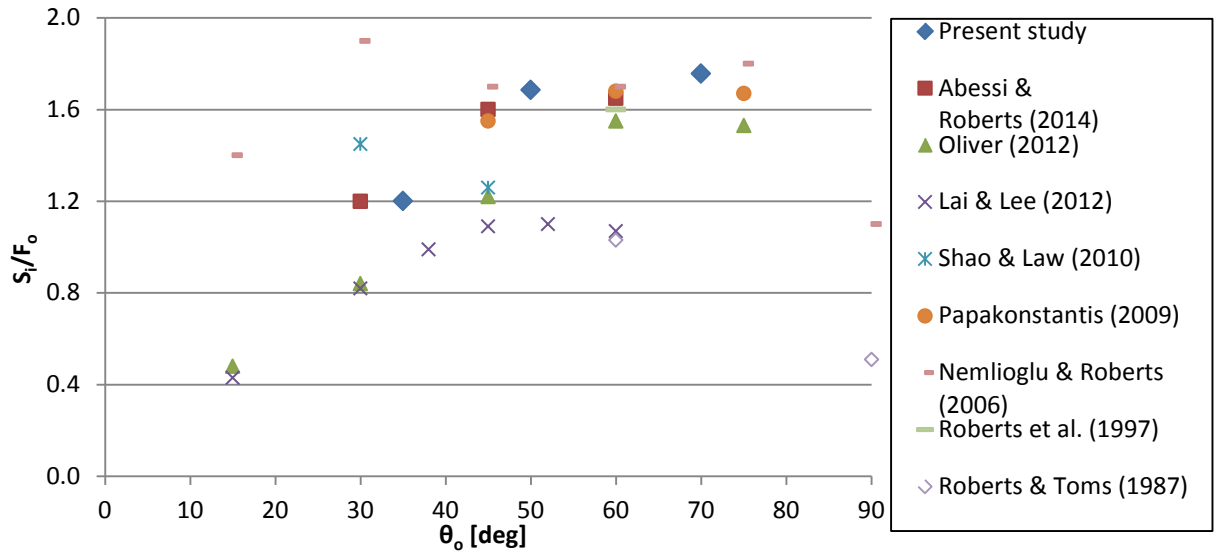


Figure 5: Dilution at the return point for all angles

Table 1: Summary of the experimental results of the present thesis

θ_o	Z_{max}/DF_o	X_z/DF_o	Z_i/DF_o	X_i/DF_o	Z_c/DF_o	X_{ic}/DF_o	S_t/F_o	S_i/F_o
15°	0.81	1.61	0.59	3.43				
30°	1.36	1.83	1.12	4.01				
35°	1.47	1.90	1.22	3.98	0.79	3.23	0.45	1.20
50°	2.12	1.94	1.83	4.04	1.28	3.00	0.57	1.69
70°	2.65	1.22	2.35	3.05	1.81	1.94	0.47	1.76

Computational investigation

Integral models are widely used for predicting the characteristics of positively buoyant jet flows. However, Papanicolaou et al. (2008) and Papakonstantis (2009) showed that such models underestimate the characteristics of dense jets, especially dilutions. To provide improved predictions they used a reduced entrainment coefficient. Several studies have been conducted regarding the improvement of integral models' performance (e.g. Lai & Lee 2012, Oliver et al 2013). In the present study the integral model GM (Gaussian Model) developed by Papanicolaou et al. (2008) and Papakonstantis (2009) was used along with three different scenarios concerning the estimation of the entrainment coefficient α and the local Richardson number $Ri(s)$, listed in Table 2. Cases i and ii were examined by Papakonstantis (2009), while in the present study a further case based on an entrainment formula used by Jirka (2004) and Lai & Lee (2012) was investigated.

Table 2: Solving cases of the integral model

Case	Parameters
i	$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2}$ $\alpha_j = 0.0545, \alpha_p = 0.0875$ $Ri(s)^2 = \left(\frac{Q(s) B(s) ^{1/2}}{M(s)^{5/4}} \right)^2 > 0$ $Ri(s) \leq Ri_p = 0.56$
ii	$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2}$ $\alpha_j = 0.025, \alpha_p = 0.0875$ $Ri(s)^2 = \left(\frac{Q(s) B(s) ^{1/2}}{M(s)^{5/4}} \right)^2 > 0$ $Ri(s) \leq Ri_p = 0.56$
iii	$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \sin\theta \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2}$ $\alpha_j = 0.0545, \alpha_p = 0.0875$ $Ri(s)^2 = \frac{Q(s)^2 B(s)}{M(s)^{5/2}} < 0$

The model consisted of differential equations solved numerically using 4th order Runge-Kutta for an initial densimetric Froude number $F_0 \approx 34$ and for discharge angles $\theta_0 = 15^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ and 75° . The following jet parameters were calculated (Figure 2):

- the final terminal height of rise, Z_f

- the maximum height of rise of the jet axis, Z_c
- the horizontal position of the terminal height of rise, X_z
- the horizontal distance from the nozzle to the location where the jet upper boundary returns at discharge level, X_i
- the horizontal distance from the nozzle to the location where the jet axis returns at discharge level, X_{ic}
- the centerline and average dilution at the terminal height, S_t and S_{tave}
- the centerline and average dilution at the return point, S_i and S_{iave} .

The model predictions were compared with the experimental results of the present study and the results of Papakonstantis (2009) for angles of 45° , 60° and 75° . The best predictions for the geometrical characteristics were obtained when a reduced jet entrainment coefficient α_j was used (Case ii), while the rest Cases were significantly lower. As an example, Figure 6 shows the comparison between model predictions and experimental data for Z_f/DF_o .

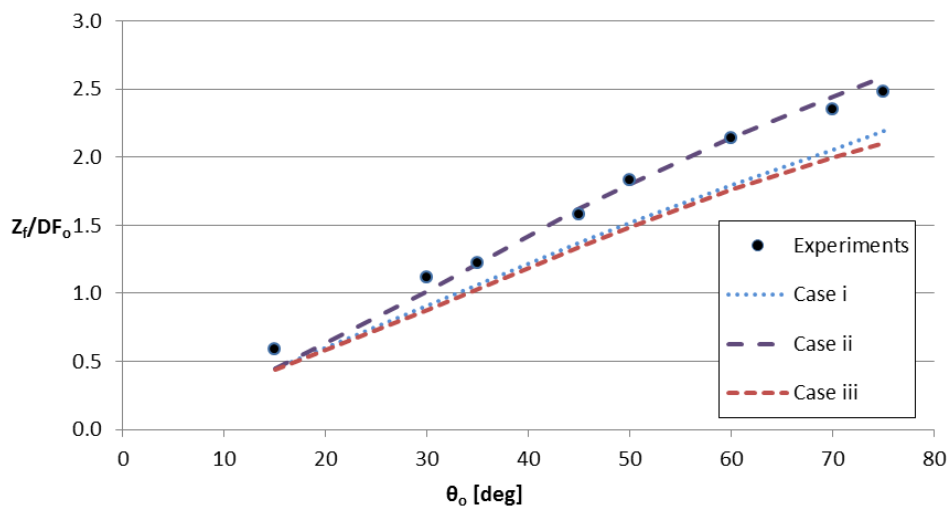


Figure 6: Predicted and observed dimensionless final terminal height of rise

The centerline dilution was underestimated in all Cases; however, in all Cases and especially in Case ii, the average dilution predictions found to be in good agreement with the experimental values of centerline dilution obtained at the terminal height and the return point. As an example, Figure 7 presents the comparison between the predicted average dilution and the experimental values of the centerline dilution at the return point.

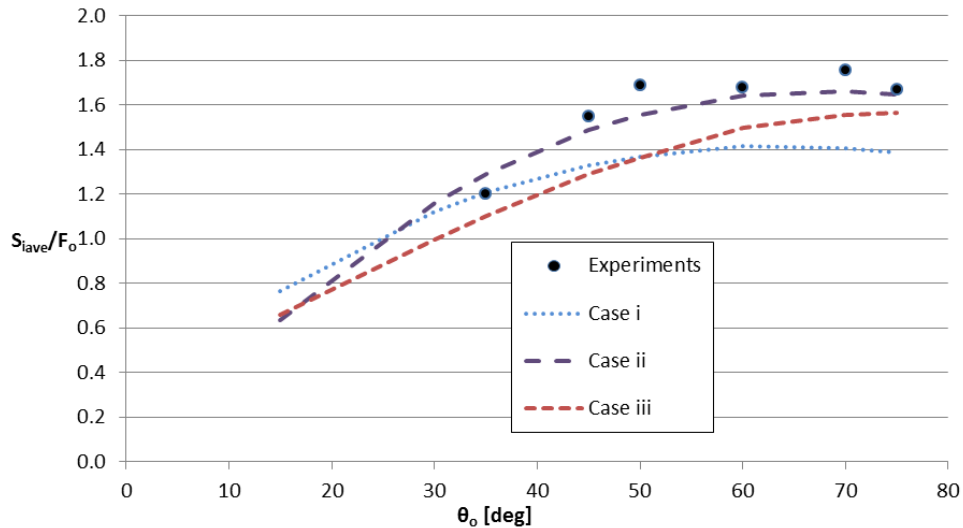


Figure 7: Comparison between predicted average dilution and measured centerline dilution at the return point

Conclusions

The measured geometrical characteristics normalized by the pipe diameter D and the initial densimetric Froude number F_0 and the dilution normalized by F_0 were found to be equal to a constant for each discharge angle studied. The constants obtained from the linear fitting (dimensionless geometrical characteristics) were generally within the range of data reported in previous studies for the same angles. The dimensionless heights Z_{max}/DF_0 , Z_f/DF_0 and Z_c/DF_0 increase linearly with the discharge angle, whereas the dimensionless horizontal distances X_z/DF_0 , X_i/DF_0 and X_{ic}/DF_0 increase with the discharge angle up to 45° where they reach a maximum and they decrease for higher angles up to 70° .

The distributions of dimensionless mean concentration and turbulent intensity on the jet axis plane at the location of the terminal rise height were found to be similar for each discharge angle considered. It was also concluded that the profile of the distribution of the dimensionless mean concentration in the location of the terminal height is asymmetrical, following Gaussian distribution from the jet axis to the upper boundary and deviating significantly below the jet axis. This is due to the masses that detach from the flow and move downwards, increasing concentrations below the axis. Moreover, it was noticed that the maximum turbulent intensity of concentration at the horizontal location of the terminal height is always presented in higher position than the position of the maximum mean concentration. It was lastly observed that the results of previous works regarding centerline dilutions vary considerably. However, dilutions seem to increase until 35° - 45° and are similar at the range 45° - 75° .

The experimental results are underestimated when the value of the parameter $\alpha_j=0.0545$ is used. When a reduced value $\alpha_j=0.025$ is used for the entrainment coefficient and the entrainment coefficient α takes values from α_j to α_p depending on $Ri(s)$, then the predictions of the model agree satisfactory with the measured values. Centerline dilution is also underestimated by the models, but can be accurately estimated as the average (at the cross section) dilution using the reduced value of the parameter α_j . A possible reason for this is that the concentration distribution far from the source can be approximated by a tophat profile.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Οι ανάγκες κατανάλωσης νερού του αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού συνεχώς μεγαλώνουν, ωστόσο οι φυσικοί πόροι πηγών πόσιμου νερού εξαντλούνται με αποτέλεσμα ένα μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού να ζει σε περιοχές με σοβαρή έλλειψη νερού. Η κατάχρηση, η ρύπανση και η υφαλμύριση των πηγών πόσιμου νερού τις καθιστούν σε διαρκή υποβάθμιση. Τα μηνύματα για το μέλλον δεν είναι καθόλου ενθαρρυντικά όσον αφορά τους υδατικούς πόρους, αν επιπλέον αναλογιστεί κανείς τις συνέπειες που προβλέπεται να επιφέρει η κλιματική αλλαγή.

Μια αποτελεσματική λύση του προβλήματος της λειψυδρίας των παράκτιων περιοχών με ξηρό κλίμα αποτελεί η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης. Πάνω από 18,000 μονάδες αφαλάτωσης λειτουργούν σε 150 χώρες παγκοσμίως, καλύπτοντας ανάγκες σε νερό για περισσότερους από 300 εκατομμύρια ανθρώπους (Στοιχεία Ιούνιος 2015 <http://idadesal.org/desalination-101/desalination-by-the-numbers/>). Αναμένεται περαιτέρω ανάπτυξη της διαδικασίας ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλάσσιο ή υφάλμυρο νερό, καθώς αποτελεί μια εναλλακτική πηγή υδροδότησης, που πέρα από ανεξαρτησία υπόσχεται και οικονομική βιωσιμότητα στα πλαίσια λειτουργίας μιας ευρύτερης πολιτικής ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων.



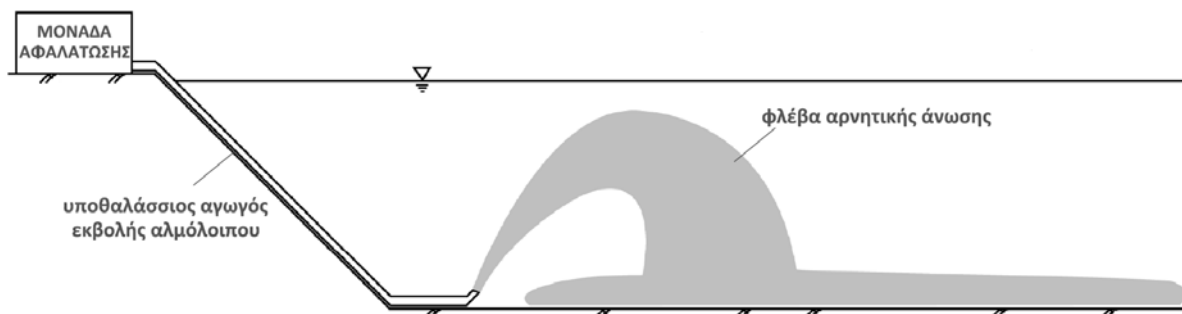
Σχήμα 1-1: Από τις μεγαλύτερες μονάδες αφαλάτωσης στον κόσμο, στο Carlsbad της California, USA, κατασκευασμένη να παρέχει 190,000 m³ νερού ανά ημέρα. (<http://carlsbaddesal.sdcwa.org>)

Η συνεισφορά της αφαλάτωσης στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας είναι αδιαμφισβήτητη, δυστυχώς όμως η εφαρμογή της έχει σοβαρό οικολογικό «αντίτιμο». Είναι μια αρκετά ενεργοβόρα διαδικασία, η οποία χρησιμοποιεί διάφορα χημικά (χλώριο, θειικό οξύ, ασβέστιο, διοξείδιο του άνθρακα κ.λπ.). Επιπλέον, κατά την άντληση του θαλασσινού νερού απορροφώνται διάφοροι μικροί οργανισμοί, όπως μικρά ψάρια, πλαγκτόν, αβγά ψαριών. Η σημαντικότερη περιβαλλοντική επίπτωση από την εφαρμογή της μεθόδου της αφαλάτωσης είναι το απόβλητο που μένει μετά την επεξεργασία του θαλάσσιου νερού και το οποίο κατά κανόνα διοχετεύεται πίσω στη θάλασσα. Πρόκειται για το αλμόλοιπο, ένα διάλυμα θερμότερο και θολότερο από τον αποδέκτη, με περιεκτικότητα σε αλάτι σχεδόν διπλάσια από αυτήν του θαλάσσιου νερού. Η διοχέτευση του αλμόλοιπου στη θάλασσα μπορεί να επιβαρύνει τη βενθική χλωρίδα και πανίδα, φτάνοντας στην περίπτωση μεγάλων μονάδων αφαλάτωσης ακόμη και να νεκρώσει τα τοπικά οικοσυστήματα σε ακτίνα μερικών χιλιομέτρων.

Ο ορθός σχεδιασμός του συστήματος διάθεσης κρίνεται λοιπόν απαραίτητος, ώστε να υπάρξει ο μικρότερος δυνατός αντίκτυπος στην ποιότητα του αποδέκτη και ως εκ τούτου στο περιβάλλον και τις παράκτιες ανθρώπινες δραστηριότητες (τουρισμός, ψάρεμα κλπ). Η προτιμώμενη μέθοδος είναι η διάθεση μέσω υποθαλάσσιων διαχυτήρων, προκειμένου να δημιουργούνται τυρβώδεις ανωστικές φλέβες. Η τυρβώδης ανωστική φλέβα είναι η εκροή ρευστού μέσα σε ρευστό διαφορετικής πυκνότητας και δημιουργείται λόγω της αρχικής ταχύτητας εκτόξευσης και της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ του αποβλήτου και του ρευστού του αποδέκτη. Η διάθεση του αλμόλοιπου γίνεται συνήθως από τον πυθμένα προς την επιφάνεια του αποδέκτη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-2. Το αλμόλοιπο είναι ρευστό βαρύτερο από το νερό του αποδέκτη, επομένως έχει την τάση να επιστρέψει στον πυθμένα. Η επιθυμητή αραίωση (διάλυση) του αποβλήτου και των ρυπογόνων συστατικών του επιτυγχάνεται μέσω της συμπαρασύρσης μεγάλων μαζών καθαρού νερού από τον αποδέκτη. Η παροχέτευση γίνεται κατά κανόνα υπό γωνία, γεγονός που επιτρέπει στη φλέβα να διασχίσει μεγαλύτερη τροχιά (από ότι στην κατακόρυφη παροχέτευση) και επομένως να συμπαρασύρει περισσότερο καθαρό νερό και να επιτευχθεί μεγαλύτερη αραίωση.

Το πεδίο της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση ροών, όπως αυτών που δημιουργεί η διάθεση του αλμόλοιπου και άλλων βαρέων αποβλήτων όταν παροχετεύονται υπό γωνία προς τα πάνω σε στάσιμο και ομογενή αποδέκτη (φλέβα αρνητικής άνωσης). Σκοπός είναι να παρουσιαστούν αποτελέσματα που θα χρησιμεύσουν στον ορθό σχεδιασμό ενός συστήματος διάθεσης. Από τα πειραματικά αποτελέσματα δίδονται σχέσεις εκτίμησης των βασικών χαρακτηριστικών των φλεβών αρνητικής άνωσης ως προς τα μεγέθη σχεδιασμού (διάμετρος αγωγού συστήματος παροχέτευσης, διαφορά

πυκνότητας) για κάθε γωνία παροχέτευσης. Οι μετρήσεις αυτές γίνεται προσπάθεια να προσεγγιστούν από ολοκληρωματικό μοντέλο, μελετώντας τη συμπαράσυρση.



Σχήμα 1-2: Σχηματισμός ανωστικής φλέβας κατά τη διάθεση αλμόλοιπου (Crowe et al., 2015)

1.2 Τυρβώδεις ανωστικές φλέβες

Η εκροή ρευστού σε αποδέκτη ομοειδούς ή μη ρευστού σχηματίζει ροές που καλούνται φλέβες, πλούμια ή ανωστικές φλέβες (Fischer et al., 1979). Πιο συγκεκριμένα, όταν ρευστό εκτοξεύεται (με αρχική ορμή) μέσα σε αποδέκτη ρευστού ίδιας πυκνότητας κυριαρχούν οι αδρανειακές δυνάμεις και η ροή ονομάζεται απλή φλέβα (jet). Στην περίπτωση που το ρευστό εκρέει χωρίς αρχική ταχύτητα μέσα σε αποδέκτη διαφορετικής πυκνότητας, η ροή καλείται πλούμιο (plume) και οφείλεται αποκλειστικά στις ανωστικές δυνάμεις. Οι συνήθεις εκροές έχουν τόσο αρχική ταχύτητα όσο και διαφορά πυκνότητας με το περιβάλλον ρευστό και ονομάζονται ανωστικές φλέβες (buoyant jets). Η συμπεριφορά τους κοντά στο στόμιο εκροής οφείλεται στην αρχική ορμή με την οποία εκτοξεύονται και προσομοιάζεται με αυτήν μιας απλής φλέβας. Σε μεγάλη απόσταση από την εκροή κυριαρχούν οι ανωστικές δυνάμεις και η ροή καταλήγει να συμπεριφέρεται σαν πλούμιο. Το βασικό χαρακτηριστικό αυτών των εκροών είναι ότι συμπαρασύρουν ρευστό από τον αποδέκτη, με αποτέλεσμα την αραιώση (διάλυση) του ρευστού της φλέβας, δηλαδή την ελάττωση της συγκέντρωσης διαφόρων ουσιών.

Οι ανωστικές φλέβες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως θετικής ή αρνητικής άνωσης ανάλογα με τη φορά των αδρανειακών και ανωστικών δυνάμεων. Ανωστική δύναμη θεωρείται η συνισταμένη της άνωσης και του ίδιου βάρους. Όταν η κάθετη συνιστώσα της αρχικής ορμής και η ανωστική δύναμη είναι ομόρροπες δημιουργείται φλέβα θετικής άνωσης, ενώ όταν είναι αντίρροπες προκύπτει φλέβα αρνητικής άνωσης. Το αλμόλοιπο για παράδειγμα, είναι ρευστό βαρύτερο από το νερό και όταν η παροχέτευσή του γίνεται με φορά προς τα άνω, η άνωση που δημιουργεί η εκροή του είναι αρνητική. Πρακτικά σε μια φλέβα θετικής άνωσης, η άνωση επιταχύνει, «βοηθάει» τη ροή, ενώ σε μια φλέβα

αρνητικής άνωσης η ροή επιβραδύνεται, καθώς η άνωση τείνει να την κατευθύνει προς στην αντίθετη φορά από αυτήν της εκροής της.

Από τα ανωτέρω γίνεται κατανοητός ο καθοριστικός ρόλος που διαδραματίζουν στη ροή οι παράμετροι της φλέβας, όπως η αρχική ορμή και η διαφορά πυκνότητας. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν τη ροή της φλέβας είναι εκείνες του αποδέκτη, όπως η ύπαρξη κίνησης (ακίνητος ή κινούμενος) και στρωμάτωσης (ομογενής, στρωματοποιημένος). Επίσης, γεωμετρικές παράμετροι καθορίζουν τη συμπεριφορά της φλέβας, όπως το σχήμα του στομίου εκροής, η γωνία της παροχέτευσης και η γειτνίαση με άλλες φλέβες ή στερεά όρια. Όταν οι φλέβες παροχετεύονται μέσω κυκλικής οπής, χαρακτηρίζονται ως κυκλικές, ενώ όταν η παροχέτευση γίνεται από σχισμή, ως διδιάστατες.

Βάσει του αριθμού Reynolds στην εκροή Re_o , η φλέβα χαρακτηρίζεται στρωτή ή τυρβώδης. Τυρβώδης ροή σχηματίζεται σύμφωνα με τους Fischer et al. (1979) για $Re_o > 2000$. Για κυκλικό στόμιο παροχέτευσης, ο αριθμός Reynolds υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$Re_o = \frac{U_o D}{\nu}$$

όπου U_o η αρχική ταχύτητα εκροής, D η διάμετρος του στομίου και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα του ρευστού της φλέβας.

1.3 Κύριες παράμετροι της ροής

Τα τρία βασικά μεγέθη που αν είναι γνωστά περιγράφουν πλήρως τη ροή μιας φλέβας είναι (Fisher et al., 1979):

- i. Ογκομετρική παροχή Q
- ii. Ειδική ορμή (ειδική ποσότητα κίνησης) M
- iii. Ειδική άνωση B .

Στον Πίνακα 1-1 Πίνακας 1-1 δίδονται οι ορισμοί των παραμέτρων αυτών:

Πίνακας 1-1: Βασικές παράμετροι κυκλικής ανωστικής φλέβας

Μέγεθος	Ορισμός	Αρχική τιμή
Παροχή	$Q = \int_A U dA$	$Q_o = \frac{\pi d^2}{4} U_o$
Ειδική ορμή	$M = \int_A U^2 dA$	$M_o = Q_o U_o$
Ειδική άνωση	$B = \int_A g \frac{\Delta \rho}{\rho_\alpha} U dA$	$B_o = g_o \frac{\Delta \rho_o}{\rho_\alpha} Q_o = g'_o Q_o$

Στον ανωτέρω πίνακα, U είναι η μέση χρονικά ταχύτητα κατά τη διεύθυνση της ροής, A η εγκάρσια διατομή της φλέβας, g' η φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας και $\Delta\rho = \rho_\alpha - \rho$, όπου ρ_α η πυκνότητα του ρευστού του αποδέκτη και ρ η πυκνότητα του ρευστού της φλέβας.

Σύμφωνα με τη διαστατική ανάλυση για μια κυκλική ανωστική φλέβα ορίζονται δύο χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους (Fisher et al., 1979):

$$l_M = \frac{M_o^{3/4}}{B_o^{1/2}}, \quad l_Q = \frac{Q_o}{M_o^{1/2}}$$

Η κλίμακα l_M ορίζει την απόσταση πέρα από την οποία η αρχική ορμή δεν είναι σημαντική και η ροή διέπεται από τις δυνάμεις άνωσης. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες από την κλίμακα μήκους l_Q , η (τοπική) παροχή εξαιτίας της συμπαράσυρσης είναι πολύ μεγαλύτερη, ώστε η αρχική να μην παίζει πλέον ρόλο.

Ο αριθμός Richardson (Ri_o) και ο πυκνομετρικός αριθμός Froude (F_o) είναι αδιάστατοι και δείχνουν την ισχύ των αδρανειακών δυνάμεων ως προς τις ανωστικές. Για κυκλική φλέβα διαμέτρου D ορίζονται ως εξής:

$$Ri_o = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{Q_o B_o^{1/2}}{M_o^{5/4}}, \quad F_o = \frac{U_o}{\sqrt{g'_o D}}, \quad Ri_o = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{F_o}$$

Για μεγάλες τιμές του πυκνομετρικού αριθμού Froude ή μικρές τιμές του αριθμού Richardson, η ροή συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα (κυριαρχούν οι δυνάμεις αδράνειας), ενώ στην αντίθετη περίπτωση σαν πλούμιο (κυριαρχούν οι ανωστικές δυνάμεις).

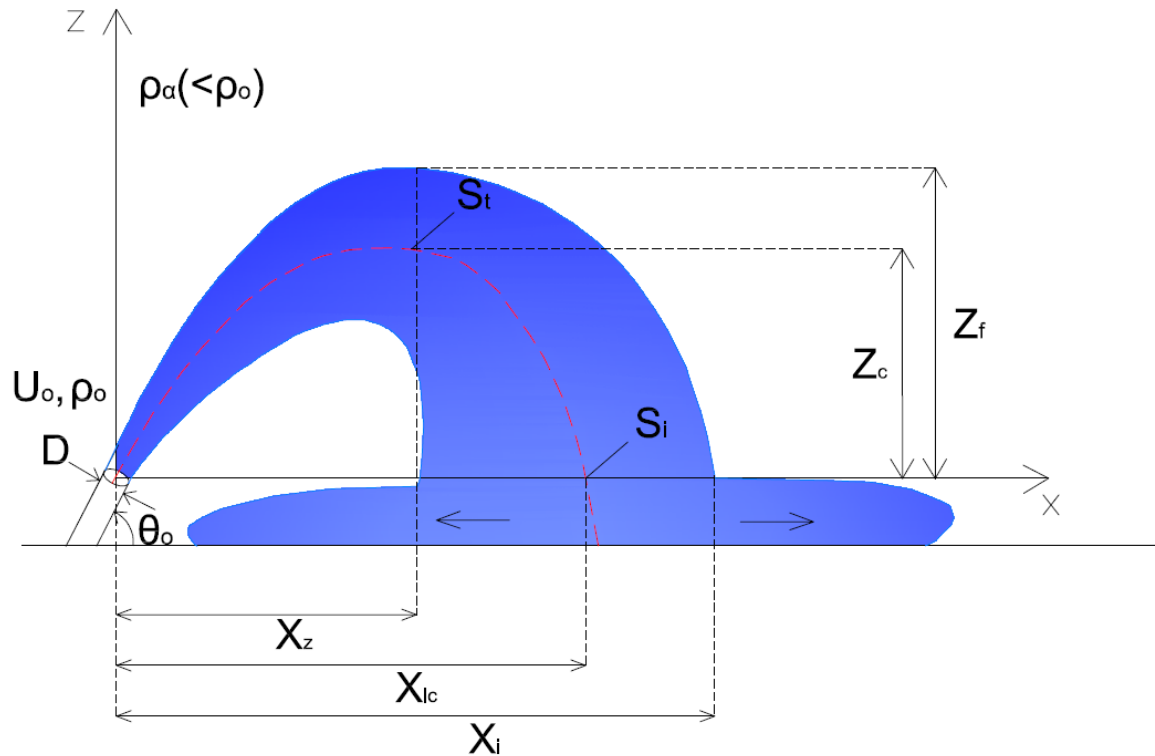
Βασική παράμετρος των ανωστικών φλεβών αποτελεί η αραιώση (διάλυση). Η αραιώση S σε ένα σημείο ορίζεται ως ο λόγος της αρχικής συγκέντρωσης ουσίας C_o προς την συγκέντρωση της C στο σημείο αυτό. Σε κάθε περίπτωση αφαιρείται, εφόσον υπάρχει, συγκέντρωση της ουσίας στον αποδέκτη C_a . Αν το σημείο βρίσκεται στον άξονα της ροής (centerline), η αραιώση είναι η ελάχιστη και συμβολίζεται ως S_c . Ο λόγος της παροχής σε ένα σημείο της φλέβας προς την αρχική παροχή είναι η μέση στη διατομή αραιώση S_{ave} .

$$S = \frac{C_o - C_a}{C - C_a}, \quad S_{ave} = \frac{Q}{Q_o}$$

1.4 Το υπό μελέτη πρόβλημα

Η παρούσα εργασία διερευνά τη ροή τυρβώδους κεκλιμένης κυκλικής φλέβας αρνητικής άνωσης σε ήρεμο και ομογενή αποδέκτη. Η μελέτη εστιάζει στη συμπεριφορά της φλέβας

στο κοντινό πεδίο (near field), δηλαδή στην περιοχή μεταξύ του στομίου εκροής και του σημείου επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης.



Σχήμα 1-3: Σχηματική απεικόνιση φλέβας αρνητικής άνωσης που παροχετεύεται υπό γωνία σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη και βασικά μεγέθη προσδιορισμού

Το υπό μελέτη πρόβλημα περιλαμβάνει συνεχή παροχέτευση ρευστού πυκνότητας ρ_0 με σταθερή ταχύτητα U_0 μέσω σωληνίσκου διαμέτρου D που σχηματίζει γωνία θ_0 ως προς το οριζόντιο επίπεδο, σε ήρεμο και ομογενή αποδέκτη πυκνότητας $\rho_a < \rho_0$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-3. Η φλέβα αρχικά κινείται ανοδικά εξαιτίας των αδρανειακών δυνάμεων. Ταυτόχρονα, η φλέβα αναμιγνύεται με το ρευστό του αποδέκτη και ως εκ τούτου αραιώνεται. Επειδή όμως οι ανωστικές δυνάμεις είναι αντίρροπες της κατακόρυφης συνιστώσας της ορμής, συνεχώς τη μειώνουν μέχρι τελικά τη μηδενίσουν. Η ανοδική επιβραδυνόμενη ροή φτάνει σε ένα μέγιστο ύψος Z_{\max} (αρχικό τερματικό ύψος ανόδου) και στη συνέχεια κινείται καθοδικά υπό την επίδραση των ανωστικών δυνάμεων και της οριζόντιας συνιστώσας της ορμής. Η καθοδική ροή αλληλεπιδρά με την ανερχόμενη, με αποτέλεσμα το αρχικό ύψος να μειωθεί. Όταν αποκατασταθεί μόνιμη ροή, το τερματικό ύψος ανόδου παρουσιάζει διακυμάνσεις γύρω από την τιμή Z_f , που ονομάζεται τελικό τερματικό ύψος ανόδου. Η καθοδική ροή επιταχύνεται από την ανωστική δύναμη και προσκρούει στον πυθμένα σε κάποια απόσταση από την πηγή.

Τα βασικά χαρακτηριστικά της φλέβας που ενδιαφέρουν περισσότερο και θα συζητηθούν στα επόμενα κεφάλαια, είναι (Σχήμα 1-3):

- Το αρχικό τερματικό ύψος ανόδου Z_{\max}
- Το τελικό τερματικό ύψος ανόδου Z_f
- Το μέγιστο ύψος του άξονα Z_c
- Η οριζόντια απόσταση της θέσης όπου εμφανίζεται το τελικό τερματικό ύψος X_z
- Η οριζόντια απόσταση της θέσης όπου το εξωτερικό όριο επιστρέφει στο επίπεδο παροχέτευσης X_i
- Η οριζόντια απόσταση της θέσης του άξονα στην περιοχή επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης X_{ic}
- Η αξονική αραίωση στη θέση του τελικού τερματικού ύψους S_f και στη θέση επιστροφής S_i .

2 Προηγούμενες εργασίες και στόχοι παρούσας εργασίας

2.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται η ερευνητική δραστηριότητα που αφορά στις τυρβώδεις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης, η οποία έχει επεκταθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Οι παρακάτω εργασίες διερευνούν την επίδραση της γωνίας παροχέτευσης στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής των φλεβών και στην αραίωση.

Οι παράμετροι της ροής μπορούν να περιγραφούν από αδιάστατες σταθερές, δεδομένου ότι η ροή παραμένει πλήρως τυρβώδης και ισχύει η παραδοχή Boussinesq, σύμφωνα με την οποία οι διαφορές πυκνότητας σε κάθε σημείο του πεδίου ροής είναι πολύ μικρές συγκριτικά με τις απόλυτες τιμές πυκνότητας [$\Delta\rho=(\rho-\rho_\alpha)\ll\rho_\alpha$]. Μέσω διαστατικής ανάλυσης έχει αποδειχθεί ότι για μια φλέβα αρνητικής άνωσης που παροχετεύεται μέσω κυκλικού στομίου διατομής D , υπό γωνία θ_0 ως προς οριζόντιο επίπεδο και με αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude $F_o\gg 1$ (συνήθως $F_o>20$), ισχύουν οι σχέσεις (Zeitoun et al. 1970, Roberts & Toms 1987, Roberts et al. 1997):

$$\frac{X}{DF_o} = k, \quad \frac{Z}{DF_o} = l, \quad \frac{S}{F_o} = m,$$

όπου X, Z οι συντεταγμένες σημείου του πεδίου ροής, S η αραίωση στο σημείο αυτό και k, l, m σταθερές που εξαρτώνται από τη γωνία παροχέτευσης. Επομένως, τα αποτελέσματα των ερευνών για κάθε παράμετρο δίνονται στη μορφή των ανωτέρω σχέσεων. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση εστιάζει σε αποτελέσματα εργασιών για ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Γίνεται επίσης αναφορά σε εργασίες που ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη ολοκληρωματικών μοντέλων προσομοίωσης των ροών αυτών.

Η εργασία των *Zeitoun et al. (1970)* ήταν η πρώτη που παρουσίασε πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τις κεκλιμένες φλέβες αρνητικής άνωσης. Μελετήθηκαν αρχικές γωνίες παροχέτευσης $\theta_0=30^\circ, 45^\circ$ και 60° και προσδιορίστηκαν με οπτικές μεθόδους η θέση του τελικού τερματικού ύψους, η αραίωση στη θέση αυτή και η οριζόντια απόσταση μεταξύ του στομίου εξόδου και του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο σημείο επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Για τις συγκρίσεις στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές που προκύπτουν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων από τα πειραματικά δεδομένα των *Zeitoun et al. (1970)*, οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 2-1. Σύμφωνα με τα αδιάστατα αποτελέσματα η γωνία των 60° δίνει τη μέγιστη τροχιά της φλέβας και τη μέγιστη αραίωση.

Πίνακας 2-1: Πειραματικά αποτελέσματα Zeitoun et al. (1970)

θ_o	Z_i/DF_o	X_i/DF_o	S_i/F_o
30°	1.04	3.48	2.80
45°	1.56	3.36	2.40
60°	2.13	3.19	1.80

Οι *Roberts & Toms (1987)* πραγματοποίησαν πειράματα σε φλέβες αρνητικής άνωσης εκτοξευόμενες υπό γωνία 60° σε ακίνητο αποδέκτη και σε αποδέκτη με εγκάρσιο ρεύμα. Μετρήθηκε το τελικό τερματικό ύψος ανόδου, καθώς επίσης και η αξονική αραίωση στο τελικό τερματικό ύψος και στο σημείο πρόσπτωσης της φλέβας στον πυθμένα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-2.

Πίνακας 2-2: Πειραματικά αποτελέσματα για ακίνητο αποδέκτη Roberts & Toms (1987)

θ_o	Z_i/DF_o	S_i/F_o	S_i/F_o
60°	2.08 για $F_o > 20$	1.03 για $F_o > 12$	0.38 για $F_o > 25$ 0.50 για $F_o = 12$

Ο *Lindberg (1994)* πραγματοποίησε πειράματα σε φλέβες αρνητικής άνωσης που εκρέουν υπό γωνία 30°, 45°, 60° και 90° σε στάσιμο και κινούμενο αποδέκτη. Προσδιορίστηκαν οπτικά οι συντεταγμένες στο τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας και οι διαστάσεις στη θέση πρόσπτωσης στον πυθμένα. Τα αδιάστατα αποτελέσματα για το τελικό ύψος ανόδου της φλέβας παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-3.

Πίνακας 2-3: Πειραματικά αποτελέσματα Lindberg (1994)

θ_o	Z_i/DF_o
30°	1.29
45°	1.58
60°	2.14

Οι *Roberts et al. (1997)* πραγματοποίησαν πειράματα με αρχική γωνία εκτόξευσης 60° με τη χρήση συστήματος LIF (Laser-induced fluorescence) και αγωγιμομέτρων σε δεξαμενή με ήρεμο νερό. Η θεωρητική ανάλυση βασίζεται στην παραδοχή ότι η ροή κυριαρχείται στην εκροή από την ποσότητα κίνησης, γεγονός που σύμφωνα με την εργασία απαιτεί αριθμούς Froude μεγαλύτερους από 20 ($F_o > 20$). Προσδιορίστηκε το τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας, η οριζόντια απόσταση από το στόμιο εξόδου ως την πρόσπτωση του άξονα της φλέβας στον πυθμένα και η αντίστοιχη αραίωση (Πίνακας 2-4), καθώς και το πάχος του σχηματιζόμενου στρώματος στον πυθμένα, η θέση όπου τελειώνει η ζώνη

ανάμιξης και η αντίστοιχη αραίωση. Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί πως οι μετρήσεις του Z_f περιλαμβάνουν το ύψος του ακροφυσίου.

Πίνακας 2-4: Πειραματικά αποτελέσματα Roberts et al. (1997)

θ_o	Z_f/DF_o	X_i/DF_o	S_i/F_o
60°	2.20	2.40	1.60

Οι *Bloomfield & Kerr (2002)* διεξήγαγαν πειράματα σε φλέβες αρνητικής άνωσης με αρχική γωνία εκτόξευσης από 30° έως 90° σε ακίνητο ομογενή και γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη. Είναι η πρώτη εργασία που παρουσιάζει αποτελέσματα για πολλές γωνίες εκτόξευσης και διακρίνει το αρχικό τερματικό ύψος της φλέβας από το τελικό, δίδοντας σχέσεις προσδιορισμού τους:

$$\text{Αρχικό τερματικό ύψος } Z_{\max}(\varphi) = 2.32(\cos\varphi)^{3/4}M_o^{3/4}B_o^{-1/2}$$

$$\text{Τελικό τερματικό ύψος } Z_f(\varphi) = f(\varphi)M_o^{3/4}B_o^{-1/2}$$

όπου $f(\varphi) = 1.73 + \frac{6.50}{10^2}\varphi - \frac{4.61}{10^3}\varphi^2 + \frac{1.24}{10^4}\varphi^3 - \frac{1.69}{10^6}\varphi^4 + \frac{9.04}{10^9}\varphi^5$ και φ η γωνία εκτόξευσης ως προς την κατακόρυφο σε μοίρες.

Από την πειραματική μελέτη προκύπτουν αποτελέσματα μικρότερα συγκριτικά με εκείνα των περισσότερων ερευνητών. Πιθανόν οι αποκλίσεις αυτές να οφείλονται στο γεγονός ότι τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή μικρής κλίμακας, με πιθανότητα να υπήρχαν φαινόμενα αλληλεπίδρασης της ροής με τα όρια του αποδέκτη (boundary effects), καθώς επίσης στο ότι προκειμένου να επιτευχθεί τυρβώδης ροή, χρησιμοποιούσαν κάποιο πλέγμα που πιθανώς μείωνε την αρχική ορμή.

Ο *Jirka (2004)* παρουσίασε την εργασία όπου χρησιμοποιείται το μοντέλο CorJet για την καλύτερη εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των χαρακτηριστικών της αραίωσης των φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία σε στάσιμο ή κινούμενο αποδέκτη.

Οι *Cipollina et al. (2005)* μελέτησαν τις περιπτώσεις φλεβών αρνητικής άνωσης με γωνίες 30° , 45° και 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Προσδιόρισαν την οριζόντια και κατακόρυφη θέση του μεγίστου ύψους του άξονα της φλέβας, την κατακόρυφη θέση του τελικού τερματικού ύψους (άνω όριο) και την οριζόντια θέση επιστροφής της φλέβας. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 2-5. Επίδραση στα αποτελέσματα αυτά πιθανώς να έχουν οι μεγάλες διαφορές πυκνότητας μεταξύ φλέβας και αποδέκτη ($\Delta\rho/\rho \approx 5-18\%$), γεγονός που δημιουργεί ερωτηματικά για την ισχύ της παραδοχής Boussinesq.

Πίνακας 2-5: Πειραματικά αποτελέσματα Cipollina et al. (2005)

θ_0	Z_f/DF_0	Z_c/DF_0	X_z/DF_0	X_{ic}/DF_0
30°	1.08	0.79	1.95	3.03
45°	1.61	1.17	1.80	2.82
60°	2.32	1.77	1.42	2.25

Μετρήσεις για την τροχιά και τις αραιώσεις σε φλέβες αρνητικής άνωσης για γωνίες 15°, 30°, 45°, 47°, 60° και 75° πραγματοποίησε ο *Kikkert (2006)* στη διδακτορική διατριβή του, χρησιμοποιώντας τις τεχνικές LA (Light Attenuation) και LIF (Laser Induced Fluorescence). Παρουσιάζονται αποτελέσματα για τη θέση του τελικού τερματικού ύψους, την κατακόρυφη απόσταση του μέγιστου ύψους του άξονα της φλέβας, καθώς και την αραιώση στη θέση αυτή. Επιπρόσθετα μετρήθηκε η οριζόντια απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και του σημείου επιστροφής του άξονα της φλέβας στο επίπεδο εκτόξευσης και η αντίστοιχη αραιώση. Πέρα από τα πειραματικά δεδομένα, παρουσιάστηκαν και αναλυτικές λύσεις πρόβλεψης των χαρακτηριστικών των φλεβών. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2-7, τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο τεχνικών παρουσιάζουν αποκλίσεις. Όσον αφορά τις τιμές των αραιώσεων, ο συγγραφέας αναφέρεται σε ολοκληρωμένες τιμές στο πλάτος της φλέβας, γεγονός που καθιστά δύσκολη τη σύγκριση με αποτελέσματα άλλων εργασιών. Ωστόσο αναφέρεται πως η ολοκληρωμένη αξονική αραιώση που προέκυψε στη θέση του τερματικού ύψους για τις γωνίες 30°, 45° και 60° είναι ίδια και ίση με $1.04F_0$. Αναφορικά με τις ολοκληρωμένες αραιώσεις στη θέση πρόπτωσης, παρατηρείται αύξηση με την αύξηση της γωνίας παροχέτευσης, όμως οι αποκλίσεις των μετρήσεων δεν καθιστούν ασφαλές το συμπέρασμα αυτό.

Πίνακας 2-6: Πειραματικά αποτελέσματα Kikkert (2006) [LIF/LA]

θ_0	Z_f/DF_0	Z_c/DF_0	X_z/DF_0	X_{ic}/DF_0	S_t/F_0 (ολοκληρωμένες)	S_i/F_0
15°	0.59/0.57	0.26/0.22	1.49/1.30	2.58/2.29	1.04	1.22
30°	1.20/1.06	0.69/0.60	1.84/1.78	-/3.17	1.04	1.51
45°	1.77/1.71	1.20/1.08	2.00/1.85	-/3.30	1.04	1.72
60°	2.45/2.28	1.74/1.59	1.79/1.65	-/2.78	1.04	1.82
75°	-/2.57	-/1.88	-/1.00	-		

Οι *Nemlioglu & Roberts (2006)* πραγματοποίησαν περιορισμένο αριθμό πειραμάτων σε φλέβες αρνητικής άνωσης με αρχικές γωνίες παροχέτευσης 15°, 30°, 45°, 60°, 75° και 90° χρησιμοποιώντας την τεχνική 3D-LIF. Προσδιορίστηκε το τελικό τερματικό ύψος της φλέβας, η οριζόντια απόσταση μέχρι τη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο

παροχέτευσης και η αντίστοιχη αραίωση. Συμπερασματικά αναφέρουν, πως η αξονική αραίωση στη θέση επιστροφής της φλέβας πρακτικά δεν εξαρτάται από τη γωνία παροχέτευσης για γωνίες μεταξύ 30° και 75°, ενώ είναι αρκετά μειωμένη για γωνίες 15° και 90° (Πίνακας 2-7).

Πίνακας 2-7: Πειραματικά αποτελέσματα Nemlioglu and Roberts (2006)

θ_o	Z_f/DF_o	X_i/DF_o	S_i/F_o
15°	0.68	2.40	1.40
30°	1.40	3.30	1.90
45°	2.00	3.20	1.70
60°	2.85	3.25	1.70
75°	3.00	1.90	1.80
90°	2.80	0.09	1.10

Τέλος, παρουσιάστηκαν αναλυτικές λύσεις για την πρόβλεψη βασικών χαρακτηριστικών των φλεβών αρνητικής άνωσης, η οποία είναι ικανοποιητική για γωνίες μέχρι περίπου 60°.

Οι *Paranicolau et al. (2008)* πραγματοποίησαν προσομοίωση της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης με χρήση ολοκληρωματικών μοντέλων που βασίζονται σε κατανομές Gauss και Top-Hat για την ταχύτητα και συγκέντρωση. Συμπερασματικά προτείνεται μειωμένη τιμή για το συντελεστή συμπάραισης, προκειμένου να προσομοιωθούν ικανοποιητικά τα χαρακτηριστικά φλεβών αρνητικής άνωσης (Κεφάλαιο 7).

Ο *Παπακωνσταντής (2009)* στη διδακτορική διατριβή του, μέρος των αποτελεσμάτων της οποίας παρουσιάζεται στις εργασίες *Parakonstantis et al. 2007, 2011a και 2011b*, πραγματοποίησε θεωρητική, πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση του πεδίου ροής μιας φλέβας αρνητικής άνωσης και της περαιτέρω εξάπλωσής της στον πυθμένα. Διεξήγαγε μεγάλο αριθμό πειραμάτων σε φλέβες αρνητικής άνωσης για γωνίες 45°, 60°, 75° και 90°, προσδιορίζοντας το αρχικό και τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας, τη θέση του τελικού τερματικού ύψους και την οριζόντια απόσταση από το στόμιο παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής του εξωτερικού ορίου και του άξονα της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Επίσης παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης για τον προσδιορισμό της αξονικής αραίωσης στη θέση του τελικού τερματικού ύψους και της επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης (Πίνακας 2-8). Από τις μετρήσεις στο τελικό τερματικό ύψος προσδιορίζεται η κατανομή της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης και για πρώτη φορά της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης κατά την κατακόρυφη και εγκάρσια διεύθυνση, διαπιστώνοντας ότι δεν υπάρχει εξάρτηση από τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude. Η πλειοψηφία των πειραμάτων διεξάχθηκε στην πειραματική διάταξη της παρούσας εργασίας. Επίσης,

προσομοιώνεται η ροή φλεβών αρνητικής άνωσης, που παροχετεύονται υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη, με χρήση δύο ολοκληρωματικών μοντέλων, του μοντέλου GM (κατανομές ταχύτητας και φαινόμενης επιτάχυνσης της βαρύτητας κατά Gauss) και του μοντέλου THM (ομοιόμορφες κατανομές) και πραγματοποιείται μελέτη της συμπαράσυρσης.

Πίνακας 2-8: Πειραματικά αποτελέσματα Παπακωνσταντής (2009)

θ_0	Z_{max}/DF_0	Z_f/DF_0	Z_c/DF_0	X_z/DF_0	X_i/DF_0	X_{ic}/DF_0	S_t/F_0	S_i/F_0
45°	1.83	1.58	1.17	2.03	3.78	3.16	0.52	1.55
60°	2.57	2.14	1.68	1.83	3.57	2.75	0.56	1.68
75°	2.73	2.48	1.93	1.15	2.42	1.80	0.51	1.67
80°	2.90	2.60	-	0.88	2.08	1.53	-	-
85°	2.98	2.53	-	0.64	1.63	1.21	-	-
90°	3.02	1.91	-	-	-	-	-	-

Οι *Shao & Law (2010)* διεξήγαγαν πειράματα σε φλέβες αρνητικής άνωσης εκτοξευόμενες υπό γωνίες 30° και 45° σε ακίνητο αποδέκτη, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους Particle Image Velocimetry (PIV) και Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF), εξετάζοντας την επίδραση του πυθμένα (boundary effect). Παρουσιάστηκαν αποτελέσματα μετρήσεων του τελικού τερματικού ύψους της φλέβας, της θέσης του μέγιστου ύψους του άξονα και της οριζόντιας απόστασης μεταξύ του στομίου και του σημείου επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο εκροής (Πίνακας 2-9). Επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της αξονικής αραίωσης στο τελικό τερματικό ύψος και στη θέση επιστροφής της φλέβας. Μεταξύ αυτών, μετρήθηκε η μεταβολή του πλάτους διεύρυνσης των ταχυτήτων και συγκεντρώσεων (κάτω ή εσωτερικό και άνω ή εξωτερικό όριο) κατά μήκος της τροχιάς της φλέβας. Όσον αφορά την επίδραση του πυθμένα, η παράμετρος z_0/l_M φαίνεται να είναι καθοριστική, όπου z_0 το ύψος στομίου από τον πυθμένα, γι' αυτό και τα αποτελέσματα διαχωρίστηκαν σε κατηγορίες.

Πίνακας 2-9: Πειραματικά αποτελέσματα Shao and Law (2010)

θ_0	Z_f/DF_0	Z_c/DF_0	X_z/DF_0	X_{ic}/DF_0	S_t/F_0	S_i/F_0
30°	1.05 ¹	0.66 ¹	1.70 ¹ /1.54 ²	2.88 ¹ /3.00 ²	0.62 ¹ /0.66 ²	1.18 ¹ /1.45 ²
45°	1.47 ³	1.14 ³	1.69 ³	3.33 ³	0.46 ³	1.26 ³

¹ $0.10 \leq z_0/l_M \leq 0.15$ (boundary), ² $z_0/l_M \geq 0.15$ (free), ³ $z_0/l_M \geq 0.05$ (free), z_0 : ύψος στομίου από τον πυθμένα

Η εργασία των *Lai & Lee (2012)* παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα φλεβών αρνητικής άνωσης για γωνίες παροχέτευσης 15°, 30°, 38°, 45°, 52° και 60° με χρήση της

τεχνικής LIF. Δίδονται αδιαστοποιημένες σχέσεις για το τελικό τερματικό ύψος της φλέβας, τη θέση του μεγίστου ύψους αξονικά, την απόσταση από το ακροφύσιο έως την επιστροφή της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης, την αραίωση στο τελικό τερματικό ύψος και την αραίωση στη θέση επιστροφής (Πίνακας 2-10). Επιπρόσθετα παρουσιάζεται η αξονική μεταβολή της μέσης ταχύτητας συναρτήσει της αξονικής απόστασης για την περίπτωση της φλέβας με αρχική γωνία εξόδου 60°. Στη θέση του τερματικού ύψους για τις γωνίες 30°, 38°, 45°, 52° και 60° προσδιορίζονται οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης κατά την κατακόρυφη και εγκάρσια διεύθυνση και η κατανομή των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Visjet, παρουσιάζοντας μια εναλλακτική εκτίμηση για το συντελεστή συμπαράσυρσης, και οι προβλέψεις του συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου και των πειραματικών αποτελεσμάτων κυμαίνονταν στο 10-15% για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και στο 30% για τις αραιώσεις.

Πίνακας 2-10: Πειραματικά αποτελέσματα Lai & Lee (2012)

θ_o	Z_i/DF_o	Z_c/DF_o	X_z/DF_o	X_{ic}/DF_o	S_t/F_o	S_i/F_o
15°	0.44	0.21	1.22	2.41	0.27	0.43
30°	0.95	0.65	1.95	3.18	0.40	0.82
38°	1.20	0.87	1.95	3.19	0.45	0.99
45°	1.58	1.19	2.09	3.34	0.45	1.09
52°	1.69	1.34	1.87	2.87	0.47	1.10
60°	2.08	1.64	1.78	2.84	0.44	1.07

Ο *Oliver (2012)* πραγματοποίησε μετρήσεις για τις γωνίες εκτόξευσης 15°, 30°, 45°, 60°, 70° και 75°, προσδιορίζοντας:

- το τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας
- το μέγιστο ύψος του άξονα της φλέβας
- τη θέση όπου εμφανίζεται το τερματικό ύψος ανόδου
- την οριζόντια απόσταση από το στόμιο εκτόξευσης μέχρι τη θέση επιστροφής της φλέβας (εξωτερικό όριο)
- την οριζόντια απόσταση από το στόμιο εκτόξευσης του άξονα της φλέβας μέχρι τη θέση επιστροφής της
- την αραίωση στο τελικό τερματικό ύψος ανόδου για γωνίες 15°, 30°, 45°, 60° και 75°
- την αραίωση στη θέση επιστροφής της φλέβας στον πυθμένα για γωνίες 15°, 30°, 45°, 60° και 75° (Πίνακας 2-11).

Πρότεινε ότι οι διακυμάνσεις της αραίωσης στη θέση επιστροφής σε παλαιότερες εργασίες, πιθανώς να εξηγούνται από την επίδραση του πυθμένα. Προσδιόρισε την κατανομή της μέσης συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης, καθώς επίσης ανέπτυξε ένα τροποποιημένο ολοκληρωματικό μοντέλο (reduced buoyancy flux - RBF model) για την πρόβλεψη των χαρακτηριστικών των φλεβών αρνητικής άνωσης (Oliver et al., 2013).

Πίνακας 2-11: Πειραματικά αποτελέσματα Oliver (2012)

θ_0	Z_i/DF_0	Z_c/DF_0	X_z/DF_0	X_i/DF_0	X_{ic}/DF_0	S_t/F_0	S_i/F_0
15°	0.63	0.24	1.37	3.68	2.39	0.25	0.48
30°	1.15	0.66	1.75	4.34	3.08	0.34	0.84
45°	1.65	1.09	1.75	4.29	3.13	0.39	1.22
60°	2.21	1.61	1.53	3.96	2.76	0.42	1.55
70°	2.44	1.84	1.13	3.29	2.00	-	-
75°	2.53	1.89	0.97	2.93	1.67	0.39	1.53

Οι *Yannopoulos and Bloutsos (2012)* ανέπτυξαν ένα μοντέλο, λαμβάνοντας υπόψη το ρευστό που διαφεύγει από την κύρια ροή μιας κεκλιμένης φλέβας αρνητικής άνωσης (Escaping Mass Approach – EMA). Οι προβλέψεις του συγκρίθηκαν με πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας και βρέθηκε ότι συμφωνούν ικανοποιητικά.

Οι *Abessi & Roberts (2014)* στην εργασία τους, παρουσίασαν τα αποτελέσματα στα οποία κατέληξαν σχετικά με την εκροή φλεβών αρνητικής άνωσης σε βαθιά νερά (Πίνακας 2-12). Αναφέρουν ότι σύμφωνα με τα πειράματά τους, η αραίωση δεν επηρεάζεται από τη γωνία παροχέτευσης στο εύρος 45°-65°, αν και στις 60° προκύπτει ελαφρά αυξημένη αραίωση.

Πίνακας 2-12: Πειραματικά αποτελέσματα Abessi & Roberts (2014)

θ_0	Z_i/DF_0	Z_c/DF_0	X_z/DF_0	X_{ic}/DF_0	S_t/F_0	S_i/F_0
30°	1.18	0.79	2.13	3.50	0.55	1.20
45°	1.80	1.33	2.25	3.60	0.58	1.60
60°	2.25	1.65	1.90	2.75	0.61	1.65

Οι *Crowe et al. (2015)* διεξήγαγαν πειράματα με τη μέθοδο PTV (Particle Velocimetry System) που αφορούν σε ανωστικές φλέβες που παροχετεύονται υπό γωνίες 15°, 45°, 60°, 70° και 75°. Προσδιορίστηκε η οριζόντια και κατακόρυφη θέση του μέγιστου ύψους στον άξονα της φλέβας και η οριζόντια απόσταση από το στόμιο παροχέτευσης έως την επιστροφή του άξονα της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης (Πίνακας 2-13). Παρουσιάζονται επίσης μετρήσεις του πλάτους της ταχύτητας, καθώς και της μέσης

αξονικής και εγκάρσιας ταχύτητας στη θέση του τερματικού ύψους και της επιστροφής της φλέβας.

Πίνακας 2-13: Πειραματικά αποτελέσματα Crowe et al. (2015)

θ_o	Z_c/DF_o	X_z/DF_o	X_{ic}/DF_o
15°	0.25	1.45	2.51
30°	0.69	1.87	3.56
45°	1.22	1.96	3.43
60°	1.71	1.69	2.93
65°	1.82	1.50	2.53
70°	1.96	1.34	2.28
75°	2.02	1.10	1.87

Ο *Nikiforakis (2015)* στη διδακτορική διατριβή του διερεύνησε πειραματικά και αριθμητικά τις κεκλιμένες φλέβες αρνητικής άνωσης στο κοντινό και στο μακρινό πεδίο. Μεταξύ άλλων διεξήγαγε πειράματα στην ίδια πειραματική διάταξη με της παρούσας εργασίας για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνίες 30°, 45° και 60° σε ομογενή και στάσιμο αποδέκτη και προσκρούουν σε πυθμένες με κλίση $\phi=5^\circ$ και 10° (Πίνακας 2-14). Παρουσιάστηκε επίσης μια τροποποίηση του μοντέλου Corjet (Modified CorJet Model - MCM), στο οποίο λαμβάνεται υπόψη η διαφυγή μάζας από την κυρία ροή της φλέβας. Μέρος των αποτελεσμάτων δημοσιεύτηκε στην εργασία *Nikiforakis et al. (2014)*.

Πίνακας 2-14: Πειραματικά αποτελέσματα Nikiforakis (2015)

θ_o	Z_f/DF_o	Z_c/DF_o	X_z/DF_o	X_i/DF_o	X_{ic}/DF_o
30°	0.99	0.70	2.13	3.81	3.23
45°	1.53	1.15	1.98	3.98	3.20
60°	2.02	1.66	1.83	3.67	3.09

2.2 Στόχοι εργασίας

Όλες οι εργασίες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο παρέχουν σημαντικά δεδομένα στην περιγραφή της ροής των τυρβωδών κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης. Ωστόσο παρατηρούνται αρκετές ασυμφωνίες μεταξύ των αποτελεσμάτων, ιδιαίτερα εκείνων που αφορούν στις αραιώσεις. Για παράδειγμα, το τελικό τερματικό ύψος ανόδου αδιαστατοποιημένο ως προς τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude F_o και τη διάμετρο του στομίου εκροής D Z_f/DF_o για γωνία παροχέτευσης 30°, δίδεται ίσο με 1.40 από τους *Nemlioglu & Roberts (2006)*, ενώ ίσο με 0.95 σύμφωνα

με τους Lai & Lee (2012). Για την ίδια γωνία παροχέτευσης, η αραίωση αδιαστατοποιημένη ως προς τον F_0 στο σημείο επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης S_i/F_0 δίδεται ίση με 1.90 από τους Nemlioglu & Roberts (2006) και 0.84 από τον Oliver (2012), διαφορά η οποία ξεπερνά το 100%.

Η παρούσα εργασία στοχεύει να συνεισφέρει στη διερεύνηση της ροής των κεκλιμένων φλεβών αρνητικής άνωσης σε ήρεμο και ομογενή αποδέκτη με οριζόντιο πυθμένα, μέσω της διεξαγωγής μεγάλου αριθμού πειραμάτων. Συγκεκριμένα πραγματοποιούνται:

- μετρήσεις κύριων γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τροχιάς φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° .
- μετρήσεις αραίωσης στη θέση του τελικού τερματικού ύψους ανόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στον πυθμένα φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνίες 35° , 50° και 70° .
- μετρήσεις συγκέντρωσης για τον προσδιορισμό της κατανομής της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης στη θέση του τελικού τερματικού ύψους και της κατανομής της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης.
- αριθμητική προσομοίωση της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό τυχαία γωνία.

Από τη διερεύνηση που θα πραγματοποιηθεί θα εκτιμηθούν χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς των φλεβών για γωνίες παροχέτευσης για τις οποίες υπάρχουν λίγα ή καθόλου πειραματικά δεδομένα, αποφεύγοντας φαινόμενα αλληλεπίδρασης της ροής με τα όρια του αποδέκτη. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται για πρώτη φορά αποτελέσματα που αφορούν:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνίες 35° και 50° .
- Αξονικές αραιώσεις φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνίες 35° , 50° και 70° .
- Κατανομή της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνίες 35° , 50° και 70° .

Συγκεντρωτικά οι στόχοι της παρούσας εργασίας είναι:

- Να δοθούν σχέσεις εκτίμησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τροχιάς και της αραίωσης για τις γωνίες που μελετήθηκαν.
- Να διερευνηθεί η επίδραση της γωνίας παροχέτευσης στο αρχικό και τελικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας, στην οριζόντια απόσταση της θέσης επιστροφής της καθώς και στις αραιώσεις, τόσο στο τελικό τερματικό ύψος όσο και στο επίπεδο παροχέτευσης.

- Να δοθούν σχέσεις εκτίμησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τροχιάς για τυχαία γωνία παροχέτευσης (έως 75°), λαμβάνοντας υπόψη τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας και προηγούμενης εργασίας (Παπακωνσταντής, 2009).
- Να μελετηθούν τυρβώδη χαρακτηριστικά σε ροές φλεβών αρνητικής άνωσης.
- Να προσεγγιστούν τα πειραματικά δεδομένα από ολοκληρωματικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό τυχαία γωνία (έως 75°) σε στάσιμο και ομογενή αποδέκτη, βάσει διαφορετικών θεωρήσεων για τη συμπαράσυρση.

3 Πειραματική διάταξη

3.1 Γενική περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Η διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ (Αίθουσα Ερευνών Γ. Νουτσόπουλος), με χρήση της πειραματικής διάταξης του Σχήματος 3-1. Η συγκεκριμένη διάταξη επιτρέπει τη διεξαγωγή πειραμάτων τυρβωδών φλεβών υπό διάφορες γωνίες και διαμέτρους στομίων εκτόξευσης, με οπτική καταγραφή της ροής της φλέβας και μετρήσεις συγκεντρώσεων, χωρίς να υπάρχει αλληλεπίδραση με πλευρικά όρια.



Σχήμα 3-1: Πειραματική διάταξη στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ

Τα βασικότερα επιμέρους τμήματα της διάταξης είναι:

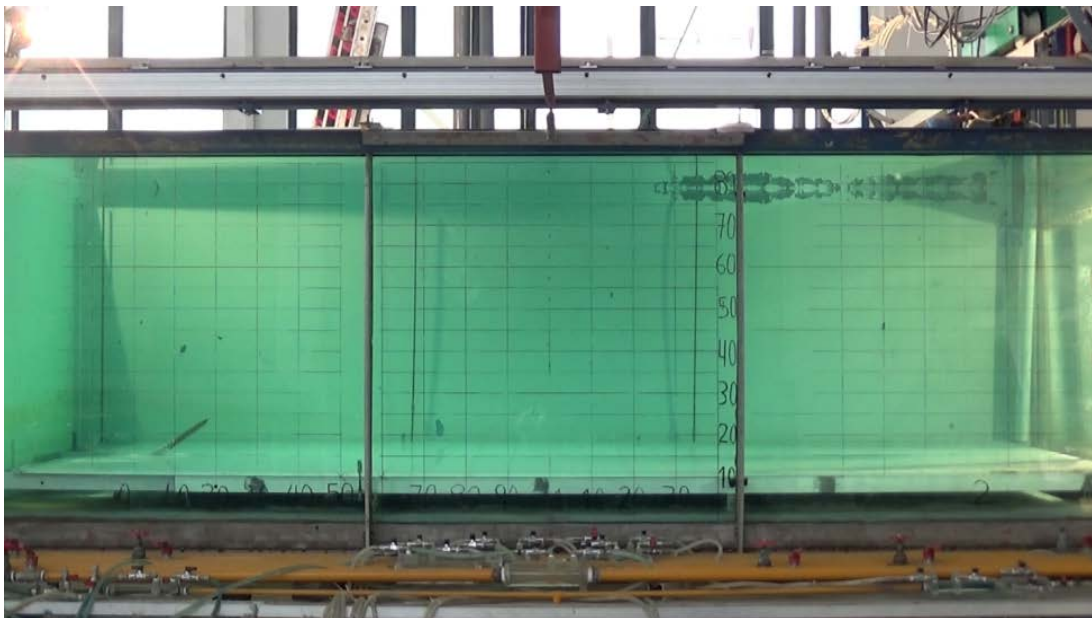
1. Δεξαμενή διεξαγωγής πειραμάτων (δεξαμενή διάχυσης).
2. Δεξαμενή παρασκευής του διαλύματος της φλέβας (χρωματισμένο αλατόνερο) χωρητικότητας 1 m^3 .
3. Δεξαμενή σταθερής στάθμης ελεύθερης επιφάνειας για την τροφοδοσία της φλέβας χωρητικότητας περίπου 0.3 m^3 με σύστημα υπερχειλίσσης, στηριζόμενη σε εξέδρα.
4. Σύστημα ρύθμισης και μέτρησης της παροχής της φλέβας αποτελούμενο από στένωση τύπου Venturi σε συνδυασμό με διαφορικό μανόμετρο και ογκομετρικό κύλινδρο διαμέτρου 39 cm.
5. Σύστημα παροχέτευσης της φλέβας στη δεξαμενή διάχυσης.
6. Όργανο μέτρησης της αγωγιμότητας/συγκέντρωσης.

7. Πίνακας χειρισμού του συστήματος μετακίνησης του οργάνου μέτρησης συγκέντρωσης και οθόνη ένδειξης της εκάστοτε θέσης του.

Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή της πειραματικής διάταξης. Να σημειωθεί πως λεπτομερής περιγραφή της διάταξης υπάρχει στην διδακτορική διατριβή Παπακωνσταντής (2009).

3.2 Δεξαμενή διεξαγωγής πειραμάτων

Η κεντρική δεξαμενή διεξαγωγής πειραμάτων (δεξαμενή διάχυσης), διαστάσεων 3.00 m x 1.50 m x 0.90 m, είναι τοποθετημένη σε μεταλλική κατασκευή υπερυψωμένη 0.85 m από το δάπεδο. Η πρόσοψη της δεξαμενής (3.00 m x 0.90 m) αποτελείται από κρύσταλλο με χαραγμένο αριθμημένο πλέγμα 10 cm x 5 cm, ώστε να επιτρέπει την οπτική καταγραφή του πειράματος και τη μέτρηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τροχιάς της φλέβας (Σχήμα 3-2). Η πλαϊνή δεξιά πλευρά της δεξαμενής (1.50 m x 0.90 m) είναι επίσης διαφανής και κατασκευασμένη από plexiglass, ενώ οι άλλες δυο πλευρές της είναι συμπαγείς από χάλυβα. Ο πυθμένας της δεξαμενής είναι οριζόντιος και κατασκευασμένος από plexiglass με μία οπή στην οποία τοποθετείται το ακροφύσιο εκτόξευσης της φλέβας. Στον πυθμένα υπάρχει επίσης οπή στην πίσω αριστερή γωνία που χρησιμεύει για την εκκένωση της δεξαμενής μέσω πλαστικού σωλήνα που οδηγεί στην αποχέτευση.



Σχήμα 3-2: Πρόσοψη δεξαμενής διάχυσης με χαραγμένο πλέγμα

Στη δεξιά πλευρά κατά πλάτος της δεξαμενής είναι εγκατεστημένος υπερχειλιστής λεπτής στέψης μήκους 1.5 m, ο οποίος επιτρέπει την ομοιόμορφη υπερχειλίση κατά πλάτος της

δεξαμενής, με σκοπό τη διατήρηση σταθερής στάθμης σε αυτήν. Το νερό που υπερχειλίζει οδηγείται μέσω πλαστικού σωλήνα στην αποχέτευση (Σχήμα 3-3).



Σχήμα 3-3: Υπερχειλιστής δεξαμενής διάχυσης

3.3 Δεξαμενή παρασκευής διαλύματος

Πίσω από τη δεξαμενή διάχυσης βρίσκεται δεξαμενή χωρητικότητας 1 m^3 , η οποία χρησιμεύει για την παρασκευή του διαλύματος της φλέβας (Σχήμα 3-4). Το διάλυμα αυτό παρασκευάζεται με την ανάμιξη νερού από το δίκτυο της ΕΥΔΑΠ, μαγειρικού αλατιού και χρωστικής τροφίμων (food dye) για το χρωματισμό του διαλύματος. Χρησιμοποιήθηκαν δύο χρωστικές ουσίες, κόκκινου και μπλε χρώματος.

Στη δεξαμενή υπάρχει εγκατεστημένη αντλία που εξυπηρετεί την ανακυκλοφορία του διαλύματος με σκοπό την ομογενοποίησή του. Μετά την ομογενοποίησή του, το διάλυμα οδηγείται μέσω αντλίας από τη δεξαμενή παρασκευής στη δεξαμενή τροφοδοσίας.



Σχήμα 3-4: Δεξαμενή παρασκευής διαλύματος (κάτω) & δεξαμενή τροφοδοσίας (άνω)

3.4 Δεξαμενή τροφοδοσίας

Η δεξαμενή τροφοδοσίας χωρητικότητας 0.3 m^3 είναι τοποθετημένη πάνω από τη δεξαμενή παρασκευής διαλύματος σε εξέδρα ύψους περίπου 4 m από τον πυθμένα της δεξαμενής (Σχήμα 3-4). Το υλικό κατασκευής της είναι plexiglass και όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, τροφοδοτείται από τη δεξαμενή παρασκευής διαλύματος μέσω αντλίας. Ο υπερχειλιστής που διαθέτει επιτρέπει τη διατήρηση σταθερής στάθμης στη δεξαμενή και επομένως τη συνεχή σταθερή παροχέτευση της φλέβας. Το διάλυμα από τον υπερχειλιστή επιστρέφει με αγωγό στη δεξαμενή παραγωγής του διαλύματος.

3.5 Σύστημα ρύθμισης και μέτρησης της παροχής

Το διάλυμα οδηγείται από τη δεξαμενή τροφοδοσίας προς το στόμιο της φλέβας μέσω χαλκοσωλήνα. Υπάρχει επίσης εγκατεστημένο σύστημα που επιτρέπει εκτός από την παροχέτευση της φλέβας, την παράκαμψη του διαλύματος προς ογκομετρικό κύλινδρο με εύκαμπτο σωλήνα. Η παροχή της φλέβας ρυθμίζεται από δικλείδα που παρεμβάλλεται στο χαλκοσωλήνα, ανάντη της οποίας έχει τοποθετηθεί ένα σύστημα μετρητή Venturi το οποίο σε συνδυασμό με διαφορικό μανόμετρο τετραχλωράνθρακα επιτρέπει τη μέτρηση της παροχής (Σχήμα 3-5).



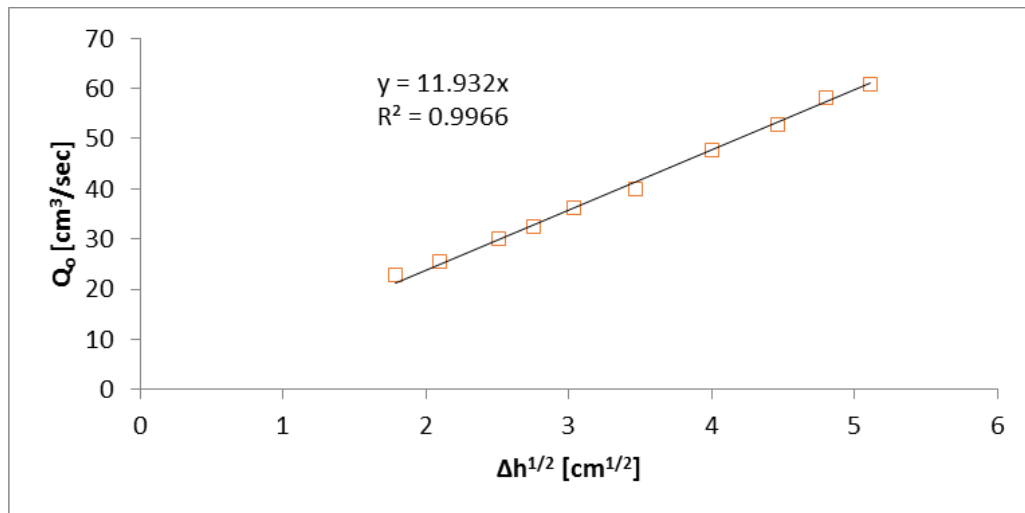
Σχήμα 3-5: Μετρητής Venturi, μανόμετρο και ογκομετρικός κύλινδρος

Η αρχή λειτουργίας του μετρητή στηρίζεται στο γεγονός ότι η στένωση προκαλεί αλλαγή της πίεσης η οποία μπορεί να μετρηθεί και μετά να υπολογισθεί η παροχή. Εφαρμόζοντας την εξίσωση Bernoulli και την εξίσωση συνέχειας, προκύπτει πως η παροχή του αγωγού εξαρτάται από τη διαφορά του μανομετρικού ύψους Δh , δηλαδή:

$$Q_o = C\sqrt{\Delta h}$$

Γνωρίζοντας λοιπόν τη σταθερά C , μπορεί να προσδιοριστεί η παροχή Q_o για κάθε διαφορά μανομετρικού ύψους Δh . Ορίζοντας κάθε φορά διαφορετική παροχή (άγνωστη) με διαφορετικό Δh (γνωστό) και οδηγώντας το διάλυμα προς τον ογκομετρικό κύλινδρο, μετριέται ο χρόνος Δt που απαιτείται για να ανέλθει η στάθμη του νερού στον κύλινδρο κατά συγκεκριμένο ύψος. Τα ζεύγη τιμών $(Q_o, \sqrt{\Delta h})$ σχεδιάζονται σε διάγραμμα και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προσδιορίζεται η ευθεία συσχέτισης και η σταθερά C (Σχήμα 3-6).

Για να μετριάσει το σφάλμα ανάγνωσης, για κάθε υψομετρική διαφορά μανομέτρου λήφθηκε η μέση τιμή τριών καταγραφών παροχής. Παρατηρήθηκε πως η σταθερά παρουσιάζει διακύμανση της τάξεως 2.5-3.5%, ανάλογα με τη θερμοκρασία και το εύρος της υψομετρικής διαφοράς μανομέτρου. Στις μετρήσεις της παρούσας χρησιμοποιήθηκε κατά κύριο λόγο η τιμή $C=12$.



Σχήμα 3-6: Ευθεία συσχέτισης παροχής – υψομετρικής διαφοράς μανομέτρου

3.6 Σύστημα παροχέτευσης φλέβας

Για την εκτόξευση της φλέβας χρησιμοποιήθηκαν σωληνίσκοι τριών διαφορετικών εσωτερικών διαμέτρων 4 mm, 6 mm και 8 mm μήκους περίπου 15 cm, οι οποίοι τοποθετούνται σε ειδικές κατασκευές από Plexiglass, που με τη σειρά τους τοποθετούνται στην οπή του πυθμένα της δεξαμενής διάχυσης, σε απόσταση 5-20 cm από τον πυθμένα (Σχήμα 3-7). Πέντε κατασκευές χρησιμοποιήθηκαν για την προσαρμογή γωνίας εκτόξευσης 15°, 30°, 35°, 50° και 70°.



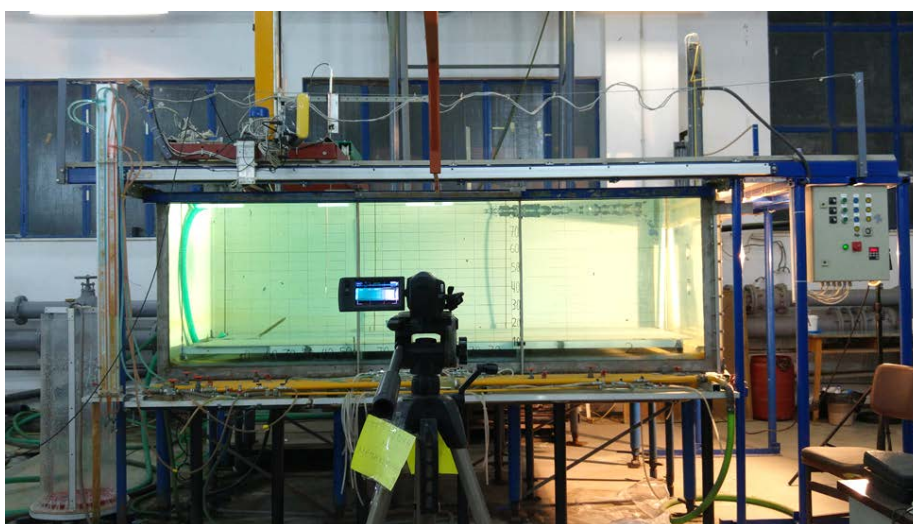
Σχήμα 3-7: Σωλήνας παροχέτευσης φλέβας και κατασκευή προσαρμογής της γωνίας παροχέτευσης με το οριζόντιο επίπεδο του πυθμένα

3.7 Σύστημα οπτικής καταγραφής

Για την εκπόνηση της εργασίας καταγράφηκαν οπτικά όλα τα πειράματα που αφορούσαν στην τροχιά της φλέβας, καθώς και ενδεικτικά κάποια πειράματα μέτρησης συγκεντρώσεων. Η οπτική καταγραφή της τροχιάς της φλέβας πραγματοποιήθηκε με

ψηφιακή κάμερα SONY ανάλυσης 1920 x 1080 (16:9) και ταχύτητας καταγραφής 25 fps (frames per second). Η ακρίβεια των οπτικών παρατηρήσεων ήταν περίπου 1.6 mm. Το αποθηκευτικό μέσο της κάμερας είναι κάρτα μνήμης. Η κάμερα τοποθετείται πάνω σε τρίποδο σε οριζόντια απόσταση 3.65 m από τη δεξαμενή διάχυσης και σε 0.45 m ύψος πάνω από τον αρχικό πυθμένα της. Το τρίποδο οριζοντιώθηκε με τη βοήθεια των φυσαλίδων που φέρει, αλλά και του πλέγματος κατακόρυφων και οριζόντιων γραμμών που διαθέτει η κάμερα, ώστε να ταυτίζονται με το πλέγμα που είναι χαραγμένο στη δεξαμενή. Ταυτόχρονα, το κέντρο της κάμερας ταυτιζόταν με το κέντρο της πρόσοψης της δεξαμενής (Σχήμα 3-8).

Για το φωτισμό της δεξαμενής κατά τη διάρκεια διεξαγωγής του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τρεις προβολείς ισχύος 1000 Watt ο καθένας, τοποθετώντας τους στις πλαϊνές πλευρές της δεξαμενής. Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων συγκέντρωσης, ένας προβολέας ήταν αρκετός. Για την κατά το δυνατόν αποφυγή των αντικατοπτρισμών στο κρύσταλλο της δεξαμενής, τοποθετήθηκαν μαύρα χαρτόνια πίσω από το τρίποδο.



Σχήμα 3-8: Προετοιμασία βιντεοσκόπησης πειράματος

3.8 Σύστημα μέτρησης της αγωγιμότητας – αλατότητας

3.8.1 Περιγραφή συστήματος μέτρησης

Οι μετρήσεις των συγκεντρώσεων στα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με το όργανο MSC1I του Σχήματος 3-9 (125 MicroScale Conductivity and Temperature Instrument) της εταιρείας Precision Measurement Engineering. Το όργανο αυτό έχει σχεδιαστεί για μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας των διαλυμάτων που περιέχουν αγώγιμα ιόντα και παρέχει δύο αναλογικά σήματα τάσης, ένα γραμμικά ανάλογο με την αγωγιμότητα διαλύματος, και ένα μη-γραμμικό ανάλογο με τη

θερμοκρασία του διαλύματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο η μέτρηση της αγωγιμότητας. Εφόσον τόσο η τάση, όσο και η συγκέντρωση είναι ανάλογη της αγωγιμότητας, η συσχέτιση τάσης και συγκέντρωσης είναι επίσης αναλογική.

Το MSCTI αποτελείται από (Παπακωνσταντής, 2009):

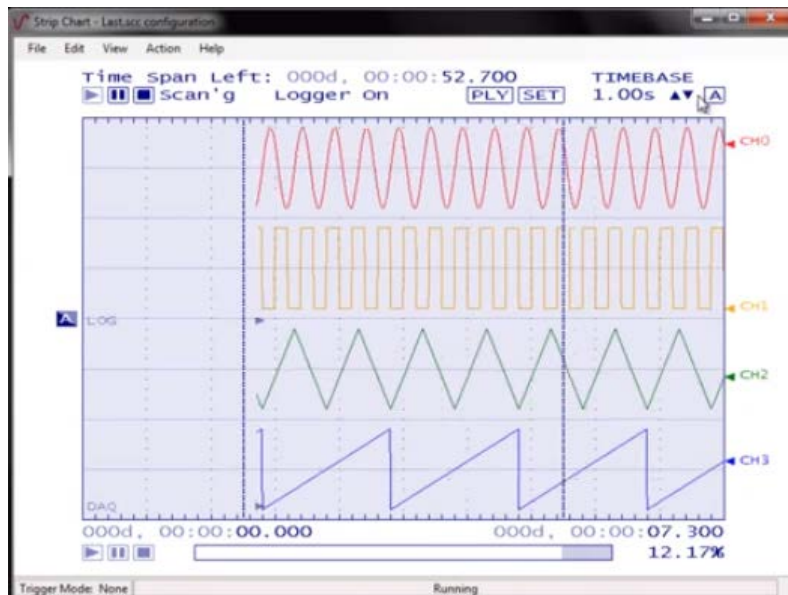
- I. την ηλεκτρονική γέφυρα, που αποτελεί τον ενισχυτή του οργάνου και παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου των διαφόρων λειτουργιών του.
- II. τον αισθητήρα αγωγιμότητας που είναι κατάλληλα σχεδιασμένος για τυρβώδεις μετρήσεις και συνδέεται με καλώδιο 10 μέτρων στην ηλεκτρονική γέφυρα μέσω σειριακής θύρας. Η ακρίβεια μέτρησης του οργάνου είναι 1%. Η χωρική ευαισθησία του οργάνου είναι περίπου ίση με σφαίρα ακτίνας 0.5 mm που έχει κέντρο μεταξύ των εσωτερικών ηλεκτροδίων.
- III. τροφοδοτικό ηλεκτρικού ρεύματος για την τροφοδοσία της ηλεκτρικής γέφυρας.



Σχήμα 3-9: Το όργανο μέτρησης της αγωγιμότητας MSCTI (<http://pme.com/products/mscti>)

Η συσκευή USB-1608FS της εταιρείας Measurement Computing μετατρέπει το σήμα που παρέχει το όργανο MSCTI από αναλογικό σε ψηφιακό, δηλαδή σε μία χρονοσειρά τιμών αγωγιμότητας. Ο μετατροπέας διαθέτει 8 απλά (ή 4 διαφορεικά) αναλογικά κανάλια εισόδου με ανάλυση 16-bit που το καθένα έχει ένα μετατροπέα του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D Converter). Το ψηφιακό σήμα (οι τιμές τάσης) στέλνεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω θύρας USB.

Για την καταγραφή των χρονοσειρών τάσης, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Tracer-DAQ (Σχήμα 3-10), μέσω του οποίου καθορίζεται η συχνότητα και το χρονικό διάστημα της δειγματοληψίας. Μετά το τέλος της μέτρησης γίνεται η αποθήκευση των δεδομένων σε μορφή .txt για περαιτέρω επεξεργασία. Οι τιμές τάσης μετατρέπονται σε τιμές αλατότητας μέσω της ευθείας βαθμονόμησης που αντιστοιχεί στο όργανο MSCTI.



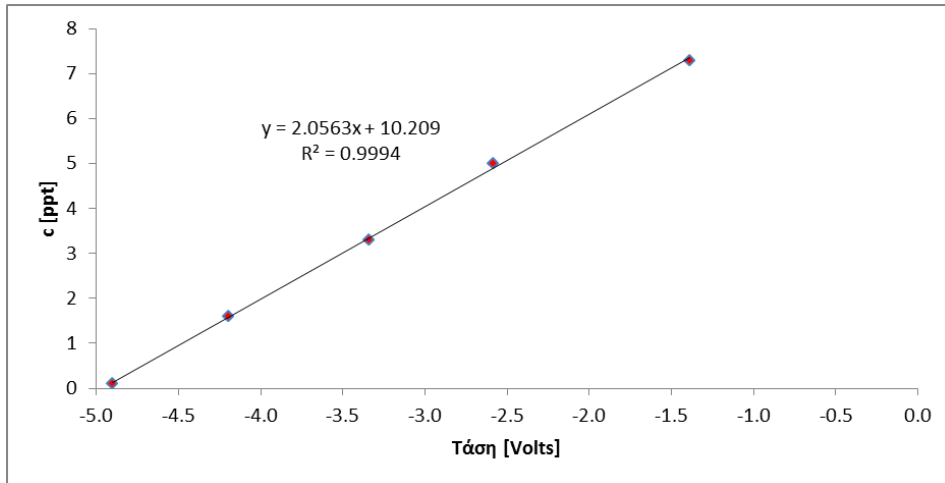
Σχήμα 3-10: Περιβάλλον συλλογής δεδομένων λογισμικού Tracer-DAQ (<http://www.mccdaq.com>)

3.8.2 Βαθμονόμηση του οργάνου MSCTI

Προκειμένου να αντιστοιχισθούν οι τιμές της τάσης που λαμβάνονται από το όργανο MSCTI σε τιμές αλατότητας, απαιτείται η βαθμονόμηση του. Από τη βαθμονόμηση, προκύπτει μια γραμμική συσχέτιση της τάσης και της αγωγιμότητας και κατ' επέκταση της συγκέντρωσης.

Αρχικά ρυθμίζεται το εύρος των τάσεων που θα μετρηθούν, ώστε να αντιστοιχισθεί η μέγιστη τάση στη μέγιστη αλατότητα και η ελάχιστη τάση στην ελάχιστη αλατότητα, αποκτώντας με αυτόν τον τρόπο μεγαλύτερη ακρίβεια μέτρησης. Το εύρος μετρήσεων που παρέχει το όργανο είναι [-5,+5] Volts.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται μέτρηση της τάσης για ένα λεπτό με συχνότητα 10 Hz (600 τιμές σύνολο) σε πέντε ομογενή διαλύματα γνωστής αλατότητας. Τα ζεύγη τιμών τάσης – αλατότητας χαράσσονται σε διάγραμμα και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η ευθεία συσχέτισής τους. Η ευθεία αυτή σύμφωνα με τον κατασκευαστή θεωρείται έγκυρη για 8 ώρες. Στο Σχήμα 3-11 παρουσιάζεται ευθεία που έχει προκύψει από βαθμονόμηση και όπως φαίνεται η συσχέτιση τάσης – αλατότητας προκύπτει γραμμική με πολύ καλή ακρίβεια.



Σχήμα 3-11: Καμπύλη βαθμονόμησης οργάνου MSCTI

3.8.3 Σύστημα ανάρτησης και μετακίνησης του οργάνου μέτρησης συγκέντρωσης

Πάνω από τη στέψη της δεξαμενής διάχυσης βρίσκεται μεταλλική γέφυρα, η οποία εξυπηρετεί την ανάρτηση του οργάνου MSCTI και την κίνηση του κατά τις διευθύνσεις x, y, z (Σχήμα 3-12). Ορθογώνιο πλαίσιο ολισθαίνει πάνω σε τροχούς κατά μήκος της μεγάλης διεύθυνσης της δεξαμενής και πάνω του ολισθαίνει ένα μικρότερο πλαίσιο εγκάρσια κατά τη μικρή διεύθυνση. Στο μικρότερο πλαίσιο έχει στερεωθεί κατακόρυφο υποστύλωμα, πάνω στο οποίο είναι τοποθετημένο το όργανο αγωγιμότητας. Ο χειρισμός του συστήματος μετακίνησης πραγματοποιείται από πίνακα που βρίσκεται δίπλα από τη δεξαμενή διεξαγωγής των πειραμάτων. Ο πίνακας χειρισμού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-13-α, διαθέτει κουμπιά που ενεργοποιούν τη μετακίνηση του συστήματος κατά την επιθυμητή διάσταση και ταχύτητα με ακρίβεια 0.005 mm.



Σχήμα 3-12: Σύστημα ανάρτησης και μετακίνησης του οργάνου MSCTI



(α)



(β)

Σχήμα 3-13: (α) Πίνακας χειρισμού γέφυρας και (β) οθόνη ένδειξης θέσης αισθητήρα αγωγιμότητας

3.9 Πρόσθετα όργανα μέτρησης

Για την εκτίμηση της πυκνότητας χρησιμοποιήθηκαν δύο πυκνόμετρα, για μετρήσεις εύρους $995-1000 \text{ kg/m}^3$ και $1000-1050 \text{ kg/m}^3$. Τα πυκνόμετρα στο άνω μέρος φέρουν βαθμονομημένη κλίμακα ανά 1 kg/m^3 , η οποία επιτρέπει την απευθείας ανάγνωση της πυκνότητας (Σχήμα 3-14-α). Η ακρίβεια της ένδειξης επηρεάζεται από το σφάλμα ανάγνωσης και από την ακρίβεια του πυκνομέτρου, δεδομένου πως κάθε πυκνόμετρο έχει βαθμονομηθεί σε θερμοκρασία 20°C . Για την επαλήθευση της μέτρησης, χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία εκτίμησης της πυκνότητας που αναπτύχθηκε στη διαδακτορική διατριβή του Παπακωνσταντής (2009), σύμφωνα με την οποία η πυκνότητα του διαλύματος αλατόνευρου (ρ σε kg/m^3) μπορεί να εκτιμηθεί έμμεσα από την αλατότητα (c σε ppt) και τη θερμοκρασία του (T σε $^\circ\text{C}$) βάσει των σχέσεων:

$$\rho(c,T) = \rho_w(T) + \rho'(c,T) - \Delta\rho \quad (3-1)$$

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

$$\rho'(c,T) = c \left(0.824493 - \frac{4.0899}{10^3} T + \frac{7.6438}{10^5} T^2 + \frac{8.2467}{10^7} T^3 + \frac{5.3875}{10^9} T^4 \right) + c^{3/2} \left(\frac{-5.72466}{10^3} + \frac{1.0227}{10^4} T - \frac{1.6546}{10^6} T^2 \right) + c^2 \frac{4.8314}{10^4} \quad (3-3)$$

$$\Delta\rho = 0.0398c \quad (3-4)$$

Για την εκτίμηση της αλατότητας και της θερμοκρασίας του διαλύματος της φλέβας και του αποδέκτη, αλλά και των διαλυμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση του οργάνου μέτρησης αγωγιμότητας, χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό όργανο YSI 30 (Σχήμα

3-14-β). Το συγκεκριμένο όργανο είναι επίσης κατάλληλο και για μέτρηση αγωγιμότητας, αν και δεν χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της παρούσας, και δεν απαιτεί βαθμονόμηση. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η ακρίβεια του οργάνου στη μέτρηση της αλατότητας είναι 1.0% και της θερμοκρασίας 0.1°C (<http://www.rickly.com/wqi/YSI30.htm>).



(α)



(β)

Σχήμα 3-14: Μέτρηση (α) πυκνότητας με πυκνόμετρο και (β) αλατότητας & θερμοκρασίας διαλύματος με όργανο YSI 30

4 Πειράματα

4.1 Κατηγορίες πειραμάτων

Ευρεία σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε στην πειραματική διάταξη (Κεφάλαιο 3), προκειμένου να διερευνηθούν χαρακτηριστικά τυρβωδών φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Πιο συγκεκριμένα προσδιορίστηκαν τα εξής (Σχήμα 1-3):

- i. Το αρχικό τερματικό ύψος (Z_{max})
- ii. η θέση του τελικού τερματικού ύψους (X_z, Z_f)
- iii. η οριζόντια θέση του εξωτερικού ορίου της φλέβας στην περιοχή επιστροφής της στο επίπεδο παροχέτευσης (X_i)
- iv. η κατακόρυφη κατανομή της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης και των τυρβωδών διακυμάνσεων της στη θέση του τερματικού ύψους
- v. το αξονικό τερματικό ύψος (Z_c)
- vi. η οριζόντια θέση του άξονα της φλέβας κατά την πρόπτωση (X_{ic})
- vii. η αξονική αραίωση στη θέση του τελικού τερματικού ύψους (S_t)
- viii. η αξονική αραίωση στη θέση πρόπτωσης (S_i).

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 102 πειράματα τα οποία ταξινομούνται σε κατηγορίες όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-1. Τα πειράματα της κατηγορίας A εξυπηρετούν στον προσδιορισμό των μεγεθών i-iii, ενώ της κατηγορίας B των iv-viii.

Πίνακας 4-1 Κατηγοριοποίηση πειραμάτων

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	A	B	
		B-i	B-ii
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	Μετρήσεις γεωμετρικών χαρακτηριστικών τροχιάς	Μετρήσεις συγκεντρώσεων στη θέση του τελικού τερματικού ύψους	Μετρήσεις συγκεντρώσεων στη θέση της πρόπτωσης
ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	46	34	22
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ			
$Re_0 > 5000$			
θ_0	15°, 30°, 35°, 50°, 70°	35°, 50°, 70°	
D	4, 6, 8 mm	6 mm	
$\Delta\rho_0/\rho_\alpha$	2-3.2 %	2.7-4 %	3.8-4 %
F_0	13-70	18-49	19-31

4.2 Πειράματα μέτρησης γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ροής

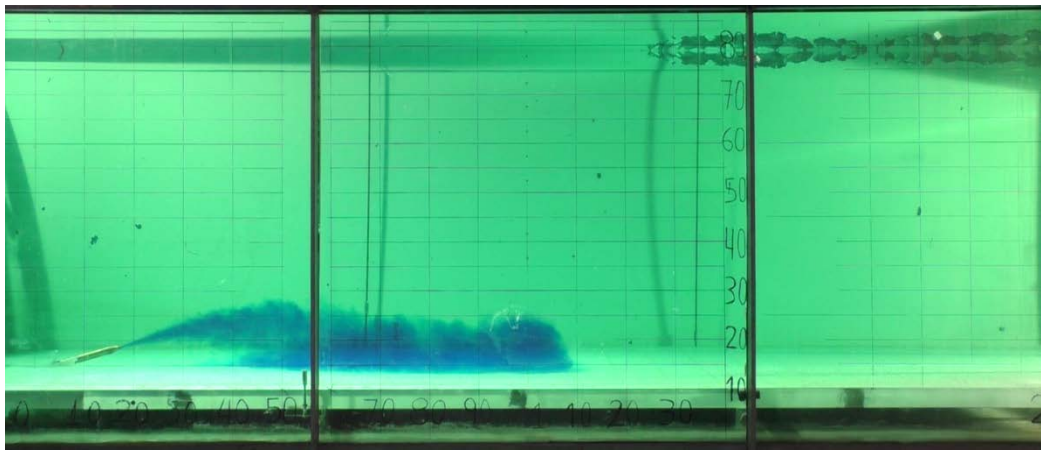
4.2.1 Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων

Το πρώτο βήμα της διεξαγωγής των πειραμάτων της πρώτης κατηγορίας αποτελούσε η εγκατάσταση της επιθυμητής γωνίας και διαμέτρου εκτόξευσης του σωληνίσκου εκτόξευσης στον πυθμένα της δεξαμενής διάχυσης καθώς και η μέτρηση της θέσης του κέντρου του ακροφυσίου. Ακολουθούσε πλήρωση της δεξαμενής διάχυσης με νερό δικτύου ΕΥΔΑΠ, η οποία διαρκούσε περίπου μία ώρα. Έπειτα ρυθμιζόταν η παροχή της φλέβας, ελέγχοντας ότι η υψομετρική διαφορά Δh στο μανόμετρο ήταν η επιθυμητή. Με χρήση του οργάνου YSI 30, πραγματοποιούταν μέτρηση της αλατότητας και της θερμοκρασίας του αποδέκτη, μεγέθη που απαιτούνταν για τον υπολογισμό της πυκνότητας βάσει των σχέσεων (3-1)-(3-4) της παραγράφου 3.9. Για λόγους επαλήθευσης, μέτρηση της πυκνότητας του αποδέκτη πραγματοποιούταν και με πυκνόμετρο. Έπειτα μεσολαβούσαν τουλάχιστον 45 λεπτά της ώρας, προκειμένου να ηρεμήσει το υγρό του αποδέκτη. Ενώ η δεξαμενή διάχυσης γέμιζε με νερό, παρασκευαζόταν το διάλυμα της φλέβας στη δεξαμενή παρασκευής.

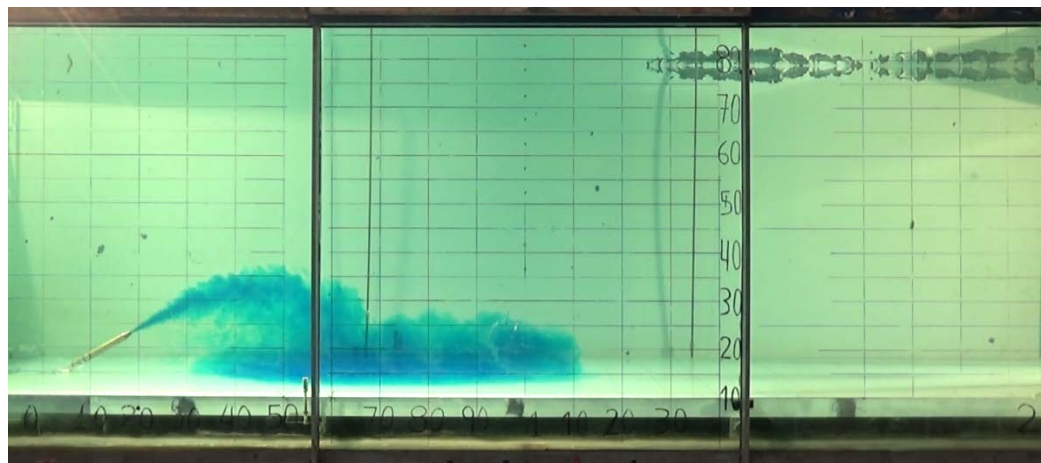
Με δειγματοληψία από τη δεξαμενή παρασκευής και πυκνόμετρο προσδιοριζόταν η πυκνότητα του διαλύματος, ενώ η αλατότητα και θερμοκρασία μετρούταν με χρήση του οργάνου YSI 30. Οι μετρήσεις αυτές επαναλαμβάνονταν λίγο πριν τη διεξαγωγή του πειράματος με δείγματα διαλύματος από παρακαμπτήριο σωλήνα πριν το διάλυμα διοχετευθεί στη δεξαμενή διάχυσης, μέχρι να ταυτιστούν με εκείνες από τη δεξαμενή παρασκευής. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλιζόταν ότι οι παράμετροι του διαλύματος που θα διοχετευόταν στη δεξαμενή διάχυσης είναι αυτές που είχαν μετρηθεί πριν την έναρξη του πειράματος.

Ακολουθούσε η τοποθέτηση της ψηφιακής βιντεοκάμερας στο τρίποδο, το κεντράρισμα και η οριζοντίωσή της. Τοποθετούνταν τρεις προβολείς ισχύος 1000 Watt έκαστος, για τον καλύτερο φωτισμό της δεξαμενής και την αποφυγή σκιάσεων. Όταν ο αποδέκτης είχε ηρεμήσει, γινόταν εκκίνηση της εγγραφής από την κάμερα, ανοιγόταν η δικλείδα τροφοδοσίας της φλέβας και ξεκινούσε το πείραμα. Το πείραμα διεξαγόταν μέχρι το ρεύμα πυκνότητας να καλύψει το ακροφύσιο παροχέτευσης. Έπειτα ρυθμιζόταν η παροχή της φλέβας για το επόμενο πείραμα και ανοιγόταν η βάννα που οδηγούσε το υγρό της δεξαμενής διάχυσης στην αποχέτευση, με ταυτόχρονη τροφοδοσία της με καθαρό νερό δικτύου, ώστε να καθαρίσει από το χρώμα, να ομογενοποιηθεί και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το επόμενο πείραμα.

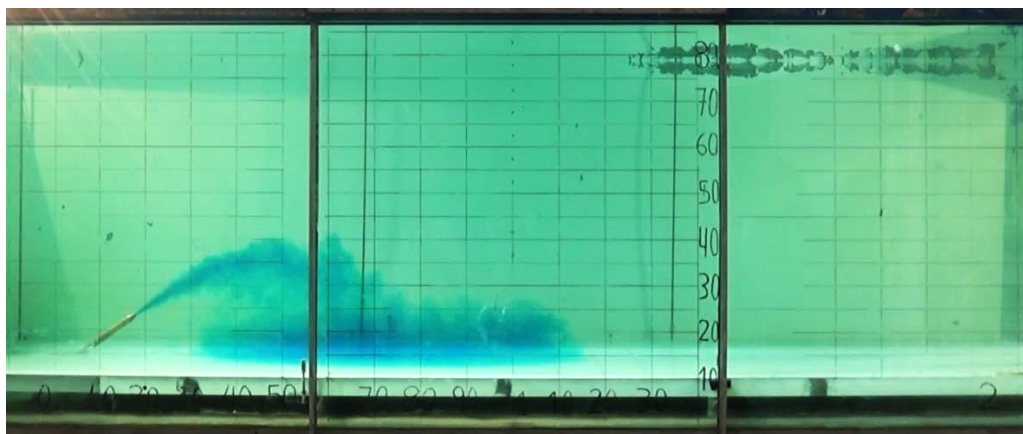
Ακολουθούν χαρακτηριστικά στιγμιότυπα πειραμάτων οπτικής καταγραφής της τροχιάς φλεβών αρνητικής άνωσης για τις γωνίες εκτόξευσης που μελετήθηκαν (Σχήμα 4-1).



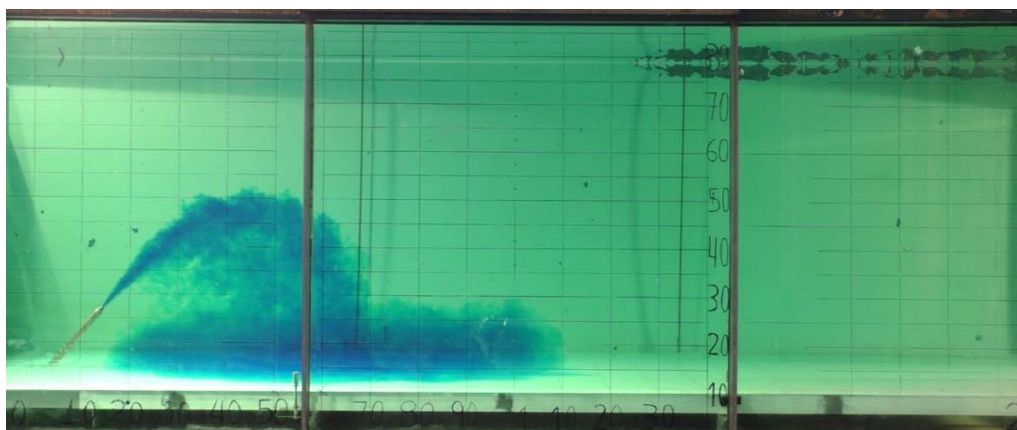
(a)



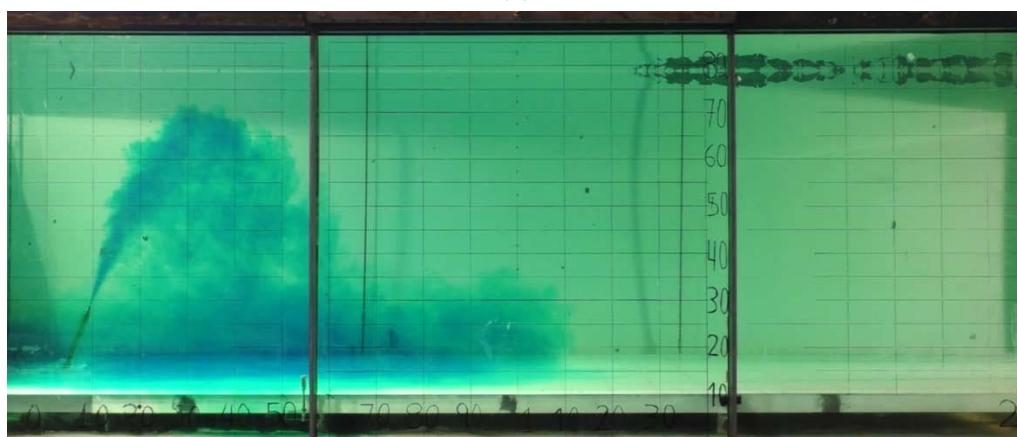
(b)



(v)



(δ)



(ε)

Σχήμα 4-1: Στιγμιότυπα πειραμάτων μετρήσεων γεωμετρικών χαρακτηριστικών τροχιάς για γωνία εκτόξευσης θ_0 (α) 15° , (β) 30° , (γ) 35° , (δ) 50° και (ε) 70°

4.2.2 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων

Στους Πίνακες 4-2 έως 4-6 που ακολουθούν συνοψίζονται οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων της κατηγορίας A.

Πίνακας 4-2: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας A για γωνία παροχέτευσης 15°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_0 [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o - \rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	131115EXP27-15	15	0.4	999.26	1031.20	3.196	17.53	39.40
2	131115EXP28-15	15	0.4	999.29	1031.50	3.223	20.61	46.11
3	131115EXP29-15	15	0.4	999.34	1031.50	3.218	23.27	52.12
4	181115EXP30-15	15	0.6	999.29	1029.50	3.023	39.25	32.91
5	181115EXP31-15	15	0.6	999.37	1029.50	3.015	34.36	28.85
6	181115EXP32-15	15	0.6	999.38	1029.50	3.014	34.99	29.38

Πίνακας 4-3: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας A για γωνία παροχέτευσης 30°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	041115EXP13-30	30	0.6	999.32	1024.50	2.519	27.69	25.43
2	051115EXP14-30	30	0.6	999.46	1025.20	2.575	36.80	33.43
3	051115EXP15-30	30	0.6	999.38	1025.00	2.564	33.19	30.22
4	051115EXP16-30	30	0.6	999.34	1025.00	2.568	44.16	40.17
5	061115EXP17-30	30	0.6	999.46	1025.00	2.555	51.99	47.42
6	091115EXP18-30	30	0.8	999.41	1025.00	2.561	48.85	21.68
7	091115EXP19-30	30	0.8	999.34	1025.00	2.568	47.79	21.18
8	091115EXP20-30	30	0.8	999.34	1025.00	2.568	44.79	19.85
9	101115EXP21-30	30	0.4	999.35	1029.50	3.017	18.75	43.36
10	101115EXP22-30	30	0.4	999.34	1029.50	3.018	22.96	53.09
11	101115EXP23-30	30	0.4	999.34	1029.80	3.048	19.51	44.89
12	111115EXP24-30	30	0.4	999.40	1032.00	3.262	25.09	55.81
13	111115EXP25-30	30	0.4	999.38	1031.80	3.244	28.51	63.58

Πίνακας 4-4: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας A για γωνία παροχέτευσης 35°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	021015EXP1-35	35	0.8	997.88	1019.00	2.116	66.39	32.41
2	051015EXP2-35	35	0.8	997.99	1019.00	2.105	36.36	17.80
3	051015EXP3-35	35	0.8	998.02	1018.00	2.002	40.18	20.16
4	051015EXP4-35	35	0.8	998.04	1018.00	2.000	32.10	16.12
5	071015EXP5-35	35	0.8	998.78	1018.00	1.925	24.80	12.69
6	071015EXP6-35	35	0.8	998.67	1018.00	1.936	47.22	24.10
7	081015EXP7-35	35	0.6	998.86	1020.00	2.116	35.29	35.37
8	081015EXP8-35	35	0.6	998.76	1019.50	2.077	43.49	43.99
9	091015EXP9-35	35	0.6	998.92	1020.00	2.111	28.81	28.91
10	091015EXP10-35	35	0.6	998.83	1019.50	2.070	42.60	43.16
11	091015EXP11-35	35	0.6	998.83	1019.50	2.070	41.03	41.58
12	091015EXP12-35	35	0.6	998.71	1020.00	2.132	49.21	49.14

Πίνακας 4-5: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας A για γωνία παροχέτευσης 50°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	191115EXP33-50	50	0.6	999.38	1029.00	2.964	39.44	33.39
2	191115EXP34-50	50	0.6	999.37	1029.50	3.015	31.29	26.27
3	191115EXP35-50	50	0.6	999.41	1029.50	3.011	23.70	19.91
4	201115EXP36-50	50	0.6	999.41	1030.50	3.111	47.40	39.17
5	201115EXP37-50	50	0.4	999.42	1024.50	2.509	23.70	60.10
6	211115EXP38-50	50	0.4	999.33	1029.80	3.049	23.70	54.52
7	211115EXP39-50	50	0.4	999.35	1029.80	3.047	30.59	70.41

Πίνακας 4-6: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας A για γωνία παροχέτευσης 70°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	231115EXP40-70	70	0.6	999.18	1029.80	3.065	31.06	25.87
2	231115EXP41-70	70	0.6	999.22	1029.80	3.060	40.34	33.62
3	231115EXP42-70	70	0.6	999.21	1029.80	3.062	23.39	19.49
4	241115EXP43-70	70	0.4	999.25	1030.50	3.127	23.39	53.14
5	241115EXP44-70	70	0.4	999.25	1030.50	3.127	19.72	44.79
6	040316EXP45-70	70	0.6	999.56	1029.00	2.900	26.56	22.74
7	030316EXP36-70	70	0.6	999.66	1028.00	2.835	42.09	36.44
8	030316EXP37-70	70	0.6	999.51	1028.00	2.851	30.36	26.21

4.3 Πειράματα μέτρησης συγκεντρώσεων

4.3.1 Διαδικασία διεξαγωγής πειραμάτων

Τα πειράματα κατηγορίας B, περιλαμβάνουν πειράματα μέτρησης συγκεντρώσεων στη θέση του τελικού τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Η διαδικασία προετοιμασίας της δεξαμενής διάχυσης, παρασκευής διαλύματος, ρύθμισης παροχής και μέτρησης πυκνοτήτων φλέβας και αποδέκτη επαναλαμβάνονται όπως περιγράφηκαν στα πειράματα κατηγορίας A.

Πριν τη διεξαγωγή των πειραμάτων απαραίτητο βήμα αποτελούσε η βαθμονόμηση του οργάνου μέτρησης αγωγιμότητας MSCTI (παράγραφος 3.8.1). Έχοντας πέντε ζεύγη τιμών αλατότητας – τάσης, χαρασσόταν η ευθεία με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Με

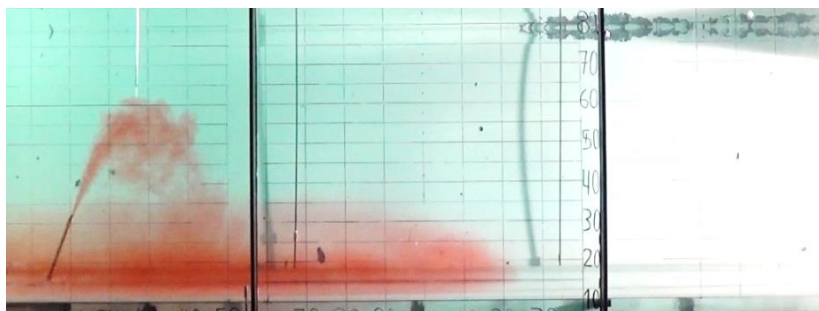
αυτήν την ευθεία (Σχήμα 3-11) αντιστοιχούνταν όλες οι μετρήσεις τάσης του οργάνου MSCTI με αλατότητα.

Το όργανο MSCTI τοποθετούταν στο επίπεδο του άξονα της φλέβας $y=0$ και συγκεκριμένα στη θέση x , στην οποία αναμενόταν να εμφανιστεί το τελικό ύψος ανόδου της φλέβας. Η εκτίμηση γινόταν βάσει των αποτελεσμάτων που είχαν προκύψει από τα πειράματα οπτικής καταγραφής της τροχιάς της φλέβας. Έπειτα το όργανο βυθιζόταν κατακόρυφα (κατά z) περίπου στη θέση του τερματικού ύψους, δηλαδή στο πρώτο σημείο που θα γινόταν μέτρηση αγωγιμότητας. Μετακινώντας το όργανο κατακόρυφα προς τον πυθμένα θα πραγματοποιούνταν μετρήσεις σε περίπου 10 θέσεις, οι οποίες είχαν εκτιμηθεί από πριν.

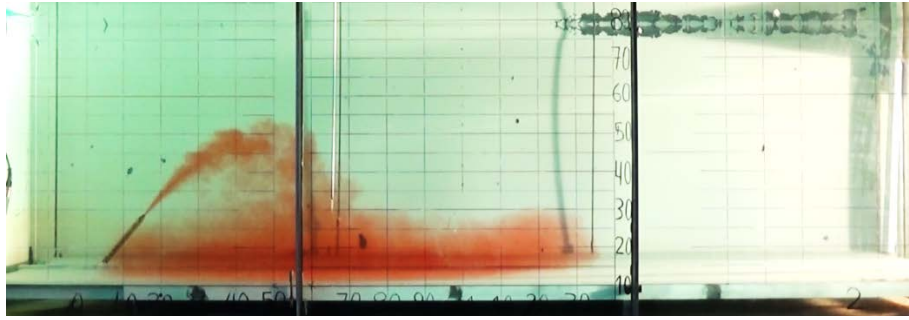
Μετά την τοποθέτηση των προβολέων και της κάμερας και αφού ο αποδέκτης είχε ηρεμήσει, ανοίγοντας τη δικλείδα τροφοδοσίας της φλέβας το πείραμα ξεκινούσε. Η πρώτη μέτρηση πραγματοποιούνταν μετά από τη μονιμοποίηση της ροής. Η διάρκεια της κάθε μέτρησης ήταν τέτοια ώστε να διέρχεται ικανός αριθμός δομών μεγάλης κλίμακας, αλλά ταυτόχρονα να πραγματοποιείται ο επιθυμητός αριθμός μετρήσεων πριν το ρεύμα πυκνότητας καλύψει το σωληνίσκο της εκροής. Συγκεκριμένα, η κάθε μέτρηση διαρκούσε 40 sec και λαμβάνονταν τιμές με συχνότητα 100 Hz (4000 τιμές σύνολο). Δύο άτομα απαιτούνταν για τη διεξαγωγή του πειράματος: ένα άτομο παρέμενε στον υπολογιστή, εκκινώντας την καταγραφή κάθε μέτρησης με το λογισμικό TracerDAQ και ορίζοντας πότε πρέπει το όργανο να μετακινηθεί και το δεύτερο άτομο μετακινούσε το όργανο στις θέσεις των μετρήσεων μέσω του πίνακα χειρισμού.

Παρόμοια διαδικασία πραγματοποιούνταν για τον προσδιορισμό της αξονικής αραίωσης στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Το όργανο MSCTI τοποθετούταν στο επίπεδο του στομίου εκροής, δεξιά από τη θέση από την οποία αναμενόταν ο άξονας της φλέβας. Μετρήσεις λαμβάνονταν σε τέσσερις θέσεις στο επίπεδο εκροής, μετακινώντας το όργανο αριστερά προς το στόμιο.

Στο Σχήμα 4-2 φαίνονται χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από τα πειράματα Κατηγορίας B-i και B-ii αντίστοιχα.



(α)



(β)

Σχήμα 4-2: Στιγμιότυπα πειραμάτων μέτρησης συγκεντρώσεων στη θέση (α) του τελικού τερματικού ύψους και (β) πρόσπτωσης της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης

4.3.2 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων

Στους Πίνακες 4-7, 4-8 και 4-9 που ακολουθούν συνοψίζονται οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων της κατηγορίας B-i και στους Πίνακες 4-10, 4-11 και 4-12 της κατηγορίας B-ii.

Πίνακας 4-7: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας B-i για γωνία παροχέτευσης 35°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o - \rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	140116EXP9-35	35	0.6	999.57	1039.50	3.99	27.36	19.96
2	140116EXP10-35	35	0.6	999.70	1039.50	3.98	33.94	24.80
3	140116EXP11-35	35	0.6	999.92	1039.50	3.96	40.69	29.82
4	150116EXP12-35	35	0.6	999.69	1039.50	3.98	46.94	34.29
5	150116EXP13-35	35	0.6	999.80	1039.50	3.97	53.80	39.36
6	150116EXP14-35	35	0.6	1000.08	1039.50	3.94	37.18	27.30
7	180116EXP15-35	35	0.6	999.64	1039.50	3.99	24.88	18.17
8	180116EXP16-35	35	0.6	1000.01	1040.00	4.00	60.00	43.74
9	110216exp29-35	35	0.6	999.81	1038.50	3.87	29.15	21.60
10	250216exp30-35	35	0.6	999.70	1027.00	2.73	52.44	46.26
11	250216exp31-35	35	0.6	999.83	1027.00	2.72	55.64	49.21
12	250216exp32-35	35	0.6	999.70	1027.00	2.73	36.99	32.63

Πίνακας 4-8: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας Β-ι για γωνία παροχέτευσης 50°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	211215EXP1-50	50	0.6	999.70	1037.00	3.73	40.87	30.85
2	221215EXP2-50	50	0.6	999.82	1039.50	3.97	34.99	25.60
3	221215EXP3-50	50	0.6	999.79	1038.50	3.87	32.20	23.86
4	110116EXP4-50	50	0.6	999.62	1038.50	3.89	40.16	29.69
5	120116EXP5-50	50	0.6	999.63	1040.00	4.04	27.36	19.85
6	130116EXP6-50	50	0.6	999.62	1038.00	3.84	50.49	37.56
7	130116EXP7-50	50	0.6	999.82	1038.00	3.82	48.15	35.92
8	130116EXP8-50	50	0.6	1000.03	1038.00	3.80	53.67	40.15
9	090216exp28-50	50	0.6	999.91	1039.50	3.96	52.99	38.82
10	260216exp33-50	50	0.6	999.60	1028.00	2.84	51.19	44.27
11	260216exp34-50	50	0.6	999.65	1027.50	2.79	46.94	40.99
12	020316exp35-50	50	0.6	999.47	1028.00	2.85	37.37	32.25

Πίνακας 4-9: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας Β-ι για γωνία παροχέτευσης 70°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	210116EXP18-70	70	0.6	999.83	1038.50	3.87	27.63	20.48
2	220116EXP19-70	70	0.6	999.86	1038.50	3.86	32.86	24.37
3	220116EXP20-70	70	0.6	999.99	1038.50	3.85	40.16	29.83
4	220116EXP21-70	70	0.6	1000.22	1038.50	3.83	47.24	35.20
5	260116EXP22-70	70	0.6	999.95	1037.50	3.76	25.17	18.94
6	260116EXP24-70	70	0.6	1000.29	1037.50	3.72	35.80	27.06
7	270116EXP26-70	70	0.6	999.87	1039.50	3.96	42.26	30.94
8	270116EXP27-70	70	0.6	1000.02	1039.50	3.95	30.36	22.27
9	030316EXP36-70	70	0.6	999.66	1028.00	2.84	42.09	36.44
10	030316EXP37-70	70	0.6	999.51	1028.00	2.85	30.36	26.21

Πίνακας 4-10: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας B-ii για γωνία παροχέτευσης 35°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	100216EXP17-35	35	0.6	999.80	1039.00	3.921	28.40	20.91
2	100216EXP18-35	35	0.6	999.86	1039.00	3.914	30.83	22.72
3	100216EXP19-35	35	0.6	999.85	1039.00	3.915	32.64	24.05
4	110216EXP20-35	35	0.6	999.74	1038.50	3.877	35.60	26.36
5	110216EXP21-35	35	0.6	999.76	1038.50	3.875	37.95	28.10
6	110216EXP22-35	35	0.6	999.75	1038.50	3.876	41.40	30.65

Πίνακας 4-11: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας B-ii για γωνία παροχέτευσης 50°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	050216EXP9-50	50	0.6	999.73	1038.00	3.828	26.83	19.99
2	050216EXP10-50	50	0.6	999.73	1038.50	3.878	28.90	21.39
3	050216EXP11-50	50	0.6	999.74	1039.00	3.927	31.29	23.02
4	080216EXP12-50	50	0.6	999.86	1040.00	4.014	34.36	25.00
5	080216EXP13-50	50	0.6	999.91	1040.00	4.009	37.37	27.21
6	080216EXP14-50	50	0.6	999.99	1040.00	4.002	39.98	29.14
7	090216EXP15-50	50	0.6	999.83	1038.50	3.868	38.88	28.82
8	090216EXP16-50	50	0.6	999.82	1039.00	3.919	35.60	26.21

Πίνακας 4-12: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων κατηγορίας B-ii για γωνία παροχέτευσης 70°

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_o [deg]	D [cm]	ρ_a [kg/m ³]	ρ_j [kg/m ³]	$(\rho_o-\rho_a)/\rho_a$ [%]	Q_o [cm ³ /s]	F_o
1	280116EXP1-70	70	0.6	999.78	1040.00	4.023	27.89	20.27
2	280116EXP2-70	70	0.6	999.87	1040.00	4.013	26.29	19.13
3	290116EXP3-70	70	0.6	999.79	1039.00	3.922	31.29	23.03
4	290116EXP4-70	70	0.6	999.84	1039.00	3.916	34.57	25.47
5	290116EXP5-70	70	0.6	999.89	1039.00	3.912	36.60	26.97
6	010216EXP6-70	70	0.6	999.60	1039.00	3.941	26.83	19.70
7	010216EXP7-70	70	0.6	999.74	1038.50	3.877	29.39	21.76
8	010216EXP8-70	70	0.6	999.73	1038.50	3.878	31.75	23.50

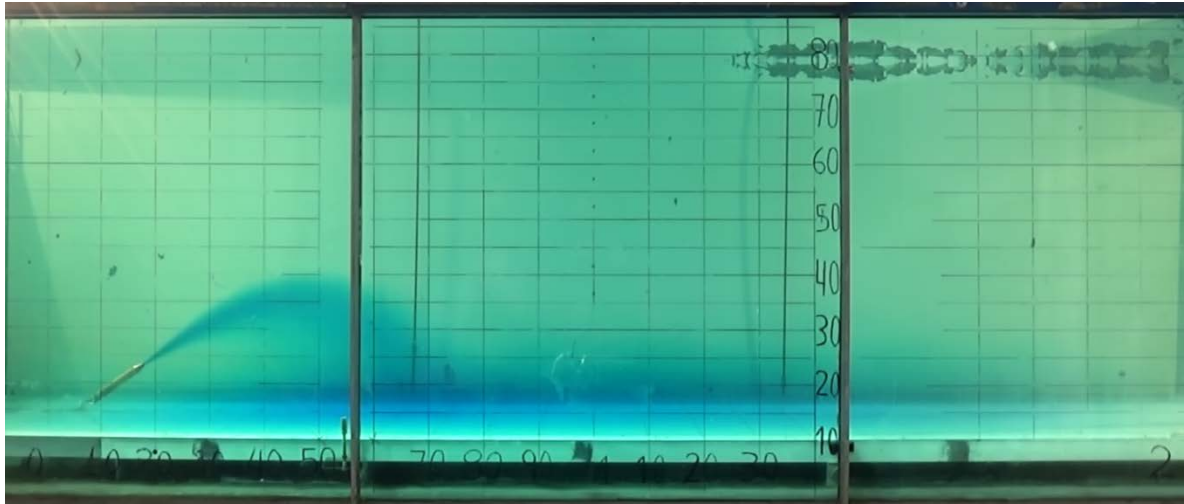
4.4 Διαδικασία προσδιορισμού πειραματικών δεδομένων

4.4.1 Προσδιορισμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φλέβας (Πειράματα Κατηγορίας A)

Το αρχείο ταινίας που δημιουργεί η κάμερα που χρησιμοποιήθηκε, μεταφέρεται στον υπολογιστή μέσω της κάρτα μνήμης. Τα αρχεία είναι μορφής .mts, τα οποία υποστηρίζουν video υψηλής ευκρίνειας, χρησιμοποιώντας τη σύγχρονη τεχνολογία AVCHD (Advanced Video Codec High Definition). Με τη βοήθεια του λογισμικού VirtualDub, το οποίο δίνει τη δυνατότητα παρακολούθησης και των 25 στιγμιότυπων ανά δευτερόλεπτο (25 fps) της ταινίας, εξάγονταν όλα τα στιγμιότυπα (frames) κάθε ταινίας από την αρχή μέχρι το τέλος του πειράματος και αποθηκεύονταν σε μορφή εικόνας .png διαστάσεων 1920x1080.

Για τον προσδιορισμό των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της φλέβας χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά Matlab R2013a και AutoCAD Civil 2013. Με το λογισμικό Matlab καταστρώθηκε αλγόριθμος υπολογισμού της μέσης εικόνας της τροχιάς της φλέβας, βάσει της οποίας προέκυψε η θέση του τελικού τερματικού ύψους ανόδου. Με τη χρήση του λογισμικού AutoCAD πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών της φλέβας, εισάγοντας σε αυτό είτε τη μέση εικόνα είτε επιλεγμένα στιγμιότυπα.

Η τεχνική της μέσης εικόνας βασίζεται στον υπολογισμό της μέσης τιμής της έντασης κάθε pixel από ένα συγκεκριμένο αριθμό εικόνων και είναι δημοφιλής στην ψηφιακή φωτογραφία για τη μείωση του θορύβου και τη βελτίωση της εικόνας. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της μέσης εικόνας, καταστρώθηκε έτσι ώστε να προσθέτει όλα τα στιγμιότυπα της ταινίας του κάθε πειράματος για 40-100 δευτερόλεπτα (1000-2500 frames) από τη χρονική στιγμή που αποκαθίσταται η μόνιμη ροή της φλέβας και να τα διαιρεί με το πλήθος τους. Το αποτέλεσμα ήταν μία «λεία», μέση τροχιά της φλέβας, η οποία είναι αντιπροσωπευτική του κάθε πειράματος και προσφέρει τη δυνατότητα εκτίμησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τροχιάς με ακρίβεια από μία μόνο εικόνα. Παράδειγμα αποτελέσματος μέσης εικόνας όπως αυτή προέκυπτε από τον αλγόριθμο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-3. Η μέση εικόνα αποθηκευόταν σε μορφή .png διαστάσεων 1920x1080 και χρησίμευε στον υπολογισμό της θέσης τερματικού ύψους ανόδου, αλλά όχι της θέσης επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Το πάχος του ρεύματος πυκνότητας καθιστά δύσκολο να διακριθεί η θέση επιστροφής της φλέβας σε μια μέση εικόνα. Το μέγεθος αυτό προτιμήθηκε να προσδιοριστεί ως μέση τιμή μετρήσεων από επιλεγμένα στιγμιότυπα. Τέλος, η θέση του αρχικού τερματικού ύψους προσδιορίστηκε από ένα στιγμιότυπο.



Σχήμα 4-3: Μέση εικόνα πειράματος με χρήση αλγορίθμου στο πρόγραμμα Matlab από 1800 στιγμιότυπα (t=72 sec)

Ο προσδιορισμός των οριζόντιων και κατακόρυφων διαστάσεων που πραγματοποιείται από τη μέση εικόνα ή από τα στιγμιότυπα πρέπει να διορθωθεί λόγω (Παπακωνσταντής, 2009):

- του ότι το πλέγμα δεν έχει χαραχθεί στο επίπεδο του άξονα της φλέβας
- της θέσης που έχει τοποθετηθεί η κάμερα
- της διάθλασης του νερού

Σύμφωνα με τη μεθοδολογία αυτή (Παπακωνσταντής, 2009), το πραγματικό ύψος H' προκύπτει με διόρθωση του μετρημένου ύψους H κατά την ποσότητα ΔH ως εξής:

$$H' = H + \Delta H \quad (4-1)$$

$$\Delta H = \frac{W}{2} \tan(\theta_\delta) \quad (4-2)$$

$$\theta_\delta = \sin^{-1} \left(\frac{n_a}{n_w} \sin(\theta_\pi) \right) \quad (4-3)$$

$$\theta_\pi = \tan^{-1} \left(\frac{H - (Z_{cam} - Z_{bot})}{Y_s} \right), \quad (4-4)$$

όπου n_a , n_w οι συντελεστές διάθλασης του αέρα και του νερού, W το πλάτος της δεξαμενής και

Z_{cam} , Z_{bot} η κατακόρυφη απόσταση της κάμερας και του πυθμένα της δεξαμενής από το δάπεδο του εργαστηρίου.

Αντίστοιχη είναι η μεθοδολογία για τη διόρθωση των οριζόντιων αποστάσεων X :

$$X' = X + \Delta X \quad (4-5)$$

$$\Delta X = \frac{W}{2} \tan(\varphi_{\delta}) \quad (4-6)$$

$$\varphi_{\delta} = \sin^{-1} \left(\frac{n_a}{n_w} \sin(\varphi_{\pi}) \right) \quad (4-7)$$

$$\varphi_{\pi} = \tan^{-1} \left(\frac{X-L/2}{Y_s} \right), \quad (4-8)$$

όπου L το πλάτος της δεξαμενής.

Ο προσδιορισμός των οριζόντιων και κατακόρυφων αποστάσεων έγινε ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

- Εισαγωγή στο πρόγραμμα AutoCAD της μέσης εικόνας ή του μεμονωμένου στιγμιότυπου.
- Χάραξη συστήματος συντεταγμένων μέτρησης αποστάσεων επί της φωτογραφίας.
- Προσδιορισμός κλίμακας της εικόνας αντιστοιχίζοντας γνωστή οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση του πλέγματος της δεξαμενής με απόσταση μετρημένη από το AutoCAD. Σε κάθε περίπτωση οριζόντια και κατακόρυφη κλίμακα προέκυπτε σχεδόν ίδια.
- Προσδιορισμός στο AutoCAD των συντεταγμένων του στομίου, διόρθωση σύμφωνα με τις Σχέσεις (4-1)-(4-8) και επαλήθευση του αποτελέσματος με επιτόπου μέτρηση.
- Προσδιορισμός της απόστασης κάθε σημείου της τροχιάς που μας ενδιαφέρει και διόρθωση σύμφωνα με τις Σχέσεις (4-1)-(4-8). Συγκεκριμένα προσδιορίζονται οι συντεταγμένες του αρχικού και του τελικού τερματικού ύψους ανόδου και η οριζόντια απόσταση του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο του στομίου εκροής.
- Προσδιορισμός των τελικών οριζόντιων και κατακόρυφων αποστάσεων, αφαιρώντας από αυτές του προηγούμενου βήματος, τις συντεταγμένες του στομίου παροχέτευσης.

4.4.2 Μετρήσεις συγκέντρωσης (Πειράματα Κατηγορίας Β)

Οι μετρημένες τάσεις που αποθηκεύονται σε μορφή .txt κατά τη διάρκεια του πειράματος, αντιγράφονται σε κελιά του λογισμικού MS Excel, οπότε με βάση την καμπύλη βαθμονόμησης προσδιορίζονται οι αντίστοιχες τιμές αλατότητας. Στη συνέχεια οι τιμές αλατότητας επεξεργάζονται στο MS Excel, ώστε να απεικονισθούν γραφικά η κατανομή των μέσων χρονικά τιμών και των τυρβωδών διακυμάνσεων της αλατότητας.

5 Αποτελέσματα μετρήσεων γεωμετρικών χαρακτηριστικών

5.1 Γενικά

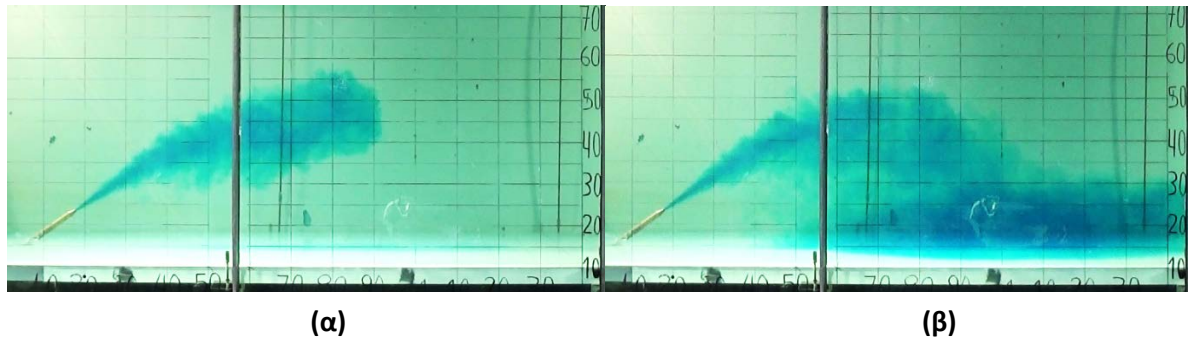
Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων της κατηγορίας A, όπως προέκυψαν μετά από την επεξεργασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.4. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς της φλέβας παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή όπως προκύπτει με χρήση διαστατικής ανάλυσης (οι πειραματικές τιμές δίνονται στον Πίνακα Π-1 του Παραρτήματος), προκειμένου να ελεγχθεί η συσχέτισή τους με τα χαρακτηριστικά της ροής, αλλά και να διερευνηθεί η μεταβολή τους ως προς τη γωνία παροχέτευσης θ_o (Πίνακας 5-1). Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκρίσεις με αποτελέσματα άλλων ερευνητών, όπου αυτά είναι διαθέσιμα. Τέλος, πραγματοποιείται συσχέτιση των αποτελεσμάτων της παρούσας για τις γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° και των αποτελεσμάτων Παπακωνσταντής (2009) για τις γωνίες 45° , 60° και 75° ως προς την αρχική γωνία παροχέτευσης, προκειμένου να προκύψουν σχέσεις εκτίμησης των αδιάστατων γεωμετρικών χαρακτηριστικών της τροχιάς της φλέβας συναρτήσει της γωνίας παροχέτευσης.

Πίνακας 5-1: Σχέσεις προσδιορισμού γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης (Πειράματα A) με αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude $F_o \gg 1$ (Παπακωνσταντής, 2009)

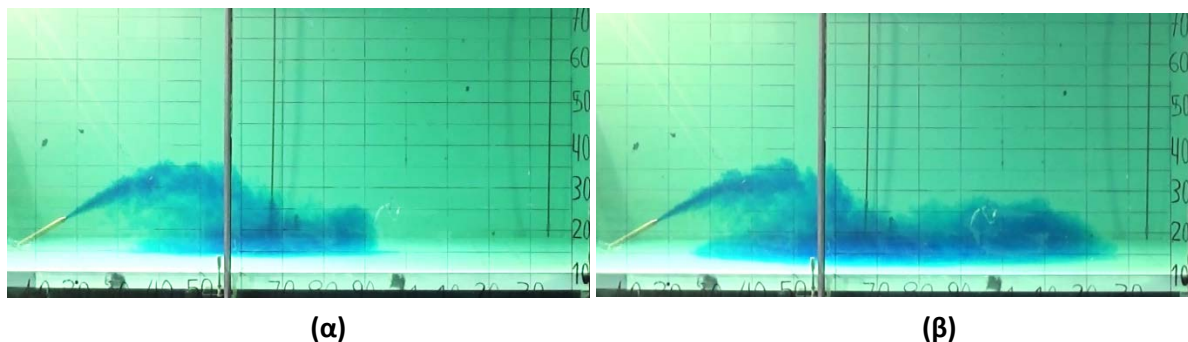
Παράμετρος	Εξίσωση
Αρχικό τερματικό ύψος ανόδου	$\frac{Z_{max}}{DF_o} = C_1(\theta_o)$
Τελικό τερματικό ύψος ανόδου	$\frac{Z_f}{DF_o} = C_2(\theta_o)$
Οριζόντια απόσταση εμφάνισης τελικού τερματικού ύψους ανόδου	$\frac{X_z}{DF_o} = C_3(\theta_o)$
Οριζόντια απόσταση άνω ορίου στη θέση πρόσπτωσης της φλέβας	$\frac{X_i}{DF_o} = C_4(\theta_o)$

Με βάση τις παρατηρήσεις της χρονικής εξέλιξης της τροχιάς, κοντά στο στόμιο εκροής κυριαρχούν οι αδρανειακές δυνάμεις και η ροή μοιάζει με απλή φλέβα (jet-like). Η φλέβα ανέρχεται, ενώ ταυτόχρονα συμπαρασύρει ελαφρύτερο υγρό από τον αποδέκτη, και φθάνει στιγμιαία στο αρχικό τερματικό ύψος ανόδου, όπου οι ανωστικές δυνάμεις μηδενίζουν την κατακόρυφη συνιστώσα της ορμής. Στη συνέχεια η ροή καθορίζεται από την οριζόντια συνιστώσα της ορμής και τις καθοδικές ανωστικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα

να προχωρά καθοδικά και τελικά να προσκρούει υπό γωνία στον πυθμένα σε κάποια απόσταση από το στόμιο εκροής και τη θέση εμφάνισης του τερματικού ύψους. Η αλληλεπίδραση της καθοδικής ροής με την ανερχόμενη ροή έχει ως επακόλουθο τη μείωση του αρχικού τερματικού ύψους στο τελικό τερματικό ύψος, το οποίο μετά την αποκατάσταση μόνιμης ροής κυμαίνεται γύρω από μια σταθερή τιμή (Σχήμα 5-1, Σχήμα 5-2). Η καθοδική ροή της φλέβας που διέπεται από τις ανωστικές δυνάμεις μοιάζει με ροή πλουμίου (plume-like).



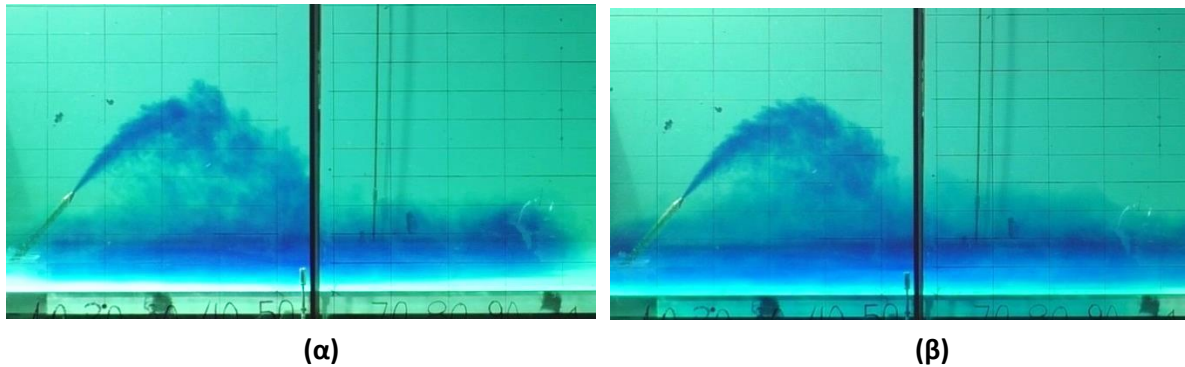
Σχήμα 5-1: (α) Αρχικό τερματικό ύψος ($t \approx 11$ sec) & (β) τελικό τερματικό ύψος ($t \approx 30$ sec) ανόδου φλέβας (091015EXP12-35, $F_o = 49.1$)



Σχήμα 5-2: (α),(β) Διακύμανση τελικού τερματικού ύψους ανόδου φλέβας ($t \approx 15$ και 30 sec) (091115EXP20-30, $F_o = 19.9$)

Η αλληλεπίδραση από τα ανερχόμενα και τα κατερχόμενα μέρη του ρευστού δείχνει να είναι εντονότερη όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία παροχέτευσης.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι δίνες μεγάλης κλίμακας που εμφανίζονται ανά διαστήματα. Οι δίνες διαφοροποιούν τη ροή, δίνοντας μεγαλύτερο τερματικό ύψος και μεγαλύτερη απόσταση έως τη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Παρατηρούνται επίσης μάζες που επιβραδύνονται σε όλο το τμήμα της ανερχόμενης ροής, αποκολλώνται και πέφτουν σχεδόν κατακόρυφα προς τον πυθμένα (Σχήμα 5-3).

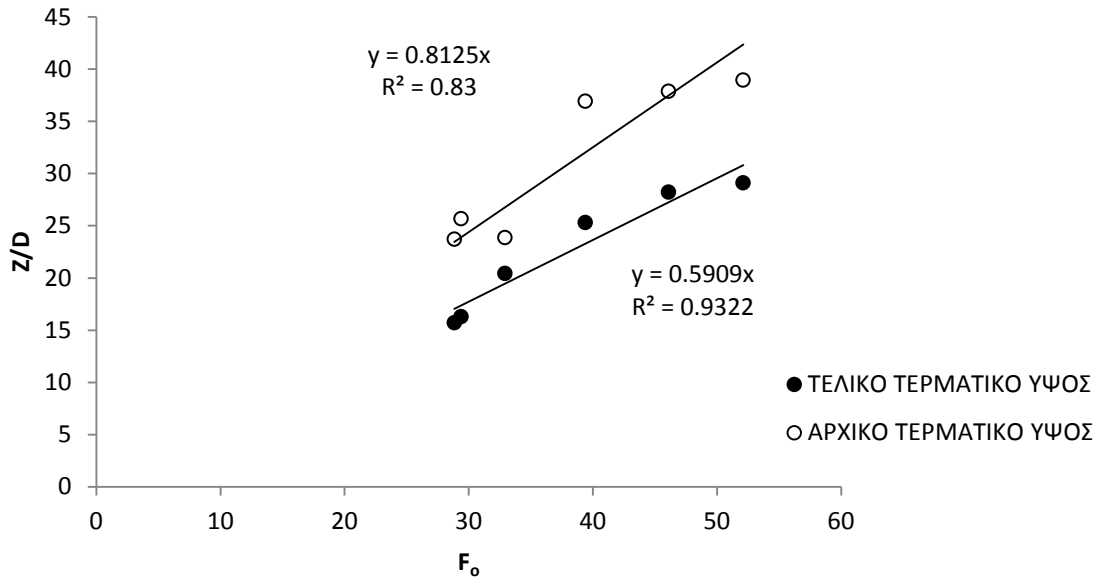


**Σχήμα 5-3: (α),(β) Μάζες που αποκολλώνται από την ροή και δίνες ($t=40$ και 48 sec)
(191115EXP35-50, $F_o=19.9$)**

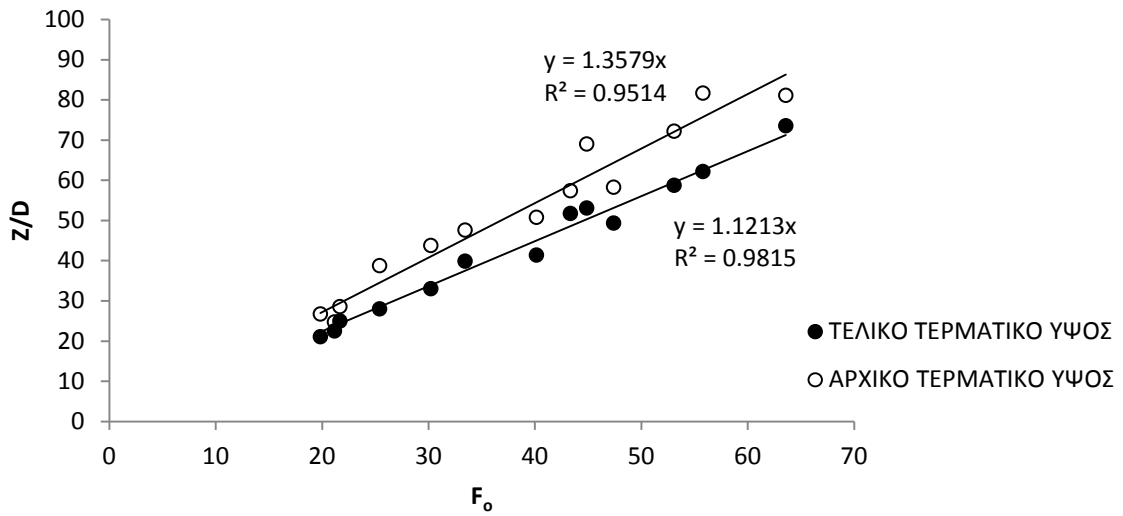
5.2 Ύψος ανόδου φλέβας

Όπως προαναφέρθηκε, η φλέβα επιτυγχάνει στιγμιαία ένα μέγιστο ύψος, το αρχικό τερματικό ύψος, το οποίο στη συνέχεια μειώνεται σε ένα τελικό. Το αρχικό τερματικό ύψος προσδιορίστηκε για κάθε πείραμα από ένα στιγμιότυπο. Το τελικό τερματικό ύψος προσδιορίστηκε ως το μέσο ύψους ανόδου από τη μέση εικόνα (average image), για τιμές αδιάστατου χρόνου $t/(M_o/B_o)$ μεγαλύτερες από 4. Έχει δειχθεί ότι μετά από αυτό το χρονικό διάστημα το τελικό τερματικό ύψος σταθεροποιείται παρουσιάζοντας μικρές διακυμάνσεις (Παπακωνσταντής, 2009).

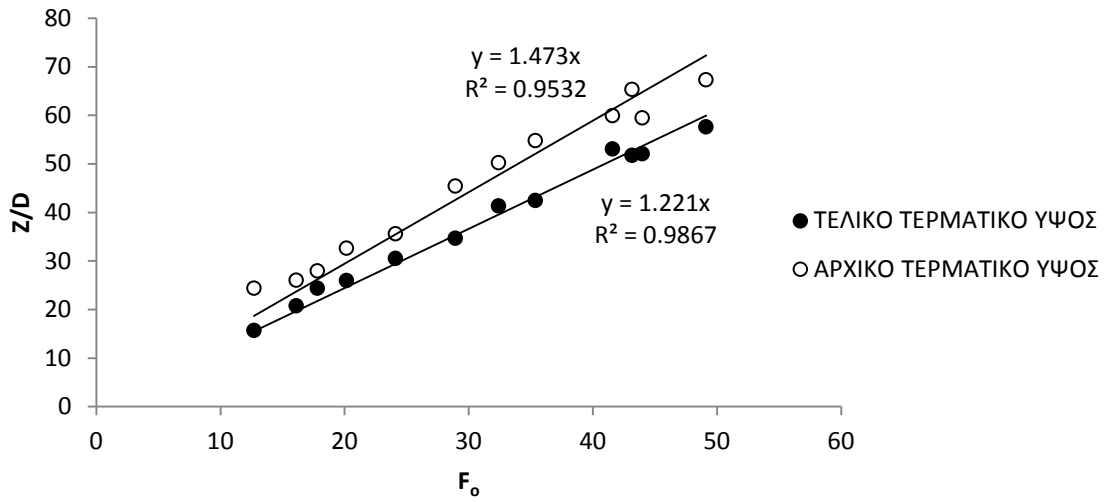
Ακολουθεί διαγραμματική παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων για τα μεγέθη Z_{max} και Z_f για κάθε γωνία εκροής θ_o . Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις των αρχικών και τελικών τερματικών υψών αδιαστατοποιούνται με τη διάμετρο του στομίου εκροής D και το αποτέλεσμα παρουσιάζεται ως προς τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude F_o (Σχήματα 5-4 έως 5-8). Ελέγχεται η γραμμική συσχέτιση των όρων Z/D και F_o και προσδιορίζονται οι σταθερές C_1 και C_2 με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Οι σταθερές που προέκυψαν συνοψίζονται στον Πίνακα 5-2.



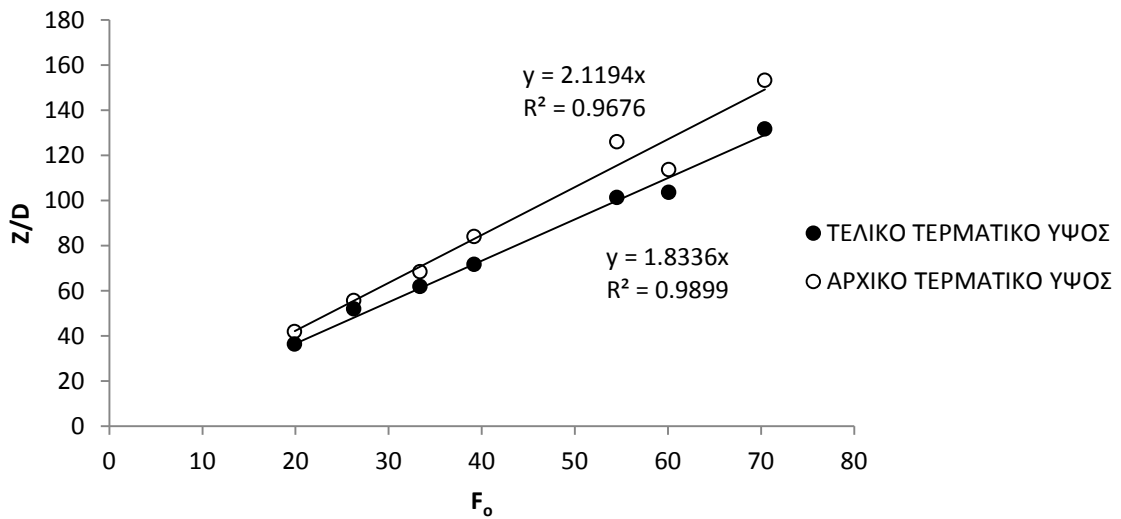
Σχήμα 5-4: Συσχέτιση του αρχικού και τελικού τερματικού ύψους με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 15°



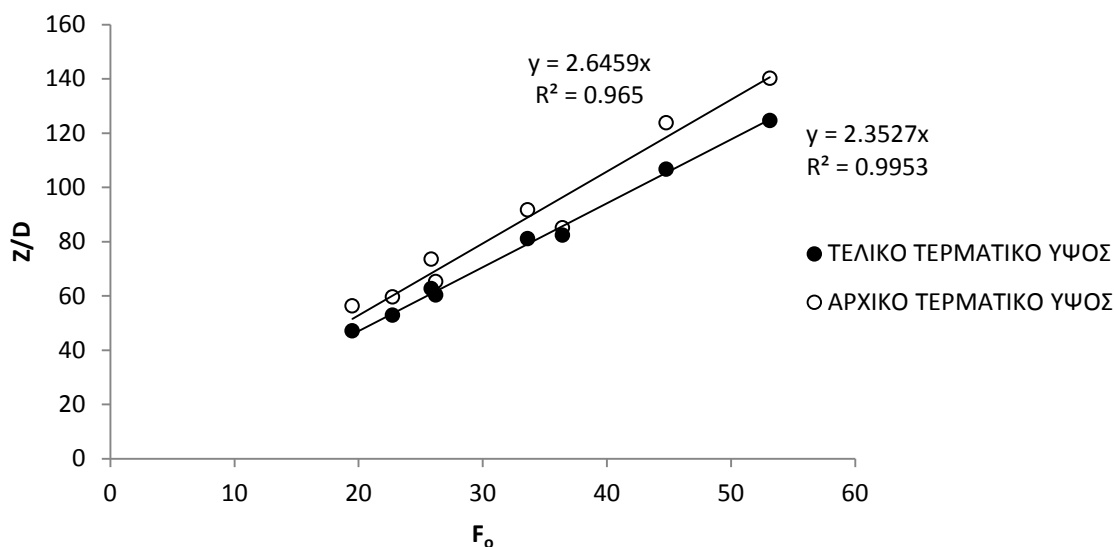
Σχήμα 5-5: Συσχέτιση του αρχικού και τελικού τερματικού ύψους με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 30°



Σχήμα 5-6: Συσχέτιση του αρχικού και τελικού τερματικού ύψους με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 35°



Σχήμα 5-7: Συσχέτιση του αρχικού και τελικού τερματικού ύψους με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 50°



Σχήμα 5-8: Συσχέτιση του αρχικού και τελικού τερματικού ύψους με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 70°

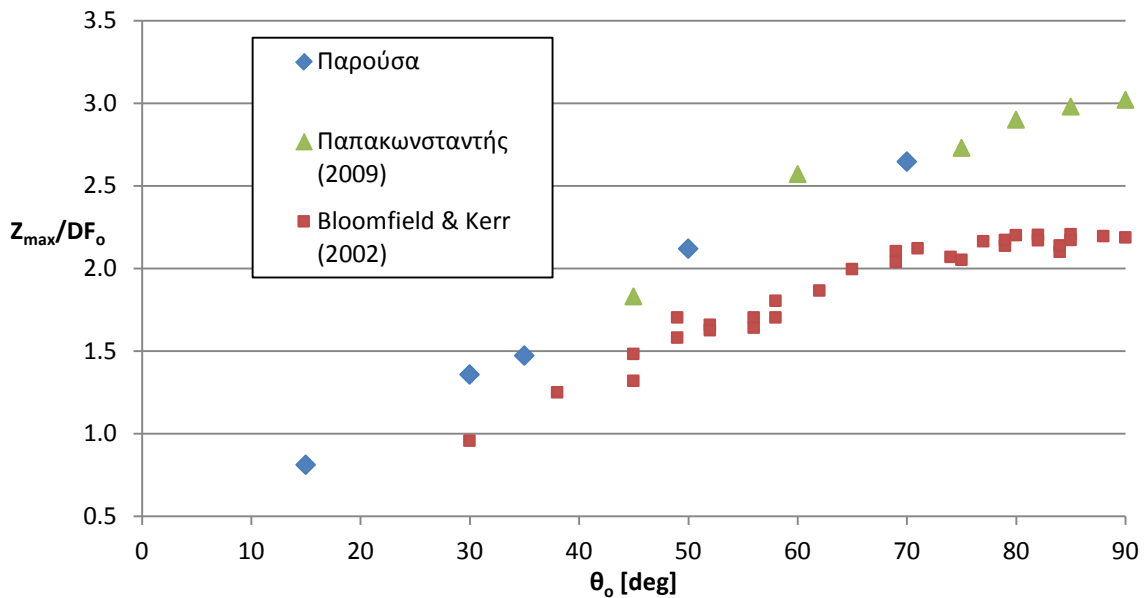
Πίνακας 5-2: Αδιάστατες τιμές του αρχικού και τελικού τερματικού ύψους της φλέβας για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

θ_o	Z_{max}/DF_o (C_1)	Z_i/DF_o (C_2)
15°	0.81	0.59
30°	1.36	1.12
35°	1.47	1.22
50°	2.12	1.83
70°	2.65	2.35

Σύμφωνα με τα ανωτέρω διαγράμματα, η μεταβολή του αδιάστατου ύψους Z/D με τον πυκνομετρικό αριθμό Froude είναι γραμμική, άρα οι σχέσεις του Πίνακα 5-1 επαληθεύονται από τις πειραματικές μετρήσεις με ικανοποιητική ακρίβεια. Το τελικό τερματικό ύψος ανόδου προκύπτει όπως αναμενόταν μικρότερο από το αρχικό τερματικό. Τόσο το τελικό, όσο και το αρχικό τερματικό ύψος ανόδου αυξάνει με αύξηση της γωνίας παροχέτευσης.

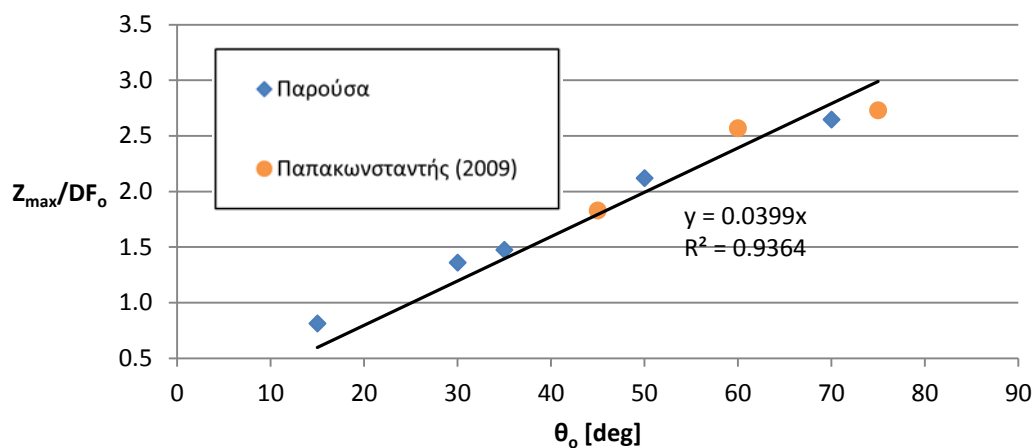
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας με αποτελέσματα άλλων ερευνητών. Στο Σχήμα 5-9 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών για το αρχικό τερματικό ύψος ανόδου. Οι τιμές της παρούσας συμφωνούν ικανοποιητικά με εκείνες που έχουν παρουσιαστεί από τον Παπακωνσταντής (2009), αν και δεν έχουν μελετηθεί κοινές γωνίες παροχέτευσης. Οι Bloomfield & Kerr (2002) παρουσιάζουν

σημαντικά μικρότερες μετρήσεις, υπάρχει όμως ποιοτική συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων. Πιθανοί λόγοι που οι Bloomfield & Kerr (2002) υποεκτιμούν το ύψος δόθηκαν στην παράγραφο 2.1.



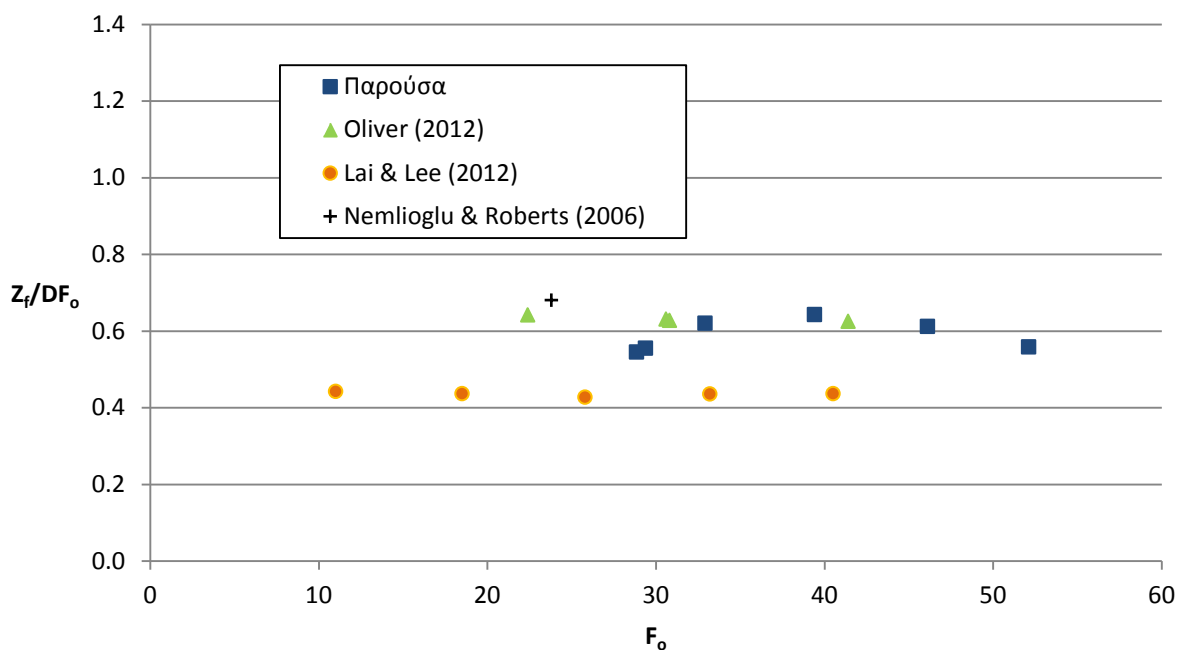
Σχήμα 5-9: Μεταβολή του αδιάστατου αρχικού ύψους ανόδου με τη γωνία παροχέτευσης

Στο Σχήμα 5-10 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι σταθερές C_1 όπως παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 5-2 της παρούσας για τις γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° μαζί με τα αποτελέσματα Παπακωνσταντής (2009) για τις γωνίες 45° , 60° και 75° , ως προς την γωνία παροχέτευσης θ_0 . Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται με γραμμική ευθεία τάσης με ικανοποιητική ακρίβεια.

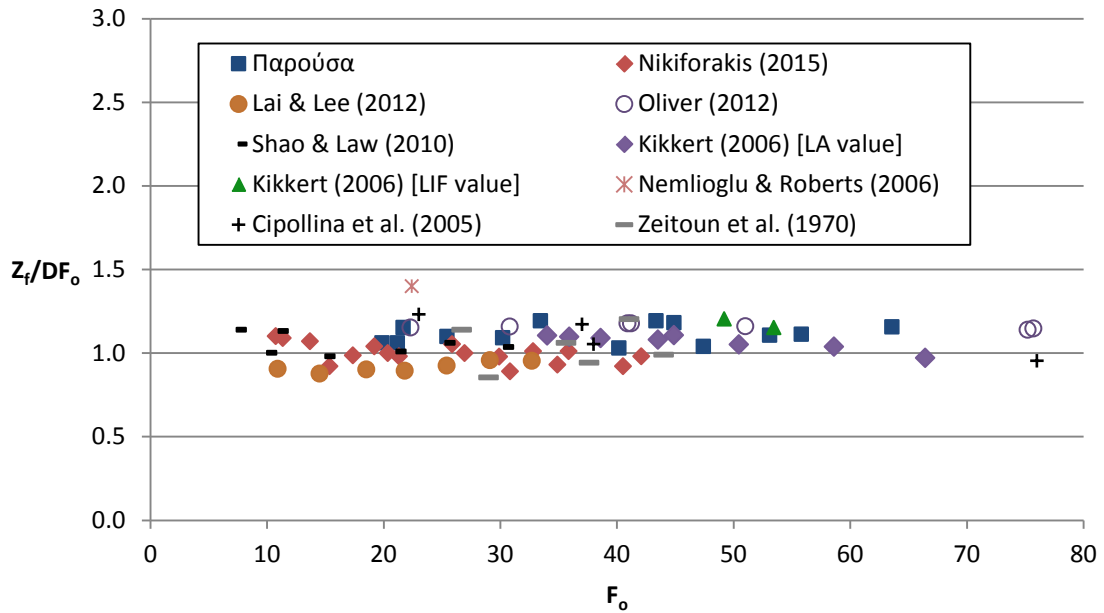


Σχήμα 5-10: Γραμμική συσχέτιση αδιάστατου αρχικού τερματικού ύψους με τη γωνία παροχέτευσης ($15^\circ \leq \theta_0 \leq 75^\circ$)

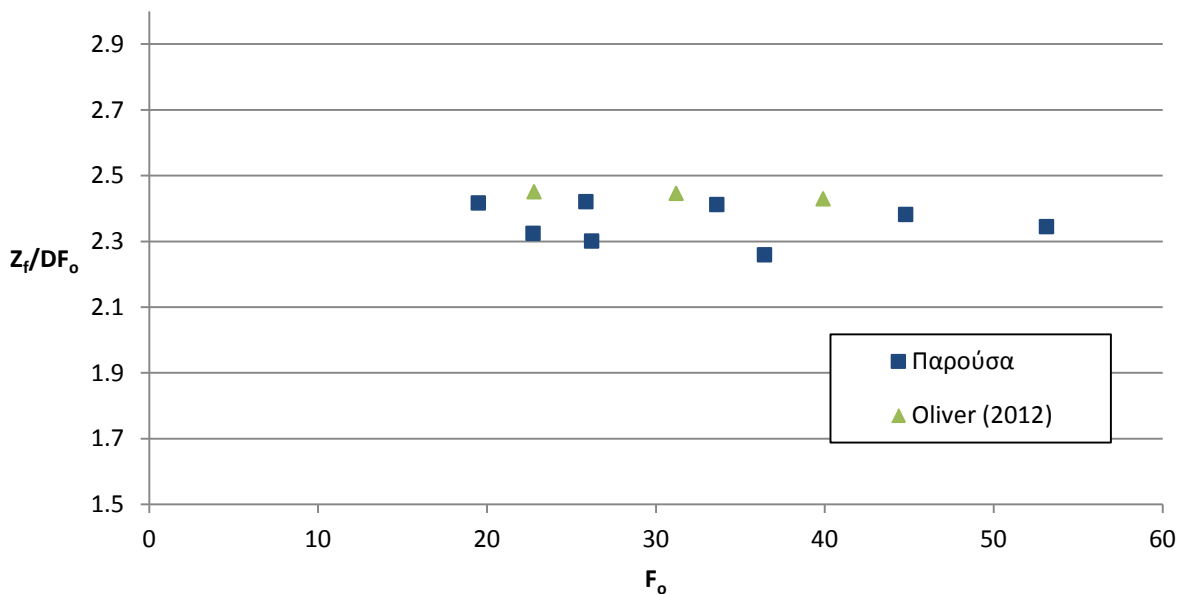
Αναλυτικές μετρήσεις για το τελικό τερματικό ύψος ανόδου διατίθενται για γωνίες παροχέτευσης 15° , 30° και 70° . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με τη σταθερά C_2 στον κατακόρυφο άξονα και τον πυκνομετρικό αριθμό F_o στον οριζόντιο. Στο Σχήμα 5-13 παρουσιάζεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας και άλλων εργασιών για το τελικό τερματικό ύψος για γωνία παροχέτευσης 15° . Τα αποτελέσματα της παρούσας συμφωνούν με εκείνα του Oliver (2012). Οι Lai & Lee (2012) υπολόγισαν μικρότερο τερματικό ύψος ανόδου, ενώ οι Nemlioglu & Roberts (2006) το προσδιορίζουν αυξημένο. Στο Σχήμα 5-12 παρουσιάζεται σύγκριση των πειραμάτων για το τερματικό ύψος φλέβας με γωνία παροχέτευσης 30° . Ιδιαίτερα ικανοποιητική είναι η συμφωνία με τα πειράματα των Nikiforakis (2015), Oliver (2012), Kikkert (2006), Shao & Law (2010), Cipollina et al. (2005) και Zeitoun et al (1970). Τα πειραματικά αποτελέσματα των Lai & Lee (2012) παρουσιάζουν μικρότερες τιμές, ενώ η τιμή από το πείραμα των Nemlioglu & Roberts (2006) είναι αυξημένη. Ομοίως στη σύγκριση για τη γωνία των 70° , όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-11, τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας και του Oliver (2012) παρουσιάζουν εξαιρετική συμφωνία. Μάλιστα τα πειράματα της παρούσας είναι περισσότερα σε αριθμό και καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude.



Σχήμα 5-11: Μεταβολή του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους ανόδου φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνία 15° με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude



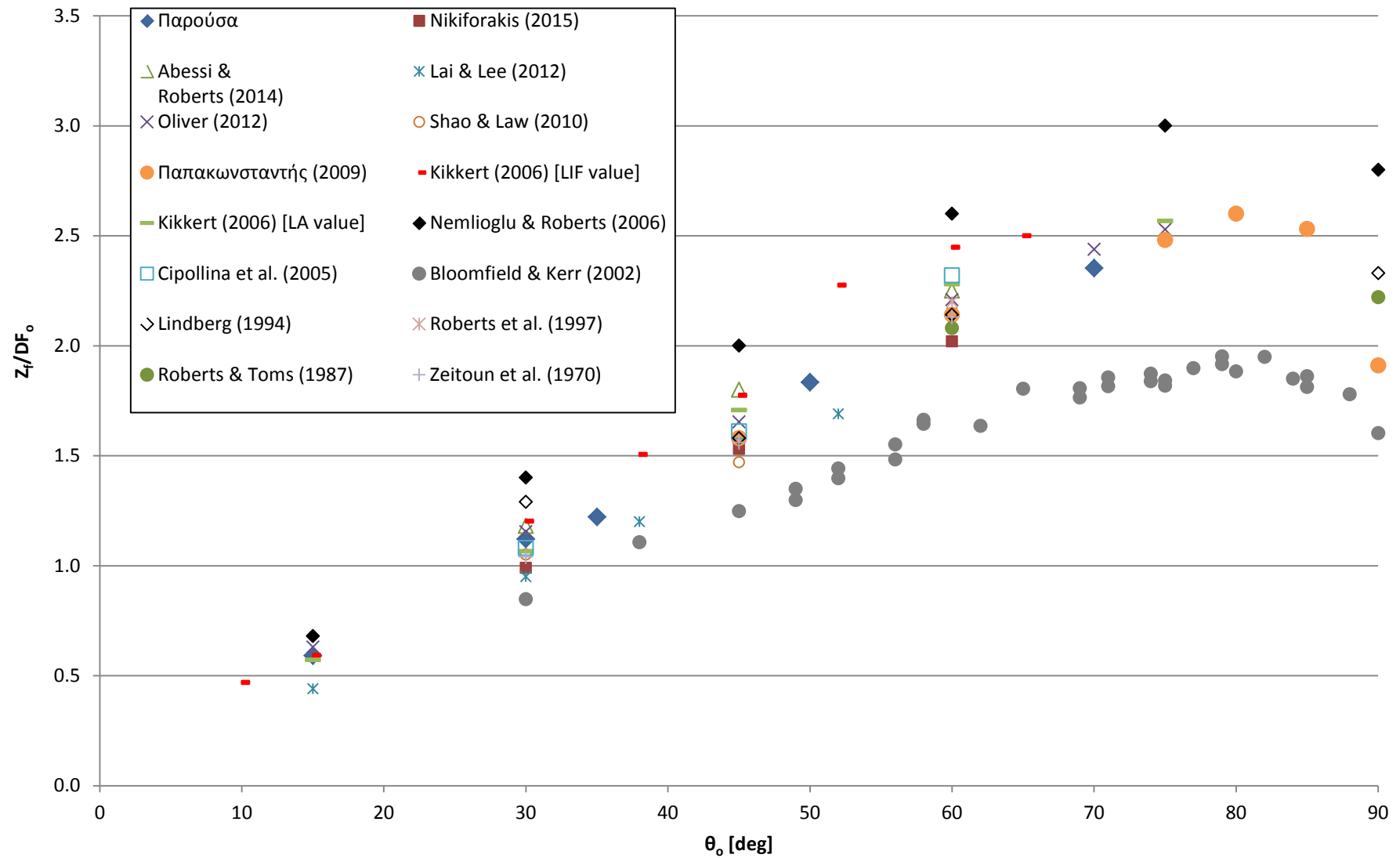
Σχήμα 5-12: Μεταβολή του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους ανόδου φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνία 30° με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude



Σχήμα 5-13: Μεταβολή του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους ανόδου φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνία 70° με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude

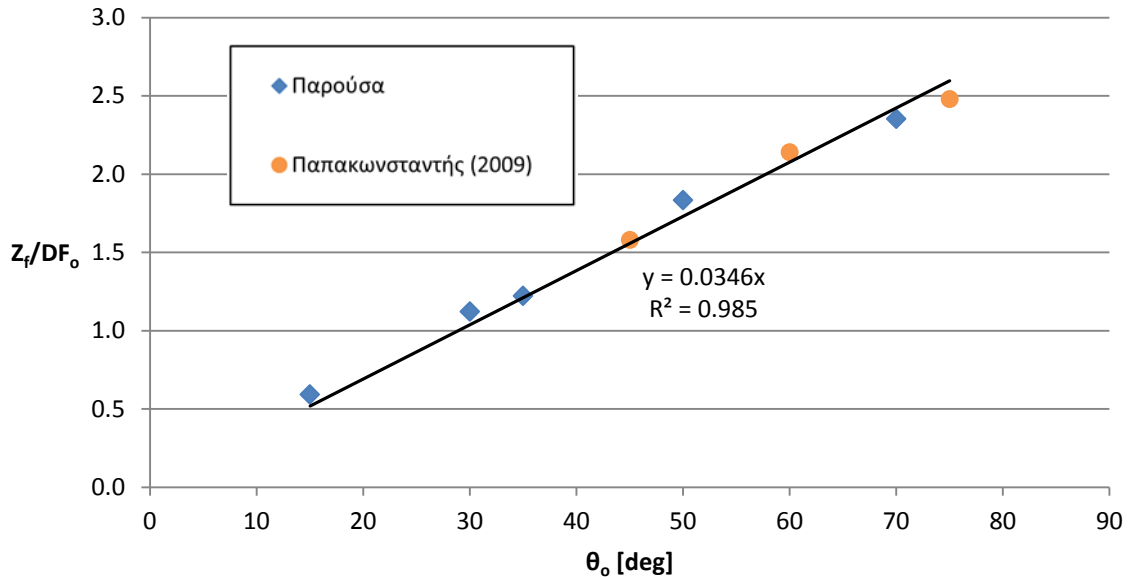
Στο Σχήμα 5-14 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους ανόδου των βασικότερων εργασιών και η μεταβολή τους με τη γωνία παροχέτευσης της φλέβας. Οι μέσες τιμές της παρούσας βρίσκονται εντός του εύρους των προτεινόμενων τιμών. Μεγαλύτερες αποκλίσεις παρατηρούνται με τις τιμές των Lai & Lee (2012), οι οποίοι υπολογίζουν το τελικό τερματικό ύψος μειωμένο για γωνίες μικρότερες

των 38° , ενώ οι Nemlioglu & Roberts (2006) το υπερεκτιμούν συστηματικά, αλλά τα αποτελέσματά τους βασίζονται σε πολύ μικρό αριθμό πειραμάτων. Τα αποτελέσματα των Bloomfield & Kerr (2002) είναι σημαντικά μικρότερα για όλο το εύρος των γωνιών, πιθανώς λόγω επίδρασης ορίων (boundary effects) από τη μικρή συσκευή που χρησιμοποίησαν και λόγω του πλέγματος που χρησιμοποίησαν για να πετύχουν τυρβώδη ροή. Ωστόσο τα αποτελέσματα τους συμφωνούν ποιοτικά με τα αποτελέσματα της παρούσας, δηλαδή το τερματικό ύψος αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας στο εύρος 15° - 70° .



Σχήμα 5-14: Μεταβολή του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους ανόδου με τη γωνία παροχέτευσης

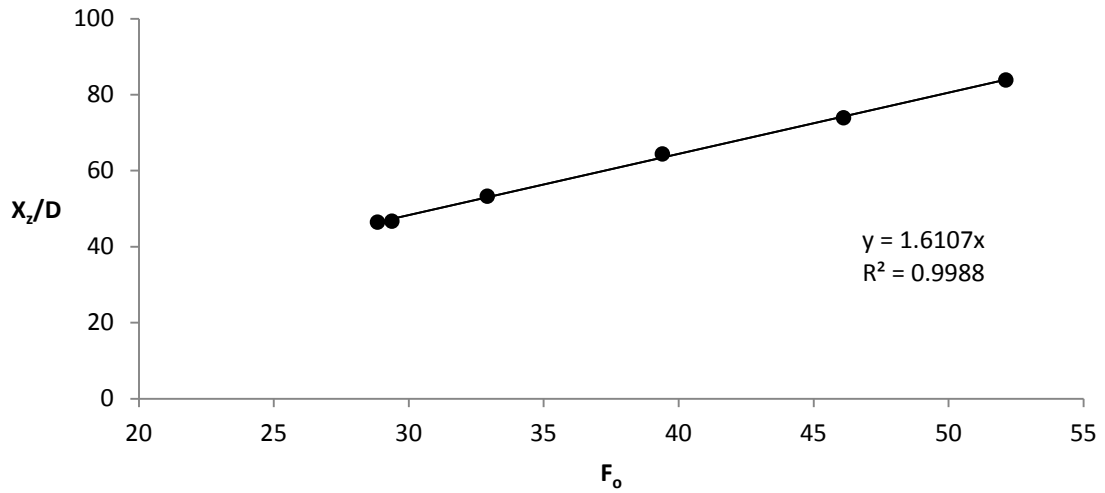
Στο Σχήμα 5-15 που ακολουθεί, πραγματοποιείται συσχέτιση των σταθερών $C_2(\theta_0)$ για το τελικό τερματικό ύψος όπως προέκυψαν από τα πειράματα της παρούσας για τις γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° μαζί με τα αποτελέσματα Παπακωνσταντής (2009) για τις γωνίες 45° , 60° και 75° . Η συσχέτιση τους φαίνεται να είναι γραμμική.



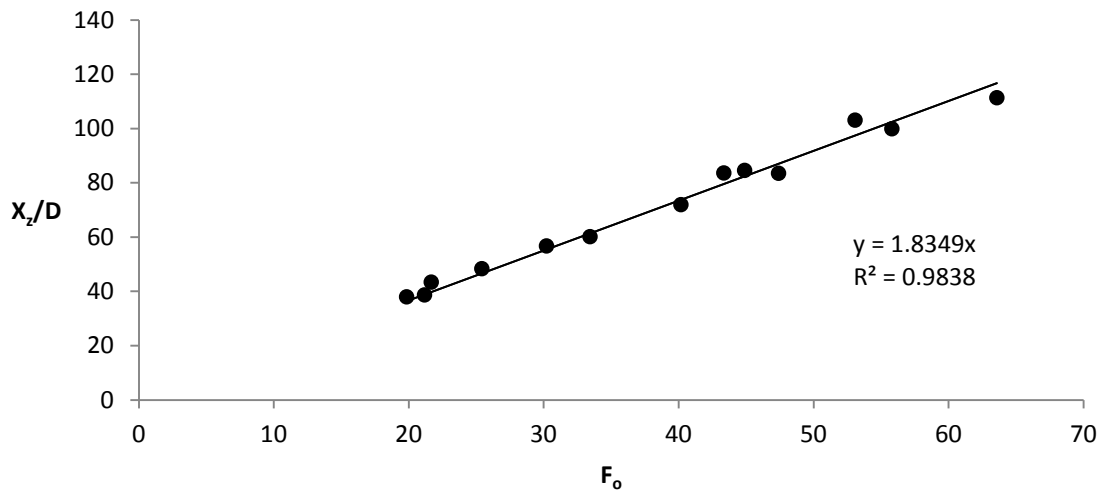
Σχήμα 5-15: Γραμμική συσχέτιση του αδιάστατου τελικού τερματικού ύψους με τη γωνία παροχέτευσης ($15^\circ \leq \theta_0 \leq 75^\circ$)

5.3 Οριζόντια θέση τελικού τερματικού ύψους ανόδου

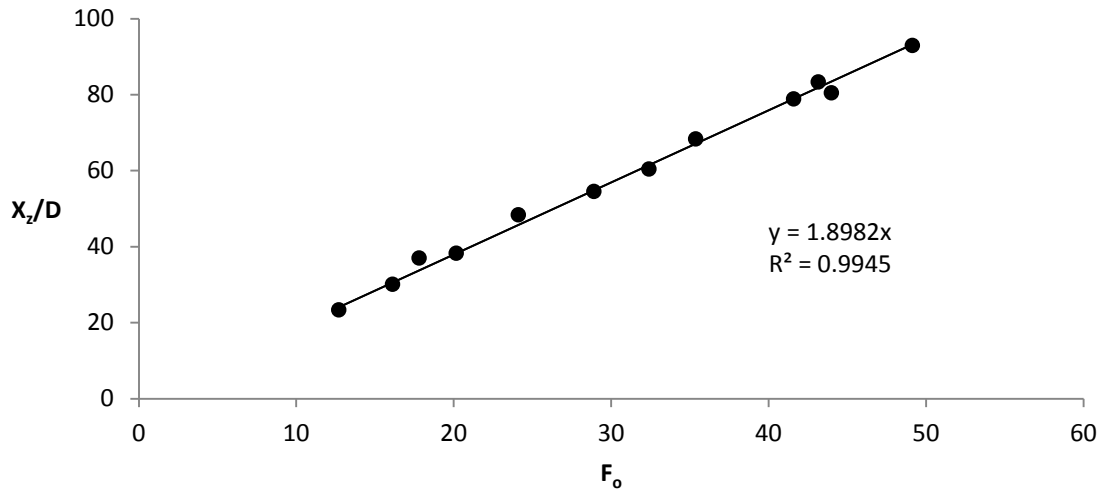
Το τελικό τερματικό ύψος ανόδου παρουσιάζει διακυμάνσεις, επομένως και η οριζόντια απόσταση X_z από το στόμιο εκροής μέχρι τη θέση του τελικού τερματικού ύψους δεν είναι σταθερή. Στην παρούσα εργασία, η απόσταση X_z προσδιορίστηκε με τη μέθοδο της μέσης εικόνας. Έπειτα παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων για κάθε γωνία εκροής θ_0 . Όπως τα τερματικά ύψη, έτσι και οι οριζόντιες αποστάσεις αδιαστατοποιούνται με τη διάμετρο του στομίου εκροής D , και παρουσιάζονται γραφικά ως προς τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude F_0 . Με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, προσδιορίζεται η εξίσωση της ευθείας που ταιριάζει στις πειραματικές τιμές και διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Στα Σχήματα 5-16 έως 5-20 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις και στον Πίνακα 5-3 φαίνονται συγκεντρωτικά οι σταθερές C_3 για κάθε γωνία, όπως προέκυψαν από τη γραμμική συσχέτιση.



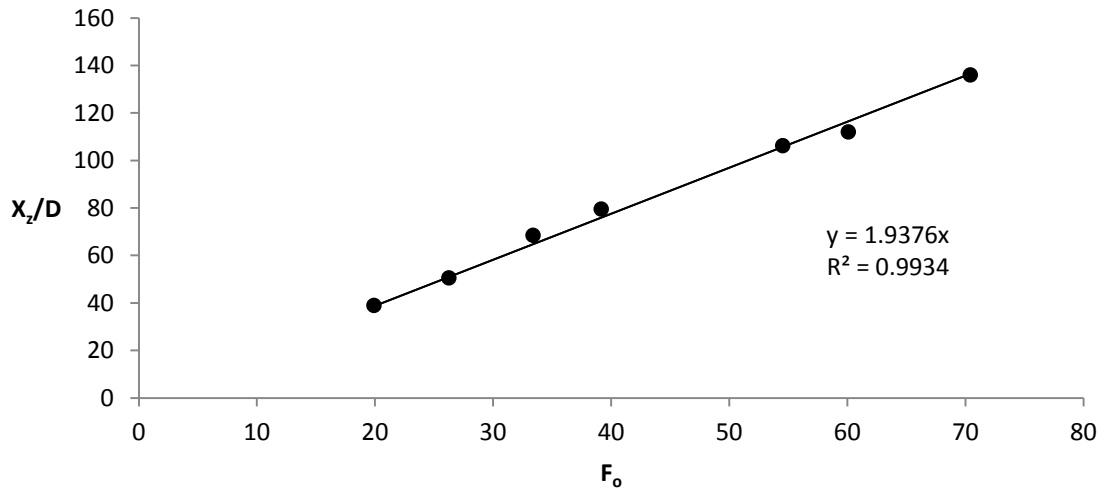
Σχήμα 5-16: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 15°



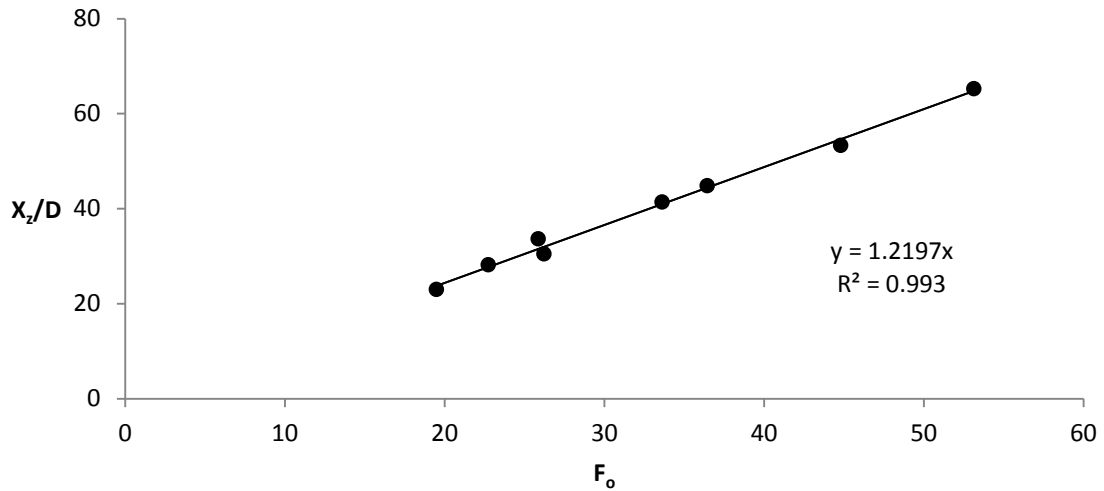
Σχήμα 5-17: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 30°



Σχήμα 5-18: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 35°



Σχήμα 5-19: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 50°



Σχήμα 5-20: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 70°

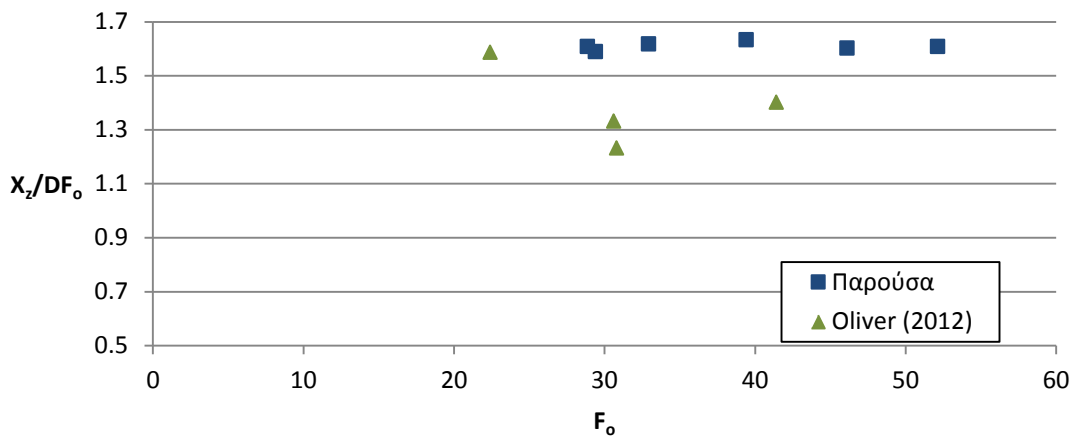
Πίνακας 5-3: Αδιάστατες τιμές της οριζόντιας απόστασης της θέσης του τελικού τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

θ_o	X_z/DF_o (C_3)
15°	1.61
30°	1.83
35°	1.90
50°	1.94
70°	1.22

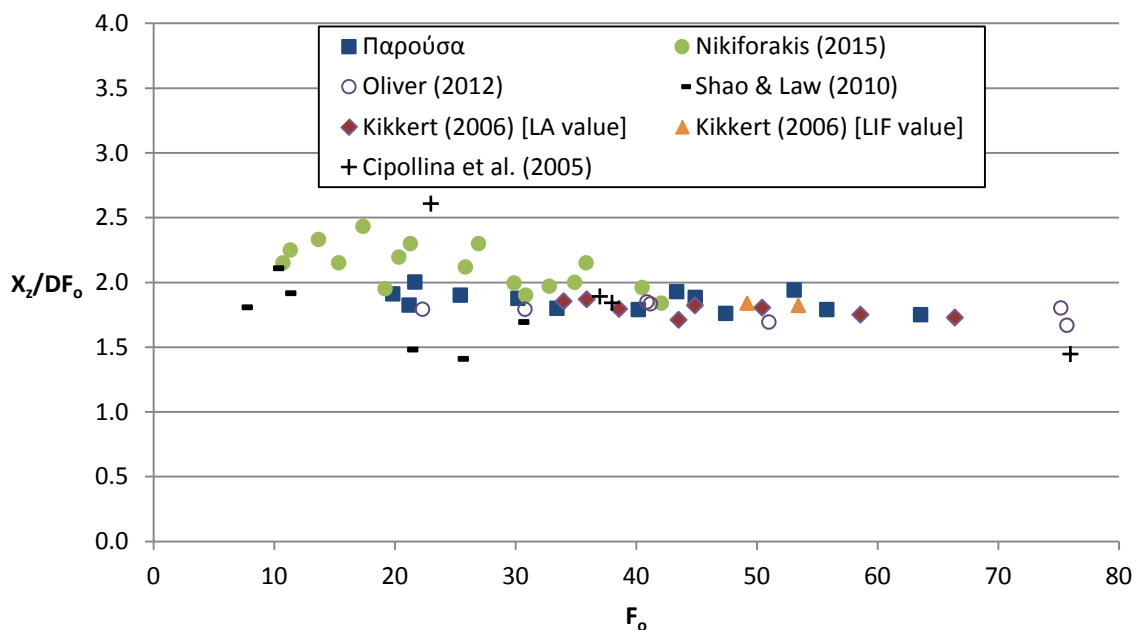
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το αδιάστατο μήκος X_z/DF_o είναι σταθερό για κάθε γωνία παροχέτευσης με τον συντελεστή συσχέτισης R^2 να τείνει στη μονάδα, επομένως και εδώ η θεώρηση του Πίνακα 5-1 επαληθεύεται από τις πειραματικές μετρήσεις με μεγάλη ακρίβεια.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας με διαθέσιμα αποτελέσματα άλλων ερευνητών και συγκεκριμένα για γωνίες παροχέτευσης 15°, 30°, και 70°. Η σύγκριση πραγματοποιείται σε γραφήματα με τις σταθερές $C_3(\theta_o)$ στον κατακόρυφο άξονα και τον πυκνομετρικό αριθμό F_o στον οριζόντιο για καλύτερη εποπτεία. Στα Σχήματα 5-21 και 5-22 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας και της διδακτορικής διατριβής του Oliver (2012) για την απόσταση X_z για γωνίες παροχέτευσης 15° και 70°. Τα πειραματικά αποτελέσματα των δύο εργασιών παρουσιάζουν συμφωνία, ιδιαίτερα στις 70°, με τις τιμές της παρούσας να είναι λίγο

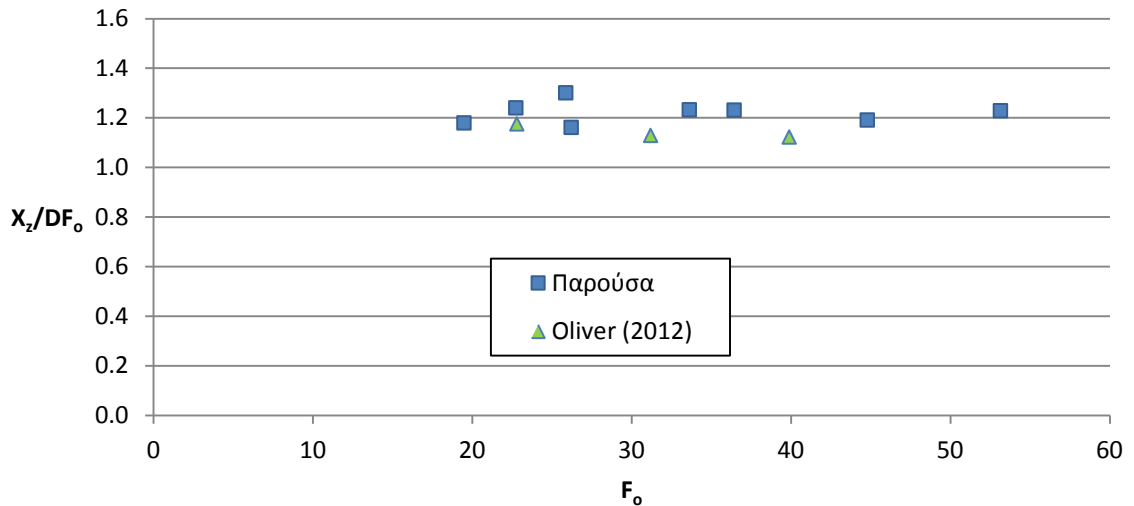
μεγαλύτερες. Τα αποτελέσματα στις 15° έχουν μια μέση απόκλιση της τάξης του 15%, αλλά οι μετρήσεις του Oliver (2012) παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά (scatter). Αξίζει να αναφερθεί πως όπως στην περίπτωση των τερματικών υψών ανόδου, τα πειράματα της παρούσας είναι περισσότερα σε αριθμό και καλύπτουν μεγαλύτερο εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude. Στο Σχήμα 5-22 παρουσιάζεται η σύγκριση για φλέβα με γωνία παροχέτευσης 30° . Ιδιαίτερα ικανοποιητική είναι η συμφωνία με τα πειράματα των Kikkert (2006), Shao & Law (2010) και Oliver (2012), ενώ τα αποτελέσματα του Nikiforakis (2015) είναι λίγο αυξημένα για $F_o < 25$. Οι μετρήσεις των Cipollina et al. (2005) παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά.



Σχήμα 5-21: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία 15°

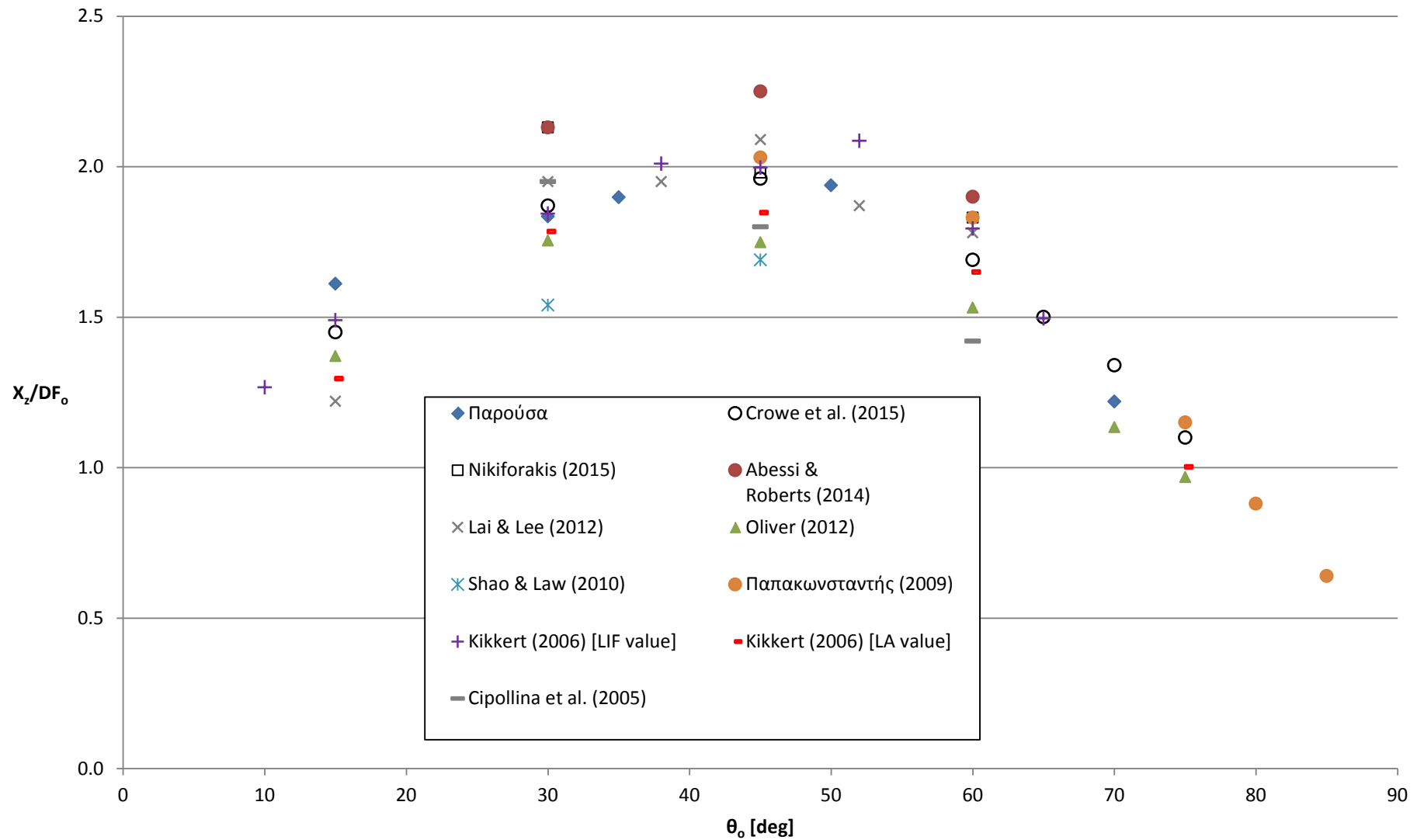


Σχήμα 5-22: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία 30°



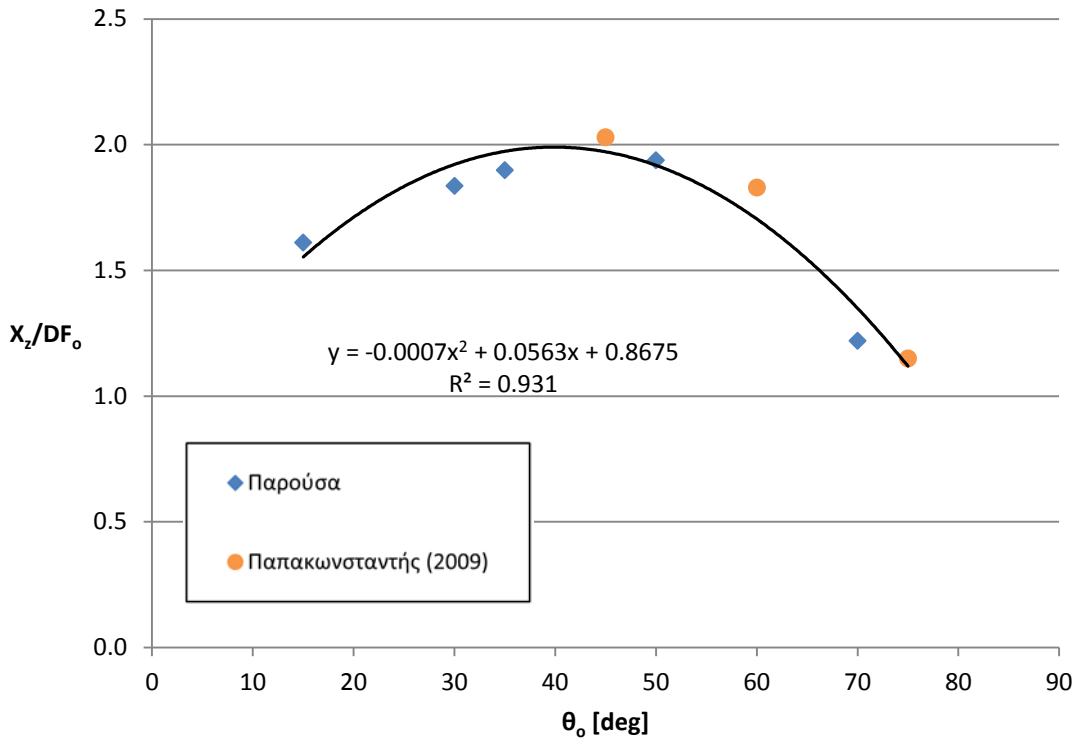
Σχήμα 5-23: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης της θέσης του τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία 70°

Στο Σχήμα 5-24 γίνεται διερεύνηση της σταθεράς C_3 με τη γωνία παροχέτευσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Οι μέσες τιμές της παρούσας βρίσκονται εντός του εύρους των προτεινόμενων τιμών και συμφωνούν ποιοτικά με τα αποτελέσματα όλων των ερευνητών, με την τιμή για τη γωνία των 15° να είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Η απόσταση X_z δείχνει αρχικά να αυξάνει αυξανόμενης της γωνίας, μεγιστοποιείται περίπου στις 45°-55° και έπειτα μειώνεται.



Σχήμα 5-24: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης της θέσης του τελικού τερματικού ύψους ανόδου από το στόμιο παροχέτευσης με τη γωνία παροχέτευσης

Η αδιάστατη απόσταση X_z/DF_0 όπως προέκυψε από τα πειράματα της παρούσας και τα πειράματα Παπακωνσταντής (2009) συσχετίζεται με τη γωνία παροχέτευσης με πολυωνυμική καμπύλη 2^{ου} βαθμού στο διάστημα $15^\circ \leq \theta_0 \leq 75^\circ$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-25.



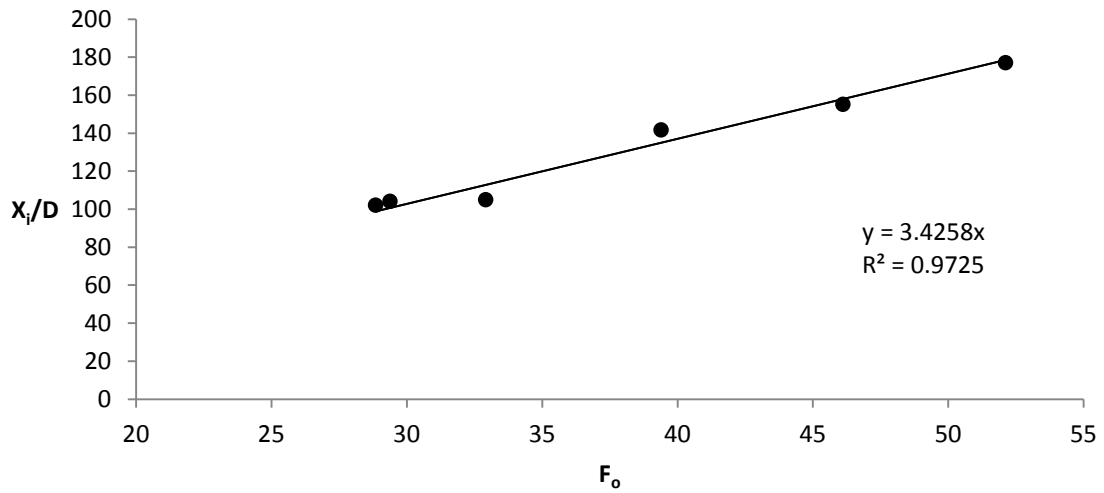
Σχήμα 5-25: Πολυωνυμική συσχέτιση αδιάστατης οριζόντιας απόστασης της θέσης του τελικού τερματικού ύψους φλέβας από το στόμιο παροχέτευσης με τη γωνία παροχέτευσης ($15^\circ \leq \theta_0 \leq 75^\circ$)

5.4 Οριζόντια θέση του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης

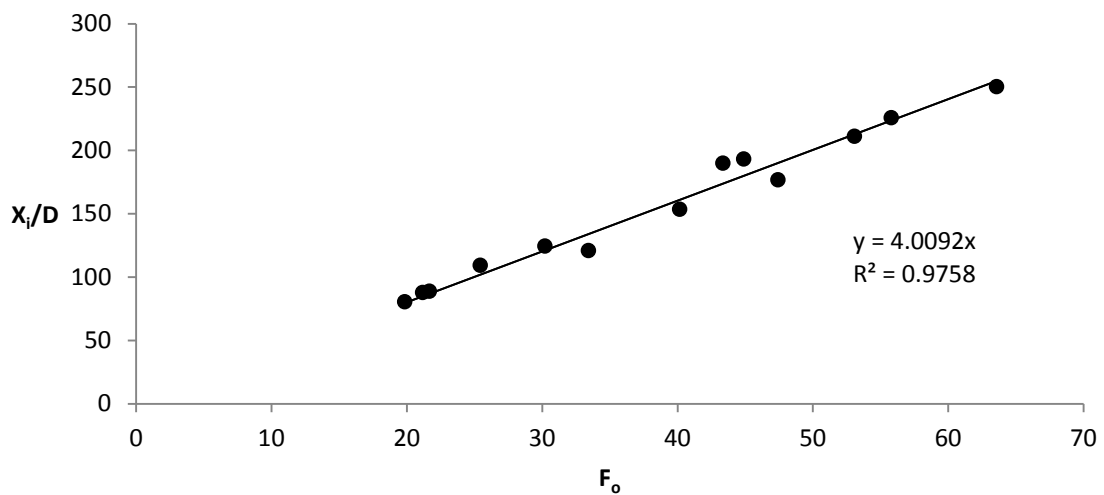
Για κάθε πείραμα προσδιορίστηκε η οριζόντια απόσταση X_i από τη θέση παροχέτευσης της φλέβας μέχρι το εξωτερικό όριο της φλέβας όταν αυτή επιστρέφει στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης. Ο προσδιορισμός πραγματοποιήθηκε εξάγοντας μεμονωμένα στιγμιότυπα από το video κάθε πειράματος και υπολογίζοντας τη μέση τιμή τους. Τη διαδικασία αυτή δυσχεραίνει το ρεύμα πυκνότητας που εξελίσσεται στον πυθμένα, οι μάζες που αποκολλώνται από την ροή της φλέβας και οι δομές μεγάλης κλίμακας που επηρεάζουν την τροχιά. Καθοριστικό ρόλο παίζει η υποκειμενικότητα του παρατηρητή που επιλέγει τα στιγμιότυπα, για το λόγο αυτό έγινε προσπάθεια να θεωρηθεί ένας μεγάλος αριθμός στιγμιότυπων.

Ακολουθεί ο προσδιορισμός των σταθερών C_4 για κάθε γωνία παροχέτευσης μέσω γραμμικής συσχέτισης των X_i/D και F_0 . Τα πειραματικά αποτελέσματα και οι μέσες τιμές

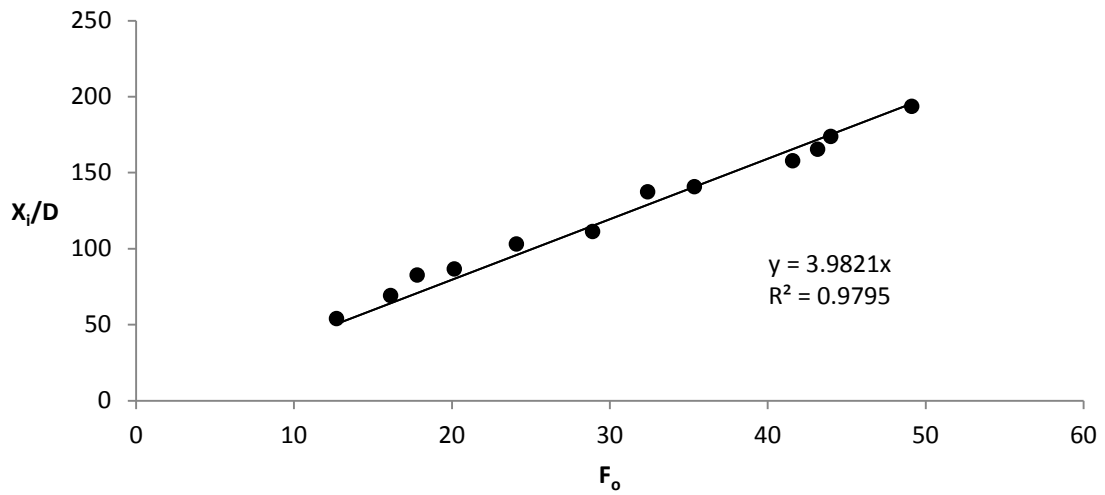
που υπολογίστηκαν παρουσιάζονται στα Σχήματα 5-26 έως 5-30 και συνοψίζονται στον Πίνακα 5-4.



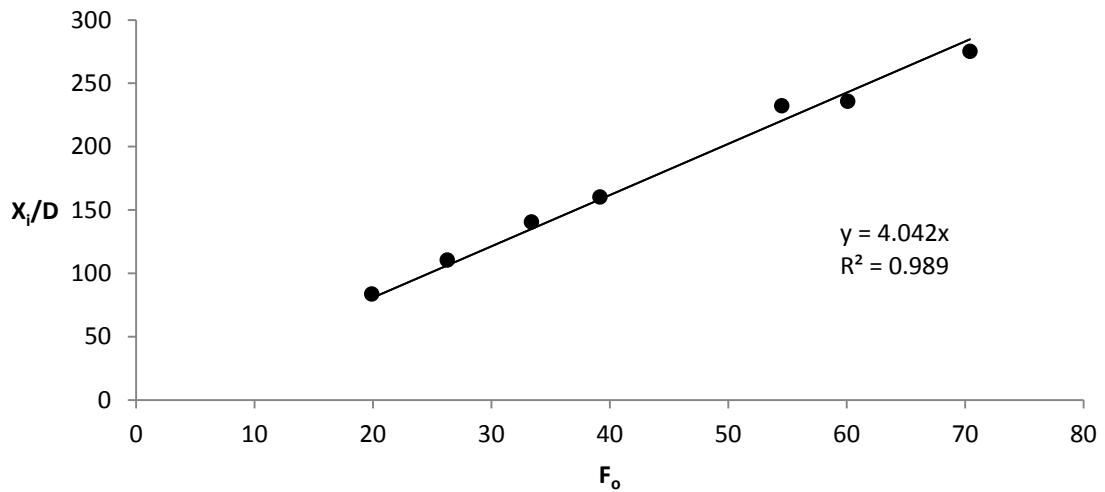
Σχήμα 5-26: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άνω ορίου φλέβας στη θέση επιστροφής της στο επίπεδο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 15°



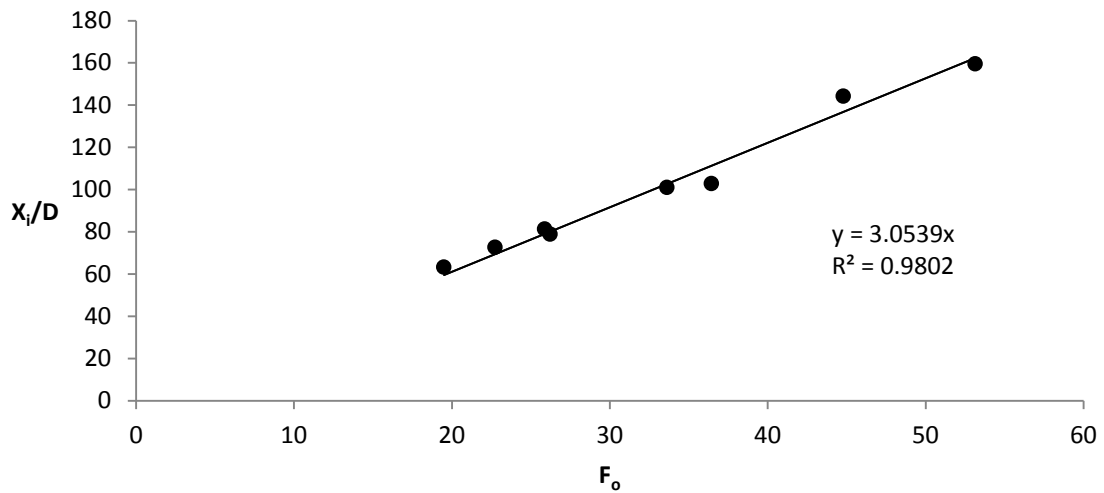
Σχήμα 5-27: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άνω ορίου φλέβας στη θέση επιστροφής της στο επίπεδο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 30°



Σχήμα 5-28: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άνω ορίου φλέβας στη θέση επιστροφής της στο επίπεδο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 35°



Σχήμα 5-29: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άνω ορίου φλέβας στη θέση επιστροφής της στο επίπεδο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 50°



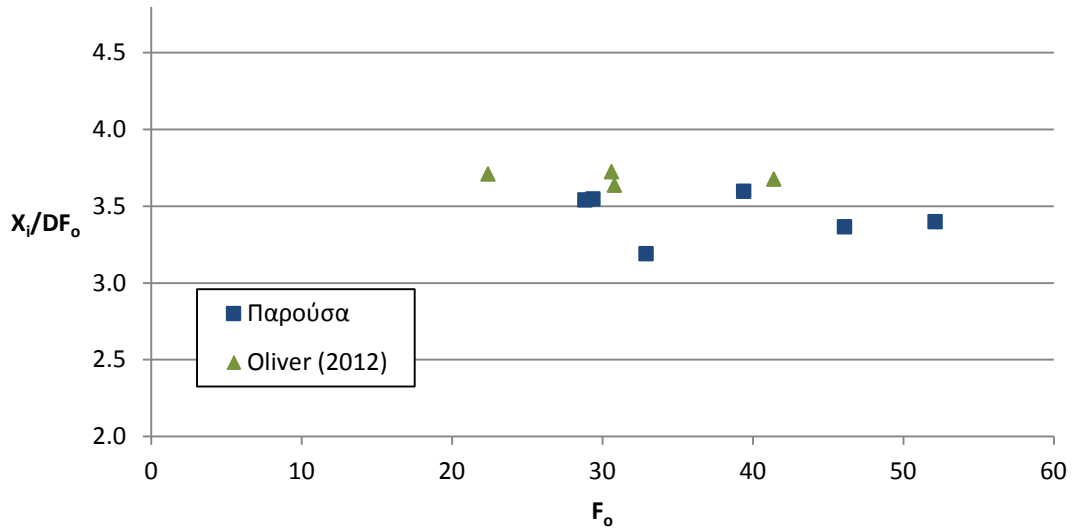
Σχήμα 5-30: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άνω ορίου φλέβας στη θέση επιστροφής της στο επίπεδο παροχέτευσης με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 70°

Πίνακας 5-4: Αδιάστατες τιμές της οριζόντιας απόστασης του εξωτερικού ορίου φλέβας στη θέση επιστροφής της στο επίπεδο παροχέτευσης για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

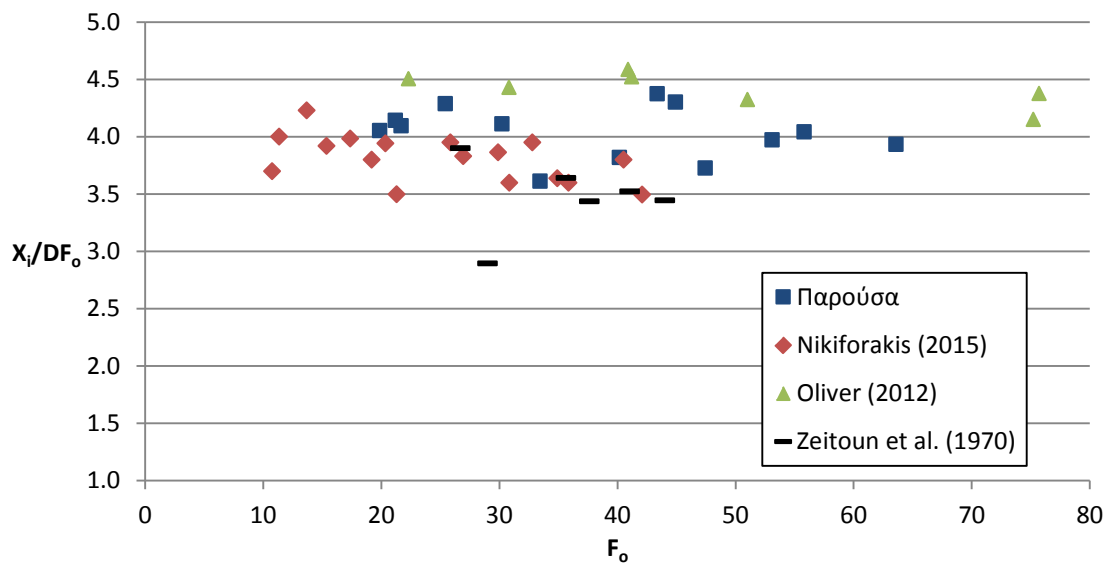
θ_o	X_i/DF_o (C_4)
15°	3.43
30°	4.01
35°	3.98
50°	4.04
70°	3.05

Από τα ανωτέρω αποτελέσματα προκύπτει πως η αδιάστατη απόσταση X_i/DF_o είναι σταθερή για κάθε αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude με μεγάλη ακρίβεια.

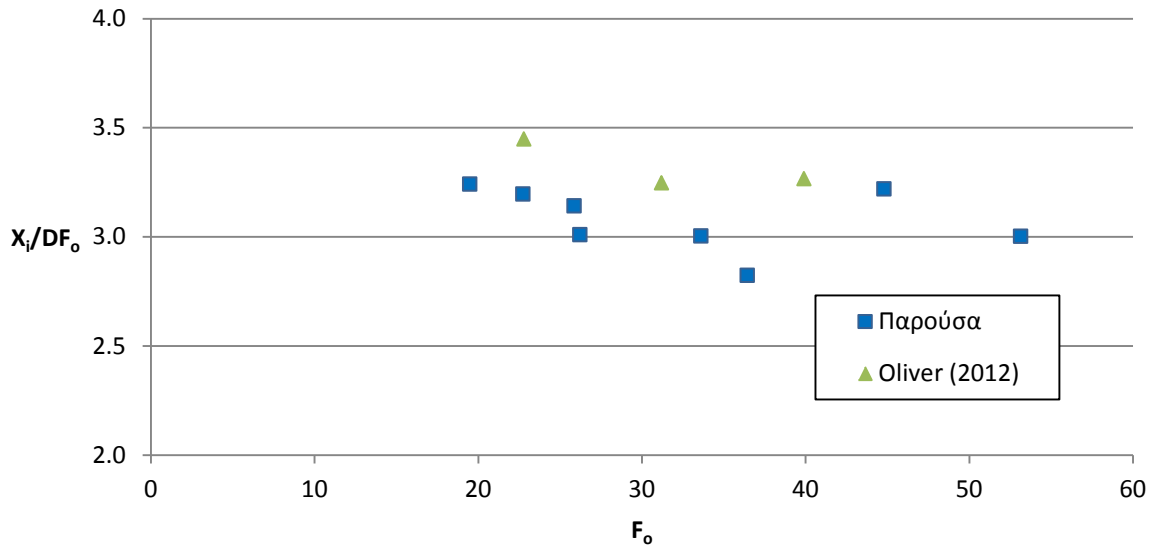
Στα Σχήματα 5-31, 5-32 και 5-33 που ακολουθούν συγκρίνονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας με διαθέσιμα αναλυτικά αποτελέσματα ερευνητών για γωνίες 15°, 30° και 70°. Οι μετρήσεις της παρούσας έρχονται σε συμφωνία με του Oliver (2012), με τις πρώτες να είναι λίγο αυξημένες. Τα αποτελέσματα της παρούσας για τη γωνία 30° είναι μεγαλύτερα από εκείνα που έχουν προταθεί από τους Zeitoun et al. (1970), ενώ συμφωνούν με τα αποτελέσματα του Nikiforakis (2015).



Σχήμα 5-31: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης του εξωτερικού ορίου της φλέβας με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία παροχέτευσης 15°

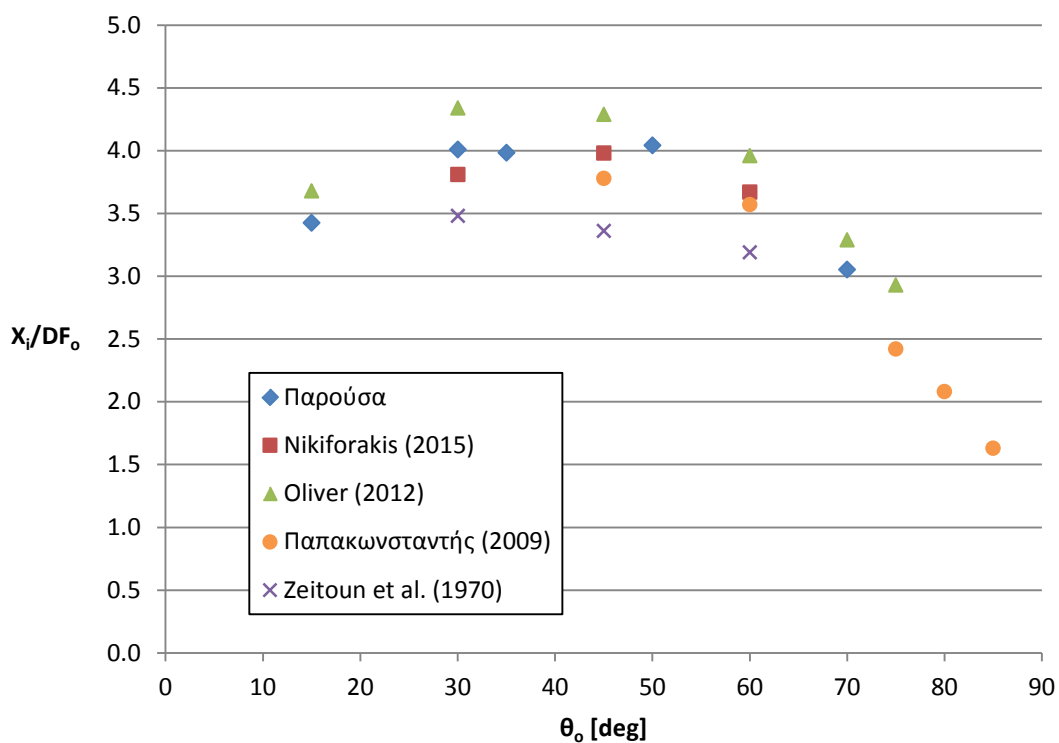


Σχήμα 5-32: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης του εξωτερικού ορίου της φλέβας με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία παροχέτευσης 30°



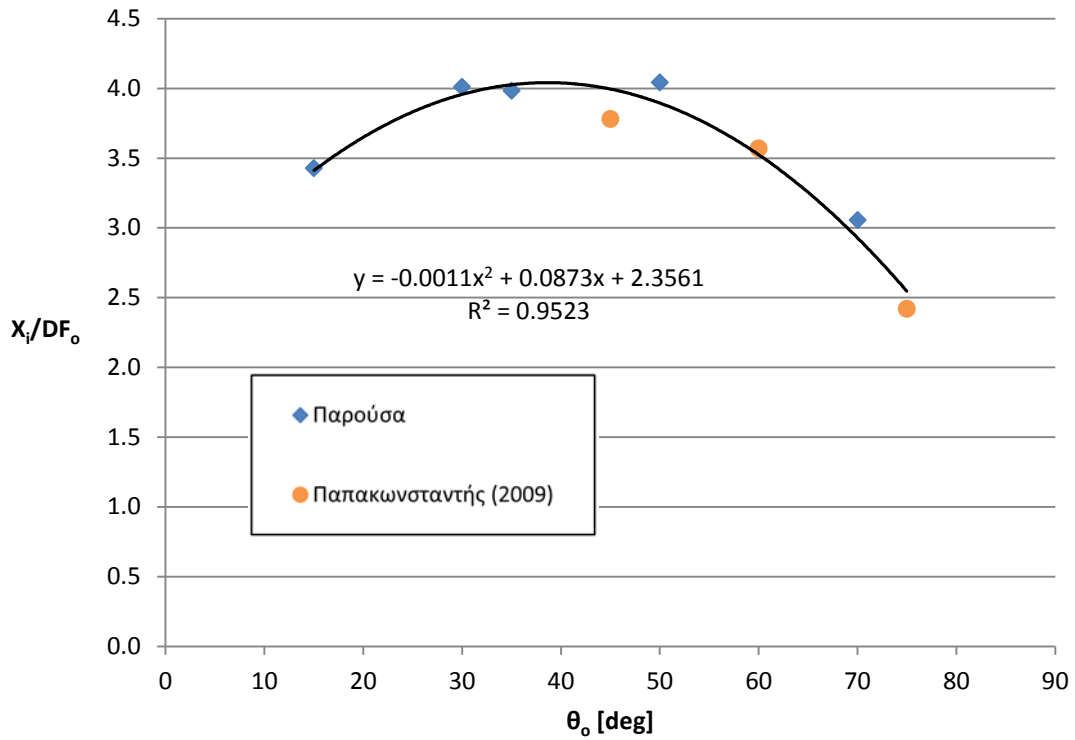
Σχήμα 5-33: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης του εξωτερικού ορίου της φλέβας με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία παροχέτευσης 70°

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5-34 που ακολουθεί, λίγες είναι οι εργασίες που έχουν ασχοληθεί με την οριζόντια θέση του εξωτερικού ορίου της φλέβας. Οι μετρήσεις της παρούσας βρίσκονται εντός του εύρους μετρήσεων που έχουν προταθεί. Η απόσταση X_i δείχνει να αυξάνει με την αύξηση της γωνίας, παρουσιάζει μέγιστο κοντά στις 45° και ακόλουθα μειώνεται για να μηδενιστεί για κατακόρυφη παροχέτευση.



Σχήμα 5-34: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων για την οριζόντια απόσταση του εξωτερικού ορίου της φλέβας από το στόμιο παροχέτευσης

Στο Σχήμα 5-35 που ακολουθεί παρουσιάζονται η αδιαστατοποιημένη απόσταση X_i/DF_o όπως προέκυψε από την παρούσα εργασία για τις γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα Παπακωνσταντής (2009) για τις γωνίες 45° , 60° και 75° . Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται με ακρίβεια με πολυωνμική καμπύλη 2^{ου} βαθμού.



Σχήμα 5-35: Πολυωνμική συσχέτιση αδιάστατης οριζόντιας απόστασης του εξωτερικού ορίου της φλέβας από το στόμιο παροχέτευσης με τη γωνία παροχέτευσης ($15^\circ \leq \theta_o \leq 75^\circ$)

6 Αποτελέσματα μετρήσεων συγκέντρωσης

6.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραμάτων κατηγορίας Β, δηλαδή των πειραμάτων μέτρησης συγκεντρώσεων με το όργανο MSCTI στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση πρόσπτωσης της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης για φλέβες αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία 35°, 50° και 70°. Οι πειραματικές τιμές δίνονται στους Πίνακες Π-2 και Π-3 του Παραρτήματος.

Κάθε στιγμιαία τιμή συγκέντρωσης στο υγρό της φλέβας c_i είναι ίση με το άθροισμα της μέσης χρονικά συγκέντρωσης \bar{c} και της τυρβώδους διακύμανσης της συγκέντρωσης c'_i :

$$c_i = \bar{c} + c'_i$$

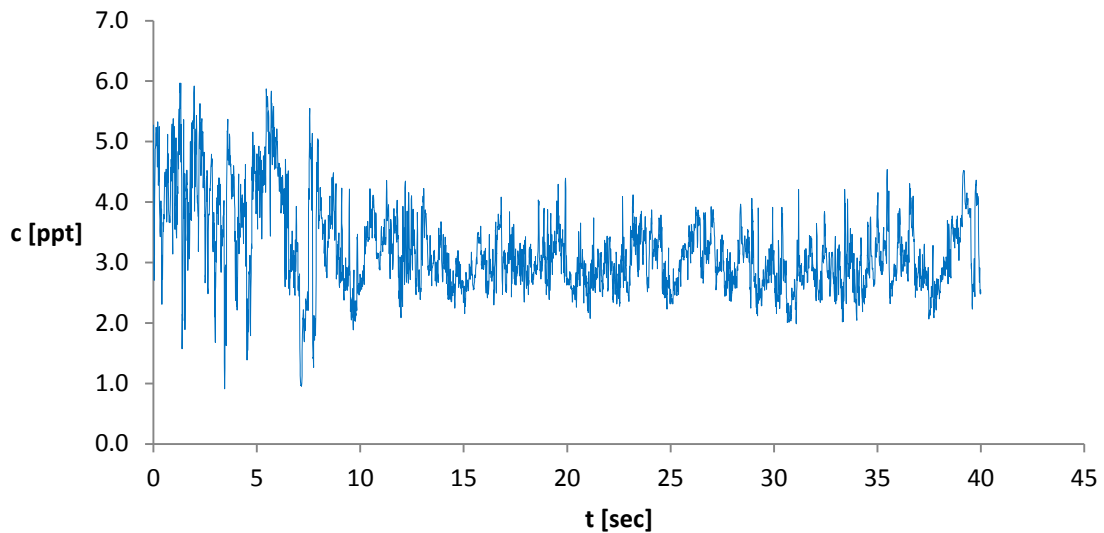
Για πλήθος N τιμών συγκέντρωσης ορίζεται η μέση τιμή \bar{c} των συγκεντρώσεων c_i και η RMS (Root Mean Square) τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης:

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} c_i = C_M$$

$$\sqrt{c'^2} = \sqrt{\frac{\sum (c_i - \bar{c})^2}{N}} = C_{RMS}$$

Η μέση τιμή αποτελεί τη μέση συγκέντρωση και στο εξής θα συμβολίζεται ως C_M και η τυπική απόκλιση των τιμών συγκέντρωσης αποτελεί την τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των διακυμάνσεων της συγκέντρωσης και στο εξής θα συμβολίζεται ως C_{RMS} .

Στην παρούσα εργασία το όργανο παρέμενε για 40 sec σε κάθε θέση δειγματοληψίας, λαμβάνοντας τιμές με συχνότητα 100 Hz. Οι συνολικά 4000 στιγμιαίες τιμές τάσης μετατράπηκαν σε τιμές συγκέντρωσης c_i μέσω της καμπύλης βαθμονόμησης. Στο Σχήμα 6-1 φαίνεται ένα παράδειγμα μέτρησης σημειακής συγκέντρωσης στον άξονα της φλέβας στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου για γωνία παροχέτευσης 35°. Εφαρμόζοντας τις ανωτέρω σχέσεις, υπολογίζονται οι τιμές C_M και C_{RMS} . Η μέγιστη μέση συγκέντρωση αποτελεί τη μέση χρονικά συγκέντρωση στον άξονα της φλέβας (centerline) και θα συμβολίζεται ως C_{Mc} . Η C_{Mc} χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση των μέσων και RMS συγκεντρώσεων (ένταση τύρβης). Παρουσιάζονται κατακόρυφες κατανομές των αδιάστατων μέσων και RMS συγκεντρώσεων συναρτήσει της απόστασης r από τη θέση του άξονα της φλέβας και συγκρίνονται με την κατανομή Gauss.



Σχήμα 6-1: Χρονοσειρά στιγμιαίας συγκέντρωσης σε σημείο της ροής στη θέση του τερματικού ύψους φλέβας που παροχέτευεται υπό γωνία 35° (180116EXP16, $F_o=43.74$)

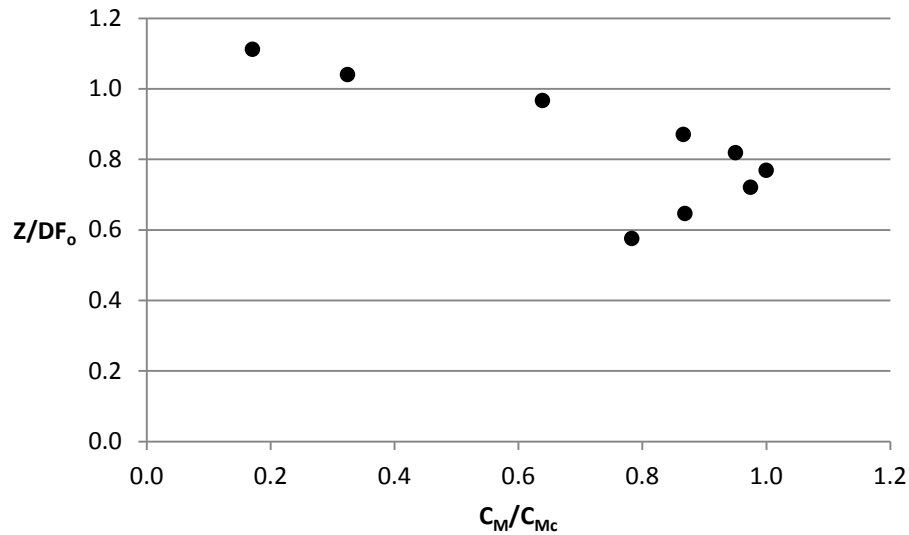
Η θέση όπου εμφανίζεται η C_{Mc} προσδιορίζεται ως θέση του άξονα για το κάθε πείραμα. Τα δεδομένα παρουσιάζονται σε αδιάστατα γραφήματα για κάθε γωνία ξεχωριστά, διατυπώνοντας σχέσεις προσδιορισμού του μέγιστου ύψους του άξονα, της απόστασης του άξονα της φλέβας από το στόμιο παροχέτευσης και της αξονικής αραιώσης τόσο στη θέση του τερματικού ύψους όσο και στη θέση της επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης (Πίνακας 6-1). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τιμές που προτείνονται από άλλους ερευνητές. Τέλος, πραγματοποιείται συσχέτιση των αποτελεσμάτων της παρούσας για τις γωνίες 35°, 50° και 70° και των αποτελεσμάτων Παπακωνσταντής (2009) για τις γωνίες 45°, 60° και 75° ως προς την αρχική γωνία παροχέτευσης, προκειμένου να προκύψουν σχέσεις εκτίμησης των αδιάστατων γεωμετρικών χαρακτηριστικών του άξονα της φλέβας συναρτήσει της γωνίας παροχέτευσης.

Πίνακας 6-1: Σχέσεις προσδιορισμού χαρακτηριστικών της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης (Πειράματα Β) με αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude $F_o \gg 1$ (Παπακωνσταντής, 2009)

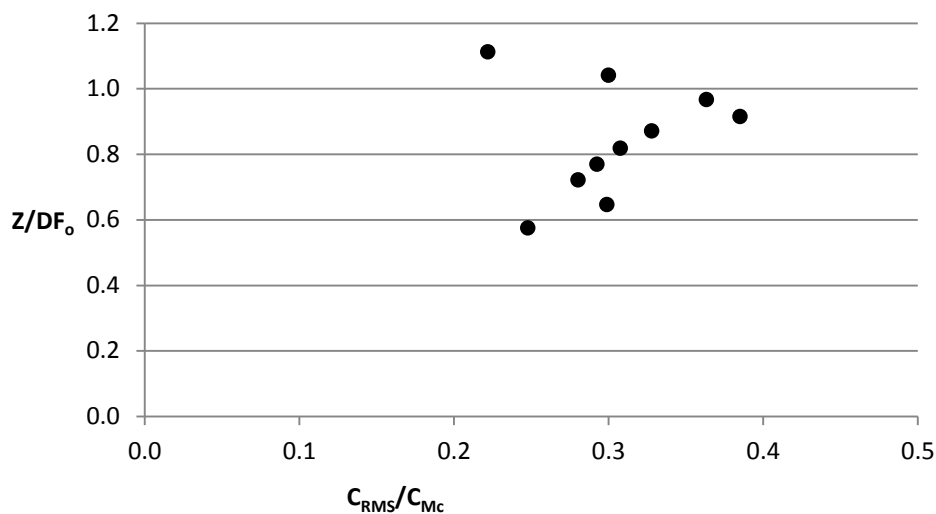
Παράμετρος	Εξίσωση
Μέγιστο ύψος άξονα φλέβας	$\frac{Z_c}{DF_o} = C_5(\theta_o)$
Οριζόντια απόσταση άξονα στη θέση πρόσπτωσης της φλέβας	$\frac{X_{ic}}{DF_o} = C_6(\theta_o)$
Αξονική αραιώση τερματικού ύψους ανόδου	$\frac{S_t}{F_o} = C_7(\theta_o)$
Αξονική αραιώση στη θέση πρόσπτωσης της φλέβας	$\frac{S_i}{F_o} = C_8(\theta_o)$

6.2 Κατακόρυφη κατανομή μέσης συγκέντρωσης και έντασης τύρβης στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου

Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.3.1, προσδιορίστηκαν η μέση συγκέντρωση C_M και η RMS συγκέντρωση C_{RMS} , καθώς και η κατακόρυφη κατανομή τους. Παραδείγματα κατανομής των συγκεντρώσεων φαίνονται στα Σχήματα 6-2 και 6-3.



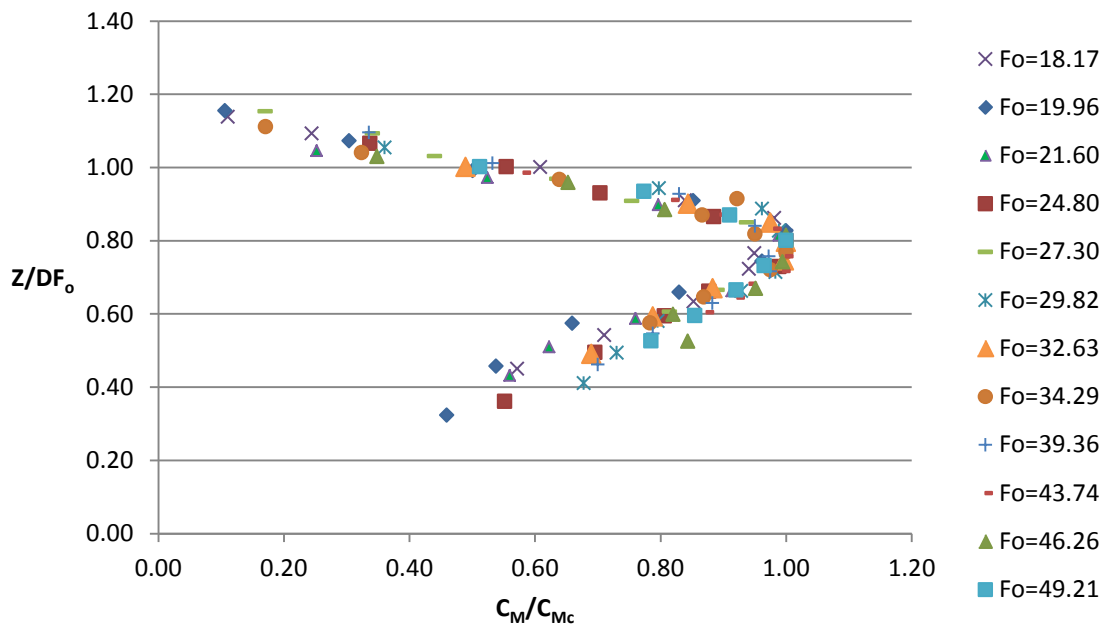
Σχήμα 6-2: Κατακόρυφη κατανομή της μέσης συγκέντρωσης (150116EXP12, $\theta_0=35^\circ$, $F_0=34.3$)



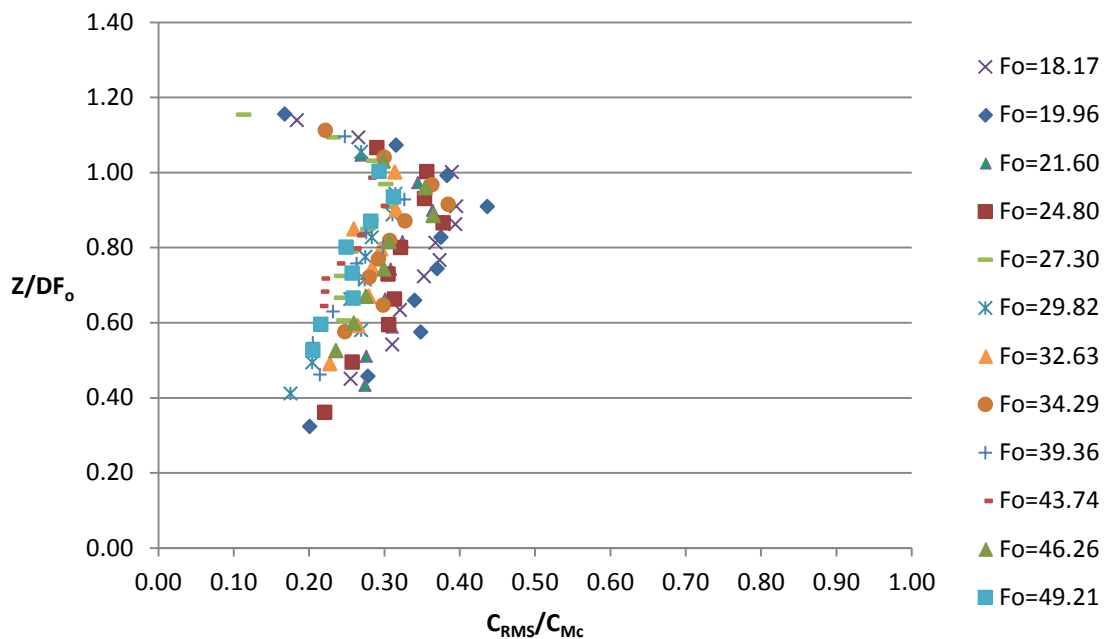
Σχήμα 6-3: Κατακόρυφη κατανομή της RMS τιμής των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης (150116EXP12, $\theta_0=35^\circ$, $F_0=34.3$)

Στο προηγούμενο κεφάλαιο ελέγχθηκε η ισχύς της θεώρησης που απαιτεί οι παραμέτροι της τροχιάς της φλέβας αδιαστατοποιημένες με τη διάμετρο του στομίου D και τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude, να παραμένουν σταθερές για την ίδια γωνία παροχέτευσης.

Στα Σχήματα 6-4, 6-5 και 6-6 έχουν τοποθετηθεί οι τιμές της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων ως προς το αδιάστατο ύψος Z/DF_0 , όπως μετρήθηκαν για όλα τα πειράματα ίδιας γωνίας παροχέτευσης.

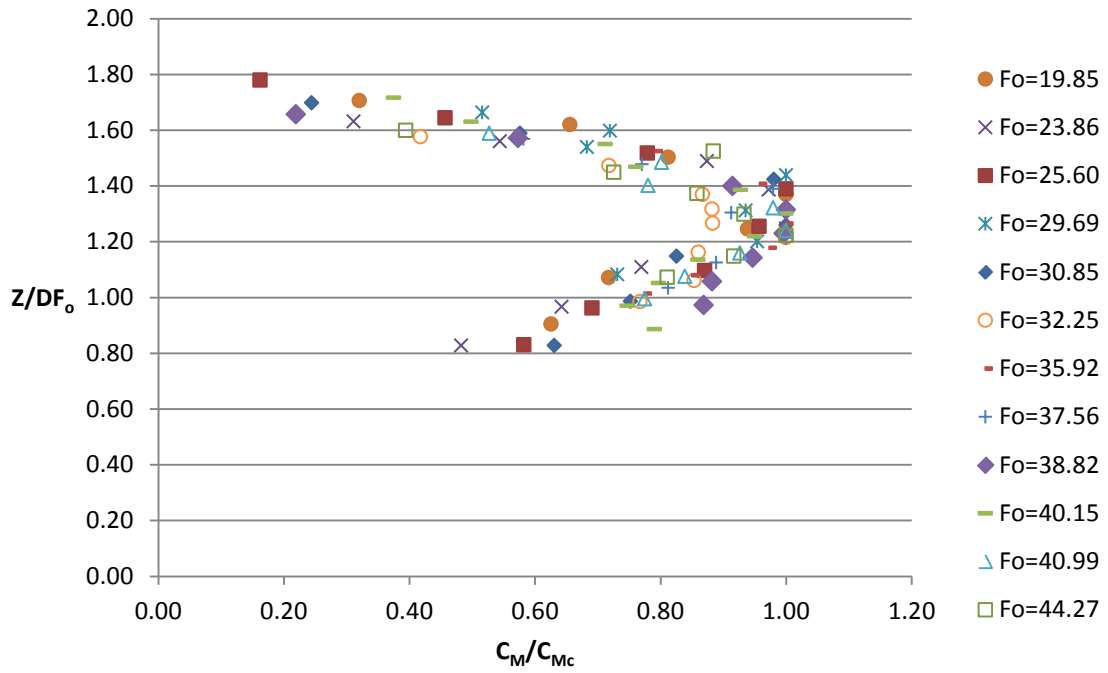


(α)

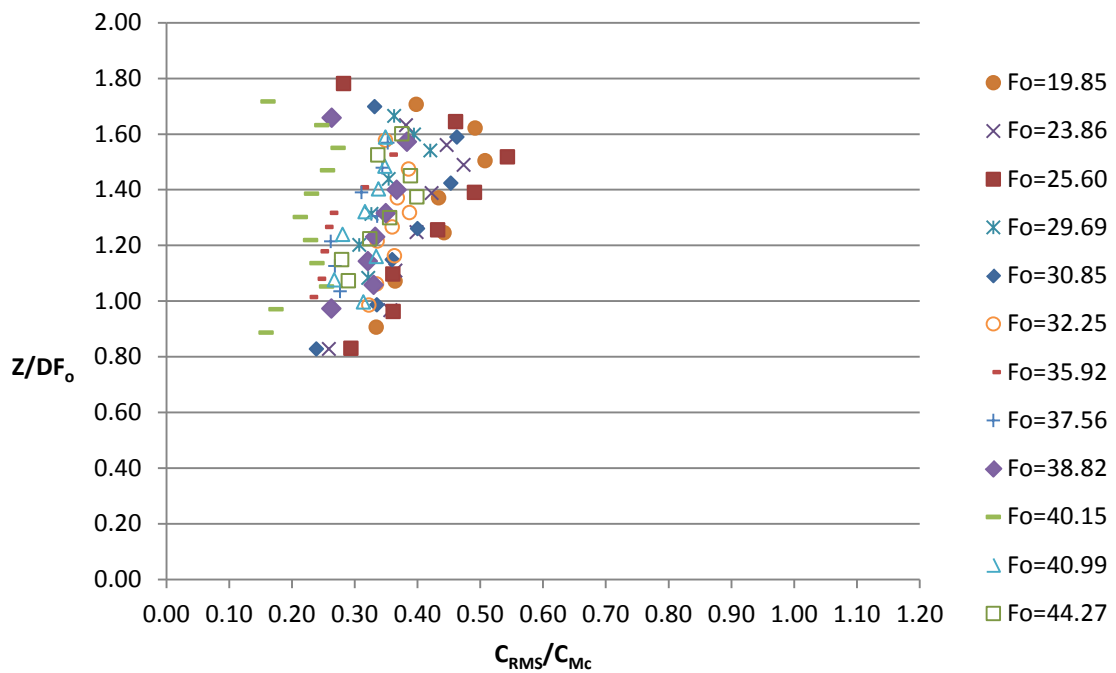


(β)

Σχήμα 6-4: Κατακόρυφη κατανομή (α) της μέσης συγκέντρωσης και (β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης, στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου για γωνία παροχέτευσης 35°

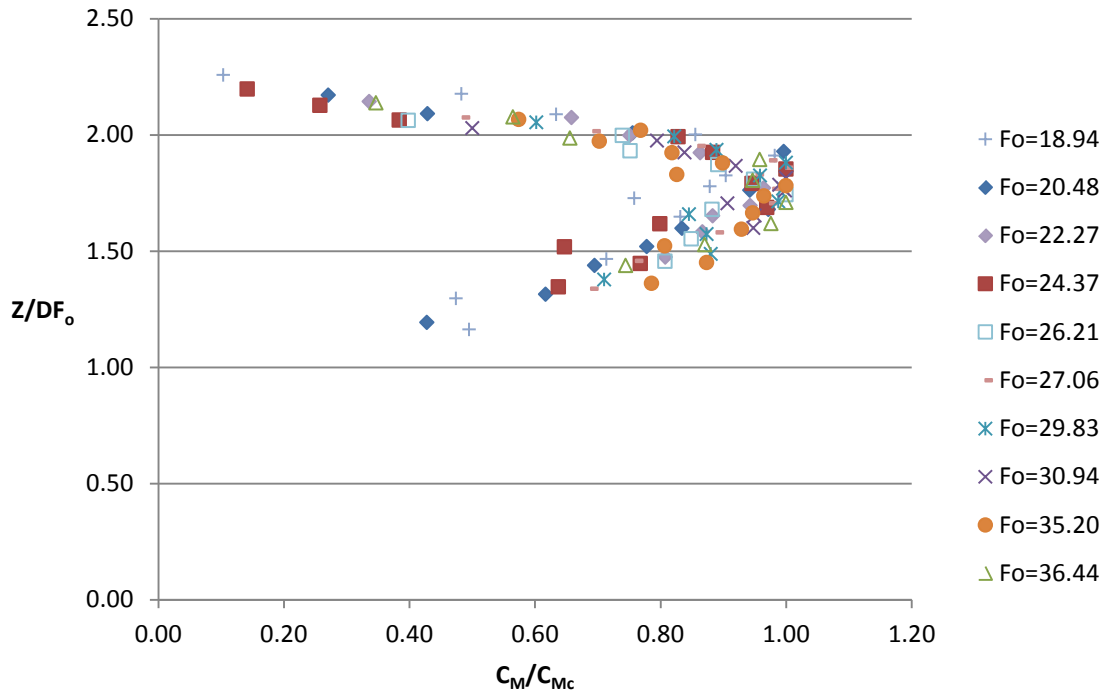


(α)

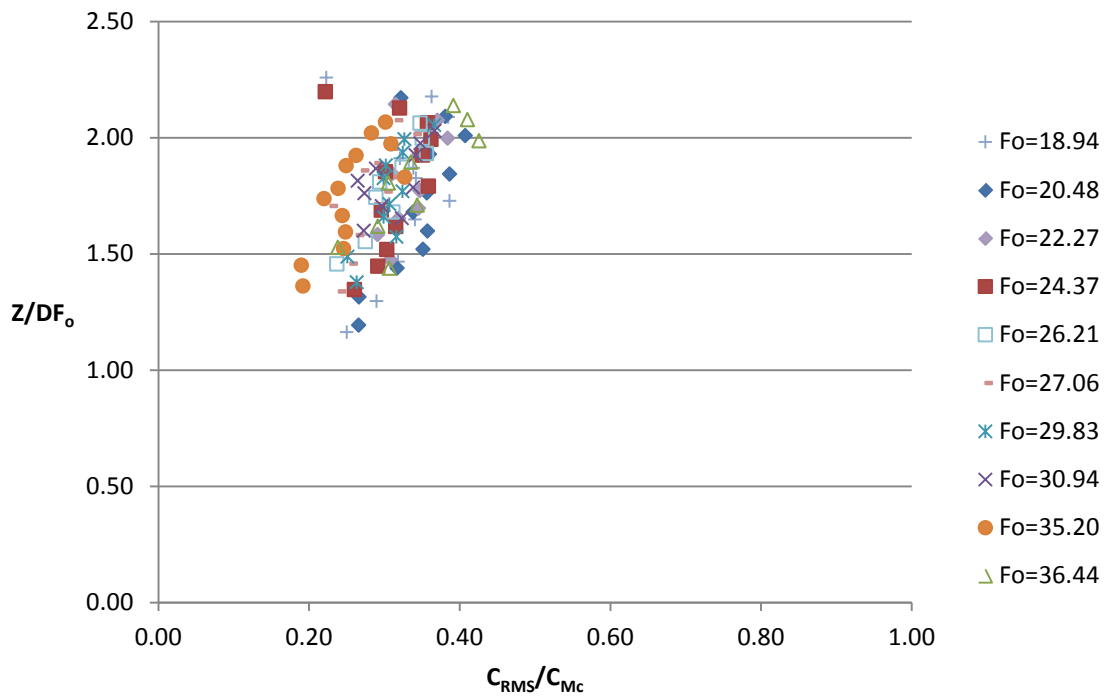


(β)

Σχήμα 6-5: Κατακόρυφη κατανομή (α) της μέσης συγκέντρωσης και (β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης, στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου για γωνία παροχέτευσης 50°



(α)



(β)

Σχήμα 6-6: Κατακόρυφη κατανομή (α) της μέσης συγκέντρωσης και (β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης, στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου για γωνία παραχέτευσης 70°

Σύμφωνα με τα ανωτέρω Σχήματα, τα αδιάστατα προφίλ συμπίπτουν ικανοποιητικά για συγκεκριμένη γωνία. Η διασπορά των τιμών είναι αναμενόμενη, δεδομένου του πλήθους των πειραμάτων, αλλά και της δυσκολίας να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θέση του τερματικού ύψους. Φαίνεται επίσης πως το ύψος της θέσης που παρουσιάζεται η μέγιστη τιμή C_{RMS}/C_{Mc} είναι υψηλότερο από το ύψος της θέσης της μέγιστης C_M/C_{Mc} .

Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια προσέγγισης και σύγκρισης της κατανομής της μέσης συγκέντρωσης με την κατανομή Gauss, καθώς είναι εμφανής η ομοιότητα τουλάχιστον του άνω κλάδου της κατανομής. Ορίζοντας σαν αφετηρία τον άξονα της φλέβας, μετρούνται οι αποστάσεις r για κάθε σημείο όπου πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία. Σύμφωνα με την κατανομή Gauss ισχύει:

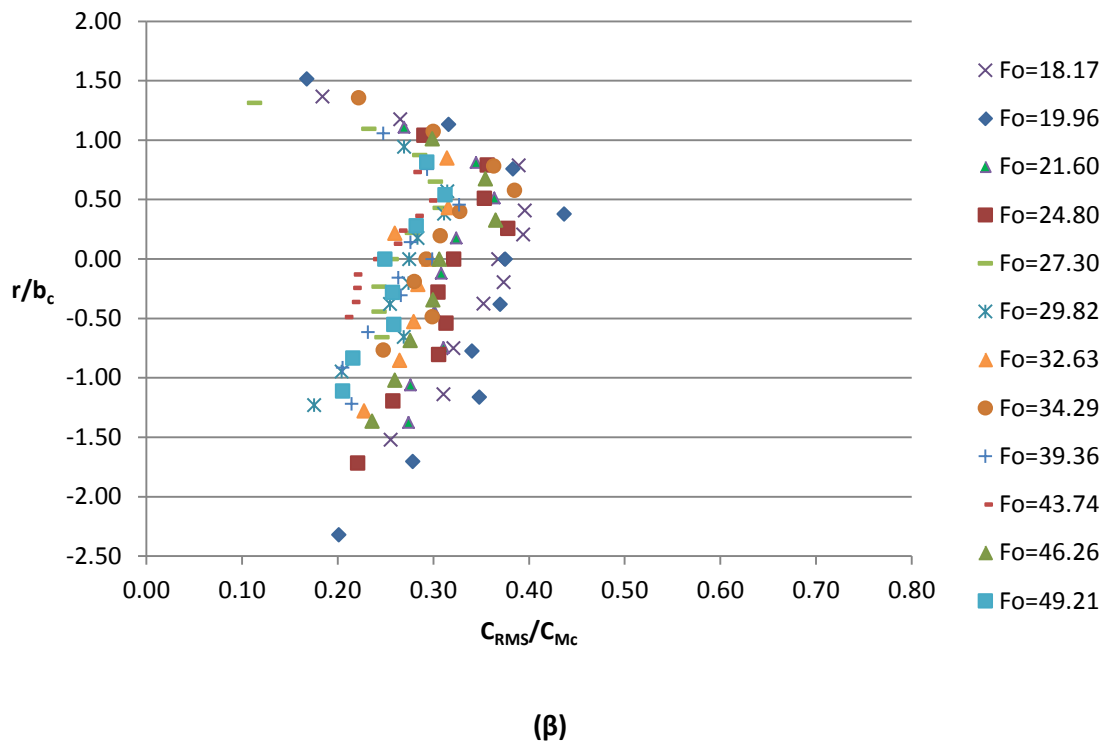
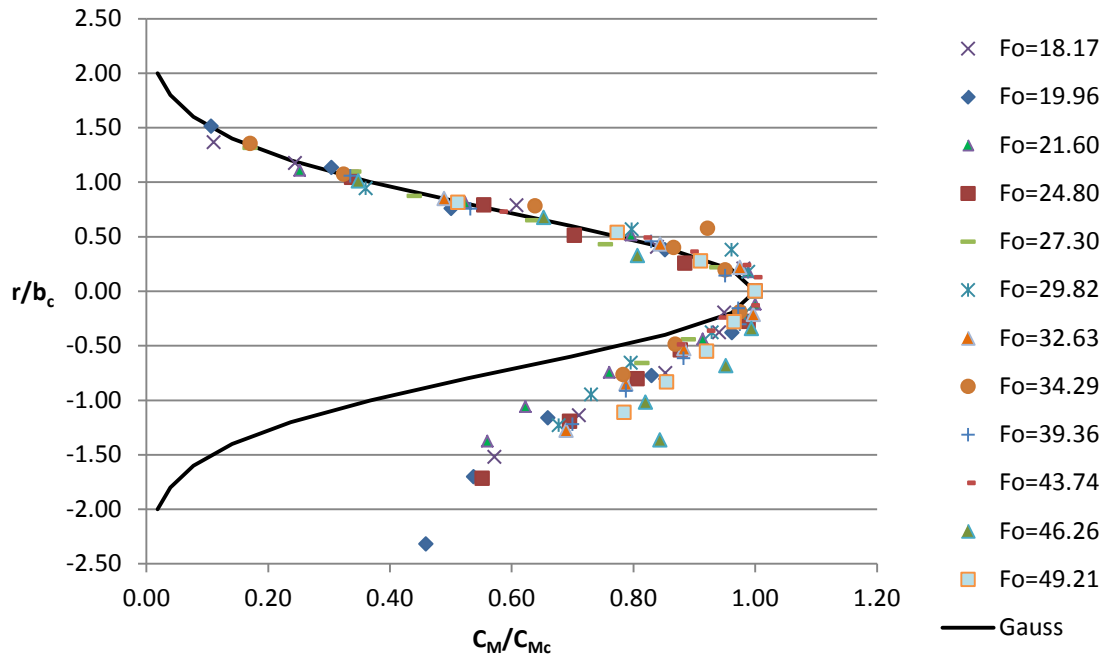
$$C_M = C_{Mc} \exp\left(-\frac{r^2}{b_c^2}\right) \Leftrightarrow \frac{C_M}{C_{Mc}} = \exp\left(-\frac{r^2}{b_c^2}\right)$$

Όπου b_c είναι το πλάτος της κατανομής της συγκέντρωσης και ορίζεται ως η απόσταση από τον άξονα στην οποία η μέση συγκέντρωση έχει τιμή $1/e \approx 37\%$ αυτής του άξονα. Λογαριθμίζοντας τα μέλη της εξίσωσης, προκύπτει:

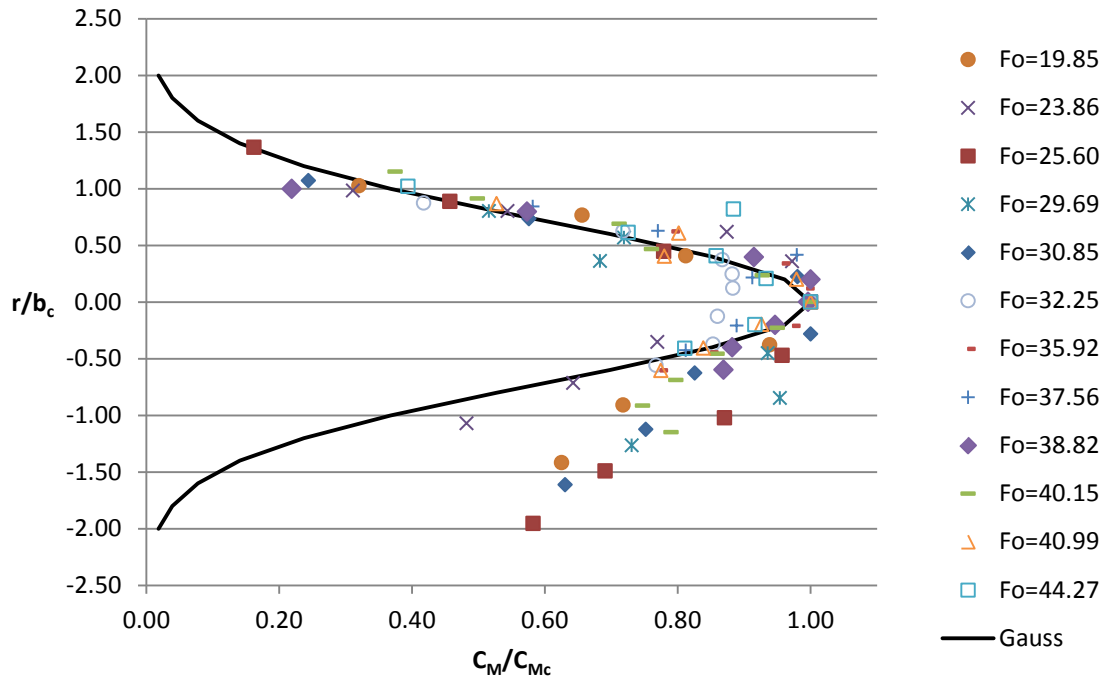
$$\ln \frac{C_M}{C_{Mc}} = -\frac{r^2}{b_c^2}$$

Σύμφωνα με την εργασία Παπακωνσταντής (2009), το πλάτος b_c προσδιορίζεται με καλή ακρίβεια είτε με δοκιμές είτε με γραμμική συσχέτιση των τιμών του πρώτου μέλους και των τιμών r^2 για κάθε πείραμα. Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει η ποσότητα $-b_c^{-2}$ ως κλίση της ευθείας, οπότε προσδιορίζεται το πλάτος b_c .

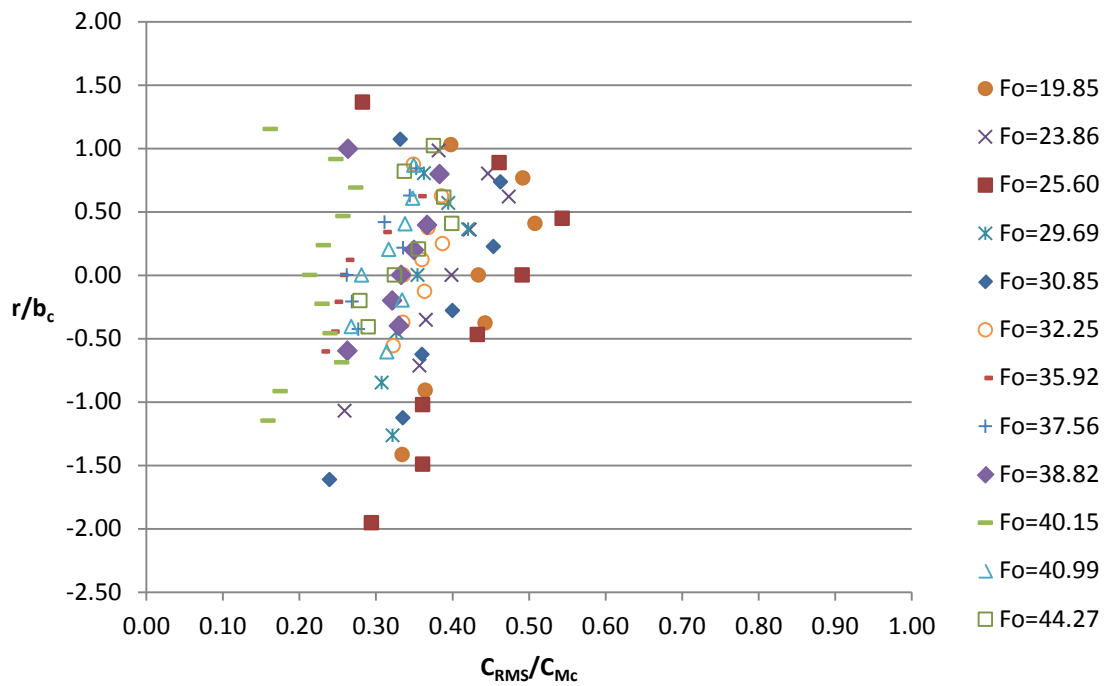
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ξανά στα Σχήματα 6-7 έως 6-9, έχοντας αυτή τη φορά στον κατακόρυφο άξονα την απόσταση από τον άξονα r αδιαστατοποιημένη με το πλάτος της κατανομής b_c . Στις κατανομές της μέσης συγκέντρωσης, έχει σχεδιαστεί η κατανομή Gauss για λόγους σύγκρισης.



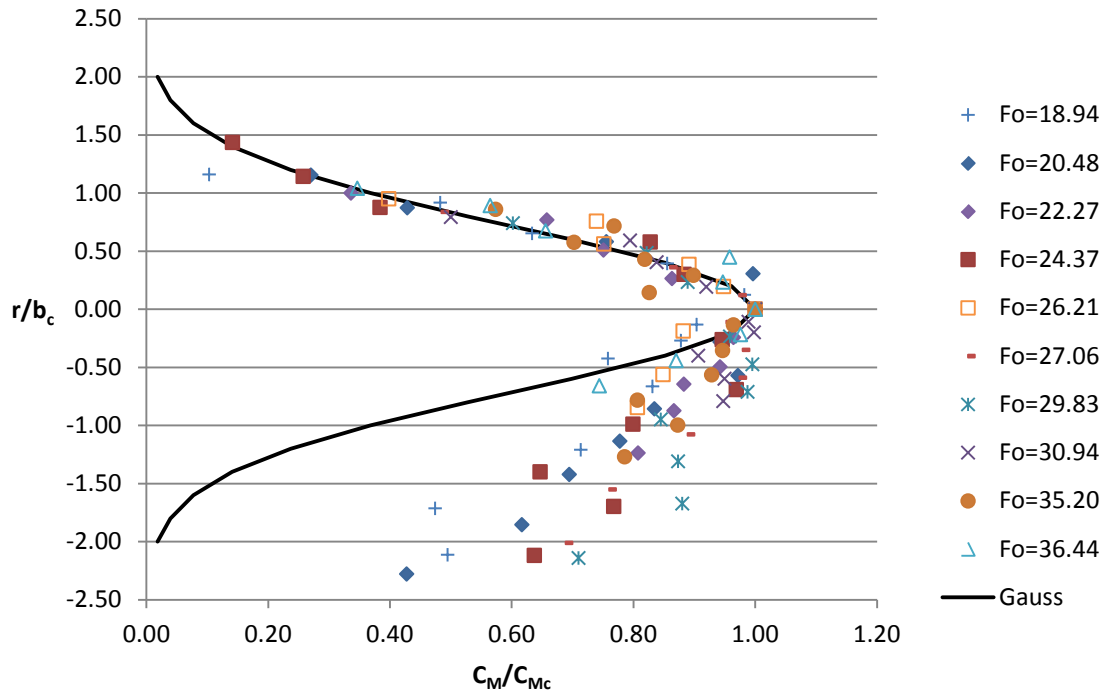
Σχήμα 6-7: Κατανομή ως προς την κατακόρυφη απόσταση από τον άξονα της φλέβας στη θέση του τερματικού ύψους (α) της μέσης συγκέντρωσης και (β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της για γωνία 35°



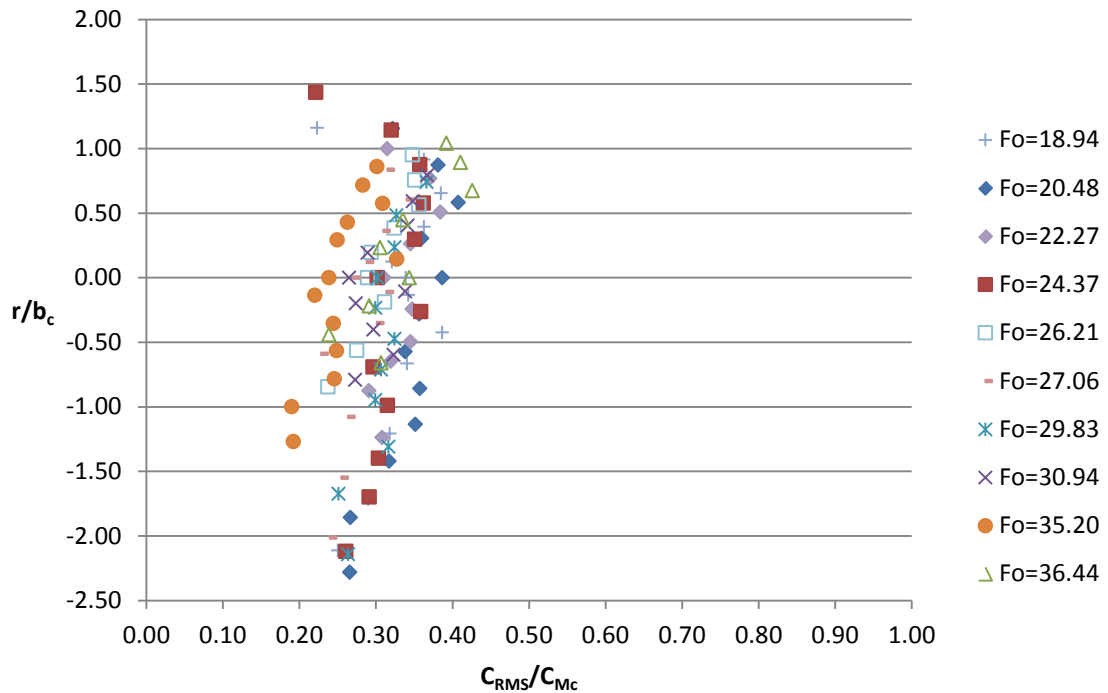
(α)



Σχήμα 6-8: Κατανομή ως προς την κατακόρυφη απόσταση από τον άξονα της φλέβας στη θέση του θερματικού ύψους (α) της μέσης συγκέντρωσης και (β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της για γωνία 50°



(α)



Σχήμα 6-9: Κατανομή ως προς την κατακόρυφη απόσταση από τον άξονα της φλέβας στη θέση του τερματικού ύψους (α) της μέσης συγκέντρωσης και (β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της για γωνία 70°

Είναι η πρώτη φορά που παρουσιάζονται μετρήσεις συγκέντρωσης για γωνίες 35°, 50° και 70°. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα, η μέση συγκέντρωση συμφωνεί με την

κατανομή Gauss από το εξωτερικό όριο της φλέβας έως τον άξονα ($r=0$). Ιδιαίτερα για τη γωνία των 35° , η ακολουθία της κατανομής με την Gauss είναι εξαιρετική, καθώς η ροή είναι περισσότερο ομαλή και η αλληλεπίδραση ανοδικής και καθοδικής είναι λιγότερο έντονη. Όσον αφορά το τμήμα της κατανομής κάτω από τον άξονα, φαίνεται να υπάρχει απόκλιση από την κατανομή Gauss. Παρατηρείται ότι η φλέβα εκτείνεται προς τα κάτω με μεγαλύτερο πλάτος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο και οφείλεται στις μάζες που αποκολλώνται από την ροή, κινούνται καθοδικά, σχεδόν κατακόρυφα και αυξάνουν τις συγκεντρώσεις από τον άξονα και κάτω.

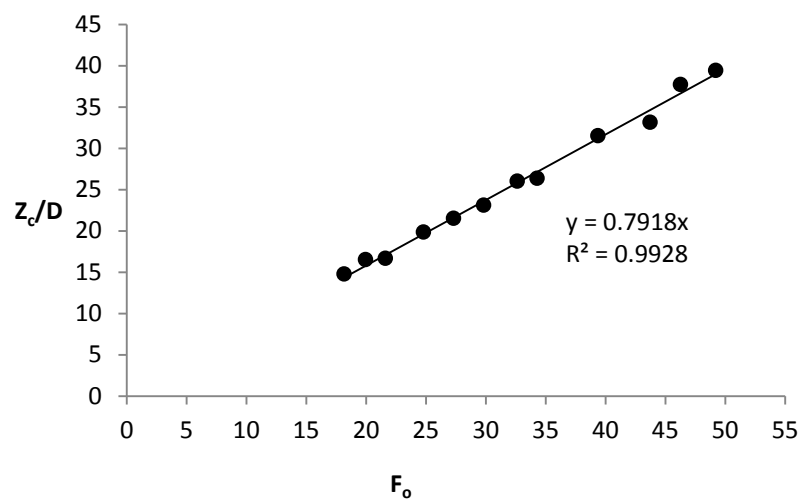
Η κατανομή της έντασης της τύρβης είναι ασύμμετρη και η μέγιστη τιμή της παρουσιάζεται πιο πάνω από τον άξονα της φλέβας περίπου σε απόσταση $r/b_c=0.54$. Η εκκεντρότητα αυτή είχε παρατηρηθεί επίσης στην εργασία Παπακωνσταντής (2009) για γωνίες 45° , 60° και 75° και ακόλουθα από τον Oliver (2012) για 15° , 30° , 45° , 60° και 75° . Τα αποτελέσματα της παρούσας παρουσιάζουν διακυμάνσεις, ιδιαίτερα στη γωνία των 50° . Παρόλα αυτά, η κατανομή της έντασης της τύρβης παρουσιάζει μέση μέγιστη τιμή 0.35 για τη γωνία των 35° , 0.41 για τη γωνία των 50° και 0.37 για τη γωνία των 70° . Οι μετρήσεις αν και παρουσιάζουν διαφορές με εκείνες που προτείνονται από τους άλλους ερευνητές (Πίνακας 6-2) βρίσκονται εντός του εύρους που έχει εκτιμηθεί. Η μέγιστη τιμή της έντασης για ροή πλουμίου σε κυκλικές ανωστικές φλέβες έχει βρεθεί περίπου 0.40, ενώ για ροή φλέβας περίπου 0.25 (Papanicolaou & List, 1987). Οι μετρήσεις δείχνουν ότι η ροή στη θέση του τελικού τερματικού ύψους ανόδου έχει γίνει πλούμιο ή τείνει να γίνει πλούμιο.

Πίνακας 6-2: Σύγκριση μέσων τιμών έντασης τύρβης C_{RMS}/C_{Mc} και μεταβολή της με τη γωνία

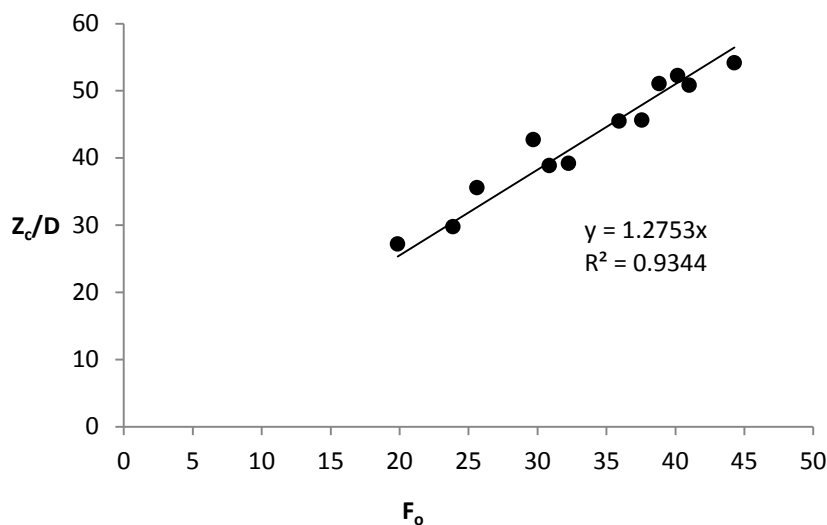
θ_0	Παρούσα	Oliver (2012)	Παπακωνσταντής (2009)
15°		0.22	
30°		0.27	
35°	0.35		
45°		0.31	0.43
50°	0.41		
60°		0.35	0.45
70°	0.37		
75°		0.37	0.45

6.3 Ύψος άξονα φλέβας

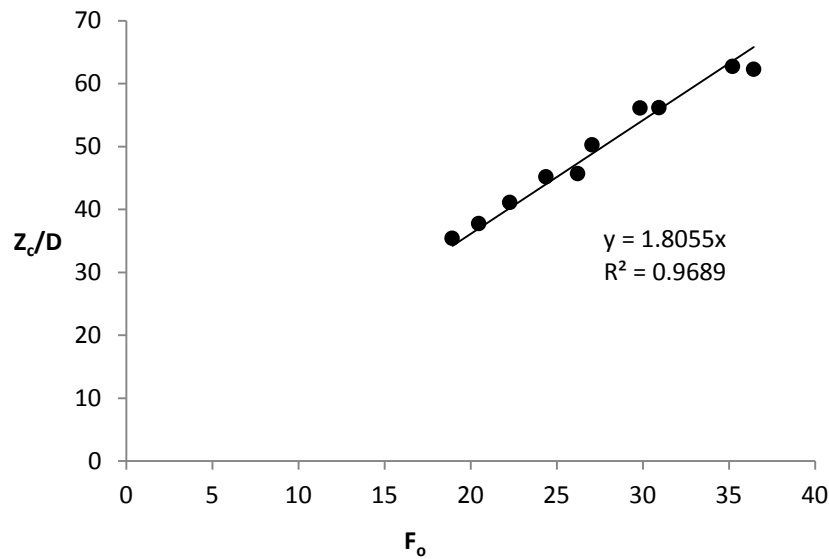
Σε κάθε πείραμα στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου της φλέβας προσδιορίστηκε το ύψος Z_c όπου μεγιστοποιείται η μέση συγκέντρωση. Οι μετρήσεις αδιαστατοποιούνται με τη διάμετρο του στομίου εκροής D , και παρουσιάζονται γραφικά ως προς τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude F_o . Με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, προσδιορίζεται η εξίσωση της ευθείας που ταιριάζει στις πειραματικές τιμές και διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Σύμφωνα με τα Σχήματα 6-10, 6-11 και 6-12, οι μετρήσεις επαληθεύουν τη θεώρηση του Πίνακα 6-1 με ακρίβεια, καθώς ο συντελεστής συσχέτισης R^2 προσεγγίζει τη μονάδα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 6-3.



Σχήμα 6-10: Συσχέτιση του μέγιστου ύψους άξονα με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 35°



Σχήμα 6-11: Συσχέτιση του μέγιστου ύψους άξονα με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 50°

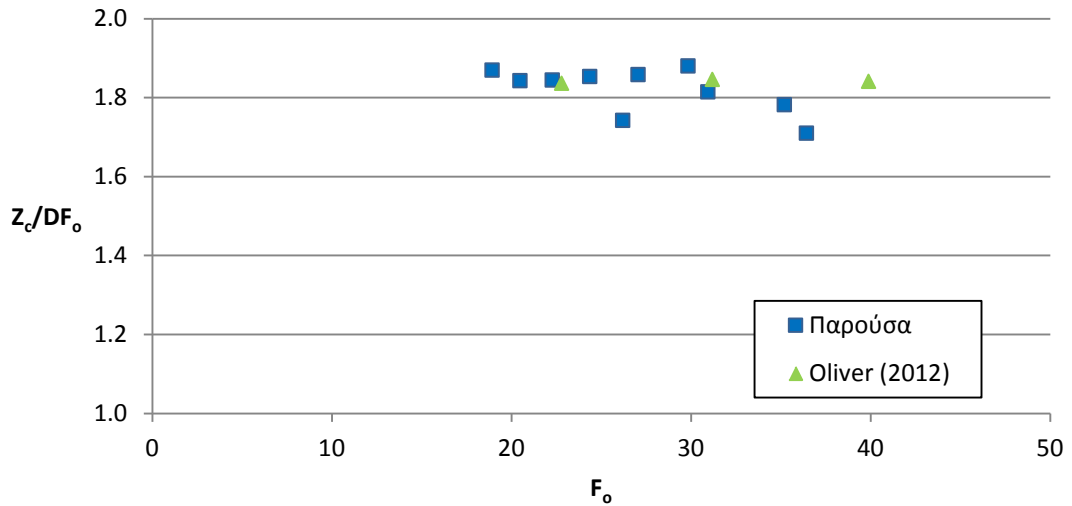


Σχήμα 6-12: Συσχέτιση του μέγιστου ύψους άξονα με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 70°

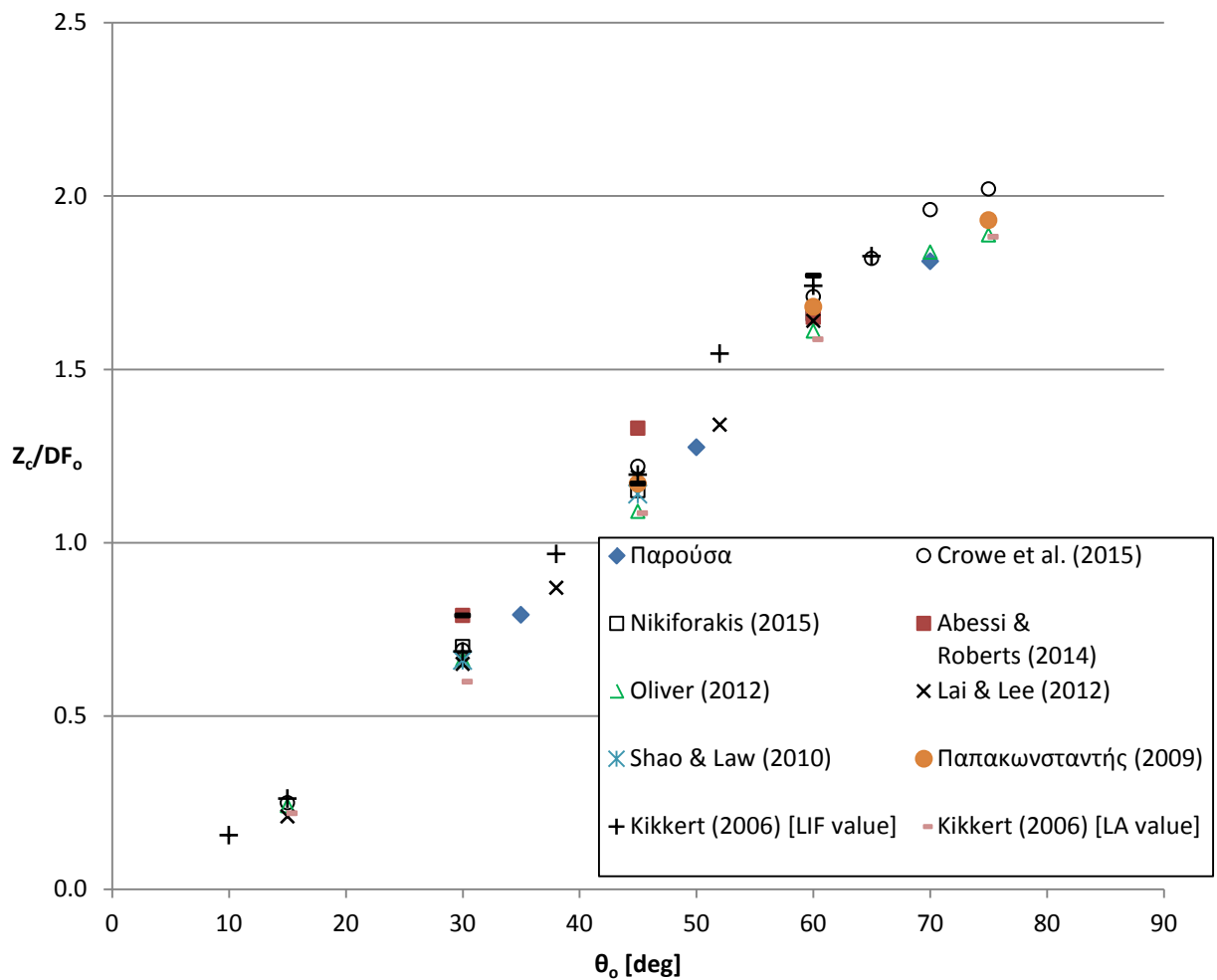
Πίνακας 6-3: Αδιάστατες τιμές μέγιστου ύψους άξονα φλέβας για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

θ_0	Z_c/DF_0 (C ₅)
35°	0.79
50°	1.28
70°	1.81

Ακολουθεί σύγκριση των υψών του άξονα της φλέβας με αποτελέσματα που έχουν προταθεί από τον Oliver (2012) για τη γωνία των 70°. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-13 η συμφωνία μεταξύ των μετρήσεων είναι εξαιρετική. Οι μέσες τιμές της παρούσας εργασίας και των άλλων ερευνητικών εργασιών συγκρίνονται στο Σχήμα 6-14. Τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας δείχνουν ακριβή, καθώς συμφωνούν ικανοποιητικά με τις μετρήσεις που έχουν παρουσιαστεί.

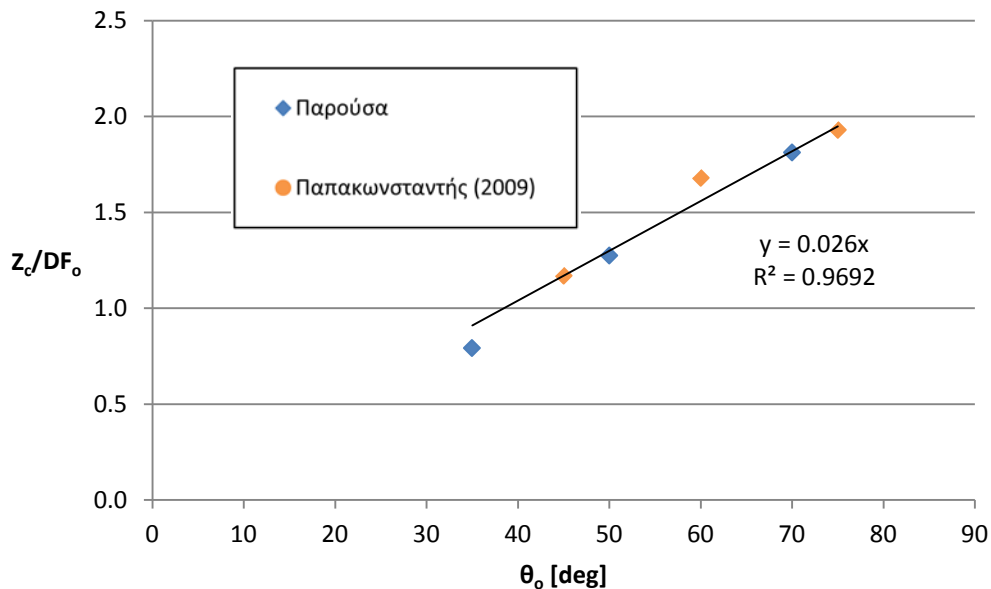


Σχήμα 6-13: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων για το μέγιστο ύψος του άξονα φλέβας που παροχετεύεται υπό γωνία 70°



Σχήμα 6-14: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων για το μέγιστο ύψος του άξονα της φλέβας

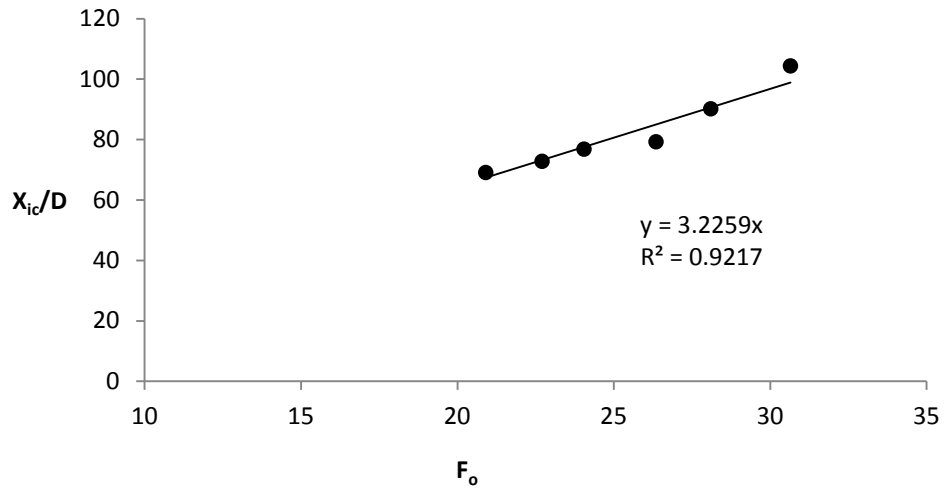
Στο Σχήμα 6-15 που ακολουθεί, πραγματοποιείται συσχέτιση των σταθερών $C_5(\theta_o)$ για το μέγιστο ύψος του άξονα όπως προέκυψαν από τα πειράματα της παρούσας για τις γωνίες 35° , 50° και 70° σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα Παπακωνσταντής (2009) για τις γωνίες 45° , 60° και 75° . Η συσχέτιση τους μπορεί να αποτυπωθεί ικανοποιητικά με μια γραμμική ευθεία.



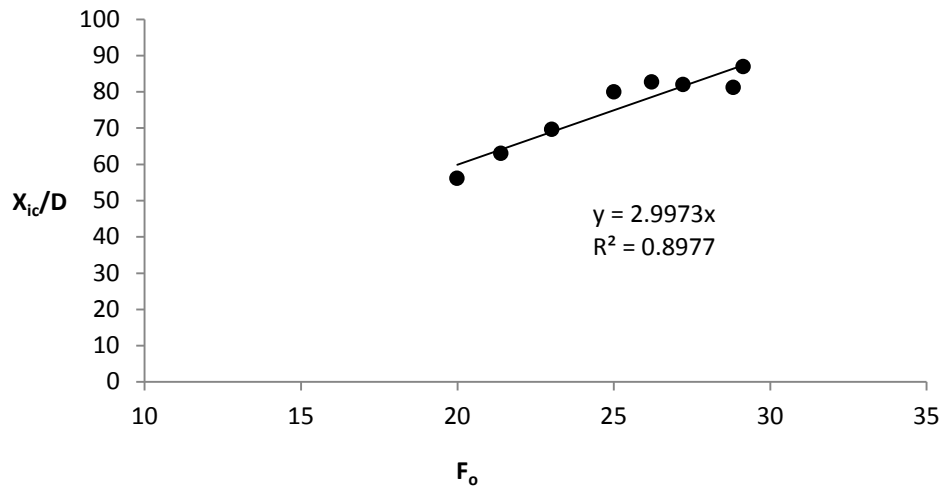
Σχήμα 6-15: Γραμμική συσχέτιση μέγιστου ύψους άξονα με τη γωνία παροχέτευσης ($35^\circ \leq \theta_o \leq 75^\circ$)

6.4 Οριζόντια απόσταση άξονα φλέβας από στόμιο παροχέτευσης στη θέση επιστροφής

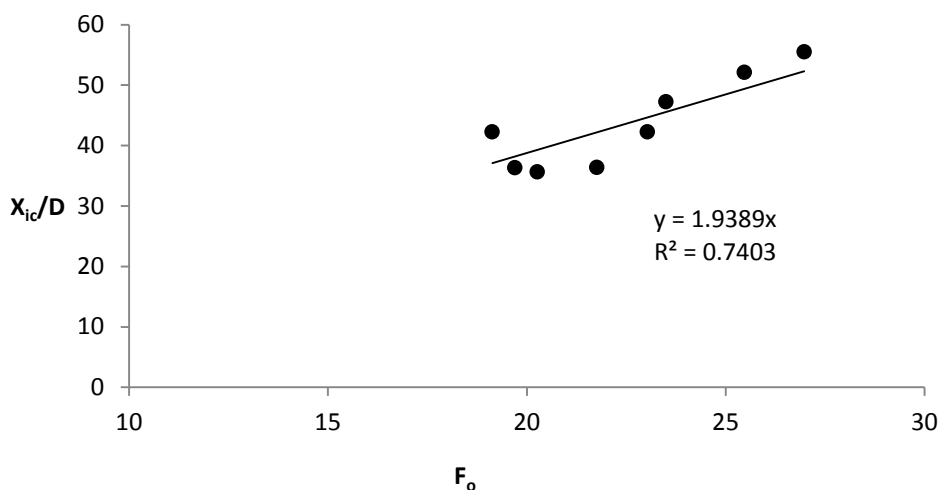
Σε κάθε πείραμα στην περιοχή επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης προσδιορίστηκε η οριζόντια απόσταση από το στόμιο X_{ic} μέχρι τη θέση όπου μεγιστοποιείται η μέση συγκέντρωση, δηλαδή προσδιορίστηκε η οριζόντια απόσταση του άξονα της φλέβας από το στόμιο. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι σταθερές C_6 για κάθε γωνία παροχέτευσης μέσω γραμμικής συσχέτισης της αδιάστατης απόστασης X_{ic}/D με τον αριθμό F_o . Σημειώνεται ότι η θέση του άξονα προσδιορίστηκε προσεγγιστικά, καθώς πραγματοποιούνταν δειγματοληψία σε 4 σημεία. Η μέτρηση πλήρους κατανομής δεν ήταν δυνατή, εξαιτίας αφενός των πολύ μικρών συγκεντρώσεων του υγρού της φλέβας και αφετέρου του ρεύματος πυκνότητας που επηρεάζει τη ροή σε σύντομο χρονικό διάστημα. Τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στα Σχήματα 6-16, 6-17 και 6-18 και οι μέσες τιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 6-4. Οι μετρήσεις επαληθεύουν ικανοποιητικά τη θεώρηση $\frac{X_{ic}}{DF_o} = C_6(\theta_o)$.



Σχήμα 6-16: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άξονα στην περιοχή επιστροφής της φλέβας με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 35°



Σχήμα 6-17: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άξονα στην περιοχή επιστροφής της φλέβας με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 50°

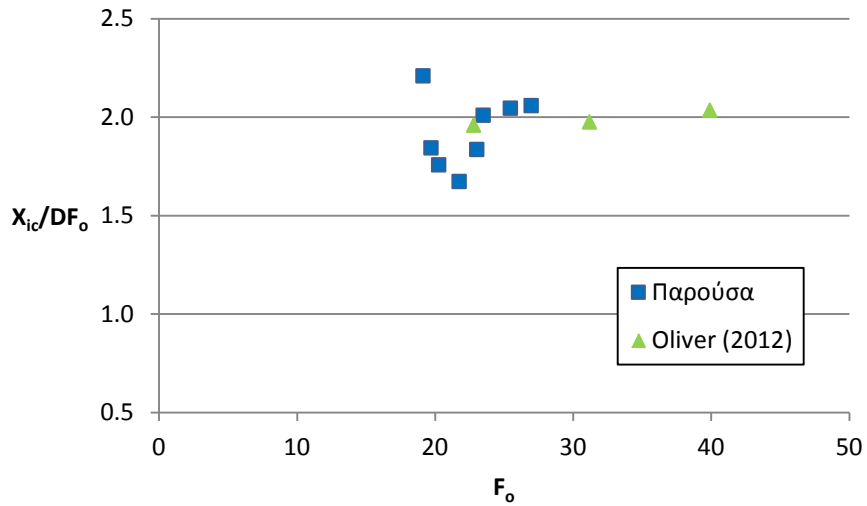


Σχήμα 6-18: Συσχέτιση της οριζόντιας απόστασης του άξονα στην περιοχή επιστροφής της φλέβας με τις παραμέτρους της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 70°

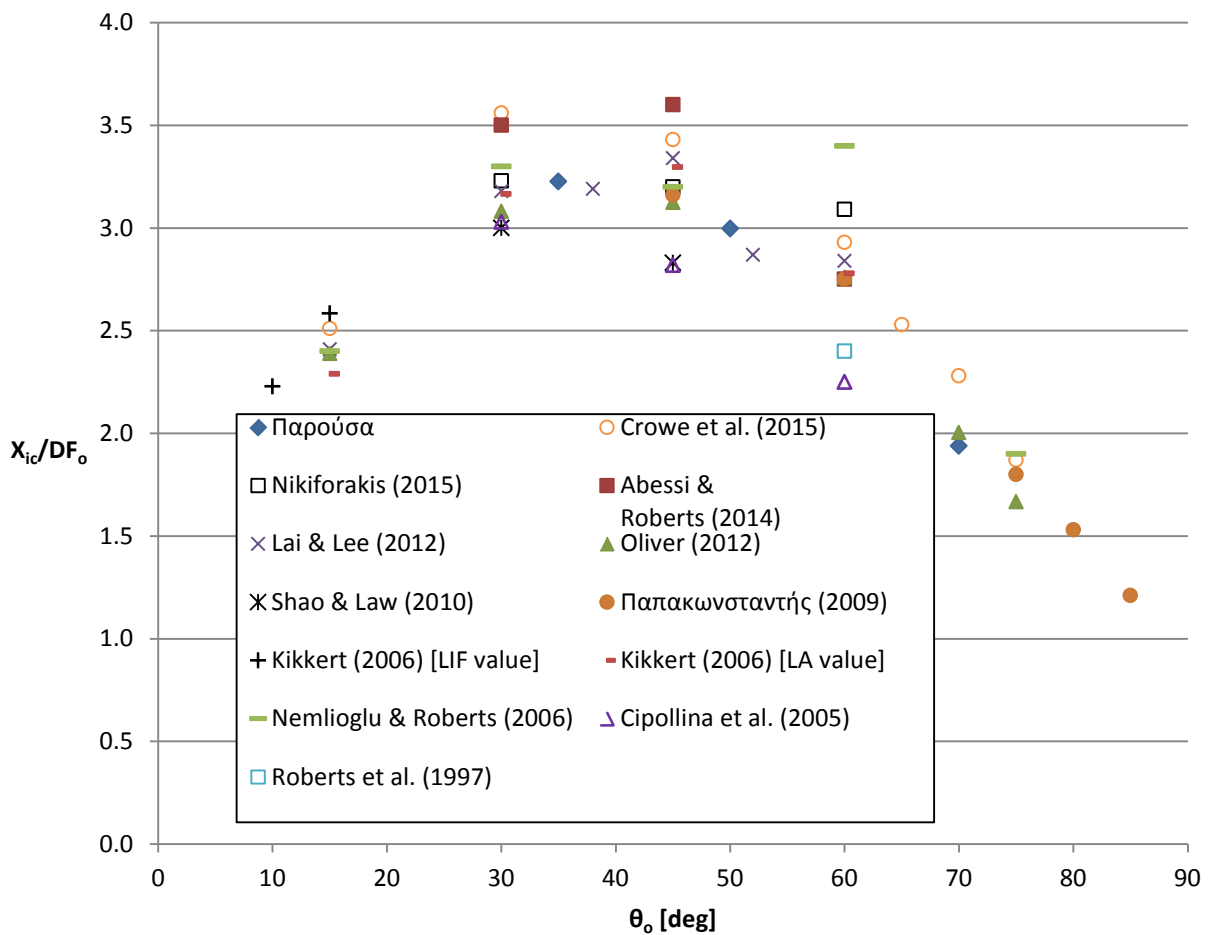
Πίνακας 6-4: Αδιάστατες τιμές οριζόντιας απόστασης άξονα στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

θ_o	X_{ic}/DF_o (C_6)
35°	3.23
50°	3.00
70°	1.94

Στο Σχήμα 6-19 που ακολουθεί, συγκρίνονται οι μετρήσεις της παρούσας με τις μετρήσεις του Oliver (2012) για γωνία παροχέτευσης 70°. Τα αποτελέσματα συμφωνούν ικανοποιητικά, αν και τα αποτελέσματα της παρούσας παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σύγκριση των μέσων τιμών του Πίνακα 6-4 με προτεινόμενες τιμές άλλων ερευνητικών εργασιών για διάφορες γωνίες παροχέτευσης (Σχήμα 6-20). Τα αποτελέσματα της παρούσας και των προηγούμενων εργασιών παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά με τις τιμές της παρούσας να συμφωνούν περισσότερο με εκείνες των Oliver (2012), Lai & Lee (2012) και Παπακωνσταντής (2009) και λιγότερο με εκείνες των Abessi & Roberts (2015), Crowe et al (2015), Shao & Law (2010) και Cipollina et al (2005).

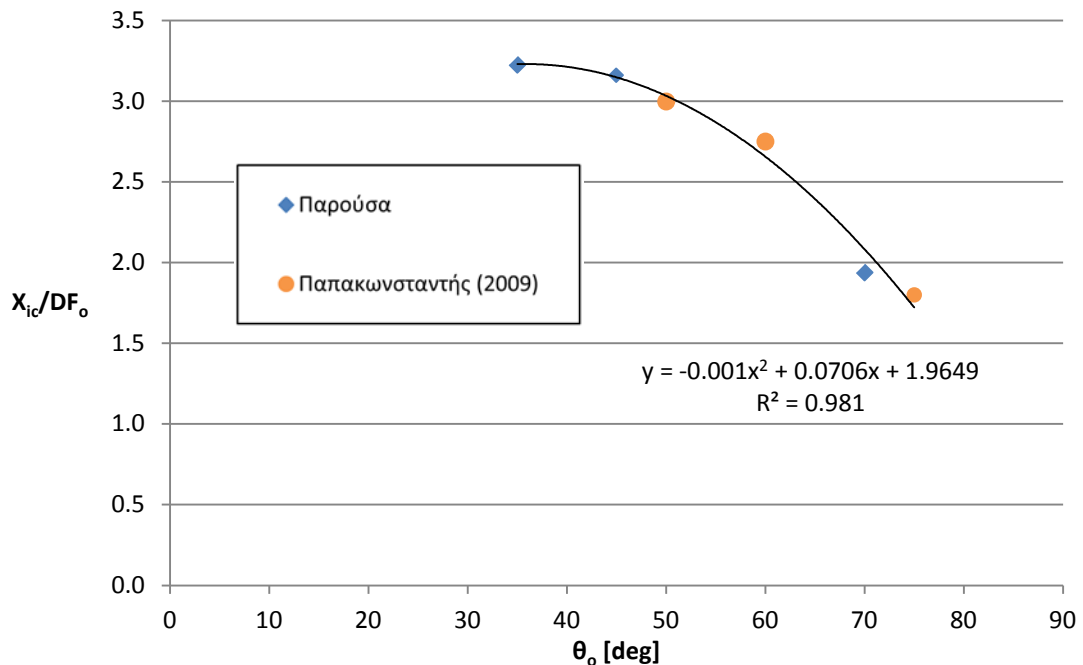


Σχήμα 6-19: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων για την οριζόντια απόσταση του άξονα στην περιοχή επιστροφής της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 70°



Σχήμα 6-20: Μεταβολή της αδιάστατης οριζόντιας απόστασης του άξονα στην περιοχή επιστροφής της φλέβας με τη γωνία παροχέτευσης

Στο Σχήμα 6-21 που ακολουθεί παρουσιάζονται η αδιαστατοποιημένη απόσταση X_{ic}/DF_o όπως προέκυψε από την παρούσα εργασία για τις γωνίες 35° , 50° και 70° σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα Παπακωνσταντής (2009) για τις γωνίες 45° , 60° , και 75° . Τα αποτελέσματα αυτά συσχετίζονται ικανοποιητικά με πολυωνυμική καμπύλη 2^{ου} βαθμού.



Σχήμα 6-21: Πολυωνυμική συσχέτιση οριζόντιας απόστασης του άξονα από το στόμιο παροχέτευσης με τη γωνία παροχέτευσης ($35^\circ \leq \theta_o \leq 75^\circ$)

6.5 Αξονική αραίωση στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης

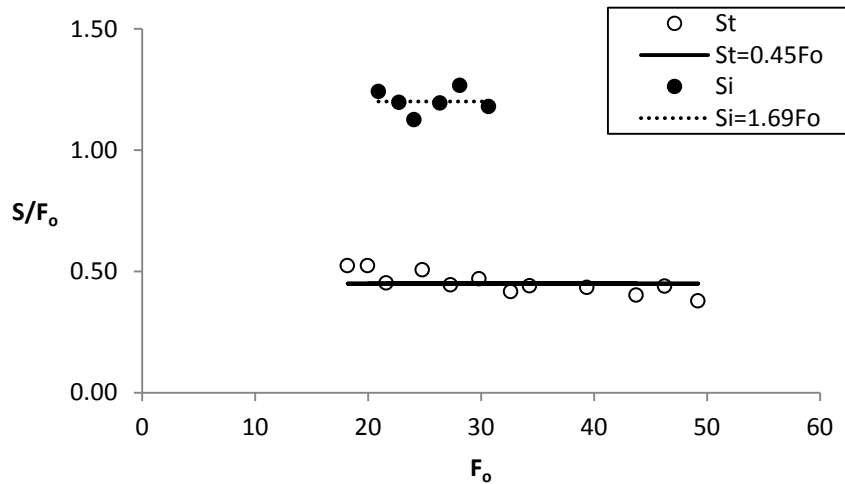
Η αραίωση σε κάποια θέση του άξονα της φλέβας ορίζεται ως ο λόγος της αρχικής συγκέντρωσης της φλέβας προς τη μέση αξονική συγκέντρωση. Ο αποδέκτης όμως έχει μια σταθερή συγκέντρωση C_a που πρέπει να αφαιρείται, συνεπώς η αραίωση υπολογίζεται ως εξής:

$$S = \frac{C_o - C_a}{C_{Mc} - C_a}$$

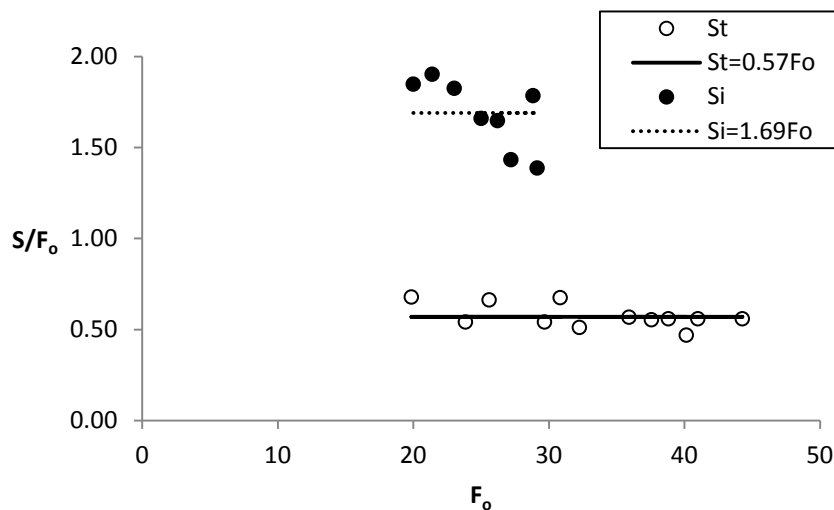
Οι τιμές C_o και C_a είναι γνωστές και μετρημένες με το όργανο YSI (παράγραφος 3.9) και η τιμή C_{Mc} είναι η μέγιστη συγκέντρωση (συγκέντρωση στον άξονα) που έχει προσδιοριστεί από τις μετρήσεις στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης.

Η αραίωση αδιαστατοποιημένη με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude παραμένει σταθερή σύμφωνα με τον Πίνακα 6-1. Για τον έλεγχο της ισχύος αυτής της θεώρησης που

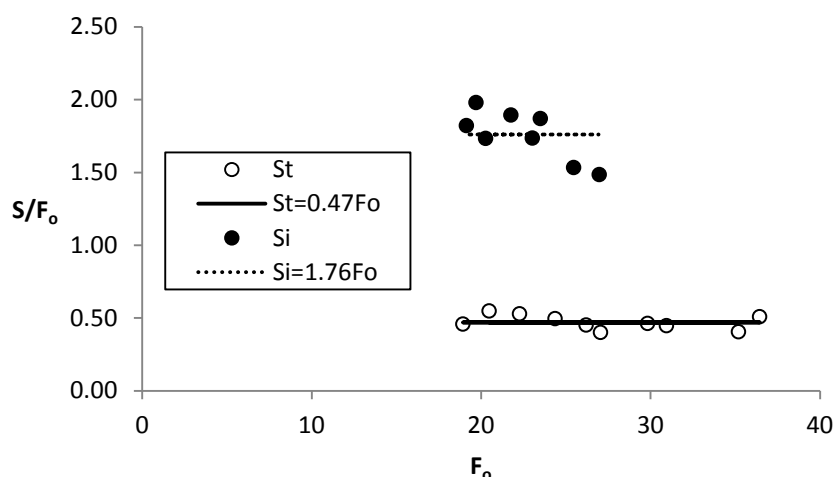
προκύπτει από διαστατική ανάλυση (Παπακωνσταντής, 2009) πραγματοποιείται συσχέτιση για κάθε γωνία παροχέτευσης των τιμών της αξονικής αραιώσης S_t στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου και S_i στη θέση πρόσπτωσης της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude (Σχήματα 6-22 έως 6-24). Οι σταθερές C_7 και C_8 υπολογίζονται ως ο μέσος όρος των αδιάστατων τιμών S/F_o .



Σχήμα 6-22: Μεταβολή της αδιάστατης αξονικής αραιώσης στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας ως προς τον πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία 35°



Σχήμα 6-23: Μεταβολή της αδιάστατης αξονικής αραιώσης στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας ως προς τον πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία 50°



Σχήμα 6-24: Μεταβολή της αδιάστατης αξονικής αραιώσης στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας ως προς τον πυκνομετρικό αριθμό Froude για γωνία 70°

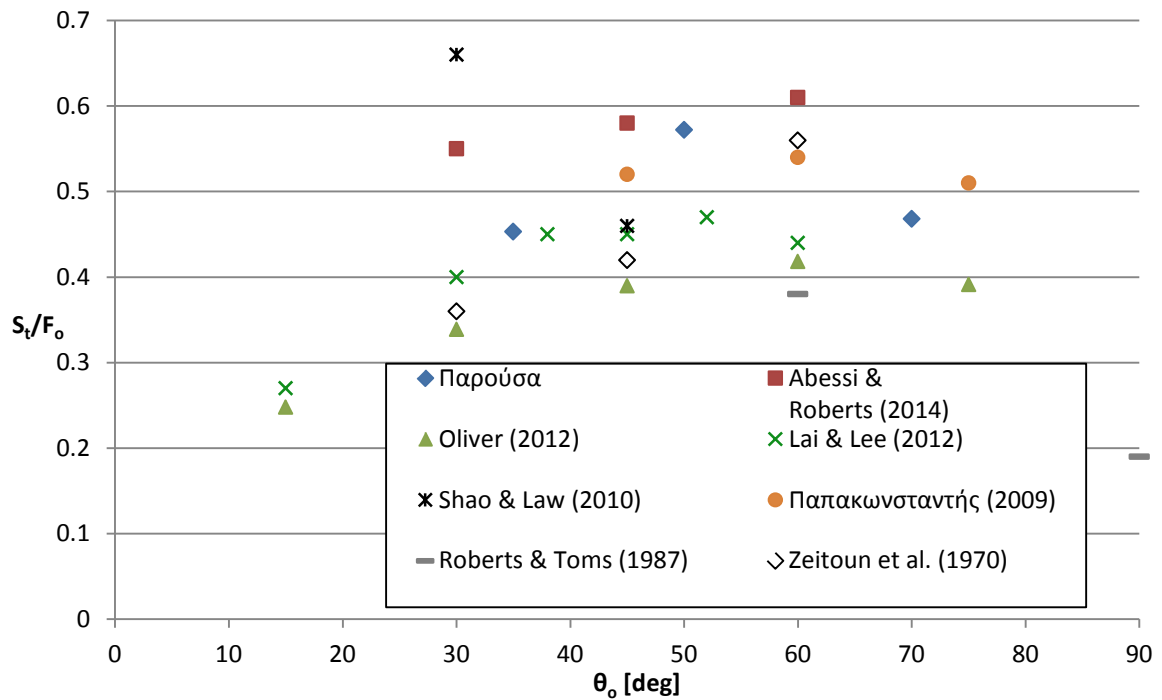
Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 6-5 που ακολουθεί. Για κάθε τιμή που προέκυψε δίδεται και το τυπικό σφάλμα της. Φαίνεται πως η διακύμανση της αξονικής αραιώσης στη θέση επιστροφής της φλέβας είναι μεγαλύτερη, γεγονός που αναμενόταν λόγω της μικρότερης δειγματοληψίας και των μικρών γενικά τιμών της συγκέντρωσης.

Πίνακας 6-5: Αδιάστατες τιμές αξονικής αραιώσης στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

θ_0	$S_t/F_o (C_7)$	$S_i/F_o (C_8)$
35°	0.45 ± 0.01	1.20 ± 0.02
50°	0.57 ± 0.02	1.69 ± 0.07
70°	0.47 ± 0.02	1.76 ± 0.06

Μέσες τιμές και αναλυτικά αποτελέσματα αξονικών αραιώσεων για γωνίες 35°, 50° και 70° δεν διατίθενται. Στο Σχήμα 6-25 φαίνεται η μεταβολή της αξονικής αραιώσης στη θέση του τερματικού ύψους ως προς τη γωνία παροχέτευσης σύμφωνα με τα αποτελέσματα διάφορων ερευνητών για μεγάλο εύρος γωνιών παροχέτευσης. Οι τιμές της αξονικής αραιώσης έχουν μεγάλη διακύμανση ιδιαίτερα στο εύρος 30°-60° όπου είναι διαθέσιμα και τα περισσότερα αποτελέσματα. Αν και τα αποτελέσματα της παρούσας δεν μπορούν να συγκριθούν ευθέως με τα αποτελέσματα άλλων εργασιών, μπορεί να γίνει σύγκριση της τάξης μεγέθους για παραπλήσιες γωνίες. Οι τιμές της παρούσας είναι μεγαλύτερες από εκείνες του Oliver (2012), ενώ ποιοτική συμφωνία υπάρχει με τις τιμές του Παπακωνσταντής (2009) και των Lai & Lee (2012) για τις 35°. Οι τιμές των Abessi & Roberts (2014) δείχνουν να είναι οι πιο αυξημένες αλλά πλησιάζουν την παρούσα για τις 50°.

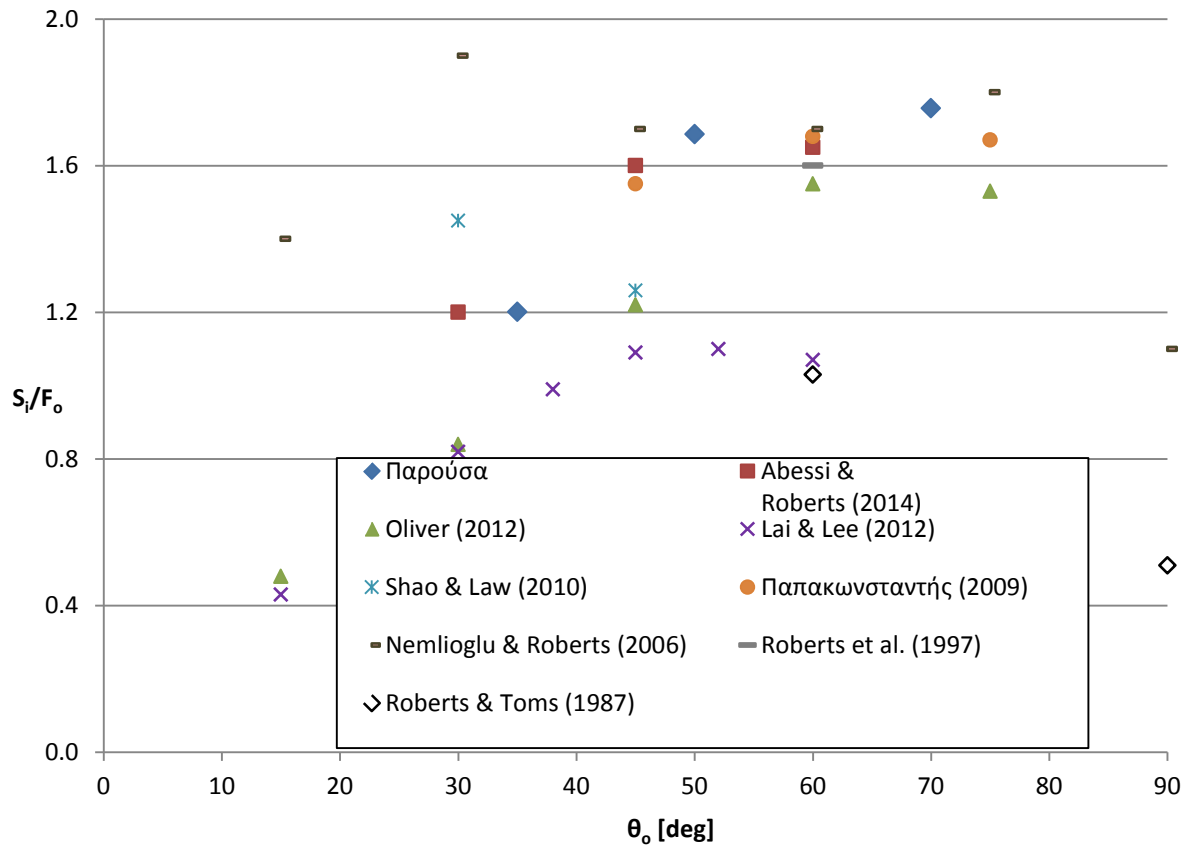
Τέλος τα αποτελέσματα των Shao & Law (2010) παρουσιάζουν σημαντικά μεγαλύτερη αραίωση στις 30° από ότι στις 45°, πράγμα που δεν έχει παρατηρηθεί σε άλλη εργασία.



Σχήμα 6-25: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων αξονικής αραίωσης στη θέση του τερματικού ύψους για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

Στο Σχήμα 6-26 συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας για την αξονική αραίωση στη θέση επιστροφής της φλέβας με εκείνα άλλων ερευνητών. Συμφωνία δείχνει να υπάρχει με τις τιμές του Παπακωνσταντής (2009) για γωνίες μεταξύ 45° και 75°, καθώς και με τις τιμές των Abessi & Roberts (2014) για γωνίες μεταξύ 30° και 60°. Οι Oliver (2012) και Lai & Lee (2012) παρουσιάζουν γενικά μικρότερες τιμές, αλλά μετά τις 60°, τα αποτελέσματα του Oliver (2012) συγκλίνουν με των υπόλοιπων ερευνητών.

Τα πειραματικά αποτελέσματα των ερευνητών για τις αξονικές αραιώσεις παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις. Ωστόσο οι αξονικές αραιώσεις δείχνουν να αυξάνονται μέχρι τις 45° και να είναι παραπλήσιες για γωνίες μεγαλύτερες των 45° και έως 75°.



Σχήμα 6-26: Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων αξονικής αραίωσης στη θέση επιστροφής της φλέβας για διάφορες γωνίες παροχέτευσης

7 Υπολογιστική διερεύνηση της ροής κεκλιμένων φλεβών αρνητικής άνωσης

7.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί πραγματοποιείται υπολογιστική διερεύνηση της ροής τυρβωδών κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία προς τα πάνω σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ολοκληρωματικό μοντέλο, το οποίο χρησιμοποιήθηκε από τους Paranicolaou et al. (2008) και τον Παπακωνσταντή (2009). Το μοντέλο αυτό βασίζεται σε κατανομές ταχύτητας και συγκέντρωσης κατά Gauss και παρουσιάζεται συνοπτικά στην επόμενη παράγραφο. Αναλυτική παρουσίαση υπάρχει στον Παπακωνσταντή (2009).

Οι Paranicolaou et al. (2008) μελέτησαν τη συμπαράσυρση σε ροές φλεβών αρνητικής άνωσης και έδειξαν ότι για την ορθή πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης απαιτείται μείωση του συντελεστή συμπαράσυρσης συγκριτικά με τις τιμές που εφαρμόζονται για την προσομοίωση της ροής φλεβών θετικής άνωσης. Είναι σαφές ότι η ορθή εκτίμηση της συμπαράσυρσης είναι ιδιαίτερα σημαντική για την προσομοίωση της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης. Έτσι το ολοκληρωματικό μοντέλο επιλύεται αριθμητικά διερευνώντας διάφορες περιπτώσεις σχετικά με τον υπολογισμό του τοπικού αριθμού Richardson και τη σχέση εκτίμησης του συντελεστή συμπαράσυρσης. Οι προβλέψεις των μοντέλων συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στα Κεφάλαια 5 και 6 για γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° και τα αποτελέσματα του Παπακωνσταντή (2009) για γωνίες 45° , 60° και 75° . Συγκεκριμένα οι παράμετροι της ροής της φλέβας που υπολογίζονται και συγκρίνονται είναι (Σχήμα 1-3):

- Το τελικό τερματικό ύψος ανόδου Z_f
- Το μέγιστο ύψος του άξονα Z_c
- Η οριζόντια απόσταση της θέσης όπου εμφανίζεται το τελικό τερματικό ύψος X_z
- Η οριζόντια απόσταση της θέσης όπου το εξωτερικό όριο προσπίπτει στο επίπεδο παροχέτευσης X_i
- Η οριζόντια απόσταση της θέσης όπου ο άξονας προσπίπτει στο επίπεδο παροχέτευσης X_{ic}
- Η αξονική αραίωση στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου S_f και στη θέση πρόσπτωσης S_i
- Η μέση αραίωση στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου S_{tave} και στη θέση πρόσπτωσης S_{iave} .

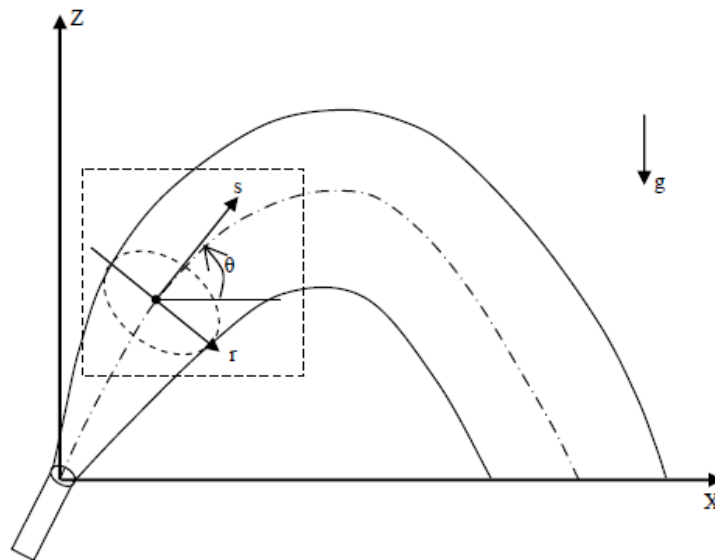
7.2 Ολοκληρωματικό μοντέλο - Σενάρια επίλυσης

Για τη μαθηματική περιγραφή του φυσικού προβλήματος χρησιμοποιούνται κυλινδρικές συντεταγμένες (s, r), όπου s είναι ο άξονας της φλέβας και r είναι η κάθετη στον άξονα ακτινική απόσταση (Σχήμα 7-1). Οι βασικές παράμετροι της ροής Q, M, B (Πίνακας 1-1) σε μια τυχαία θέση του άξονα ορίζονται ως εξής:

$$Q(s) = \int_A u(r, s) dA = \int_0^b u(r, s) 2\pi r dr \quad (7-1)$$

$$M(s) = \int_A u^2(r, s) dA = \int_0^b u^2(r, s) 2\pi r dr \quad (7-2)$$

$$B(s) = \int_A g \frac{(\rho_\alpha - \rho(r, s))}{\rho_\alpha} u(r, s) dA = \int_0^b g \frac{(\rho_\alpha - \rho(r, s))}{\rho_\alpha} u(r, s) 2\pi r dr \quad (7-3)$$

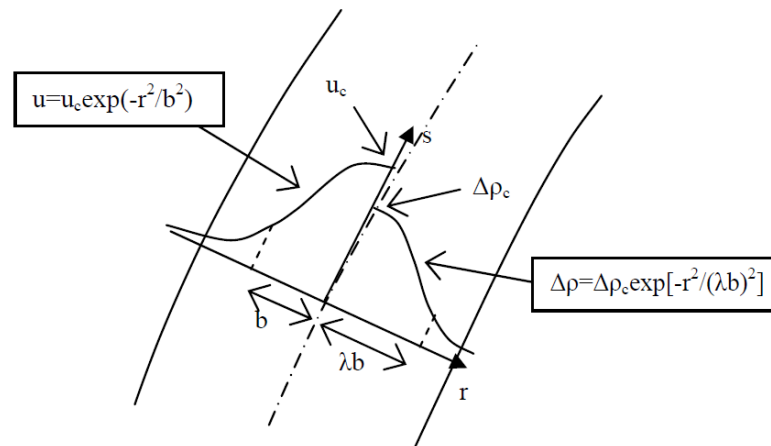


Σχήμα 7-1: Σύστημα συντεταγμένων προβλήματος (Παπακωνσταντής, 2009)

Σύμφωνα με τη θεωρία της αυτοομοιότητας, τα προφίλ της ταχύτητας u κατά τη διεύθυνση της ροής και της διαφοράς πυκνότητας $\Delta\rho$ ή ισοδύναμα της φαινόμενης επιτάχυνσης της βαρύτητας g' είναι όμοια σε κάθε διατομή και ακολουθούν κατανομή Gauss (Fisher et al. 1979):

$$u = u_c \exp(-r^2/b^2), \quad g' = g'_c \exp(-r^2/(\lambda b)^2) \quad (7-4)$$

όπου λ είναι ο λόγος των πλατών της κατανομής της συγκέντρωσης (ή της φαινόμενης επιτάχυνσης της βαρύτητας) b_c και της κατανομής της ταχύτητας b (Σχήμα 7-2). Σύμφωνα με τον Jirka (2004) η τιμή $\lambda=1.20$ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 7-2: Κατανομές Gauss ταχύτητας και διαφοράς πυκνότητας (Παπακωνσταντής, 2009)

Η μελέτη του φαινομένου της ανάπτυξης του πεδίου ροής μιας ανωστικής φλέβας επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις συνέχειας, ορμής και διατήρησης της μάζας του διαχεόμενου ρευστού. Με βάση τις εξισώσεις αυτές και λαμβάνοντας υπόψη τις εξισώσεις (7-1) ως (7-4), προκύπτουν διαφορικές εξισώσεις που συνιστούν ένα ολοκληρωματικό μοντέλο (Fan 1967, Fischer et al. 1979).

Ο Παπακωνσταντής (2009) παρουσίασε στη διδακτορική διατριβή του μια νέα μορφή ολοκληρωματικού μοντέλου με κατανομές Gauss και Top-Hat για την ταχύτητα και τη συγκέντρωση έτσι ώστε κάθε διαφορική εξίσωση να δίνει την παράγωγο μιας εκ των αγνώστων παραμέτρων. Ειδικότερα θεωρώντας κατανομές Gauss προέκυψε το ακόλουθο σύστημα των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν τη ροή (GM – Gaussian Model) και θα μας απασχολήσει στην παρούσα:

$$\frac{dQ}{ds} = 2\sqrt{2\pi}\alpha M^2 \quad (7-5)$$

$$\frac{dM}{ds} = \frac{1 + \lambda^2 QB}{2 M} \sin\theta \quad (7-6)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1 + \lambda^2 QB}{2 M^2} \cos\theta \quad (7-7)$$

$$\frac{dB}{ds} = 0 \quad (7-8)$$

$$\frac{dX}{ds} = \cos\theta \quad (7-9)$$

$$\frac{dZ}{ds} = \sin\theta \quad (7-10)$$

όπου α είναι ο συντελεστής συμπαράσυρσης σύμφωνα με τους Morton et al. (1956). Το σύστημα των έξι εξισώσεων του μοντέλου έχει 6 αγνώστους, τις παραμέτρους Q , M , B , θ , X , Z και επιλύεται αριθμητικά μέσω μιας ρουτίνας Runge - Kutta 4^{ης} τάξης, ορίζοντας τις αρχικές τιμές των παραμέτρων, τον συντελεστή συμπαράσυρσης α και την παράμετρο λ .

Με βάση την υπόθεση της συμπαράσυρσης (entrainment hypothesis), η ταχύτητα συμπαράσυρσης από το περιβάλλον ρευστό v_e είναι ανάλογη της αξονικής ταχύτητας στην εκάστοτε θέση u_c (Morton et al., 1956):

$$v_e = -\alpha u_c$$

Ο συντελεστής συμπαράσυρσης α δεν είναι σταθερός και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (Fischer et al. 1979):

$$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2} \quad (7-11)$$

όπου οι συντελεστές α_j , α_p είναι οι συντελεστές συμπαράσυρσης που αντιστοιχούν στην απλή φλέβα και στο πλούμιο αντίστοιχα και $Ri(s)$ είναι ο τοπικός αριθμός Richardson, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$Ri(s) = \frac{Q(s)|B(s)|^{1/2}}{M(s)^{5/4}} > 0 \quad (7-12)$$

Ο τοπικός αριθμός Richardson μεταβάλλεται από την αρχική τιμή του μέχρι την τιμή Ri_p που αντιστοιχεί στον αριθμό Richardson της ροής πλουμίου ($Ri(s) \leq Ri_p$). Συνεπώς, ο συντελεστής α μεταβάλλεται από την τιμή α_j έως στην τιμή α_p .

Σε μία φλέβα αρνητικής άνωσης, ο τοπικός αριθμός Richardson υψωμένος στο τετράγωνο μπορεί εναλλακτικά να υπολογισθεί, διατηρώντας το αρνητικό πρόσημο της ειδικής άνωσης B :

$$Ri(s)^2 = \frac{Q(s)^2 B(s)}{M(s)^{5/2}} < 0 \quad (7-13)$$

Ο υπολογισμός αυτός επιτρέπει στο συντελεστή συμπαράσυρσης να πάρει τιμές μικρότερες του α_j .

Σύμφωνα με τη θεώρηση των Jirka (2004) και Lai & Lee (2012) για την προσομοίωση φλεβών αρνητικής άνωσης, η τοπική γωνία της φλέβας θ ως προς το οριζόντιο επίπεδο επηρεάζει το συντελεστή συμπαράσυρσης α , ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \sin\theta \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2} \quad (7-14)$$

Έτσι επειδή στον ανοδικό κλάδο της ροής $Ri^2 < 0$, $\sin\theta > 0$ ο συντελεστής α λαμβάνει τιμές μικρότερες της τιμής α_j , ενώ στον καθοδικό κλάδο ($Ri^2 < 0$, $\sin\theta < 0$) ο συντελεστής α λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της τιμής α_j .

Η θέση εφαρμογής των αρχικών συνθηκών τοποθετείται σε κάποια απόσταση s_0 από την πηγή, μετά από την οποία ξεκινά η αυτοομοιότητα. Ακολουθώντας την προσέγγιση των Paranicolaou et al. (2008) και Παπακωνσταντής (2009), η εικονική αφετηρία (virtual origin) της φλέβας βρίσκεται σε απόσταση $s_0 = 3.28D$ από την πηγή κατά τη διεύθυνση του άξονα της φλέβας (D η διάμετρος του στομίου παροχέτευσης).

Στην επίλυση του μοντέλου έγιναν τρεις διαφορετικές θεωρήσεις που αφορούν είτε τον τρόπο υπολογισμού του συντελεστή συμπαράσυρσης α είτε τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στον υπολογισμό του, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7-1. Ειδικότερα, στο σενάριο *i*, το μοντέλο επιλύθηκε υπολογίζοντας τον συντελεστή συμπαράσυρσης α σύμφωνα με τη Σχέση (7-11) και θεωρώντας $\alpha_j = 0.0545$, $\alpha_p = 0.0875$ (Paranicolaou & List, 1988). Ο τοπικός αριθμός Richardson υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση (7-12) με τον περιορισμό $Ri(s) \leq Ri_p = 0.56$. Η ίδια θεώρηση έγινε και στο σενάριο *ii*, με τη διαφορά ότι θεωρήθηκε μειωμένη τιμή για την παράμετρο α_j ίση με 0.025. Σημειώνεται ότι τα σενάρια *i* και *ii* εξετάστηκαν από τον Παπακωνσταντής (2009), ενώ στην παρούσα εργασία διερευνάται ένα επιπλέον σενάριο βασισμένο στη θεώρηση των Jirka (2004) και Lai & Lee (2012) για τον τρόπο μεταβολής του συντελεστή συμπαράσυρσης. Έπειτα, κατά την επίλυση του μοντέλου σύμφωνα με το σενάριο *iii*, το μοντέλο επιλύθηκε υπολογίζοντας τον συντελεστή συμπαράσυρσης α σύμφωνα με τη Σχέση (7-14) και τον τοπικό αριθμό Richardson με το πρόσημο του ακολουθώντας τη Σχέση (7-13), με τον $Ri(s)$ να μεταβάλλεται χωρίς περιορισμό. Η παράμετρος $\lambda (= b_c/b)$ είναι σταθερή και ίση με την τιμή 1.20 σε όλα τα σενάρια.

Πίνακας 7-1: Παράμετροι για την επίλυση του ολοκληρωματικού μοντέλου

Σενάριο	Παράμετροι
i	$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2}$ $\alpha_j = 0.0545, \alpha_p = 0.0875$ $Ri(s)^2 = \left(\frac{Q(s) B(s) ^{1/2}}{M(s)^{5/4}} \right)^2 > 0$ $Ri(s) \leq Ri_p = 0.56$
ii	$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2}$ $\alpha_j = 0.025, \alpha_p = 0.0875$ $Ri(s)^2 = \left(\frac{Q(s) B(s) ^{1/2}}{M(s)^{5/4}} \right)^2 > 0$ $Ri(s) \leq Ri_p = 0.56$
iii	$\alpha = \alpha_j - (\alpha_j - \alpha_p) \sin\theta \frac{Ri(s)^2}{Ri_p^2}$ $\alpha_j = 0.0545, \alpha_p = 0.0875$ $Ri(s)^2 = \frac{Q(s)^2 B(s)}{M(s)^{5/2}} < 0$

Οι διαφορικές εξισώσεις των μοντέλων επιλύονται αριθμητικά για την περίπτωση αρχικού πυκνομετρικού Froude $F_o \approx 34$ και αρχικής πυκνομετρικής διαφοράς $\Delta\rho = 3\%$ για γωνίες παροχέτευσης $\theta_o = 15^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$ και 75° . Χρησιμοποιήθηκε ρουτίνα Runge-Kutta 4^{ης} τάξης με βήμα Δs κατά τη διεύθυνση του άξονα της φλέβας ίσο με 0.1 mm. Με αριθμητική επίλυση των εξισώσεων των μοντέλων μέσω αλγορίθμου στο λογισμικό Matlab R2013a προσδιορίζονται σε κάθε σημείο s της τροχιάς οι συντεταγμένες (X, Z) του άξονα της φλέβας, η γωνία θ που σχηματίζει ο άξονας με το οριζόντιο επίπεδο και τα μεγέθη Q, M, B. Από τα μεγέθη αυτά μπορούν να υπολογιστούν όλες οι παράμετροι της ροής. Στην παρούσα εργασία υπολογίστηκε σύμφωνα με τον Πίνακα 7-2, το πλάτος της κατανομής της ταχύτητας, η αξονική και μέση αραίωση, καθώς και οι συντεταγμένες της τροχιάς του άνω και κάτω ορίου της φλέβας.

Πίνακας 7-2: Σχέσεις υπολογισμού παραμέτρων ροής φλέβας (Παπακωνσταντής, 2009)

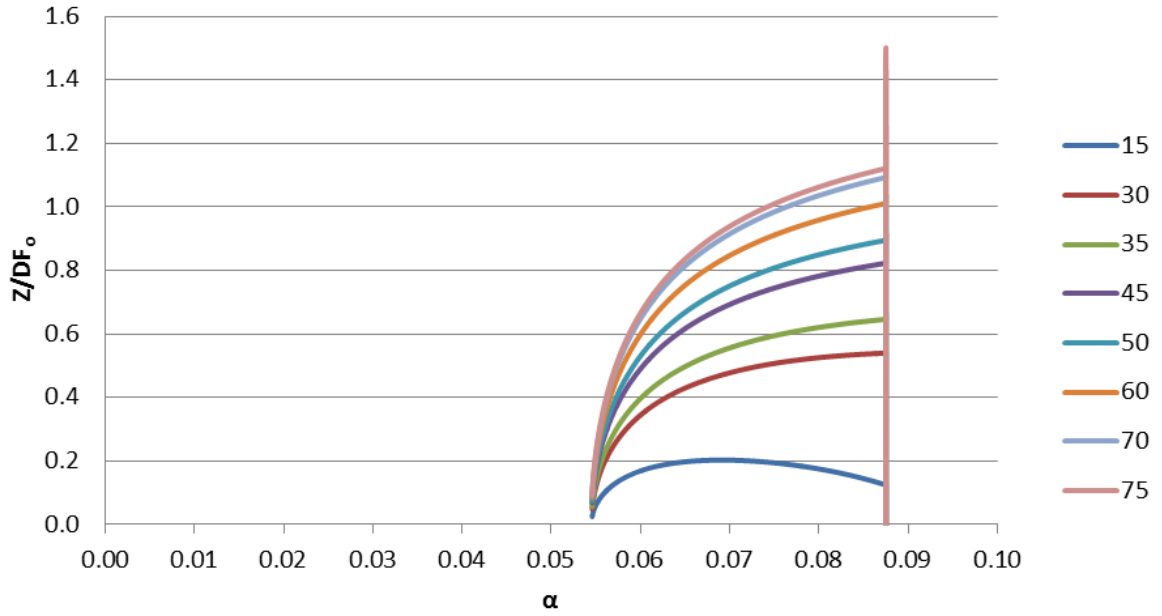
Μέση διάλυση	$S_{ave} = Q/Q_o$
Αξονική διάλυση	$S_c = \frac{Q}{Q_o} \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2}$
Πλάτος κατανομής ταχύτητας	$b = \frac{Q}{\sqrt{2\pi M}}$
Οπτικό πλάτος	$b_{visual} = 1.5\lambda b$
Συντεταγμένες άνω ορίου	$X_{up} = X - b_{visual} \cdot \sin\theta$
	$Z_{up} = Z + b_{visual} \cdot \cos\theta$
Συντεταγμένες κάτω ορίου	$X_{down} = X + b_{visual} \cdot \sin\theta$
	$Z_{down} = Z - b_{visual} \cdot \cos\theta$

Το οπτικό πλάτος b_{visual} αποτελεί την απόσταση του άξονα από το εξωτερικό όριο της φλέβας. Η θεώρηση $b_{visual}=1.5b_c$ χρησιμοποιήθηκε από τον Παπακωνσταντή (2009), όπως παρόμοιες θεωρήσεις πραγματοποίησαν οι Paranicolaou et al. (2008) και ο Jirka (2004) για το ολοκληρωματικό μοντέλο Corjet.

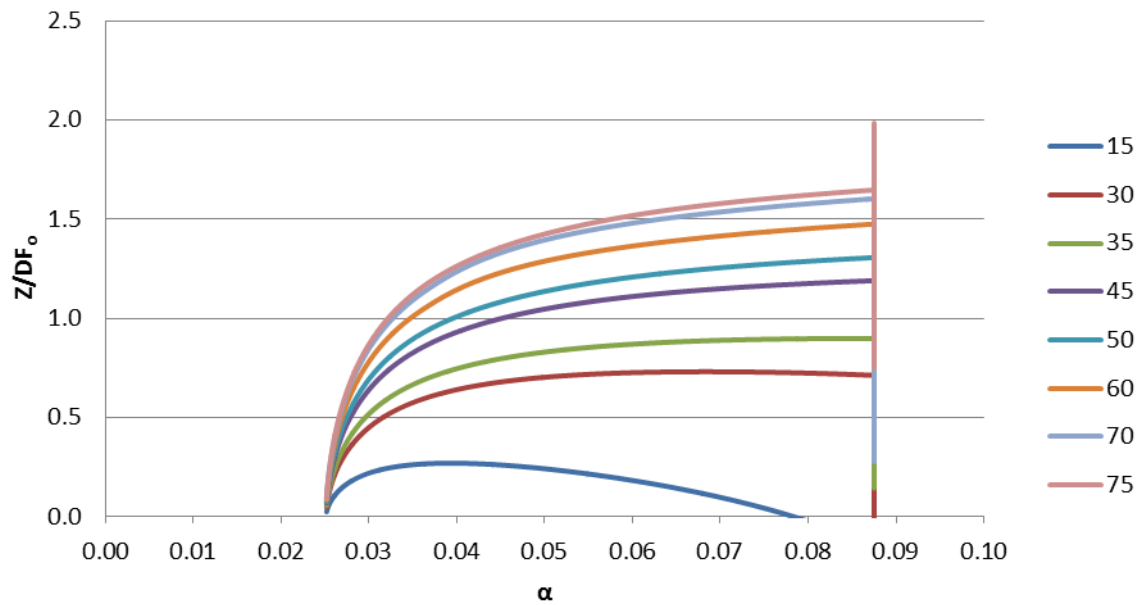
Το μέγιστο ύψος του άξονα Z_c προσδιορίστηκε ως μέγιστη τιμή των τιμών Z και το τελικό τερματικό ύψος ανόδου Z_f υπολογίστηκε από τη σχέση $Z_f=Z_c+1.5\lambda b$. Η οριζόντια απόσταση X_z προσδιορίζεται εύκολα από τη θέση που εμφανίζεται το μέγιστο ύψος Z_c και η οριζόντια απόσταση X_{ic} ως το σημείο όπου $Z \approx 0$. Τέλος, η οριζόντια απόσταση της θέσης όπου το εξωτερικό όριο προσπίπτει στο επίπεδο παροχέτευσης X_i προσδιορίστηκε από τη θέση όπου $Z_{up} \approx 0$.

7.3 Μεταβολή συντελεστή συμπαράσυρσης α & σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά αποτελέσματα

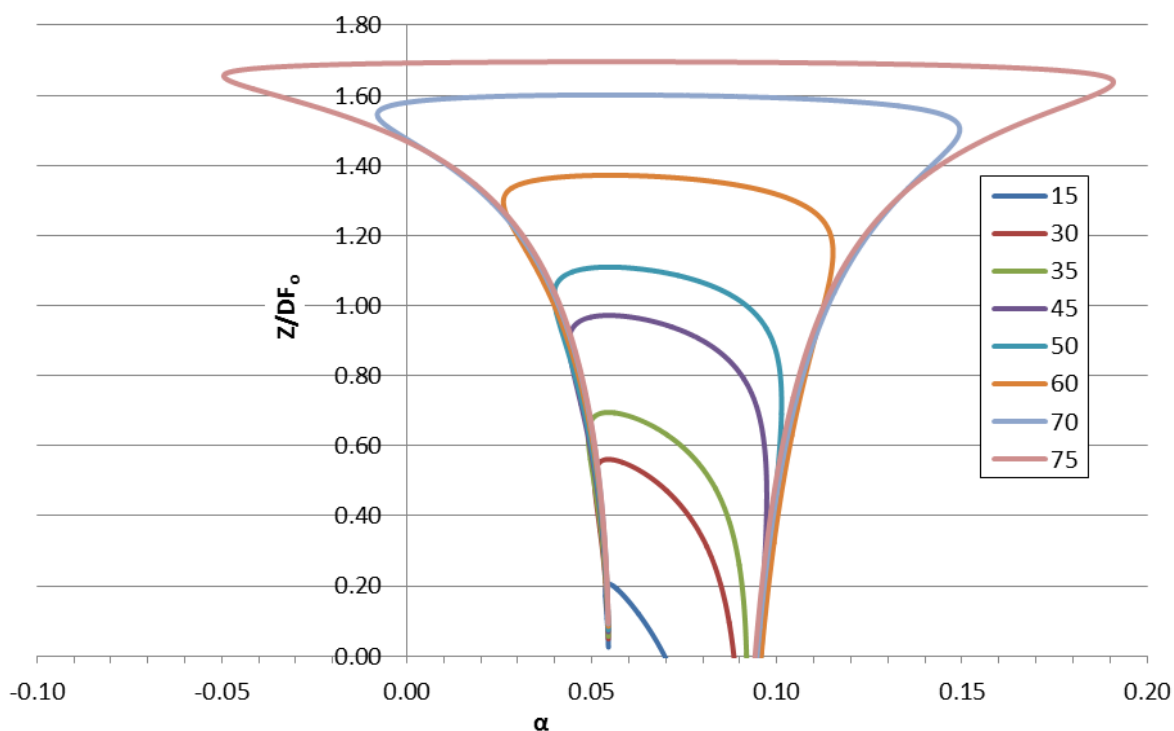
Στα Σχήματα 7-3, 7-4 και 7-5 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή συμπαράσυρσης α για τα διαφορετικά σενάρια υπολογισμού. Στο υπόμνημα φαίνονται οι αρχικές γωνίες παροχέτευσης της φλέβας θ_o σε μοίρες.



Σχήμα 7-3: Μεταβολή του συντελεστή συμπαράσυρσης α με το ύψος του άξονα φλέβας για γωνίες παροχέτευσης $\theta_0=15^\circ-75^\circ$ (Σενάριο i)



Σχήμα 7-4: Μεταβολή του συντελεστή συμπαράσυρσης α με το ύψος του άξονα φλέβας για γωνίες παροχέτευσης $\theta_0=15^\circ-75^\circ$ (Σενάριο ii)



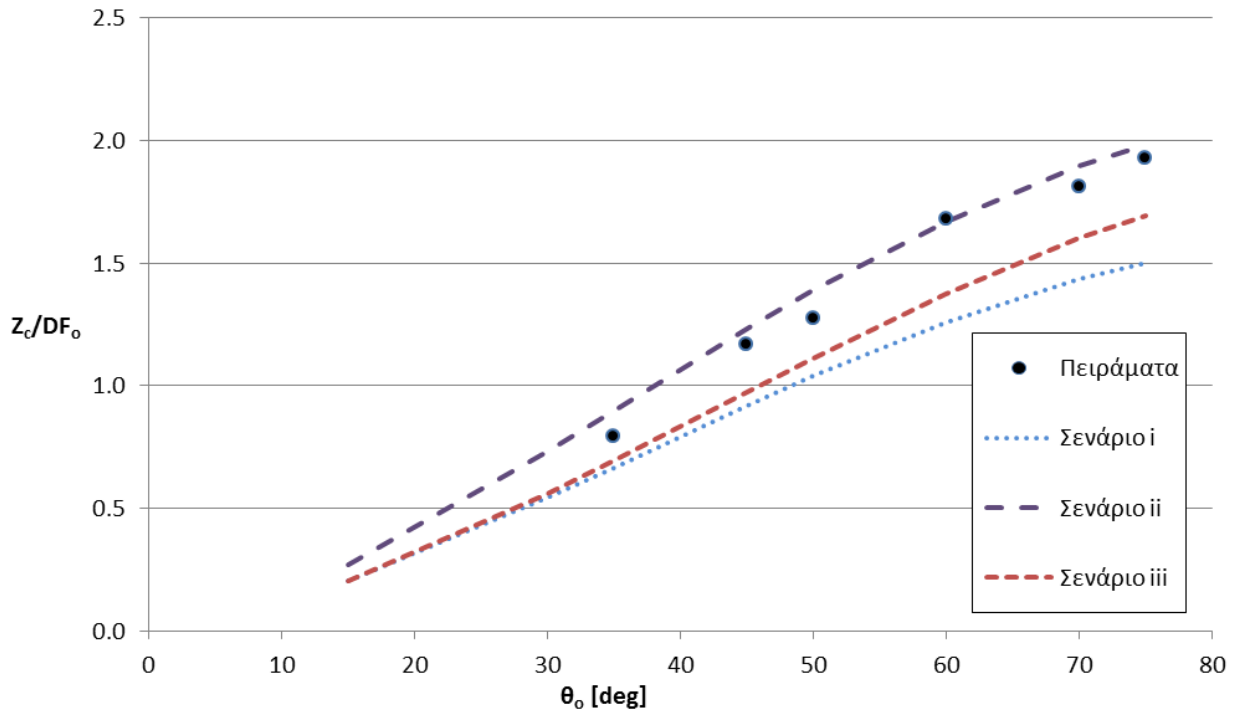
Σχήμα 7-5: Μεταβολή του συντελεστή συμπαράσυρσης α με το ύψος του άξονα φλέβας για γωνίες παροχέτευσης $\theta_0=15^\circ-75^\circ$ (Σενάριο iii)

Στο σενάριο i ο συντελεστής συμπαράσυρσης α αυξάνεται κατά την τροχιά της φλέβας ξεκινώντας από την τιμή 0.0545 και φτάνοντας την τιμή $\alpha_p=0.0875$. Για γωνίες 35° και μετά, η μέγιστη τιμή του α έχει επιτευχθεί πριν τη θέση του μέγιστου ύψους. Ομοίως στο σενάριο ii, το οποίο προτάθηκε από τον Παπακωνσταντής (2009), ο συντελεστής συμπαράσυρσης έχει ανοδική πορεία μεταξύ των τιμών 0.025 και $\alpha_p=0.0875$. Για αρχική γωνία παροχέτευσης 15° , ο συντελεστής συμπαράσυρσης δεν καταφέρνει να φθάσει τη μέγιστη τιμή του, αλλά μεγιστοποιείται κατά την επιστροφή της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης στην τιμή 0.0784. Στο σενάριο iii, ο συντελεστής συμπαράσυρσης μειώνεται σε μια ελάχιστη τιμή πριν το τερματικό ύψος και έπειτα αυξάνεται στην τιμή α_j απότομα στην περιοχή του τερματικού ύψους. Κατά την κάθοδο, ο συντελεστής συμπαράσυρσης αυξάνει γρήγορα λαμβάνοντας ακόμη και τιμές μεγαλύτερες από α_p (για γωνίες μεγαλύτερες των 15°), που δεν έχουν παρατηρηθεί σε μετρήσεις. Επίσης, κατά την άνοδο στις γωνίες των 70° και 75° , ο συντελεστής α μειώνεται δίχως περιορισμό λαμβάνοντας ακόμη και αρνητικές τιμές.

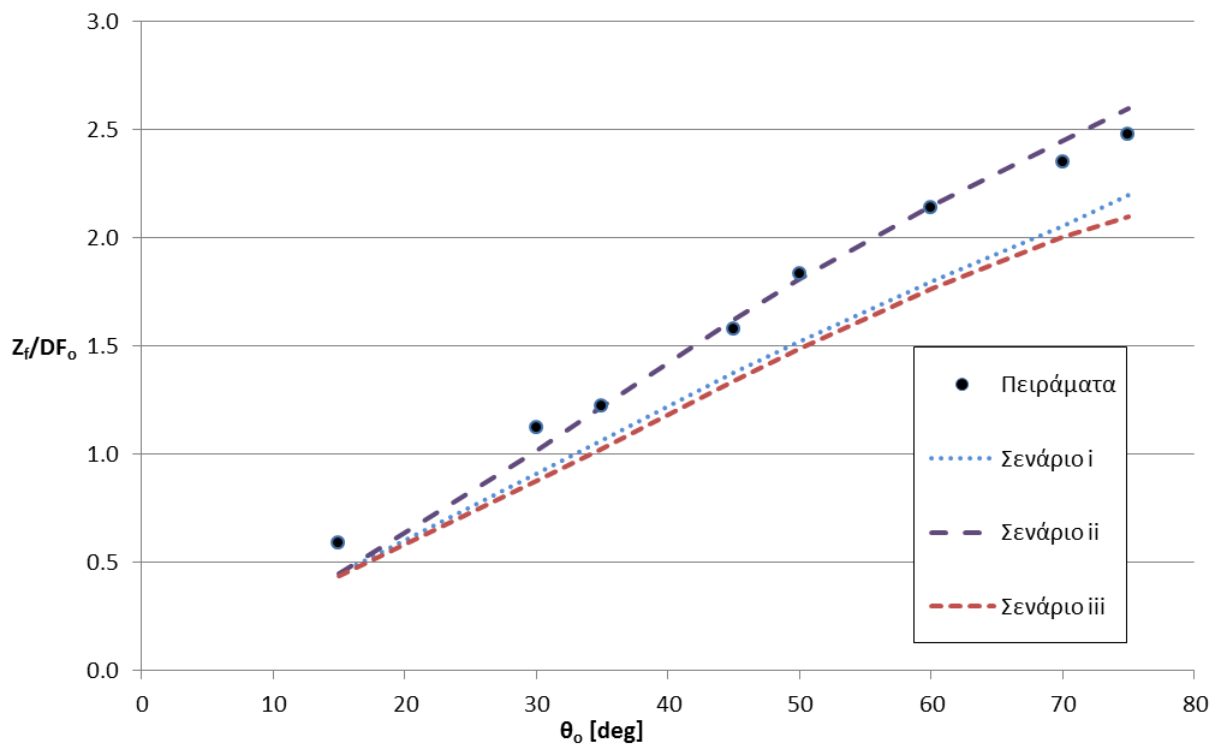
Στον Πίνακα 7-3 παρουσιάζονται οι προβλέψεις των μοντέλων και πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας και του Παπακωνσταντής (2009) σε αδιάστατη μορφή για τις κυριότερες παραμέτρους της ροής. Η σύγκριση παρουσιάζεται σε διαγραμματική μορφή στα Σχήματα 7-6 έως 7-14.

Πίνακας 7-3: Συγκρίσεις προβλέψεων μοντέλου (M) Σεναρίων i, ii & iii και πειραματικών αποτελεσμάτων (Π)

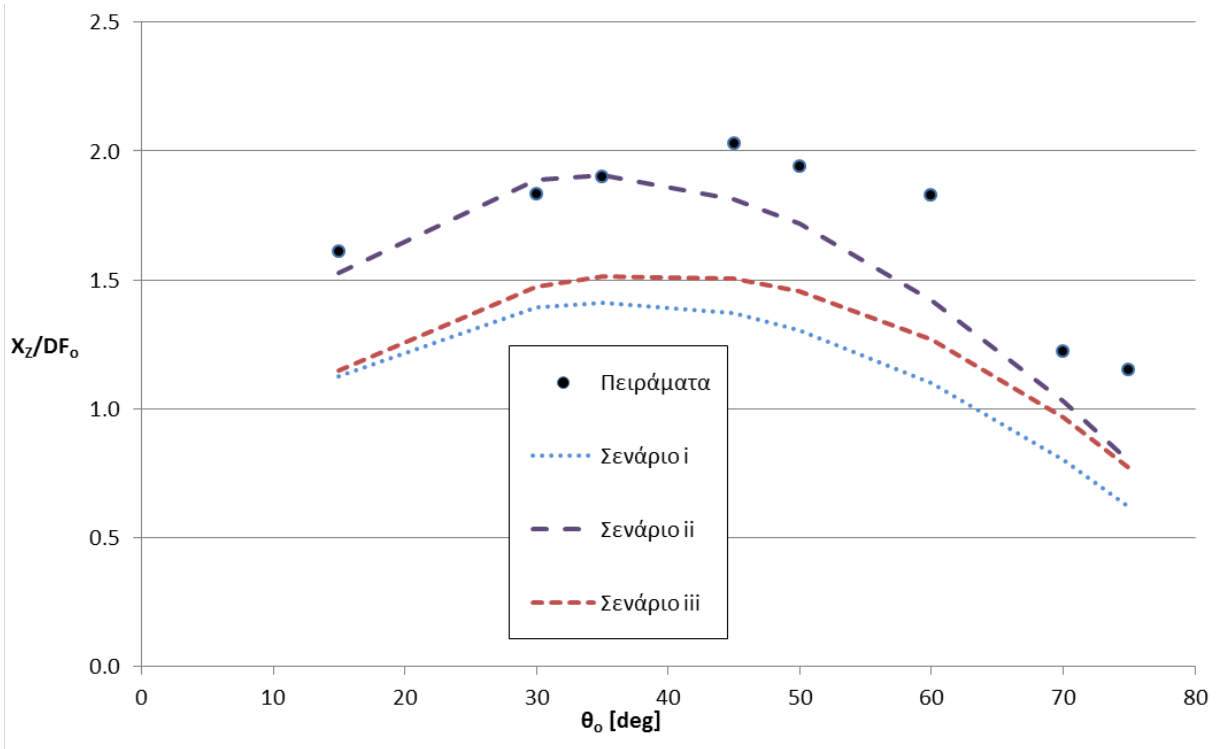
θ _o	Z _i /DF _o		Z _{ii} /DF _o		Z _{iii} /DF _o		X _{1i} /DF _o		X _{1ii} /DF _o		X _{1iii} /DF _o		S _{1i} /F _o		S _{1ii} /F _o		S _{1iii} /F _o	
	M	Π	M	Π	M	Π	M	Π	M	Π	M	Π	M	Π	M	Π	M	Π
15°	0.20	-	0.45	0.59	1.12	1.61	1.92	-	2.81	3.43	0.22	-	0.38	0.45	-	0.76		
30°	0.54	-	0.91	1.12	1.39	1.83	2.37	-	3.17	4.01	0.32	-	0.54	0.66	-	1.12		
35°	0.67	0.79	1.07	1.22	1.41	1.90	2.42	3.23	3.21	3.98	0.33	0.45	0.57	0.71	1.20	1.21		
45°	0.92	1.17	1.37	1.58	1.37	2.03	2.36	3.16	3.12	3.78	0.36	0.52	0.60	0.79	1.55	1.33		
50°	1.04	1.28	1.52	1.83	1.30	1.94	2.26	3.00	3.00	4.04	0.36	0.57	0.61	0.81	1.69	1.37		
60°	1.26	1.68	1.80	2.14	1.10	1.83	1.93	2.75	2.65	3.57	0.35	0.56	0.60	0.84	1.68	1.42		
70°	1.43	1.81	2.06	2.35	0.80	1.22	1.43	1.94	2.12	3.05	0.34	0.47	0.57	0.83	1.76	1.41		
75°	1.50	1.93	2.20	2.48	0.62	1.15	1.12	1.80	1.78	2.42	0.33	0.51	0.56	0.82	1.67	1.38		
15°	0.27	-	0.45	0.59	1.53	1.61	2.59	-	3.39	3.43	0.16	-	0.27	0.37	-	0.64		
30°	0.73	-	1.01	1.12	1.89	1.83	3.11	-	3.88	4.01	0.24	-	0.41	0.69	-	1.16		
35°	0.90	0.79	1.22	1.22	1.91	1.90	3.12	3.23	3.90	3.98	0.27	0.45	0.46	0.76	1.20	1.29		
45°	1.23	1.17	1.62	1.58	1.81	2.03	3.00	3.16	3.78	3.78	0.30	0.52	0.52	0.88	1.55	1.49		
50°	1.39	1.28	1.81	1.83	1.72	1.94	2.87	3.00	3.64	4.04	0.31	0.57	0.53	0.92	1.69	1.56		
60°	1.67	1.68	2.15	2.14	1.42	1.83	2.40	2.75	3.16	3.57	0.31	0.56	0.53	0.97	1.68	1.64		
70°	1.90	1.81	2.45	2.35	1.03	1.22	1.77	1.94	2.50	3.05	0.30	0.47	0.51	0.98	1.76	1.66		
75°	1.98	1.93	2.59	2.48	0.80	1.15	1.38	1.80	2.10	2.42	0.29	0.51	0.49	0.97	1.67	1.64		
15°	0.21	-	0.44	0.59	1.15	1.61	1.99	-	2.81	3.43	0.21	-	0.35	0.39	-	0.66		
30°	0.56	-	0.88	1.12	1.47	1.83	2.55	-	3.31	4.01	0.27	-	0.46	0.59	-	1.00		
35°	0.69	0.79	1.03	1.22	1.51	1.90	2.63	3.23	3.38	3.98	0.28	0.45	0.48	0.65	1.20	1.10		
45°	0.97	1.17	1.34	1.58	1.50	2.03	2.62	3.16	3.37	3.78	0.28	0.52	0.48	0.76	1.55	1.29		
50°	1.11	1.28	1.49	1.83	1.46	1.94	2.54	3.00	3.29	4.04	0.28	0.57	0.47	0.80	1.69	1.36		
60°	1.37	1.68	1.76	2.14	1.27	1.83	2.24	2.75	2.99	3.57	0.26	0.56	0.43	0.88	1.68	1.50		
70°	1.60	1.81	2.00	2.35	0.96	1.22	1.71	1.94	2.44	3.05	0.22	0.47	0.37	0.92	1.76	1.55		
75°	1.70	1.93	2.10	2.48	0.77	1.15	1.37	1.80	2.10	2.42	0.19	0.51	0.32	0.92	1.67	1.57		



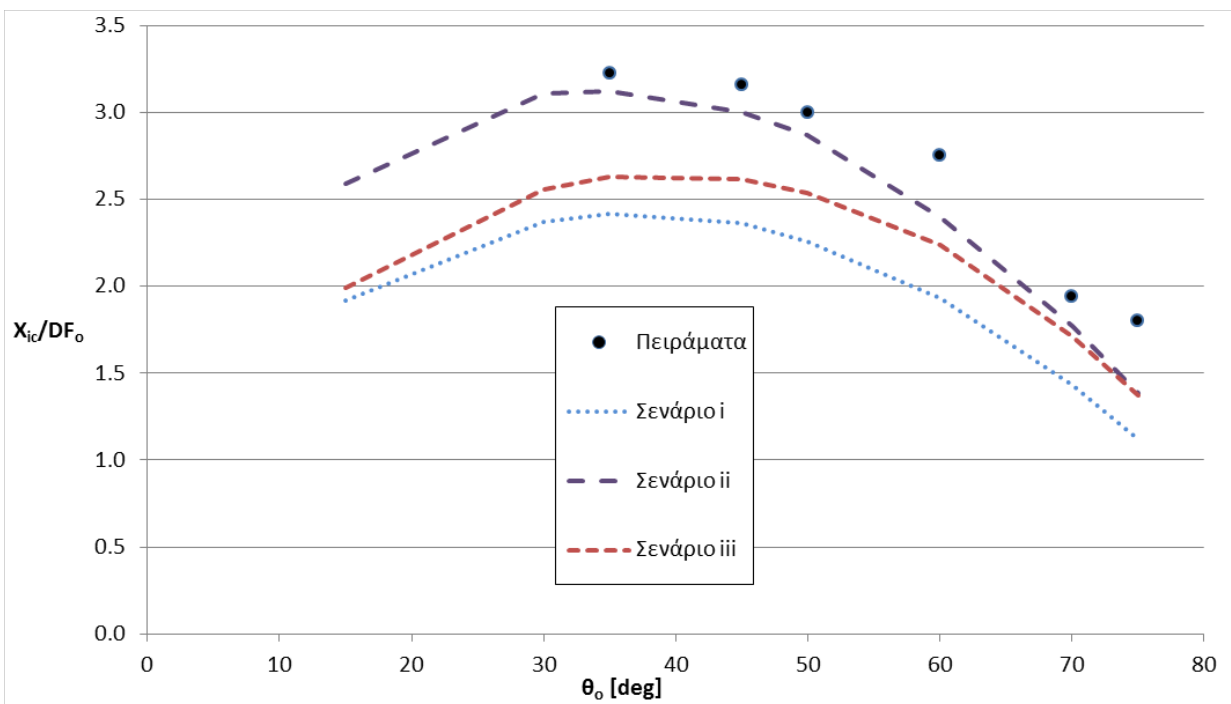
Σχήμα 7-6: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για το μέγιστο ύψος του άξονα της φλέβας



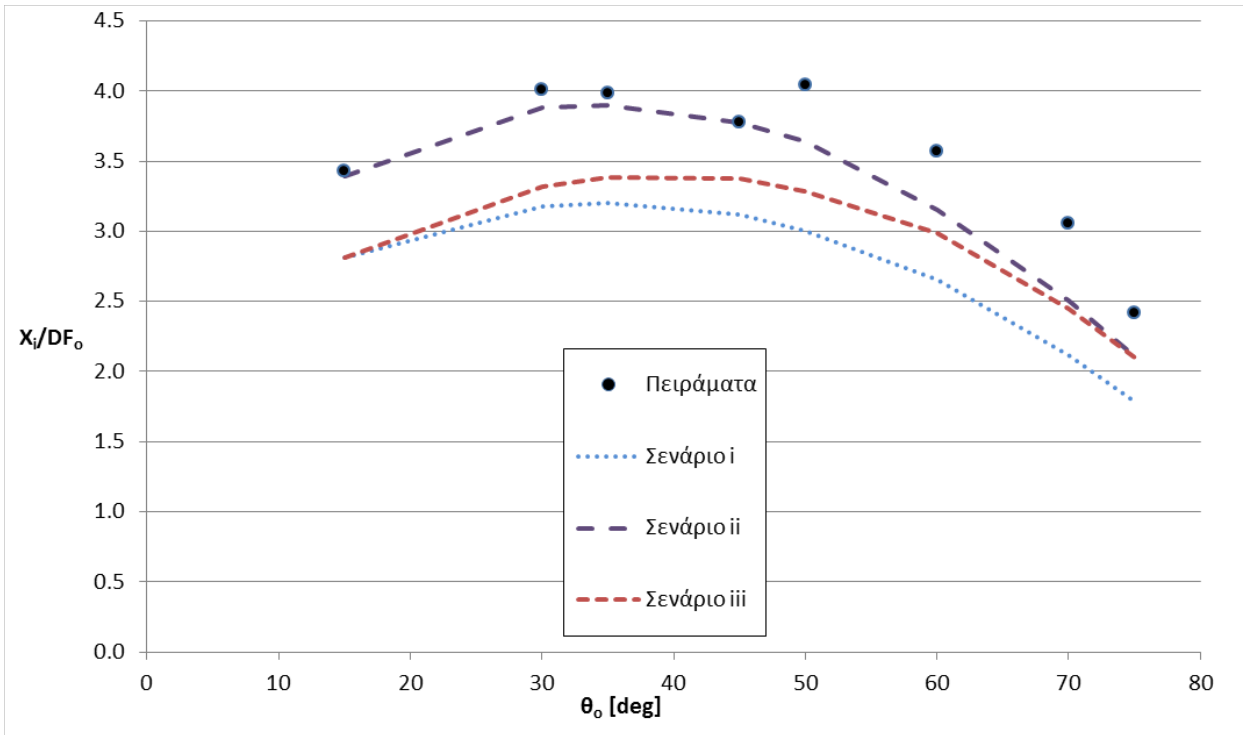
Σχήμα 7-7: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για το τελικό τερματικό ύψος της φλέβας



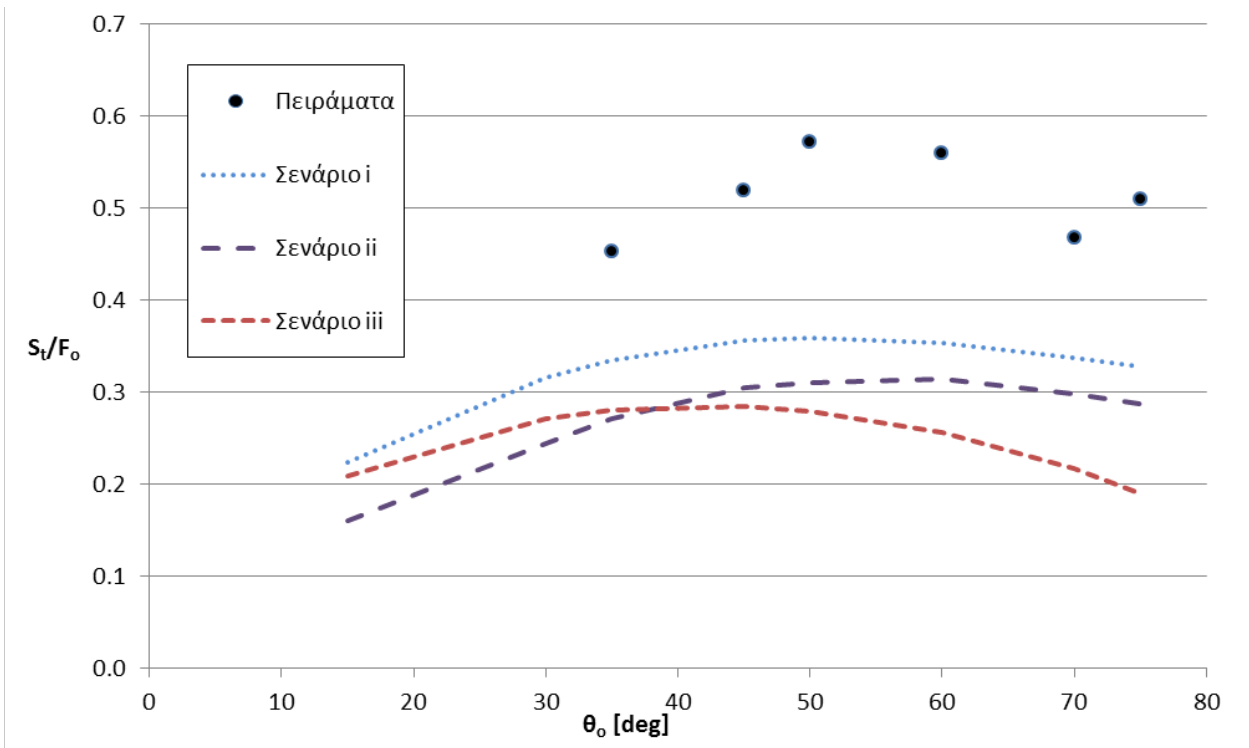
Σχήμα 7-8: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την οριζόντια θέση του τελικού τερματικού ύψους ανόδου της φλέβας



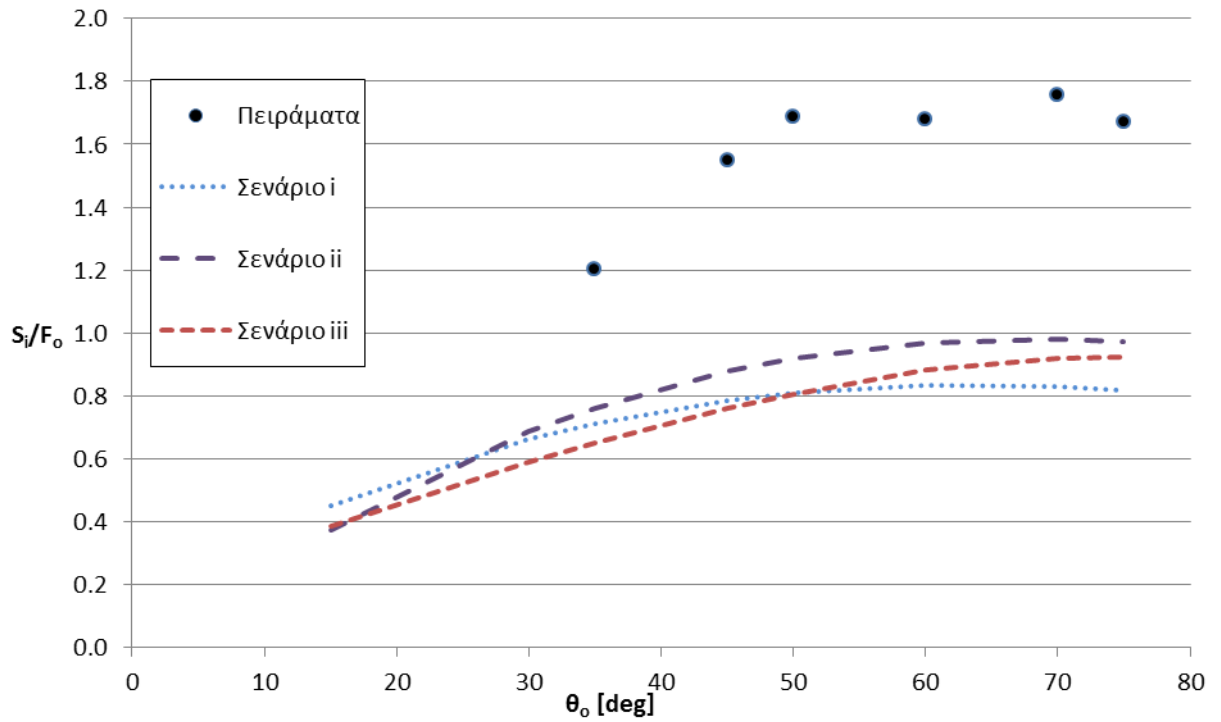
Σχήμα 7-9: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την οριζόντια θέση του άξονα φλέβας στη θέση επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης



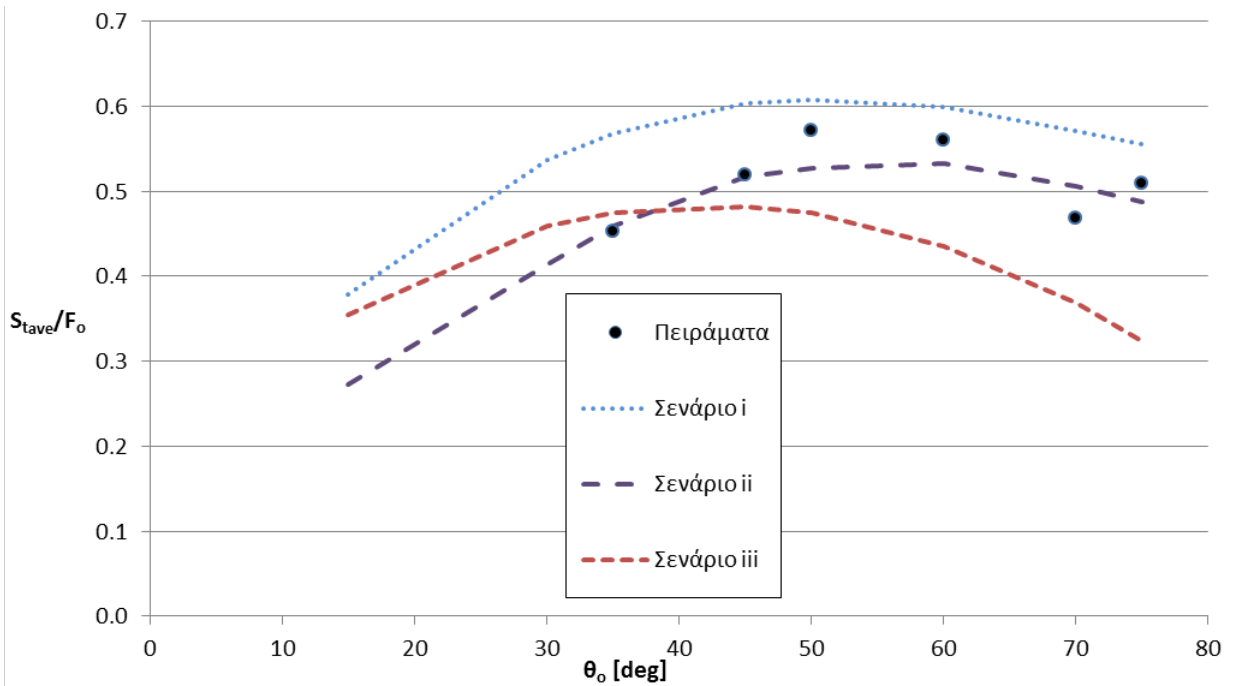
Σχήμα 7-10: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την οριζόντια θέση του εξωτερικού ορίου της φλέβας στη θέση επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης



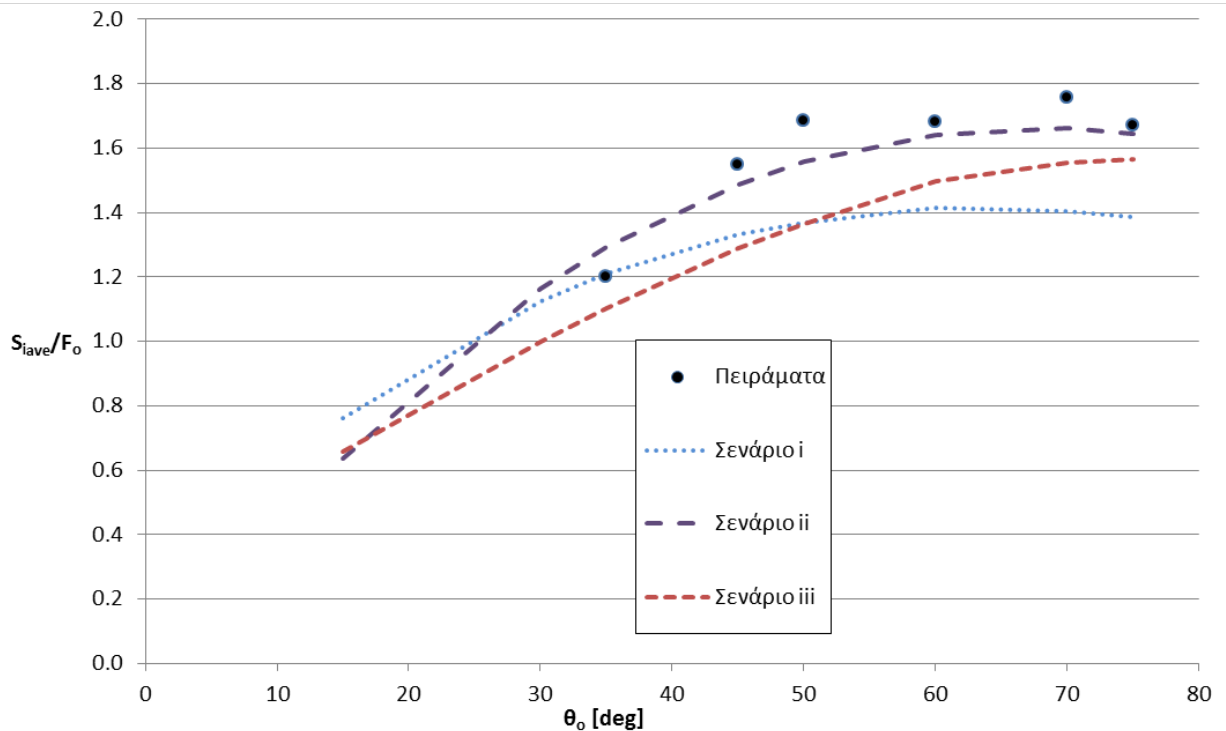
Σχήμα 7-11: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την αξονική αραίωση φλέβας στη θέση του τελικού τερματικού ύψους



Σχήμα 7-12: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων με πειραματικά δεδομένα για την αξονική αραίωση φλέβας στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης



Σχήμα 7-13: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων για τη μέση αραίωση με πειραματικά δεδομένα για την αξονική αραίωση φλέβας στη θέση του τελικού τερματικού ύψους



Σχήμα 7-14: Σύγκριση προβλέψεων μοντέλων για τη μέση αραιώση με πειραματικά δεδομένα για την αξονική αραιώση φλέβας στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης

Σύμφωνα με τα ανωτέρω Σχήματα, το μοντέλο που επιλύθηκε με το σενάριο ii ($\alpha_j=0.025$), προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά αποτελέσματα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλέβας, ενώ τα υπόλοιπα τα υποεκτιμούν. Συγκεκριμένα, πολύ καλή συμφωνία υπάρχει στο σενάριο ii για το μέγιστο ύψος του άξονα και το τελικό τερματικό ύψος (αποκλίσεις κατά μέσο όρο μικρότερες του 10%), με τα υπόλοιπα σενάρια να δίνουν παρόμοιες αποκλίσεις (16-26%). Το σενάριο ii προσεγγίζει ικανοποιητικά την οριζόντια θέση του τελικού τερματικού ύψους ανόδου που προέκυψε από τα πειράματα έως τη γωνία των 50° . Κατά μέσο όρο για το X_z/DF_0 οι αποκλίσεις των προβλέψεων του σεναρίου ii είναι περίπου 15%, του σεναρίου iii 35%, ενώ οι προβλέψεις του σεναρίου i αποκλίνουν πάνω από 50%. Η οριζόντια θέση του άξονα και του εξωτερικού ορίου της φλέβας στη θέση επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης, προσεγγίζονται από το σενάριο ii με απόκλιση μικρότερη από 10%, από το σενάριο iii με απόκλιση 20% και από το σενάριο i με απόκλιση που φθάνει το 40%.

Όλα τα σενάρια υποεκτιμούν σημαντικά την αξονική αραιώση για όλες τις γωνίες τόσο στο τερματικό ύψος όσο και στη θέση επιστροφής της φλέβας. Τα μοντέλα προβλέπουν ότι η αραιώση στο τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας και στο επίπεδο παροχέτευσης για τις γωνίες μεγαλύτερες των 45° δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα, όπως προέκυψε και από τα πειραματικά αποτελέσματα. Ωστόσο, η μέση αραιώση στη διατομή που προβλέπεται από

όλα τα μοντέλα συμφωνεί καλύτερα με τις μετρημένες τιμές της αξονικής αραιώσης. Ιδιαίτερα το σενάριο ii προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια τις τιμές των πειραμάτων τόσο στο τερματικό ύψος όσο και στην περιοχή επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Στο συμπέρασμα αυτό είχε καταλήξει και ο Παπακωνσταντής (2009) από τη σύγκριση για γωνίες 45° , 60° και 75° . Φαίνεται λοιπόν ότι μεταξύ των τριών σεναρίων που εξετάστηκαν, το σενάριο ii οδηγεί στην καλύτερη δυνατή πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της ροής.

8 Ανακεφαλαίωση & συμπεράσματα

8.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε το κοντινό πεδίο της ροής τυρβωδών κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Γωνίες παροχέτευσης όπως 30° , 45° και 60° έχουν μελετηθεί αρκετά από προηγούμενους ερευνητές. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν περιορισμένα αποτελέσματα για χαρακτηριστικά φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνίες 15° , 52° , 70° και 75° , ενώ δεν υπάρχουν αποτελέσματα για γωνίες 35° και 50° . Σημαντικό είναι επίσης να σημειωθεί, πως τα αποτελέσματα των ερευνητών για τη γωνία των 30° παρουσιάζουν ασυμφωνίες, ιδιαίτερα όσον αφορά στο κρίσιμο μέγεθος της αραίωσης. Συγκεκριμένα οι τιμές S/F_0 που έχουν δημοσιευθεί για την αραίωση στη θέση του τερματικού ύψους κυμαίνονται από 0.34 (Oliver, 2012) έως 0.66 (Shao & Law, 2010) και στη θέση επιστροφής της φλέβας από 0.82 (Lai & Lee, 2012) έως 1.90 (Nemlioglu & Roberts, 2006). Σε πολλές εργασίες τίθενται θέματα φαινομένων αλληλεπίδρασης της ροής με τα όρια του αποδέκτη (boundary effects). Κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας ήταν η διεξαγωγή μεγάλου αριθμού πειραμάτων (102) ροής φλεβών αρνητικής άνωσης σε δεξαμενή μεγάλων διαστάσεων, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης της ροής με τα όρια του αποδέκτη (boundary effects).

Η πρώτη κατηγορία πειραμάτων περιλάμβανε βιντεοσκόπηση της τροχιάς της φλέβας διάρκειας τουλάχιστον 120 sec σε 5 διαφορετικές γωνίες παροχέτευσης, 15° , 30° , 35° , 50° και 70° . Μελετήθηκε μεγάλο εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude ($F_0=13-70$) και διαφορών πυκνότητας $\Delta\rho/\rho$ (2-3.2%) και προέκυψαν αποτελέσματα για τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροής. Μετρήθηκαν το αρχικό τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας, το τελικό τερματικό ύψος, η θέση του τελικού τερματικού ύψους ανόδου και η οριζόντια θέση όπου το εξωτερικό όριο της φλέβας επιστρέφει στο επίπεδο παροχέτευσης. Για τον προσδιορισμό του τελικού τερματικού ύψους ανόδου της φλέβας χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της μέσης εικόνας. Η μέση εικόνα κάθε πειράματος προσδιορίστηκε μέσω αλγορίθμου που καταστρώθηκε στο λογισμικό Matlab από το σύνολο 1000-2500 frames (40-100 sec) του βίντεο κάθε πειράματος. Τα πειραματικά αποτελέσματα επαλήθευσαν τις θεωρητικές σχέσεις που έχουν διατυπωθεί βάσει διαστατικής ανάλυσης και φάνηκε ότι συμφωνούν ικανοποιητικά με εκείνα άλλων εργασιών. Επιπλέον, βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων της παρούσας για γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° και του Παπακωνσταντής (2009) για γωνίες 45° , 60° και 75°

πραγματοποιήθηκε πολυωνυμική συσχέτιση των αδιάστατων γεωμετρικών παραμέτρων με τη γωνία παροχέτευσης.

Στη δεύτερη κατηγορία πειραμάτων μετρήθηκαν συγκεντρώσεις με το όργανο MSCTI σε χαρακτηριστικές θέσεις της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία 35°, 50° και 70°. Εξετάστηκε εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude 18-49 και διαφορών πυκνότητας 2.7-4%. Πραγματοποιήθηκαν σημειακές μετρήσεις συγκέντρωσης στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου της φλέβας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση, με σκοπό τον προσδιορισμό της κατανομής της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης. Διαπιστώθηκε πως τα προφίλ της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης και της έντασης της τύρβης γενικά ακολουθούν περίπου την ίδια καμπύλη για την ίδια γωνία παροχέτευσης ανεξάρτητα του πυκνομετρικού αριθμού Froude για συγκεκριμένη γωνία παροχέτευσης. Βρέθηκε πως η κατανομή της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης συμπίπτει με την κατανομή Gauss από το εξωτερικό όριο της φλέβας έως τον άξονα και πως η μέγιστη τιμή της έντασης της τύρβης εμφανίζεται πιο πάνω από τον άξονα της φλέβας. Επιπλέον, οι σταθερές που προσδιορίστηκαν για το αδιάστατο μέγιστο ύψος του άξονα και την αξονική αραιώση στη θέση του τερματικού ύψους, επιβεβαίωσαν τις θεωρητικές σχέσεις που έχουν προταθεί με χρήση διαστατικής ανάλυσης. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν σημειακές μετρήσεις κατά την οριζόντια διεύθυνση στην περιοχή επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης για τον προσδιορισμό της θέσης του άξονα και της αξονικής διάλυσης.

Τα αποτελέσματα που αφορούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τις αραιώσεις έτσι όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραμάτων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 8-1.

Πίνακας 8-1: Μέσες αδιάστατες τιμές γεωμετρικών χαρακτηριστικών φλέβας και αραιώσεων για γωνίες παροχέτευσης 15° έως 70°

θ_0	Z_{max}/DF_0	X_z/DF_0	Z_i/DF_0	X_i/DF_0	Z_c/DF_0	X_{ic}/DF_0	S_t/F_0	S_i/F_0
15°	0.81	1.61	0.59	3.43				
30°	1.36	1.83	1.12	4.01				
35°	1.47	1.90	1.22	3.98	0.79	3.23	0.45	1.20
50°	2.12	1.94	1.83	4.04	1.28	3.00	0.57	1.69
70°	2.65	1.22	2.35	3.05	1.81	1.94	0.47	1.76

Ολοκληρώνοντας, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε υπολογιστική διερεύνηση της ροής κυκλικών φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό τυχαία γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη (15° - 75°). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ολοκληρωματικό μοντέλο, το οποίο παρουσιάστηκε από τους Papanicolaou et al. (2008) και τον Παπακωνσταντή (2009) και βασίζεται σε κατανομές ταχύτητας και συγκέντρωσης Gauss. Το ολοκληρωματικό μοντέλο επιλύθηκε αριθμητικά κάνοντας τρεις διαφορετικές θεωρήσεις σχετικά με τον υπολογισμό του τοπικού αριθμού Richardson και τη σχέση εκτίμησης του συντελεστή συμπαράσυρσης. Οι προβλέψεις των μοντέλων συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα της παρούσας για γωνίες 15° , 30° , 35° , 50° και 70° και τα αποτελέσματα του Παπακωνσταντή (2009) για γωνίες 45° , 60° και 75° . Από τη σύγκριση προέκυψε ότι τα ολοκληρωματικά μοντέλα υποεκτιμούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλέβας και την αραίωση, όταν εφαρμόζονται οι συμβατικές τιμές των συντελεστών συμπαράσυρσης, είτε ο συντελεστής συμπαράσυρσης μειώνεται είτε αυξάνεται στον ανοδικό κλάδο της ροής. Αντίθετα, θεωρώντας μειωμένο συντελεστή συμπαράσυρσης α_j (Papanicolaou et al. 2008, Παπακωνσταντή 2009) φαίνεται ότι τα πειραματικά αποτελέσματα για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά προβλέπονται με ικανοποιητική ακρίβεια. Επίσης η πρόβλεψη της μέσης στη διατομή αραίωσης συμφωνεί ικανοποιητικά με τις μετρημένες τιμές της αξονικής αραίωσης.

8.2 Συμπεράσματα

Στην παράγραφο που ακολουθεί συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.

Πειράματα βιντεοσκόπησης τροχιάς της φλέβας

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς της φλέβας (αρχικό και τελικό τερματικό ύψος, οριζόντια θέση του τερματικού ύψους και του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης) αδιαστατοποιημένα με τη διάμετρο του στομίου παροχέτευσης D και τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude F_o , παραμένουν σταθερά για την ίδια γωνία παροχέτευσης. Οι τιμές αυτές συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα διαθέσιμα αποτελέσματα άλλων εργασιών και βρέθηκε ότι υπάρχει γενικά συμφωνία.
- Το αδιάστατο αρχικό τερματικό ύψος αυξάνεται με αύξηση της γωνίας παροχέτευσης για το εύρος 15° - 70° που μελετήθηκε, σε συμφωνία με αποτελέσματα προηγούμενης έρευνας όπου φαίνεται για γωνίες 15° - 75° να υπάρχει γραμμική αύξηση του ύψους με τη γωνία.

- Το αδιάστατο τελικό τερματικό ύψος αυξάνεται με αύξηση της γωνίας παροχέτευσης για το εύρος 15° - 70° που μελετήθηκε. Με βάση και δεδομένα προηγούμενης έρευνας φαίνεται ότι για γωνίες 15° - 75° φαίνεται να υπάρχει επίσης γραμμική αύξηση του ύψους με τη γωνία.
- Οι αδιάστατες οριζόντιες αποστάσεις του τερματικού ύψους και του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης αυξάνονται με τη γωνία παροχέτευσης μέχρι τη γωνία των 45° , όπου παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους και κατόπιν μειώνονται.

Μετρήσεις συγκέντρωσης

- Η κατανομή της αδιάστατης μέσης συγκέντρωσης στη θέση του τερματικού ύψους ως προς την αδιάστατη κατακόρυφη απόσταση μετρούμενη από τον άξονα είναι ασύμμετρη. Το εξωτερικό (άνω) όριο της φλέβας έως τον άξονα ακολουθεί κατανομή Gauss, ενώ το τμήμα κάτω από τον άξονα αποκλίνει σημαντικά. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις μάζες που αποκολλώνται από την ροή, κινούνται καθοδικά και αυξάνουν τις συγκεντρώσεις από τον άξονα και κάτω.
- Η θέση που παρουσιάζεται η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης στη θέση του τερματικού ύψους ανόδου είναι πάντα υψηλότερη από τη θέση της μέγιστης μέσης συγκέντρωσης.
- Η κατακόρυφη κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης παρουσιάζει μέγιστη τιμή κατά μέσο όρο ίση με 0.35 για τη γωνία των 35° , 0.41 για τη γωνία των 50° και 0.37 για τη γωνία των 70° . Οι τιμές αυτές δείχνουν ότι η ροή στη θέση του τελικού τερματικού ύψους ανόδου έχει γίνει πλούμιο ή τείνει να γίνει πλούμιο.
- Το αδιάστατο μέγιστο ύψος του άξονα και η αδιάστατη οριζόντια απόσταση του άξονα της φλέβας από το στόμιο παροχέτευσης έως τη θέση επιστροφής της στον πυθμένα, παραμένουν σταθερά για την ίδια γωνία παροχέτευσης. Η σύγκριση των τιμών της παρούσας με τιμές εργασιών για γωνίες μικρότερες των 90° ποιοτικά συμφωνούν ικανοποιητικά.
- Το αδιάστατο μέγιστο ύψος του άξονα αυξάνεται με αύξηση της γωνίας παροχέτευσης για το εύρος 35° - 70° που μελετήθηκε, σε συμφωνία με αποτελέσματα προηγούμενης έρευνας που επιβεβαιώνουν ότι για γωνίες 35° - 75° υπάρχει επίσης γραμμική αύξηση του μέγιστου ύψους του άξονα με τη γωνία.
- Η αδιάστατη οριζόντια απόσταση της θέσης όπου ο άξονας προσπίπτει στο επίπεδο παροχέτευσης αυξάνεται με τη γωνία παροχέτευσης μέχρι τη γωνία των 45° , όπου μεγιστοποιείται και στη συνέχεια μειώνεται.

- Η αξονική αραίωση στη θέση του τερματικού ύψους και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης αδιαστατοποιημένη ως προς τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude F_0 παραμένει σταθερή για την ίδια γωνία παροχέτευσης.
- Για την αξονική αραίωση στο τερματικό ύψος ανόδου (αδιαστατοποιημένη ως προς τον πυκνομετρικό αριθμό Froude) προέκυψαν κοντινές τιμές για τις τρεις γωνίες που εξετάστηκαν (35° , 50° και 70°) με την αραίωση στη γωνία των 50° να είναι λίγο μεγαλύτερη.
- Για την αξονική αραίωση στην περιοχή επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης (αδιαστατοποιημένη ως προς τον πυκνομετρικό αριθμό Froude) προέκυψαν κοντινές τιμές για τις τρεις γωνίες που εξετάστηκαν (35° , 50° και 70°) με την αραίωση στη γωνία των 35° να είναι λίγο μικρότερη.
- Τα αποτελέσματα των ερευνητών για τις αξονικές αραιώσεις παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις. Ωστόσο οι αξονικές αραιώσεις δείχνουν να αυξάνονται με τη γωνία μέχρι τις 35° - 45° και να είναι παραπλήσιες από 45° έως 75° .

Υπολογιστική διερεύνηση με χρήση ολοκληρωματικού μοντέλου

- Τα μοντέλα υποεκτιμούν τα πειραματικά αποτελέσματα όταν χρησιμοποιείται η τιμή της παραμέτρου $\alpha_j=0.0545$ είτε θεωρώντας ότι ο συντελεστής α αυξάνεται από την τιμή α_j στην τιμή α_p , είτε θεωρώντας ότι μπορεί να μειώνεται και να λαμβάνει μικρότερες τιμές από α_j ως και τιμές μεγαλύτερες από α_p .
- Όταν εφαρμόζεται μειωμένη τιμή για το συντελεστή συμπαράσυρσης $\alpha_j=0.025$ στην αρχή της φλέβας και ο συντελεστής α παίρνει τιμές από α_j ως α_p ανάλογα με τον τοπικό αριθμό Richardson $Ri(s)$ τότε οι προβλέψεις του μοντέλου βελτιώνονται και συμφωνούν από ικανοποιητικά έως εξαιρετικά με τις μετρημένες τιμές.
- Η αξονική αραίωση υποεκτιμάται από τα μοντέλα αλλά μπορεί να εκτιμηθεί με καλή ακρίβεια ως η μέση αραίωση στη διατομή από το μοντέλο με τη μειωμένη τιμή της παραμέτρου α_j . Αυτό οφείλεται πιθανόν στο γεγονός ότι η κατανομή της συγκέντρωσης μακριά από την πηγή προσεγγίζεται καλύτερα από ένα ομοιόμορφο προφίλ.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

Παπακωνσταντής, Η. 2009 Τυρβώδεις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Διεθνής βιβλιογραφία

Abessi, O., and Roberts, P. J. W. 2014 Multiport diffusers for dense discharges. *J. Hydraul. Eng. ASCE*, 140 (8), DOI 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000882.

Bloomfield, L. J. & Kerr, R. C. 2002 Inclined turbulent fountains. *J. Fluid Mech.* 451, 283-294.

Cipollina, A., Brucato, A., Grisafi, F. & Nicosia, S. 2005 Benchscale investigation of inclined dense jets. *J. Hydraul. Eng. ASCE* 131(11), 1017–1022.

Crowe, A. T., Davidson, R. I., Nokes, R. I. 2016 Velocity measurements in inclined negatively buoyant jets. *Envir. Fluid Mech.* 16 (3), 503-520.

Fan, L. N. 1967 Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids. Tech. Rep. KHR-15, W. M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA.

Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. & Brooks, N. H. 1979 Mixing in inland and coastal waters. Academic.

Jirka, G. H. 2004 Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single round jet. *Envir. Fluid Mech.* 4, 1–56.

Kikkert, G. A. 2006 Buoyant jets with two and three dimensional trajectories. PhD thesis, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

Lai, C. C. K., and Lee, J. H. W. 2012. Mixing of inclined dense jets in stationary ambient. *J. Hydro-environ. Res.*, 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), pp. 131-145. Kluwer.

- Morton, B. R., Taylor, G. I. & Turner, J. S. 1956 Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proc. R. Soc. Lond. A* 234, 1-23.
- 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*.
- Nikiforakis, I. K., Stamou, A. I. 2014 Integrated modelling for the discharge of brine from desalination plants into coastal waters. *Desalination and Water Treatment*, DOI: 10.1080/19443994.2014.933629.
- Nikiforakis, I.K., 2015 Numerical and experimental investigation of brine discharge from desalination plants into coastal waters. PhD thesis, National Technical University of Athens, Greece.
- Oliver, C. J. 2012 Near field mixing of negatively buoyant jets. PhD thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Oliver, C .J., Davidson, M. J., Nokes, R.I. 2013 Predicting the near-field mixing of desalination discharges in a stationary environment. *Desalination*. 309,148-155.
- Papakonstantis, I. G., Christodoulou, G. C., Papanicolaou, P.N. 2011a Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics. *J. Hydraul. Eng.* 49(1), 3–12.
- Papakonstantis, I. G., Christodoulou, G. C., Papanicolaou, P.N. 2011b Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *J. Hydraul. Eng.* 49(1), 13–22.
- Papakonstantis, I., Kampourelli, M. & Christodoulou, G. 2007 Height of rise of inclined and vertical negatively buoyant jets. In *Proc. 32nd IAHR Congress: Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics; Fluid Mechanics and Hydraulics Theme* (ed. G. Di Silvio & S. Lanzoni; theme ed. A. Cenedese), CD-ROM.
- Papanicolaou, P. N. & List, J. E. 1987 Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets. *Intl J. Heat Mass Transfer* 30, 2059–2071.
- Papanicolaou, P. N. & List, J. E. 1988 Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *J. Fluid Mech.* 195, 341–391.
- Papanicolaou, P. N., Papakonstantis, I. G. & Christodoulou, G. C. 2008 On the entrainment coefficient in negatively buoyant jets. *J. Fluid Mech.* 614, 447-470.

Roberts, P. J. W., Ferrier, A. & Daviero, G. 1997 Mixing in inclined dense jets. *J. Hydraul. Eng.* ASCE 123(8), 693–699.

Roberts, P. J. W. & Toms, G. 1987 Inclined dense jets in flowing current. *J. Hydraul. Eng.* ASCE 113(3), 323-341.

Shao, D., & Law, A. W.-K. 2010 Mixing and boundary interactions of 30° and 45° inclined dense jets. *Envir. Fluid Mech.* 10(5), 521–553.

Yannopoulos, P. C., Bloutsos, A. A. 2012 Escaping mass approach for inclined plane and round buoyant jets. *J. Fluid Mech.* 695, 81–111.

Zeitoun, M. A., McIlhenny, W. F. & Reid, R. O. 1970 Conceptual designs of outfall systems for desalting plants. Res. and Devel. Progress Report No 550, Office of Saline Water, US Dept. of Interior, Washington, DC, USA, p. 139.

Παράρτημα

Πίνακας Π-1: Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειραμάτων Κατηγορίας Α

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_0 [deg]	D [cm]	F_0	Z_{max} [cm]	Z_f [cm]	X_z [cm]	X_i [cm]
1	131115EXP27-15	15	0.4	39.40	14.76	10.12	25.74	56.69
2	131115EXP28-15	15	0.4	46.11	15.14	11.29	29.56	62.05
3	131115EXP29-15	15	0.4	52.12	15.58	11.64	33.54	70.83
4	181115EXP30-15	15	0.6	32.91	14.32	12.25	31.95	63.00
5	181115EXP31-15	15	0.6	28.85	14.23	9.44	27.84	61.27
6	181115EXP32-15	15	0.6	29.38	15.40	9.78	28.02	62.51
7	041115EXP13-30	30	0.6	25.43	23.25	16.76	29.00	65.45
8	051115EXP14-30	30	0.6	33.43	28.53	23.93	36.10	72.46
9	051115EXP15-30	30	0.6	30.22	26.22	19.79	34.04	74.58
10	051115EXP16-30	30	0.6	40.17	30.45	24.83	43.14	92.05
11	061115EXP17-30	30	0.6	47.42	34.94	29.57	50.09	106.03
12	091115EXP18-30	30	0.8	21.68	22.80	19.98	34.74	71.03
13	091115EXP19-30	30	0.8	21.18	19.75	17.96	30.93	70.19
14	091115EXP20-30	30	0.8	19.85	21.37	16.84	30.36	64.37
15	101115EXP21-30	30	0.4	43.36	22.95	20.68	33.44	75.88
16	101115EXP22-30	30	0.4	53.09	28.86	23.49	41.21	84.37
17	101115EXP23-30	30	0.4	44.89	27.60	21.22	33.81	77.29
18	111115EXP24-30	30	0.4	55.81	32.66	24.85	39.95	90.28
19	111115EXP25-30	30	0.4	63.58	32.45	29.40	44.53	100.07
20	021015EXP1-35	35	0.8	32.41	40.19	33.07	48.32	109.80
21	051015EXP2-35	35	0.8	17.80	22.37	19.49	29.59	66.04
22	051015EXP3-35	35	0.8	20.16	26.13	20.77	30.57	69.34
23	051015EXP4-35	35	0.8	16.12	20.84	16.63	24.05	55.30
24	071015EXP5-35	35	0.8	12.69	19.51	12.56	18.68	43.18
25	071015EXP6-35	35	0.8	24.10	28.49	24.42	38.71	82.34
26	081015EXP7-35	35	0.6	35.37	32.89	25.49	41.00	84.45
27	081015EXP8-35	35	0.6	43.99	35.68	31.23	48.27	104.26
28	091015EXP9-35	35	0.6	28.91	27.25	20.80	32.69	66.79
29	091015EXP10-35	35	0.6	43.16	39.21	31.05	49.97	99.17
30	091015EXP11-35	35	0.6	41.58	35.95	31.84	47.32	94.66
31	091015EXP12-35	35	0.6	49.13	40.39	34.58	55.75	116.08
32	191115EXP33-50	50	0.6	33.39	41.11	37.20	41.13	84.27
33	191115EXP34-50	50	0.6	26.27	33.40	31.24	30.31	66.23
34	191115EXP35-50	50	0.6	19.91	25.17	21.89	23.35	50.18
35	201115EXP36-50	50	0.6	39.17	50.47	43.07	47.74	96.20
36	201115EXP37-50	50	0.4	60.10	45.50	41.45	44.79	94.31

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_0 [deg]	D [cm]	F_0	Z_{max} [cm]	Z_f [cm]	X_z [cm]	X_i [cm]
37	211115EXP38-50	50	0.4	54.52	50.42	40.58	42.49	92.90
38	211115EXP39-50	50	0.4	70.41	61.31	52.71	54.40	110.13
39	231115EXP40-70	70	0.6	25.87	44.12	37.57	20.18	48.76
40	231115EXP41-70	70	0.6	33.62	55.03	48.65	24.84	60.57
41	231115EXP42-70	70	0.6	19.49	33.75	28.26	13.79	37.91
42	241115EXP43-70	70	0.4	53.14	56.09	49.85	26.09	63.83
43	241115EXP44-70	70	0.4	44.79	49.52	42.68	21.33	57.68
44	040316EXP45-70	70	0.6	22.74	35.77	31.71	16.91	43.62
45	030316EXP36-70	70	0.6	36.44	51.03	49.40	26.90	61.72
46	030316EXP37-70	70	0.6	26.21	39.19	36.19	18.26	47.34

Πίνακας Π-2: Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειραμάτων Κατηγορίας B-i

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_0 [deg]	D [cm]	F_0	Z_c [cm]	S_t
1	140116EXP9-35	35	0.6	19.96	9.90	10.47
2	140116EXP10-35	35	0.6	24.80	11.90	12.57
3	140116EXP11-35	35	0.6	29.82	13.86	14.00
4	150116EXP12-35	35	0.6	34.29	15.82	15.10
5	150116EXP13-35	35	0.6	39.36	18.92	17.09
6	150116EXP14-35	35	0.6	27.30	12.92	12.14
7	180116EXP15-35	35	0.6	18.17	8.86	9.53
8	180116EXP16-35	35	0.6	43.74	19.88	17.62
9	110216EXP29-35	35	0.6	21.60	10.00	9.78
10	250216EXP30-35	35	0.6	46.26	22.63	20.36
11	250216EXP31-35	35	0.6	49.21	23.65	18.62
12	250216EXP32-35	35	0.6	32.63	15.60	13.61
13	211215EXP1-50	50	0.6	30.85	23.32	20.80
14	221215EXP2-50	50	0.6	25.60	21.34	16.94
15	221215EXP3-50	50	0.6	23.86	17.84	12.90
16	110116EXP4-50	50	0.6	29.69	25.62	16.05
17	120116EXP5-50	50	0.6	19.85	16.31	13.46
18	130116EXP6-50	50	0.6	37.56	27.35	20.74
19	130116EXP7-50	50	0.6	35.92	27.28	20.37
20	130116EXP8-50	50	0.6	40.15	31.33	18.82
21	090216EXP28-50	50	0.6	38.82	30.62	21.68
22	260216EXP33-50	50	0.6	44.27	32.48	24.68
23	260216EXP34-50	50	0.6	40.99	30.49	22.86
24	020316EXP35-50	50	0.6	32.25	23.51	16.46
25	210116EXP18-70	70	0.6	20.48	22.64	11.20

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_0 [deg]	D [cm]	F_0	Z_c [cm]	S_t
26	220116EXP19-70	70	0.6	24.37	27.10	12.06
27	220116EXP20-70	70	0.6	29.83	33.66	13.79
28	220116EXP21-70	70	0.6	35.20	37.64	14.25
29	260116EXP22-70	70	0.6	18.94	21.24	8.66
30	260116EXP24-70	70	0.6	27.06	30.17	10.87
31	270116EXP26-70	70	0.6	30.94	33.69	13.86
32	270116EXP27-70	70	0.6	22.27	24.65	11.76
33	030316EXP36-70	70	0.6	36.44	37.37	18.54
34	030316EXP37-70	70	0.6	26.21	27.40	11.85

Πίνακας Π-3: Αρχικές συνθήκες και αποτελέσματα πειραμάτων Κατηγορίας Β-ii

A/A	ΠΕΙΡΑΜΑ	θ_0 [deg]	D [cm]	F_0	X_{ic} [cm]	S_i
1	100216EXP17-35	35	0.6	20.91	41.40	25.96
2	100216EXP18-35	35	0.6	22.72	43.64	27.20
3	100216EXP19-35	35	0.6	24.05	46.05	27.09
4	110216EXP20-35	35	0.6	26.36	47.54	31.49
5	110216EXP21-35	35	0.6	28.10	54.08	35.62
6	110216EXP22-35	35	0.6	30.65	62.60	36.16
7	050216EXP9-50	50	0.6	19.99	33.69	36.93
8	050216EXP10-50	50	0.6	21.39	37.79	40.68
9	050216EXP11-50	50	0.6	23.02	41.76	42.02
10	080216EXP12-50	50	0.6	25.00	48.00	41.51
11	080216EXP13-50	50	0.6	27.21	49.22	39.00
12	080216EXP14-50	50	0.6	29.14	52.14	40.38
13	090216EXP15-50	50	0.6	28.82	48.71	51.41
14	090216EXP16-50	50	0.6	26.21	49.64	43.18
15	280116EXP1-70	70	0.6	20.27	21.37	35.14
16	280116EXP2-70	70	0.6	19.13	25.36	34.84
17	290116EXP3-70	70	0.6	23.03	25.36	39.98
18	290116EXP4-70	70	0.6	25.47	31.25	39.06
19	290116EXP5-70	70	0.6	26.97	33.31	40.05
20	010216EXP6-70	70	0.6	19.70	21.80	38.99
21	010216EXP7-70	70	0.6	21.76	21.83	41.21
22	010216EXP8-70	70	0.6	23.50	28.33	43.93

