

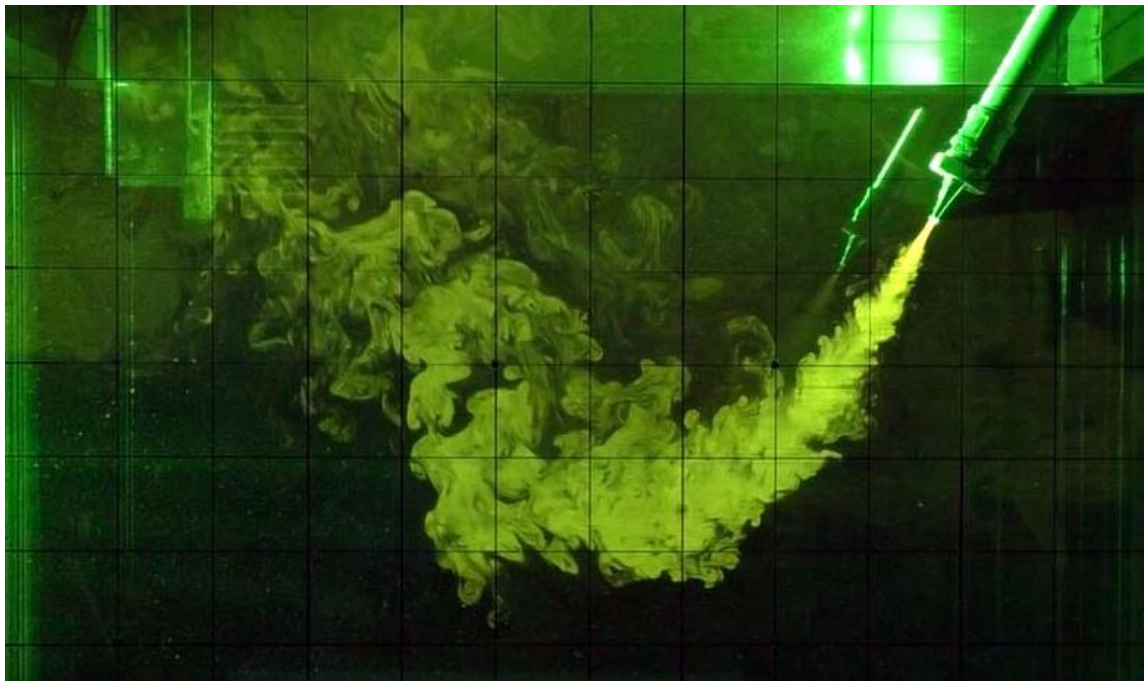


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ
ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES
AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΕΣ ΦΛΕΒΕΣ
ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΒΡΑΧΙΟΛΙΔΗΣ

Επιβλέπων: Παναγιώτης Ν. Παπανικολάου
Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Πρόλογος

Ο πρόλογος αυτής της εργασίας αποτελεί ταυτόχρονα και τον επίλογο ενός κύκλου. Του κύκλου της προπτυχιακής εκπαίδευσης στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η εισαγωγή και φοίτηση σε αυτό το τμήμα ήταν μια επιλογή που δεν έγινε συνειδητά αλλά βασίστηκε περισσότερο στο προαίσθημα. Το προαίσθημα πως μέσω αυτής της σχολής θα μπορέσω να ωριμάσω πνευματικά. Μετά από σχεδόν επτά (7) χρόνια φοίτησης, ατελείωτες ώρες διαβάσματος, εργασιών, μαθημάτων, τεχνικών προδιαγραφών, μεθοδολογιών κτλ, διαπίστωσα πως στο Πολυτεχνείο διδάχθηκα ένα πράγμα, να σκέφτομαι. Να επεξεργάζομαι και να αναλύω τις εισερχόμενες πληροφορίες, ώστε να μπορέσω να βρώ τη βέλτιστη λύση σε κάθε πρόβλημα που μου παρουσιάζεται. Είτε πρόκειται για πρόβλημα γραμμένο σε ένα χαρτί, είτε για ένα πρόβλημα της καθημερινής ζωής.

Η διπλωματική εργασία που παρουσιάζεται στις επόμενες σελίδες αυτού του τεύχους, ασχολείται με την πειραματική μελέτη σε τυρβώδεις φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Ε.Μ.Π. Διερευνάται η μεταβολή της θερμοκρασίας της φλέβας στο πεδίο ροής της αλλά και ορισμένα από τα κυριότερα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της σύγχρονης βιβλιογραφίας.

Για να ολοκληρωθεί με επιτυχία η εργασία ήταν απαραίτητη η πολύτιμη βοήθεια μερικών συντελεστών. Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας Παναγιώτη Παπανικολάου για την ευκαιρία που μου έδωσε να δουλέψω σε συνθήκες εργαστηρίου. Σε ολόκληρη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας ήταν διαθέσιμος σε κάθε πρόβλημα που προέκυπτε και με τις γνώσεις του αλλά και την αμεσότητα του ήταν αυτός μου κίνησε το ενδιαφέρον της μελέτης των ανωστικών φλεβών. Επίσης, θα ήθελα να αναφερθώ στην πολύτιμη βοήθεια του Παναγιώτη Δημητριάδη (Υποψήφιος Διδάκτορας). Ειδικά στα πρώτα στάδια εκπόνησης της εργασίας και διεξαγωγής των πειραμάτων, αφιέρωσε πολύτιμο χρόνο ώστε να με μυήσει στη λειτουργία των οργάνων του εργαστηρίου και συμμετείχε ενεργά στη μετατροπή της πειραματικής διάταξης για τις ανάγκες των πειραμάτων. Τέλος, ανεκτίμητη ήταν η συνεισφορά του Γιάννη Πατσέλη (Τεχνικός Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής), κυρίως στη μετατροπή της πειραματικής διάταξης, όπου πραγματοποιήθηκε κατά το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτόν.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική έρευνα σε θερμαινόμενες τυρβώδεις φλέβες αρνητικής άνωσης, εκτοξευόμενες υπό γωνία σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη. Η παροχέτευση έγινε από κυκλικό στόμιο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, με κατεύθυνση προς τον πυθμένα του αποδέκτη.

Με χρήση διαστατικής ανάλυσης εκφράστηκαν τα κύρια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η αραίωση της φλέβας, συναρτήσει των αρχικών συνθηκών της ροής και προσδιορίστηκαν οι σχέσεις που πρέπει να επαληθευτούν πειραματικά. Στη συνέχεια έγινε σύγκριση μεταξύ ανωστικών φλεβών αρνητικής άνωσης όπου η φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας οφείλεται στη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ φλέβας και αποδέκτη (δεν διατηρείται η αρχική ειδική άνωση), με αυτές που οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης αλατιού (δεν μεταβάλλεται η αρχική ειδική άνωση).

Κατά την πειραματική διαδικασία εξετάστηκαν δύο γωνίες παροχέτευσης ως προς το οριζόντιο επίπεδο, 45° και 60° . Διεξήχθησαν συνολικά περίπου 50 πειράματα και μετρήθηκε η θερμοκρασία της φλέβας με συστοιχία οκτώ (8) αισθητήρων (thermistors) σε δύο θέσεις του πεδίου ροής, στη θέση του μεγίστου βάθους καθόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε υφιστάμενη πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του Ε.Μ.Π, που τροποποιήθηκε κατάλληλα για τις ανάγκες της έρευνας.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από επεξεργασία των δεδομένων, επαληθεύουν τη διαστατική ανάλυση που προηγήθηκε, και είναι συγκρίσιμα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για φλέβες αρνητικής άνωσης (όπου διατηρείται η αρχική ειδική άνωση) της πρόσφατης βιβλιογραφίας.

ABSTRACT

An experimental study has been conducted in heated turbulent negatively buoyant jets, that is discharged at an angle with respect to horizontal in a homogeneous calm ambient. The discharge came out of a circular nozzle near the free surface, directed toward the bottom of the tank used.

Using dimensional analysis, the main geometrical characteristics and the dilution of the jet were normalized using the initial flow parameters and jet diameter, and relationships were identified which had to be verified experimentally. Comparison was made between negative buoyant jets wherein the apparent gravity is due to the temperature difference between jet and ambient (the initial specific buoyancy flux is not maintained), and those due to the salt concentration difference (the initial specific buoyancy flux does not change).

Experiments have been implemented for two discharge angles with respect to horizontal, 45° and 60° . A total amount of 50 experiments were conducted, wherein the temperature of the jet was measured using an array of eight (8) sensors (fast response thermistors), in two different locations of the flow field: (i) Vertical measurements around the cross section of the maximum descent depth, and (ii) horizontal measurements at the elevation of the nozzle where the flow returns. The experiments were conducted in an existing experimental apparatus at the Laboratory of Applied Hydraulics of NTUA, amended to suit the needs of the research.

The results after data processing, verified dimensional analysis and are found to be comparable to those of inclined negatively buoyant jets (wherein the initial specific buoyancy is maintained) of the recent literature.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	1
1.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΙΣΜΟΙ	2
1.3 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	4
2. ΘΕΩΡΙΑ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ, ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	5
2.1 ΡΟΗ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΗΣ ΦΛΕΒΑΣ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ	5
2.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ	6
2.3 ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	10
2.4 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	14
2.5 ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΞΥ ΦΛΕΒΩΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑΣ	17
3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	19
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	19
3.2 ΦΛΕΒΕΣ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ ΥΠΟ ΓΩΝΙΑ	19
3.3 ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ – ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	22
3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΛΕΒΩΝ ΑΡΝΗΤΙΚΗΣ ΑΝΩΣΗΣ	23
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	27
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	27
4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	27
4.3 ΌΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	30
4.3.1 Παροχόμετρο	30
4.3.2 Μέτρηση θερμοκρασίας	30
5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ	33
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	33
5.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	33
5.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	35
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	41
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	41
6.2 ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΚΑΘΟΔΟΥ	42
6.3 ΒΑΘΟΣ ΑΞΟΝΑ ΤΗΣ ΦΛΕΒΑΣ ΚΑΙ ΘΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΥΡΒΗΣ.	51
6.4 ΠΛΑΤΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	56
6.5 ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΘΕΣΗ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΚΑΘΟΔΟΥ	58
6.6 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΩ ΟΡΙΟΥ ΦΛΕΒΑΣ	60
6.7 ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΙΑΛΥΣΗ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΒΑΘΟΥΣ ΚΑΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΗΣ ΦΛΕΒΑΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΣΗΣ	61
6.8 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΘΕΣΗΣ ΑΞΟΝΑ ΦΛΕΒΑΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΠΑΡΟΧΕΤΕΥΣΗΣ	66
6.9 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	68
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	77

Κυριότεροι Συμβολισμοί

Λατινικά Σύμβολα

b_c	Πλάτος κατανομής μέσης χρονικά διαφοράς θερμοκρασίας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση στη θέση του μεγίστου βάθους.
B_o	Αρχική ροή ειδικής άνωσης (στην εκροή)
C_i	Σταθερά αναλογίας θεωρητικής σχέσης i , με βάση τη διαστατική ανάλυση
D	Διάμετρος στομίου παροχέτευσης
F_o	Αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude ($=U_o/(g'oD)^{0.5}$)
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
g'	Φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας ($=g\Delta\rho/\rho_o$)
I_M	Χαρακτηριστική κλίμακα μήκους ($=M_o^{3/4}/B_o^{1/2}$)
I_Q	Χαρακτηριστική κλίμακα μήκους ($=Q_o/M_o^{1/2}$)
M_o	Αρχική ροή ειδικής ποσότητας κίνησης
Q_o	Αρχική παροχή
Re_o	Αρχικός αριθμός Reynolds
Ri_o	Αρχικός αριθμός Richardson
s	Άξονας φλέβας
S	Αραίωση
S_t	Αξονική αραίωση στο μέγιστο βάθος καθόδου
S_i	Αξονική αραίωση στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης
T	Θερμοκρασία
T_M	Μέση χρονικά θερμοκρασία
T_{RMS}	RMS τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας
U_o	Αρχική ταχύτητα φλέβας
X	Οριζόντιος άξονας συστήματος συντεταγμένων με αρχή το στόμιο παροχέτευσης της φλέβας
X_Z	Οριζόντια απόσταση από το στόμιο παροχέτευσης μέχρι τη θέση του μεγίστου βάθους καθόδου
X_{ic}	Οριζόντια απόσταση από το στόμιο παροχέτευσης μέχρι τον άξονα της φλέβας, στο επίπεδο παροχέτευσης
Z	Κατακόρυφος άξονας με αρχή το κέντρο του στομίου παροχέτευσης κάθετος στον άξονα X
Z_c	Μέγιστο βάθος άξονα φλέβας
Z_f	Μέγιστο βάθος φλέβας (εξωτερικό όριο)

Ελληνικά Σύμβολα

ρ	Πυκνότητα υγρού
μ	Δυναμική συνεκτικότητα (ιξώδες)
ν	Κινηματική συνεκτικότητα (ιξώδες)

Δείκτες

α	Ποσότητες που αφορούν το υγρό του αποδέκτη
c	Ποσότητες που αφορούν τον άξονα της φλέβας
o	Ποσότητες που αφορούν τις αρχικές συνθήκες της φλέβας στην εκροή
M	Μέση χρονικά τιμή

Συντομογραφίες

Δ	Διαφορά
Σ	Άθροισμα
RMS	Τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων (Root Mean Square)

1. Εισαγωγή

1.1 Γενικά Στοιχεία

Το νερό αποτελεί το θεμελιώδες αγαθό που απαιτείται για την ύπαρξη ζωής. Περίπου το 72% της Γης καλύπτεται από νερό. Με βάση αυτό το εντυπωσιακό ποσοστό θα μπορούσαμε εύκολα να πούμε ότι υπάρχει αφθονία νερού για κατανάλωση και την ανάπτυξη του ανθρώπινου είδους. Ωστόσο, μόνο το 3% του νερού της Γης είναι γλυκό. Αλλά από αυτό το 1,6% δεν είναι διαθέσιμο γιατί αποτελεί τους πάγους των πόλων και τα χιόνια των βουνών. Ένα άλλο 0,36% βρίσκεται κάτω από τη Γη ή μέσα στα πηγάδια. Περίπου 1% κυκλοφορεί στον αέρα με μορφή σύννεφων και ατμού ή βρίσκεται μέσα στα φυτά και τους ζωντανούς οργανισμούς. Έτσι, μόνο το 0,03% είναι στα ποτάμια και στις λίμνες. Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως έχουμε έλλειψη και όχι αφθονία νερού. Για να συνεχίσει να υπάρχει ζωή στη Γη πρέπει να γίνει σωστή διαχείριση του υπάρχοντος διαθέσιμου πόσιμου νερού, προστασία των υδάτινων πόρων, πόσιμων και μη, αλλά και εύρεση εναλλακτικών πηγών πόσιμου νερού.

Η ραγδαία ανάπτυξη του ανθρώπινου είδους τους τελευταίους δύο αιώνες έχει οδηγήσει στην ανάλογη αύξηση υγρών αποβλήτων που διατίθενται σε επιφανειακά νερά (θάλασσες, ποτάμια κλπ.). Ο επικρατέστερος τρόπος διάθεσής τους στους υδάτινους αποδέκτες μετά από επεξεργασία είναι, μέσω διαχυτήρων που τοποθετούνται στον πυθμένα, με τη μορφή τυρβωδών φλεβών. Ως τυρβώδης ανωστική φλέβα ορίζεται η εκροή υγρού από οπή ή σχισμή μέσα σε μεγάλο όγκο ρευστού με διαφορετική πυκνότητα. Η ανωστική φλέβα δημιουργείται από την ποσότητα κίνησης (αρχική ταχύτητα) που της παρέχουμε και την ύπαρξη ανωστικών δυνάμεων (πυκνομετρικής διαφοράς). Αν η ανωστική δύναμη έχει ίδια φορά με αυτή της ταχύτητας, η άνωση είναι θετική, ενώ στην αντίθετη περίπτωση η φλέβα διακατέχεται από αρνητική άνωση. Οι τυρβώδεις φλέβες χαρακτηρίζονται από μεγάλη συμπαράσυρση περιβάλλοντος ρευστού στη μάζα τους. Η συμπαράσυρση οδηγεί στην αραίωση του διατιθέμενου ρευστού και τη μείωση της πυκνότητάς του.

Η πυκνότητα των υγρών αποβλήτων είναι κατά κανόνα διαφορετική από την πυκνότητα του αποδέκτη. Τα συνήθη αστικά λύματα μιας περιοχής έχουν μικρότερη πυκνότητα από αυτή του αποδέκτη. Αυτή η πυκνομετρική διαφορά οδηγεί στην ύπαρξη θετικής άνωσης στη φλέβα που διατίθεται στον πυθμένα, οδηγώντας τη στην επιφάνεια του αποδέκτη. Μέχρι σήμερα, η μεγάλη πλειοψηφία των λυμάτων διάθεσης ήταν αυτής της κατηγορίας με αποτέλεσμα οι μελέτες που έχουν γίνει να αφορούν φλέβες θετικής άνωσης. Τα τελευταία χρόνια όμως, υπάρχει η ανάγκη διάθεσης αποβλήτων με πυκνότητα μεγαλύτερη από του αποδέκτη. Τέτοια λύματα είναι τα βαριά υγρά βιομηχανικά απόβλητα. Επίσης, η ανάγκη για εύρεση εναλλακτικών πηγών πόσιμου νερού οδήγησε στην άνθιση των εγκαταστάσεων αφαλάτωσης. Το αλμόλουπο, δηλαδή το διάλυμα που περισσεύει μετά την αφαλάτωση του νερού, έχει διπλάσια αλατότητα από του θαλασσινού νερού. Η διάθεση των προαναφερθέντων σε υδάτινο αποδέκτη είναι πιο περίπλοκη,

δημιουργεί συνθήκες αρνητικής άνωσης στη φλέβα, οδηγώντας τα λύματα που διαθέτουμε στον πυθμένα του αποδέκτη, αλλάζοντας τις ισορροπίες που υπάρχουν σε αυτόν.

Για την αποφυγή καταστροφής του υδάτινου περιβάλλοντος από την επιστροφή των αποβλήτων στον πυθμένα και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, απαιτείται ο βέλτιστος σχεδιασμός της διάθεσης ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη αραίωση του υγρού που παροχετεύεται στον αποδέκτη. Για την επίτευξη του βέλτιστου σχεδιασμού απαιτείται συστηματική έρευνα για τη συμπεριφορά των ανωστικών φλεβών ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους.



Εικόνα 1.1: Μονάδα αφαλάτωσης και διάθεσης αλμολιπού (desalination plant).

Πηγή: Διαδίκτυο

1.2 Βασικοί ορισμοί

Μία φλέβα ρευστού ανάλογα με τις συνθήκες που καθορίζουν τη ροή της, κατατάσσεται σε μία από τις ακόλουθες κατηγορίες.

Απλή φλέβα (jet), ονομάζεται η εκροή ρευστού από στόμιο, σε αποδέκτη που περιέχει ρευστό ίδιας πυκνότητας. Στην απλή φλέβα, η ροή παράγεται από μια συνεχή πηγή ορμής (ποσότητας κίνησης), ή πιο συγκεκριμένα, η ροή κυριαρχείται από την αρχική ορμή της. Πλούμιο (plume), είναι ροή που μοιάζει με αυτή της απλής

φλέβας, αλλά έχει διαφορετική γενεσιουργό αιτία. Η ροή παράγεται από μια συνεχή πηγή άνωσης. Η άνωση οφείλεται στην πυκνομετρική διαφορά μεταξύ των ρευστών αποδέκτη και φλέβας. Σε αντίθεση με την απλή φλέβα, στο πλούμιο η αρχική ορμή είναι μηδενική. Η ανωστική φλέβα (buoyant jet), αποτελεί το συνδυασμό ροής απλής φλέβας και πλουμίου. Είναι δηλαδή μια φλέβα που κυριαρχείται από την αρχική ορμή της και έχει πυκνομετρική διαφορά με το ρευστό του αποδέκτη. Σε κάποια απόσταση από την πηγή η αρχική ορμή είναι ελάχιστη σε σχέση με την τοπική ορμή της φλέβας και θεωρούμε ότι η κίνηση οφείλεται πρακτικά μόνο στην αρχική άνωση (πλούμιο).

Μια ανωστική φλέβα μπορεί να είναι θετικής ή αρνητικής άνωσης. Θετικής άνωσης είναι οι φλέβες όπου η συνολική ανωστική δύναμη και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας (δηλαδή της ορμής) έχουν την ίδια φορά. Αντίστοιχα, όταν η συνολική ανωστική δύναμη και η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας (δηλαδή της ορμής) έχουν αντίθετη φορά, η φλέβα είναι αρνητικής άνωσης. Αυτός ο ανταγωνισμός μεταξύ άνωσης και ταχύτητας κάνει τις φλέβες αρνητικής άνωσης να παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον από αυτές της θετικής άνωσης. Η μηχανική λειτουργία των φλεβών αρνητικής άνωσης είναι πιο περίπλοκη. Η άνωση εμποδίζοντας την κίνηση, ελαττώνει σταδιακά το μέγεθος της ποσότητας κίνησης με αποτέλεσμα η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας να μηδενίζεται σε κάποια απόσταση από την πηγή της ροής. Μετά το σημείο αυτό η ροή αντιστρέφεται και μεταπίπτει σε πλούμιο, όπου η κίνηση κυριαρχείται από τις ανωστικές δυνάμεις και την οριζόντια συνιστώσα της ορμής.

Η συμπεριφορά μίας φλέβας επηρεάζεται από τρεις κατηγορίες μεταβλητών. Αυτές είναι (i) οι αρχικές κινηματικές παράμετροι της φλέβας, (ii) οι παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού και (iii) τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλέβας. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει την αρχική ταχύτητα παροχέτευσης μέσω του στομίου και τη διαφορά πυκνότητας με το ρευστό του αποδέκτη. Η ταχύτητα δημιουργεί την αρχική ορμή (M_0) ενώ η πυκνομετρική διαφορά καθορίζει το μέγεθος της αρχικής ανωστικής δύναμης που επιδρά στη φλέβα. Η δεύτερη κατηγορία, που αφορά τη κατάσταση του περιβάλλοντος ρευστού, περιλαμβάνει παραμέτρους όπως το επίπεδο της τύρβης, ρεύματα και την πιθανή πυκνομετρική στρωμάτωση του αποδέκτη. Οι παράμετροι αυτές συνήθως αρχίζουν να επηρεάζουν τη ροή σε κάποια απόσταση από το στόμιο, σε αντίθεση με τις παραμέτρους της πρώτης κατηγορίας. Τέλος, η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φαινομένου. Αυτά περιλαμβάνουν το σχήμα του στομίου διάχυσης, την κατεύθυνση της παροχέτευσης, τη γειτνίαση με άλλα στόμια, στερεά όρια ή την ελεύθερη επιφάνεια. Μία φλέβα μπορεί να χαρακτηριστεί ως δισδιάστατη ή τρισδιάστατη. Έτσι αν μια φλέβα εκρέει από λεπτή σχισμή, όπου η μια διάσταση είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από την άλλη, τότε είναι δισδιάστατη, ενώ αν εκρέει από στόμιο τότε είναι τρισδιάστατη.

Τυρβώδης, καλείται η ροή που χαρακτηρίζεται από χαοτικές και τυχαίες μεταβολές του πεδίου ροής του ρευστού. Οι φλέβες αρνητικής άνωσης είναι κατά κανόνα

τυρβώδεις (turbulent buoyant jets). Τυρβώδης ροή δημιουργείται σε επαρκώς μεγάλους αριθμούς Reynolds. Ο αριθμός Reynolds, είναι αδιάστατη παράμετρος και εκφράζεται ως ο λόγος μεταξύ δυνάμεων αδρανείας και δυνάμεων συνεκτικότητας, και ορίζεται από τη σχέση:

$$Re_o = \frac{U_o L}{\nu} \quad (1.1)$$

όπου U_o είναι η ταχύτητα εξόδου από το στόμιο, L ένα χαρακτηριστικό μήκος (για κυκλικά στόμια χρησιμοποιείται η διάμετρος D) και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα.

1.3 Σκοπός της έρευνας

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Επιχειρείται η πειραματική διερεύνηση της ροής φλεβών αρνητικής άνωσης που δημιουργούνται από τη διαφορά πυκνότητας (θερμοκρασιακή διαφορά) και παροχετεύονται υπό γωνία, ως προς την ελεύθερη επιφάνεια, σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση των βασικών χαρακτηριστικών των φλεβών, όπως το τερματικό ύψος καθόδου και η οριζόντια απόσταση στην οποία εμφανίζεται, καθώς επίσης η αραίωση που επιτυγχάνεται στο τερματικό ύψος καθόδου αλλά και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο οριζόντιο επίπεδο του στομίου παροχέτευσης.

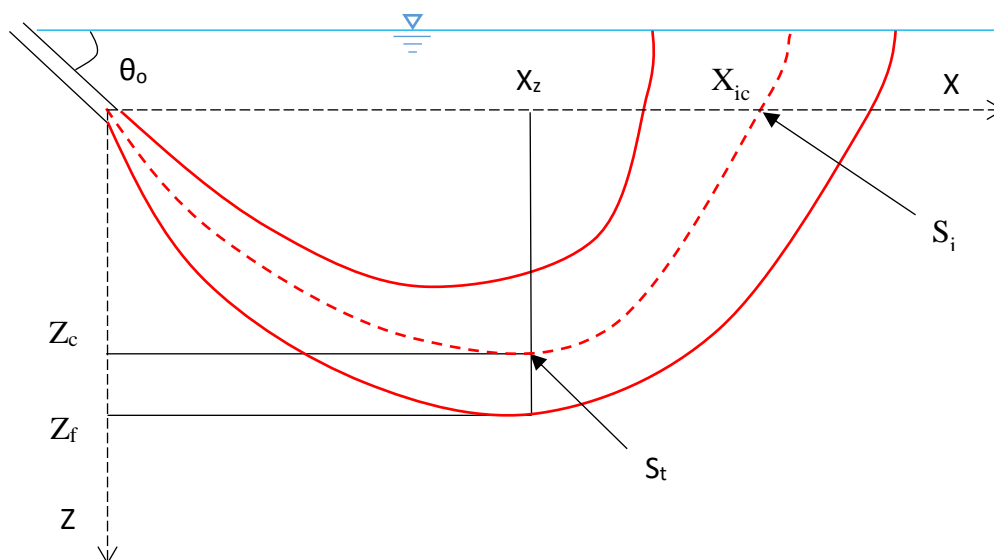
Στη σύγχρονη αλλά και στην παλαιότερη βιβλιογραφία δεν υπάρχουν μελέτες σχετικά με τις θερμαινόμενες φλέβες αρνητικής άνωσης. Όλες οι μελέτες της βιβλιογραφίας επικεντρώνονται στις ανωστικές φλέβες με διαφορές αλατότητας, κυρίως λόγω της εφαρμογής τους στις μονάδες αφαλάτωσης. Οι θερμαινόμενες φλέβες σε σχέση με τις φλέβες αλατότητας, παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες ως προς την ανωστική τους συμπεριφορά, η οποία και θα περιγραφεί σε επόμενα κεφάλαια.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επιχειρήσουμε την πειραματική διερεύνηση θερμαινόμενων ανωστικών φλεβών αρνητικής άνωσης και θα τις συγκρίνουμε με ανωστικές φλέβες με αλατότητα ώστε να δούμε εάν η μη διατήρηση της αρχικής ειδικής άνωσης επηρεάζει τη συμπεριφορά της φλέβας και τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής. Για το σκοπό αυτό, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων της παρούσας με δεδομένα που έχουν προκύψει από πειράματα σε φλέβες αρνητικής άνωσης που δημιουργούνται από τη διαφορά συγκέντρωσης (αλατότητας).

2. Θεωρία ανωστικών φλεβών, διαστατική ανάλυση

2.1 Ροή θερμαινόμενης φλέβας αρνητικής άνωσης

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας διενεργείται πειραματική μελέτη θερμαινόμενων φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία, ως προς το οριζόντιο επίπεδο, από σημείο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια, προς τον πυθμένα του αποδέκτη. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα της ροής με το σύστημα συντεταγμένων και τους κυριότερους συμβολισμούς που θα χρησιμοποιηθούν.



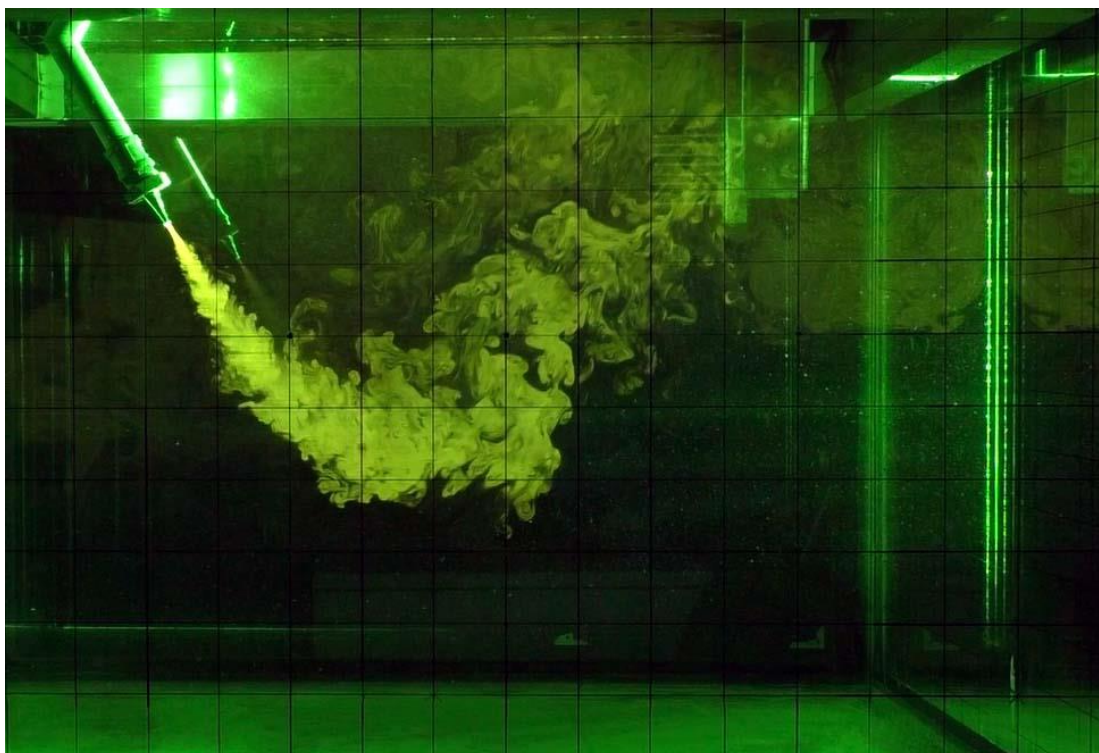
Σχήμα 2.1: Γραφική απεικόνιση ροής με τους κυριότερους συμβολισμούς.

Υγρό με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του αποδέκτη, εκτοξεύεται υπό γωνία, από κυκλικό στόμιο διαμέτρου D τοποθετημένο κοντά στην επιφάνεια του αποδέκτη, όπως στο Σχήμα 2.1. Ο αποδέκτης είναι ομογενής και μη στρωματωμένος. Επίσης θεωρούμε πως η φλέβα βρίσκεται μακριά από τα στερεά όρια του αποδέκτη και δεν επηρεάζεται από αυτά. Η φλέβα αρχικά κινείται προς την κατεύθυνση της παροχέτευσης, μέχρι να μηδενιστεί η ορμή σε κάποια απόσταση από την πηγή. Στο σημείο αυτό η ροή αναστρέφεται και η φλέβα οδηγούμενη από τις ανωστικές δυνάμεις ακολουθεί ανοδική πορεία προς την επιφάνεια του αποδέκτη.

Για την κατανόηση της κίνησης της φλέβας πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο πείραμα με χρήση της τεχνικής οπτικοποίησης LIF (Laser Induced Fluorescence). Στο υγρό της θερμής φλέβας προστέθηκε ροδαμίνη 6G, ουσία κατάλληλη που όταν διαγείρεται από φύλλο Laser ορισμένης συχνότητας (532 nm), εκπέμπει ακτινοβολία (κίτρινο φως) μήκους κύματος περί τα 565 nm. Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό στιγμιότυπο της τροχιάς της φλέβας. Μπορούμε να διακρίνουμε το μέγιστο βάθος καθόδου, τη θέση δηλαδή όπου η ροή αναστρέφεται και ξεκινά την

ανοδική της πορεία προς την ελεύθερη επιφάνεια. Παρατηρούμε πως η θέση αυτή δεν είναι σημειακή αλλά έχει κάποιο μήκος, στοιχείο που προσδίδει αβεβαιότητα στην εκτίμηση της θέσης του μεγίστου βάθους. Μετά την αναστροφή της ροής, η φλέβα κυριαρχείται από τις ανωστικές δυνάμεις και παρουσιάζει χαρακτηριστικά πλουμίου. Στο επίπεδο παροχέτευσης της φλέβας, παρατηρούμε πως η αραίωση είναι σαφώς μεγαλύτερη από το μέγιστο βάθος καθόδου.

2.2 Στοιχεία ανωστικών φλεβών



Εικόνα 2.1: Στιγμιότυπο της τροχιάς της φλέβας, με χρήση της μεθόδου LIF.

Το μέγιστο βάθος ροής της φλέβας, αγνοώντας το ιξώδες καθώς η φλέβα θεωρείται τυρβώδης, μπορεί να περιγραφεί συναρτήσει τριών μεγεθών. Της ογκομετρικής παροχής Q , της ροής ειδικής ποσότητας κίνησης ή ορμής M και της ροής ειδική άνωσης B (Fischer *et al.* 1979) . Με τον όρο ειδική αναφερόμαστε στην αντίστοιχη ποσότητα ανά μονάδα ρέοντος ρευστού. Τα μεγέθη αυτά ορίζονται ως εξής:

$$Q = \int_A u dA \quad (2.1)$$

$$M = \int_A u^2 dA \quad (2.2)$$

$$B = \int_A g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho} dA \quad (2.3)$$

Στις παραπάνω σχέσεις είναι u η μέση χρονικά ταχύτητα κατά τη διεύθυνση του άξονα της φλέβας, A η εγκάρσια διατομή της φλέβας, $\Delta\rho$ η διαφορά της πυκνότητας μεταξύ των ρευστών περιβάλλοντος και φλέβας και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Στον υπολογισμό των ανωστικών φλεβών αντί της επιτάχυνσης βαρύτητας g , χρησιμοποιείται η φαινόμενη (μειωμένη) επιτάχυνση της βαρύτητας g' , η οποία ορίζεται:

$$g' = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_o} = g \cdot \frac{|\rho_\alpha - \rho_o|}{\rho_o} \quad (2.4)$$

Στη σχέση (2.4) ρ_α είναι η πυκνότητα του ρευστού του αποδέκτη (ambient) και ρ_o η αρχική πυκνότητα του ρευστού της φλέβας. Στον παρονομαστή της σχέσης (2.4) μπορεί εναλλακτικά να χρησιμοποιηθεί η πυκνότητα του ρευστού του αποδέκτη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η παροχέτευση φλέβας ρευστού μικρότερης πυκνότητας, σε ομογενή αποδέκτη ρευστού μεγαλύτερης πυκνότητας. Επομένως, η σχέση (2.4) μπορεί να γραφτεί:

$$g' = g \cdot \frac{\Delta\rho}{\rho_o} = g \cdot \frac{\rho_\alpha - \rho_o}{\rho_o} \quad (2.5)$$

Έτσι, στην εκροή της φλέβας, ολοκληρώνοντας τις σχέσεις (2.1), (2.2) και (2.3), τα τρία μεγέθη που περιγράφουν τη ροή της φλέβας διαμορφώνονται ως εξής:

Παροχή:

$$Q_o = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot U_o \quad (2.6)$$

Ροή ειδικής ποσότητας κίνησης:

$$M_o = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot U_o^2 = U_o \cdot Q_o \quad (2.7)$$

Ροή ειδικής άνωσης:

$$B_o = g \cdot \frac{\Delta\rho_o}{\rho_o} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot U_o = g'_o \cdot Q_o \quad (2.8)$$

Ο δείκτης “ο” εκφράζει την ποσότητα του αντίστοιχου μεγέθους στο σημείο της εκροής, δηλαδή την αρχική τιμή του.

Θεωρώντας ότι στο πεδίο ροής ισχύει η παραδοχή Boussinesq ($\Delta\rho \ll \rho_a$) και ότι η ροή είναι τυρβώδης, κάθε μεταβλητή του πεδίου ροής μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση των παραμέτρων Q_o , M_o , B_o , και της απόστασης από την πηγή s για κεκλιμένο άξονα ή z για κατακόρυφες φλέβες. Από τις παραμέτρους αυτές ορίζονται δύο χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους (Fischer *et al.*, 1979):

$$l_Q = \frac{Q_o}{M_o^{1/2}} \quad (2.9)$$

$$l_M = \frac{M_o^{3/4}}{B_o^{1/2}} \quad (2.10)$$

Αν $z \gg l_M$ μια κατακόρυφη φλέβα συμπεριφέρεται σαν πλούμιο, ενώ αν $z \ll l_M$ συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα (Fischer *et al.*, 1979).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και μια άλλη ερμηνεία των κλιμάκων l_Q και l_M (Wright 1984, Roberts *et al.* 1997):

- I. Σε απόσταση από την πηγή ίση με l_Q , η παροχή από τη συμπαράσυρση του περιβάλλοντος ρευστού είναι ίση με την αρχική παροχή Q_o . Σε αποστάσεις μικρότερες της l_Q ($z/l_Q \ll 1$), δηλαδή κοντά στην εκροή, η αρχική παροχή και η γεωμετρία του στομίου παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά της ροής. Αντίθετα, σε αποστάσεις μεγαλύτερες της l_Q ($z/l_Q \gg 1$) η παροχή από τη συμπαράσυρση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αρχική παροχή η οποία μπορεί να αμεληθεί.
- II. Σε απόσταση από την πηγή ίση με l_M , η ποσότητα κίνησης που δημιουργείται λόγω της άνωσης, είναι περίπου ίση με την αρχική ποσότητα κίνησης M_o . Σε αποστάσεις μικρότερες της l_M ($z/l_M \ll 1$) η αρχική ποσότητα κίνησης είναι σημαντική ενώ σε αποστάσεις μεγαλύτερες της l_M ($z/l_M \gg 1$) η ποσότητα κίνησης που δημιουργείται από την άνωση είναι πολύ μεγαλύτερη από την αρχική ποσότητα κίνησης, η οποία μπορεί να αμεληθεί. Όμως, στις φλέβες αρνητικής άνωσης, μέχρι το σημείο αντιστροφής της ροής, η κατακόρυφη συνιστώσα της ταχύτητας (ποσότητας κίνησης) αντιτίθεται στη ροή και άρα δεν μπορεί να αμεληθεί.

Ο λόγος l_Q/l_M ονομάζεται αριθμός Richardson, ο οποίος εκφράζει το λόγο των αδρανειακών δυνάμεων προς τις ανωστικές δυνάμεις. Για τις αρχικές συνθήκες, στο σημείο της εκροής, ορίζεται ο αρχικός αριθμός Richardson Ri_o :

$$Ri_o = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{Q_o \cdot B_o^{1/2}}{M_o^{5/4}} \quad (2.11)$$

Ο οποίος για παροχέτευση από κυκλικό στόμιο διαμέτρου D , με τη βοήθεια των σχέσεων (2.6), (2.7) και (2.8) γράφεται:

$$Ri_o = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \cdot \frac{\sqrt{g'_o \cdot D}}{U_o} \quad (2.12)$$

όπου $U_o / \sqrt{g'_o \cdot D}$ είναι ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude της φλέβας. Στην ανάλυση των ανωστικών φλεβών χρησιμοποιείται η φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας, που ορίσθηκε προηγουμένως. Έτσι, ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude ορίζεται ως:

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{g \cdot \frac{|\rho_\alpha - \rho_o|}{\rho_\alpha} \cdot D}} = \frac{U_o}{\sqrt{g'_o \cdot D}} \quad (2.13)$$

όπου U_o είναι η αρχική ταχύτητα της φλέβας και D η διάμετρος του στομίου παροχέτευσης.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2.12) και (2.13), ο αρχικός αριθμός Richardson γράφεται συναρτήσει του πυκνομετρικού αριθμού Froude ως εξής:

$$Ri_o = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \cdot \frac{1}{F_o} \quad (2.14)$$

Οι Paranicolaou & List (1988) παρατήρησαν ότι για μεγάλους αριθμούς F_o κυριαρχεί η ορμή στην εκροή της φλέβας, ενώ για μικρούς αριθμούς F_o η ροή συμπεριφέρεται σαν πλούμιο από την εκροή της φλέβας. Πρακτικά για αριθμούς $F_o > 15$ έχουμε κυριαρχία της ορμής στην εκροή. Επίσης, από τη σχέση (2.14) παρατηρούμε ότι οι αριθμοί Richardson και Froude είναι αντιστρόφως ανάλογοι. Έτσι, σε μια ροή όπου στην εκροή υπάρχει κυριαρχία της ορμής ο αριθμός Richardson θα είναι μικρός, ενώ στην περίπτωση που η ροή προσεγγίζει αυτή του πλουμίου, ο αριθμός Richardson θα είναι μεγάλος.

Μία ακόμη σημαντική παράμετρος η οποία θα υπολογιστεί από τις μετρήσεις θερμοκρασίας είναι η αραίωση (ή διάλυση) της φλέβας. Σε κάποιο σημείο της φλέβας η αραίωση ορίζεται:

$$S = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_M} = \frac{T_o - T_\alpha}{T_M - T_\alpha} \quad (2.15)$$

Στη σχέση (2.15) T_o είναι η αρχική θερμοκρασία της φλέβας στο σημείο εκροής, T_α η θερμοκρασία του αποδέκτη, και T_M η (μέση χρονικά) θερμοκρασία της φλέβας στο σημείο που υπολογίζεται η αραίωση.

2.3 Διαστατική ανάλυση

Βασικό εργαλείο για την εξαγωγή συμπερασμάτων στην πειραματική υδραυλική αποτελεί η διαστατική ανάλυση (dimensional analysis). Το 1822 διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Fourier η αρχή της διαστατικής ομογενείας, σύμφωνα με την οποία, κάθε αλγεβρική έκφραση ενός φυσικού νόμου είναι διαστατικά ομογενής, δηλαδή στην εξίσωση περιγραφής μιας φυσικής σχέσης όλοι οι όροι πρέπει να έχουν τις ίδιες διαστάσεις. Η διαστατική ανάλυση χρησιμοποιεί αντίστροφα την αρχή αυτή, σε συνδυασμό με τη θεωρία των ομογενών συναρτήσεων, για να συνάγει τη μορφή της εξίσωσης που διέπει ένα φυσικό φαινόμενο, προϋποθέτοντας τη γνώση μόνο των σχετικών μεταβλητών και των διαστάσεών τους. Η διαστατική ανάλυση συνήθως δεν οδηγεί στον πλήρη ποσοτικό προσδιορισμό του φαινομένου, αλλά σε ένα ποιοτικό συσχετισμό μεταξύ των μεταβλητών που επηρεάζουν το φαινόμενο. Αυτός ο συσχετισμός ποσοτικοποιείται με τη βοήθεια πειραματικών δεδομένων. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι διαστατικής ανάλυσης είναι η μέθοδος του Rayleigh και η μέθοδος του Buckingham (1915), γνωστή και ως «Θεώρημα των Π».

Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στην ανάλυση που παρουσιάστηκε στον Παπακωνσταντή (2009).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, μια οποιαδήποτε μονάδα μήκους που χαρακτηρίζει τη ροή της φλέβας, για παράδειγμα το βάθος καθόδου Z , για συγκεκριμένη γωνία παροχέτευσης θ_o , μπορεί να περιγραφεί πλήρως συναρτήσει των τριών παραμέτρων της ροής:

$$Z = f(Q_o, M_o, B_o) \quad (2.16)$$

Με χρήση διαστατικής ανάλυσης και των σχέσεων (2.9) & (2.10) για τις κλίμακες μήκους l_Q και l_M προκύπτει:

$$\frac{Z}{l_M} = f\left(\frac{l_M}{l_Q}\right) \quad (2.17)$$

Θεωρώντας ότι ισχύει η παραδοχή Boussinesq ($\Delta\rho \ll \rho_\alpha$), οι διαφορές πυκνότητας αμελούνται και λαμβάνονται υπόψη μόνο μέσω του όρου της βαρύτητας. Στην προηγούμενη παράγραφο ορίσθηκε η μειωμένη επιτάχυνση της βαρύτητας, η οποία για ένα σημείο (X,Z) της φλέβας, γράφεται:

$$g'_{(X,Z)} = g \cdot \frac{|\rho_{\varphi(X,Z)} - \rho_\alpha|}{\rho_{\varphi(X,Z)}} = f(Q_o, M_o, B_o, X, Z) \quad (2.18)$$

Η μειωμένη επιτάχυνση της βαρύτητας είναι και αυτή, συνάρτηση των τριών βασικών παραμέτρων Q_o , M_o , B_o και της θέσης (X,Z) του σημείου της φλέβας που εξετάζουμε.

Η αραιώση ορίσθηκε στη σχέση (2.15) συναρτήσεως της θερμοκρασίας. Μπορεί όμως να ορισθεί και σαν συνάρτηση της φαινόμενης επιτάχυνσης της βαρύτητας ως εξής (Roberts *et al.* 1997):

$$S = \frac{g'_o}{g'} \quad (2.19)$$

Επομένως, για ένα σημείο (X,Z) της φλέβας, η μέση χρονικά αραιώση γράφεται:

$$S_{(X,Z)} = \frac{g'_o}{g'_{(X,Z)}} \quad (2.20)$$

Στη θέση (X,Z) της φλέβας θα ισχύει για την αραιώση:

$$S \cdot \frac{l_Q}{l_M} = f\left(\frac{l_M}{l_Q}, \frac{X}{l_M}, \frac{Z}{l_M}\right) \quad (2.21)$$

Οι φλέβες αρνητικής άνωσης κοντά στο σημείο εκροής κυριαρχούνται από δυνάμεις ορμής (ποσότητα κίνησης). Αυτό συνεπάγεται μεγάλη αρχική ταχύτητα και κατ' επέκταση μεγάλο αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude ($F_o \gg 1$). Όμως, ο αριθμός Froude είναι αντιστρόφως ανάλογος του αρχικού αριθμού Richardson, άρα ισχύει και $Ri_o = l_Q/l_M \ll 1$. Με αυτές τις συνθήκες η δυναμική επίδραση της αρχικής παροχής είναι

ασήμαντη και επομένως οι όροι l_Q , Q μπορούν να παραληφθούν από την ανάλυση. Έτσι, οι σχέσεις (2.17) & (2.21) γίνονται:

$$\frac{Z}{l_M} = \text{σταθερό} \quad (2.22)^1$$

$$S \cdot \frac{l_Q}{l_M} = f\left(\frac{X}{l_M}, \frac{Z}{l_M}\right) \quad (2.23)$$

Οι κλίμακες μήκους που ορίστηκαν στις σχέσεις (2.9) & (2.10) μπορούν να γραφούν:

$$l_M = \frac{M_o^{3/4}}{B_o^{1/2}} = \frac{U_o^{3/4} \cdot U_o^{3/4} \cdot A^{3/4}}{g_o^{1/2} \cdot U_o^{1/2} \cdot A^{1/2}} = \frac{U_o}{g_o^{1/2}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4}\right)^{1/4} = F_o \cdot D \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \quad (2.24\alpha)$$

$$l_Q = \frac{Q_o}{M_o^{1/2}} = \frac{U_o \cdot A}{U_o^{1/2} \cdot U_o^{1/2} \cdot A^{1/2}} = D \cdot \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/2} \quad (2.24\beta)$$

Όπου στη θέση του A αντικαταστάθηκε η επιφάνεια κυκλικού στομίου διαμέτρου D , $\pi D^2/4$. Οι σχέσεις (2.22) & (2.23) με τη βοήθεια των σχέσεων (2.24α & β) γράφονται:

$$\frac{Z}{D \cdot F_o} = \text{σταθερό} \quad (2.25)$$

$$\frac{S}{F_o} = f\left(\frac{X}{D \cdot F_o}, \frac{Z}{D \cdot F_o}\right) \quad (2.26)$$

Στη σχέση (2.25) ο όρος Z μπορεί να αντικατασταθεί από οποιαδήποτε θέση της τροχιάς της φλέβας που μελετάται:

$$\frac{Z_c}{D \cdot F_o} = \text{σταθερό}, \quad \frac{X_Z}{D \cdot F_o} = \text{σταθερό} \quad (2.27)$$

Από τη σχέση (2.26) βλέπουμε πως και η αραίωση παραμένει σταθερή σε μια συγκεκριμένη θέση, για κάθε F_o . Επομένως για συγκεκριμένο σημείο (X/DF_o , Z/DF_o):

$$\frac{S}{F_o} = \text{σταθερό} \quad (2.28)$$

¹ Η σχέση αυτή διατυπώθηκε πρώτη φορά για κατακόρυφη φλέβα από τον Turner (1966)

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζεται το σύνολο των εξισώσεων που προκύπτουν από τη διαστατική ανάλυση και θα επιχειρηθεί η πειραματική τους επαλήθευση. Οι εξισώσεις ισχύουν για σταθερή γωνία παροχέτευσης, δηλαδή για κάθε γωνία υπολογίζεται ξεχωριστή σταθερά C_i . Τα σύμβολα φαίνονται και γραφικά στο Σχήμα 2.1 στην αρχή του κεφαλαίου.

Παράμετρος	Σύμβολο	Εξίσωση
Μέγιστο βάθος καθόδου	Z_f	$\frac{Z_f}{D \cdot F_o} = C_1$
Μέγιστο βάθος του άξονα της φλέβας	Z_c	$\frac{Z_c}{D \cdot F_o} = C_2$
Οριζόντια θέση εμφάνισης μεγίστου βάθους καθόδου	X_z	$\frac{X_z}{D \cdot F_o} = C_3$
Οριζόντια θέση άξονα στο σημείο επιστροφής	X_{ic}	$\frac{X_{ic}}{D \cdot F_o} = C_4$
Αξονική αραιώση στο σημείο (X_z, Z_c)	S_t	$\frac{S_t}{F_o} = C_5$
Αξονική αραιώση στο σημείο $(X_{ic}, 0)$	S_i	$\frac{S_i}{F_o} = C_6$

Πίνακας 2.1: Σταθερές προς προσδιορισμό, στις χαρακτηριστικές θέσης ροής φλέβας αρνητικής άνωσης.

Η διαστατική ανάλυση που προηγήθηκε μπορεί να επεκταθεί εύκολα και στην κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας. Στη σχέση (2.15) ορίσθηκε η αραιώση σε ένα τυχαίο σημείο του πεδίου ροής της φλέβας, ως ο λόγος μεταξύ της αρχικής διαφοράς θερμοκρασίας (ΔT_o) και της (μέσης χρονικά) διαφοράς θερμοκρασίας στο τυχαίο αυτό σημείο. Έτσι για ένα σημείο (X, Z) της φλέβας η σχέση (2.26) γράφεται:

$$\frac{S}{F_o} = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_{M(X,Z)}} \cdot \frac{1}{F_o} = f\left(\frac{X}{D \cdot F_o}, \frac{Z}{D \cdot F_o}\right) \quad (2.29)$$

Στην οριζόντια θέση εμφάνισης του μεγίστου βάθους καθόδου (X_z) ισχύει $X_z/DF_o=C_3$ και η σχέση (2.29) γράφεται:

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_M} \cdot \frac{1}{F_o} = f\left(\frac{Z}{D \cdot F_o}\right) \quad (2.30)$$

Στο μέγιστο βάθος καθόδου, στον άξονα της φλέβας (Z_c) η μέση χρονικά διαφορά θερμοκρασίας είναι ΔT_{Mc} . Επομένως η αξονική αραιώση γράφεται:

$$\frac{\Delta T_o}{\Delta T_{Mc}} \cdot \frac{1}{F_o} = f\left(\frac{Z_c}{D \cdot F_o}\right) \quad (2.31)$$

Διαιρώντας τις σχέσεις (2.30) και (2.31) κατά μέλη και για ένα σταθερό σημείο Z (Z/DF_o=σταθερό), προκύπτει:

$$\frac{\Delta T_M}{\Delta T_{Mc}} = \text{σταθερό} = C_7 \quad (2.32)$$

Δηλαδή, για μια συγκεκριμένη θέση (X,Z) της φλέβας, ο λόγος της μέσης χρονικά διαφοράς θερμοκρασίας σε αυτό το σημείο προς τη μέση χρονικά αξονική διαφορά θερμοκρασίας, είναι σταθερός και ανεξάρτητος του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού Froude F_o. Αυτή η διαπίστωση ισχύει για ανωστικές φλέβες, δηλαδή φλέβες που κυριαρχούνται από την ύπαρξη ορμής στην εκροή τους. Αυτό συμβαίνει για F_o>15.

Αντίστοιχη διαστατική ανάλυση μπορούμε να εφαρμόσουμε και για την κατανομή της έντασης της τύρβης σε μία διατομή του πεδίου ροής τη φλέβας οπότε και προκύπτει:

$$\frac{T_{RMS}}{\Delta T_{Mc}} = \text{σταθερό} = C_8 \quad (2.33)$$

2.4 Ο ρόλος της θερμοκρασίας

Στην παράγραφο 1.2 ορίσθηκε ο αριθμός Reynolds ως μια αδιάστατη παράμετρος και εκφράζεται ως ο λόγος μεταξύ δυνάμεων αδρανείας και δυνάμεων συνεκτικότητας. Η σχέση (1.1) επαναλαμβάνεται προς υπενθύμιση:

$$Re_o = \frac{U_o L}{\nu} \quad (2.34)$$

Όπου U_o είναι η ταχύτητα εξόδου από το στόμιο, L ένα χαρακτηριστικό μήκος (για κυκλικά στόμια χρησιμοποιείται η διάμετρος D) και ν είναι η κινηματική συνεκτικότητα.

Ως κινηματική συνεκτικότητα ορίζεται ο λόγος της δυναμικής συνεκτικότητας (ιξώδες) προς την πυκνότητα του ρευστού:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.35)$$

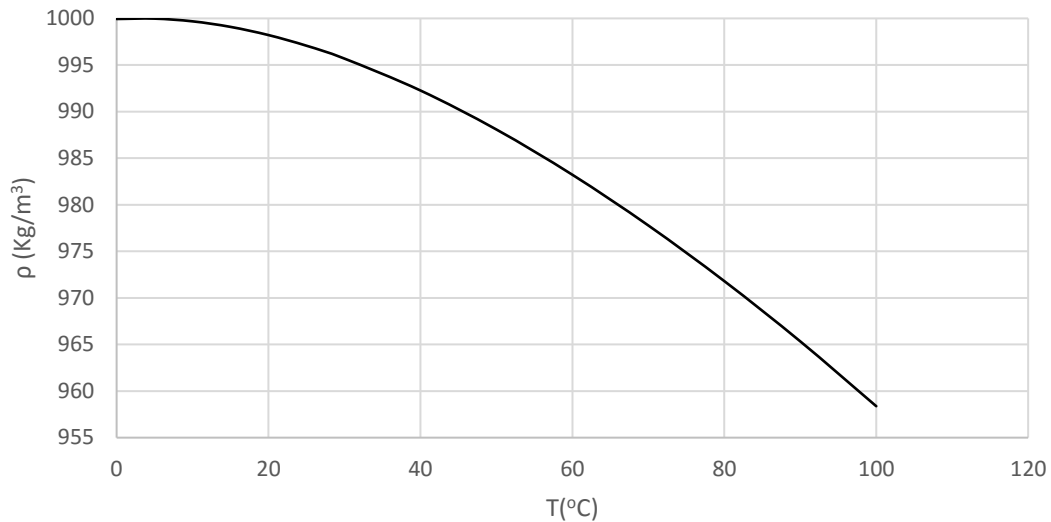
Οι Γ. Νουτσόπουλος και Γ. Χριστοδούλου (Μαθήματα Μηχανικής των ρευστών σελ. 23) αναφέρουν σχετικά με τη δυναμική συνεκτικότητα. «Ο συντελεστής δυναμικής συνεκτικότητας επηρεάζεται από τις ιδιότητες του ρευστού, κυρίως από τη θερμοκρασία. Στα υγρά η συνεκτικότητα μειώνεται αυξανόμενης της θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται στη χαλάρωση της μοριακής δομής των υγρών όταν αυξάνεται η θερμοκρασία με συνέπεια τη μείωση της αντίστασης στην παραμόρφωση τους».

Επίσης, η πυκνότητα του νερού μεταβάλλεται με την αλλαγή της θερμοκρασίας του. Η πυκνότητα του νερού συναρτηθεί της θερμοκρασίας μπορεί να εκτιμηθεί όταν είναι γνωστή η θερμοκρασία του, από τη σχέση των Streeter *et al.* (1998) όπως αναφέρει ο Παπακωνσταντής (2009). Η σχέση ορίζεται ως εξής:

$$\rho_w(T) = 999.9399 + \frac{4.216485}{10^2} T - \frac{7.097451}{10^3} T^2 + \frac{3.509571}{10^5} T^3 - \frac{9.9037785}{10^8} T^4 \quad (2.36)$$

Όπου η θερμοκρασία εκφράζεται σε βαθμούς κελσίου (°C) και η πυκνότητα σε Kg/m³. Η σχέση αυτή αποτελεί μια πολυωνυμική συνάρτηση τετάρτου βαθμού της οποίας η γραφική παράσταση, για μεταβολή της θερμοκρασίας από 0-100°C, φαίνεται στο Σχήμα 2.2.

Γίνεται αντιληπτό πως η τιμή της κινηματικής συνεκτικότητας επηρεάζεται σημαντικά από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Στον Πίνακα 2.2 φαίνονται οι τιμές της πυκνότητας, της δυναμικής συνεκτικότητας και της κινηματικής συνεκτικότητας για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας. Η μονάδα μέτρησης της πυκνότητας έχει μετατραπεί σε gr/cm³ ώστε η μονάδα μέτρησης της κινηματικής συνεκτικότητας να προκύψει cm²/sec η οποία είναι χρηστική για τον υπολογισμό του αρχικού αριθμού Reynolds. Στο σχήμα 2.2 αποτυπώνονται οι τιμές της κινηματικής συνεκτικότητας για διάφορες θερμοκρασίες του νερού.



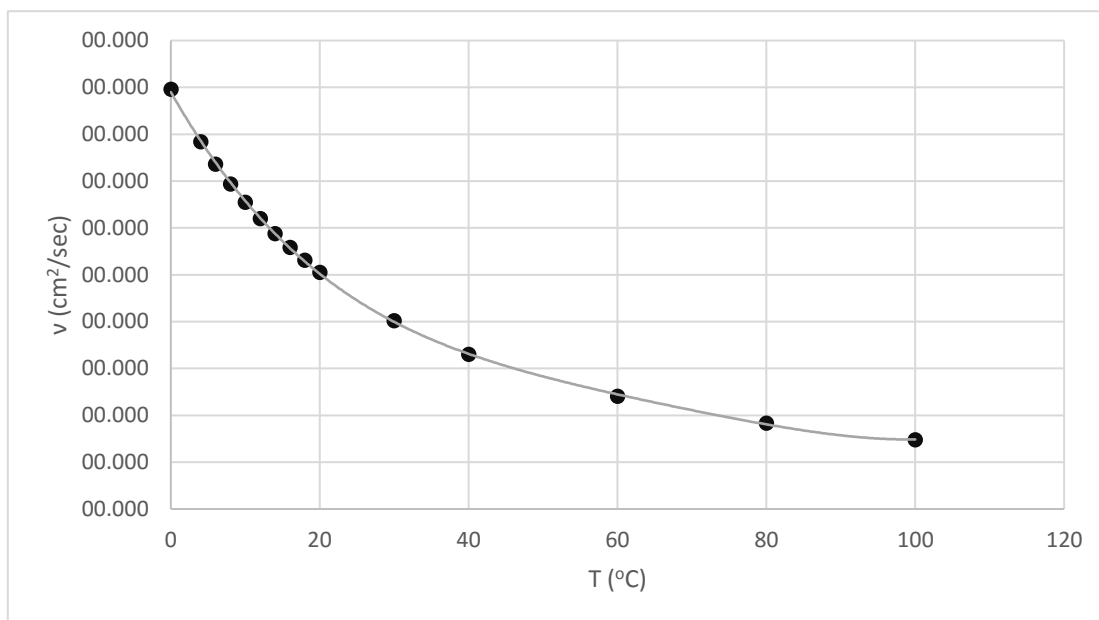
Σχήμα 2.2: Μεταβολή της πυκνότητας του νερού σε σχέση με τη θερμοκρασία, σύμφωνα με τη σχέση 2.36.

Θερμοκρασία	Πυκνότητα	Πυκνότητα	Δυναμική Συνεκτικότητα	Κινηματική Συνεκτικότητα
	ρ	ρ	$\mu \times 10^2$	$\nu \times 10^2$
(°C)	(kg/m ³)	(gr/cm ³)	(gr/cm sec)	(cm ² /sec)
0	999.94	0.99994	1.7921	1.7922
4	1000.00	1.00000	1.5676	1.5676
6	999.94	0.99994	1.4726	1.4727
8	999.84	0.99984	1.3872	1.3874
10	999.69	0.99969	1.3097	1.3101
12	999.48	0.99948	1.2390	1.2396
14	999.23	0.99923	1.1748	1.1757
16	998.93	0.99893	1.1156	1.1168
18	998.59	0.99859	1.0603	1.0618
20	998.21	0.99821	1.0087	1.0105
30	995.68	0.99568	0.8004	0.8039
40	992.26	0.99226	0.6550	0.6601
60	983.22	0.98322	0.4735	0.4816
80	971.80	0.97180	0.3567	0.3671
100	958.37	0.95837	0.2834	0.2957

Πίνακας 2.2: Μεταβολή των ρ , μ , ν σε σχέση με τη θερμοκρασία

Παρατηρούμε πως από τα σημεία που αποτυπώνονται στη γραφική παράσταση στο Σχήμα (2.3) διέρχεται με εξαιρετική ακρίβεια μια πολυωνυμική εξίσωση 4^{ου} βαθμού η οποία μας δίνει την τιμή της κινηματικής συνεκτικότητας σε cm²/sec για οποιαδήποτε τιμή της θερμοκρασίας, δοσμένης σε °C. Η εξίσωση γράφεται:

$$\nu(T) = 4 \cdot 10^{-10} \cdot T^4 - 10^{-7} \cdot T^3 + 10^{-5} \cdot T^2 - 6 \cdot 10^{-4} \cdot T + 0.0178 \quad (2.37)$$



Σχήμα 2.3: Μεταβολή της κινηματικής συνεκτικότητας του νερού, συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

2.5 Διαφορά μεταξύ φλεβών θερμοκρασίας και αλατότητας

Σε όλα τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα στο αντικείμενο των φλεβών αρνητικής άνωσης, για τη δημιουργία της ανωστικής δύναμης χρησιμοποιείται αλάτι το οποίο αναμιγνύεται με το υγρό της φλέβας. Η εστίαση της πειραματικής έρευνας στην ύπαρξη διαφοράς συγκέντρωσης μεταξύ φλέβας και αποδέκτη είναι λογική, καθώς έχει ευρεία πρακτική εφαρμογή στις μονάδες αφαλάτωσης. Στην παρούσα διπλωματική μελέτη, θα εστιάσουμε στην ύπαρξη θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ φλέβας και αποδέκτη, αντί της διαφοράς συγκέντρωσης. Από φυσικής άποψης υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των δύο γενεσιουργών αιτιών της αρχικής άνωσης.

Τα ρευστά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας τους τείνουν να αλλάξουν και τον όγκο τους. Η μεταβολή αυτή εκφράζεται μέσω του συντελεστή θερμικής διαστολής (thermal expansion coefficient). Συγκεκριμένα, εκφράζει την κλασματική μεταβολή του όγκου για μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μία μονάδα, σε συνθήκες σταθερής πίεσης. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής μαθηματικά εκφράζεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p \quad (2.38)$$

Στην εκροή μιας θερμαινόμενης ανωστικής φλέβας, υπάρχει αρχική άνωση ίση με:

$$B_o = Q \cdot \frac{\Delta \rho_o}{\rho_o} \cdot g \quad (2.39)$$

Όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο της εκροής, λόγω της συμπαράσυρσης περιβάλλοντος ρευστού, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ φλέβας και αποδέκτη μειώνεται. Σε ένα σημείο που βρίσκεται σε απόσταση s από την εκροή ισχύει:

$$B(s) = \mu(s) \cdot \frac{\Delta \rho}{\rho_o} \cdot g < B_o \quad (2.40)$$

Παρατηρούμε πως όσο μειώνεται η διαφορά θερμοκρασίας τόσο μειώνεται και η άνωση. Έτσι, σε ένα σημείο του πεδίου ροής της φλέβας, όπου η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ φλέβας και αποδέκτη είναι $\Delta T = 1^\circ\text{C}$, η άνωση είναι κατά πολύ μικρότερη από την αρχική ανωστική δύναμη στην εκροή της φλέβας.

Στις ανωστικές φλέβες με διαφορά αλατότητας στα ρευστά, η θερμοκρασία μεταξύ ρευστού και αποδέκτη είναι περίπου ίδια και η άνωση οφείλεται στη διαφορά συγκέντρωσης άλατος. Η άνωση επομένως δεν μειώνεται με την αραιώση αλλά διατηρείται σταθερή, σε αντίθεση με τις θερμαινόμενες φλέβες.

3. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

3.1 Εισαγωγή

Η επιστημονική μελέτη των φλεβών, των πλουμίων και γενικά των ανωστικών φλεβών που διατίθενται σε υδάτινο αποδέκτη, αποτελεί αντικείμενο έρευνας τις τελευταίες δεκαετίες. Η έρευνα έχει μεγάλο εύρος με πλήθος θεωρήσεων και παραδοχών, όπως ομογενής ή στρωματοποιημένος αποδέκτης ως προς την πυκνότητα, στάσιμο ή κινούμενο ρευστό του αποδέκτη, πλευρικά περιορισμένος αποδέκτης κλπ. Στα πρώτα χρόνια της επιστημονικής μελέτης κυριαρχούν μετρήσεις για φλέβες θετικής άνωσης. Οι φλέβες αρνητικής άνωσης που εκτοξεύονται υπό γωνία μελετήθηκαν πρώτη φορά από τους Zeitoun *et al* το 1970. Τα τελευταία 15 χρόνια η μελέτη φλεβών αρνητικής άνωσης γίνεται συνεχώς πιο εντατική, κυρίως λόγω της πρακτικής εφαρμογής των ανωστικών φλεβών στις μονάδες αφαλάτωσης. Οι φλέβες αρνητικής άνωσης διαχωρίζονται σε φλέβες που εκτοξεύονται κατακόρυφα ή με κλίσης ως προς τον οριζόντιο άξονα του αποδέκτη. Στη συνέχεια ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση σε κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης, με κεκλιμένο άξονα, εκτοξευόμενες σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη.

3.2 Φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία

Παπακωνσταντής (2009), Τυρβώδεις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη.

Ο Παπακωνσταντής (2009) στη διδακτορική του διατριβή, μεταξύ άλλων, πραγματοποίησε λεπτομερή πειραματική διερεύνηση στις φλέβες αρνητικής άνωσης (με αλατότητα) εκτοξευόμενες από τον πυθμένα δεξαμενής, σε ακίνητο και ομογενές περιβάλλον ρευστό. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν για γωνίες 45°, 60°, 75°, 80°, 85° και 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τεχνικές οπτικής καταγραφής, και σημειακά, με αισθητήρα αγωγιμότητας (Fast Response Conductivity Sensor) κατάλληλο για μετρήσεις σε ροή με τυρβώδη ανάμιξη.

Παρουσιάζει δεδομένα σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς, το αρχικό και τερματικό ύψος ανόδου, την οριζόντια θέση του τερματικού ύψους, του άξονα και του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Εξάγει αποτελέσματα σχετικά με την αξονική διάλυση στο τερματικό ύψος και στο επίπεδο παροχέτευσης της φλέβας. Επίσης, μελετά τη δομή της τύρβης σε ροές φλεβών αρνητικής άνωσης και δίνει δεδομένα σχετικά με το πεδίο συγκεντρώσεων.

Για το αδιάστατο (ως προς τη διάμετρο και τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude) τερματικό ύψος ανόδου συμπεραίνει πως παίρνει τη μέγιστη τιμή του στη γωνία των 80°. Η αδιάστατη (ως προς τη διάμετρο και τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude) οριζόντια θέση εμφάνισης του τελικού τερματικού ύψους, μειώνεται με την αύξηση

της γωνίας παροχέτευσης. Το ίδιο ισχύει και για τις οριζόντιες αποστάσεις του άξονα και του εξωτερικού ορίου της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Για την αξονική διάλυση (αραίωση) στο τερματικό ύψος ανόδου (ανηγμένη ως προς τον πυκνομετρικό αριθμό Froude) συμπεραίνει πως είναι περίπου ίδια για τις γωνίες 45° , 60° και 75° . Επίσης η αξονική αραίωση στο επίπεδο παροχέτευσης της φλέβας είναι περίπου ίδια για τις γωνίες 60° και 75° και σαφώς μικρότερη για γωνία παροχέτευσης 45° . Για συγκεκριμένη γωνία παροχέτευσης, το αδιάστατο (ως προς τη διάμετρο και τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude) μέγιστο ύψος της μέσης συγκέντρωσης είναι σταθερό και ανεξάρτητο των αρχικών συνθηκών παροχέτευσης. Το ύψος της μέγιστης έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης είναι πάντα μεγαλύτερο από το ύψος της μέγιστης μέσης συγκέντρωσης, στην οριζόντια θέση που εμφανίζεται το τερματικό ύψος ανόδου με λόγο $Z_{RMS}/Z_C \approx 1.17$, για όλες τις γωνίες που εξετάστηκαν.

Επίσης, πραγματοποιεί πειραματικές μετρήσεις συγκέντρωσης της φλέβας. Παρουσιάζει γραφήματα της κατανομής της συγκέντρωσης της φλέβας, στη θέση αναστροφής της ροής, την οποία συγκρίνει με την κανονική κατανομή Gauss. Τέλος, εισάγει μαθηματικό ολοκληρωματικό μοντέλο και πραγματοποιεί σύγκριση των προβλέψεών του, με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Oliver (2012), Φλέβες αρνητικής άνωσης στο κοντινό πεδίο

Ο Oliver (2012) στη διδακτορική του διατριβή συνέλεξε πειραματικά δεδομένα σχετικά με τη αραίωση και το πεδίο συγκεντρώσεων, για φλέβες αρνητικής άνωσης (αλατότητα) εκτοξευόμενες υπό κλίση (15° έως 75°) σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο, σε ομογενή μη στρωματοποιημένο αποδέκτη. Για τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε κυρίως το σύστημα LIF (Laser Induced Fluorescence) αλλά και τεχνικές οπτικής παρατήρησης και καταγραφής.

Τα πειραματικά αποτελέσματα που παραθέτει είναι λεπτομερή και ακριβή. Παρουσιάζει αδιαστατοποιημένα προφίλ της μέγιστης μέσης συγκέντρωσης στο μέγιστο ύψος ανόδου της φλέβας για γωνία 45° , συμπεραίνοντας πως το εξωτερικό όριο της φλέβας ακολουθεί κατανομή Gauss. Υποστηρίζει πως ο λόγος Z_{RMS}/Z_C δεν παραμένει σταθερός αλλά αυξάνεται όσο μειώνεται η γωνία παροχέτευσης ως προς τον οριζόντιο άξονα. Παρουσιάζει αποτελέσματα σχετικά με την τροχιά της φλέβας, συμπεραίνοντας πως δεν ακολουθεί παραβολική τροχιά, ενώ για συγκεκριμένη γωνία παροχέτευσης, το αδιάστατο (ως προς τη διάμετρο και τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude) μέγιστο μέσο ύψος ανόδου της φλέβας είναι σταθερό και ανεξάρτητο των αρχικών συνθηκών παροχέτευσης. Το ίδιο ισχύει και για το σημείο επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης. Επίσης, παρουσιάζει δεδομένα για την αραίωση στο τερματικό σημείο ανόδου και στο σημείο επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης.

Εισάγει ένα νέο θεωρητικό- μαθηματικό μοντέλο το “New forced jet model”, το οποίο προβλέπει στοιχεία σχετικά με τη συγκέντρωση και την αραίωση για γωνίες μικρότερες των 60° σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο. Ο Oliver (2012 σ.59), θεωρεί πως στην περιοχή που η ανωστική φλέβα έχει χαρακτηριστικά πλουμίου, δηλαδή μετά την αναστροφή της στο μέγιστο ύψος ανόδου, η ανωστική δύναμη προκαλεί αστάθεια στο μοντέλο και δεν είναι κρίσιμη η παρουσία της. Έτσι για την περιοχή αυτή αντικαθίσταται από μια σταθερή τιμή. Η παραδοχή αυτή έχει μαθηματική λογική αλλά υστερεί από φυσική άποψη, με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα να αποκλίνουν της πραγματικότητας.

Σχετικά με τα υπάρχοντα ολοκληρωματικά μοντέλα Corejet και Visjet, συμπεραίνει πως προβλέπουν κάποια καλά χαρακτηριστικά αλλά αποτυγχάνουν να προβλέψουν την αξονική διάλυση στο τερματικό ύψος και στο σημείο επιστροφής.

Crowe (2013), Φλέβες αρνητικής άνωσης και αλληλεπίδραση στερεών ορίων.

Ο Crowe (2013) διερεύνησε τη συμπεριφορά φλεβών αρνητικής άνωσης και την αλληλεπίδραση τους με τον πυθμένα του αποδέκτη. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με το πεδίο ταχυτήτων της φλέβας χρησιμοποιεί μια οπτική τεχνική που βασίζεται στην παρακολούθηση της ταχύτητας σωματιδίων (particle tracking velocimetry ή PTV). Laser, εκπέμπεται και αντανακλά πάνω σε παραβολικό κάτοπτρο το οποίο δημιουργεί κατακόρυφο επίπεδο που διέρχεται από τον άξονα της φλέβας, κάνοντας τα ανιχνεύσιμα σωματίδια που έχουν εισαχθεί στο υγρό της φλέβας ορατά. Η μεταβολή της θέσης των σωματιδίων βιντεοσκοπείται, επιτρέποντας τον προσδιορισμό της ταχύτητας. Τα αποτελέσματα σχετικά με το πεδίο ταχυτήτων δεν αποτελούν αντικείμενο της παρούσας εργασίας, αλλά η μέθοδος παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον, γι’ αυτό και αναφέρεται. Στην έρευνα του παρουσιάζει επίσης αποτελέσματα σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της φλέβας, τα οποία συμφωνούν με τα αποτελέσματα της σύγχρονης βιβλιογραφίας και θα χρησιμοποιηθούν ως μέτρο σύγκρισης, με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Για λόγους πληρότητας, ακολουθεί περιληπτική αναφορά σε παλαιότερες έρευνες, όπως παρουσιάστηκε από τον Παπακωνσταντή (2009):

Οι Zeitoun *et al.* (1970) ήταν οι πρώτοι που μελέτησαν φλέβες αρνητικής άνωσης εκτοξευόμενες υπό γωνία σε στάσιμο ομογενή αποδέκτη. Μελέτησαν παροχέτευση υπό γωνία 30° , 45° , 60° και 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και προσδιόρισαν πειραματικά το τερματικό ύψος ανόδου, την αραίωση στη θέση αυτή και την οριζόντια απόσταση από το στόμιο παροχέτευσης ως το εξωτερικό όριο της φλέβας στη θέση πρόσπτωσης στον πυθμένα. Αποφάνθηκαν ότι η μέγιστη τροχιά και η μέγιστη αραίωση επιτυγχάνεται για γωνία εκτόξευσης 60° ως προς τον οριζόντιο άξονα.

Ο Lindberg (1994) μελέτησε την τροχιά φλεβών που εκτοξεύονται υπό γωνία 30° , 45° και 60° ως προς οριζόντιο επίπεδο, σε ακίνητο αλλά και κινούμενο αποδέκτη με εγκάρσια ροή. Προσδιόρισε γεωμετρικά στοιχεία της τροχιάς της φλέβας όπως το τερματικό ύψος ανόδου, το πλάτος της φλέβας κατά y και z σε αυτή τη θέση αλλά και τις διαστάσεις της φλέβας στο σημείο επιστροφής της φλέβας στον πυθμένα, εφαρμόζοντας μια τεχνική που βασίζεται στη λήψη ενός μέσου όρου παρατηρήσεων από πολλά στιγμιότυπα.

Οι Bloomfield & Kerr (2002) προσδιόρισαν πειραματικά και υπολογιστικά το μέγιστο ύψος που φτάνει φλέβα εκτοξευόμενη από τον πυθμένα για διάφορες κλίσεις. Θεώρησαν ακίνητο αποδέκτη ομογενή αλλά και γραμμικά στρωματοποιημένο. Στη μελέτη γίνεται διάκριση μεταξύ αρχικού και τελικού τερματικού ύψους, το οποίο είναι μικρότερο και διαμορφώνεται από την επίδραση της καθοδικής ροής στην ανοδική. Χρησιμοποίησαν γωνίες και στο εύρος 60° - 90° διαπιστώνοντας ότι το μέγιστο αρχικό τερματικό ύψος εμφανίζεται για γωνία 80° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και μάλιστα είναι 20% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο ύψος για κατακόρυφη εκτόξευση της φλέβας. Ερωτηματικό για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων αποτελεί η χρήση μικρής δεξαμενής στα πειράματα με την πιθανότητα επίδρασης των τοιχωμάτων στα αποτελέσματα να είναι μεγάλη.

Οι Cipollina et al. (2005) μελέτησαν φλέβες που παροχετεύονται υπό γωνίες 30° , 45° και 60° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και προσδιόρισαν το τελικό τερματικό ύψος ανόδου του άνω ορίου και του άξονα της φλέβας, την οριζόντια απόσταση μέχρι τη θέση εμφάνισης του μεγίστου ύψους και τη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Η μεγάλη πυκνομετρική διαφορά μεταξύ φλέβας και αποδέκτη κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ενδεχομένως να μην ικανοποιεί την παραδοχή Boussinesq και να επηρεάζει τα αποτελέσματα.

Ο Kikkert (2006) χρησιμοποίησε τις τεχνικές LA (Light Attenuation) και LIF (Laser Induced Fluorescence) ώστε να προσδιορίσει το τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας, την οριζόντια απόσταση από την πηγή στην οποία εμφανίζεται και την οριζόντια απόσταση μέχρι τη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Επίσης παρέχει αποτελέσματα σχετικά με τη διάλυση στο τερματικό ύψος και στο σημείο επιστροφής. Τα αποτελέσματα της αραίωσης παρουσιάζονται ολοκληρωμένα σε όλο το πλάτος της φλέβας, καθιστώντας τη σύγκριση τους με άλλα πειραματικά δεδομένα δύσκολη. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη για γωνίες από 0° έως 75° για πυκνομετρικούς Froude από 14 έως 99.

3.3 Θεωρητικά – μαθηματικά μοντέλα

Στον τομέα της έρευνας των φλεβών αρνητικής άνωσης δεν έχουν αναπτυχθεί πολλά θεωρητικά – μαθηματικά μοντέλα. Ο Pantokratoras (1999) χρησιμοποίησε τροποποιημένο το ολοκληρωματικό μοντέλο Fan – Brooks ώστε να προβλέψει το τερματικό βάθος καθόδου κυκλικής θερμαινόμενης φλέβας εκτοξευόμενης με

κατεύθυνση προς τον πυθμένα. Στη μελέτη του προτείνει τη χρήση του ενεργού αριθμού Froude (effective Froude) αντί του πυκνομετρικού αριθμού Froude. Αξίζει να σημειωθεί πως είναι η μόνη μελέτη, έστω και μαθηματική, η οποία ασχολείται με τις θερμαινόμενες φλέβες αρνητικής άνωσης.

Οι Cipollina et al. (2004) παρουσίασαν μοντέλο το οποίο βασίζεται στην υπόθεση της συμπαράσυρσης (Morton et al. 1956) και θεωρεί κατανομές ταχύτητας και συγκέντρωσης κατά Gauss. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια σταθερή τιμή του συντελεστή συμπαράσυρσης την οποία και όρισαν ώστε να ικανοποιεί καλύτερα δικές τους μετρήσεις.

Αναλυτικές λύσεις σχετικά με τα χαρακτηριστικά φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη, παρουσιάστηκαν από τον Kikkert (2006) και τους Kikkert et al. (2007). Δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σχετικά με το μέγιστο ύψος ανόδου της φλέβα, την οριζόντια απόσταση μέχρι το τερματικό ύψος και το σημείο επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης για γωνίες 15° έως 60° . Οι Papakonstantis & Christodoulou (2008) αποφαινόμενοι πως οι θεωρητικές προβλέψεις υπερεκτιμούν ελαφρώς το τερματικό ύψος ανόδου της φλέβας, χωρίς όμως αυτό να καθιστά λάθος τα αποτελέσματα. Μάλιστα τα αποτελέσματα του Kikkert (2006) και Kikkert et al. (2007) προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματικότητα, σε σχέση με τα αποτελέσματα που δίνουν τα μοντέλα Corjet (Jirka 2004) και Visjet (Lee et al. 2000) τα οποία φαίνεται να υποεκτιμούν τα χαρακτηριστικά της ροής στις φλέβες αρνητικής άνωσης.

Όπως γίνεται αντιληπτό η μελέτη και έρευνα των φλεβών αρνητικής άνωσης βρίσκεται ακόμα σε στάδιο ωρίμανσης. Νέα δεδομένα και έρευνες έρχονται να προστεθούν διαρκώς στο οικοδόμημα της γνώσης. Σκοπός είναι καλύτερη δυνατή προσέγγιση της πραγματικότητας ώστε να επιτύχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα.

3.4 Πειραματικά αποτελέσματα φλεβών αρνητικής άνωσης

Στη βιβλιογραφία μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα που να αφορούν θερμαινόμενες φλέβες αρνητικής άνωσης, εκτοξευόμενες με κλίση προς τον πυθμένα του αποδέκτη. Σε όλα τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί η ανωστική δύναμη προκύπτει από τη διαφορά συγκέντρωσης μεταξύ φλέβας και αποδέκτη και η παροχέτευση γίνεται από τον πυθμένα προς την επιφάνεια. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επιχειρηθεί σύγκριση με αυτά τα πειραματικά δεδομένα της βιβλιογραφίας, με σκοπό να δούμε κατά πόσο παρουσιάζουν ομοιότητα τα χαρακτηριστικά των δύο τύπων φλεβών αρνητικής άνωσης. Στον

Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα κυριότερα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία², για τις γωνίες 45° και 60°.

² Τα αποτελέσματα με * δίπλα από το συγγραφέα έχουν παρθεί από τον Παπακωνσταντή (2009)

θ_0	$Z_f/(DF_0)^3$		$Z_c/(DF_0)$		$X_z/(DF_0)$		$X_{ic}/(DF_0)$		S_t/F_0		S_i/F_0	
	45°	60°	45°	60°	45°	60°	45°	60°	45°	60°	45°	60°
Παπακωνσταντής (2009)	1.59	2.15	1.17±0.06	1.68±0.06	2.03±0.13	1.83±0.08	3.24±0.14	2.75±0.16	0.52±0.05	0.56±0.05	1.55±0.14	1.68±0.10
Oliver (2012)	1.65	2.21	1.09	1.61	1.75	1.53	3.13	2.76	0.39	0.42	1.22	1.55
Crowe (2013)	1.73±0.05	2.23±0.04	1.22±0.04	1.71±0.02	1.96±0.07	1.69±0.04	3.43±0.09	2.93±0.06	-	-	-	-
Zeitoun <i>et al.</i> (1970)*	1.56	2.13	-	-	-	-	-	-	0.42	0.56	-	-
Lindberg (1994)*	1.58	2.14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bloomfield & Kerr (2002)*	1.24	1.63	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cipollina <i>et al.</i> (2005)*	1.61	2.32	1.17	1.77	1.80	1.42	2.82	2.25	-	-	-	-
Kikkert (2006)	1.71/1.78	2.28/2.45	1.10/1.21	1.60/1.76	1.86/2.00	1.67/1.80	3.32	2.79	-	-	-	-

Πίνακας 3.1: Πειραματικά αποτελέσματα βιβλιογραφίας φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται υπό γωνία.

³ Ο Παπακωνσταντής (2009) χρησιμοποιεί τη σχέση $Z_f=Z_c+1.5b_c$ ενώ οι Oliver (2012) και Crowe (2013) τη σχέση $Z_f=Z_c+2b_c$.

4. Πειραματική Διάταξη

4.1 Εισαγωγή

Για την εξαγωγή δεδομένων πραγματοποιήθηκε σειρά από πειράματα σε δεξαμενή του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής του ΕΜΠ (Αίθουσα ερευνών του Γ. Νουτσόπουλος). Εξετάσθηκαν τυρβώδεις θερμαινόμενες φλέβες νερού, αρνητικής άνωσης, εκτοξευόμενες με κλίση προς τον πυθμένα ομογενούς και μη στρωματοποιημένου αποδέκτη. Για όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε νερό από τη γεώτρηση του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπεται η πλήρης ανάπτυξη της φλέβας και να μην επηρεάζεται από τα τοιχώματα της δεξαμενής. Γενική άποψη της πειραματικής διάταξης φαίνεται στην Εικόνα 4.1. Στη συνέχεια ακολουθεί αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα4.1: Γενική άποψη πειραματικής διάταξης

4.2 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ορθογωνική δεξαμενή διαστάσεων κάτοψης 1.00m×0.80m και βάθους 0.70m. Ο σκελετός της δεξαμενής είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα, ενώ τα τοιχώματά της είναι

διαφανή, από γυαλί (3 πλευρές) και Plexiglas (1 πλευρά και ο πυθμένας), ώστε να διευκολύνεται η παρατήρηση. Η μια μικρή πλευρά της δεξαμενής καλύφθηκε με μαύρη επιφάνεια για τη διευκόλυνση λειτουργίας του συστήματος Laser, ενώ η μια μεγάλη πλευρά της, καλύφθηκε με ημιδιάφανο χαρτί για την απεικόνιση της σκιάς της φλέβας. Στο ανώτερο τμήμα της δεξαμενής υπάρχει εγκατεστημένος περιμετρικός υπερχειλιστής με σχισμές V (V-notch weir) ώστε να απομακρύνεται το περισσευούμενο νερό και να διατηρείται σταθερή η στάθμη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων. Πάνω στη δεξαμενή είναι τοποθετημένη διάταξη (τραβέρσα), στην οποία είναι διατεταγμένοι οι θερμίστορες μέτρησης, με τη δυνατότητα να μετακινηθούν και στις τρεις διευθύνσεις της δεξαμενής (μήκος, πλάτος, βάθος).

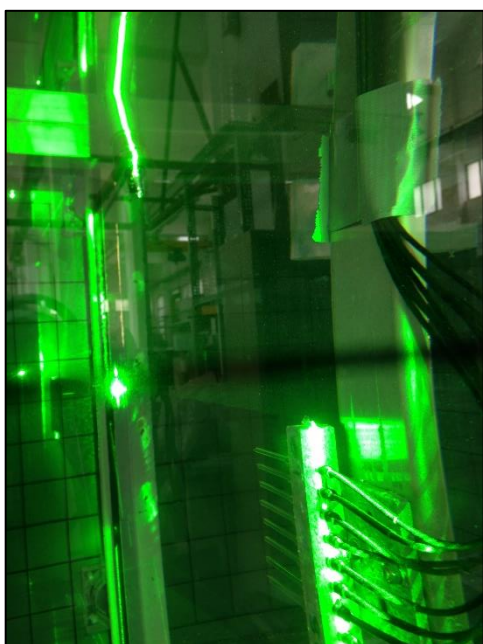
Η διάταξη δημιουργίας της φλέβας (jet), είναι προσαρμοσμένη σε δοκό στήριξης από ανοξείδωτο χάλυβα με οπή στο κέντρο της. Η δοκός είναι πακτωμένη στις δύο μεγάλες πλευρές της δεξαμενής ενώ η επιθυμητή κλίση του jet πραγματοποιείται από ειδικές σφήνες. Πριν την έξοδο της φλέβας, πάνω στο jet είναι τοποθετημένο χειροκίνητο σύστημα εξαέρωσης του σωλήνα και θερμοζεύγος ακριβείας ώστε να καταγράφεται η θερμοκρασία του νερού ακριβώς πριν την έξοδο. Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα 4.2. Η διάμετρος της φλέβας εξαρτάται από το ακροφύσιο που τοποθετείται. Χρησιμοποιήθηκαν κυκλικά μεταλλικά ακροφύσια διαμέτρων, 0.44cm και 0.57cm ώστε να καλυφθεί το μέγιστο δυνατό εύρος αρχικών πυκνομετρικών αριθμών Froude.



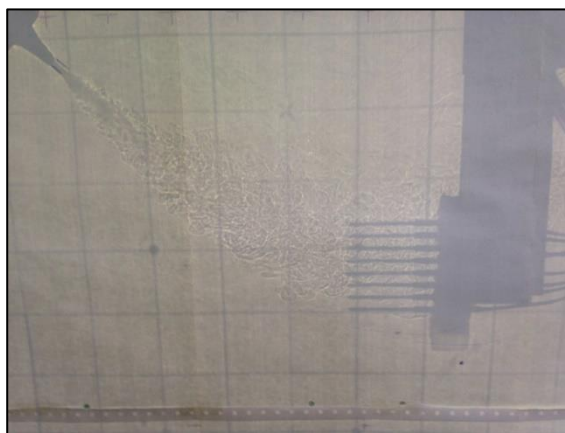
Εικόνα 4.2: Αγωγός εκροής, με σύστημα εξαέρωσης και μετρητή θερμοκρασίας πριν την έξοδο της φλέβας.

Η τροφοδοσία της φλέβας γίνεται από θερμικά μονωμένο δοχείο χωρητικότητας 40L. Το νερό θερμαίνεται στο δοχείο μέσω αντιστάσεων, ομογενοποιείται μέσω κυκλοφορητή που είναι εγκατεστημένος στη δεξαμενή και στη συνέχεια συμπιέζεται με αέρα στις 2-2.5 atm από αεροσυμπιεστή με ρυθμιστή πίεσης εξόδου. Η παροχή της φλέβας ρυθμίζεται με βάνια ακριβείας και μετρείται από ρυθμισμένο παροχόμετρο.

Για την ευθυγράμμιση των θερμοστόρων σε κάθε θέση μέτρησης, ώστε να βρίσκονται στο επίπεδο του άξονα της φλέβας, χρησιμοποιείται σύστημα laser, το οποίο μετά από ευθυγράμμιση προσδιορίζει το επίπεδο συμμετρίας πάνω στο οποίο βρίσκεται ο άξονας της φλέβας. Τέλος, για την απεικόνιση του σκιαγραφήματος της φλέβας, πάνω στο ημιδιαφανές χαρτί που είναι τοποθετημένο στη μια πλευρά της δεξαμενής, χρησιμοποιείται προβολέας (projector) διαφανειών που εκπέμπει συνήθη δέσμη λευκού φωτός. Η ευθυγράμμιση των θερμοστόρων στον άξονα εκροής της φλέβας και η απεικόνιση του σκιαγραφήματος της φλέβας φαίνονται στις εικόνες 4.3 & 4.4.



Εικόνα 4.3: Ευθυγράμμιση με το σύστημα Laser.

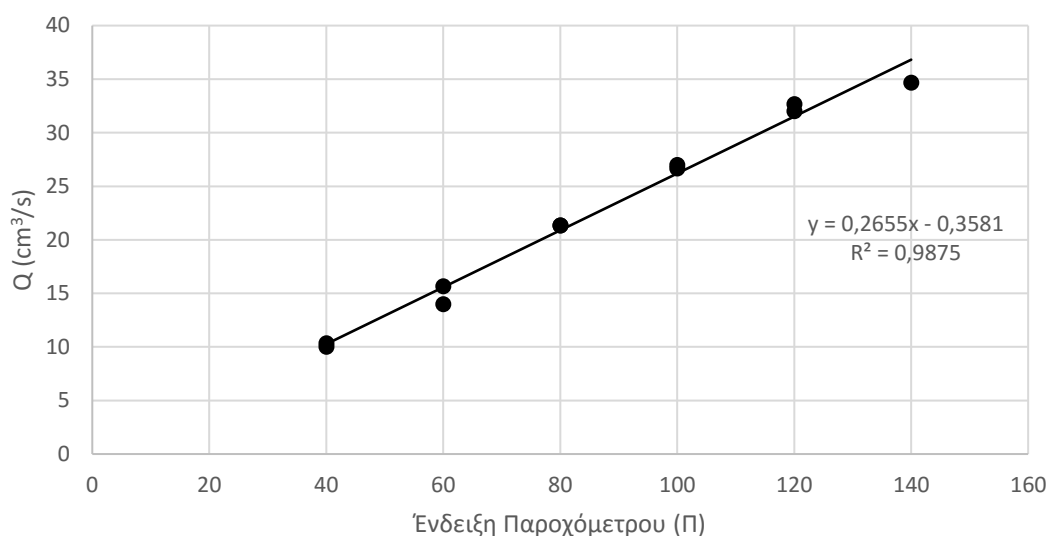


Εικόνα 4.4: Απεικόνιση σκιαγραφήματος φλέβας.

4.3 Όργανα μέτρησης

4.3.1 Παροχόμετρο

Για τη μέτρηση της παροχής χρησιμοποιήθηκε παροχόμετρο (πλωτήρα με σφαίρα), δυναμικότητας 0.3 – 1.9 L/min. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του οργάνου ώστε να συσχετιστεί η ένδειξη του οργάνου με την παροχή της φλέβας. Για διάφορες ενδείξεις και θερμοκρασίες του νερού, προσδιορίσθηκε η παροχή ως ο λόγος του μετρημένου όγκου προς τον αντίστοιχο χρόνο. Η καμπύλη βαθμονόμησης προέκυψε γραμμική με μεγάλη ακρίβεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1: Καμπύλη βαθμονόμησης παροχόμετρου.

4.3.2 Μέτρηση θερμοκρασίας

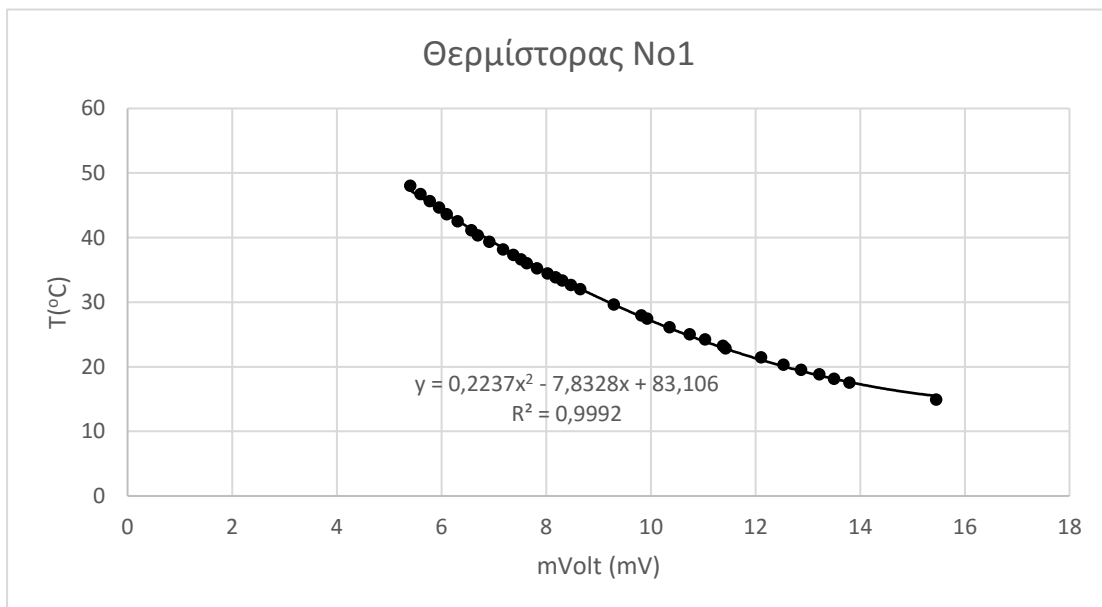
Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας στη ροή της φλέβας χρησιμοποιήθηκαν μικρομετρητές θερμοκρασίας της εταιρίας General Electric. Κάθε μετρητής αποτελείται από έναν μικρό σφαιρικό αισθητήρα θερμοκρασίας (θερμίστορα), ερμητικά εγκλωβισμένο στην άκρη μιας ανθεκτικής στις δονήσεις γυάλινης ράβδου, ο οποίος στηρίζεται στο κυρίως σώμα του οργάνου. Η γυάλινη επικάλυψη προσδίδει βελτιωμένη σταθερότητα αποτελεσμάτων αλλά και μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στο όργανο. Το μεγάλο μήκος του κορμού κάνει το μετρητή πιο εύχρηστο και ιδανικό για χρήσεις όπου απαιτείται γρήγορη απόκριση και βύθιση του οργάνου. Ο τύπος του θερμίστορα είναι ο P25BA102J και τα χαρακτηριστικά του, όπως δίνονται από τον κατασκευαστή, φαίνονται στον πίνακα 4.1.

Max. Diameter	0.64mm
Standard body Length (L)	6.3mm
Lead-wire Nominal Diameter	0.05mm
Minimum Lead Length	6.3mm
Lead Material	Platinum Alloy
Nominal Resistance Range at 25°C	680Ω – 1.6kΩ
Thermal time Constant	23msec
Dissipation Constant at 25°C	0.80mW/°C
±Tolerance at 25°C	5%

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά θερμιστόρων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν 8 θερμίστορες διατεταγμένοι σε σειρά. Πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση των οργάνων ώστε να συσχετισθεί η μετρούμενη τάση με τη θερμοκρασία. Προέκυψαν 8 καμπύλες βαθμονόμησης με εξαιρετική ακρίβεια. Μια τυπική καμπύλη φαίνεται στο σχήμα 4.2.

Οι θερμίστορες εκπέμπουν αναλογικό σήμα το οποίο μετατρέπεται σε ψηφιακό μέσω μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D Converter). Ο μετατροπέας τροφοδοτείται με ρεύμα από τροφοδοτικό με ρυθμιστή τάσης. Η τάση σε όλα τα πειράματα ήταν ρυθμισμένη στα 10.0 V. Ο μετατροπέας στέλνει το ψηφιακό σήμα στον υπολογιστή μέσω θύρας USB. Για τη συλλογή των δεδομένων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό LabVIEW της εταιρίας National Instruments.



Σχήμα 4.2: Καμπύλη βαθμονόμησης θερμίστορα

5. Πειράματα

5.1 Εισαγωγή

Για τη συλλογή και την επεξεργασία δεδομένων σχετικά με τα χαρακτηριστικά των φλεβών αρνητικής άνωσης που παροχετεύονται προς τον πυθμένα υπό γωνία, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές μετρήσεις. Στόχος της πειραματικής διαδικασίας είναι η εκτίμηση των εξής μεγεθών:

- Προσδιορισμός του μέγιστου βάθους καθόδου και της οριζόντιας απόστασης από το στόμιο εκροής στην οποία επιτυγχάνεται.
- Προσδιορισμός της κατανομής της μέσης χρονικά διαφοράς θερμοκρασίας και των τυρβωδών διακυμάνσεων στον άξονα της στη θέση εμφάνισης του μέγιστου βάθους καθόδου.
- Προσδιορισμός της αξονικής διάλυσης στο μέγιστο βάθος καθόδου και στο σημείο επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο εκροής.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το υγρό τόσο της δεξαμενής όσο και της φλέβας είναι νερό από το δίκτυο ύδρευσης του εργαστηρίου (προερχόμενο από τη γεώτρηση του Ε.Μ.Π). Για την απόκτηση των επιθυμητών δεδομένων πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο θέσεις του πεδίου ροής της φλέβας, στο μέγιστο βάθος καθόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης.

5.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για τη διεξαγωγή ενός αυτοτελούς πειράματος ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Πλήρωση της δεξαμενής μέχρι τη στάθμη υπερχειλίσης με νερό στη θερμοκρασία του εργαστηρίου.
2. Πλήρωση του δοχείου της τροφοδοσίας της φλέβας και θέρμανση του νερού στην επιθυμητή θερμοκρασία. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης είναι ενεργοποιημένος κυκλοφορητής ανάμιξης ώστε η θερμοκρασία του δοχείου να είναι ίδια παντού.
3. Ενεργοποίηση του ηλεκτρονικού υπολογιστή και του προγράμματος LabVIEW για τη συλλογή των δεδομένων.
4. Τοποθέτηση προειδοποιητικής πινακίδας στην είσοδο του εργαστηρίου για χρήση Laser, ενεργοποίηση του συστήματος Laser και έλεγχος ότι το κατακόρυφο επίπεδο που δημιουργεί διέρχεται από το κέντρο του στομίου της φλέβας.

5. Ενεργοποίηση του προβολέα ώστε να είναι ορατή η προβολή της φλέβας πάνω στο ημιδιαφανές χαρτί (shadowgraph) που είναι τοποθετημένο στην απέναντι πλευρά της δεξαμενής.
6. Απενεργοποίηση του κυκλοφορητή, κλείσιμο βανών και εισαγωγή πιεσμένου αέρα από τον αεροσυμπιεστή στο δοχείο τροφοδοσίας.
7. Καταγραφή (μέτρησης) της θερμοκρασίας του νερού της δεξαμενής (περιβάλλον ρευστό) με τους θερμίστορες διάρκειας 5 sec. Η λήψη της πρώτης μέτρησης γίνεται τουλάχιστον 10' μετά το γέμισμα της δεξαμενής, ώστε το νερό να έχει ηρεμήσει.
8. Έναρξη παροχέτευσης της φλέβας. Τα πρώτα δευτερόλεπτα η παροχέτευση γίνεται μέσω εκτροπής, σε δοχείο εκτός της δεξαμενής μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του υγρού που θα δημιουργήσει τη φλέβα.
9. Έναρξη εκροής της φλέβας στη δεξαμενή για σταθερή ένδειξη του παροχόμετρου και εξαερισμός αγωγού παροχέτευσης.
10. Αναμονή λίγα δευτερόλεπτα μέχρι να σταθεροποιηθεί η ένδειξη της θερμοκρασίας του θερμοζεύγους που βρίσκεται ακριβώς πριν το στόμιο εκροής.
11. Λήψη και καταγραφή των μετρήσεων στον υπολογιστή.

Η διαδικασία της προετοιμασίας για τη λήψη μετρήσεων είναι ίδια και στις δύο θέσεις που πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, τόσο στο μέγιστο βάθος καθόδου όσο και στο σημείο επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο μέγιστο βάθος καθόδου της φλέβας οι θερμίστορες κινούνται καθ' ύψος του άξονα της φλέβας (διεύθυνση άξονα Z). Σε κάθε πείραμα λαμβάνονται μετρήσεις διάρκειας 60sec σε 3-5 θέσεις, ώστε να καλύπτεται ολόκληρο το εύρος της φλέβας. Κατά τη μετακίνηση των θερμιστόρων από τη μια θέση μέτρησης στην επόμενη, δίνεται προσοχή ώστε να βρίσκονται στο επίπεδο του άξονα της φλέβας. Αυτό πραγματοποιείται με τη βοήθεια του φύλλου Laser.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης, οι θερμίστορες κινούνται κατά μήκος της φλέβας (διεύθυνση άξονα X). Σε κάθε πείραμα λαμβάνονται μετρήσεις διάρκειας 180 – 300sec. Η μεγαλύτερη διάρκεια λήψεως των μετρήσεων σε αυτή τη θέση οφείλεται στις διακυμάνσεις που παρουσιάζει η τροχιά της φλέβας κατά τη διάρκεια της ροής. Οι διακυμάνσεις αυτές, οφείλονται στις δομές μεγάλης κλίμακας (large scale structures) που χαρακτηρίζουν τη φλέβα. Μια δομή που ξεκινάει από την πηγή αφού ζευγαρώσει με την αμέσως προηγούμενη (βραδύτερη) δομή αρκετές φορές (vortex ή large structure pairing), φθάνει στο μέγιστο βάθος καθόδου και στη συνέχεια κινείται ανοδικά μέχρι το επίπεδο που βρίσκεται το στόμιο της παροχέτευσης. Μέχρι να φτάσει η επόμενη δομή στο μέγιστο βάθος καθόδου, μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα στο οποίο η τροχιά της φλέβας μεταβάλλεται. Στα περισσότερα πειράματα πραγματοποιείται μια μέτρηση όπου οι θερμίστορες τοποθετούνται κατ' εκτίμηση, στον άξονα του πλάτους της φλέβας στο σημείο επιστροφής. Δεν πραγματοποιούνται

μετρήσεις σε παραπάνω θέσεις για να αποφευχθεί η λήψη μετρήσεων στο θερμικά στρωματοποιημένο ανώτερο περιβάλλον ρευστό της δεξαμενής διάχυσης.

5.3 Παράμετροι πειραμάτων

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν καλύπτουν μεγάλο εύρος πυκνομετρικών αριθμών Froude, ώστε η ροή της φλέβας να μην επηρεάζεται από τα τοιχώματα της δεξαμενής. Στην υπό μελέτη διπλωματική εργασία εξετάζονται τυρβώδεις ανωστικές φλέβες. Έχει παρατηρηθεί ότι για πυκνομετρικούς αριθμούς Froude μικρότερους του 15 ($Fr < 15$) η ροή της φλέβας προσεγγίζει πολύ γρήγορα τη ροή του πλουμίου και δεν έχει όλα τα χαρακτηριστικά μιας ανωστικής φλέβας. Για τον λόγο αυτό έγινε προσπάθεια ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude κάθε πειράματος να είναι μεγαλύτερος από αυτήν την οριακή τιμή. Στους Πίνακες 5.1 έως 5.4 παρουσιάζονται οι αρχικές συνθήκες όλων των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Αναλυτικά οι μετρήσεις κάθε πειράματος σε κάθε θέση, παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

α/α	Πείραμα	D	T _α	ρ _α	T _ο	ρ _ο	ΔT _ο	(ρ _α -ρ _ο)/ρ _ο	Q _ο	M _ο	B _ο	F _ο	Re _ο
		(cm)	(°C)	(kg/m ³)	(°C)	(kg/m ³)	(°C)	(%)	(cm ³ /sec)	(cm ⁴ /sec)	(cm ⁴ /sec ³)		
1	16_3 EXP1	0.57	16.24	998.90	55.98	985.24	39.74	1.39	18.23	1301.93	247.79	25.66	21041
2	16_3 EXP2	0.57	16.70	998.82	55.98	985.24	39.28	1.38	18.23	1301.93	246.40	25.73	21041
3	18_3 EXP1	0.57	16.18	998.91	55.84	985.31	39.66	1.38	15.57	950.26	210.78	21.97	17796
4	21_3 EXP1	0.57	16.42	998.87	54.8	985.82	38.38	1.32	10.26	412.68	133.25	14.78	10910
5	21_3 EXP2	0.57	16.69	998.82	44.8	990.34	28.11	0.86	10.26	412.68	86.21	18.38	6349
6	22_3 EXP1	0.57	16.28	998.89	44.3	990.55	28.02	0.84	10.26	412.68	84.76	18.53	6209
7	22_3 EXP2	0.57	16.57	998.84	45.33	990.12	28.76	0.88	10.26	412.68	88.69	18.12	6504
8	24_3 EXP1	0.57	16.58	998.84	55.98	985.24	39.40	1.38	18.23	1301.93	246.76	25.71	21041
9	5_4 EXP1	0.57	18.36	998.53	55.75	985.36	37.40	1.34	18.23	1301.93	239.04	26.13	20697
10	25_4 EXP1	0.44	20.04	998.20	52.6	986.87	32.56	1.15	12.92	1097.29	145.49	38.16	15468
11	25_4 EXP2	0.44	20.59	998.09	52.6	986.87	32.01	1.14	15.57	1594.73	173.64	46.23	18648
12	11_5 EXP1	0.44	20.63	998.08	47.4	989.23	26.77	0.89	10.26	692.56	90.05	34.35	9288
13	12_5 EXP1	0.44	20.65	998.08	52.68	986.83	32.03	1.14	12.92	1097.29	144.37	38.31	15543
14	12_5 EXP2	0.44	21.09	997.98	52.53	986.90	31.44	1.12	12.92	1097.29	142.25	38.59	15403
15	12_5 EXP3	0.44	21.54	997.88	51.65	987.31	30.11	1.07	12.92	1097.29	135.65	39.52	14629

Πίνακας 5.1: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων στο μέγιστο βάθος καθόδου για γωνία παροχέτευσης 45°.

α/α	Πείραμα	D	T _α	ρ _α	T _ο	ρ _ο	ΔT _ο	(ρ _α -ρ _ο)/ρ _ο	Q _ο	M _ο	B _ο	F _ο	Re _ο
		(cm)	(°C)	(kg/m ³)	(°C)	(kg/m ³)	(°C)	(%)	(cm ³ /sec)	(cm ⁴ /sec)	(cm ⁴ /sec ³)		
1	10_6 EXP1	0.44	23.20	997.51	52.67	986.84	29.47	1.08	12.92	1097.29	137.00	39.32	15534
2	10_6 EXP2	0.44	23.66	997.40	51.86	987.22	28.20	1.03	10.26	692.56	103.81	31.99	11764
3	10_6 EXP3	0.44	23.90	997.34	51.20	987.52	27.30	0.99	10.26	692.56	100.09	32.58	11328
4	10_6 EXP4	0.44	24.11	997.29	51.10	987.57	26.99	0.98	11.59	883.34	111.91	36.98	12722
5	13_6 EXP1	0.44	24.15	997.28	39.09	992.61	14.94	0.47	7.61	380.56	35.12	35.10	4799
6	13_6 EXP2	0.44	24.10	997.29	56.10	985.18	32.00	1.23	10.26	692.56	123.73	29.30	15481
7	14_6 EXP1	0.57	23.93	997.33	45.50	990.05	21.57	0.74	12.92	653.85	93.27	24.95	8250
8	14_6 EXP2	0.57	24.27	997.25	45.75	989.94	21.48	0.74	15.57	950.26	112.79	30.03	10061
9	14_6 EXP3	0.44	24.63	997.16	44.34	990.53	19.71	0.67	10.26	692.56	67.38	39.71	8058
10	14_6 EXP4	0.44	24.83	997.11	44.25	990.57	19.42	0.66	10.26	692.56	66.47	39.98	8026
11	15_6 EXP2	0.44	24.24	997.26	53.23	986.57	28.99	1.08	10.26	692.56	109.03	31.21	12770
12	15_6 EXP3	0.44	24.50	997.19	53.96	986.22	29.46	1.11	11.59	883.34	126.44	34.79	15103

Πίνακας 5.2: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων στο μέγιστο βάθος καθόδου για γωνία παροχέτευσης 60°.

α/α	Πείραμα	D	T_α	ρ_α	T_o	ρ_o	ΔT_o	$(\rho_\alpha - \rho_o)/\rho_o$	Q_o	M_o	B_o	F_o	Re_o
		(cm)	($^\circ\text{C}$)	(kg/m^3)	($^\circ\text{C}$)	(kg/m^3)	($^\circ\text{C}$)	(%)	(cm^3/sec)	(cm^4/sec)	(cm^4/sec^3)		
1	20_5 EXP2	0.44	21.57	997.88	55.90	985.28	34.33	1.28	7.61	380.56	95.39	21.30	11310
2	24_5 EXP2	0.44	21.33	997.93	52.00	987.15	30.67	1.09	7.61	380.56	81.48	23.04	8791
3	25_5 EXP1	0.44	21.00	998.00	53.50	986.44	32.50	1.17	7.61	380.56	87.43	22.25	9627
4	25_5 EXP2	0.44	21.21	997.96	55.30	985.58	34.09	1.26	10.26	692.56	126.45	28.98	14625
5	26_5 EXP1	0.57	21.32	997.93	58.00	984.24	36.68	1.39	10.26	412.68	140.07	14.42	13847
6	26_5 EXP2	0.57	21.72	997.84	58.70	983.88	36.98	1.42	12.92	653.85	179.82	17.97	18498
7	26_5 EXP3	0.57	22.07	997.77	43.64	990.82	21.57	0.70	11.59	526.36	79.69	22.94	6812
8	31_5 EXP2	0.44	22.87	997.58	37.35	993.25	14.48	0.44	4.95	161.27	21.20	23.73	2919
9	31_5 EXP3	0.44	23.00	997.55	37.18	993.31	14.18	0.43	4.95	161.27	20.75	23.98	2901
10	2_6 EXP1	0.44	23.37	997.47	39.40	992.49	16.03	0.50	7.61	380.56	37.42	34.00	4858

Πίνακας 5.3: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων στη θέση επιστροφής της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 45°.

α/α	Πείραμα	D	T _α	ρ _α	T _ο	ρ _ο	ΔT _ο	(ρ _α -ρ _ο)/ρ _ο	Q _ο	M _ο	B _ο	F _ο	Re _ο
		(cm)	(°C)	(kg/m ³)	(°C)	(kg/m ³)	(°C)	(%)	(cm ³ /sec)	(cm ⁴ /sec)	(cm ⁴ /sec ³)		
1	6_6 EXP1	0.44	23.37	997.47	40.73	991.98	17.36	0.55	7.61	380.56	41.27	32.38	5125
2	6_6 EXP2	0.44	23.97	997.32	40.50	992.07	16.53	0.53	4.95	161.27	25.72	21.54	3305
3	6_6 EXP3	0.44	24.16	997.28	41.03	991.87	16.87	0.55	7.61	380.56	40.71	32.60	5188
4	6_6 EXP4	0.44	24.29	997.24	41.20	991.80	16.91	0.55	7.61	380.56	40.98	32.50	5224
6	7_6 EXP2	0.44	24.73	997.14	48.70	988.66	23.97	0.86	10.26	692.56	86.33	35.08	9909
8	8_6 EXP1	0.44	23.91	997.34	46.75	989.51	22.84	0.79	12.92	1097.29	100.21	45.98	11331
9	8_6 EXP2	0.44	24.11	997.29	46.66	989.55	22.55	0.78	10.26	692.56	78.72	36.74	8963
10	8_6 EXP3	0.44	24.32	997.24	46.78	989.50	22.46	0.78	12.92	1097.29	99.10	46.24	11347
11	8_6 EXP4	0.44	24.58	997.17	46.45	989.64	21.87	0.76	11.59	883.34	86.54	42.05	10023

Πίνακας 5.4: Αρχικές συνθήκες πειραμάτων στη θέση επιστροφής της φλέβας για γωνία παροχέτευσης 60°.

6. Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από επεξεργασία των μετρήσεων. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με τη χρήση του προγράμματος Microsoft Excel. Ελέγχεται εάν επαληθεύονται οι θεωρητικές σχέσεις που προέκυψαν από τη θεωρητική ανάλυση και γίνεται σύγκριση με αποτελέσματα από προηγούμενες έρευνες, όπως παρουσιάστηκαν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.

6.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκαν οι αισθητήρες θερμοκρασίας που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4.3.2. Η συχνότητα λήψης μετρήσεων σε όλα τα πειράματα ήταν ρυθμισμένη στα 60 Hz. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο μέγιστο βάθος καθόδου, πριν την αναστροφή της ροής, σε κάθε θέση μέτρησης λαμβάνονταν δεδομένα για 60 sec, δηλαδή περίπου 3600 μετρήσεις ανά σημείο. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στην επιστροφή της φλέβας στο επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης, τα δεδομένα λαμβάνονταν για χρόνο 3-5min, δηλαδή περίπου 10800-18000 μετρήσεις ανά θερμίστορα. Οι τιμές της τάσης (Volts) που λαμβάνονταν από τους θερμίστορες μετατρέπονταν σε τιμές θερμοκρασίας μέσω των καμπυλών βαθμονόμησης. Για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος πραγματοποιούνταν μέτρηση διάρκειας 5 sec (300 μετρήσεις).

Έστω N μετρήσεις τάσης (V) που λαμβάνονται από έναν θερμίστορα και στη συνέχεια μετατρέπονται σε θερμοκρασία ($^{\circ}\text{C}$). Για το σύνολο N των μετρήσεων θερμοκρασίας, ορίζεται η μέση τιμή των στιγμιαίων μετρήσεων T_i και η RMS (Root Mean Square) τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας ως:

Μέση τιμή:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} T_i}{N} = T_M \quad (6.1)$$

RMS τιμή:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (T_i - T_M)^2}{N}} = T_{RMS} \quad (6.2)$$

Κατά την επεξεργασία των μετρήσεων μας ενδιαφέρει η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του σημείου της φλέβας που λαμβάνονται μετρήσεις και της θερμοκρασίας

του περιβάλλοντος ρευστού. Έτσι για ένα θερμίστορα η διαφορά θερμοκρασίας γράφεται:

$$\Delta T_M = T_M - T_a \quad (6.3)$$

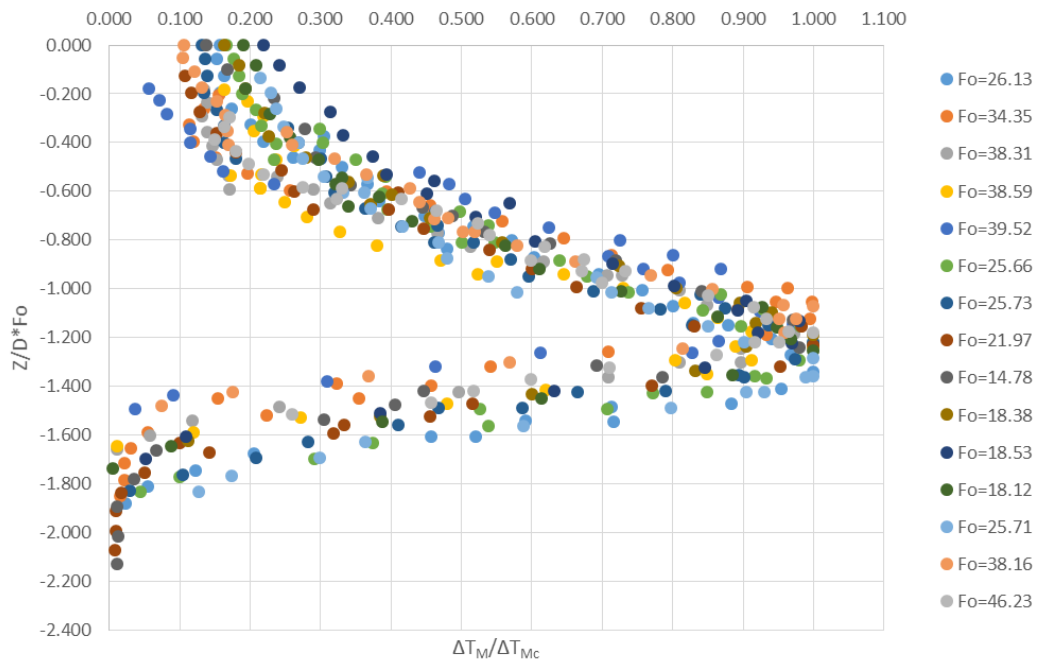
Όπου T_a είναι η θερμοκρασία του αποδέκτη, όπως λήφθηκε από το συγκεκριμένο μετρητή.

6.2 Κατακόρυφη κατανομή μέσης θερμοκρασίας και έντασης τύρβης στο μέγιστο βάθος καθόδου

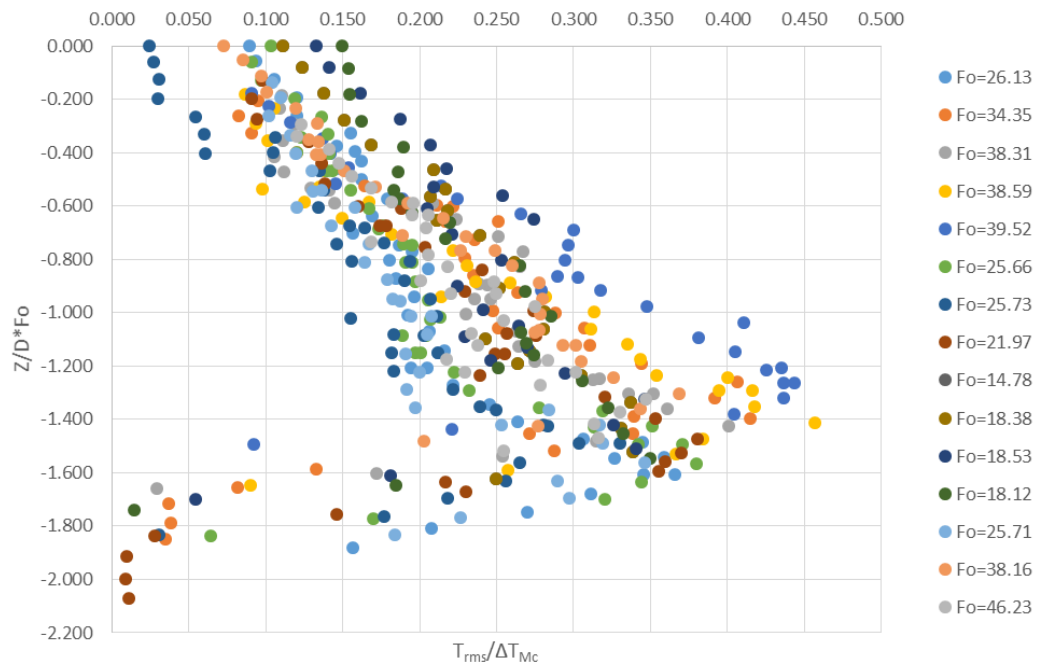
Τα διαγράμματα που αποτυπώνουν τη μεταβολή της θερμοκρασίας και η ένταση της τύρβης παρουσιάζονται σε αδιάστατη μορφή. Για την αδιαστατοποίηση χρησιμοποιείται η μέγιστη (μέση) διαφορά θερμοκρασίας, δηλαδή η διαφορά θερμοκρασίας σε σχέση με το περιβάλλον ρευστό που εμφανίζεται στον άξονα της φλέβας (centerline) και συμβολίζεται με ΔT_{MC} . Έτσι προκύπτουν οι αδιάστατοι όροι της μέσης θερμοκρασίας ($\Delta T_M / \Delta T_{MC}$) και της RMS τιμής ($T_{RMS} / \Delta T_{MC}$).

Με βάση τη θεωρητική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο κεφάλαιο 2.3, στις ανωστικές φλέβες, το βάθος καθόδου Z από το στόμιο εκροής αδιαστατοποιημένο ως προς τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude (F_o) και τη διάμετρο D του στομίου εκροής, παραμένει σταθερό και ανεξάρτητο του F_o για την ίδια γωνία παροχέτευσης. Έτσι, για μια γωνία παροχέτευσης, οι τιμές της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας και της έντασης της τύρβης απεικονίζονται σε ένα αδιαστατοποιημένο γράφημα, όπου ο κατακόρυφος άξονας είναι το αδιαστατοποιημένο βάθος διείδυσης (Z/DF_o) και ο οριζόντιος άξονας η αδιάστατη μέση θερμοκρασία ($\Delta T_M / \Delta T_{MC}$) ή, η αδιάστατη RMS τιμή ($T_{RMS} / \Delta T_{MC}$). Στο υπόμνημα των γραφημάτων αναγράφεται ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude κάθε πειράματος.

(α)

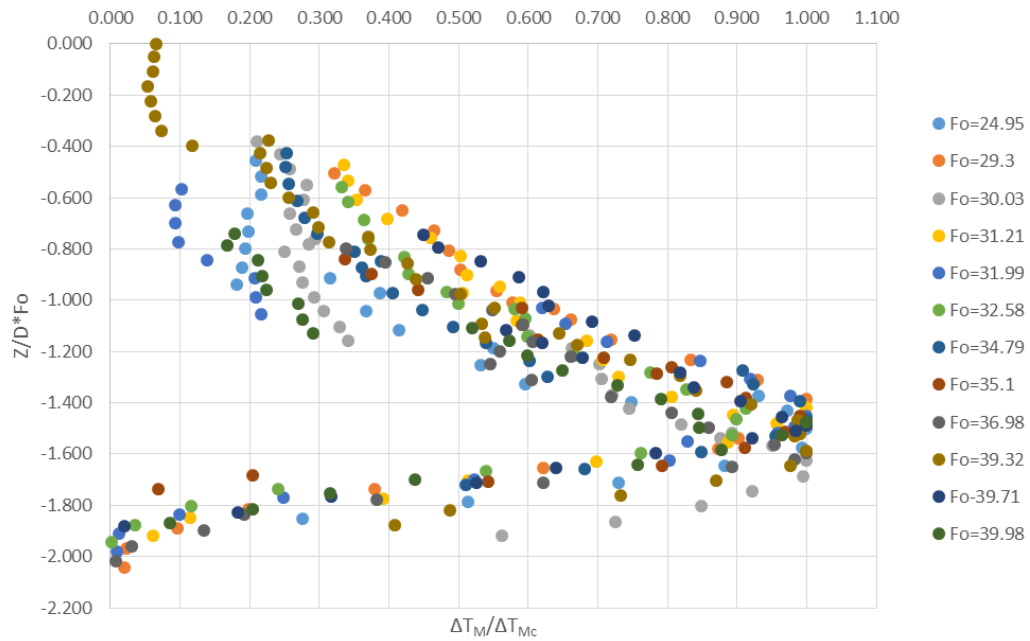


(β)

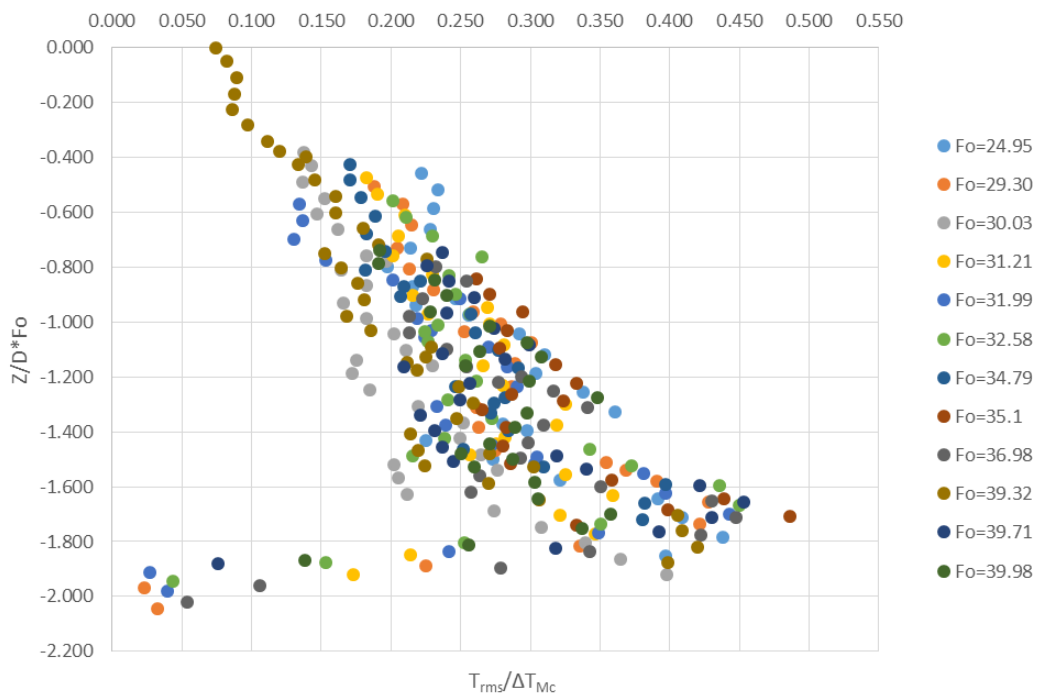


Σχήμα 6.1: Καθ' ύψος κατανομή α) της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας και β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας, στη θέση του μέγιστου βάθους καθόδου για γωνία παροχέτευσης 45°

(α)



(β)



Σχήμα 6.2: : Καθ' ύψος κατανομή α) της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας και β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της θερμοκρασίας, στη θέση του μέγιστου βάθους καθόδου για γωνία παροχέτευσης 60°

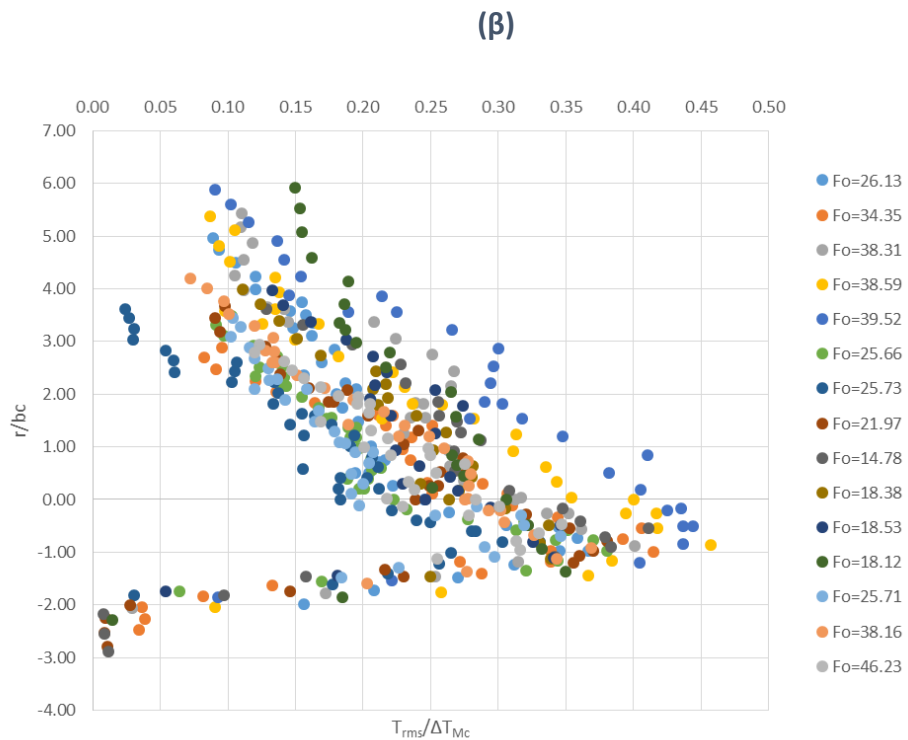
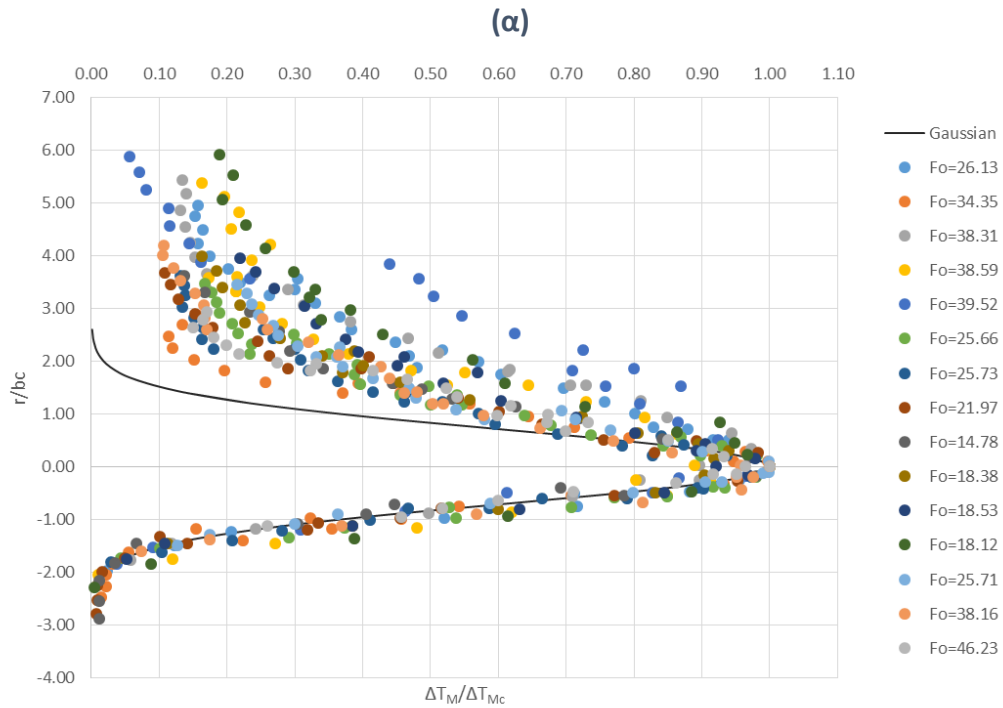
Από τα αδιαστατοποιημένα γραφήματα $\Delta T_M/\Delta T_{MC}$ συναρτήσει του λόγου $Z/(DF_0)$, παρατηρούμε πως το τμήμα από τη μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας μέχρι το κάτω όριο της φλέβας παρουσιάζει ομοιότητα με την κανονική κατανομή Gauss. Για το λόγο επιχειρείται σύγκριση της κατανομής της θερμοκρασίας με τη θεωρητική κατανομή Gauss. Για κάθε πείραμα, εντοπίζεται η θέση του άξονα της φλέβας, δηλαδή το σημείο όπου εμφανίζεται η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας. Αυτό το σημείο θεωρείται ως αφητηρία ($r=0$) και στη συνέχεια υπολογίζεται η απόσταση r όλων των σημείων που έγιναν μετρήσεις. Η μορφή της κατανομής Gauss δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta T_M = \Delta T_{MC} \cdot e^{-\frac{r^2}{b_c^2}} \Leftrightarrow \frac{\Delta T_M}{\Delta T_{MC}} = e^{-\frac{r^2}{b_c^2}} \quad (6.4)$$

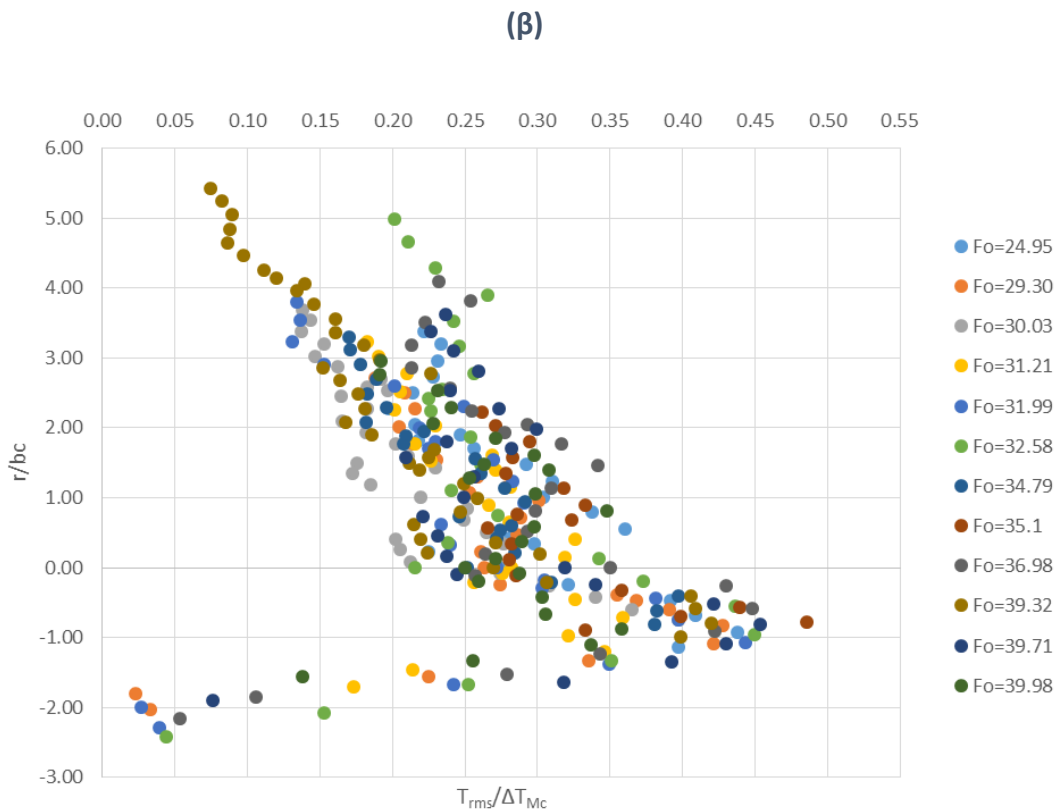
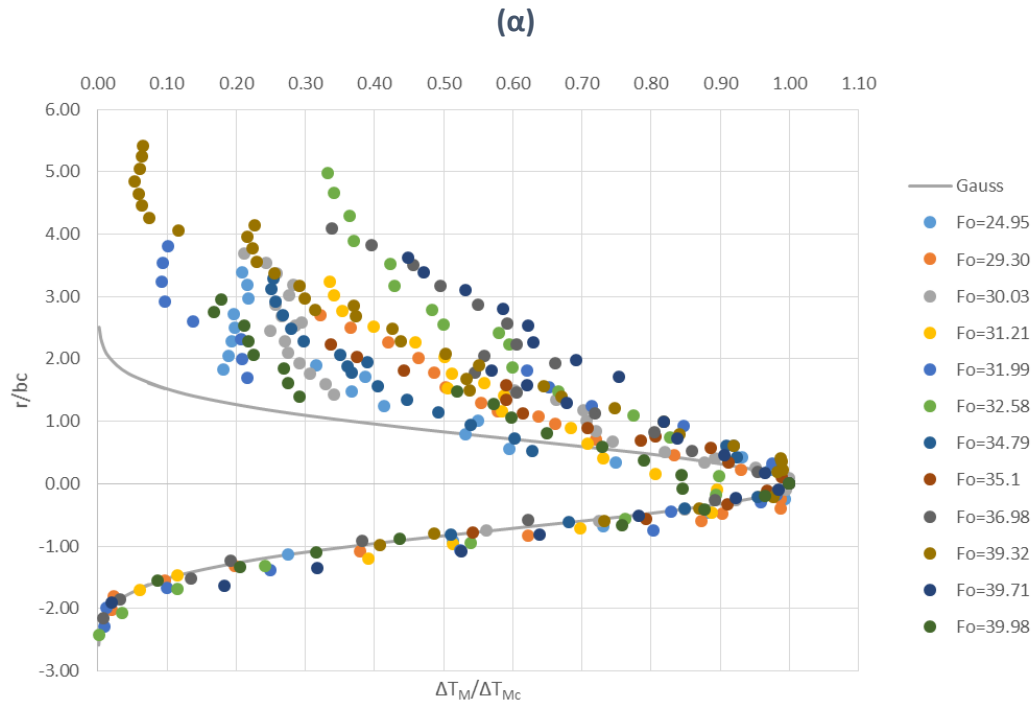
Στην οποία εάν λογαριθμίσουμε και τα δύο μέλη της προκύπτει:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_M}{\Delta T_{MC}}\right) = -\frac{r^2}{b_c^2} \quad (6.5)$$

Από την εξίσωση (6.5), με τη χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων, προσδιορίζεται η τιμή του $-b_c^2$ ως η κλίση της ευθείας, και επομένως και η τιμή b_c του πλάτους της κατανομής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα γραφήματα κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας και έντασης της τύρβης, αλλά αυτή τη φορά αδιαστατοποιημένα ως προς το λόγο r/b_c . Όπως και προηγουμένως όλα τα πειράματα ανά γωνία παροχέτευσης παρουσιάζονται σε ένα ενιαίο γράφημα. Στα αδιαστατοποιημένα γραφήματα κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας έχει προσαρμοστεί μια τυπική καμπύλη της κατανομής Gauss, ως μέτρο σύγκρισης με την κατανομή που ακολουθούν οι μετρήσεις. Στο υπόμνημα των γραφημάτων αναγράφεται ο αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude κάθε πειράματος.



Σχήμα 6.3: Κατανομή ως προς την κατακόρυφη απόσταση από τον άξονα της φλέβας στη θέση του μέγιστου βάθους α) της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας και β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της διαφοράς θερμοκρασίας, για γωνία παροχέτευσης 45°



Σχήμα 6.4: Κατανομή ως προς την κατακόρυφη απόσταση από τον άξονα της φλέβας στη θέση του μέγιστου βάθους α) της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας και β) της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της διαφοράς θερμοκρασίας, για γωνία παροχέτευσης 60°

Όπως φαίνεται από τα γραφήματα, το τμήμα της κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας, από τον άξονα μέχρι το κάτω όριο της φλέβας, ακολουθεί με ικανοποιητική προσέγγιση την κανονική κατανομή. Ο λόγος που το άνω τμήμα της φλέβας δεν παρουσιάζει κανονική κατανομή οφείλεται στην αποκόλληση μαζών της ροής. Μάζες νερού που βρίσκονται στο εσωτερικό άνω όριο της φλέβας και έχουν μικρή οριζόντια ταχύτητα αποκολλώνται και κατευθύνονται προς την ελεύθερη επιφάνεια της δεξαμενής. Αυτό το φαινόμενο έχει σαν αποτέλεσμα την ανάμιξη με το περιβάλλον ρευστό και την αλλοίωση της «κανονικότητας» που παρατηρείται από τον άξονα της φλέβας και κάτω.

Ο μέσος όρος των μεγίστων τιμών του λόγου $T_{RMS}/\Delta T_{MC}$ δηλαδή η μέγιστη τιμή της κατανομής της έντασης της τύρβης είναι 0.38 για παροχέτευση 45° και 0.42 για παροχέτευση υπό γωνία 60° . Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι τιμές σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές των Παπακωνσταντής (2009) Oliver (2012).

θ_0	45°	60°
Παρούσα μελέτη	0.38	0.42
Παπακωνσταντής (2009)	0.43	0.45
Oliver (2012)	0.308	0.348

Πίνακας 6.1: Μέσος όρος μεγίστων τιμών κατανομής έντασης της τύρβης.

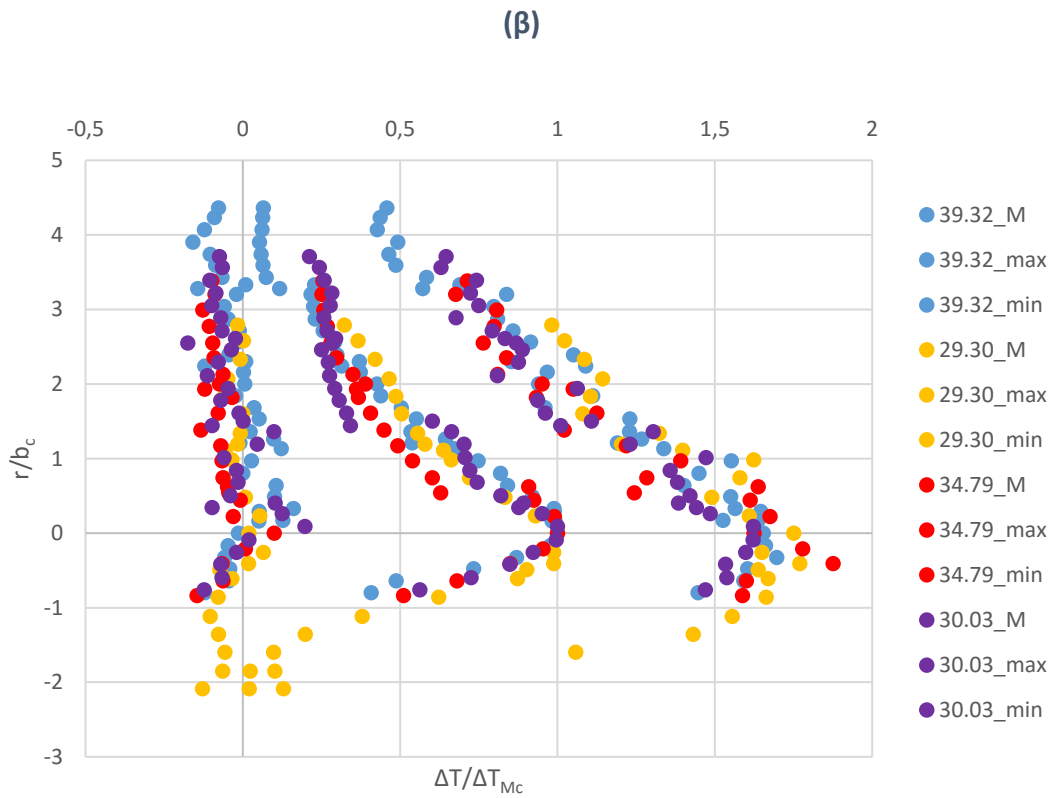
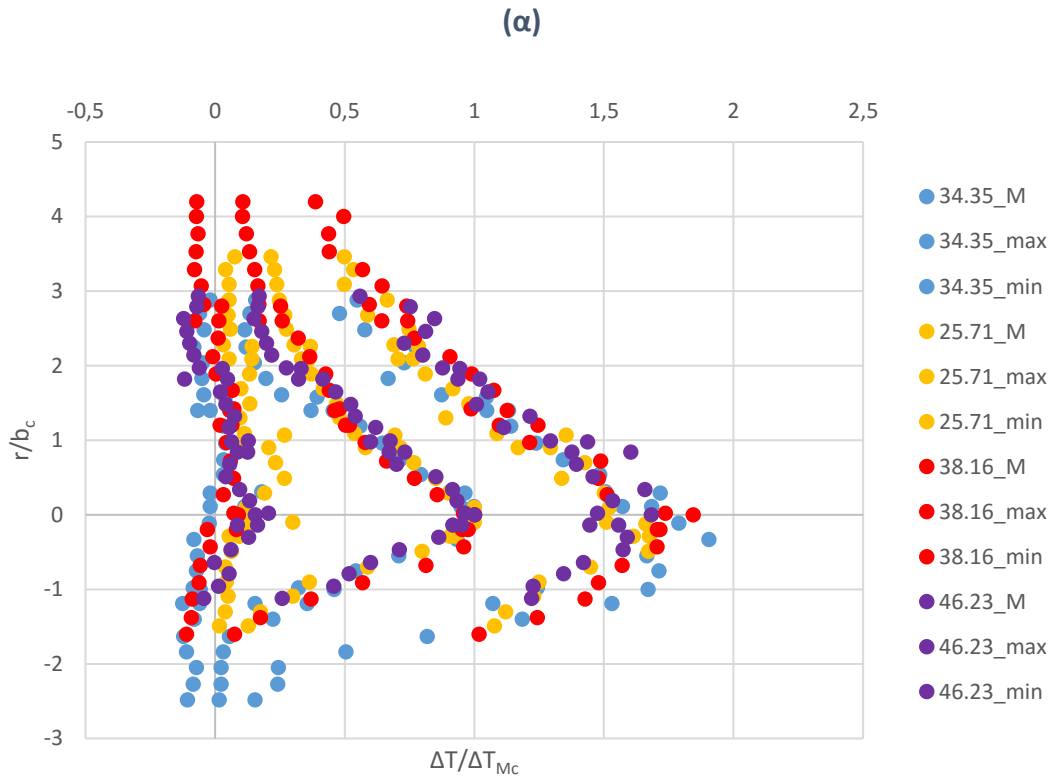
Σύμφωνα με τον Παπακωνσταντή (2009), οι Paranicolaou & List (1987) μελέτησαν θερμαινόμενες κατακόρυφες ανωστικές φλέβες και βρήκαν τιμές 0.40 για τη ροή πλουμίου και 0.25 για τη ροή απλής φλέβας. Επίσης ο Oliver (2012) επισημαίνει πως στο σημείο αναστροφής της ροής η φλέβα έχει ήδη συμπεριφορά πλουμίου και όχι απλής φλέβας. Οι διαπιστώσεις αυτές φαίνεται να συμφωνούν με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων δεν εμφανίζεται στο ίδιο σημείο που εμφανίζεται η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας αλλά παρουσιάζει εκκεντρότητα ως προς τον άξονα της φλέβας. Συγκεκριμένα εμφανίζεται σε σημείο πιο κοντά στο κάτω όριο της φλέβας. Για γωνία παροχέτευσης 45° το σημείο της μέγιστης έντασης της τύρβης εμφανίζεται κατά μέσο όρο σε απόσταση $0.83b_c$ από τον άξονα της φλέβας, όπου b_c είναι το πλάτος της κανονικής κατανομής της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας, ενώ για γωνία 60° σε απόσταση $0.77b_c$. Ο Παπακωνσταντής (2009) υπολογίζει μια ενιαία τιμή για όλες τις γωνίες ίση με $0.75b_c$ ενώ ο Oliver (2012) και για τις δύο γωνίες δίνει τιμή $0.86b_c$.

Στα γραφήματα που παρουσιάστηκαν χρησιμοποιείται η μέση τιμή της θερμοκρασίας σε κάθε θέση. Κατά τη λήψη των δεδομένων καταγράφονται περίπου 3600 τιμές της θερμοκρασίας, από τις οποίες μία είναι η μέγιστη (T_{max}) και μία είναι η ελάχιστη (T_{min}). Μπορούν επομένως να προκύψουν δύο νέες καμπύλες, μία για τη μέγιστη τιμή της θερμοκρασίας ($\Delta T_{max}/\Delta T_{MC}$) που καταγράφεται σε κάθε σημείο, και μία για την

ελάχιστη τιμή ($\Delta T_{\min}/\Delta T_{Mc}$). Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζονται ξεχωριστά για κάθε γωνία παροχέτευσης, τρία γραφήματα για κάθε πείραμα, για την ελάχιστη, τη μέση και τη μέγιστη θερμοκρασία ανά θέση. Στο υπόμνημα, δίπλα στη τιμή του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού Froude, αναγράφεται το σύμβολο «M» όταν πρόκειται για τη μέση τιμή της θερμοκρασίας, και οι λέξεις «max» και «min» όταν το γράφημα αντιστοιχεί στη μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία αντίστοιχα. Για λόγους ευκρίνειας δεν έχουν τοποθετηθεί στο σχήμα όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν ανά γωνία παροχέτευσης.

Παρατηρούμε πως τα γραφήματα της μέγιστης και της ελάχιστης δεν ακολουθούν παρόμοια κατανομή με αυτό της μέσης θερμοκρασίας. Δεν έχουν την ίδια ομοιομορφία με αυτά της μέσης τιμής, καθώς για τη σχεδίασή τους χρησιμοποιείται μία μόνο τιμή, η μέγιστη ή η ελάχιστη θερμοκρασία που καταγράφεται από κάθε θερμίστορα. Η τιμές αυτές εκφράζουν τα ακρότατα των καταγραφών σε κάθε θέση. Σε πολλές περιπτώσεις, η μέγιστη τιμή που καταγράφει ο θερμίστορας, μπορεί να μην είναι πραγματική αλλά να οφείλεται σε κάποια στιγμιαία «φασαρία» (noise) του ηλεκτρικού ρεύματος.



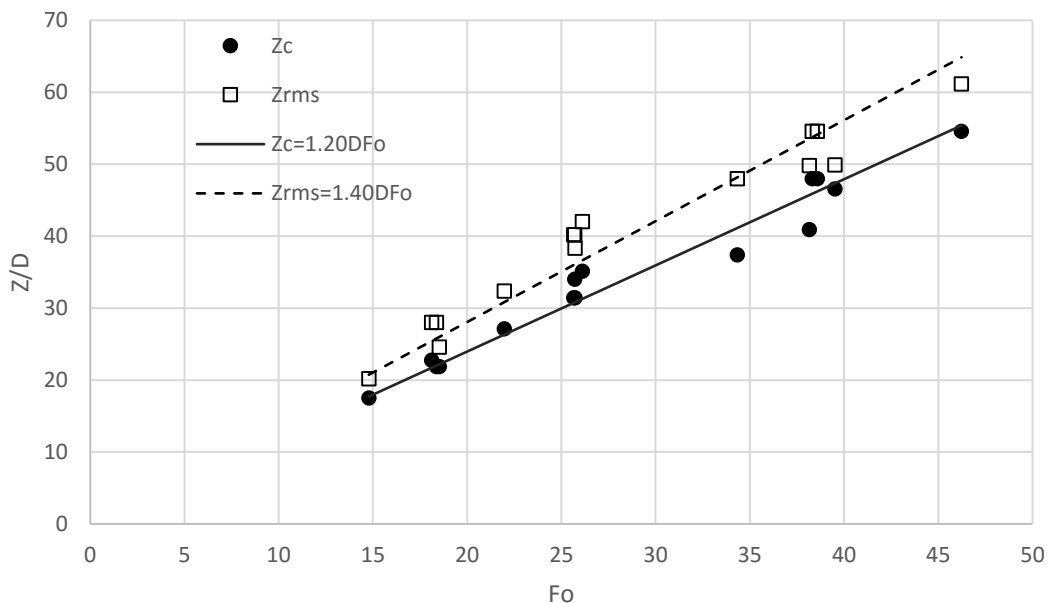
Σχήμα 6.5: Κατακόρυφη κατανομή της ελάχιστης, μέσης και μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας για παροχέτευση υπό γωνία α)45° και β)60°.

6.3 Βάθος άξονα της φλέβας και θέση μεγιστοποίησης έντασης τύρβης.

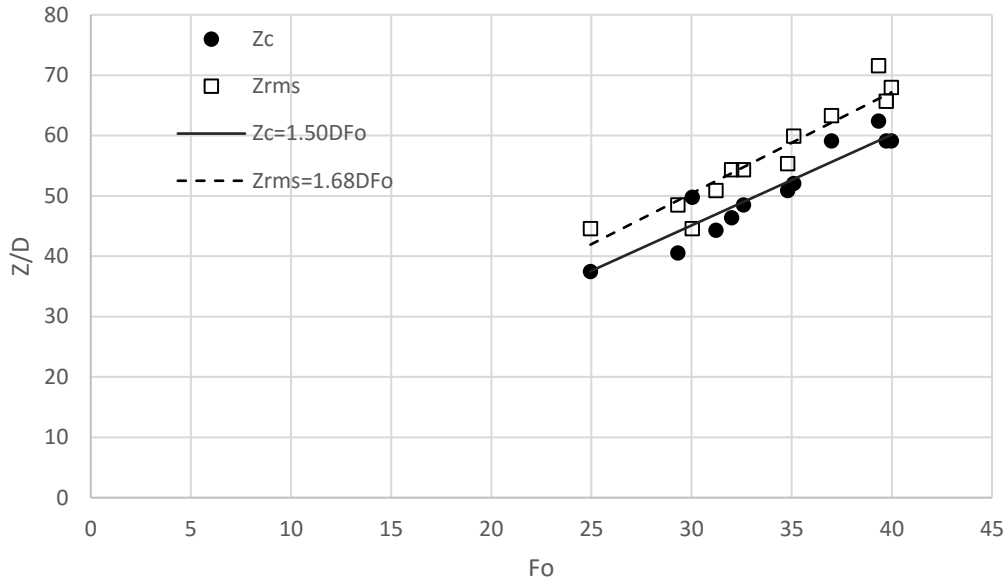
Παρατηρώντας τα αδιάστατα γραφήματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 6.3 και 6.4, παρατηρούμε ότι η θέση που εμφανίζεται η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας είναι περίπου ίδια σε όλα τα πειράματα. Το ίδιο ισχύει και για τη θέση εμφάνισης της μέγιστης RMS τιμής (ένταση της τύρβης). Η διαπίστωση αυτή, εκφράζεται και σύμφωνα με τη διαστατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Κεφάλαιο 2, μέσα από τις σχέσεις:

$$\frac{Z_c}{D \cdot Fo} = \text{σταθ}, \quad \frac{Z_{RMS}}{D \cdot Fo} = \text{σταθ} \quad (6.6)$$

Για κάθε πείραμα που πραγματοποιήθηκε βρέθηκε η θέση εμφάνισης της μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας και η θέση εμφάνισης της μέγιστης έντασης της τύρβης. Στα αδιάστατα γραφήματα που ακολουθούν φαίνεται η σχέση μεταξύ των λόγων Z_c/D και Z_{RMS}/D συναρτήσει του του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού Fo .



Σχήμα 6.6: Βάθος που μεγιστοποιείται η μέγιστη (μέση) διαφορά θερμοκρασίας και η ένταση της τύρβης για γωνία 45°.

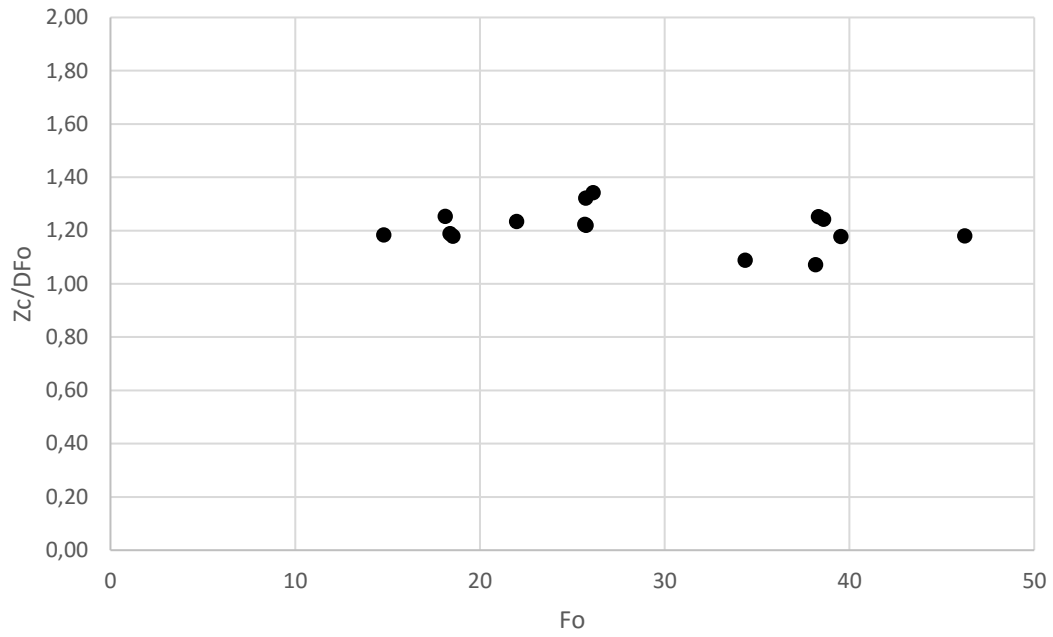


Σχήμα 6.7: Βάθος που μεγιστοποιείται η μέγιστη (μέση) διαφορά θερμοκρασίας και η ένταση της τύρβης για γωνία 60°.

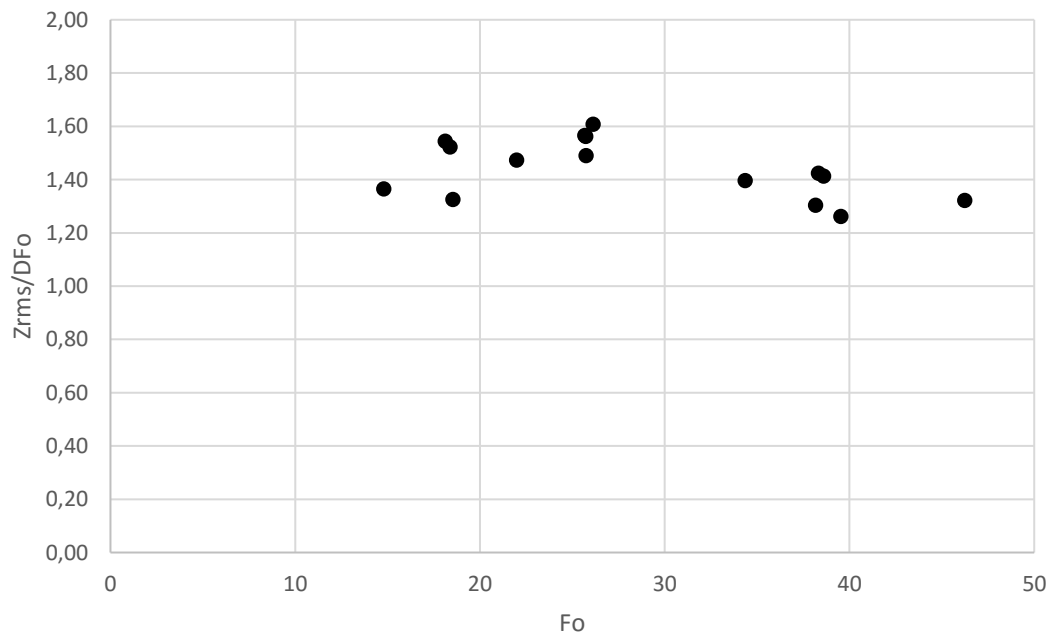
Στα σχήματα 6.5 και 6.6 παρατηρούμε πως η μέγιστη τιμή έντασης της τύρβης εμφανίζεται μονίμως σε μεγαλύτερο βάθος από αυτό της μέγιστης μέσης διαφοράς θερμοκρασίας. Αυτή η παρατήρηση επαληθεύει τη διαπίστωση που έγινε προηγουμένως σε σχέση με την ύπαρξη εκκεντρότητας μεταξύ των δύο βαθών.

Αν αντί του λόγου Z/D χρησιμοποιήσουμε τον λόγο $Z/(DF_o)$, συναρτήσει του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού Froude, με βάση και τη διαστατική ανάλυση ο λόγος αυτός θα πρέπει να έχει περίπου σταθερή τιμή ανεξάρτητα από τις αρχικές συνθήκες του πειράματος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν.

(α)

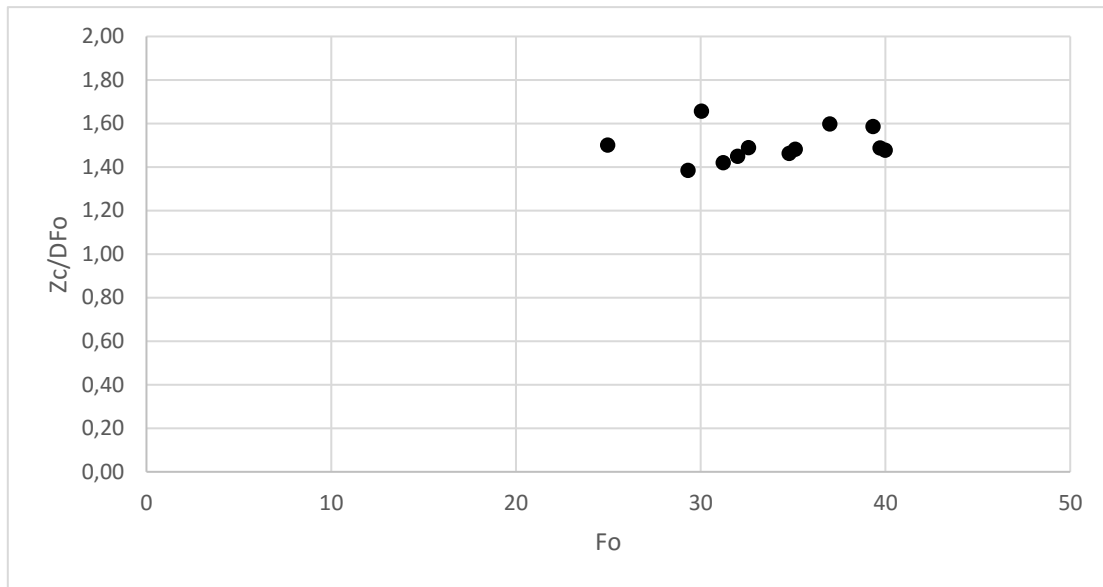


(β)

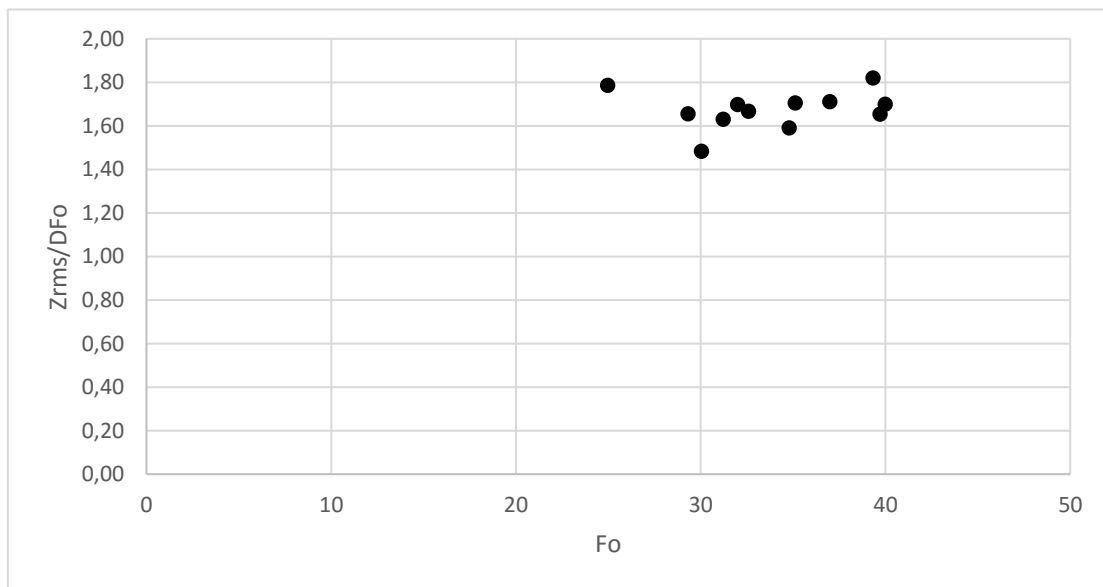


Σχήμα 6.8: Βάθος εμφάνισης α) της μέγιστης μέσης διαφοράς θερμοκρασίας και β) της μέγιστης έντασης της τύρβης για γωνία παροχέτευσης 45°.

(α)



(β)



Σχήμα 6.9: Βάθος εμφάνισης α) της μέγιστης διαφοράς θερμοκρασίας και β) της μέγιστης έντασης της τύρβης για γωνία παροχέτευσης 60°.

Από τα Σχήματα 6.8 και 6.9 παρατηρούμε πως ο λόγος Z/DF_0 παραμένει σταθερός για όλους τους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude, τόσο στον άξονα της φλέβας όσο και στη θέση εμφάνισης της μέγιστης RMS τιμής. Μάλιστα όπως είναι λογικό, η τιμή αυτή είναι ο συντελεστής κλίσης των ευθειών που προσαρμόστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων στα σχήματα 6.6 και 6.7.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα αποτελέσματα του λόγου $Z_c/(DF_0)$ της παρούσας μελέτης σε σύγκριση με τα αποτελέσματα από προηγούμενες μελέτες. Σε αυτό το σημείο αξίζει να υπενθυμίσουμε ότι τα αποτελέσματα των άλλων μετρήσεων αφορούν το μέγιστο τερματικό ύψος ανόδου για παροχέτευση από τον πυθμένα του αποδέκτη προς τα πάνω.

$\frac{Z_c}{D \cdot F_0}$		
	45°	60°
Παρούσα μελέτη	1.20	1.50
Παπακωνσταντής (2009)	1.17	1.68
Oliver (2012)	1.09	1.61
Crowe (2013)	1.22	1.71

Πίνακας 6.2: Σύγκριση αποτελεσμάτων του βάθους του άξονα της φλέβας.

Τα αποτελέσματα τη παρούσας μελέτης σχετικά με το βάθος του άξονα της φλέβας είναι αρκετά ικανοποιητικά σε σχέση με τα τελευταία αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Για το βάθος εμφάνισης της RMS τιμής η σύγκριση γίνεται μόνο με τα αποτελέσματα του Παπακωνσταντή (2009). Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 6.2.

$\frac{Z_{RMS}}{D \cdot F_0}$		
	45°	60°
Παρούσα μελέτη	1.40	1.68
Παπακωνσταντής (2009)	1.37	1.95

Πίνακας 6.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων του βάθους της RMS τιμής.

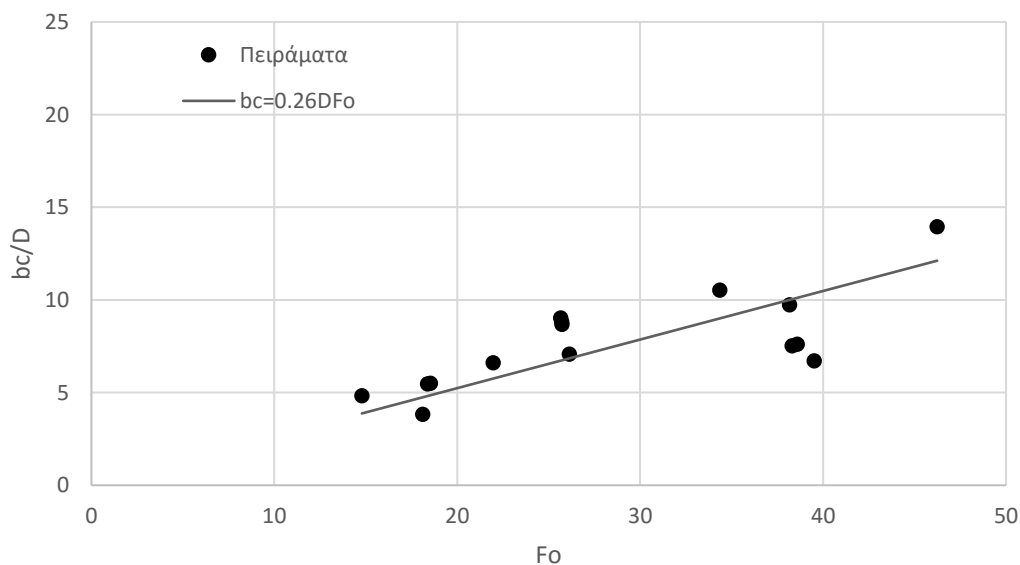
Για γωνία παροχέτευσης 45° τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις είναι εξαιρετικά κοντά στα αντίστοιχα αποτελέσματα της σύγχρονης βιβλιογραφίας. Για γωνία παροχέτευσης 60° τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης είναι μικρότερα από τα αποτελέσματα των άλλων ερευνητών.

6.4 Πλάτος κατακόρυφης κατανομής διαφοράς θερμοκρασίας

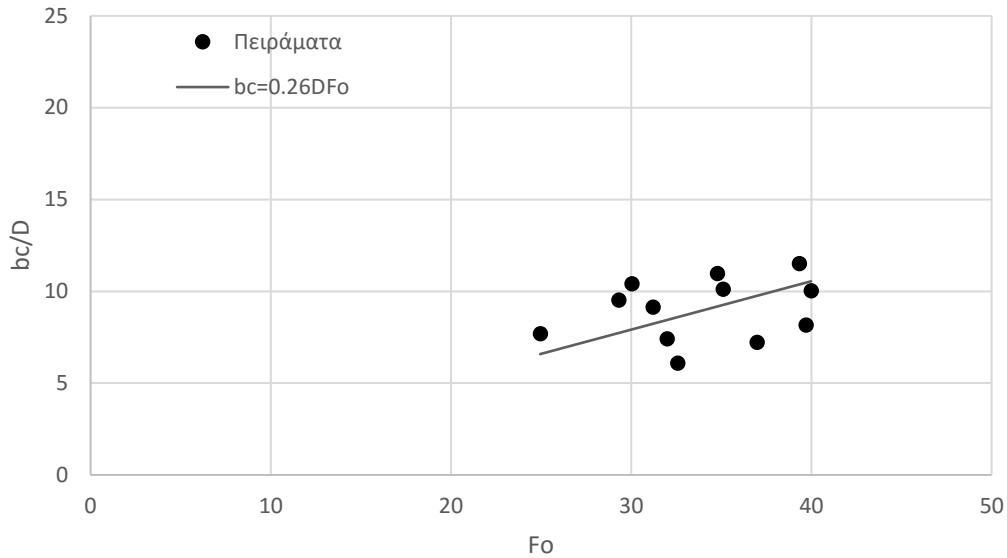
Σε κάθε πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο μέγιστο βάθος καθόδου της φλέβας υπολογίστηκε το πλάτος της κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας, από το κάτω όριο μέχρι τον άξονα της φλέβας. Αυτό έγινε διότι στη συνέχεια η κατανομή παρουσιάζει ασυμμετρία. Η ασυμμετρία αυτή, αλλά και μια τυπική κατανομή Gauss παρουσιάστηκαν στα σχήματα (6.3) και (6.4). Με βάση τη διαστατική ανάλυση το πλάτος της κατανομής διαιρούμενο με το γινόμενο της διαμέτρου (D) και του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού F_o , πρέπει να ακολουθεί τη σχέση

$$\frac{b_c}{D \cdot F_o} = \text{σταθερό} \quad (6.7)$$

ξεχωριστά για κάθε γωνία παροχέτευσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αδιάστατα γραφήματα του λόγου b_c/D συναρτήσει του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού $Froude$, χωριστά για κάθε γωνία. Σε κάθε γράφημα προσαρμόζεται η βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων με χρήση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων.



Σχήμα 6.10: Πλάτος κατακόρυφης κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας για γωνία παροχέτευσης 45° .



Σχήμα 6.11: Πλάτος κατακόρυφης κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας για γωνία παροχέτευσης 60°.

Για παροχέτευση υπό γωνία 45° τα αποτελέσματα επαληθεύουν τη θεωρητική σχέση, σε αντίθεση με τη γωνία των 60° όπου τα πλάτη της κατανομής έχουν μεγάλη διασπορά. Στον πίνακα που ακολουθεί συγκρίνονται τα αποτελέσματα με αυτά του Παπακωνσταντής (2009):

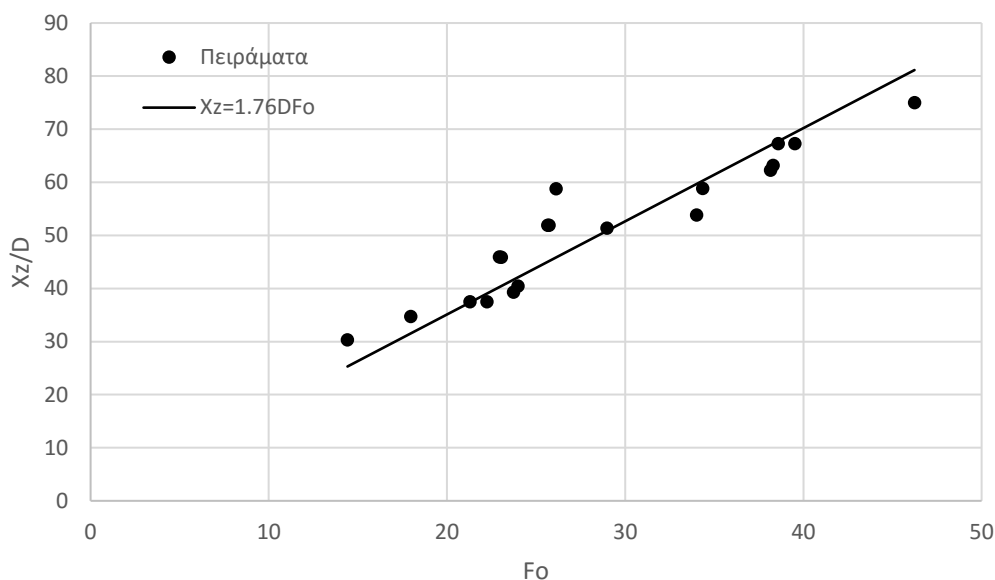
	$\frac{b_c}{D \cdot F_o}$	
	45°	60°
Παρούσα μελέτη	0.26	0.26
Παπακωνσταντής (2009)	0.28	0.32

Πίνακας 6.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων του πλάτους της κατακόρυφης κατανομής.

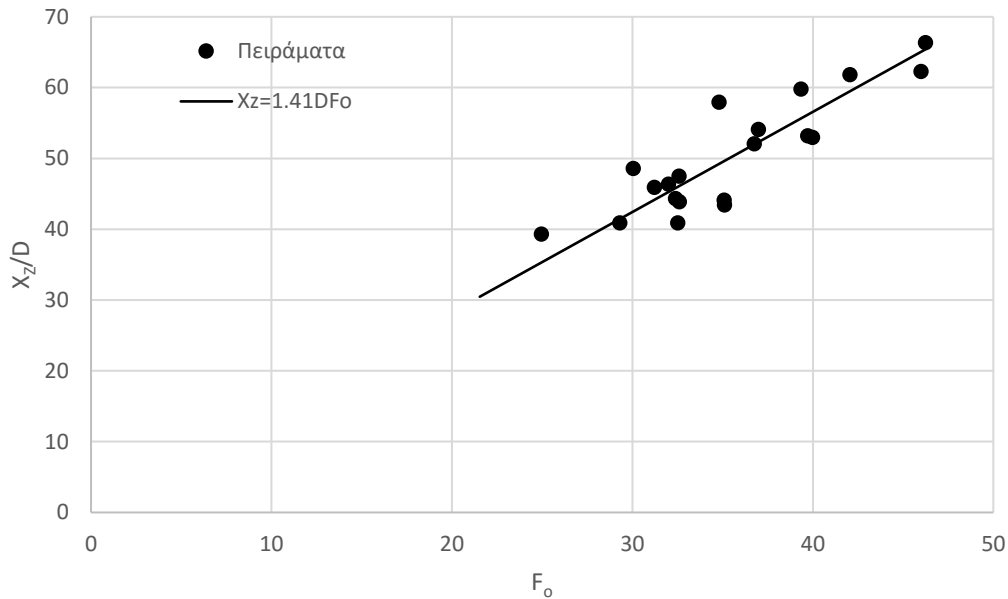
Παρατηρούμε πως για αύξηση της γωνίας σύμφωνα με τον Παπακωνσταντής (2009) αυξάνεται και το πλάτος της κατακόρυφης κατανομής. Αντίθετα στην παρούσα εργασία ο αδιάστατος λόγος $b_c/(DF_o)$ παραμένει σταθερός και στις δύο γωνίες παροχέτευσης.

6.5 Οριζόντια θέση μεγίστου βάθους καθόδου

Πριν από την έναρξη των μετρήσεων κάθε πειράματος τόσο στο μέγιστο βάθος καθόδου όσο και στο σημείο επιστροφής της φλέβας σημειωνόταν η απόσταση από το σημείο εκροής, που εμφανιζόταν το μέγιστο βάθος καθόδου της φλέβας, δηλαδή το σημείο αναστροφής της ροής (X_z). Η διαδικασία αυτή έχει έντονο το στοιχείο της υποκειμενικότητας, καθώς το σημείο αναστροφής της ροής δεν είναι ευδιάκριτο και στην πραγματικότητα δεν είναι σημείο, αλλά συμβαίνει σε κάποιο μήκος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αδιάστατα γραφήματα του λόγου X_z/D συναρτήσει του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού Froude, για κάθε γωνία παροχέτευσης. Σε κάθε γράφημα φαίνεται και η βέλτιστη ευθεία που ικανοποιεί τα σημεία και διέρχεται από την αρχή των αξόνων.



Σχήμα 6.12: Οριζόντια απόσταση μεγίστου βάθους καθόδου από το σημείο εκροής, για γωνία 45°.



Σχήμα 6.13: Οριζόντια απόσταση μεγίστου βάθους καθόδου από το σημείο εκροής, για γωνία 60°

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, του λόγου X_z/DF_o , για γωνίες παροχέτευσης 45° και 60° σε σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

	$\frac{X_z}{D \cdot F_o}$	
	45°	60°
Παρούσα Μελέτη	1.76	1.41
Παπακωνσταντής (2009)	2.03±0.13	1.83±0.08
Oliver (2012)	1.75	1.53
Crowe (2013)	1.96±0.07	1.69±0.04

Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα οριζόντιας θέσης εμφάνισης μεγίστου βάθους, παρούσας εργασίας σε σύγκριση με αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Αρχικά παρατηρούμε πως η σχέση που προέκυψε από τη διαστατική ανάλυση,

$$\frac{X_z}{D \cdot F_o} = C_3 \quad (6.8)$$

επαληθεύεται με μεγάλη ακρίβεια. Στη σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα προηγούμενων μελετών, παρατηρούμε ότι για παροχέτευση υπό γωνία 45° η σταθερά που προσδιορίστηκε σχεδόν ταυτίζεται με αυτή του Oliver (2012). Αντίθετα

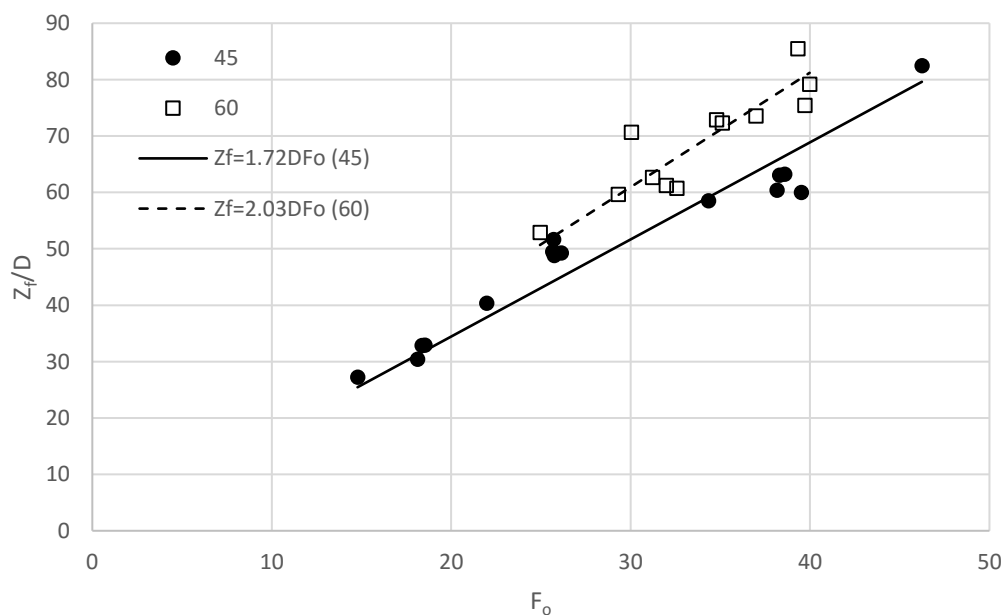
οι τιμές των Παπακωνσταντής (2009) και Crowe (2013) είναι μεγαλύτερες. Για γωνία παροχέτευσης 60° και πάλι η σταθερή τιμή του λόγου είναι πιο κοντά σε αυτή του Oliver (2012), αλλά με μια μικρή απόκλιση. Και υπό αυτή τη γωνία οι σταθερές των άλλων μελετητών είναι μεγαλύτερες.

6.6 Εκτίμηση κάτω ορίου φλέβας

Παρατηρώντας τα Σχήματα (6.3) και (6.4) της κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας παρατηρούμε ότι ο λόγος $\Delta T_M/\Delta T_{Mc}$ μηδενίζεται περίπου για $r/b_c=2$. Αυτή η διαπίστωση ισχύει και για τις δύο γωνίες παροχέτευσης. Θα μπορούσαμε επομένως με αρκετά μεγάλη ακρίβεια να πούμε ότι το κάτω όριο της φλέβας στο μέγιστο βάθος καθόδου εμφανίζεται σε απόσταση $2b_c$ από τον άξονα της φλέβας. Δηλαδή:

$$Z_f = Z_c + 2 \cdot b_c \quad (6.9)$$

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η συσχέτιση του αδιάστατου λόγου Z_f/D με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude. Για κάθε γωνία παροχέτευσης προσαρμόζεται και ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Οι Oliver (2012) και Crowe (2013) καταλήγουν στην ίδια σχέση βασιζόμενοι στις κατακόρυφες κατανομές της συγκέντρωσης. Ο Παπακωνσταντής (2009), για ανωστικές φλέβες εκτοξευόμενες από τον πυθμένα, κατέληξε πως η απόσταση του άνω ορίου της φλέβας από τον άξονα είναι περίπου $1.5b_c$ για όλες τις γωνίες παροχέτευσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν τα συγκρίνει με τα αντίστοιχα δεδομένα από την οπτική καταγραφή πειραμάτων και προκύπτει ικανοποιητική συμφωνία.



Σχήμα 6.14: Συσχέτιση του λόγου Z_f/D με τον F_o , για κάθε γωνία παροχέτευσης.

Στον Πίνακα 6.6 φαίνονται τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας σε σύγκριση με προηγούμενες έρευνες.

	$\frac{Z_f}{D \cdot E_o}$	
	45°	60°
Παρούσα μελέτη	1.72	2.03
Παπακωνσταντής (2009)	1.59	2.15
Oliver (2012)	1.65	2.21
Crowe (2013)	1.73±0.05	2.23±0.04

Πίνακας 6.6: Σύγκριση αποτελεσμάτων του μεγίστου βάθους καθόδου με προηγούμενες έρευνες.

Για παροχέτευση υπό γωνία 45° παρατηρούμε ότι το αποτέλεσμα της παρούσας μελέτης είναι εξαιρετικά κοντά με τα αποτελέσματα των Oliver (2012) και Crowe (2013), ενώ και με του Παπακωνσταντή (2009) η απόκλιση δεν είναι μεγάλη. Στη γωνία των 60° η σταθερά που υπολογίζεται από τα πειράματα της παρούσας μελέτης είναι μικρότερη από τα αποτελέσματα των άλλων ερευνητών.

6.7 Αξονική αραίωση στη θέση του μεγίστου βάθους καθόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης

Για τον προσδιορισμό της μέσης χρονικά διάλυσης (αραίωσης) χρησιμοποιείται η σχέση:

$$S = \frac{\Delta T_o}{\Delta T_M} = \frac{T_o - T_\alpha}{T_M - T_\alpha} \quad (6.10)$$

όπου για κάθε πείραμα όλες οι παράμετροι της εξίσωσης είναι γνωστές. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο μέγιστο βάθος καθόδου, όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η κατακόρυφη κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας ακολουθεί την κανονική κατανομή Gauss. Επομένως η θερμοκρασία στον άξονα της φλέβας είναι η T_{Mc} , δηλαδή η μέγιστη θερμοκρασία της κατανομής.

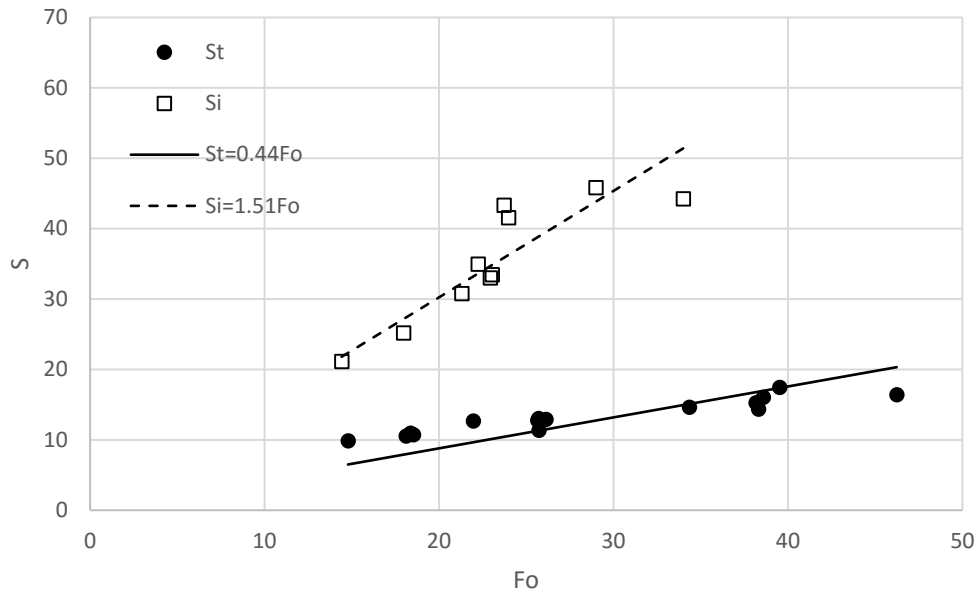
Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης, η (οριζόντια) κατανομή της θερμοκρασίας δεν φαίνεται να ακολουθεί την κανονική κατανομή. Η διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον ρευστό είναι πλέον πολύ μικρή, με αποτέλεσμα όλες οι τιμές που μετρούνται να είναι παραπλήσιες. Την κατανομή της θερμοκρασιακής διαφοράς μπορούμε να τη θεωρήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια σαν ομοιόμορφη κατανομή (top hat). Κατά τη

διεξαγωγή των πειραμάτων στη θέση επιστροφής, οι θερμίστορες τοποθετούνταν συμμετρικά του άξονα της φλέβας, ο οποίος προσδιορίζονταν οπτικά. Για τον προσδιορισμό της τιμής T_M λαμβάνονταν ο μέσος όρος των τιμών που μετρούνταν στον άξονα και κοντά σε αυτόν.

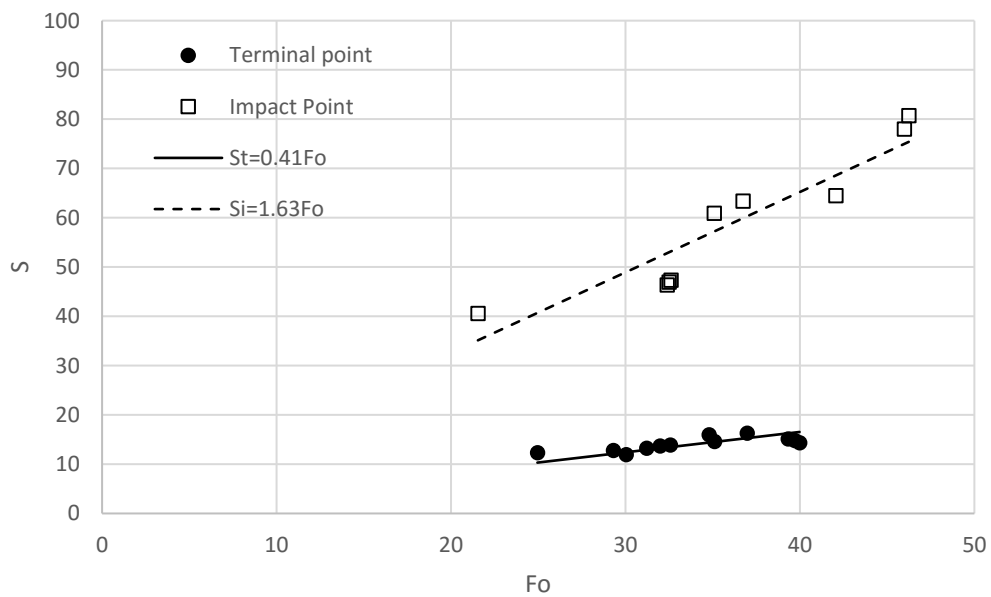
Στα αδιάστατα γραφήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται για κάθε γωνία ξεχωριστά, ο λόγος S/F_0 συναρτήσει του πυκνομετρικού αριθμού F_0 . Με βάση τη διαστατική ανάλυση που προηγήθηκε πρέπει να επαληθεύεται η σχέση:

$$\frac{S}{F_0} = \text{σταθερό} \quad (6.11)$$

Δηλαδή τα σημεία να συσχετίζονται γραμμικά μεταξύ τους. Για το λόγο αυτό στα γραφήματα έχουν προσαρμοστεί οι βέλτιστες ευθείες που διέρχονται από την αρχή των αξόνων και επαληθεύουν τα σημεία, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

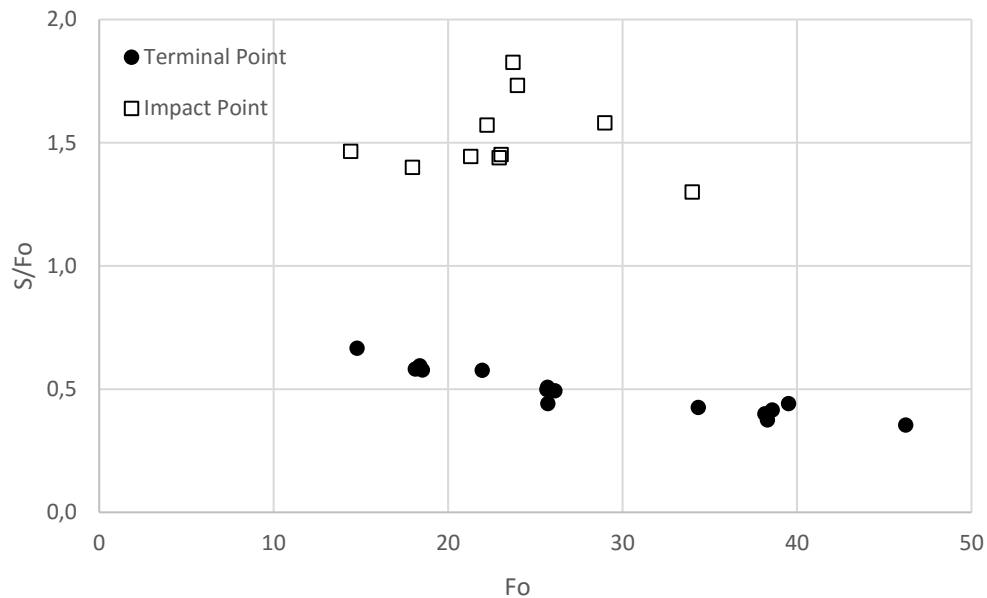


Σχήμα 6.15: Αξονική διάλυση συναρτήσει του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού F_0 , στο μέγιστο βάθος καθόδου και στο επίπεδο επιστροφής, για γωνία παροχέτευσης 45° .

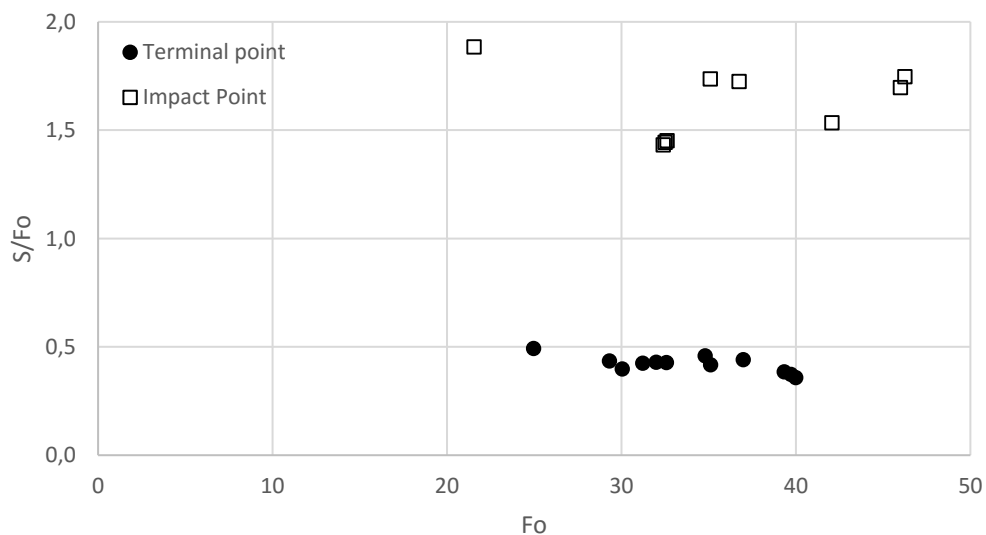


Σχήμα 6.16: Αξονική διάλυση συναρτήσει του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού F_0 , στο μέγιστο βάθος καθόδου και στο επίπεδο επιστροφής, για γωνία παροχέτευσης 60° .

Παρατηρούμε πως η αραίωση συσχετίζεται γραμμικά με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude. Επομένως εάν συσχετίσουμε τον λόγο S/F_0 με τον αρχικό αριθμό F_0 τα σημεία αναμένεται να βρίσκονται σε ευθεία, όπως φαίνεται στα παρακάτω γραφήματα για κάθε γωνία παροχέτευσης.



Σχήμα 6.17: Συσχέτιση του λόγου S/F_0 με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό F_0 για γωνία παροχέτευσης 45° .



Σχήμα 6.18: Συσχέτιση του λόγου S/F_0 με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό F_0 για γωνία παροχέτευσης 60°

Η αραίωση στο επίπεδο επιστροφής είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αξονική αραίωση στο μέγιστο βάθος καθόδου. Επίσης, η διακύμανση των τιμών στο επίπεδο επιστροφής είναι μεγάλη. Αυτό οφείλεται στη μικρή θερμοκρασιακή διαφορά που παρατηρείται στο επίπεδο επιστροφής. Στη συνέχεια πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με προηγούμενες μελέτες.

	$\frac{S_t}{F_o}$	
	45°	60°
Παρούσα μελέτη	0.44	0.41
Παπακωνσταντής (2009)	0.52±0.05	0.56±0.05
Oliver (2012)	0.39	0.42

Πίνακας 6.7: Σύγκριση αποτελεσμάτων αξονικής διάλυσης στο μέγιστο βάθος καθόδου.

	$\frac{S_i}{F_o}$	
	45°	60°
Παρούσα μελέτη	1.51	1.63
Παπακωνσταντής (2009)	1.55±0.14	1.68±0.10
Oliver (2012)	1.22	1.55

Πίνακας 6.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων αξονικής διάλυσης στη θέση επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης

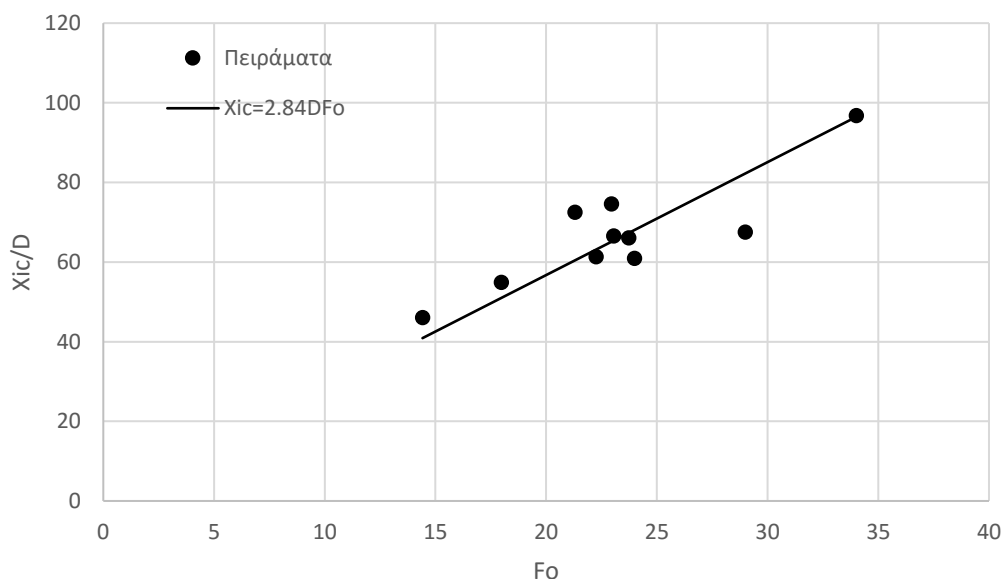
Στο μέγιστο βάθος καθόδου τα αποτελέσματα και για τις δύο γωνίες παρουσιάζουν εξαιρετική συμφωνία με τα αποτελέσματα του Oliver (2012). Ειδικά για παροχέτευση υπό γωνία 60° η αξονική διάλυση σχεδόν ταυτίζεται στις δύο εργασίες. Τα αποτελέσματα αραίωσης του Παπακωνσταντή (2009) είναι ελαφρώς μεγαλύτερα από αυτά της παρούσας εργασίας. Βέβαια παρατηρούμε ότι στα αποτελέσματα των άλλων ερευνητών, με την αύξηση της γωνίας παροχέτευσης αυξάνεται και η αξονική αραίωση. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, παρατηρείται μια ελαφρά μείωση της αξονικής αραίωσης.

Στο επίπεδο επιστροφής της παροχέτευσης, τα αποτελέσματα είναι εξαιρετικά κοντά με αυτά του Παπακωνσταντή (2009). Ο Oliver (2012) για γωνία παροχέτευσης 45° παρουσιάζει μικρότερη αραίωση αλλά και με τους δύο ερευνητές που επιχειρείται σύγκριση υπάρχει συμφωνία σε σχέση με την αξονική αραίωση στο επίπεδο επιστροφής της παροχέτευσης.

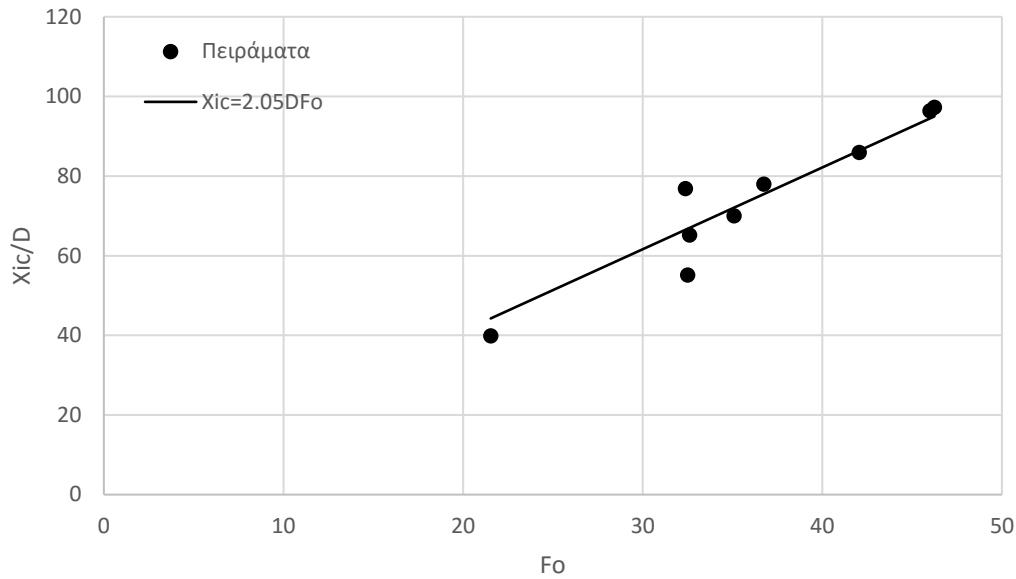
6.8 Εκτίμηση οριζόντιας θέσης άξονα φλέβας στη θέση επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης

Στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης, η διαφορά θερμοκρασίας φλέβας και περιβάλλοντος ρευστού είναι πλέον πολύ μικρή. Η ροή μπορεί να χαρακτηριστεί με σχετική επιτυχία ομοιόμορφη (top Hat). Η κατανομή αυτή κάνει την εύρεση και εκτίμηση του άξονα της φλέβας σε αυτήν τη θέση δύσκολη αλλά και αβέβαιη. Στις μετρήσεις που έγιναν στο επίπεδο επιστροφής οι θερμίστορες τοποθετήθηκαν κατ' εκτίμηση στον άξονα της φλέβας, όπως αυτός φαινόταν μέσω του σκιαγραφήματος. Και πράγματι, στα περισσότερα δεδομένα που ελήφθησαν, μεταξύ του 4^{ου} και του 5^{ου} θερμίστορα μετρήθηκαν λίγο μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας. Έτσι, αν θεωρήσουμε πως ο άξονας της φλέβας βρίσκεται κοντά στο σημείο εμφάνισης της μεγαλύτερης θερμοκρασίας, μπορούμε να κάνουμε μια εκτίμηση του άξονα της φλέβας στο επίπεδο επιστροφής.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αδιάστατα γραφήματα του λόγου Xi_c/D συναρτήσει του αρχικού πυκνομετρικού αριθμού Froude, για κάθε γωνία παροχέτευσης. Κατόπιν πραγματοποιείται σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών.



Σχήμα 6.19: Συσχέτιση του λόγου Xi_c/D του άξονα της φλέβας στο επίπεδο επιστροφής, με τον αρχικό πυκνομετρικού αριθμού F_o , για γωνία παροχέτευσης 45°.



Σχήμα 6.20: Συσχέτιση του λόγου X_{ic}/D του άξονα της φλέβας στο επίπεδο επιστροφής, με τον αρχικό πυκνομετρικού αριθμού F_o , για γωνία παροχέτευσης 60° .

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παρούσας σε σύγκριση με τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών.

	$\frac{X_{ic}}{D \cdot F_o}$	
	45°	60°
Παρούσα μελέτη	2.84	2.05
Παπακωνσταντής (2009)	3.24 ± 0.14	2.75 ± 0.16
Oliver (2012)	3.13	2.76
Crowe (2013)	3.43 ± 0.09	2.93 ± 0.06

Πίνακας 6.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων για τη θέση του άξονα της φλέβας στο επίπεδο επιστροφής, με προηγούμενες μελέτες.

Τα αποτελέσματα για την απόσταση του άξονα της φλέβας στη θέση επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης είναι μικρότερη σε σχέση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων μελετών. Δεδομένου ότι η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του άξονα στην επιστροφή στο επίπεδο παροχέτευσης είναι εμπειρική, τα αποτελέσματα είναι ικανοποιητικά. Σε μελλοντικές μετρήσεις θα ήταν χρήσιμο να ληφθούν πιο αξιόπιστα δεδομένα σε σχέση με τον άξονα της φλέβας στο επίπεδο επιστροφής.

6.9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στις παραγράφους που προηγήθηκαν παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από ανάλυση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της πειραματικής έρευνας. Ελέγχθηκε η ορθότητα των σχέσεων που προέκυψαν από τη διαστατική ανάλυση (παρ. 2.3) και προσδιορίστηκαν οι ζητούμενες παράμετροι. Επίσης, τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα προηγούμενων μελετών, σε φλέβες αρνητικής άνωσης με διαφορά συγκέντρωσης. Οι τιμές των σταθερών κάθε σχέσης της διαστατικής ανάλυσης υπολογίστηκαν με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται συνοπτικά όλα τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Παράμετρος	Γωνία	
	45°	60°
$\frac{Z_c}{D \cdot F_o}$	1.20	1.50
$\frac{Z_{RMS}}{D \cdot F_o}$	1.40	1.68
$\frac{b_c}{D \cdot F_o}$	0.26	0.26
$\frac{X_z}{D \cdot F_o}$	1.76	1.41
$\frac{Z_f}{D \cdot F_o}$	1.72	2.03
$\frac{S_t}{F_o}$	0.44	0.41
$\frac{S_i}{F_o}$	1.51	1.63
$\frac{X_{ic}}{D \cdot F_o}$	2.84	2.05

Πίνακας 6.10: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εργασίας

7. Συμπεράσματα

Οι φλέβες αρνητικής άνωσης αποτελούν έναν κλάδο επιστημονικής έρευνας που ξεκίνησε να ερευνάται τη δεκαετία του 1960. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πειραματικές εργασίες που αφορούν κυρίως φλέβες θετικής άνωσης, αλλά και φλέβες αρνητικής άνωσης με διαφορά συγκέντρωσης αλατότητας μεταξύ υγρού φλέβας και αποδέκτη. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας επιχειρήθηκε μια πρώτη προσέγγιση και πειραματική έρευνα σε τυρβώδεις θερμαινόμενες φλέβες αρνητικής άνωσης εκτοξευόμενες υπό γωνία, σε ακίνητο και ομογενή αποδέκτη.

Από τη διαστατική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, προέκυψε πως όλες οι παράμετροι της τροχιάς της φλέβας (σε διαστάσεις μήκους), αδιαστατοποιημένες με τη διάμετρο του στομίου παροχέτευσης και τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude (F_o) παραμένουν σταθερές, ξεχωριστά για κάθε γωνία παροχέτευσης. Επίσης η αξονική αραίωση, διαιρούμενη με τον αρχικό πυκνομετρικό αριθμό Froude, παραμένει σταθερή, για κάθε γωνία παροχέτευσης.

Βασικός σκοπός της μελέτης ήταν η σύγκριση των θερμαινόμενων ανωστικών φλέβων με τις ανωστικές φλέβες που προέρχονται από διαφορά αλατότητας με τον αποδέκτη. Από τη σύγκριση που πραγματοποιήθηκε με αποτελέσματα προηγούμενων μελετών μπορούμε να καταλήξουμε σε ένα βασικό συμπέρασμα. Παρ' όλο που στις θερμαινόμενες φλέβες αρνητικής άνωσης δεν διατηρείται η αρχική άνωση, αυτό δεν φαίνεται να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ροής, σε σχέση με τις φλέβες αρνητικής άνωσης με διαφορά συγκέντρωσης. Σχεδόν σε όλες τις παραμέτρους της ροής, οι σταθερές που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη ήταν πολύ κοντά με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας. Η διαπίστωση αυτή, μπορεί να φανεί χρήσιμη σε μελλοντικούς σχεδιασμούς εγκαταστάσεων που χρησιμοποιούν θερμαινόμενες φλέβες, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα μελετών σε ανωστικές φλέβες με διαφορά συγκέντρωσης, τουλάχιστον για παροχέτευση 45° και 60° .

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Η κατακόρυφη κατανομή της διαφοράς θερμοκρασίας, στο μέγιστο βάθος καθόδου, από τον άξονα μέχρι το κάτω όριο της φλέβας, ακολουθεί με ικανοποιητική προσέγγιση την κανονική κατανομή.
- Η μέγιστη τιμή της κατανομής της έντασης της τύρβης ($T_{RMS}/\Delta T_{MC}$) είναι 0.38 για παροχέτευση 45° και 0.42 για παροχέτευση υπό γωνία 60° , τιμές που βρίσκονται πολύ κοντά με τα αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών.
- Η μέγιστη ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων δεν εμφανίζεται στο ίδιο βάθος που εμφανίζεται η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας αλλά παρουσιάζει εκκεντρότητα ως προς τον άξονα της φλέβας. Για γωνία παροχέτευσης 45° το

- σημείο της μέγιστης έντασης της τύρβης εμφανίζεται κατά μέσο όρο σε απόσταση $0.83b_c$ από τον άξονα της, ενώ για γωνία 60° σε απόσταση $0.77b_c$.
- Ο λόγος Z/DF_o παραμένει σταθερός για όλους τους πυκνομετρικούς αριθμούς Froude, τόσο στο στον άξονα της φλέβας όσο και στη θέση εμφάνισης της μέγιστης RMS τιμής, για κάθε γωνία παροχέτευσης. Οι σταθερές που προσδιορίστηκαν συμφωνούν με αυτές από προηγούμενες εργασίες.
 - Το πλάτος της κατακόρυφης κατανομής της διαφοράς θερμοκρασίας, αδιαστατοποιημένο με τον αρχικό αριθμό Froude και τη διάμετρο του στομίου εκροής, παραμένει σταθερό για κάθε γωνία παροχέτευσης. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με γωνία 60° το πλάτος παρουσιάζει σημαντική διακύμανση.
 - Η αδιάστατη οριζόντια θέση εμφάνισης του μεγίστου βάθους καθόδου παραμένει σταθερή, ξεχωριστά για κάθε γωνία παροχέτευσης, επαληθεύοντας τη διαστατική ανάλυση. Κατά τη σύγκριση με προηγούμενες μελέτες, για παροχέτευση υπό γωνία 45° η σταθερά που υπολογίστηκε συμπίπτει με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Στη γωνία παροχέτευσης 60° η σταθερά προκύπτει ελαφρώς μικρότερη.
 - Το κάτω όριο της φλέβας βρίσκεται σε απόσταση $2b_c$ από τον άξονα της φλέβας, στη θέση του μεγίστου βάθους καθόδου. Η διαπίστωση αυτή συμπίπτει με την αντίστοιχη των Oliver (2012) και Crowe (2013). Ο Παπακωνσταντής (2009) αποφαινεται πως το όριο της φλέβας (άνω όριο), καθώς η παροχέτευση πραγματοποιείται από τον πυθμένα) βρίσκεται πιο κοντά στον άξονα, σε απόσταση $1.5b_c$.
 - Η αξονική διάλυση, διαιρούμενη με τον αρχικό πυκνομετρικό Froude, σε ένα σημείο και για σταθερή γωνία παροχέτευσης, παραμένει σταθερή. Ελήφθησαν μετρήσεις στη θέση του μεγίστου βάθους καθόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης. Η αξονική αραίωση στη θέση επιστροφής είναι σαφώς μεγαλύτερη από αυτή στο μέγιστο βάθος καθόδου. Και για τις δύο γωνίες παροχέτευσης προέκυψαν περίπου ίσες τιμές αξονικής αραίωσης στο μέγιστο βάθος καθόδου. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε σύγκρουση με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας, όπου η αξονική αραίωση αυξάνεται με την αύξηση της γωνίας παροχέτευσης. Για το λόγο αυτό απαιτείται η πραγματοποίηση περισσότερων πειραμάτων.
 - Για την εκτίμηση του άξονα της φλέβας στη θέση επιστροφής στο επίπεδο παροχέτευσης, χρησιμοποιήθηκε μια προσεγγιστική μέθοδος, βασιζόμενη στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι αρκετά κοντά στα αντίστοιχα προηγούμενων μελετών.

Οι θερμαινόμενες φλέβες αρνητικής άνωσης παρουσιάζουν εξαιρετικό πειραματικό ενδιαφέρον και χρήζουν περαιτέρω μελέτης και έρευνας. Τα επόμενα χρόνια και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, και τη διεύρυνση της χρήσης των ανωστικών φλεβών το πρακτικό τους αντίκρυσμα θα γίνει ακόμα μεγαλύτερο. Η σύγκριση που επιχειρήθηκε με τις φλέβες αρνητικής άνωσης λόγω διαφοράς αλατότητας στο υγρό της φλέβας, έδωσε εξαιρετικά παραπλήσια αποτελέσματα. Ένα ερώτημα που τίθεται και χρήζει απάντησης είναι «Γιατί παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά, ενώ διαφέρουν στη σύσταση τους;». Κρίνεται σκόπιμο η έρευνα να επεκταθεί και σε διαφορετικές

γωνίες παροχέτευσης και να μελετηθούν λεπτομερώς και άλλα χαρακτηριστικά της ροής. Τέλος, θα ήταν σκόπιμο να πραγματοποιηθούν περισσότερες πειραματικές μετρήσεις, ειδικά για τη γωνία παροχέτευσης 60° , όπου ορισμένες σταθερές παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση και αποκλίσεις από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ελληνική Βιβλιογραφία

Νουτσόπουλος Γ. & Χριστοδούλου Γ. 1996. Μαθήματα μηχανικής των ρευστών για πολιτικούς μηχανικούς.

Παπακωνσταντής, Η. Γ. 2009. Τυρβώδεις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα.

Διεθνής Βιβλιογραφία

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

Cipollina, A., Bonfiglio, A., Micaele, G. & Brucato, A. 2004. Dense jet modelling applied to the design of dense effluent diffusers. *Desalination* 167,459-468

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

Crowe, T. A. 2013. Inclined Negatively Buoyant Jets and Boundary Interaction. Ph.D. thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberg, 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. Ph.D. thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

Kikkert, G. A., Davidson, M. J., & Nokes, R. I. 2007. Inclined Negatively Buoyant Discharges. *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)* 133(5), 545–554.

Lee, J. H. W., Cheung, V., Wang, W. P., & Cheung, S. K. B. 2000. Lagrangian modeling and visualization of rosette outfall plumes. In: Proceedings of the Hydroinformatics 2000, University of Iowa, July 2000.

- Lindberg, W. R. 1994. Experiments on negatively buoyant jets, with and 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 Academic Publishers.
- Morton, B. R., Taylor, G., & Turner, J. S. 1956. Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 234, 1–23.
- Oliver, C. J. 2012. Near field mixing of negatively buoyant jets. Ph.D. thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Pantokratoras, A. 1999. Vertical penetration of inclined heated water jets discharged downward. *Journal of Environmental Engineering*, 125(4), 389–393.
- Papakonstantis, I. G. & Christodoulou, G. C. 2008. Discussion of “Inclined Negatively Buoyant Discharges” by G. A. Kikkert, M. J. Davidson, and R. I. Nokes. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, December 2008, p. 1782-1784.
- Papakonstantis, I. G., Christodoulou, G. C., & Papanicolaou, P. N. 2011a. Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), 3–12.
- Papakonstantis, I. G., Christodoulou, G. C., & Papanicolaou, P. N. 2011b. Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *Journal of Hydraulic Research*, 49(1), 13–22
- Papanicolaou, P. N. & List, J. E. 1987. Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets. *Intl J. Heat Mass Transfer* 30, 2059-2071.
- Roberts, P. J. W., Ferrier, A., & Daviero, G. 1997. Mixing in inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* 123(8), 693–699.
- Streeter, V. L., Wyle, E. B., Bedford, K. W. 1998. *Fluid Mechanics*. 9th Edition, McGraw-Hill.
- Wright, S. 1984. Buoyant jets in density stratified cross-flow. *J. Hydraul. Div. ASCE* 110(5), 643-656.
- 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, U.S. Dept of the Interior, Washington, D.C., USA, p. 139.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μετρήσεις και τα βασικά χαρακτηριστικά όλων των πειραμάτων. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα για δύο γωνίες παροχέτευσης, 45° και 60° , σε δύο θέσεις του πεδίου ροής της φλέβας. Στη θέση του μεγίστου βάθους καθόδου και στη θέση επιστροφής της φλέβας στο επίπεδο παροχέτευσης.

Πείραμα: 16_3 EXP1					
Ημερομηνία	16/3/2016	F_o	25.66	ΔT_{Mc} (°C)	3.111
Θέση	Terminal	Ri_o	0.037	Z_c (cm)	17.9
Γωνία (°C)	45°	Re	21041	Z_{RMS} (cm)	22.9
D (cm)	0.57	l_M (cm)	13.77	X_z (cm)	29.6
A (cm ²)	0.26	l_Q (cm)	0.505	b_c (cm)	5.15
ΔT_o (°C)	39.74	Q_o (cm ³ /s)	18.23		
g'_o (cm/s ²)	13.60	M_o (cm ⁴ /s ²)	1301.9		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.014	B_o (cm ⁴ /s ³)	247.79		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
0.00	3.48	0.167	0.516	0.007	0.103
-0.85	3.31	0.177	0.462	0.004	0.091
-1.85	3.12	0.185	0.459	-0.014	0.097
-2.90	2.92	0.189	0.614	-0.030	0.119
-3.90	2.72	0.208	0.633	-0.005	0.136
-4.85	2.54	0.216	0.608	-0.001	0.140
-5.90	2.33	0.237	0.638	0.003	0.141
-6.85	2.15	0.234	0.642	-0.007	0.139
-5.00	2.51	0.298	0.620	0.115	0.123
-5.85	2.34	0.303	0.665	0.105	0.120
-6.85	2.15	0.350	0.717	0.084	0.143
-7.90	1.94	0.392	0.835	0.100	0.155
-8.90	1.75	0.388	0.829	0.116	0.167
-9.85	1.56	0.396	0.971	0.107	0.176
-10.90	1.36	0.456	1.036	0.081	0.195
-11.85	1.18	0.500	1.212	0.089	0.195
-10.00	1.54	0.497	1.094	0.184	0.173
-10.85	1.37	0.538	1.163	0.155	0.189
-11.85	1.18	0.547	1.086	0.169	0.191
-12.90	0.97	0.639	1.255	0.135	0.197
-13.90	0.78	0.678	1.229	0.159	0.205
-14.85	0.59	0.737	1.384	0.157	0.213
-15.90	0.39	0.843	1.313	0.186	0.188
-16.85	0.20	0.898	1.420	0.236	0.197
-15.00	0.56	0.869	1.459	0.263	0.207
-15.85	0.40	0.929	1.500	0.318	0.204
-16.85	0.20	0.981	1.682	0.380	0.201
-17.90	0.00	1.000	1.553	0.260	0.223
-18.90	-0.19	0.981	1.504	0.256	0.232
-19.85	-0.38	0.916	1.636	0.128	0.277
-20.90	-0.58	0.771	1.539	0.023	0.313
-21.85	-0.77	0.527	1.420	-0.001	0.342
-20.00	-0.41	0.934	1.146	1.021	0.319
-20.85	-0.57	0.848	1.280	1.233	0.351
-21.85	-0.77	0.707	0.427	0.396	0.370
-22.90	-0.97	0.538	0.717	0.651	0.380
-23.90	-1.17	0.374	0.488	0.436	0.344
-24.85	-1.35	0.291	0.186	0.164	0.320
-25.90	-1.55	0.101	0.042	0.029	0.169
-26.85	-1.74	0.044	0.024	0.018	0.064

Πείραμα: 16_3 EXP2					
Ημερομηνία	16/3/2016	F_o	25.73	ΔT_{Mc} (°C)	3.464
Θέση	Terminal	Ri_o	0.037	Z_c (cm)	17.9
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	21041	Z_{RMS} (cm)	21.85
D (cm)	0.57	l_M (cm)	13.808	X_Z (cm)	29.6
A (cm²)	0.256	l_Q (cm)	0.505	b_c (cm)	4.95
ΔT_o (°C)	39.28	Q_o (cm³/s)	18.23		
g'_o (cm/s²)	13.519	M_o (cm⁴/s²)	1301.93		
Δρ/ρ_o	0.014	B_o (cm⁴/s³)	246.404		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
0	3.62	0.132	0.256	0.090	0.024
-0.85	3.45	0.137	0.314	0.075	0.027
-1.85	3.24	0.138	0.247	0.053	0.030
-2.9	3.03	0.134	0.321	0.013	0.030
-3.9	2.83	0.152	0.360	0.082	0.054
-4.85	2.64	0.164	0.362	0.074	0.060
-5.9	2.43	0.163	0.381	0.065	0.060
-6.85	2.23	0.180	0.560	0.038	0.103
-5	2.61	0.254	0.666	0.227	0.106
-5.85	2.44	0.268	0.527	0.168	0.105
-6.85	2.23	0.300	0.589	0.150	0.135
-7.9	2.02	0.308	0.680	0.120	0.137
-8.9	1.82	0.320	0.610	0.103	0.134
-9.85	1.63	0.363	0.787	0.123	0.154
-10.9	1.41	0.415	0.720	0.133	0.146
-11.85	1.22	0.462	0.769	0.124	0.156
-10	1.60	0.462	0.954	0.156	0.164
-10.85	1.43	0.466	0.975	0.131	0.177
-11.85	1.22	0.518	1.057	0.123	0.193
-12.9	1.01	0.570	1.130	0.100	0.190
-13.9	0.81	0.595	1.217	0.131	0.207
-14.85	0.62	0.687	1.243	0.189	0.211
-15.9	0.40	0.782	1.247	0.126	0.203
-16.85	0.21	0.827	1.451	0.131	0.212
-15	0.59	0.840	1.347	0.308	0.155
-15.85	0.41	0.874	1.485	0.331	0.183
-16.85	0.21	0.936	1.447	0.356	0.182
-17.9	0.00	1.000	1.550	0.298	0.183
-18.9	-0.20	0.973	1.458	0.182	0.221
-19.85	-0.39	0.894	1.550	0.305	0.239
-20.9	-0.61	0.664	1.370	0.025	0.283
-21.85	-0.80	0.468	1.440	0.006	0.330
-20	-0.42	0.902	1.469	0.163	0.249
-20.85	-0.60	0.789	1.413	0.145	0.280
-21.85	-0.80	0.587	1.469	0.053	0.303
-22.9	-1.01	0.411	1.141	0.006	0.265
-23.9	-1.21	0.282	1.250	0.035	0.256
-24.85	-1.40	0.208	1.034	-0.013	0.218
-25.9	-1.62	0.104	0.952	-0.013	0.177
-26.85	-1.81	0.029	0.393	-0.038	0.030

Πείραμα: 18_3 EXP1					
Ημερομηνία	18/3/2016	F_o	21.97	ΔT_{Mc} (°C)	3.132
Θέση	Terminal	Ri_o	0.043	Z_c (cm)	15.45
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	17796	Z_{RMS} (cm)	18.45
D (cm)	0.57	l_M (cm)	11.789	X_z (cm)	19.8
A (cm ²)	0.256	l_Q (cm)	0.505	b_c (cm)	3.77
ΔT_o (°C)	39.67	Q_o (cm ³ /s)	15.57		
g'_o (cm/s ²)	13.536	M_o (cm ⁴ /s ²)	950.263		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.014	B_o (cm ⁴ /s ³)	210.776		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
-1.6	3.67	0.108	0.403	-0.021	0.098
-2.45	3.45	0.116	0.487	-0.021	0.091
-3.45	3.18	0.129	0.592	-0.015	0.094
-4.5	2.90	0.152	0.620	-0.051	0.128
-5.5	2.64	0.179	0.595	-0.020	0.136
-6.45	2.39	0.245	0.652	-0.005	0.138
-7.5	2.11	0.263	0.694	-0.010	0.160
-8.45	1.86	0.290	0.799	-0.028	0.174
-7.6	2.08	0.410	1.005	0.058	0.188
-8.45	1.86	0.397	0.870	0.056	0.178
-9.45	1.59	0.446	0.979	0.073	0.204
-10.5	1.31	0.541	1.300	0.040	0.241
-11.5	1.05	0.601	1.324	0.036	0.230
-12.45	0.80	0.664	1.395	0.026	0.274
-13.5	0.52	0.756	1.351	0.033	0.257
-14.45	0.27	0.831	1.637	0.051	0.255
-13.6	0.49	0.892	1.804	0.122	0.275
-14.45	0.27	0.984	1.650	0.110	0.249
-15.45	0.00	1.000	1.573	0.182	0.239
-16.5	-0.28	0.953	1.803	-0.022	0.320
-17.5	-0.54	0.771	1.692	-0.008	0.353
-18.45	-0.80	0.516	1.569	-0.024	0.380
-19.5	-1.07	0.334	1.540	-0.022	0.360
-20.45	-1.33	0.101	1.159	-0.051	0.216
-19.1	-0.97	0.455	1.646	-0.021	0.370
-19.95	-1.19	0.319	1.728	-0.015	0.355
-20.95	-1.46	0.142	1.110	-0.032	0.230
-22	-1.74	0.050	0.860	-0.046	0.146
-23	-2.00	0.016	0.144	-0.026	0.028
-23.95	-2.25	0.009	0.039	-0.024	0.009
-25	-2.53	0.009	0.046	-0.016	0.009
-25.95	-2.79	0.008	0.051	-0.033	0.011

Πείραμα: 21_3 EXP1					
Ημερομηνία	21/3/2016	F_o	14.78	ΔT_{Mc} (°C)	3.898
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0637	Z_c (cm)	9.98
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	10910	Z_{RMS} (cm)	11.5
D (cm)	0.57	l_M (cm)	7.932	X_z (cm)	
A (cm ²)	0.256	l_q (cm)	0.5051	b_c (cm)	2.76
ΔT_o (°C)	38.383	Q_o (cm ³ /s)	10.2619		
g'_o (cm/s ²)	12.985	M_o (cm ⁴ /s ²)	412.682		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.013	B_o (cm ⁴ /s ³)	133.246		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
0	3.62	0.137	0.667	-0.019	0.129
-0.85	3.31	0.168	0.731	-0.022	0.155
-1.85	2.95	0.233	0.864	-0.023	0.192
-2.9	2.56	0.278	0.973	-0.035	0.228
-3.9	2.20	0.293	1.010	-0.018	0.232
-4.85	1.86	0.342	1.080	-0.014	0.255
-5.9	1.48	0.487	1.263	-0.017	0.269
-6.85	1.13	0.625	1.564	-0.017	0.287
-5.6	1.59	0.445	1.224	-0.009	0.256
-6.45	1.28	0.532	1.264	0.000	0.272
-7.45	0.92	0.720	1.476	0.037	0.267
-8.5	0.53	0.841	1.645	0.033	0.268
-9.5	0.17	0.971	1.968	0.003	0.308
-10.45	-0.17	0.980	1.865	0.002	0.348
-11.5	-0.55	0.785	1.675	-0.011	0.411
-12.45	-0.90	0.405	1.468	-0.027	0.383
-11.1	-0.41	0.692	1.723	-0.004	0.360
-11.95	-0.72	0.447	1.764	-0.022	0.379
-12.95	-1.08	0.304	1.288	-0.023	0.342
-14	-1.46	0.066	0.955	-0.041	0.158
-15	-1.82	0.035	0.640	-0.018	0.097
-15.95	-2.17	0.012	0.041	-0.019	0.008
-17	-2.55	0.012	0.047	-0.017	0.008
-17.95	-2.89	0.012	0.057	-0.032	0.011

Πείραμα: 21_3 EXP2					
Ημερομηνία	21/3/2016	F_o	18.377	ΔT_{Mc} (°C)	2.571
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0512	Z_c (cm)	12.45
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	6349	Z_{RMS} (cm)	15.95
D (cm)	0.57	l_M (cm)	9.8611	X_Z (cm)	
A (cm²)	0.256	l_Q (cm)	0.505	b_c (cm)	3.12
ΔT_o (°C)	28.110	Q_o (cm³/s)	10.262		
g'_o (cm/s²)	8.401	M_o (cm⁴/s²)	412.68		
Δρ/ρ_o	0.009	B_o (cm⁴/s³)	86.214		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
0	3.99	0.163	0.579	-0.027	0.111
-0.85	3.72	0.185	0.768	-0.028	0.124
-1.85	3.39	0.194	0.703	-0.035	0.138
-2.9	3.06	0.220	0.666	-0.058	0.151
-3.9	2.74	0.226	0.803	-0.035	0.169
-4.85	2.43	0.279	1.177	-0.025	0.209
-5.9	2.10	0.340	1.110	-0.021	0.207
-6.85	1.79	0.371	1.117	-0.026	0.211
-5.6	2.19	0.389	1.244	-0.002	0.217
-6.45	1.92	0.401	1.117	-0.002	0.218
-7.45	1.60	0.455	1.291	-0.003	0.239
-8.5	1.27	0.558	1.567	-0.041	0.262
-9.5	0.94	0.723	1.425	0.017	0.252
-10.45	0.64	0.805	1.654	0.010	0.281
-11.5	0.30	0.940	1.547	0.136	0.242
-12.45	0.00	1.000	1.639	0.033	0.264
-11.1	0.43	0.895	1.667	0.109	0.280
-11.95	0.16	0.918	1.589	-0.028	0.271
-12.95	-0.16	0.904	1.715	-0.020	0.305
-14	-0.50	0.832	1.730	-0.066	0.337
-15	-0.82	0.600	1.468	-0.077	0.331
-15.95	-1.12	0.385	1.330	-0.059	0.339
-17	-1.46	0.112	1.505	-0.063	0.249

Πείραμα: 22_3 EXP1					
Ημερομηνία	22/3/2016	F_o	18.534	ΔT_{Mc} (°C)	2.62
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0508	Z_c (cm)	12.45
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	6209	Z_{RMS} (cm)	14
D (cm)	0.57	l_M (cm)	9.945	X_Z (cm)	
A (cm²)	0.256	l_Q (cm)	0.5051	b_c (cm)	3.14
ΔT_o (°C)	28.018	Q_o (cm³/s)	10.2619		
g'_o (cm/s²)	8.26	M_o (cm⁴/s²)	412.682		
Δρ/ρ_o	0.008	B_o (cm⁴/s³)	84.7642		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
0	3.97	0.219	0.587	0.021	0.133
-0.85	3.69	0.242	0.640	0.011	0.141
-1.85	3.38	0.270	0.990	0.010	0.161
-2.9	3.04	0.314	0.964	-0.022	0.187
-3.9	2.72	0.332	1.103	0.025	0.207
-4.85	2.42	0.375	1.088	0.023	0.217
-5.9	2.09	0.462	1.177	0.034	0.254
-6.85	1.78	0.569	1.383	0.011	0.274
-5.6	2.18	0.394	0.984	0.043	0.209
-6.45	1.91	0.451	1.063	0.043	0.205
-7.45	1.59	0.520	1.261	0.031	0.221
-8.5	1.26	0.605	1.313	0.047	0.253
-9.5	0.94	0.714	1.444	0.089	0.224
-10.45	0.64	0.802	1.501	0.072	0.241
-11.5	0.30	0.892	1.490	0.065	0.229
-12.45	0.00	0.921	1.655	0.034	0.246
-11.1	0.43	0.905	1.634	0.121	0.264
-11.95	0.16	0.979	1.918	0.084	0.270
-12.95	-0.16	0.969	1.701	0.068	0.295
-14	-0.49	0.845	1.858	0.008	0.346
-15	-0.81	0.632	1.541	0.025	0.326
-15.95	-1.11	0.385	1.446	0.008	0.341
-17	-1.45	0.109	1.102	0.011	0.181
-17.95	-1.75	0.052	0.476	-0.011	0.054

Πείραμα: 22_3 EXP2					
Ημερομηνία	22/3/2016	F_o	18.12	ΔT_{Mc} (°C)	2.726
Θέση	Terminal	Ri_o	0.052	Z_c (cm)	12.95
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	6504	Z_{RMS} (cm)	15.95
D (cm)	0.57	l_M (cm)	9.7223	X_Z (cm)	
A (cm²)	0.256	l_Q (cm)	0.5051	b_c (cm)	2.19
ΔT_o (°C)	28.755	Q_o (cm³/s)	10.2619		
g'_o (cm/s²)	8.64	M_o (cm⁴/s²)	412.682		
Δρ/ρ_o	0.009	B_o (cm⁴/s³)	88.6918		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
0	5.92	0.190	0.588	-0.006	0.150
-0.85	5.53	0.209	0.612	-0.006	0.154
-1.85	5.08	0.193	0.617	-0.016	0.155
-2.9	4.60	0.227	0.755	-0.036	0.162
-3.9	4.14	0.257	0.787	-0.015	0.189
-4.85	3.70	0.298	0.851	-0.002	0.186
-5.9	3.22	0.322	0.827	-0.011	0.187
-6.85	2.79	0.339	0.979	-0.021	0.219
-5.6	3.36	0.330	0.978	0.025	0.183
-6.45	2.97	0.382	0.960	0.019	0.195
-7.45	2.52	0.430	1.039	0.014	0.217
-8.5	2.04	0.563	1.432	0.027	0.265
-9.5	1.58	0.610	1.707	0.041	0.269
-10.45	1.14	0.727	1.772	0.039	0.286
-11.5	0.66	0.864	1.651	0.036	0.269
-12.45	0.23	0.968	1.693	0.065	0.251
-11.1	0.85	0.927	1.655	0.056	0.266
-11.95	0.46	0.948	1.793	0.077	0.274
-12.95	0.00	1.000	1.814	0.066	0.306
-14	-0.48	0.886	1.782	0.011	0.322
-15	-0.94	0.614	1.536	-0.007	0.332
-15.95	-1.37	0.388	1.279	-0.026	0.350
-17	-1.85	0.087	1.026	-0.019	0.184
-17.95	-2.29	0.005	0.073	-0.043	0.014

Πείραμα: 24_3 EXP2					
Ημερομηνία	24/3/2016	F_o	25.71	ΔT_{Mc} (°C)	3.018
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0366	Z_c (cm)	19.38
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	21041	Z_{RMS} (cm)	22.9
D (cm)	0.57	l_M (cm)	13.797	X_Z (cm)	
A (cm²)	0.256	l_Q (cm)	0.5051	b_c (cm)	5.03
ΔT_o (°C)	39.396	Q_o (cm³/s)	18.2269		
g'_o (cm/s²)	13.538	M_o (cm⁴/s²)	1301.93		
Δρ/ρ_o	0.014	B_o (cm⁴/s³)	246.763		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-2	3.46	0.215	0.498	0.076	0.104
-2.85	3.29	0.229	0.534	0.040	0.110
-3.85	3.09	0.237	0.498	0.054	0.102
-4.9	2.88	0.247	0.664	0.053	0.116
-5.9	2.68	0.268	0.588	0.050	0.119
-6.85	2.49	0.275	0.748	0.058	0.130
-7.9	2.28	0.304	0.689	0.031	0.137
-8.85	2.09	0.332	0.763	0.053	0.158
-8	2.26	0.367	0.784	0.142	0.130
-8.85	2.09	0.361	0.706	0.141	0.120
-9.85	1.89	0.371	0.810	0.133	0.142
-10.9	1.69	0.416	0.917	0.099	0.167
-11.9	1.49	0.468	0.979	0.134	0.164
-12.85	1.30	0.479	0.889	0.096	0.179
-13.9	1.09	0.538	1.087	0.113	0.182
-14.85	0.90	0.579	1.169	0.097	0.194
-14	1.07	0.693	1.354	0.267	0.187
-14.85	0.90	0.714	1.293	0.206	0.208
-15.85	0.70	0.766	1.426	0.232	0.205
-16.9	0.49	0.850	1.336	0.267	0.191
-17.9	0.29	0.901	1.501	0.191	0.200
-18.85	0.10	0.999	1.521	0.119	0.191
-19.9	-0.10	0.999	1.509	0.299	0.197
-20.85	-0.29	0.929	1.613	0.053	0.253
-20	-0.12	0.989	1.661	0.127	0.284
-20.85	-0.29	0.905	1.675	0.093	0.317
-21.85	-0.49	0.798	1.671	0.062	0.319
-22.9	-0.70	0.588	1.448	0.039	0.346
-23.9	-0.90	0.363	1.249	0.042	0.290
-24.85	-1.09	0.299	1.229	0.050	0.297
-25.9	-1.30	0.174	1.120	0.039	0.226
-26.85	-1.49	0.127	1.077	0.017	0.184

Πείραμα: 5_4 EXP1					
Ημερομηνία	5/4/2016	F_o	26.13	ΔT_{Mc} (°C)	2.90
Θέση	Terminal	Ri_o	0.036	Z_c (cm)	20
Γωνία (°C)	45°	Re	20697	Z_{RMS} (cm)	23.95
D (cm)	0.57	I_M (cm)	14.02	X_Z (cm)	33.5
A (cm²)	0.256	I_Q (cm)	0.51	b_c (cm)	4.31
ΔT_o (°C)	37.4	Q_o (cm³/s)	18.23		
g'_o (cm/s²)	13.12	M_o (cm⁴/s²)	239.037		
Δρ/ρ_o	0.013	B_o (cm⁴/s³)	1301.93		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
0	4.519	0.157	0.496	0.006	0.089
-0.85	4.322	0.153	0.424	0.007	0.093
-1.85	4.091	0.164	0.539	-0.007	0.106
-2.9	3.847	0.157	0.575	-0.035	0.120
-3.9	3.616	0.174	0.575	0.009	0.120
-4.85	3.395	0.201	0.776	0.012	0.155
-5.9	3.152	0.219	0.750	0.024	0.158
-6.85	2.932	0.262	0.760	0.006	0.148
-5.6	3.222	0.305	0.707	0.055	0.146
-6.45	3.025	0.299	0.844	0.038	0.162
-7.45	2.793	0.330	0.898	0.042	0.162
-8.5	2.549	0.366	0.972	0.035	0.179
-9.5	2.318	0.383	0.842	0.072	0.169
-10.45	2.097	0.448	0.922	0.075	0.156
-11.5	1.854	0.468	1.103	0.075	0.195
-12.45	1.634	0.480	1.113	0.076	0.206
-11.1	1.947	0.518	1.248	0.126	0.187
-11.95	1.750	0.571	1.051	0.114	0.180
-12.95	1.518	0.604	1.129	0.141	0.184
-14	1.275	0.696	1.334	0.162	0.196
-15	1.043	0.756	1.299	0.158	0.192
-15.95	0.823	0.801	1.498	0.140	0.206
-17	0.579	0.829	1.471	0.180	0.216
-17.95	0.359	0.917	1.480	0.138	0.194
-17.1	0.556	0.879	1.442	0.106	0.212
-17.95	0.359	0.940	1.522	0.202	0.205
-18.95	0.127	0.968	1.525	0.131	0.222
-20	-0.116	1.000	1.554	0.025	0.245
-21	-0.348	0.955	1.550	0.051	0.264
-21.95	-0.568	0.883	1.559	-0.029	0.306
-23	-0.811	0.716	1.574	-0.056	0.327
-23.95	-1.031	0.520	1.379	-0.121	0.345
-22.1	-0.603	0.713	1.585	-0.062	0.345
-22.95	-0.800	0.591	1.583	-0.056	0.359
-23.95	-1.031	0.457	1.303	-0.063	0.366
-25	-1.275	0.206	1.191	-0.095	0.311
-26	-1.506	0.122	1.184	-0.072	0.270
-26.95	-1.727	0.055	1.289	-0.070	0.208
-28	-1.970	0.024	0.814	-0.085	0.156
-28.95	-2.190	-0.034	0.046	-0.111	0.021

Πείραμα: 25_4 EXP1					
Ημερομηνία	25/4/2016	F_o	38.16	ΔT_{Mc} (°C)	2.136
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0247	Z_c (cm)	18
Γωνία (°C)	45°	Re	15468	Z_{RMS} (cm)	21.9
D (cm)	0.44	l_M (cm)	15.806	X_z (cm)	27.4
A (cm ²)	0.152	l_Q (cm)	0.3899	b_c (cm)	4.28
ΔT_o (°C)	32.561	Q_o (cm ³ /s)	12.9169		
g'_o (cm/s ²)	1.264	M_o (cm ⁴ /s ²)	1097.29		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.064	B_o (cm ⁴ /s ³)	145.49		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
0	4.20	0.106	0.387	-0.071	0.072
-0.85	4.00	0.105	0.496	-0.072	0.085
-1.85	3.77	0.120	0.437	-0.066	0.097
-2.9	3.53	0.132	0.440	-0.074	0.100
-3.9	3.29	0.152	0.568	-0.080	0.119
-4.85	3.07	0.165	0.644	-0.054	0.134
-5.9	2.82	0.168	0.594	-0.044	0.128
-6.85	2.60	0.170	0.642	-0.079	0.135
-6	2.80	0.252	0.739	0.025	0.134
-6.85	2.60	0.259	0.743	0.014	0.133
-7.85	2.37	0.320	0.768	0.012	0.151
-8.9	2.12	0.365	0.905	-0.009	0.172
-9.9	1.89	0.427	0.989	0.003	0.192
-10.85	1.67	0.440	1.075	0.066	0.215
-11.9	1.42	0.480	0.987	0.072	0.189
-12.85	1.20	0.518	1.096	0.019	0.226
-12	1.40	0.461	1.127	0.056	0.230
-12.85	1.20	0.503	1.245	0.064	0.249
-13.85	0.97	0.578	1.213	0.043	0.260
-14.9	0.72	0.661	1.487	0.058	0.278
-15.9	0.49	0.769	1.478	0.071	0.279
-16.85	0.27	0.856	1.512	0.031	0.278
-17.9	0.02	0.957	1.737	0.072	0.277
-18.85	-0.20	0.952	1.706	-0.030	0.293
-18	0.00	1.000	1.844	0.089	0.275
-18.85	-0.20	0.976	1.716	0.082	0.301
-19.85	-0.43	0.959	1.704	-0.019	0.305
-20.9	-0.68	0.813	1.570	-0.058	0.326
-21.9	-0.91	0.568	1.478	-0.063	0.369
-22.85	-1.13	0.369	1.427	-0.088	0.343
-23.9	-1.38	0.175	1.243	-0.092	0.277
-24.85	-1.60	0.074	1.018	-0.111	0.203

Πείραμα: 25_4 EXP2					
Ημερομηνία	25/4/2016	F_o	46.234	ΔT_{Mc} (°C)	1.952
Θέση	Terminal	Ri_o	0.02036	Z_c (cm)	24
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	18648	Z_{RMS} (cm)	26.9
D (cm)	0.44	l_M (cm)	19.151	X_Z (cm)	33
A (cm²)	0.152	l_Q (cm)	0.3899	b_c (cm)	6.14
ΔT_o (°C)	32.012	Q_o (cm³/s)	15.5719		
g'_o (cm/s²)	11.151	M_o (cm⁴/s²)	1594.73		
Δρ/ρ_o	0.011	B_o (cm⁴/s³)	173.643		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-6	2.93	0.170	0.559	-0.065	0.123
-6.85	2.79	0.164	0.752	-0.071	0.120
-7.85	2.63	0.150	0.846	-0.122	0.141
-8.9	2.46	0.180	0.812	-0.110	0.148
-9.9	2.30	0.198	0.729	-0.098	0.156
-10.85	2.14	0.218	0.801	-0.082	0.168
-11.9	1.97	0.274	0.877	-0.062	0.182
-12.85	1.82	0.322	0.936	-0.118	0.195
-12	1.96	0.331	0.944	0.027	0.196
-12.85	1.82	0.415	1.020	0.047	0.205
-13.85	1.65	0.465	1.052	0.020	0.204
-14.9	1.48	0.523	1.008	0.041	0.168
-15.9	1.32	0.540	1.214	0.075	0.206
-16.85	1.17	0.619	1.113	0.053	0.218
-17.9	0.99	0.674	1.293	0.128	0.200
-18.85	0.84	0.732	1.376	0.125	0.220
-18	0.98	0.599	1.437	0.063	0.249
-18.85	0.84	0.671	1.603	0.086	0.249
-19.85	0.68	0.699	1.393	0.056	0.275
-20.9	0.51	0.851	1.457	0.041	0.254
-21.9	0.34	0.915	1.657	0.094	0.234
-22.85	0.19	0.933	1.533	0.132	0.238
-23.9	0.02	0.964	1.475	0.205	0.217
-24.85	-0.14	0.951	1.445	0.163	0.229
-24	0.00	1.000	1.682	0.155	0.283
-24.85	-0.14	0.917	1.556	0.086	0.301
-25.85	-0.30	0.862	1.590	0.129	0.278
-26.9	-0.47	0.711	1.573	0.061	0.347
-27.9	-0.64	0.599	1.421	-0.003	0.330
-28.85	-0.79	0.517	1.344	0.053	0.313
-29.9	-0.96	0.457	1.226	0.013	0.316
-30.85	-1.12	0.259	1.221	-0.044	0.255

Πείραμα: 11_5 EXP1					
Ημερομηνία	11/5/2016	F_o	34.35	ΔT_{Mc} (°C)	1.830
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0274	Z_c (cm)	16.45
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	9288	Z_{RMS} (cm)	21.1
D (cm)	0.44	l_M (cm)	14.227	X_Z (cm)	25.9
A (cm²)	0.152	l_α (cm)	0.3899	b_c (cm)	4.64
ΔT_o (°C)	26.767	Q_o (cm³/s)	10.2619		
g'_o (cm/s²)	8.775	M_o (cm⁴/s²)	692.565		
Δρ/ρ_o	0.009	B_o (cm⁴/s³)	90.0496		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-3.1	2.88	0.156	0.547	-0.020	0.095
-3.95	2.70	0.134	0.479	-0.060	0.082
-4.95	2.48	0.114	0.577	-0.043	0.091
-6	2.25	0.119	0.773	-0.083	0.120
-7	2.04	0.151	0.729	-0.049	0.136
-7.95	1.83	0.196	0.667	-0.052	0.165
-9	1.61	0.256	0.873	-0.044	0.211
-9.95	1.40	0.370	1.048	-0.067	0.217
-9.1	1.58	0.393	1.046	0.039	0.222
-9.95	1.40	0.455	1.132	-0.020	0.251
-10.95	1.19	0.558	1.140	0.034	0.236
-12	0.96	0.645	1.238	0.040	0.229
-13	0.74	0.713	1.343	0.033	0.235
-13.95	0.54	0.793	1.484	0.031	0.264
-15	0.31	0.906	1.506	0.179	0.248
-15.95	0.11	0.947	1.571	0.114	0.251
-15.1	0.29	0.964	1.717	-0.020	0.288
-15.95	0.11	0.998	1.683	-0.020	0.307
-16.95	-0.11	0.994	1.788	-0.023	0.310
-18	-0.33	0.933	1.905	-0.083	0.344
-19	-0.55	0.708	1.665	-0.069	0.406
-19.95	-0.75	0.542	1.712	-0.073	0.392
-21	-0.98	0.322	1.243	-0.085	0.339
-21.95	-1.19	0.154	1.071	-0.126	0.272
-21.1	-1.00	0.458	1.670	-0.058	0.415
-21.95	-1.19	0.355	1.530	-0.060	0.339
-22.95	-1.40	0.223	1.185	-0.081	0.287
-24	-1.63	0.055	0.818	-0.122	0.133
-25	-1.84	0.031	0.504	-0.111	0.082
-25.95	-2.05	0.022	0.244	-0.073	0.037
-27	-2.27	0.022	0.241	-0.085	0.039
-27.95	-2.48	0.015	0.154	-0.107	0.035

Πείραμα: 12_5 EXP1					
Ημερομηνία	12/5/2016	F_o	38.31	ΔT_{Mc} (°C)	2.333
Θέση	Terminal	Ri_o	0.025	Z_c (cm)	21.21
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	15543	Z_{RMS} (cm)	24
D (cm)	0.44	l_M (cm)	15.88	X_Z (cm)	27.8
A (cm²)	0.152	l_α (cm)	0.390	b_c (cm)	3.31
ΔT_o (°C)	32.033	Q_o (cm³/s)	12.92		
g'_o (cm/s²)	11.177	M_o (cm⁴/s²)	1097.29		
Δρ/ρ_o	0.011	B_o (cm⁴/s³)	144.369		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-3.1	5.43	0.134	0.584	-0.035	0.110
-3.95	5.18	0.139	0.649	-0.055	0.109
-4.95	4.87	0.131	0.659	-0.072	0.119
-6	4.56	0.139	0.534	-0.074	0.111
-7	4.25	0.146	0.574	-0.045	0.105
-7.95	3.97	0.153	0.579	-0.013	0.112
-9	3.65	0.170	0.523	-0.029	0.129
-9.95	3.36	0.171	0.755	-0.065	0.144
-9.1	3.62	0.238	0.655	-0.003	0.141
-9.95	3.36	0.290	1.083	-0.039	0.208
-10.95	3.06	0.313	0.947	-0.041	0.224
-12	2.75	0.382	1.008	-0.040	0.251
-13	2.44	0.467	1.237	-0.062	0.267
-13.95	2.16	0.512	1.149	-0.030	0.265
-15	1.84	0.617	1.146	-0.029	0.239
-15.95	1.55	0.707	1.458	0.017	0.246
-15.1	1.81	0.614	1.248	0.126	0.244
-15.95	1.55	0.729	1.437	0.134	0.235
-16.95	1.25	0.810	1.421	0.103	0.230
-18	0.94	0.849	1.409	0.060	0.263
-19	0.63	0.944	1.611	0.091	0.264
-19.95	0.35	0.972	1.787	0.039	0.275
-21	0.03	0.897	1.530	-0.029	0.317
-21.95	-0.26	0.809	1.771	-0.082	0.352
-21.1	0.00	1.000	1.704	0.044	0.313
-21.95	-0.26	0.897	1.674	0.013	0.336
-22.95	-0.56	0.709	1.679	-0.072	0.361
-24	-0.88	0.497	1.617	-0.106	0.401
-25	-1.18	0.242	1.442	-0.079	0.315
-25.95	-1.46	0.118	1.211	-0.064	0.253
-27	-1.78	0.058	1.009	-0.062	0.172
-27.95	-2.07	0.011	0.116	-0.114	0.029

Πείραμα: 12_5 EXP2					
Ημερομηνία	12/5/2016	F_o	38.591	ΔT_{Mc} (°C)	1.961
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0244	Z_c (cm)	21.1
Γωνία (°C)	45°	Re	15403	Z_{RMS} (cm)	24
D (cm)	0.44	l_M (cm)	15.985	X_z (cm)	29.6
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899	b_c (cm)	3.35
ΔT_o (°C)	31.441	Q_o (cm ³ /s)	12.9169		
g'_o (cm/s ²)	11.013	M_o (cm ⁴ /s ²)	1097.29		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.011	B_o (cm ⁴ /s ³)	142.249		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
-3.1	5.38	0.163	0.513	0.003	0.087
-3.95	5.12	0.196	0.688	0.027	0.105
-4.95	4.82	0.218	0.572	0.008	0.094
-6	4.51	0.206	0.620	-0.055	0.102
-7	4.21	0.263	0.729	0.016	0.135
-7.95	3.93	0.236	0.672	-0.005	0.138
-9	3.61	0.216	0.663	-0.011	0.135
-9.95	3.33	0.214	0.852	-0.070	0.167
-9.1	3.58	0.172	0.780	0.022	0.098
-9.95	3.33	0.214	0.822	0.007	0.125
-10.95	3.03	0.248	0.987	-0.010	0.150
-12	2.72	0.281	0.949	-0.017	0.182
-13	2.42	0.328	1.044	-0.005	0.222
-13.95	2.14	0.380	1.011	-0.005	0.230
-15	1.82	0.471	1.170	-0.011	0.237
-15.95	1.54	0.524	1.209	-0.032	0.214
-15.1	1.79	0.551	1.254	0.061	0.259
-15.95	1.54	0.645	1.580	0.047	0.282
-16.95	1.24	0.729	1.534	0.065	0.313
-18	0.93	0.816	1.550	0.023	0.311
-19	0.63	0.864	1.732	0.016	0.335
-19.95	0.34	0.911	1.707	0.035	0.343
-21	0.03	0.889	1.706	-0.030	0.354
-21.95	-0.25	0.803	1.844	-0.070	0.394
-21.1	0.00	1.000	1.848	-0.015	0.400
-21.95	-0.25	0.912	1.779	-0.054	0.417
-22.95	-0.55	0.849	1.810	-0.048	0.417
-24	-0.87	0.620	1.766	-0.095	0.457
-25	-1.16	0.480	1.537	-0.084	0.384
-25.95	-1.45	0.271	1.582	-0.085	0.367
-27	-1.76	0.119	1.469	-0.069	0.257
-27.95	-2.05	0.011	0.679	-0.109	0.090

Πείραμα: 12_5 EXP3					
Ημερομηνία	12/5/2016	F_o	39.519	ΔT_{Mc} (°C)	1.725
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0238	Z_c (cm)	20.48
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	14629	Z_{RMS} (cm)	21.95
D (cm)	0.44	l_M (cm)	16.369	X_Z (cm)	29.6
A (cm²)	0.152	l_α (cm)	0.3899	b_c (cm)	2.95
ΔT_o (°C)	30.107	Q_o (cm³/s)	12.9169		
g'_o (cm/s²)	0.011	M_o (cm⁴/s²)	1097.29		
Δρ/ρ_o	10.502	B_o (cm⁴/s³)	135.65		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-3.1	5.88	0.056	0.583	-0.125	0.091
-3.95	5.60	0.071	0.623	-0.116	0.102
-4.95	5.26	0.081	0.544	-0.133	0.116
-6	4.90	0.115	0.709	-0.130	0.137
-7	4.56	0.115	0.715	-0.089	0.142
-7.95	4.24	0.144	0.728	-0.060	0.154
-9	3.89	0.161	0.690	-0.070	0.145
-9.95	3.56	0.234	0.886	-0.114	0.189
-9.1	3.85	0.440	0.970	-0.015	0.214
-9.95	3.56	0.482	1.098	0.004	0.225
-10.95	3.23	0.505	1.299	-0.046	0.266
-12	2.87	0.547	1.250	-0.016	0.300
-13	2.53	0.624	1.399	0.005	0.297
-13.95	2.21	0.725	1.421	0.058	0.294
-15	1.85	0.800	1.595	0.091	0.290
-15.95	1.53	0.869	1.642	0.114	0.279
-15.1	1.82	0.709	1.477	-0.015	0.303
-15.95	1.53	0.758	1.737	0.027	0.318
-16.95	1.19	0.809	1.712	-0.046	0.347
-18	0.84	0.865	1.850	-0.085	0.411
-19	0.50	0.924	1.871	-0.041	0.381
-19.95	0.18	0.971	1.986	-0.012	0.405
-21	-0.18	0.966	1.951	-0.046	0.435
-21.95	-0.50	0.828	1.780	-0.114	0.436
-21.1	-0.21	0.866	1.846	-0.015	0.425
-21.95	-0.50	0.612	1.793	-0.116	0.444
-22.95	-0.84	0.462	1.504	-0.175	0.436
-24	-1.19	0.309	1.601	-0.176	0.405
-25	-1.53	0.091	1.344	-0.134	0.221
-25.95	-1.85	0.037	0.652	-0.130	0.092

Πείραμα: 10_6 EXP1					
Ημερομηνία	10/6/2016	F_o	39.324	ΔT_{Mc} (°C)	1.946
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0239	Z_c (cm)	27.45
Γωνία (°C)	60°	Re	15534	Z_{RMS} (cm)	31.5
D (cm)	0.44	l_M (cm)	16.289	X_z (cm)	26.3
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899	b_c (cm)	5.07
ΔT_o (°C)	29.465	Q_o (cm ³ /s)	12.9169		
g'_o (cm/s ²)	10.606	M_o (cm ⁴ /s ²)	1097.29		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.011	B_o (cm ⁴ /s ³)	136.997		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
0	4.36	0.065	0.457	-0.078	0.074
-0.85	4.23	0.063	0.436	-0.091	0.082
-1.85	4.07	0.061	0.427	-0.122	0.089
-2.9	3.90	0.053	0.492	-0.159	0.087
-3.9	3.74	0.058	0.463	-0.104	0.086
-4.85	3.59	0.064	0.486	-0.087	0.097
-5.9	3.43	0.074	0.583	-0.067	0.111
-6.85	3.28	0.117	0.571	-0.144	0.139
-6.5	3.33	0.227	0.689	0.009	0.120
-7.35	3.20	0.216	0.838	-0.021	0.134
-8.35	3.04	0.224	0.797	-0.059	0.145
-9.4	2.87	0.230	0.809	-0.047	0.161
-10.4	2.71	0.255	0.858	-0.012	0.161
-11.35	2.56	0.292	0.914	-0.017	0.180
-12.4	2.39	0.299	1.050	-0.045	0.191
-13.35	2.24	0.314	1.089	-0.121	0.226
-13	2.30	0.370	0.853	0.009	0.152
-13.85	2.16	0.373	0.967	0.002	0.164
-14.85	2.00	0.426	0.940	0.006	0.176
-15.9	1.84	0.438	1.111	-0.024	0.181
-16.9	1.68	0.503	0.960	0.035	0.168
-17.85	1.53	0.551	1.229	0.052	0.185
-18.9	1.36	0.534	1.228	0.023	0.229
-19.85	1.21	0.538	1.190	-0.010	0.211
-19.5	1.26	0.644	1.267	0.097	0.225
-20.35	1.13	0.670	1.337	0.122	0.219
-21.35	0.97	0.747	1.552	0.027	0.249
-22.4	0.80	0.818	1.449	0.000	0.259
-23.4	0.64	0.841	1.401	0.105	0.247
-24.35	0.49	0.920	1.550	0.100	0.214
-25.4	0.33	0.988	1.564	0.160	0.219
-26.35	0.17	0.991	1.525	0.127	0.224
-25.6	0.29	0.989	1.645	0.052	0.271
-26.45	0.16	0.982	1.636	0.050	0.302
-27.45	0.00	1.000	1.654	-0.015	0.270
-28.5	-0.17	0.977	1.661	-0.047	0.306
-29.5	-0.33	0.869	1.696	-0.058	0.406
-30.45	-0.48	0.733	1.604	-0.042	0.409
-31.5	-0.64	0.487	1.592	-0.045	0.420
-32.45	-0.80	0.408	1.446	-0.121	0.398

Πείραμα: 10_6 EXP2					
Ημερομηνία	10/6/2016	F_o	31.99	ΔT_{Mc} (°C)	2.053
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0294	Z_c (cm)	20.4
Γωνία (°C)	60°	Re	11764	Z_{RMS} (cm)	23.9
D (cm)	0.44	l_M (cm)	13.25	X_z (cm)	20.4
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899	b_c (cm)	3.26
ΔT_o (°C)	28.197	Q_o (cm ³ /s)	10.2619		
g'_o (cm/s ²)	10.116	M_o (cm ⁴ /s ²)	692.565		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.010	B_o (cm ⁴ /s ³)	103.813		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
-8	3.80	0.102	0.588	-0.088	0.134
-8.85	3.54	0.094	0.664	-0.113	0.137
-9.85	3.23	0.093	0.578	-0.114	0.131
-10.9	2.91	0.097	0.854	-0.139	0.153
-11.9	2.60	0.138	0.905	-0.103	0.202
-12.85	2.31	0.207	0.965	-0.086	0.250
-13.9	1.99	0.208	0.894	-0.069	0.219
-14.85	1.70	0.217	0.982	-0.122	0.225
-14.5	1.81	0.621	1.217	-0.024	0.229
-15.35	1.55	0.653	1.375	0.023	0.270
-16.35	1.24	0.713	1.344	-0.009	0.283
-17.4	0.92	0.847	1.502	-0.029	0.290
-18.4	0.61	0.919	1.487	0.009	0.233
-19.35	0.32	0.976	1.611	0.051	0.240
-20.4	0.00	1.000	1.720	-0.026	0.272
-21.35	-0.29	0.958	1.605	-0.035	0.303
-21	-0.18	0.982	1.633	-0.066	0.305
-21.85	-0.44	0.829	1.667	-0.068	0.381
-22.85	-0.75	0.803	1.637	-0.114	0.397
-23.9	-1.07	0.523	1.555	-0.117	0.443
-24.9	-1.38	0.249	1.332	-0.081	0.349
-25.85	-1.67	0.099	1.271	-0.086	0.242
-26.9	-1.99	0.012	0.129	-0.092	0.027
-27.85	-2.28	0.009	0.165	-0.122	0.039

Πείραμα: 10_6 EXP3					
Ημερομηνία	10/6/2016	F_o	32.56	ΔT_{Mc} (°C)	1.960
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0289	Z_c (cm)	21.35
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	11328	Z_{RMS} (cm)	23.9
D (cm)	0.44	l_M (cm)	13.494	X_Z (cm)	20.9
A (cm²)	0.152	l_α (cm)	0.3899	b_c (cm)	2.68
ΔT_o (°C)	27.304	Q_o (cm³/s)	10.2619		
g'_o (cm/s²)	9.753	M_o (cm⁴/s²)	692.565		
Δρ/ρ_o	0.010	B_o (cm⁴/s³)	100.089		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-8	5.04	0.333	0.857	-0.079	0.201
-8.85	4.72	0.341	0.840	-0.092	0.211
-9.85	4.35	0.364	0.943	-0.127	0.230
-10.9	3.95	0.370	1.117	-0.142	0.265
-11.9	3.57	0.422	1.091	-0.087	0.242
-12.85	3.21	0.428	1.046	-0.069	0.246
-13.9	2.82	0.482	1.048	-0.077	0.256
-14.85	2.46	0.580	1.137	-0.066	0.225
-14.5	2.59	0.500	1.129	-0.035	0.234
-15.35	2.27	0.595	1.132	-0.069	0.227
-16.35	1.89	0.599	1.290	-0.017	0.254
-17.4	1.49	0.666	1.329	-0.048	0.261
-18.4	1.11	0.775	1.412	-0.039	0.241
-19.35	0.76	0.827	1.510	0.052	0.272
-20.4	0.36	0.912	1.468	-0.054	0.238
-21.35	0.00	1.000	1.586	0.192	0.216
-21	0.13	0.898	1.589	-0.035	0.343
-21.85	-0.19	0.893	1.629	-0.069	0.373
-22.85	-0.57	0.762	1.597	-0.106	0.436
-23.9	-0.96	0.539	1.599	-0.164	0.450
-24.9	-1.34	0.241	1.439	-0.110	0.351
-25.85	-1.70	0.116	1.427	-0.092	0.252
-26.9	-2.10	0.035	1.256	-0.099	0.153
-27.85	-2.46	0.002	0.146	-0.158	0.044

Πείραμα: 10_6 EXP4					
Ημερομηνία	10/6/2016	F_o	36.98	ΔT_{Mc} (°C)	1.653
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0255	Z_c (cm)	26
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	12722	Z_{RMS} (cm)	27.85
D (cm)	0.44	l_M (cm)	15.316	X_Z (cm)	23.8
A (cm²)	0.152	l_α (cm)	0.3899	b_c (cm)	3.18
ΔT_o (°C)	29.994	Q_o (cm³/s)	11.5894		
g'_o (cm/s²)	9.656	M_o (cm⁴/s²)	883.338		
Δρ/ρ_o	0.010	B_o (cm⁴/s³)	111.911		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-13	4.09	0.338	1.009	-0.085	0.232
-13.85	3.83	0.395	1.122	-0.121	0.254
-14.85	3.51	0.456	1.142	-0.116	0.222
-15.9	3.18	0.495	1.195	-0.133	0.213
-16.9	2.86	0.549	1.254	-0.065	0.213
-17.85	2.57	0.592	1.434	-0.067	0.240
-18.9	2.24	0.606	1.332	-0.108	0.255
-19.85	1.94	0.662	1.375	-0.123	0.277
-19.5	2.05	0.558	1.305	-0.111	0.293
-20.35	1.78	0.545	1.282	-0.121	0.317
-21.35	1.46	0.605	1.439	-0.088	0.341
-22.4	1.13	0.719	1.541	-0.133	0.309
-23.4	0.82	0.805	1.606	-0.037	0.298
-24.35	0.52	0.859	1.564	-0.037	0.293
-25.4	0.19	0.954	1.644	-0.024	0.264
-26.35	-0.11	0.982	1.595	-0.012	0.257
-26	0.00	1.000	1.885	-0.030	0.350
-26.85	-0.27	0.892	1.839	-0.092	0.430
-27.85	-0.58	0.622	1.590	-0.142	0.448
-28.9	-0.91	0.382	1.476	-0.215	0.422
-29.9	-1.23	0.192	1.319	-0.150	0.343
-30.85	-1.53	0.134	1.305	-0.124	0.279
-31.9	-1.86	0.031	0.813	-0.108	0.106
-32.85	-2.16	0.008	0.242	-0.177	0.053

Πείραμα: 13_6 EXP1					
Ημερομηνία	13/6/2016	F_o	35.101	ΔT_{Mc} (°C)	1.020
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0268	Z_c (cm)	22.9
Γωνία (°C)	60°	Re	4799	Z_{RMS} (cm)	26.35
D (cm)	0.44	l_M (cm)	14.539	X_z (cm)	19.1
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899	b_c (cm)	4.45
ΔT_o (°C)	14.940	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	0.005	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	4.617	B_o (cm ⁴ /s ³)	35.1189		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
-13	2.27	0.337	1.201	-0.236	0.262
-13.85	2.08	0.375	1.067	-0.281	0.271
-14.85	1.85	0.443	1.281	-0.324	0.295
-15.9	1.61	0.591	1.436	-0.268	0.283
-16.9	1.38	0.591	1.388	-0.189	0.278
-17.85	1.16	0.614	1.515	-0.233	0.318
-18.9	0.92	0.708	1.668	-0.170	0.333
-19.85	0.70	0.785	1.746	-0.320	0.323
-19.5	0.78	0.806	1.531	-0.105	0.286
-20.35	0.59	0.886	1.674	-0.048	0.265
-21.35	0.36	0.912	1.798	-0.021	0.282
-22.4	0.11	0.989	1.932	-0.131	0.281
-23.4	-0.11	0.968	1.640	-0.099	0.286
-24.35	-0.33	0.910	1.565	-0.187	0.358
-25.4	-0.57	0.792	1.620	-0.214	0.439
-26.35	-0.79	0.542	1.697	-0.320	0.486
-26	-0.71	0.204	1.531	-0.279	0.399
-26.85	-0.91	0.068	1.268	-0.327	0.333
-27.85	-1.14	-0.004	1.141	-0.366	0.260
-28.9	-1.38	-0.093	0.191	-0.401	0.080
-29.9	-1.61	-0.085	0.136	-0.328	0.064
-30.85	-1.83	-0.078	0.096	-0.279	0.053
-31.9	-2.07	-0.078	0.103	-0.305	0.054
-32.85	-2.29	-0.076	0.174	-0.411	0.078

Πείραμα: 13_6 EXP2					
Ημερομηνία	13/6/2016	F_o	29.30	ΔT_{Mc} (°C)	2.507
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0321	Z_c (cm)	17.85
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	15481	Z_{RMS} (cm)	20.35
D (cm)	0.44	l_m (cm)	12.137	X_z (cm)	18
A (cm²)	0.152	l_a (cm)	0.3899	b_c (cm)	4.19
ΔT_o (°C)	32.003	Q_o (cm³/s)	10.2619		
g'_o (cm/s²)	12.057	M_o (cm⁴/s²)	692.565		
Δρ/ρ_o	12.012	B_o (cm⁴/s³)	123.731		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-6.5	2.79	0.322	0.981	-0.017	0.188
-7.35	2.58	0.366	1.022	0.002	0.209
-8.35	2.33	0.420	1.085	-0.009	0.215
-9.4	2.07	0.464	1.143	-0.048	0.205
-10.4	1.83	0.486	1.104	-0.058	0.214
-11.35	1.60	0.504	1.080	0.000	0.230
-12.4	1.34	0.555	1.323	-0.009	0.259
-13.35	1.11	0.637	1.397	-0.056	0.253
-13	1.19	0.578	1.203	-0.017	0.279
-13.85	0.98	0.662	1.623	-0.035	0.300
-14.85	0.74	0.720	1.579	-0.061	0.289
-15.9	0.48	0.833	1.490	0.008	0.286
-16.9	0.23	0.929	1.609	0.054	0.261
-17.85	0.00	1.000	1.750	0.019	0.263
-18.9	-0.26	0.987	1.650	0.065	0.275
-19.85	-0.49	0.902	1.637	-0.074	0.368
-19.5	-0.41	0.987	1.770	0.018	0.355
-20.35	-0.61	0.872	1.669	-0.035	0.391
-21.35	-0.86	0.622	1.663	-0.079	0.428
-22.4	-1.12	0.379	1.555	-0.104	0.421
-23.4	-1.36	0.198	1.431	-0.078	0.335
-24.35	-1.60	0.097	1.058	-0.057	0.225
-25.4	-1.85	0.023	0.101	-0.064	0.023
-26.35	-2.09	0.020	0.129	-0.129	0.033

Πείραμα: 14_6 EXP1					
Ημερομηνία	14/6/2016	F_o	24.951	ΔT_{Mc} (°C)	1.752
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0377	Z_c (cm)	21.35
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	8250	Z_{RMS} (cm)	25.4
D (cm)	0.57	l_m (cm)	13.389	X_z (cm)	22.4
A (cm²)	0.256	l_a (cm)	0.5051	b_c (cm)	4.39
ΔT_o (°C)	21.572	Q_o (cm³/s)	12.9169		
g'_o (cm/s²)	7.221	M_o (cm⁴/s²)	653.848		
Δρ/ρ_o	0.007	B_o (cm⁴/s³)	93.2678		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-6.5	3.12	0.208	0.885	-0.059	0.222
-7.35	2.94	0.217	1.165	-0.116	0.233
-8.35	2.73	0.217	1.197	-0.116	0.231
-9.4	2.51	0.196	1.084	-0.128	0.228
-10.4	2.30	0.198	0.823	-0.087	0.214
-11.35	2.10	0.193	0.889	-0.093	0.198
-12.4	1.88	0.189	0.928	-0.102	0.216
-13.35	1.68	0.182	0.963	-0.146	0.218
-13	1.75	0.316	0.995	-0.032	0.246
-13.85	1.57	0.386	1.224	-0.061	0.256
-14.85	1.36	0.367	1.393	-0.066	0.292
-15.9	1.14	0.414	1.258	-0.128	0.310
-16.9	0.93	0.550	1.321	-0.141	0.304
-17.85	0.73	0.531	1.457	-0.093	0.338
-18.9	0.51	0.596	1.447	-0.051	0.361
-19.85	0.31	0.748	1.574	-0.043	0.298
-19.5	0.39	0.931	1.671	0.017	0.280
-20.35	0.21	0.972	1.623	0.211	0.225
-21.35	0.00	1.000	1.679	-0.066	0.273
-22.4	-0.22	0.993	1.828	-0.075	0.321
-23.4	-0.43	0.882	1.837	-0.061	0.392
-24.35	-0.63	0.730	1.704	-0.039	0.409
-25.4	-0.85	0.513	1.626	-0.076	0.438
-26.35	-1.05	0.275	1.514	-0.198	0.397

Πείραμα: 14_6 EXP2					
Ημερομηνία	14/6/2016	F_o	30.03	ΔT_{Mc} (°C)	1.794
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0313	Z_c (cm)	28.38
Γωνία (°C)	60°	Re	10061	Z_{RMS} (cm)	25.4
D (cm)	0.57	l_M (cm)	16.115	X_z (cm)	27.7
A (cm ²)	0.256	l_a (cm)	0.5051	b_c (cm)	5.94
ΔT_o (°C)	21.479	Q_o (cm ³ /s)	15.5719		
g'_o (cm/s ²)	0.007	M_o (cm ⁴ /s ²)	950.263		
$\Delta\rho/\rho_o$	7.243	B_o (cm ⁴ /s ³)	112.793		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
-6.5	3.71	0.211	0.646	-0.075	0.138
-7.35	3.56	0.243	0.629	-0.065	0.143
-8.35	3.39	0.258	0.742	-0.105	0.137
-9.4	3.22	0.282	0.723	-0.086	0.153
-10.4	3.05	0.277	0.749	-0.099	0.147
-11.35	2.89	0.257	0.677	-0.071	0.162
-12.4	2.71	0.267	0.792	-0.066	0.192
-13.35	2.55	0.285	0.868	-0.175	0.197
-13	2.61	0.295	0.833	-0.024	0.183
-13.85	2.46	0.250	0.888	-0.037	0.164
-14.85	2.29	0.271	0.875	-0.079	0.183
-15.9	2.11	0.275	0.808	-0.113	0.166
-16.9	1.94	0.292	1.063	-0.047	0.182
-17.85	1.78	0.306	0.936	-0.071	0.202
-18.9	1.61	0.329	0.961	-0.013	0.211
-19.85	1.44	0.341	1.010	-0.098	0.230
-19.5	1.50	0.602	1.107	0.001	0.175
-20.35	1.36	0.663	1.304	0.098	0.172
-21.35	1.19	0.703	1.230	0.045	0.185
-22.4	1.01	0.706	1.472	-0.060	0.220
-23.4	0.84	0.721	1.358	-0.021	0.252
-24.35	0.68	0.744	1.381	-0.016	0.249
-25.4	0.50	0.819	1.421	-0.040	0.265
-26.35	0.34	0.876	1.441	-0.098	0.277
-26	0.40	0.892	1.384	0.102	0.202
-26.85	0.26	0.951	1.485	0.125	0.205
-27.85	0.09	1.000	1.622	0.197	0.212
-28.9	-0.09	0.995	1.621	0.019	0.274
-29.9	-0.26	0.922	1.598	-0.021	0.308
-30.85	-0.42	0.848	1.534	-0.071	0.340
-31.9	-0.60	0.725	1.538	-0.066	0.365
-32.85	-0.76	0.562	1.470	-0.123	0.398

Πείραμα: 14_6 EXP3					
Ημερομηνία	14/6/2016	F_o	39.707	ΔT_{Mc} (°C)	1.331
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0237	Z_c (cm)	26
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	8058	Z_{RMS} (cm)	28.9
D (cm)	0.44	l_m (cm)	16.447	X_z (cm)	23.4
A (cm²)	0.152	l_a (cm)	0.3899	b_c (cm)	3.59
ΔT_o (°C)	19.714	Q_o (cm³/s)	10.2619		
g'_o (cm/s²)	6.566	M_o (cm⁴/s²)	692.565		
Δρ/ρ_o	0.007	B_o (cm⁴/s³)	67.3776		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-13	3.62	0.449	1.194	-0.125	0.237
-13.85	3.38	0.471	1.204	-0.103	0.226
-14.85	3.10	0.531	1.316	-0.105	0.242
-15.9	2.81	0.586	1.281	-0.066	0.260
-16.9	2.53	0.622	1.368	-0.075	0.240
-17.85	2.27	0.630	1.478	-0.069	0.274
-18.9	1.98	0.692	1.380	-0.068	0.299
-19.85	1.71	0.753	1.434	-0.160	0.282
-19.5	1.81	0.569	1.119	-0.125	0.237
-20.35	1.57	0.621	1.204	-0.103	0.209
-21.35	1.29	0.678	1.391	-0.140	0.257
-22.4	1.00	0.818	1.518	-0.174	0.250
-23.4	0.72	0.837	1.527	-0.003	0.221
-24.35	0.46	0.905	1.597	0.043	0.231
-25.4	0.17	0.965	1.655	-0.033	0.237
-26.35	-0.10	0.984	1.629	-0.232	0.245
-26	0.00	1.000	1.756	-0.055	0.319
-26.85	-0.24	0.922	1.814	-0.103	0.340
-27.85	-0.51	0.782	1.803	-0.174	0.421
-28.9	-0.81	0.639	1.676	-0.244	0.453
-29.9	-1.09	0.525	1.567	-0.148	0.430
-30.85	-1.35	0.317	1.275	-0.141	0.393
-31.9	-1.64	0.183	1.304	-0.138	0.318
-32.85	-1.91	0.021	0.415	-0.335	0.076

Πείραμα: 14_6 EXP4					
Ημερομηνία	14/6/2016	F_o	39.977	ΔT_{Mc} (°C)	1.353
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0235	Z_c (cm)	26
Γωνία (°C)	60°	Re	8026	Z_{RMS} (cm)	29.9
D (cm)	0.44	l_M (cm)	16.559	X_Z (cm)	23.3
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899	b_c (cm)	4.41
ΔT_o (°C)	19.417	Q_o (cm ³ /s)	10.2619		
g'_o (cm/s ²)	6.477	M_o (cm ⁴ /s ²)	692.565		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.007	B_o (cm ⁴ /s ³)	66.4693		

Z	r/b	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$	$T_{RMS}/\Delta T_{Mc}$
-13	2.92	0.178	0.853	-0.142	0.192
-13.85	2.73	0.167	0.809	-0.146	0.191
-14.85	2.50	0.212	0.908	-0.187	0.231
-15.9	2.27	0.218	0.931	-0.258	0.240
-16.9	2.04	0.225	0.934	-0.162	0.228
-17.85	1.83	0.269	0.994	-0.154	0.271
-18.9	1.59	0.276	1.068	-0.119	0.298
-19.85	1.38	0.291	1.167	-0.241	0.308
-19.5	1.46	0.519	1.188	-0.108	0.263
-20.35	1.27	0.573	1.291	-0.146	0.253
-21.35	1.04	0.598	1.428	-0.187	0.299
-22.4	0.81	0.649	1.559	-0.188	0.348
-23.4	0.58	0.729	1.447	-0.124	0.298
-24.35	0.37	0.790	1.560	-0.045	0.289
-25.4	0.13	0.844	1.535	-0.046	0.271
-26.35	-0.08	0.845	1.637	-0.026	0.288
-26	0.00	1.000	1.642	0.136	0.250
-26.85	-0.19	0.964	1.659	0.116	0.260
-27.85	-0.42	0.877	1.654	-0.151	0.303
-28.9	-0.65	0.757	1.640	-0.188	0.306
-29.9	-0.88	0.437	1.327	-0.124	0.358
-30.85	-1.09	0.316	1.480	-0.118	0.337
-31.9	-1.32	0.205	1.184	-0.119	0.255
-32.85	-1.54	0.086	1.091	-0.345	0.138

Πείραμα: 15_6 EXP2					
Ημερομηνία	15/6/2016	F_o	31.214	ΔT_{Mc} (°C)	2.186
Θέση	Terminal	Ri_o	0.0302	Z_c (cm)	19.5
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	12770	Z_{RMS} (cm)	22.4
D (cm)	0.44	l_M (cm)	12.929	X_Z (cm)	20.2
A (cm²)	0.152	l_α (cm)	0.3899	b_c (cm)	4.02
ΔT_o (°C)	28.989	Q_o (cm³/s)	10.2619		
g'_o (cm/s²)	10.624	M_o (cm⁴/s²)	692.565		
Δρ/ρ_o	0.011	B_o (cm⁴/s³)	109.026		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-6.5	3.20	0.335	0.967	-0.067	0.183
-7.35	2.99	0.341	0.958	-0.065	0.191
-8.35	2.74	0.353	0.911	-0.091	0.210
-9.4	2.49	0.398	0.911	-0.121	0.206
-10.4	2.24	0.459	0.960	-0.066	0.202
-11.35	2.01	0.502	1.224	-0.042	0.230
-12.4	1.75	0.512	1.087	-0.017	0.216
-13.35	1.51	0.506	1.166	-0.072	0.227
-13	1.60	0.559	1.197	-0.027	0.269
-13.85	1.39	0.588	1.229	-0.020	0.271
-14.85	1.14	0.584	1.253	-0.111	0.281
-15.9	0.89	0.684	1.320	-0.079	0.266
-16.9	0.64	0.707	1.426	-0.066	0.280
-17.85	0.41	0.730	1.477	-0.064	0.326
-18.9	0.15	0.806	1.698	-0.058	0.319
-19.85	-0.09	0.895	1.731	-0.029	0.276
-19.5	0.00	1.000	1.670	0.118	0.282
-20.35	-0.21	0.957	1.664	0.159	0.256
-21.35	-0.46	0.887	1.725	-0.050	0.326
-22.4	-0.71	0.698	1.644	-0.079	0.359
-23.4	-0.96	0.514	1.277	-0.089	0.321
-24.35	-1.19	0.391	1.224	-0.064	0.346
-25.4	-1.45	0.115	0.922	-0.079	0.214
-26.35	-1.69	0.061	0.883	-0.135	0.173

Πείραμα: 15_6 EXP3					
Ημερομηνία	15/6/2016	F_o	34.79	ΔT_{Mc} (°C)	29.456
Θέση	Terminal	Ri_o	0.027	Z_c (cm)	22.4
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	15103	Z_{RMS} (cm)	24.35
D (cm)	0.44	l_M (cm)	14.41	X_Z (cm)	25.5
A (cm²)	0.152	l_α (cm)	0.39	b_c (cm)	4.82
ΔT_o (°C)	1.847	Q_o (cm³/s)	11.59		
g'_o (cm/s²)	10.910	M_o (cm⁴/s²)	883.34		
Δρ/ρ_o	0.011	B_o (cm⁴/s³)	126.44		

Z	r/b	ΔT/ΔT_{Mc}	ΔT_{max}/ΔT_{Mc}	ΔT_{min}/ΔT_{Mc}	T_{RMS}/ΔT_{Mc}
-6.5	3.38	0.254	0.713	-0.099	0.170
-7.35	3.20	0.251	0.676	-0.089	0.171
-8.35	2.99	0.257	0.806	-0.128	0.178
-9.4	2.77	0.268	0.798	-0.107	0.189
-10.4	2.55	0.279	0.764	-0.096	0.183
-11.35	2.35	0.298	0.838	-0.092	0.196
-12.4	2.13	0.350	0.809	-0.063	0.182
-13.35	1.93	0.361	1.049	-0.121	0.209
-13	2.00	0.389	0.951	-0.075	0.221
-13.85	1.82	0.367	0.932	-0.035	0.207
-14.85	1.61	0.405	1.125	-0.079	0.257
-15.9	1.38	0.448	1.021	-0.134	0.261
-16.9	1.17	0.492	1.218	-0.071	0.277
-17.85	0.97	0.539	1.391	-0.066	0.291
-18.9	0.74	0.602	1.283	-0.063	0.246
-19.85	0.54	0.628	1.244	-0.045	0.274
-19.5	0.62	0.908	1.637	-0.049	0.282
-20.35	0.44	0.924	1.612	-0.009	0.272
-21.35	0.22	0.989	1.675	-0.031	0.284
-22.4	0.00	1.000	1.624	0.099	0.252
-23.4	-0.21	0.954	1.779	0.008	0.310
-24.35	-0.41	0.849	1.875	-0.066	0.397
-25.4	-0.64	0.680	1.600	-0.063	0.382
-26.35	-0.84	0.510	1.588	-0.146	0.380

Πείραμα: 20_5 EXP2					
Ημερομηνία	20/5/2016	F_o	21.2975	ΔT_{Mc} (°C)	1.116
Θέση	Impact	Ri_o	0.0442	X_{ic} (cm)	31.9
Γωνία (°C)	45°	Re	11310	X_z (cm)	16.5
D (cm)	0.44	l_M (cm)	8.8217		
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	34.327	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	0.013	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	12.540	B_o (cm ⁴ /s ³)	95.3942		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
16.5	0.620	2.432	-0.028
17.35	0.619	2.164	-0.066
18.35	0.627	2.646	-0.171
19.4	0.845	2.791	-0.225
20.4	0.928	2.788	-0.080
21.35	0.841	3.006	-0.119
22.4	0.957	2.520	-0.070
23.35	0.917	2.586	-0.184
22.5	0.912	2.634	-0.061
23.35	0.843	3.087	-0.138
24.35	0.808	2.484	-0.171
25.4	0.856	2.492	-0.191
26.4	0.864	2.657	-0.116
27.35	0.884	2.520	-0.080
28.4	0.980	2.862	-0.070
29.35	0.934	3.495	-0.221
28.5	1.059	2.634	0.006
29.35	1.051	2.773	0.009
30.35	1.044	2.403	-0.069
31.4	1.075	2.450	-0.084
32.4	0.969	2.700	-0.153
33.35	0.912	2.305	-0.080
34.4	0.813	2.187	-0.105
35.35	0.725	2.586	-0.116
34.5	0.552	2.432	0.006
35.35	0.372	1.994	-0.066
36.35	0.287	2.086	-0.204
37.4	0.310	1.787	-0.119
38.4	0.356	1.366	-0.009
39.35	0.368	0.984	0.028
40.4	0.405	1.227	0.072
41.35	0.393	0.794	-0.010

Πείραμα: 24_5 EXP2					
Ημερομηνία	24/5/2016	F_o	23.0439	ΔT_{Mc} (°C)	0.917
Θέση	Impact	Ri_o	0.04085	X_{ic} (cm)	29.3
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	8791	X_z (cm)	20.2
D (cm)	0.44	I_M (cm)	9.5451		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	30.671	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	10.712	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.011	B_o (cm ⁴ /s ³)	81.4833		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
25.9	0.881	2.491	-0.146
26.75	0.911	2.380	-0.176
27.75	0.983	2.363	-0.231
28.8	1.025	2.614	-0.262
29.8	0.999	2.332	-0.206
30.75	0.993	2.511	-0.123
31.8	0.945	2.561	-0.107
32.75	0.839	2.271	-0.277

Πείραμα: 25_5 EXP1					
Ημερομηνία	25/5/2016	F_o	22.2462	ΔT_{Mc} (°C)	0.930
Θέση	Impact	Ri_o	0.04232	X_{ic} (cm)	27
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	9627	X_z (cm)	16.5
D (cm)	0.44	I_M (cm)	9.2147		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	32.501	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	11.494	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.012	B_o (cm ⁴ /s ³)	87.4315		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
23.6	0.975	3.142	-0.068
24.45	0.936	3.165	-0.188
25.45	0.939	3.178	-0.209
26.5	1.013	3.560	-0.271
27.5	1.036	2.937	-0.158
28.45	1.011	3.079	-0.121
29.5	0.901	3.294	-0.129
30.45	0.788	3.219	-0.222

Πείραμα: 25_5 EXP2					
Ημερομηνία	25/5/2016	F_o	28.9841	ΔT_{Mc} (°C)	0.744
Θέση	Impact	Ri_o	0.03248	X_{ic} (cm)	29.7
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	14625	X_z (cm)	22.6
D (cm)	0.44	I_M (cm)	12.006		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	34.088	Q_o (cm ³ /s)	10.2619		
g'_o (cm/s ²)	12.322	M_o (cm ⁴ /s ²)	692.565		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.013	B_o (cm ⁴ /s ³)	126.45		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
25.2	0.866	2.771	-0.121
26.05	0.882	3.040	-0.151
27.05	0.975	3.106	-0.251
28.1	1.032	2.923	-0.273
29.1	0.985	3.011	-0.232
30.05	1.007	3.497	-0.176
31.1	0.981	3.461	-0.141
32.05	0.977	3.191	-0.206

Πείραμα: 26_5 EXP1					
Ημερομηνία	26/5/2016	F_o	14.4173	ΔT_{Mc} (°C)	1.736
Θέση	Impact	Ri_o	0.0653	X_{ic} (cm)	26.28
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	13847	X_z (cm)	17.3
D (cm)	0.57	I_M (cm)	7.7363		
A (cm ²)	0.256	I_Q (cm)	0.5051		
ΔT_o (°C)	36.676	Q_o (cm ³ /s)	10.2619		
g'_o (cm/s ²)	13.650	M_o (cm ⁴ /s ²)	412.682		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.014	B_o (cm ⁴ /s ³)	140.075		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
23.9	0.959	2.665	-0.070
24.75	0.986	2.920	-0.049
25.75	1.033	2.895	-0.078
26.8	1.001	3.083	-0.055
27.8	0.981	2.491	-0.036
28.75	0.904	2.525	-0.039
29.8	0.781	2.237	-0.056
30.75	0.635	2.252	-0.200

Πείραμα: 26_5 EXP2					
Ημερομηνία	26/5/2016	F_o	17.9695	ΔT_{Mc} (°C)	1.470
Θέση	Impact	Ri_o	0.05239	X_{ic} (cm)	31.3
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	18498	X_z (cm)	19.8
D (cm)	0.57	I_M (cm)	9.6424		
A (cm ²)	0.256	I_Q (cm)	0.5051		
ΔT_o (°C)	36.978	Q_o (cm ³ /s)	12.9169		
g'_o (cm/s ²)	13.922	M_o (cm ⁴ /s ²)	653.848		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.014	B_o (cm ⁴ /s ³)	179.825		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
29.8	0.928	2.339	-0.045
30.65	0.892	2.527	-0.116
31.65	0.948	2.801	-0.150
32.7	1.006	2.615	-0.114
33.7	1.002	2.686	-0.115
34.65	1.021	2.630	-0.109
35.7	1.025	2.336	-0.098
36.65	0.951	2.483	-0.164

Πείραμα: 26_5 EXP3					
Ημερομηνία	26/5/2016	F_o	22.9403	ΔT_{Mc} (°C)	0.653
Θέση	Impact	Ri_o	0.04104	X_{ic} (cm)	42.53
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	6812	X_z (cm)	26.2
D (cm)	0.57	I_M (cm)	12.31		
A (cm ²)	0.256	I_Q (cm)	0.5051		
ΔT_o (°C)	21.566	Q_o (cm ³ /s)	11.5894		
g'_o (cm/s ²)	6.877	M_o (cm ⁴ /s ²)	526.359		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.007	B_o (cm ⁴ /s ³)	79.6947		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
42.1	1.050	2.691	-0.117
42.95	0.979	2.730	-0.223
43.95	0.971	2.683	-0.344
45	0.945	3.198	-0.423
46	0.937	2.587	-0.242
46.95	0.932	2.733	-0.214
48	0.884	2.481	-0.155
48.95	0.888	2.750	-0.338

Πείραμα: 31_5 EXP2					
Ημερομηνία	31/5/2016	F_o	23.7263	ΔT_{Mc} (°C)	0.334
Θέση	Impact	Ri_o	0.03968	X_{ic} (cm)	29.08
Γωνία (°C)	45°	Re	2919	X_z (cm)	17.3
D (cm)	0.44	I_M (cm)	9.8278		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	14.481	Q_o (cm ³ /s)	4.9519		
g'_o (cm/s ²)	4.282	M_o (cm ⁴ /s ²)	161.268		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.004	B_o (cm ⁴ /s ³)	21.2037		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
26.7	1.012	4.383	-0.548
27.55	1.031	4.576	-0.581
28.55	1.035	4.729	-0.655
29.6	1.058	5.324	-0.796
30.6	0.876	5.019	-0.487
31.55	0.754	4.176	-0.525
32.6	0.676	3.869	-0.520
33.55	0.612	3.798	-0.703

Πείραμα: 31_5 EXP3					
Ημερομηνία	31/5/2016	F_o	23.9845	ΔT_{Mc} (°C)	0.341
Θέση	Impact	Ri_o	0.03925	X_{ic} (cm)	26.83
Γωνία (°C)	45°	Re	2901	X_z (cm)	17.8
D (cm)	0.44	I_M (cm)	9.9347		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	14.177	Q_o (cm ³ /s)	4.9519		
g'_o (cm/s ²)	4.190	M_o (cm ⁴ /s ²)	161.268		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.004	B_o (cm ⁴ /s ³)	20.7497		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
26.4	1.167	4.141	-4.467
27.25	0.980	3.928	-4.641
28.25	0.853	3.680	-4.398
29.3	0.853	4.382	-5.329
30.3	0.792	3.911	-4.447
31.25	0.792	4.349	-4.797
32.3	0.640	3.637	-4.077
33.25	0.641	3.189	-4.157

Πείραμα: 2_6 EXP1					
Ημερομηνία	2/6/2016	F_o	34.0045	ΔT_{Mc} (°C)	0.363
Θέση	Impact	Ri_o	0.02768	X_{ic} (cm)	42.59
Γωνία (°C)	45 ^o	Re	4858	X_z (cm)	23.7
D (cm)	0.44	I_M (cm)	14.085		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	16.033	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	4.919	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.005	B_o (cm ⁴ /s ³)	37.4203		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
39.2	0.976	3.649	-0.402
40.05	1.060	4.094	-0.518
41.05	1.077	3.496	-0.729
42.1	1.055	3.803	-0.907
43.1	0.991	3.115	-0.486
44.05	1.007	3.165	-0.476
45.1	0.928	3.227	-0.546
46.05	0.907	3.410	-0.854

Πείραμα: 6_6 EXP1					
Ημερομηνία	6/6/2016	F_o	32.379	ΔT_{Mc} (°C)	0.374
Θέση	Impact	Ri_o	0.02907	X_{ic} (cm)	33.8
Γωνία (°C)	60 ^o	Re	5125	X_z (cm)	19.5
D (cm)	0.44	I_M (cm)	13.412		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	17.363	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	5.426	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.006	B_o (cm ⁴ /s ³)	41.2717		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
30.40	0.945	3.534	-0.390
31.25	1.027	3.966	-0.501
32.25	1.043	3.386	-0.706
33.30	1.022	3.684	-0.879
34.30	0.960	3.018	-0.471
35.25	0.975	3.066	-0.461
36.30	0.899	3.126	-0.529
37.25	0.878	3.303	-0.827

Πείραμα: 6_6 EXP2					
Ημερομηνία	6/6/2016	F_o	21.5424	ΔT_{Mc} (°C)	0.407
Θέση	Impact	Ri_o	0.0437	X_{ic} (cm)	17.55
Γωνία (°C)	60°	Re	3305	X_z (cm)	
D (cm)	0.44	I_M (cm)	8.9232		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	16.531	Q_o (cm ³ /s)	4.9519		
g'_o (cm/s ²)	0.005	M_o (cm ⁴ /s ²)	161.268		
$\Delta\rho/\rho_o$	5.194	B_o (cm ⁴ /s ³)	25.7208		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
16.20	1.015	4.047	-0.360
17.05	1.103	4.622	-0.392
18.05	0.968	3.747	-0.710
19.10	1.055	4.801	-0.661
20.10	0.874	4.062	-0.479
21.05	0.733	4.230	-0.499
22.10	0.637	4.019	-0.313
23.05	0.583	3.972	-0.903

Πείραμα: 6_6 EXP3					
Ημερομηνία	6/6/2016	F_o	32.6011	ΔT_{Mc} (°C)	0.356
Θέση	Impact	Ri_o	0.02888	X_{ic} (cm)	28.67
Γωνία (°C)	60°	Re	5188	X_z (cm)	19.3
D (cm)	0.44	I_M (cm)	13.504		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	16.867	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	0.005	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	5.352	B_o (cm ⁴ /s ³)	40.7113		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
28.30	0.932	2.786	-0.294
29.15	1.062	2.887	-0.430
30.15	0.974	2.863	-0.452
31.20	1.098	3.529	-0.651
32.20	0.953	2.939	-0.457
33.15	0.975	3.269	-0.324
34.20	1.032	3.182	-0.283
35.15	1.044	3.120	-0.608

Πείραμα: 6_6 EXP4					
Ημερομηνία	6/6/2016	F_o	32.4958	ΔT_{Mc} (°C)	0.360
Θέση	Impact	Ri_o	0.02897	X_{ic} (cm)	24.27
Γωνία (°C)	60°	Re	5224	X_z (cm)	18
D (cm)	0.44	l_M (cm)	13.46		
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	16.908	Q_o (cm ³ /s)	7.6069		
g'_o (cm/s ²)	5.387	M_o (cm ⁴ /s ²)	380.557		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.005	B_o (cm ⁴ /s ³)	40.9756		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
20.40	0.955	2.927	-0.402
21.25	1.038	3.614	-0.414
22.25	0.936	3.897	-0.580
23.30	1.086	3.683	-0.756
24.30	0.932	3.375	-0.562
25.25	0.942	3.026	-0.416
26.30	1.031	3.376	-0.347
27.25	1.034	3.563	-0.683

Πείραμα: 7_6 EXP2					
Ημερομηνία	7/6/2016	F_o	35.0778	ΔT_{Mc} (°C)	0.393
Θέση	Impact	Ri_o	0.02684	X_{ic} (cm)	30.8
Γωνία (°C)	60°	Re	9909	X_z (cm)	19.4
D (cm)	0.44	l_M (cm)	14.53		
A (cm ²)	0.152	l_a (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	23.969	Q_o (cm ³ /s)	10.2619		
g'_o (cm/s ²)	8.413	M_o (cm ⁴ /s ²)	692.565		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.009	B_o (cm ⁴ /s ³)	86.3327		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
27.40	0.979	3.028	-0.331
28.25	1.095	3.850	-0.679
29.25	1.014	3.501	-0.537
30.30	1.093	3.716	-0.678
31.30	0.951	3.441	-0.579
32.25	0.942	3.538	-0.417
33.30	1.102	3.536	-0.275
34.25	1.039	4.721	-0.630

Πείραμα: 8_6 EXP1					
Ημερομηνία	8/6/2016	F_o	45.9794	ΔT_{Mc} (°C)	0.293
Θέση	Impact	Ri_o	0.02047	X_{ic} (cm)	42.4
Γωνία (°C)	60°	Re	11331	X_z (cm)	27.4
D (cm)	0.44	I_M (cm)	19.045		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	22.838	Q_o (cm ³ /s)	12.9169		
g'_o (cm/s ²)	7.758	M_o (cm ⁴ /s ²)	1097.29		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.008	B_o (cm ⁴ /s ³)	100.209		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
39.00	0.853	2.982	-0.406
39.85	0.944	3.588	-0.412
40.85	0.976	3.588	-0.693
41.90	1.019	3.593	-0.766
42.90	0.995	3.707	-0.544
43.85	1.011	3.604	-0.369
44.90	0.992	3.134	-0.387
45.85	0.982	3.905	-0.895

Πείραμα: 8_6 EXP2					
Ημερομηνία	8/6/2016	F_o	36.7349	ΔT_{Mc} (°C)	0.356
Θέση	Impact	Ri_o	0.02563	X_{ic} (cm)	34.3
Γωνία (°C)	60°	Re	8963	X_z (cm)	22.9
D (cm)	0.44	I_M (cm)	15.216		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	22.548	Q_o (cm ³ /s)	10.2619		
g'_o (cm/s ²)	7.671	M_o (cm ⁴ /s ²)	692.565		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.008	B_o (cm ⁴ /s ³)	78.7195		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
30.90	0.979	3.869	-0.281
31.75	1.041	3.749	-0.289
32.75	0.935	3.786	-0.694
33.80	1.054	3.970	-0.756
34.80	1.006	3.651	-0.443
35.75	1.005	3.425	-0.445
36.80	1.062	3.469	-0.282
37.75	1.067	4.088	-0.598

Πείραμα: 8_6 EXP3					
Ημερομηνία	8/6/2016	F_o	46.2363	ΔT_{Mc} (°C)	0.278
Θέση	Impact	Ri_o	0.02036	X_{ic} (cm)	42.18
Γωνία (°C)	60°	Re	11347	X_z (cm)	29.2
D (cm)	0.44	I_M (cm)	19.152		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	22.459	Q_o (cm ³ /s)	12.9169		
g'_o (cm/s ²)	7.672	M_o (cm ⁴ /s ²)	1097.29		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.008	B_o (cm ⁴ /s ³)	99.098		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
39.00	1.116	3.673	-0.312
39.85	1.179	3.665	-0.631
40.85	1.000	3.437	-0.831
41.90	0.992	3.408	-1.084
42.90	1.006	3.183	-0.658
43.85	1.003	3.274	-0.633
44.90	1.040	3.353	-0.589
45.85	1.292	4.343	-0.820

Πείραμα: 8_6 EXP4					
Ημερομηνία	8/6/2016	F_o	42.0498	ΔT_{Mc} (°C)	0.339
Θέση	Impact	Ri_o	0.02239	X_{ic} (cm)	37.8
Γωνία (°C)	60°	Re	10023	X_z (cm)	27.2
D (cm)	0.44	I_M (cm)	17.418		
A (cm ²)	0.152	I_Q (cm)	0.3899		
ΔT_o (°C)	21.873	Q_o (cm ³ /s)	11.5894		
g'_o (cm/s ²)	7.467	M_o (cm ⁴ /s ²)	883.338		
$\Delta\rho/\rho_o$	0.008	B_o (cm ⁴ /s ³)	86.5389		

X	$\Delta T/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{max}/\Delta T_{Mc}$	$\Delta T_{min}/\Delta T_{Mc}$
39.00	0.875	3.300	-0.430
39.85	0.916	3.284	-0.572
40.85	0.970	3.625	-0.755
41.90	1.026	4.309	-0.914
42.90	1.004	3.418	-0.524
43.85	1.000	3.333	-0.516
44.90	0.965	3.494	-0.370
45.85	0.915	3.135	-0.856

