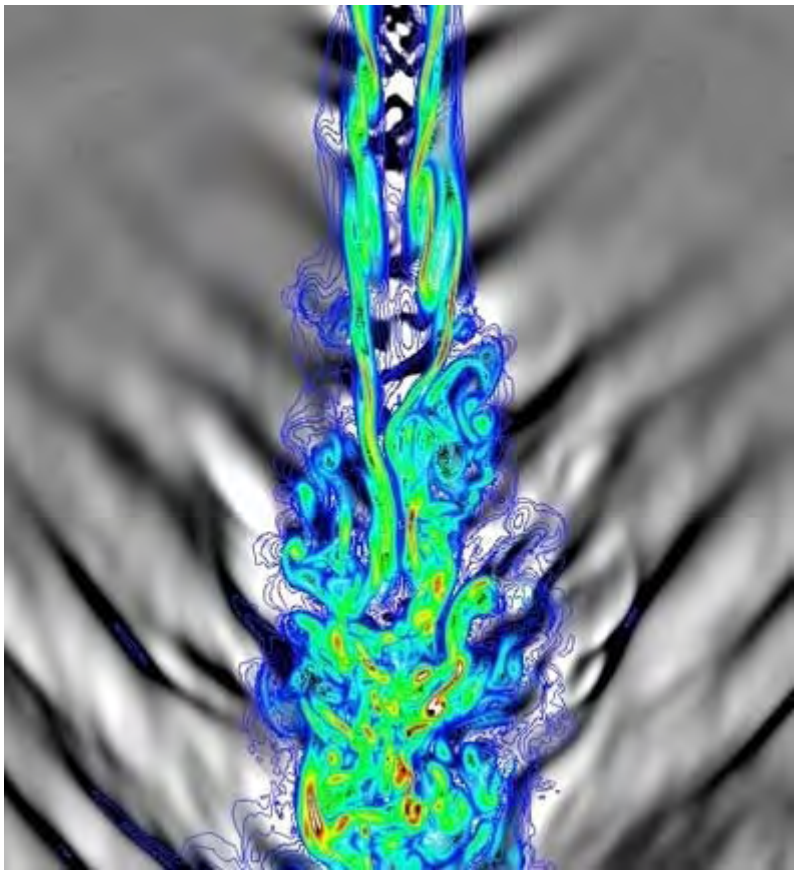
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΔΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΥΡΒΗΣ ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΘΕΡΜΑΙΝΟΜΕΝΗ ΦΛΕΒΑ ΜΕ ΑΡΝΗΤΙΚΗ ΑΝΩΣΗ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΥΠΟ
ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΣΠΕΤΣΙΩΤΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ Επ. Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2008

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Στη Δήμητρα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Υδρομηχανικής και Περιβαλλοντικής Τεχνικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας την περίοδο Ιουνίου 2007 – Μαρτίου 2008. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα κ. Παναγιώτη Παπανικολάου, επίκουρο καθηγητή Π.Θ. για την υπομονή του και την άριστη καθοδήγηση. Επίσης τον κ. Αντώνη Λιακόπουλο, καθηγητή Π.Θ. και τον κ. Θεόδωρο Καρακασίδη, λέκτορα Π.Θ. για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους. Ευχαριστίες απευθύνονται επίσης στον κ. Ηλία Παππά για τη βοήθεια στην κατασκευή της πειραματικής διάταξης καθώς και στον κ. Δημήτρη Καραμπερόπουλο για την τεχνική υποστήριξη του ηλεκτρονικού εξοπλισμού. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους φοιτητές που δουλέψαμε μαζί στο εργαστήριο (Γιώργος, Λένα, Τάσος) καθώς και σε όλους όσους βοήθησαν στο να πραγματοποιηθεί η εργασία αυτή. Μέρος της εργασίας αποτέλεσε αντικείμενο έρευνας στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ – Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ. ΙΙ» το οποίο χρηματοδοτήθηκε επί μέρους από την Ευρωπαική Ένωση και το ΥΠ.Ε.Π.Θ.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Λατινικά σύμβολα

B	Άνωση
b_c	Πλάτος της φλέβας στο σημείο όπου $c = 0.37c_c$
b_w	Πλάτος της φλέβας στο σημείο όπου $w = 0.37w_c$
C	Αρχική συγκέντρωση φλέβας
c(r,z)	Κατανομή κατά Gauss μέσης συγκέντρωσης
D	Διάμετρος διατομής ακροφυσίου
Fr	Αριθμός Froude
f	Συχνότητα
g	Επιτάχυνση της βαρύτητας
g'_0	Ανωστική επιτάχυνση
l_Q	Κλίμακα μήκους
l_M	Κλίμακα μήκους
M	Ειδική ορμή φλέβας
m(z)	Ειδική ορμή ρευστού
Q	Αρχική ογκομετρική παροχή φλέβας
R_0	Αρχικός αριθμός Richardson
Re	Αριθμός Reynolds
S_c	Αραίωση στον άξονα της φλέβας
S'_c	Τύρβη στον άξονα της φλέβας
S_{min}	Ελάχιστη αραίωση στον άξονα της φλέβας
T	Διαφορά θερμοκρασίας
T_c	Διαφορά θερμοκρασίας στον άξονα της φλέβας
T_{mean}	Μέσος όρος μετρούμενων θερμοκρασιών
T_{max}	Μέγιστη μετρούμενη θερμοκρασία
T_{min}	Ελάχιστη μετρούμενη θερμοκρασία
T’	Ένταση τύρβης
T'_c	Ένταση τύρβης στον άξονα της φλέβας
T_0	Θερμοκρασία φλέβας
T_a	Θερμοκρασία αποδέκτη
T_I	Σημειακή μέτρηση thermistor
W	Μέση ταχύτητα εξόδου φλέβας
w(r,z)	Κατανομή κατά Gauss μέσης ταχύτητας
z	Κατακόρυφη απόσταση από ακροφύσιο
z_{max}	Μέγιστο βάθος φλέβας
z_s	Βάθος σταθεροποίησης φλέβας
z_{sur}	Κατακόρυφη απόσταση από ελεύθερη επιφάνεια

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Ελληνικά σύμβολα

$\beta(z)$	Ειδική άνωση ρευστού
$\Delta\rho$	Μέση διαφορά πυκνότητας
ΔT_0	Διαφορά θερμοκρασίας φλέβας - αποδέκτη
ΔT_c	Διαφορά θερμοκρασίας στον άξονα της φλέβας
$\mu(z)$	Ογκομετρική παροχή ρευστού
ν	Κινηματικό ιξώδες
ρ_a	Πυκνότητα αποδέκτη
ρ_0	Πυκνότητα φλέβας

Μονάδες μέτρησης

L	Μονάδα μέτρησης μήκους
T	Μονάδα μέτρησης χρόνου
m	Μέτρο
cm	Εκατοστό του μέτρου
mm	Χιλιοστό του μέτρου
min	Λεπτό
sec	Δευτερόλεπτο
l	Λίτρο
ml	Χιλιοστό του λίτρου
gr	Γραμμάριο
^oC	Βαθμός Κελσίου
atm	Ατμόσφαιρα
Ω	Ohm
KΩ	Kiloohm
mA	Miliambere
mV	Milivolt
Hz	Herz
deg	Μοίρες

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελ.
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ....1
1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση....1
1.2 Τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες....2
1.3 Φλέβες χωρίς άνωση, φλέβες με θετική ή αρνητική άνωση....4
1.4 Διαστατική ανάλυση....7
1.5 Ρυθμός αραίωσης....9
1.6 Αντικείμενο της εργασίας....11
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ....13
2.1 Πειραματική διάταξη....13
2.1.1 Ορθογωνική δεξαμενή....13
2.1.2 Σύστημα ανάρτησης του ακροφυσίου....14
2.1.3 Σύστημα τριών ροόμετρων....15
2.1.4 Θερμοσίφωνας....16
2.1.5 Δίκτυο τροφοδοσίας της φλέβας και θερμοστοιχείο ταχείας απόκρισης....17
2.1.6 Συστοιχία πέντε αισθητήρων ταχείας απόκρισης (thermistors)....19
2.1.7 Μηχανικός βραχίονας για την κίνηση των thermistors....22
2.1.8 Ηλεκτρονικός υπολογιστής....23
2.1.9 Σύστημα φωτισμού και οπτικοποίησης της φλέβας....24
2.2 Ρύθμιση ροόμετρων....25
2.3 Πειραματική διαδικασία....30
2.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας με thermistors....31
2.5 Περιγραφή τυπικού πειράματος....32
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ....34
3.1 Επεξεργασία δεδομένων....34
3.2 Περιοχή $z = 0.5l_M$....40
3.3 Περιοχή $z = l_M$....43
3.4 Περιοχή $z = 1.5l_M$....46
3.5 Περιοχή $z = 2l_M$....49
3.6 Βιντεοσκόπηση – Όρια φλέβας....56
3.7 Επιπρόσθετα πειράματα....57
3.8 Σφάλματα....60
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ....61
5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΥΡΒΗΣ....62
5.1 Ανάλυση χρονοσειρών....62
5.2 Συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης - ετεροσυσχέτισης....63
5.3 Φασματική ανάλυση....64
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ....67

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο της διάχυσης φλέβας θερμού νερού ή άλλου ρευστού σε υδάτινο αποδέκτη απαντάται στη φύση σε διάφορες μορφές, τόσο ως φυσικού φαινομένου, αλλά κυρίως υπό τη μορφή ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Οι υδάτινοι αποδέκτες (ποτάμια, λίμνες, ωκεανοί) αποτελούν τον κύριο τόπο διάθεσης επεξεργασμένων αστικών και βιομηχανικών λυμάτων τα οποία διοχετεύονται εκεί συνήθως σε υγρή μορφή μέσω διαχυτήρων. Σε αρκετές περιπτώσεις τα απόβλητα προς διάθεση είναι θερμό νερό το οποίο αναμιγνύεται με το νερό του αποδέκτη. Τέτοιες περιπτώσεις συναντώνται σε μονάδες αφαλατώσεως θαλασσινού νερού ή σε εγκαταστάσεις ψύξεως μηχανών βιομηχανικών μονάδων όπου το νερό αντλείται από το περιβάλλον, κυκλοφορεί μέσα στις μηχανές απάγοντας την παραγόμενη θερμότητα και εν συνεχεία επιστρέφει θερμότερο στο περιβάλλον.

Η ανάμιξη του θερμού νερού με το νερό του αποδέκτη είναι δυνατό να προκαλέσει αύξηση της θερμοκρασίας του τελευταίου με διάφορες συνέπειες για τα οικοσυστήματα που έχουν αναπτυχθεί εκεί. Αύξηση της θερμοκρασίας ενός ποταμού ή μιας λίμνης ενδέχεται να προκαλέσει καταστροφές στην τοπική χλωρίδα και πανίδα και γενικότερα υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Παρόμοιες περιπτώσεις συναντώνται και στην ατμόσφαιρα όπου η διάθεση αερολυμάτων υψηλής θερμοκρασίας από υψικάμινο μπορεί να προκαλέσει επιπτώσεις στο μικροκλίμα της περιοχής.

Η επίδραση των θερμαινόμενων υγρών αποβλήτων στο περιβάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι, κατά τη διάθεσή τους στους υδάτινους αποδέκτες, έχουν χαμηλή αρχική αραίωση. Ο σχεδιασμός των διαχυτήρων, επομένως, πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη αρχική αραίωση που να έχει σαν αποτέλεσμα περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι ανωστικές φλέβες αποτελούν την καλύτερη μέθοδο επίτευξης μέγιστης αραίωσης καθώς προκαλούν ανάμειξη των ιδιοτήτων του προς διάθεση ρευστού με αυτό του αποδέκτη. Συνηθέστερη μορφή διαχυτήρα αποτελεί ένας, βυθισμένος στον αποδέκτη, αγωγός με οπές στην άνω παρειά, από τις οποίες εκρέουν τα υγρά απόβλητα με τη μορφή φλεβών.

Στην παρούσα εργασία έχει γίνει ένα εργαστηριακό προσομοίωμα ενός διαχυτήρα θερμού νερού. Αντικείμενο της μελέτης είναι η πειραματική διερεύνηση της τύρβης και της διάλυσης φλέβας θερμού νερού η οποία διαχέεται, με αρνητική άνωση, σε ομογενή και ακίνητο υδάτινο αποδέκτη. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν πειράματα σημειακών μετρήσεων θερμοκρασίας, με τη χρήση thermistors ταχείας απόκρισης, σε αντιπροσωπευτικά σημεία του πεδίου ροής.

1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το αντικείμενο της διάχυσης φλέβας νερού σε υδάτινο αποδέκτη έχει αποτελέσει πεδίο εκτεταμένης έρευνας στον τομέα της υδρομηχανικής εδώ και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

δεκαετίες. Οι Fisher *et al.* (1979) αρχικά και στη συνέχεια ο List (1982) περιγράφουν τυρβώδεις ανωστικές φλέβες με βάση την βιβλιογραφία που περιείχε το τι είχε γίνει μέχρι εκείνη την εποχή ερευνητικά. Οι Kotsovinos (1975) και Papanicolaou & List (1988) μέτρησαν μεταφορά μάζας και ορμής σε κατακόρυφες ανωστικές διδιάστατες και αξονοσυμμετρικές ανωστικές φλέβες με θετική άνωση, προσδιορίζοντας τα χαρακτηριστικά ανάπτυξής τους όπως το πλάτος, οι συντελεστές συμπαράσυρσης, ο ρυθμός αραίωσης κλπ.

Κατακόρυφες φλέβες με αρνητική άνωση μελετήθηκαν πειραματικά πρωτίστως από τον Turner (1966), που προσδιόρισε το μέγιστο ύψος (ή βάθος) διείσδυσης κατακόρυφης φλέβας με ανωστική δύναμη που είναι αντίθετη με την αρχική ορμή του ρευστού της φλέβας. Στη συνέχεια ο Abraham (1967) προσπάθησε να προσδιορίσει, με μονοδιάστατο μαθηματικό ομοίωμα, το μέγιστο βάθος διείσδυσης της φλέβας συναρτήσει της διαμέτρου του ακροφυσίου και του αριθμού Froude. Ακολουθούν πειραματικές έρευνες οι οποίες αφορούν κυρίως στον υπολογισμό του μέγιστου (steady state) βάθους διείσδυσης κατακόρυφων φλεβών με αρνητική άνωση από τους Baines, Turner & Campbell (1989), Lindberg (1994), Zhang & Baddour (1998), Pantzlaff & Lueptow (1999), Bloomfield & Kerr (1998, 2000) και Kokkalis & Papanicolaou (2008). Μετρήσεις τύρβης έχουν γίνει από τους Seban, Behnia & Abreu (1978) σε θερμαινόμενες φλέβες, οι οποίοι μέτρησαν διάχυση θερμοκρασίας σε κατακόρυφη φλέβα θερμού αέρα με αρνητική άνωση (τα αποτελέσματα των οποίων πρόκειται να συγκριθούν με αυτά της παρούσας εργασίας).

1.2 Τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες

Εκτοξευόμενη φλέβα ή δέσμη είναι μια φλέβα ρευστού που διαχέεται σε αποδέκτη ομοειδούς ρευστού με την ίδια ή διαφορετική πυκνότητα. Οι διαστάσεις του αποδέκτη είναι συνήθως μεγαλύτερες της φλέβας. Οι φλέβες, ανάλογα με την χρονική διακύμανση των κινηματικών τους χαρακτηριστικών, διακρίνονται σε στρωτές και τυρβώδεις. Τυρβώδης σημαίνει ότι στο πεδίο ροής της φλέβας υπάρχει χρονική διακύμανση της ταχύτητας ή/και της συγκέντρωσης κάποιας ουσίας διαλυμένης στη φλέβα. Γενικά το φαινόμενο της εισρέουσας φλέβας σε αποδέκτη διαφορετικής πυκνότητας θεωρείται ως φαινόμενο μεταφοράς, μετά των επιμέρους λειτουργιών της μετάθεσης (transport) και της τυρβώδους διάχυσης (turbulent diffusion). Η μετάθεση (ελεύθερη ή εξαναγκασμένη) είναι η διαδικασία κατά την οποία το ρευστό κινείται από θέση σε θέση. Η τυρβώδης διάχυση είναι η μή αναστρέψιμη διαδικασία της κινήσεως μιας ιδιότητας ή ενός συστατικού του μίγματος σχετικώς προς τα άλλα συστατικά του μίγματος προς την κατεύθυνση της μικρότερης συγκέντρωσης (ομογενοποίηση του μίγματος). Οι παραπάνω διαδικασίες λαμβάνουν χώρα αφενός μεν λόγω της αρχικής ταχύτητας της εκτοξευόμενης φλέβας, αφετέρου δε λόγω της συνεχούς προς την αντίθετη πλευρά διευρύνσεως της φλέβας αυτής, αποκλίνουσα ροή, η οποία οφείλεται στην επιβράδυνση των ρευστών σωματιδίων λόγω μεταφοράς ποσότητας κίνησης του ρευστού της φλέβας στο ρευστό του αποδέκτη. Αυτό επιτελείται με τη συμπαράσυρση (entrainment)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

περιβάλλοντος ρευστού δηλαδή την κίνηση των ρευστών σωματιδίων του περιβάλλοντος ρευστού προς την περιοχή της φλέβας, η οποία είναι η κυριότερη αιτία της επερχόμενης ανάμιξης (mixing) με τελικό αποτέλεσμα τη διάχυση και τη διάλυση. Τα χαρακτηριστικά και η ρευστοδυναμική συμπεριφορά των εκτοξευόμενων φλεβών εξαρτώνται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Αρχικές κινηματικές παράμετροι της φλέβας.
- Παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού.
- Γεωμετρικές παράμετροι.

Στις παραμέτρους της φλέβας περιλαμβάνονται η αρχική κατανομή της ταχύτητας, η ένταση της τύρβης, η ογκομετρική παροχή, η ορμή, τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά και η συγκέντρωση τυχόν διαλυμένων ουσιών. Είναι δυνατόν η φλέβα να ευρίσκεται σε μόνιμη ή μή μόνιμη ροή, να εξέρχεται από το στόμιο με ή χωρίς συστροφή (swirl), συνεχώς ή με διαλείπουσες εκχύσεις. Στις περιβαλλοντικές παραμέτρους περιλαμβάνονται η πυκνομετρική διαφορά φλέβας και αποδέκτη, η στρωμάτωση (θερμική ή πυκνομετρική) και η κίνηση στον αποδέκτη. Επίσης ο αποδέκτης είναι δυνατόν να είναι στάσιμος ή να κινείται (σε στρωτή ή τυρβώδη ροή), να είναι απείρων ή πεπερασμένων διαστάσεων και ομογενής ή με πυκνομετρική στρωμάτωση. Στις γεωμετρικές παραμέτρους περιλαμβάνονται η μορφή και ο προσανατολισμός των φλεβών, η αλληλεπίδραση με άλλες φλέβες και η επίδραση των ορίων του αποδέκτη πάνω στη φλέβα. Εξίσου σημαντικός παράγοντας της ροής είναι η γεωμετρική μορφή της φλέβας, η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες εξόδου (κυκλική ή μη διατομή). Αυτονόητο είναι ότι τα ρευστά φλέβας και αποδέκτη πρέπει να είναι αναμίξιμα

Τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες εμφανίζονται συχνά στη φύση υπό τη μορφή:

- Φυσικών υποθαλάσσιων φλεβών (sea-vents).
- Θερμοπηγών (geysers).
- Αρτεσιανών πηγαδιών.
- Κατά την έκρηξη ηφαιστείων κλπ.

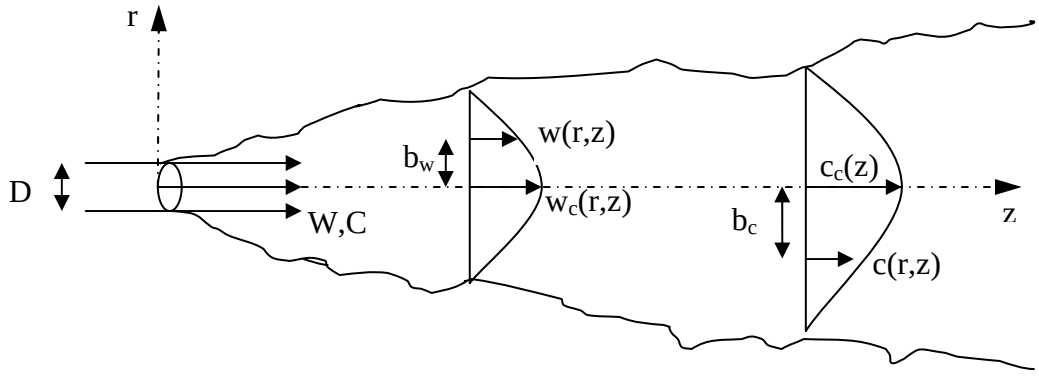
Τεχνητές (ανθρωπογενείς) τυρβώδεις εκτοξευόμενες φλέβες εμφανίζονται:

- Σε καμινάδες υψικαμίνων.
- Πάνω από πυρκαγιές.
- Στις εξατμίσεις οχημάτων.
- Στους διαχυτήρες διάθεσης επεξεργασμένων αποβλήτων σε υδάτινους αποδέκτες.
- Στις τουρμπίνες προώθησης αεροσκαφών.
- Στο fuel injection κινητήρων.
- Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις.
- Σε μηχανισμούς ψύξης-θέρμανσης χώρων (κλιματισμός, πισίνες κ.λ.π.).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

1.3 Φλέβες χωρίς άνωση, φλέβες με θετική ή αρνητική άνωση.

Σαν απλή εκτοξευόμενη φλέβα (jet) ορίζεται η παροχή ρευστού η οποία εκρέει απο οπή ή σχισμή σε αποδέκτη ομοειδούς ρευστού ίδιας ή διαφορετικής πυκνότητας (σχήμα 1.1). Εάν η φλέβα δημιουργείται από μια πηγή δυναμικής ενέργειας που παρέχει στο ρευστό κάποια θετική ή αρνητική άνωση, τότε ονομάζεται πλούμιο (plume). Η φλέβα που εμπεριέχει τις ιδιότητες της απλής φλέβας και του πλουμίου (δηλ αρχική ορμή και άνωση) ονομάζεται ανωστική φλέβα (buoyant jet).



Σχήμα 1.1 Τυρβώδης διάχυση απλής φλέβας με αρχική ταχύτητα W και αρχική συγκέντρωση C.

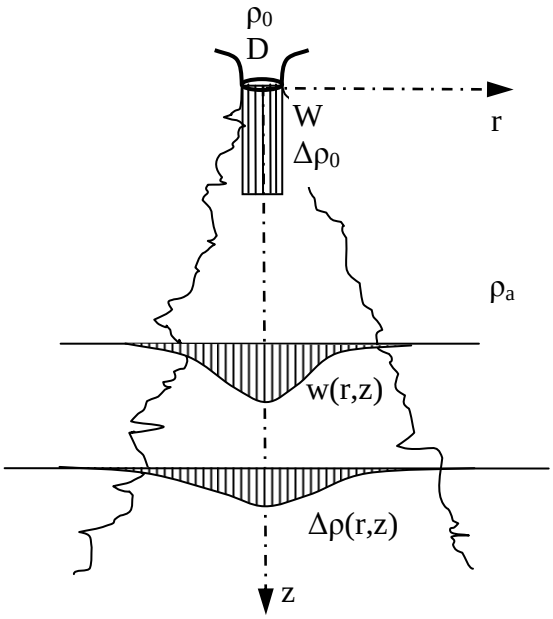
‘Εστω κυκλική φλέβα διαμέτρου D και πυκνότητας ρ_0, η οποία εκβάλλει κατακόρυφα και με φορά προς τα κάτω σε ομογενή και ακίνητο αποδέκτη πυκνότητας ρ_a. Εάν θεωρήσουμε W την αρχική μέση ταχύτητα εξόδου, τότε μπορούν να ορισθούν η αρχική ογκομετρική παροχή Q της φλέβας, η ειδική (κινηματική - ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού) ορμή M και η άνωση B ως εξής:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} W \quad [L^3/T] \tag{1.1}$$

$$M = QW \quad [L^4/T^2] \tag{1.2}$$

$$B = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} gQ = g'_0 Q \quad [L^4/T^3], \text{ όπου } g'_o = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} g \; [L/T^2] \tag{1.3}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 1.2 Τυρβώδης διάχυση κατακόρυφης ανωστικής φλέβας με ομοιόμορφη αρχική ταχύτητα W και αρχική πυκνομετρική διαφορά $\Delta\rho_0$.

Με βάση τα μεγέθη αυτά και τους ορισμούς της προηγούμενης παραγράφου ισχύει ότι:

- Απλή φλέβα (jet) είναι η φλέβα για την οποία ισχύει M>>B ή B→0.
- Πλούμιο (plume) είναι η φλέβα για την οποία ισχύει B>>M ή M→0.
- Ανωστική φλέβα (Buoyancy jet) είναι η φλέβα για την οποία ισχύει M≠0 και B≠0.

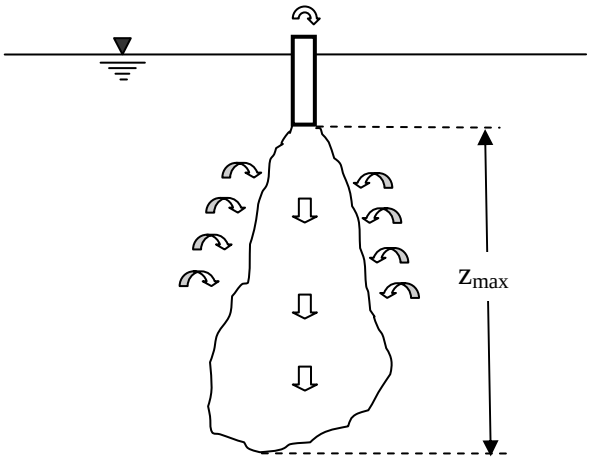
Οι φλέβες που παρατηρούνται στη φύση έχουν αρχική ορμή και άνωση. Έτσι, εάν η αρχική ορμή είναι επικρατέστερη, η φλέβα αρχικά συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα (jet) ενώ, εάν η αρχική άνωση υπερισχύει της ορμής, συμπεριφέρεται σαν πλούμιο (plume). Στις υπό άνωση φλέβες κατατάσσονται ως οριακές περιπτώσεις, η απλή φλέβα χωρίς άνωση, όταν δεν υπάρχει διαφορά πυκνοτήτων, και η απλή ανωστική φλέβα στην οποία υπάρχει μόνο επίδραση δυνάμεων άνωσης. Ουσιαστική είναι επίσης, στις κατακόρυφες φλέβες, η σύγκριση των κατευθύνσεων της αρχικής ταχύτητας εξόδου και των δυνάμεων άνωσης. Εάν είναι της ίδιας φοράς η φλέβα είναι θετικής άνωσης, ενώ αν είναι αντίθετης φοράς τότε η φλέβα είναι αρνητικής άνωσης.

Φλέβα αρνητικής άνωσης είναι η φλέβα εκείνη η οποία διαχέεται κατακόρυφα με φορά προς τα κάτω σε αποδέκτη μεγαλύτερης πυκνότητας (σχήματα 1.3 και 1.4). Το φαινόμενο της αρνητικής άνωσης έχει σαν αποτέλεσμα η φλέβα να συμπαρασύρει βαρύτερο ρευστό μόνο από τον ακίνητο αποδέκτη και να διεισδύει μέχρι κάποιο μέγιστο βάθος z_{max} όπου η ορμή της μηδενίζεται (σχήμα 1.2). Στη συνέχεια αλλάζει η φορά της κίνησης και η φλέβα αρχίζει να διαχέεται περιμετρικά προς την ελεύθερη επιφάνεια του αποδέκτη, λόγω της επίδρασης της ανωστικής δύναμης, περικλείοντας την κατερχόμενη ροή (σχήμα 1.3). Το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

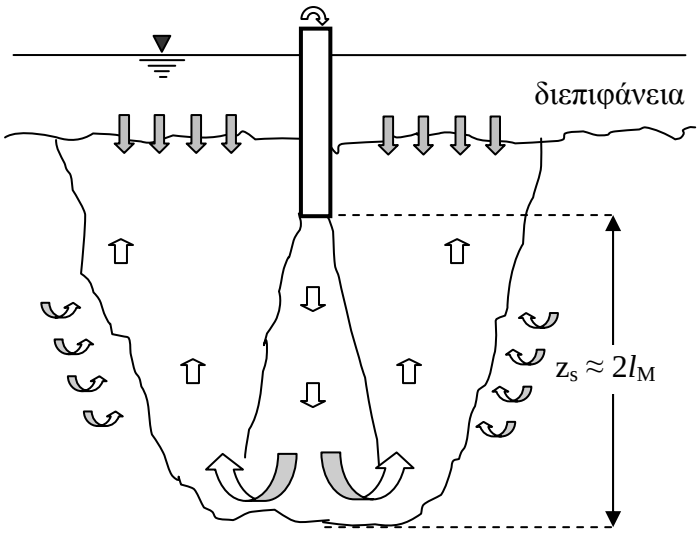
βάθος διείσδυσης μειώνεται και σταθεροποιείται σε απόσταση z_s λόγω της αλληλεπίδρασης της κατερχόμενης φλέβας και ανερχόμενης ροής. Η απόσταση z_s είναι η μέση στάθμη (σε σχέση με το στόμιο της φλέβας) στην οποία μηδενίζεται η αρχική ορμή, λόγω της αντίθετης δράσης της ανωστικής δύναμης στη ροή της φλέβας. Θεωρούμε ότι αρχικά στη φλέβα έχουμε M>>B. Με βάση τους ορισμούς της προηγούμενης παραγράφου, στο στόμιο της φλέβας η αρχική ορμή είναι επικρατέστερη επομένως η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα. Σε απόσταση πλησίον του μέσου βάθους διείσδυσης z_s υπερισχύει η ορμή την οποία απέκτησε (έχασε στην πραγματικότητα) η φλέβα λόγω αρνητικής άνωσης και η φλέβα συμπεριφέρεται ως πλούμιο. Κατακόρυφη φλέβα αρνητικής άνωσης παρατηρείται και στην περίπτωση που η φλέβα διαχέεται κατακόρυφα προς τα πάνω σε ομογενή αποδέκτη με υγρό μικρότερης πυκνότητας.

Το βάθος διείσδυσης της φλέβας παραμένει στο z_{max} στιγμιαία ενώ στη συνέχεια ελαττώνεται λόγω της αντίθετα κινούμενης δακτυλιοειδούς ροής, η οποία συμπαρασύρει ελαφρύτερο ρευστό από την κατερχόμενη φλέβα, προσδίδοντάς της ορμή αντίθετης κατεύθυνσης με αποτέλεσμα να την επιβραδύνει. Η φλέβα περιέρχεται σε κατάσταση μόνιμης δίαιτας (steady state) και το βάθος διείσδυσης σταθεροποιείται σε μια τιμή $z_s<z_{max}$ (σχήμα 1.3). Όταν η ανερχόμενη ροή πλησιάσει την ελεύθερη επιφάνεια του αποδέκτη, η φλέβα αρχίζει να διαχέεται ακτινικά μέχρι να φτάσει τα κατακόρυφα όρια του αποδέκτη σχηματίζοντας τη λεγόμενη διεπιφάνεια (interface) μεταξύ αναμεμειγμένου ρευστού και ρευστού του αποδέκτη, η οποία σταδιακά κατέρχεται προς το στόμιο της φλέβας.



Σχήμα 1.3 Κατακόρυφη φλέβα με αρνητική άνωση. Αρχικό στάδιο διάχυσης (transient state) κατά το οποίο η φλέβα διεισδύει μέχρι το μέγιστο βάθος z_{max}.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 1.4 Κατακόρυφη φλέβα με αρνητική άνωση. Κατάσταση μόνιμης δίαιτας (steady state) κατά την οποία η φλέβα αλλάζει φορά προς τα πάνω, περικλείοντας την κατερχόμενη ροή, και το βάθος διείσδυσης σταθεροποιείται σε βάθος $z_s<z_{max}$.

1.4 Διαστατική ανάλυση

Σε μια απλή κυκλική φλέβα τα μοναδικά αρχικά χαρακτηριστικά είναι η παροχή Q και η ειδική ορμή M, με βάση τις οποίες οι Fischer *et al*. (1979) προτείνουν την κλίμακα μήκους l_Q η οποία ορίζεται ως:

$$l_Q = \frac{Q}{M^{1/2}} \tag{1.4}$$

και είναι ίση με την τετραγωνική ρίζα της επιφάνειας του ακροφυσίου. Σε μια ανωστική φλέβα με αρχικά χαρακτηριστικά Q, M και B, οι ίδιοι συγγραφείς προτείνουν μια δεύτερη κλίμακα μήκους l_M που, εκτός από τα αδρανειακά, εμπεριέχει και τα ανωστικά χαρακτηριστικά της φλέβας:

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \tag{1.5}$$

Ο λόγος των παραπάνω κλιμάκων ονομάζεται αρχικός αριθμός Richardson R_0 της φλέβας:

$$R_0 = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{\left(g_0^{'} D\right)^{1/2}}{W} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{Fr} \tag{1.6}$$

όπου Fr είναι ο πυκνομετρικός αριθμός Froude και g'_0 η ανωστική επιτάχυνση ίση με:

$$g'_0 = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} g \tag{1.7}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Συμπερασματικά, η κλίμακα μήκους l_Q εκφράζει το αρχικό μέγεθος (διάμετρο ακροφυσίου) της φλέβας, η κλίμακα l_M προσδιορίζει την απόσταση από την έξοδο της φλέβας στην οποία οι ανωστικές δυνάμεις γίνονται σημαντικές, ενώ ο αριθμός Richardson προσδιορίζει τη συμπεριφορά της φλέβας (εάν είναι R_0=0 τότε συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα ενώ εάν R_0 είναι της τάξης του 0.6 και άνω τότε συμπεριφέρεται σαν πλούμιο). Σε απόσταση z αρκετών διαμέτρων από το ακροφύσιο όπου η φλέβα έχει αναπτυχθεί πλήρως θεωρούμε την κατανομή της μέσης ταχύτητας w=w(r,z) και μέσης διαφοράς πυκνότητας Δρ=Δρ(r,z). Από τα μεγέθη αυτά μπορούν να υπολογιστούν η ογκομετρική παροχή μ(z) (όγκος ρευστού), η ειδική ορμή ρευστού m(z) και η ειδική άνωση ρευστού β(z) που διέρχονται από μία διατομή A της φλέβας στη μονάδα του χρόνου, με την χρήση των ολοκληρωμάτων:

$$\mu(z) = \int_A w(r,z)dA \tag{1.8}$$

$$m(z) = \int_A w^2(r,z)dA \tag{1.9}$$

$$\beta(z) = \int_A g\,\frac{\Delta\rho(r,z)}{\rho_o}\,w(r,z)dA \tag{1.10}$$

Με βάση τις παραπάνω παραμέτρους ροής ορίζεται ο αριθμός Richardson της ροής R(z) σε απόσταση z από το ακροφύσιο ώς:

$$R(z) = \frac{\mu\beta^{1/2}}{m^{5/4}} \tag{1.11}$$

Στην περιοχή μιας κατακόρυφης ανωστικής φλέβας με θετική άνωση οι Papanicolaou & List (1988) έδειξαν ότι για z/l_M<<1 η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή (jet), ενώ για z/l_M>>1 σαν πλήρως ανωστική (plume). Πρακτικά, για z/l_M<1 η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή, για z/l_M>5 σαν πλήρως ανωστική ενώ η περιοχή 1<z/l_M<5 αποτελεί μια μεταβατική κατάσταση. Στην απλή φλέβα (z/l_M<1) ισχύει R_0→0 επειδή B→0. Επίσης για z/l_M<1 (περιοχή απλής φλέβας) οι Papanicolaou & List (1988) επιβεβαίωσαν με μετρήσεις ότι R(z)~z. Για αδιάστατη απόσταση z/l_M>5 (περιοχή πλουμίου) προτείνουν R=R_p=0.63 που αποτελεί και την οριακή τιμή του αριθμού Richardson (αριθμός Richardson πλουμίου). Γενικώς, σε φλέβες με αρχική ορμή και άνωση, ο βαθμός συμπεριφοράς μιας φλέβας σαν πλούμιο, σε περιοχές όπου z/l_M>1 δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως, με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από μετρήσεις στις περιοχές αυτές να είναι διφορούμενα.

Οι Kokkalis & Papanicolaou (2008) χρησιμοποιώντας διαστατική ανάλυση έδειξαν ότι σε κατακόρυφη φλέβα με αρνητική άνωση, η οποία διαχέεται σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη διαφορετικής πυκνότητας, το κανονικοποιημένο βάθος διείσδυσης z/l_M είναι συνάρτηση του αρχικού αριθμού Richardson, δηλαδή:

$$\frac{z}{l_M} = f(R_0) \tag{1.12}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σημαντική διαφοροποίηση στην ανάλυση συνιστά το μέγεθος της ορμής της φλέβας κατά την έξοδο από το ακροφύσιο (αρχική ποσότητα κίνησης) και η αρχική άνωση. Γενικά στις φλέβες υπό άνωση η επιρροή των μεγεθών αυτών εκτείνεται μεν σε όλο το μήκος της φλέβας αλλά διαφοροποιείται συνεχώς ανάλογα την απόσταση από την έξοδο. Στην περιοχή πλησίον του ακροφυσίου κυριαρχούν οι δυνάμεις ορμής ενώ κοντά στο βάθος σταθεροποίησης (z_s) κυριαρχούν οι δυνάμεις άνωσης.

Σε περίπτωση που η αρχική ορμή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αρνητική ανωστική δύναμη (ή όταν R_0<<1) η παραπάνω σχέση είναι ανεξάρτητη από τον αρχικό αριθμό Richardson της φλέβας, πράγμα που σημαίνει ότι:

$$\frac{z_s}{l_M} = C \tag{1.13}$$

όπου C είναι μια σταθερά. Οι Kokkalis & Papanicolaou (2008) έδειξαν επίσης ότι σε κατακόρυφη θερμαινόμενη κυκλική φλέβα με αρνητική άνωση και αριθμό Richardson μικρότερο του 0.2 το μέγιστο βάθος διείσδυσης z_{max} /l_M είναι περίπου ίσο με 3, ενώ το κανονικοποιημένο μέσο σταθεροποιημένο βάθος διείσδυσης z_s /l_M είναι περίπου ίσο με 2, δηλαδή το βάθος διείσδυσης z_s είναι περίπου 2l_M (σχήμα 1.3). Στα πειράματα της παραπάνω όπως και της παρούσας εργασίας ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώθηκε, όχι μόνο σε κατακόρυφες φλέβες που διατηρούν την αρχική τους άνωση (φλέβες αλατόνερου σε καθαρό νερό), αλλά και στις θερμαινόμενες φλέβες σε κρύο νερό στις οποίες η αρχική άνωση μειώνεται σαν συνάρτηση του ρυθμού αραίωσης, λόγω της μεταβολής του συντελεστή θερμικής διαστολής του νερού με τη θερμοκρασία.

1.5 Ρυθμός αραίωσης

Η πυκνότητα του νερού στον αποδέκτη είναι διαφορετική από την πυκνότητα του νερού της φλέβας και αυτό οφείλεται στις διαφορετικές θερμοκρασίες. Η διαφορά αυτή της πυκνότητας προκαλεί την ανωστική δύναμη η οποία επιδρά στη φλέβα αλλάζοντας τη διεύθυνση προς την οποία αυτή κινείται αρχικά. Το θερμό νερό της φλέβας όταν εξέρχεται από το ακροφύσιο αναμιγνύεται με το νερό του αποδέκτη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αραίωση, δηλαδή μείωση της αρχικής θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ νερού της φλέβας και αποδέκτη που προέρχεται από τη μείξη των δύο υγρών. Η μέση αραίωση μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με τη χρήση του συντελεστή S σε κάποιο τυχαίο σημείο του πεδίου ροής και είναι ίση με:

$$S = \frac{T_0 - T_a}{T - T_a} \tag{1.16}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

όπου:

T_0: Η θερμοκρασία της φλέβας.

T_a: Η θερμοκρασία του αποδέκτη.

T: Η χρονικά μέση (time-averaged) μετρούμενη θερμοκρασία στο ζητούμενο σημείο.

Η αραίωση στον άξονα της φλέβας μπορεί να εκφραστεί αδιάστατα, σύμφωνα με τη σχέση που προτείνουν οι Papanicolaou & List (1987) και Kokkalis & Papanicolaou (2008):

$$\frac{S_c l_Q}{z} = \frac{T_0 - T_a}{T_c - T_a} \frac{Q}{z\sqrt{M}} \tag{1.17}$$

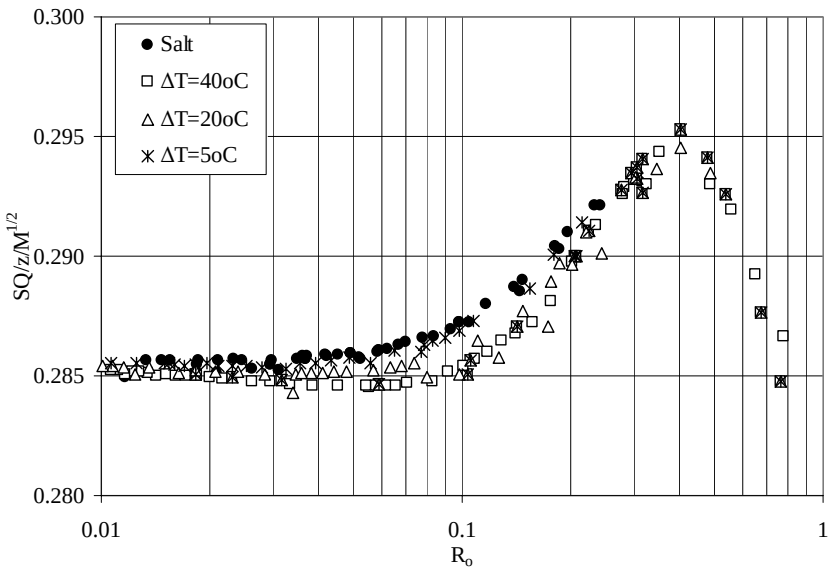
ή σύμφωνα με τη σχέση του Jirka (2004):

$$\frac{S_c}{F_r} = \frac{1}{F_0} \frac{T_0 - T_a}{T_c - T_a} \tag{1.18}$$

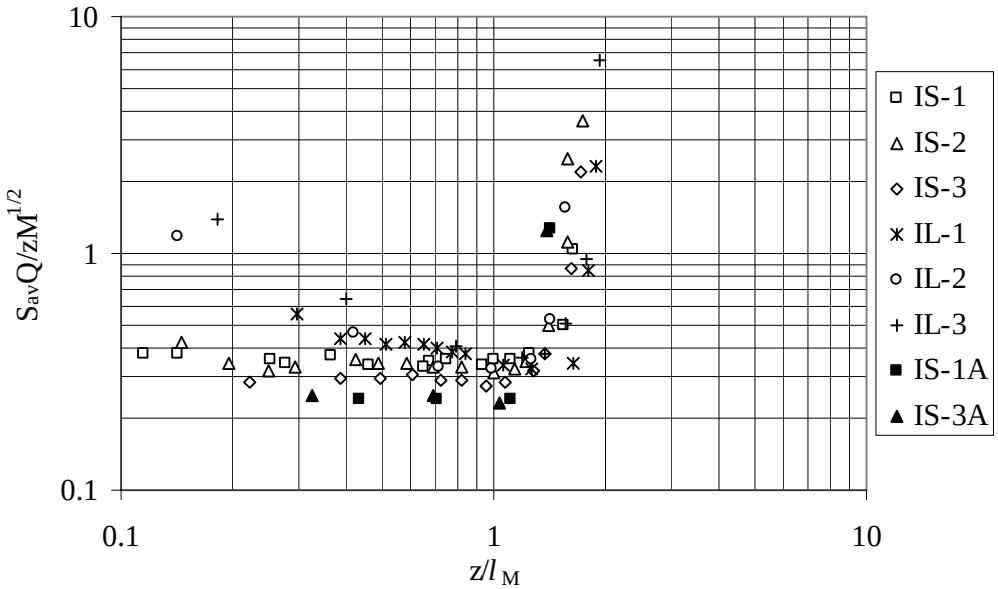
όπου T_c είναι η μέση μετρούμενη θερμοκρασία στον άξονα της φλέβας.

Οι παραπάνω σχέσεις είναι απόρροια της διαστατικής ανάλυσης των Papanicolaou & List (1987, 1988) οι οποίοι απέδειξαν ότι η αδιάστατη αραίωση $S_c\left(l_Q / z\right)$ είναι σταθερή για απλές φλέβες ($z \ll l_M$) ενώ είναι ανάλογη του λόγου $\left(z / l_M\right)^{2/3}$ στην περιοχή πλουμίου ($z \gg l_M$). Οι Papanicolaou & Kokkalis (2008) υπολόγισαν την κανονικοποιημένη μέση αραίωση $S_{ave}\left(l_Q / z\right)$, εφαρμόζοντας ένα μονοδιάστατο μοντέλο, την οποία συνέκριναν με τα δεδομένα των Seban *et al.* (1978) κατάλληλα αδιαστατοποιημένα. Η υπολογισμένη μέση διάλυση στο σημείο αναστροφής της ροής σε φλέβες (βάθος διείσδυσης z_s/l_M) βρέθηκε από τους Papanicolaou & Kokkalis (2008) ότι είναι 0.285 για μικρούς αρχικούς αριθμούς Richardson (<0.10). Το αποτέλεσμα αυτό συμφωνεί γενικά με τις τιμές μέσης αραίωσης που προέκυψαν από τις μετρήσεις των Seban *et al.* (1978), που κυμαίνονται σε ένα εύρος 0.30~0.40 για $0.5<z/l_M<2$ ενώ απειρίζονται για $z/l_M>2$ (σχήματα 1.5 και 1.6).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 1.5 Υπολογισμένη αδιαστατοποιημένη μέση αραίωση θερμαινόμενης φλέβας στο μέγιστο βάθος διείσδυσης z_{max} σαν συνάρτηση του αρχικού αριθμού Richardson (Papanicolaou & Kokkalis 2008).



Σχήμα 1.6 Αδιαστατοποιημένη μέση αραίωση θερμαινόμενης φλέβας αέρα σαν συνάρτηση της αδιάστατης απόστασης z/l_M από το ακροφύσιο

(Papanicolaou & Kokkalis 2008 από τα δεδομένα των Seban *et al.* 1978).

1.6 Αντικείμενο της εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μέτρηση των χαρακτηριστικών της τύρβης σε μια θερμαινόμενη φλέβα νερού αρνητικής άνωσης, που εκβάλλει κατακόρυφα σε ψυχρό (θερμοκρασίας δωματίου) νερό. Συγκεκριμένα, με τη χρήση μεθοδολογιών σημειακής θερμομέτρησης με αισθητήρες ταχείας απόκρισης, (βλ. Παπανικολάου & Παλαμιτζόγλου 2006 και Michas &

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Papanicolaou 2008 σχετικά με μετρήσεις θερμοκρασίας σε οριζόντια ανωστική φλέβα) πρόκειται να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της τύρβης και συγκεκριμένα η κατανομή της μέσης θερμοκρασίας και της έντασης της τύρβης σε διατομές εγκάρσιες στη διεύθυνση της κίνησης της φλέβας, οι οποίες όμως διέρχονται από τον άξονά της. Παράλληλα θα μελετηθούν οι φασματικές ιδιότητες της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο υγρό της φλέβας και αυτό του ακίνητου αποδέκτη καθώς επίσης και ο ρυθμός της μέσης αδιαστατοποιημένης αραίωσης κατά μήκος του άξονα διάχυσης της φλέβας.

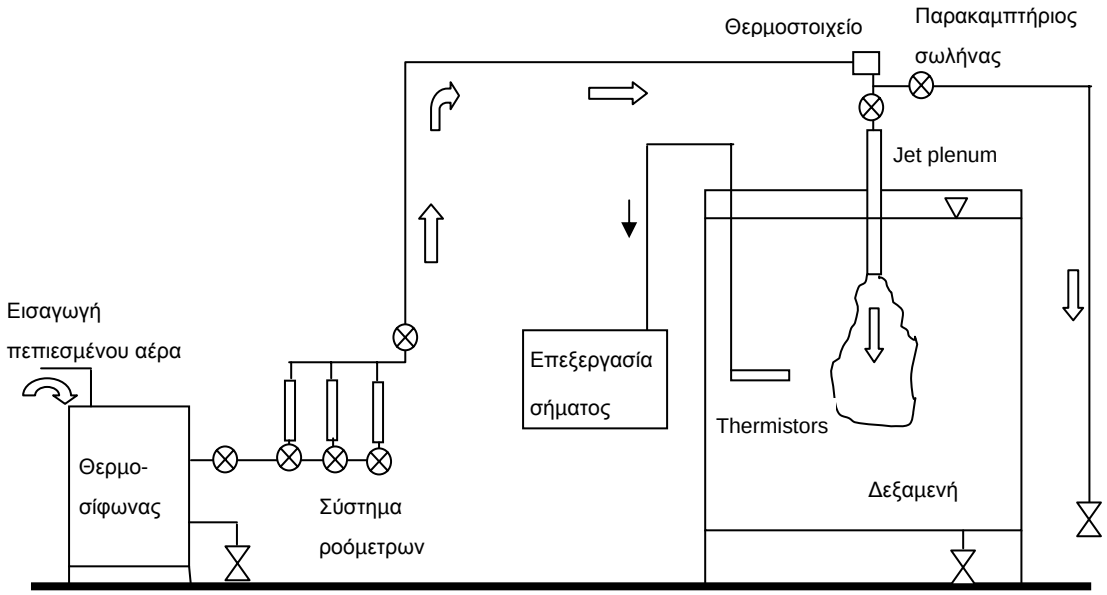
Οι μετρήσεις θερμοκρασίας πρόκειται να υλοποιηθούν σε συγκεκριμένες κατακόρυφες αποστάσεις από το ακροφύσιο καλύπτοντας ολόκληρο το μήκος διάχυσης, από την έξοδο της φλέβας έως και βάθος $2l_M$. Συγκεκριμένα θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις περί τις αποστάσεις $0.5l_M$. l_M. $1.50l_M$ και $2l_M$, στο επίπεδο της οπής του ακροφυσίου (έξοδος της φλέβας) καθώς επίσης και σε διατομές υπεράνω του επιπέδου του ακροφυσίου (περιοχή καθαρά θετικής άνωσης). Ενδεικτικές μετρήσεις πρόκειται να γίνουν και σε άλλες αποστάσεις όπως π.χ. σε απόσταση 0.25 l_M, 0.75 l_M και 1.25 l_M από το ακροφύσιο. Ο αρχικός αριθμός Richardson πρόκειται διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα περί την περιοχή $0.01<R_0<0.2$ που σημαίνει ότι η φλέβα αρχικά θα συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα (jet).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

2.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα: (1) Ορθογωνική δεξαμενή, (2) Σύστημα ανάρτησης του ακροφυσίου, (3) Σύστημα τριών ροόμετρων, (4) Θερμοσίφωνα, (5) Δίκτυο τροφοδοσίας της φλέβας, (6) Θερμοστοιχείο ταχείας απόκρισης με εξωτερικό καταγραφικό σύστημα, (7) Συστοιχία πέντε αισθητήρων ταχείας απόκρισης (thermistors), (8) Μηχανικό βραχίονα (τραβέρσα) για την μετακίνηση των thermistors, (9) Ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή των δεδομένων, (10) Σύστημα φωτισμού και οπτικοποίησης της φλέβας και (11) Ψηφιακή βιντεοκάμερα για τη λήψη εικόνων. Μία συνοπτική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Πειραματική διάταξη.

2.1.1 Ορθογωνική δεξαμενή. Η δεξαμενή έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με εσωτερικές διαστάσεις 0.80×0.80 m^2 και βάθος 1.00 m (σχήμα 2.2). Οι ακμές της είναι μεταλλικές, οι κατακόρυφες πλευρές είναι κατασκευασμένες από θερμικά κατεργασμένο γυαλί υψηλής αντοχής πάχους 1.25 cm, ενώ ο πυθμένας από plexiglass πάχους 1.50 cm. Η έδρα της οροφής είναι κενή (ακάλυπτη) και από εκεί γίνεται η πλήρωση της δεξαμενής και η ανάδευση του νερού στο εσωτερικό της. Στη στεφάνη της δεξαμενής εδράζονται το σύστημα ανάρτησης του ακροφυσίου και ο μηχανικός βραχίονας για την κίνηση των thermistors. Στον πυθμένα υπάρχει οπή για την εκκένωση της δεξαμενής, η οποία συνδέεται, μέσω μιας βάνας και ενός πλαστικού σωλήνα, με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

το δίκτυο αποχέτευσης του εργαστηρίου. Η δεξαμενή εδράζεται πάνω σε μεταλλικό βάθρο ύψους 0.50 m.

Στις δύο απέναντι έδρες της δεξαμενής έχουν σχεδιαστεί, με ανεξίτηλο μαρκαδόρο, τετραγωνικοί κάνναβοι πλευράς 5 cm. Η αρχή τους έχει σχεδιαστεί σε απόσταση 5 cm από το χείλος της δεξαμενής.

Σχήμα 2.2 Δεξαμενή.

2.1.2 Σύστημα ανάρτησης του ακροφυσίου. Αποτελείται από έναν κυλινδρικό σωλήνα από PVC μήκους 25 cm με εσωτερική διάμετρο 4 cm στο ένα άκρο του οποίου στερεώνεται το ακροφύσιο (σχήμα 2.3). Το άλλο άκρο του σωλήνα συνδέεται με την παροχή του θερμού νερού. Ο σωλήνας εφαρμόζει σε υποδοχή που είναι κολημμένη επάνω σε μία επίπεδη μεταλλική πλάκα η οποία στερεώνεται με κοχλίες στη στεφάνη της δεξαμενής. Το όλο σύστημα δημιουργίας της φλέβας (jet plenum) τοποθετείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ακροφύσιο να είναι οριζόντιο και κεντραρισμένο έτσι ώστε η φλέβα να είναι κατακόρυφη με άξονα τον άξονα συμμετρίας της δεξαμενής (κατακόρυφος από το σημείο τομής των διαγωνίων του πυθμένα της δεξαμενής).

Τα ακροφύσια είναι κατασκευασμένα από διαφανές πλαστικό με διαμέτρους 0.50, 0.75 και 1.00 cm, με ομαλή καμπύλη μετάβασης από την εσωτερική διάμετρο των 4 cm του σωλήνα εφαρμογής ως τη διάμετρο του ακροφυσίου. Για την αποφυγή διαρροών η προσαρμογή των ακροφυσίων στον πλαστικό σωλήνα έγινε με τη χρήση ενός ορειχάλκινου συνδετήρα με σπείρωμα, πάνω στον οποίο κοχλιώνονται τόσο το ακροφύσιο όσο και ο σωλήνας, ενώ μεταξύ τους τοποθετείται πλαστικός δακτύλιος για καλύτερη εφαρμογή. Επίσης, για την καταστροφή των μεγάλων δινών κατά την είσοδο του νερού από το σωλήνα εισόδου στη συσκευή δημιουργίας της φλέβας (σωλήνα από PVC), έχει τοποθετηθεί κυψελοδιάφραγμα από πλαστικά καλαμάκια διαμέτρου 0.5 cm και μήκους 6 cm στο μέσο του σωλήνα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σχήμα 2.3 Σύστημα ανάρτησης του ακροφυσίου.

2.1.3 Σύστημα τριών ροόμετρων. Το σύστημα των τριών ροόμετρων παρεμβάλλεται μεταξύ της συσκευής δημιουργίας της φλέβας και του θερμοσίφωνα. Αποτελείται από τρία ροόμετρα με διαφορετικό εύρος παροχής το κάθε ένα (σχήμα 2.4). Τα ροόμετρα συνδέονται παράλληλα με το σωλήνα τροφοδοσίας της φλέβας. Στο σωλήνα εισόδου στο σύστημα των ροόμετρων έχει τοποθετηθεί σφαιρική βάνα ώστε να είναι δυνατή η διακοπή της ροής χωρίς κάποιο από τα ροόμετρα να είναι υπό πίεση, καθώς και στην έξοδο του κάθε ενός χωριστά, έτσι ώστε να επιλέγεται ποιό θα χρησιμοποιείται κάθε φορά. Το εύρος παροχής για το πρώτο ροόμετρο είναι 0.06~0.55 l/min, για το δεύτερο 0.20~2.00 l/min και για το τρίτο 2.00~10.00 l/min. Η επιθυμητή παροχή της φλέβας ρυθμίζεται με μία βάνα ακριβείας με βερνιέρο τοποθετημένη στον κοινό σωλήνα εξόδου των τριών ροόμετρων. Το σύστημα των ροόμετρων στερεώνεται κατακόρυφα σε ξύλινη βάση η οποία εδράζεται στο μεταλλικό βάθρο της δεξαμενής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σχήμα 2.4 Σύστημα τριών ροόμετρων.

2.1.4 Θερμοσίφωνας. Ο θερμοσίφωνας είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα και έχει σχήμα κυλινδρικό με διάμετρο 0.50 m και ύψος 1.00 m (σχήμα 2.5). Εξωτερικά περιβάλλεται από μεταλλικό ανοξείδωτο κάλυμμα. Η χωρητικότητά του είναι 60 l ενώ είναι σχεδιασμένος να αντέχει σε πίεση 10 atm. Στο επάνω μέρος υπάρχει είσοδος νερού και είσοδος για πεπιεσμένο αέρα, πάνω στην οποία έχει προσαρμοστεί μανόμετρο για τον έλεγχο της πίεσης εισόδου. Και οι δύο είσοδοι διαθέτουν ταχυσυνδέσμους και βάνες για λόγους ασφαλείας. Στον πυθμένα υπάρχει βάνα εκκένωσης του θερμοσίφωνα που καταλήγει, μέσω πλαστικού σωλήνα, στο δίκτυο αποχέτευσης του εργαστηρίου. Στο κατακόρυφο τοίχωμα του θερμοσίφωνα έχει τοποθετηθεί ο δείκτης θερμοκρασίας νερού στο μέσον και η έξοδος τροφοδοσίας χαμηλότερα η οποία συνδέεται με το σωλήνα εισόδου των ροόμετρων. Ο θερμοσίφωνας διαθέτει κυκλοφορητή, για να αποφεύγεται η δημιουργία θερμικής στρωμάτωσης εντός του δοχείου κατά το στάδιο της θέρμανσης του νερού, ενώ εξωτερικά του θερμοσίφωνα και παράλληλα με αυτόν έχει τοποθετηθεί ένα γυάλινο σταθμήμετρο για τον έλεγχο της στάθμης του νερού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σχήμα 2.5 Θερμοσίφωνας.

2.1.5 Δίκτυο τροφοδοσίας της φλέβας και θερμοστοιχείο ταχείας απόκρισης. Το δίκτυο τροφοδοσίας της φλέβας αποτελείται από πλαστικό σωλήνα κυκλικής διαμέτρου, επενδεδυμένο με θερμομονωτικό υλικό ώστε να αποφεύγεται η διαφυγή θερμότητας στο περιβάλλον. Το δίκτυο αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα, το σωλήνα σύνδεσης του θερμοσίφωνα με το σύστημα ροόμετρων και το σωλήνα σύνδεσης του συστήματος ροόμετρων με τη συσκευή δημιουργίας της φλέβας. Πριν από το σημείο του σωλήνα εισόδου στο σωλήνα PVC, όπου εφαρμόζονται τα ακροφύσια, έχει τοποθετηθεί θερμοστοιχείο ταχείας απόκρισης για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της φλέβας. Στη συνέχεια τοποθετείται με ΤΑΥ παρακαμπτήριος σωλήνας ο οποίος καταλήγει στο δίκτυο αποχέτευσης του εργαστηρίου (σχήμα 2.6). Το σύστημα αυτό έχει σκοπό να απομακρύνει το νερό του δικτύου τροφοδοσίας της φλέβας, μέχρις ότου η θερμοκρασία του αποκτήσει σταθερή τιμή πριν την είσοδο στο σωλήνα PVC. Τότε ο παρακαμπτήριος σωλήνας απομονώνεται με βάνα και το νερό αφήνεται να ρέει προς τη συσκευή δημιουργίας της φλέβας.

Το θερμοστοιχείο ταχείας απόκρισης PT100 είναι τύπου πλατίνας με αντίσταση 100 Ω στους 0 ^{o}C. Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της αντίστασης του θερμοστοιχείου. Οι αυξομειώσεις της θερμοαντίστασης μετατρέπονται σε ηλεκτρικό σήμα και καταγράφονται ψηφιακά σε ηλεκτρονικό καταγραφικό όργανο. Η ρύθμισή του έγινε με εμβάπτιση της θερμοαντίστασης σε νερό για διαφορετικές θερμοκρασίες. Η καμπύλη ρύθμισης του θερμοστοιχείου προκύπτει από την εξίσωση:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

$$T = \frac{R_0 - \frac{V_0}{I_E}}{-0.5(R_0 A + \sqrt{R^2{}_0 A^2 - 4R_0 B(R_0 - \frac{V_0}{I_E})})} \qquad (2.1)$$

όπου:

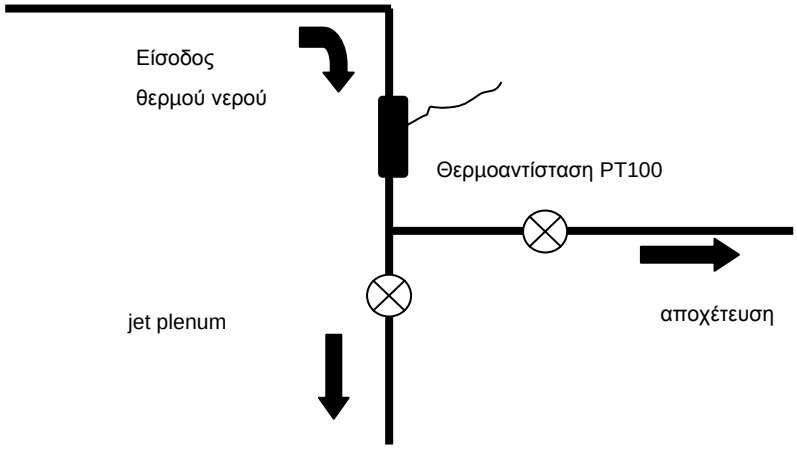
I_E = 1 mA πηγή σταθερού ρεύματος.

A = 3.9 x 10^{-3}

B = -5.80195 x 10^{-3}

R_0 = 100 Ω.

V_0 = Τάση στα άκρα του PT100.



Σχήμα 2.6(a) Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας ΤΑΥ σύνδεσης παρακαμπτήριου σωλήνα και συσκευής τροφοδοσίας της φλέβας με το δίκτυο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σχήμα 2.6(b) ΤΑΥ σύνδεσης παρακαμπτήριου σωλήνα και συσκευής τροφοδοσίας της φλέβας με το δίκτυο. Διακρίνεται το θερμοστοιχείο ταχείας απόκρισης.

2.1.6 Συστοιχία πέντε αισθητήρων ταχείας απόκρισης (thermistors). Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας της φλέβας χρησιμοποιήθηκε μια συστοιχία από thermistors (σχήμα 2.7 και 2.8). Ο αισθητήρας ταχείας απόκρισης (thermistor) είναι μινιατούρα πάχους περίπου 0.2 mm που διαθέτει αντίσταση κατασκευασμένη από οξείδια μετάλλου (νικελίου, κοβαλτίου, τιτανίου κ.α.) που περιβάλλεται από γυαλί. Όταν βρίσκεται μέσα στο πεδίο ροής ενός ρευστού, τότε η αντίστασή του αυξομειώνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του ρευστού. Οι αυξομειώσεις της αντίστασης προκαλούν μεταβολές στο δυναμικό στο ηλεκτρικό κύκλωμα του thermistor που καταγράφονται ψηφιακά με υπολογιστή και το κατάλληλο λογισμικό δειγματοληψίας.

Οι thermistors P20BA103J που χρησιμοποιήθηκαν είναι κατασκευασμένοι από την Thermometrics Inc., τύπου NTC (Negative Temperature Coefficient) που σημαίνει ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η αντίστασή του μειώνεται. Η ονομαστική τους αντίσταση στους 25 ^{o}C είναι 10 KΩ με σφάλμα 5%. Η σχέση αντίστασης θερμοκρασίας είναι:

$$Tk = \frac{1}{(a + b(\ln Rt) + c(\ln Rt)^3)} \qquad (2.2)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

ενώ οι σταθερές που δίδονται από τον κατασκευαστή είναι:

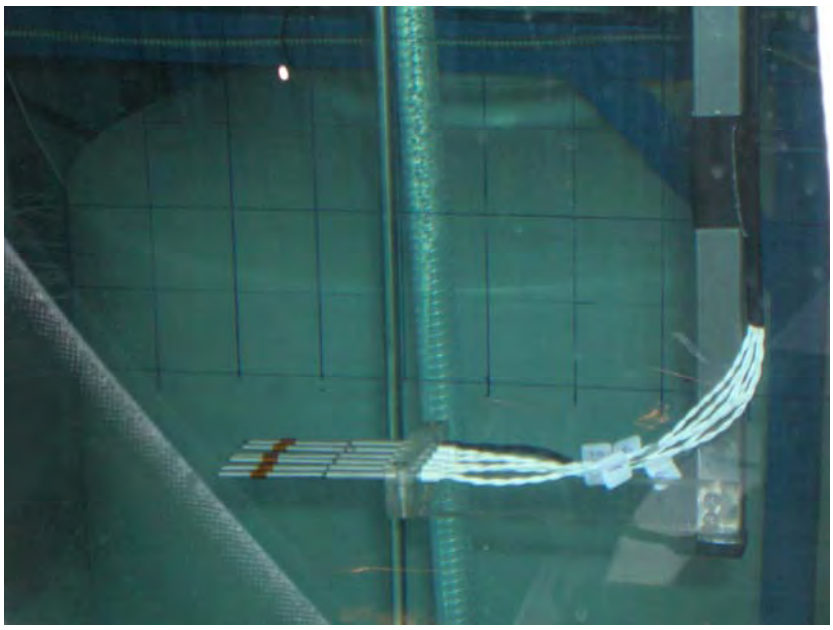
$a = 7.587 \times 10^{-4}$

$b = 2.808 \times 10^{-4}$

$c = 8.827 \times 10^{-4}$

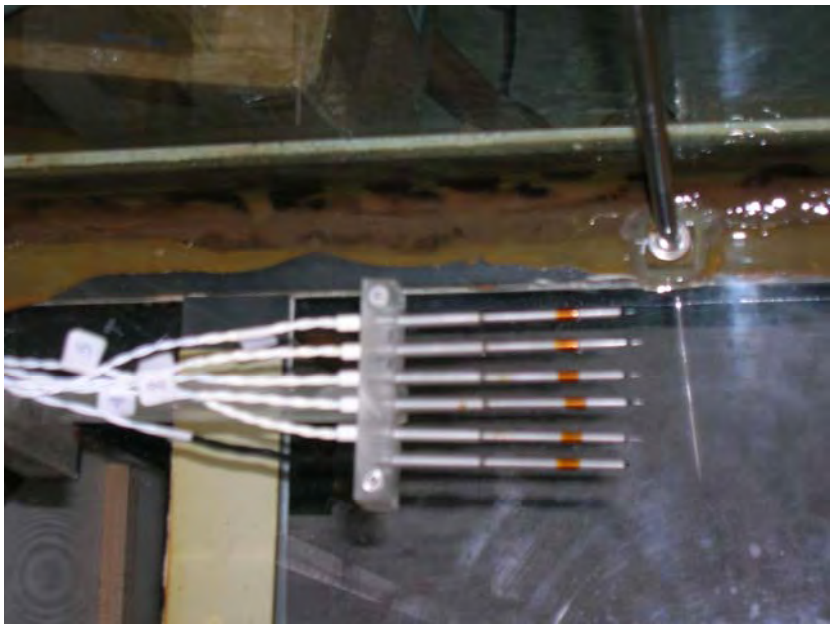
Η απόκριση του παραπάνω θερμίστορα επιτρέπει σημειακή μέτρηση της θερμοκρασίας με συχνότητα έως και 100 Hz. Λόγω του σφάλματος στην αντίσταση των thermistors είναι απαραίτητο να γίνει ρύθμιση (calibration). Η διαδικασία της ρύθμισης γίνεται με εμβάπτιση των thermistors σε νερό, η θερμοκρασία του οποίου μετράται με αναλογικό θερμόμετρο, και σύγκριση των ενδείξεων αυτών με τις ψηφιακές. Ρύθμιση επίσης πρέπει να γίνεται και σε τακτά χρονικά διαστήματα καθώς με την πάροδο του χρόνου οι thermistors παρουσιάζουν μόνιμο σφάλμα καθώς στη σχέση αντίστασης - θερμοκρασίας εμφανίζεται ένας σταθερός συντελεστής (drift ή offset).

Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν πέντε thermistors οι οποίοι προσαρμόστηκαν σε μία υποδοχή από plexiglass και τοποθετήθηκαν σειριακά και σε απόσταση 1 cm μεταξύ τους. Το κάθε thermistor έχει προσαρμοστεί στο άκρο ανοξείδωτου στεγανοποιημένου σωλήνα διαμέτρου 2.5 mm και μήκους 50 mm, που έχει συγκολληθεί σε σωλήνα διαμέτρου 5 mm και μήκους 50 mm. Από το άλλο άκρο του σωλήνα διαμέτρου 5 mm εξέρχεται το καλώδιο σύνδεσης το οποίο καταλήγει με σύνδεσμο BNC σε τερματικό κουτί του προενισχυτή (σχήμα 2.9), το οποίο με τη σειρά του συνδέεται με κάρτα δειγματοληψίας AT-MIO-16E-10 της National Instruments που μετατρέπει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό (σχήμα 2.10). Η τροφοδοσία τάσης των thermistors γίνεται από τροφοδοτικό DC ρεύματος τάσεως 10 mV (σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.7 Thermistors.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

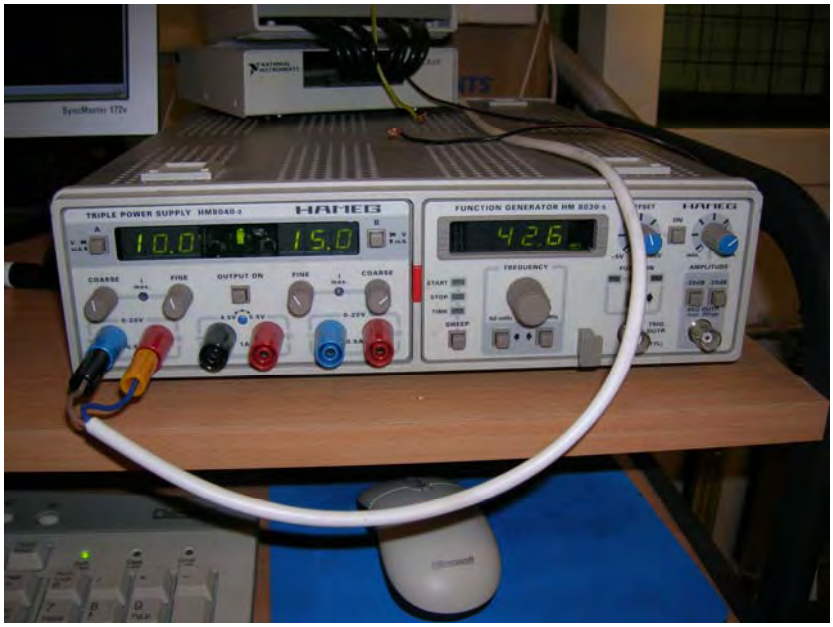


Σχήμα 2.8 Thermistors.

Σχήμα 2.9 Προενισχυτής σήματος thermistors και καταγραφικό θερμοκρασίας εισόδου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σχήμα 2.10 Μετατροπέας αναλογικού σήματος thermistors σε ψηφιακό.

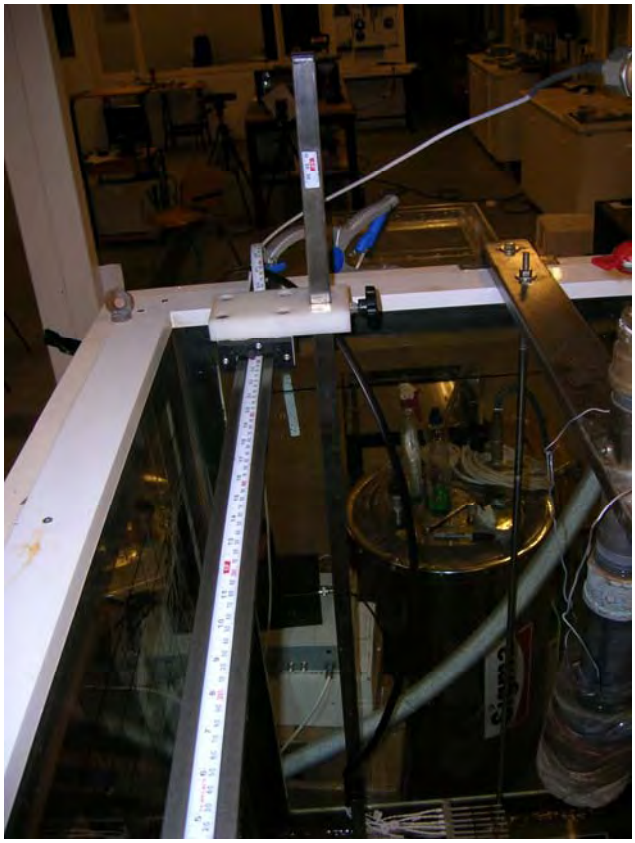


Σχήμα 2.11 Τροφοδοτικό τάσης της συστοιχίας των thermistors.

2.1.7 Μηχανικός βραχίονας για την μετακίνηση των thermistors. Πρόκειται για βραχίονα μήκους 1 m και κοίλης τετραγωνικής διατομής 1×1 cm^2 ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ανοξείδωτο χάλυβα. Στην άκρη του βραχίονα έχει τοποθετηθεί η βάση επάνω στην οποία είναι στερεωμένοι οι thermistors (σχήμα 2.12). Ο βραχίονας εφαρμόζει επάνω σε μία πλαστική επιφάνεια με τρόπο ώστε να μπορεί να μετακινείται κατακόρυφα και να στερεώνεται στο επιθυμητό ύψος με τη βοήθεια ενός κοχλία. Η πλαστική επιφάνεια εδράζεται επάνω σε μία τραβέρσα η οποία αναρτάται στη στεφάνη της δεξαμενής, παράλληλα με το σύστημα ανάρτησης του ακροφυσίου, και έχει την δυνατότητα να μετακινείται δεξιά και αριστερά. Με τον τρόπο αυτό οι thermistors μπορούν να μετακινηθούν

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

σε οποιοδήποτε σημείο του επιπέδου στο οποίο ανήκει ο άξονας της φλέβας. Στο βραχίονα και την τραβέρσα έχει τοποθετηθεί βαθμονόμηση μήκους ώστε να είναι εφικτός ο προσδιορισμός της απόστασης από τον άξονα και του βάθους που έχει τοποθετηθεί η συστοιχία των thermistors.



Σχήμα 2.12 Μηχανικός βραχίονας.

2.1.8 Ηλεκτρονικός υπολογιστής. Ο Η/Υ που χρησιμοποιείται για την καταγραφή των δεδομένων είναι ένας Pentium III με λειτουργικό σύστημα Windows XP (σχήμα 2.13). Στον Η/Υ είναι εγκατεστημένο το λογισμικό Lab View® της National Instruments όπου γίνεται η καταγραφή και αποθήκευση των ενδείξεων των thermistors καθώς και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

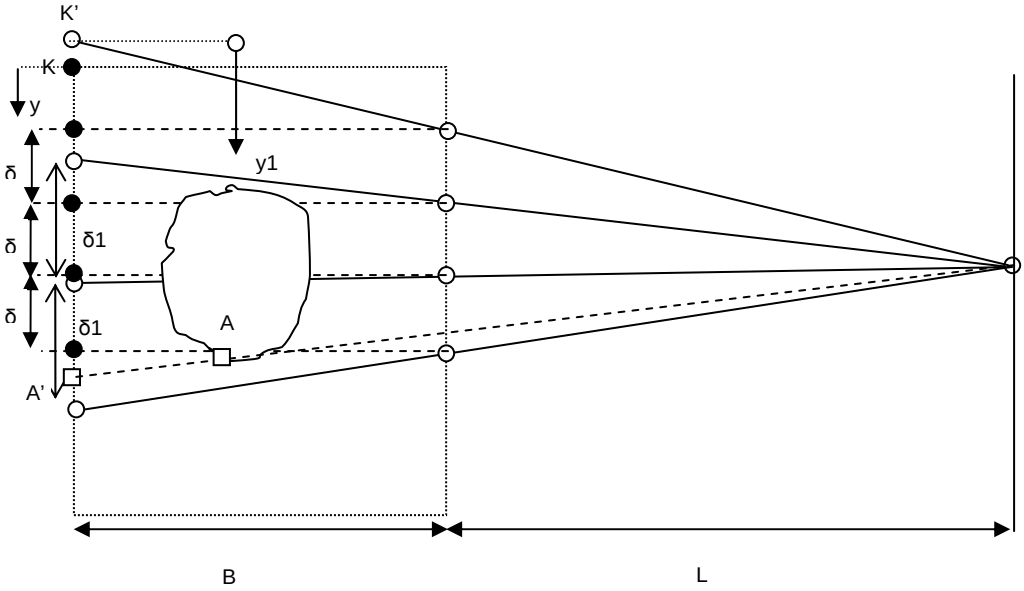
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σχήμα 2.13 Ηλεκτρονικός υπολογιστής και τροφοδοτικό τάσης των thermistors.

2.1.9 Σύστημα φωτισμού και οπτικοποίησης της φλέβας. Για την οπτικοποίηση της φλέβας χρησιμοποιείται ένας προβολέας συγκεντρωτικής δέσμης (σχήμα 2.15) ο οποίος τοποθετείται σε απόσταση περίπου 5 m από την εμπρόσθια πλευρά της δεξαμενής. Στην αντίθετη πλευρά τοποθετείται ημιδιαφανές χαρτί έτσι ώστε να προβάλλεται το σκιαγράφημα της φλέβας που προέρχεται από τη μεταβολή διεύθυνσης των ακτίνων φωτός με τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης στο πεδίο ροής της φλέβας λόγω τοπικών πυκνομετρικών διαφορών. Ο προσδιορισμός της απόστασης από το ακροφύσιο στον άξονα της φλέβας γίνεται όπως φαίνεται στο σχήμα 2.14. Στο διαφανές χαρτί εμφανίζονται δύο κάναβοι, ο κάναβος της οπίσθιας πλευράς και η προβολή του κανάβου της εμπρόσθιας πλευράς της δεξαμενής.

Εάν το πλάτος της δεξαμενής είναι B και η απόσταση του προβολέα από την εμπρόσθια πλευρά είναι L, τότε η διάσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές γραμμές του κανάβου που προβάλλεται είναι (L+B)/L. Η προβολή του ορίου της φλέβας προκύπτει σαν το ημιάθροισμα της προβολής σε σχέση με τους δύο κανάβους. Θα πρέπει όμως να ληφθεί υπ' όψη και η καμπύλωση της ακτίνας φωτός μέσα στο νερό, λόγω αλλαγής του δείκτη διάθλασης, για την εκτίμηση του σφάλματος στη μέτρηση. Από τριγωνική ομοιότητα προκύπτει ότι δ1=δ(L+B)/B και η προβολή του σημείου A (οριακή γραμμή της φλέβας) είναι το σημείο A' του οποίου οι συντεταγμένες ως προς τα συστήματα Ky και K'y' είναι KA' και K'A', το ημιάθροισμα των οποίων δίδει την απόλυτη στάθμη του A. Οι κάναβοι έχουν οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας ώστε αν προβάλλεται οριζόντια οποιοδήποτε σημείο το ενός στο άλλο θα συμπέσει σε σημείο με την ίδια τεταγμένη.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 2.14 Προβολή ορίων της φλέβας.

Σχήμα 2.15 Προβολέας συγκεντρωτικής δέσμης

2.2 Ρύθμιση ροόμετρων. Τα ροόμετρα είναι τα όργανα ρύθμισης της παροχής της φλέβας. Αποτελούνται από έναν κατακόρυφο διαφανή διαβαθμισμένο σωλήνα μέσα στον οποίο κινείται μία μεταλλική σφαίρα. Η σφαίρα, ανάλογα με την εισερχόμενη παροχή (δυναμική άνωση), σταθεροποιείται στην εκάστοτε στάθμη. Η ρύθμιση των ροόμετρων γίνεται με την εξής διαδικασία: Αφού οι σωλήνες του δικτύου πληρωθούν με νερό, ώστε να αποφευχθεί ο εγκλωβισμός φυσαλίδων αέρα, τότε προσδίδεται παροχή στο δίκτυο και σταθεροποιείται η ένδειξη του ροόμετρου σε μία καθορισμένη τιμή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Στη συνέχεια το νερό που εκρέει από την έξοδο της φλέβας συλλέγεται σε έναν κάδο για χρονικό διάστημα περίπου ενός λεπτού. Με τη βοήθεια ογκομετρικών δοχείων υπολογίζεται ο όγκος του νερού που έχει συγκεντρωθεί και με γνωστό το χρόνο προκύπτει η πραγματική παροχή:

$$Q = \frac{V}{t} \tag{2.3}$$

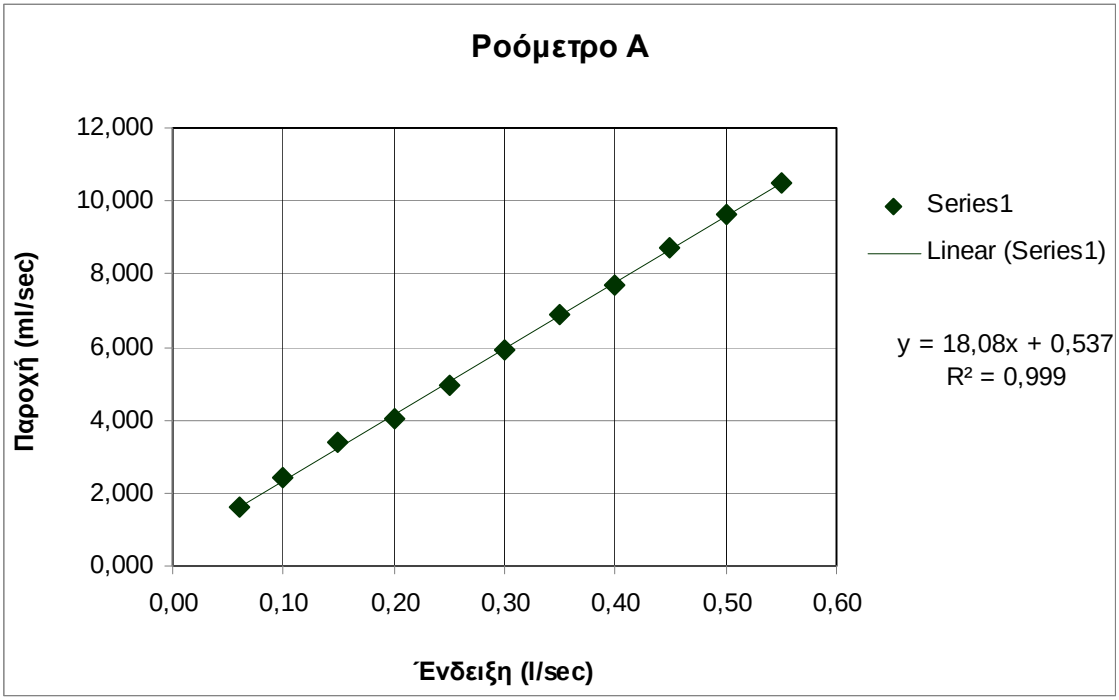
Η διαδικασία αυτή γίνεται για κάθε ένδειξη του ροόμετρου και για κάθε ροόμετρο ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα παριστάνονται σε ένα διάγραμμα μετρήσεων - ενδείξεων και προσδιορίζεται η ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων που συνδέει γραμμικά την ένδειξη F του ροόμετρου με την μετρούμενη παροχή Q. Η εξίσωση της ευθείας αποτελεί και την εξίσωση ρύθμισης του ροόμετρου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

(Παρατήρηση: η πρώτη στήλη δείχνει την ένδειξη του ροόμετρου, η δεύτερη είναι ο χρόνος υπολογισμού της παροχής, η τρίτη είναι ο μετρούμενος όγκος νερού, η τέταρτη είναι η μετρούμενη παροχή, η πέμπτη είναι η διορθωμένη παροχή από την εξίσωση ρύθμισης του ροόμετρου και η έκτη είναι το σφάλμα σε κάθε ένδειξη).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Ροόμετρο Α

Ένδειξη ροόμετρου (l/sec)	Χρόνος (sec)	Μέτρηση (ml)	Παροχή Q (ml/sec)	Διορθωμένη παροχή Q_{com} (ml/sec)	Σφάλμα ΔQ/Q
0.06	60	97	1.62	1.62	-0.003
0.10	60	145	2.42	2.35	0.030
0.15	60	203	3.38	3.25	0.040
0.20	60	243	4.05	4.15	-0.025
0.25	60	297	4.95	5.06	-0.022
0.30	60	354	5.90	5.96	-0.010
0.35	60	414	6.90	6.87	0.005
0.40	60	463	7.72	7.77	-0.007
0.45	60	522	8.70	8.67	0.003
0.50	60	579	9.65	9.58	0.008
0.55	60	630	10.50	10.48	0.002

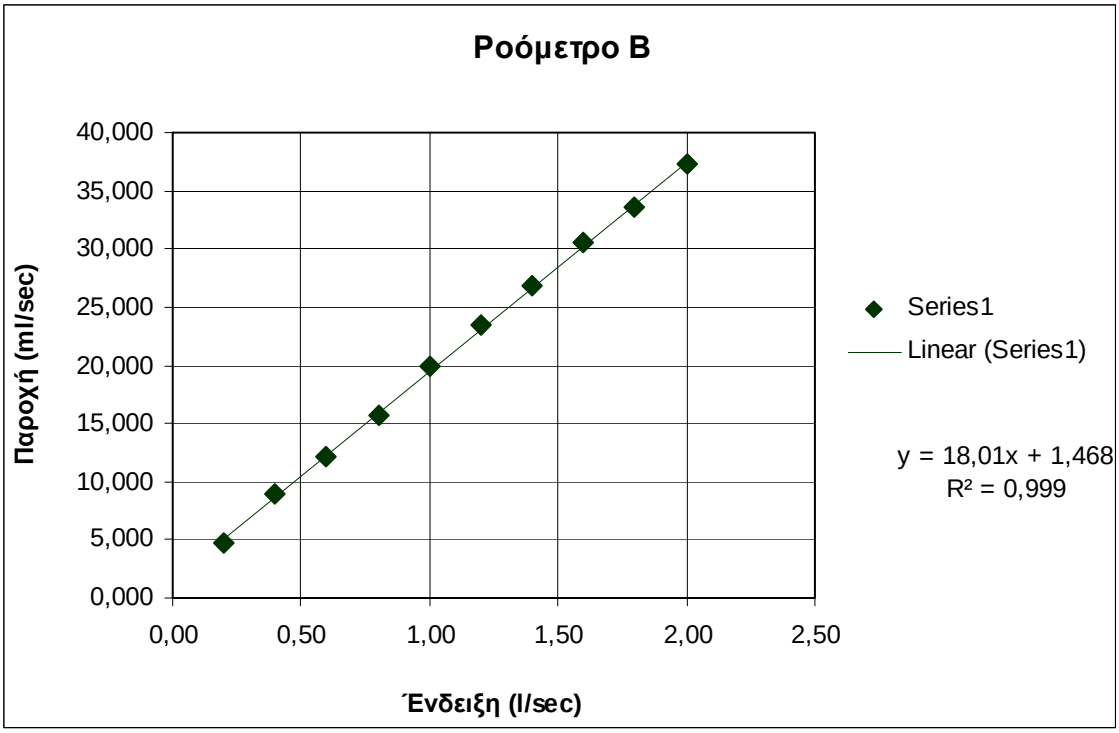


Η εξίσωση ρύθμισης του ροόμετρου είναι y = 18.08x + 0.537

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Ροόμετρο Β

Ένδειξη ροόμετρου (l/sec)	Χρόνος (sec)	Μέτρηση (ml)	Παροχή Q (ml/sec)	Διορθωμένη παροχή Q_{com} (ml/sec)	Σφάλμα ΔQ/Q
0.20	60	281	4.68	5.07	-0.083
0.40	60	532	8.87	8.67	0.022
0.60	60	731	12.18	12.27	-0.007
0.80	60	938	15.63	15.88	-0.016
1.00	60	1194	19.90	19.48	0.021
1.20	60	1407	23.45	23.08	0.016
1.40	60	1610	26.83	26.68	0.006
1.60	60	1834	30.57	30.28	0.009
1.80	60	2012	33.53	33.89	-0.011
2.00	60	2233	37.22	37.49	-0.007

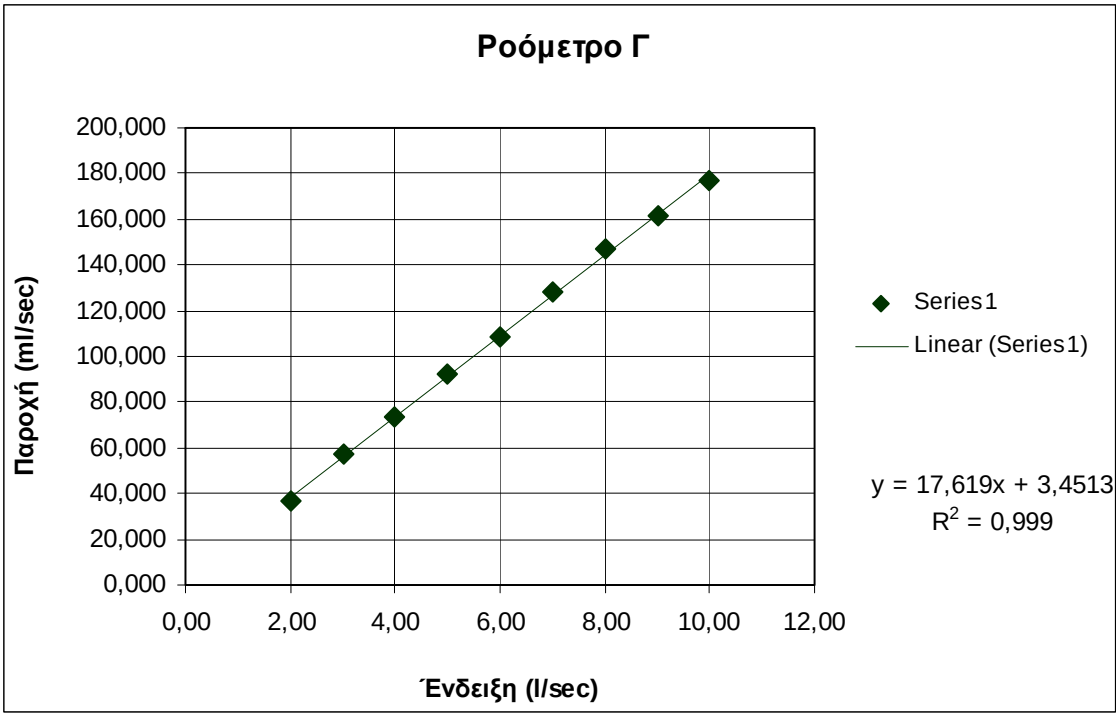


Η εξίσωση ρύθμισης του ροόμετρου είναι y = 18.01x + 1.468

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Ροόμετρο Γ

Ένδειξη ροόμετρου (l/sec)	Χρόνος (sec)	Μέτρηση (ml)	Παροχή Q (ml/sec)	Διορθωμένη παροχή Q_{com} (ml/sec)	Σφάλμα ΔQ/Q
2.00	60	2224	37.07	38.67	-0.043
3.00	60	3417	56.95	56.28	0.012
4.00	60	4424	73.73	73.89	-0.002
5.00	60	5529	92.15	91.50	0.007
6.00	60	6506	108.43	109.11	-0.006
7.00	60	7716	128.60	126.72	0.015
8.00	60	8802	146.70	144.33	0.016
9.00	60	9689	161.48	161.94	-0.003
10.00	60	10641	177.35	179.55	-0.012



Η εξίσωση ρύθμισης του ροόμετρου είναι y = 17.619x + 3.4513

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

2.3 Πειραματική διαδικασία

Η διεξαγωγή ενός τυπικού πειράματος περιλαμβάνει τη διαδικασία που ακολουθεί. Κατ' αρχάς γίνεται μια πρόχειρη εκτίμηση του βάθους στο οποίο θα γίνουν οι μετρήσεις. Με δεδομένη τη διάμετρο του ακροφυσίου και την παροχή (κατά βούληση) γίνεται μία πρόχειρη εκτίμηση της θερμοκρασίας του νερού στο θερμοσίφωνα και του νερού στη δεξαμενή. Τα στοιχεία αυτά επιτρέπουν τον υπολογισμό των δύο κλιμάκων μηκών l_Q και l_M καθώς και του αρχικού αριθμού Richardson R_0. Ο τελευταίος ελέγχεται εάν είναι ανάμεσα στα επιθυμητά όρια (μικρότερος του 0.2) και επιλέγεται η απόσταση (σε συνάρτηση του l_M) που θα τοποθετηθούν οι thermistors. Βέβαια κατά τη διάρκεια του πειράματος μετρώνται οι πραγματικές θερμοκρασίες νερού της φλέβας και του αποδέκτη, οπότε γίνεται εκ νέου υπολογισμός των l_Q, l_M και R_0 και συνεπώς διόρθωση της θέσης των thermistors. Προκειμένου να υπάρχουν συνθήκες πλήρους ανεπτυγμένης ροής, το βάθος μετρήσεων είναι προτιμότερο να βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 20 διαμέτρων από το ακροφύσιο.

Γεμίζουμε το θερμοσίφωνα με νερό και το θερμαίνουμε σε θερμοκρασία της τάξεως των 55~65 ^oC. Ταυτόχρονα γεμίζουμε τη δεξαμενή με καθαρό νερό έως ένα συγκεκριμένο ύψος (η δεξαμενή δεν διαθέτει υπερχείλιση). Εννοείται ότι η δεξαμενή έχει πλυθεί την προηγούμενη ημέρα και διατηρείται σκεπασμένη με νάυλον ώστε να μην εισχωρήσουν αιωρούμενα σωματίδια. Πριν την έναρξη των πειραμάτων το νερό στη δεξαμενή πρέπει να βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας.

Όταν το νερό στο θερμοσίφωνα φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία τότε διακόπτουμε την παροχή ρεύματος και ενεργοποιούμε την παροχή πεπιεσμένου αέρα (2 atm). Ανοίγουμε όλες τις βάνες του συστήματος εκτός από τις βάνες της συσκευής δημιουργίας της φλέβας και των δύο ροόμετρων που δεν χρησιμοποιούνται (σε κάθε πείραμα χρησιμοποιείται μόνο ένα ροόμετρο). Το θερμό νερό διατρέχει το κύκλωμα και διοχετεύεται στην αποχέτευση μέσω του παρακαμπτήριου σωλήνα. Ταυτόχρονα παρακολουθούμε τη θερμοκρασία του νερού στην είσοδο της συσκευής δημιουργίας της φλέβας (σωλήνα από PVC), από την ένδειξη της οθόνης της θερμοαντίστασης PT100. Όταν η θερμοκρασία σταθεροποιηθεί, λαμβάνεται μια μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού στη δεξαμενή (ambient temperature) και εν συνεχεία κλείνει η βάνα του παρακαμπτήριου αγωγού και ανοίγει η βάνα της συσκευής δημιουργίας της φλέβας.

Για την οπτικοποίηση της ροής της φλέβας γίνεται συσκότιση του εργαστηρίου και ενεργοποιούμε τον προβολέα συγκεντρωτικής δέσμης. Έτσι είναι δυνατή η απεικόνιση του σκιαγραφήματος της φλέβας επάνω στο ημιδιαφανές χαρτί που είναι προσαρμοσμένο στην απέναντι πλευρά της δεξαμενής. Η φλέβα διαχέεται μέσα στον αποδέκτη μέχρι το μέγιστο βάθος z_{max}. Το μέγιστο αυτό βάθος, σε πειράματα με θερμό νερό, δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί. Αυτό συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι, με την έναρξη του πειράματος, το θερμό νερό εκτοπίζει σταδιακά το ψυχρό νερό του θαλάμου της φλέβας. Η φλέβα επομένως αρχικά συμπεριφέρεται σαν απλή, ενώ όταν το νερό του θαλάμου της φλέβας αποκτήσει μέγιστη θερμοκρασία (μόνιμη ροή) συμπεριφέρεται σαν φλέβα με αρνητική άνωση. Επειδή λοιπόν η φλέβα βρίσκεται σε μετάβαση από απλή σε

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

πλήρως ανωστική με αρνητική άνωση (transient state), διεισδύει μέχρι τον πυθμένα της δεξαμενής χωρίς να είναι δυνατός ο υπολογισμός του z_{max}. Μόλις προσκρούσει στον πυθμένα, η φλέβα ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι να σταθεροποιηθεί στο βάθος z_s (steady state).

Στη συνέχεια μετακινούμε τον βραχίονα πάνω στον οποίο είναι προσαρμοσμένοι οι thermistors. Προσδιορίζεται οπτικά το αριστερό όριο της φλέβας επάνω στο σκιαγράφημα και μετακινείται ο βραχίονας έτσι ώστε το πρώτο thermistor να βρίσκεται πλησίον του άκρου. Λαμβάνεται μία σειρά μετρήσεων θερμοκρασίας σε πέντε ισαπέχοντα ανα 1cm σημεία και εν συνεχεία ο βραχίονας μετακινείται κατά 5 εκατοστά δεξιά όπου λαμβάνεται καινούρια σειρά μετρήσεων. Με τον τρόπο αυτό γίνεται καταγραφή μετρήσεων θερμοκρασίας, ανά ένα εκατοστό, επάνω σε μία διατομή κάθετη στον άξονα της φλέβας που καλύπτει ολόκληρο το πλάτος της. Σε ορισμένα πειράματα, στην περιοχή του άξονα της φλέβας, η μετακίνηση του βραχίονα έγινε ανά μισό εκατοστό ώστε να ληφθούν περισσότερα δεδομένα στην περιοχή αυτή.

Μετά το πέρας των μετρήσεων κλείνουν όλες οι βάνες του συστήματος καθώς και η παροχή του πεπιεσμένου αέρα, γίνεται εξαέρωση του θερμοσίφωνα και επαναπλήρωσή του με νερό. Η δεξαμενή εκκενώνεται μέχρι το προκαθορισμένο ύψος και στη συνέχεια το νερό αναδεύεται ώστε να υπάρχει ομογενοποίηση των φυσικών ιδιοτήτων του. Το νερό αφήνεται να ηρεμήσει για κάποιο χρονικό διάστημα και ακολουθεί καινούριο πείραμα. Εάν δεν πρόκειται να πραγματοποιηθεί άλλο πείραμα, τότε η δεξαμενή εκκενώνεται πλήρως, πλένεται και σκεπάζεται με νάυλον. Όταν η δεξαμενή είναι άδεια το ακροφύσιο εμβαπτίζεται σε πλαστικό δοχείο γεμάτο νερό ώστε να μην εισχωρήσει αέρας μέσα στο σωλήνα τροφοδοσίας του.

2.4 Μετρήσεις θερμοκρασίας με thermistors

Η καταγραφή των σημειακών μετρήσεων της θερμοκρασίας γίνεται σε Η/Υ με το πρόγραμμα LabView® της National Instruments. Το αναλογικό σήμα (Volts) μετατρέπεται από την κάρτα δειγματοληψίας σε ψηφιακό με την μορφή χρονοσειράς και on-line ρύθμισης σε ^{o}C. Με το παραπάνω πρόγραμμα δειγματοληψίας μας δίδεται η δυνατότητα επιλογής εύρους διακύμανσης της θερμοκρασίας καθώς επίσης της συχνότητας και του χρόνου δειγματοληψίας. Στην οθόνη εμφανίζονται οι ενδείξεις όλων των thermistors που είναι συνδεδεμένοι στην κάρτα δειγματοληψίας (ο μέγιστος αριθμός thermistors που μπορεί να εξυπηρετηθούν είναι 8), κάθε μία με διαφορετικό χρώμα. Έχουμε προγραμματίσει δύο επιλογές για το χρόνο δειγματοληψίας: η πρώτη για δειγματοληψία επ’ αόριστον που διακόπτουμε κατά βούληση και η δεύτερη για δειγματοληψία διάρκειας συγκεκριμένου χρόνου. Τα αποτελέσματα αποθηκεύονται σε αρχεία μορφής *.txt και η ονομασία τους γίνεται μέσα από το πρόγραμμα.

Στα πειράματα που έγιναν, η συχνότητα δειγματοληψίας για μετρήσεις θερμοκρασίας της φλέβας ήταν 80 μετρήσεις/sec για 40 sec ενώ η μέτρηση θερμοκρασίας του αποδέκτη ήταν διάρκειας 10 sec. Συνεπώς οι χρονοσειρές

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

θερμοκρασίας που προέκυπταν είχαν μέγεθος 3200 και 800 δεδομένων για τον αποδέκτη και τη φλέβα αντίστοιχα.

2.5 Περιγραφή τυπικού πειράματος

Στις παραγράφους που ακολουθούν θα γίνει περιγραφή ενός πειράματος που πραγματοποιήθηκε στις 25/10/2007. Οι αρχικές συνθήκες του πειράματος ήταν:

Διάμετρος ακροφυσίου: D=0.75cm.

Παροχή: Q=1.6 l/min.

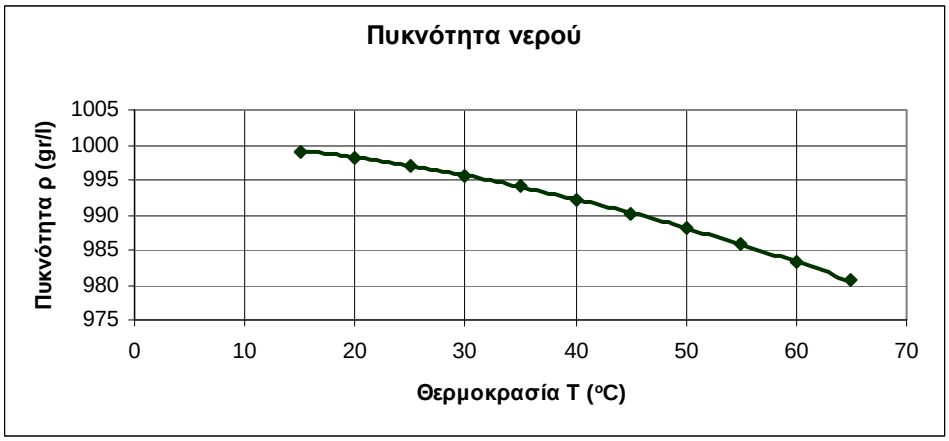
Απόσταση διατομής μέτρησης από το ακροφύσιο: z=26.50 cm ($\approx$1.50 l_M).

Αρχικά μετρήθηκε η θερμοκρασία του περιβάλλοντος νερού. Ο μέσος όρος των ενδείξεων των thermistors ήταν T_a=22.6 ^oC. Στη συνέχεια διοχετεύτηκε θερμό νερό στο κύκλωμα, η παροχή του οποίου ρυθμίζεται από την βάνα ακριβείας στα 1.6 l/min. Η θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού σταθεροποιήθηκε στους 53 ^oC οπότε και ανοίξαμε τη βάνα τροφοδοσίας της φλέβας.

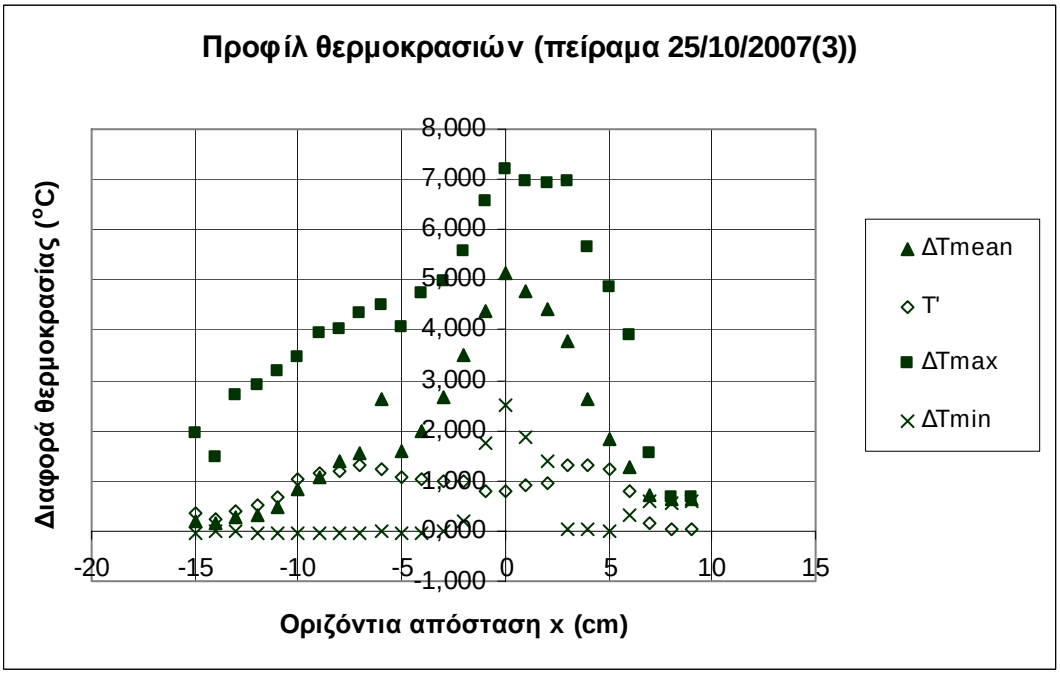
Η φλέβα αρχικά συμπεριφέρεται σαν απλή (transient) έως ότου προσκρούσει στον πυθμένα της δεξαμενής. Στη συνέχεια, υπό την επίδραση της αρνητικής άνωσης, η φλέβα εκτρέπεται προς τα πάνω, περιβάλλοντας την κατερχόμενη ροή, έως ότου περιέλθει σε κατάσταση μόνιμης δίαιτας (steady state). Το βάθος σταθεροποίησης ήταν στα 44.5 cm από το ακροφύσιο. Με δεδομένη τη θερμοκρασία του νερού της φλέβας και του περιβάλλοντος, την παροχή και τη διάμετρο του ακροφυσίου υπολογίζονται η πυκνότητα νερού φλέβας ρ_0 = 0.986 gr/cm^3, η πυκνότητα νερού αποδέκτη ρ_a=0.997 gr/cm^3 (σχήμα 2.16), η ταχύτητα νερού της φλέβας W=68.55 cm/sec, η ανωστική επιτάχυνση g'_0=10.65 cm/sec^2, και το κινηματικό ιξώδες ν=0.00534 cm^2/sec. Από τα μεγέθη αυτά υπολογίστηκαν η ορμή της φλέβας M=2075.94 cm^4/sec^2, η άνωση B=322.46 cm^4/sec^3 και ο αριθμός Reynolds Re=9634 (τυρβώδης ροή). Προκύπτει λοιπόν ότι l_Q=0.665 cm, l_M=17.127 cm και R_0=0.039.

Μόλις η φλέβα περιήλθε σε κατάσταση μόνιμης δίαιτας ξεκίνησαν οι μετρήσεις των θερμοκρασιών. Οι thermistors τοποθετήθηκαν στο επιθυμητό βάθος (1.50l_M) και στο αριστερό όριο της φλέβας όπου και έγινε η πρώτη δειγματοληψία στα 80 Hz για 40 sec. Στη συνέχεια ο βραχίονας μετακινήθηκε κατά 5 cm όπου έγινε η δεύτερη δειγματοληψία. Συνολικά έγιναν 5 δειγματοληψίες δηλαδή μετρήθηκαν θερμοκρασίες σε 25 σημεία που ισαπέχουν μεταξύ τους 1 cm επάνω σε έναν άξονα μήκους 25 cm ο οποίος βρίσκεται σε κατακόρυφη απόσταση 1.50l_M από το ακροφύσιο. Τα αποτελέσματα καταγράφονται με τη μορφή χρονοσειρών και επεξεργάζονται σε υπολογιστικά φύλλα εργασίας (spreadsheet). Το προφίλ των αδιάστατων θερμοκρασιών που υπολογίστηκαν φαίνεται στο σχήμα 2.17.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 2.16 Πυκνότητα νερού
(Table from CRC Handbook of Chemistry and Physics)



Σχήμα 2.17 Προφίλ θερμοκρασιών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Επεξεργασία δεδομένων

Πραγματοποιήθηκαν σαράντα έξι πειράματα από τα οποία προέκυψαν ισάριθμα διαγράμματα θερμοκρασίας και έντασης τύρβης. Οι περισσότερες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε κατακόρυφη απόσταση $0.25l_M<z<2l_M$ από το ακροφύσιο. Έγιναν όμως μετρήσεις και στη στάθμη εξόδου του ακροφυσίου καθώς και στην περιοχή ανάντη αυτού. Οι αριθμοί Reynolds μεταβάλλονταν στην περιοχή $5500<Re<17500$ ενώ ο αριθμός Richardson στην περιοχή $0.01<R_0<0.157$. Οι θερμοκρασίες αποδέκτη και φλέβας μεταβάλλονταν στις περιοχές 17 $^oC<T_a<29$ ^oC και 45 $^oC<T_0<73$ ^oC αντίστοιχα. Από τις μετρήσεις προέκυψαν χρονοσειρές θερμοκρασίας για κάθε σημείο, από τις οποίες υπολογίζονται τα στατιστικά μεγέθη της τύρβης όπως η μέση χρονικά τιμή της θερμοκρασίας, η μέγιστη και η ελάχιστη θερμοκρασία καθώς και η ένταση της τύρβης (τυπική απόκλιση) (πίνακας 3.1).

T_{mean}	**21.88**	**22.39**	**22.03**	**23.37**	**23.81**
T'	**1.97**	**1.65**	**1.27**	**1.11**	**1.28**
T_{max}	**25.10**	**25.97**	**24.82**	**25.96**	**26.59**
T_{min}	**17.40**	**17.58**	**17.80**	**18.59**	**17.60**

Πίνακας 3.1 Παράδειγμα υπολογισμού στατιστικών μεγεθών από τα δεδομένα των μετρήσεων (μία σειρά μετρήσεων για κάθε thermistor)

(πείραμα 19/11/2007 (4)).

Στον πίνακα 3.2 φαίνονται όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Η διάμετρος D και η παροχή F είναι προεπιλεγμένες και αποτελούν αρχικές συνθήκες των πειραμάτων. Αναλυτικά σε κάθε στήλη αναγράφονται τα εξής:

Στήλη 1: Ημερομηνία διεξαγωγής του πειράματος.

Στήλη 2: Ονομασία πειράματος.

Στήλη 3: Διάμετρος ακροφυσίου D.

Στήλη 4: Παροχή F (ένδειξη ροόμετρου).

Στήλη 5: Κατακόρυφη απόσταση αισθητήρων από ελεύθερη επιφάνεια z_{sur}

Στήλη 6: Κατακόρυφη απόσταση αισθητήρων από ακροφύσιο z (το ακροφύσιο απέχει 20.5 cm από την ελεύθερη επιφάνεια).

Στήλη 7: Κατακόρυφη απόσταση αισθητήρων από ακροφύσιο συναρτήσει της κλίμακας l_M.

Στήλη 8: Θερμοκρασία περιβάλλοντος νερού T_a.

Στήλη 9: Θερμοκρασία νερού στον άξονα της φλέβας T_0.

Στήλη 10: Μέση θερμοκρασία στον άξονα της φλέβας T_{mean} (axis).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Στήλη 11: Ένταση τύρβης στον άξονα της φλέβας rms (axis) = T'_c.

Στήλη 12: Μέγιστη θερμοκρασία στον άξονα της φλέβας T_{max} (axis).

Στήλη 13: Ελάχιστη θερμοκρασία στον άξονα της φλέβας T_{min} (axis).

Στήλη 14: Βάθος σταθεροποίησης z_s.

Στήλη 15: Πραγματική παροχή Q. Η πραγματική παροχή υπολογίζεται βάσει των εξισώσεων που προέκυψαν από την ρύθμιση των ροόμετρων ως:

$$Q_1 = 18.08F_1 + 0.537$$

$$Q_2 = 18.01F_2 + 1.468$$

$$Q_3 = 17.619F_3 + 3.4513$$

Στήλη 16: Ταχύτητα νερού στην έξοδο της φλέβας:

$$W = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Στήλη 17: Πυκνότητα νερού φλέβας ρ_0.

Στήλη 18: Πυκνότητα περιβάλλοντος νερού:

$$\rho_a = \frac{-0.0038\mathrm{T}^2 - 0.0689\mathrm{T} + 1001.1}{1000}$$

Στήλη 19: Ανωστική επιτάχυνση:

$$g'_0 = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} g$$

Στήλη 20: Ειδική (ανά μονάδα μάζας ρέοντος ρευστού) ορμή (ποσότητα κίνησης):

$$M = QW$$

Στήλη 21: Ειδική (ανά μονάδα μάζας ρέοντος ρευστού) άνωση:

$$B = \frac{\rho_a - \rho_0}{\rho_0} gQ = g'_0 Q$$

Στήλη 22: Κινηματικό ιξώδες:

$$\nu = 0.0225 - 0.0039T^{0.3855} + (0.0000008T^2 - 0.00003T + 0.0002)$$

Στήλη 23: Αριθμός Reynolds:

$$\mathrm{Re} = \frac{WD}{n}$$

Στήλη 24: Κλίμακα μήκους l_Q:

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Στήλη 25: Κλίμακα μήκους l_M:

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}}$$

Στήλη 26: Αριθμός Richardson:

$$R_0 = \frac{l_Q}{l_M}$$

Στήλη 27: Διαφορά θερμοκρασίας φλέβας – αποδέκτη:

$$\Delta T_0 = T_0 - T_a$$

Στήλη 28: Ένταση τύρβης στον άξονα της φλέβας:

$$T'_c = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_i(axis) - T_{mean}(axis))^2}$$

Στήλη 29: Διαφορά θερμοκρασίας στον άξονα της φλέβας:

$$\Delta T_c = T_{mean}(axis) - T_a$$

Στήλη 30: Μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας στον άξονα της φλέβας:

$$\max \Delta T_c = T_{\max}(axis) - T_a$$

Στήλη 31: Ελάχιστη διαφορά θερμοκρασίας στον άξονα της φλέβας:

$$\min \Delta T_c = T_{\min}(axis) - T_a$$

Στήλη 32: Αδιάστατη απόσταση:

$$\frac{z}{l_M}$$

Στήλη 33: Αραίωση στον άξονα της φλέβας:

$$S_c = \frac{\Delta T_0}{\Delta T_c}$$

Στήλη 34: Τύρβη στον άξονα της φλέβας:

$$S'_c = \frac{\Delta T_0}{T'_c}$$

Στήλη 35: Ελάχιστη αραίωση στον άξονα της φλέβας:

$$S_{\min} = \frac{\Delta T_0}{\max \Delta T_c}$$

Στήλη 36: Αριθμός Froude:

$$Fr = \frac{W}{\sqrt{g'_0 D}}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

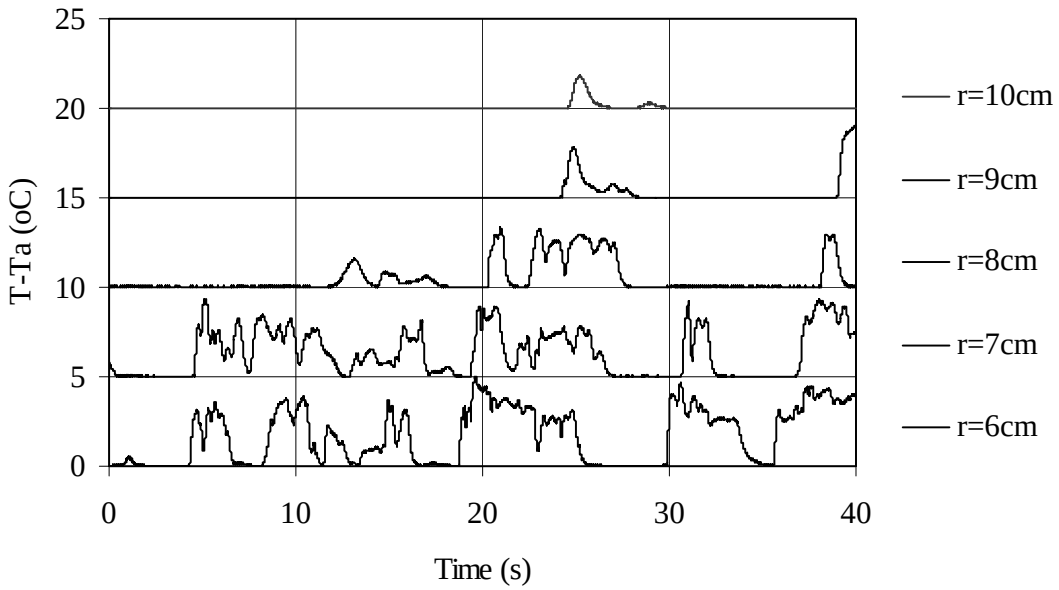
Στήλη 37: Κανονικοποιημένη μέση αραίωση:

$$\frac{S_c l_Q}{z}$$

Στήλη 38: Αδιάστατη αραίωση στον άξονα της φλέβας:

$$\frac{\Delta T_0}{\Delta T_c F} = \frac{S_c}{Fr}$$

Σε απόσταση z ≈ 2l_M από το ακροφύσιο όπου βρίσκεται η περιοχή μετάβασης της φλέβας σε πλήρως ανωστική, υπήρχαν διαλείψεις στο σήμα των αισθητήρων (thermistors) καθώς υπήρξαν μικρομεταβολές του βάθους σταθεροποίησης z_s. Έτσι, όταν οι αισθητήρες ήταν τοποθετημένοι στη θέση αυτή, υπήρχαν στιγμές που βρίσκονταν εκτός της φλέβας και κατέγραφαν θερμοκρασία περιβάλλοντος νερού με αποτέλεσμα να υπεισέρχεται σφάλμα στην επεξεργασία των μετρήσεων. Για την αποφυγή του σφάλματος αυτού κατά την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, αφαιρέθηκε η θερμοκρασία περιβάλλοντος από όλες τις μετρήσεις (σχήμα 3.1). Από την καινούρια χρονοσειρά που προέκυψε αγνοήθηκαν όλες οι μηδενικές και αρνητικές τιμές.

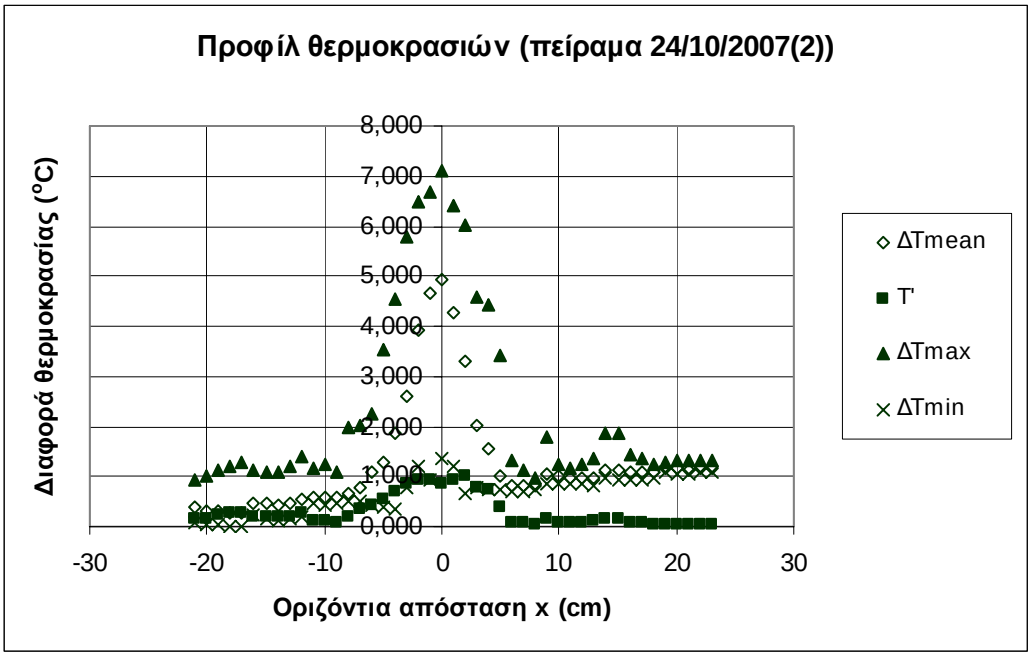


Σχήμα 3.1 Διαλείψεις στο σήμα των thermistors στην περιοχή z = 2l_M (πείραμα 25/10/2007 (4)).

Ο άξονας των μετρήσεων διαιρείται σε τόσα σημεία όσα και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους 1 cm. Σε κάθε ένα τέτοιο σημείο αντιστοιχεί μια χρονοσειρά θερμοκρασίας. Από κάθε χρονοσειρά υπολογίζονται η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρείται η μέση τιμή των ενδείξεων του κάθε αισθητήρα ξεχωριστά για κάθε θέση στην οποία είναι τοποθετημένος.



Σχήμα 3.2 Προφίλ μέσης θερμοκρασίας, τύρβης, μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε απόσταση l_M κατά πλάτος του άξονα της φλέβας (πείραμα 24/10/2007 (2)).

Στη συνέχεια (πίνακας 3.3), υπολογίζονται οι διαφορές θερμοκρασίας

$$\Delta T_{mean} = T_{mean} - T_a$$

$$T' = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_i - T_{mean})^2}$$

$$\Delta T_{max} = T_{max} - T_a$$

$$\Delta T_{min} = T_{min} - T_a$$

και προβάλλονται σε διαγράμματα συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από τον άξονα της φλέβας (σχήμα 3.2). Ακολούθως υπολογίζονται οι λόγοι:

$$r / l_M$$

$$r / z$$

$$T / T_c = \Delta T_{mean} / \Delta T_c$$

$$T' / T_c = T' / \Delta T_c$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

οι οποίοι αποτελούν τις αδιάστατες εκφράσεις της μέσης θερμοκρασίας και της έντασης τύρβης.

Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα θερμοκρασίας T/T_c και τύρβης T'/T_c προβάλλονται συναρτήσει των αδιάστατων αποστάσεων r/l_M και r/z όπου r είναι η οριζόντια απόσταση από τον άξονα της φλέβας και z η κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο. Τα διαγράμματα κατηγοριοποιήθηκαν, ανάλογα με την αδιάστατη απόσταση l_M, σε τέσσερις κατηγορίες $0.5l_M$, l_M, $1.5l_M$ και $2l_M$. Σε κάθε γράφημα προβάλλονται τα πειράματα που έχουν γίνει στο εκάστοτε βάθος. Η κωδικοποίηση των πειραμάτων γίνεται σύμφωνα με την ημερομηνία διεξαγωγής και τον αύξοντα αριθμό του πειράματος μέσα σε παρένθεση (Οι αρχικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του κάθε πειράματος φαίνονται στον πίνακα 3.2).

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T_{mean}	21.971	22.380	22.034	23.372	23.809	24.670	24.430	23.514	22.961	20.853
rms	1.879	1.649	1.269	1.112	1.278	2.243	2.080	1.388	2.241	2.776
T_{max}	25.102	25.969	24.821	25.965	26.590	27.765	27.679	26.124	26.619	25.619
T_{min}	17.440	17.581	17.801	18.592	17.602	17.440	17.452	17.446	17.444	17.449
T_a	**17.430**	**17.406**	**17.526**	**17.394**	**17.415**	**17.430**	**17.406**	**17.526**	**17.394**	**17.415**

Axis	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
ΔT_{mean}	4.541	4.973	4.508	5.978	6.394	7.240	7.023	5.988	5.567	3.438
rms	1.879	1.649	1.269	1.112	1.278	2.243	2.080	1.388	2.241	2.776
ΔT_{max}	7.672	8.563	7.294	8.571	9.175	10.335	10.273	8.598	9.225	8.204
ΔT_{min}	0.009	0.175	0.275	1.198	0.187	0.009	0.046	-0.080	0.050	0.034

r/l_M	-0.362	-0.289	-0.217	-0.145	-0.072	0.000	0.072	0.145	0.217	0.289
T/T_c	0.627	0.687	0.623	0.826	0.883	1.000	0.970	0.827	0.769	0.475

r/l_M	-0.362	-0.289	-0.217	-0.145	-0.072	0.000	0.072	0.145	0.217	0.289
T'/T_c	0.260	0.228	0.175	0.154	0.177	0.310	0.287	0.192	0.310	0.383

r/z	-0.182	-0.145	-0.109	-0.073	-0.036	0.000	0.036	0.073	0.109	0.145
T/T_c	0.627	0.687	0.623	0.826	0.883	1.000	0.970	0.827	0.769	0.475

r/z	-0.182	-0.145	-0.109	-0.073	-0.036	0.000	0.036	0.073	0.109	0.145
T'/T_c	0.260	0.228	0.175	0.154	0.177	0.310	0.287	0.192	0.310	0.383

19/11/2007			
z_{sur} =	48	cm	$2l_M$
z =	27.5	cm	
F =	1.4	l/min	
T_a =	17.43	^oC	
T_0 =	64	^oC	
z_s =	53	cm	

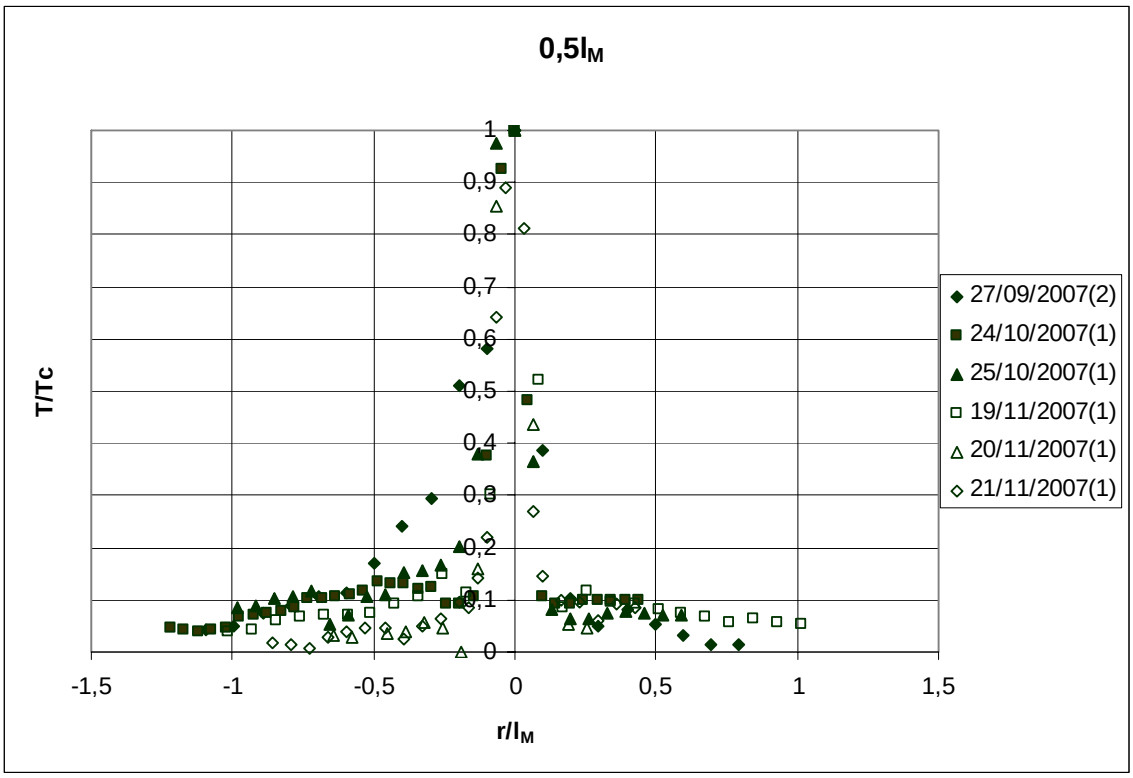
Πίνακας 3.3 Παράδειγμα υπολογισμού μέσων θερμοκρασιών και τύρβης καθώς και των αδιάστατων μεγεθών (πείραμα 19/11/2007 (4)).

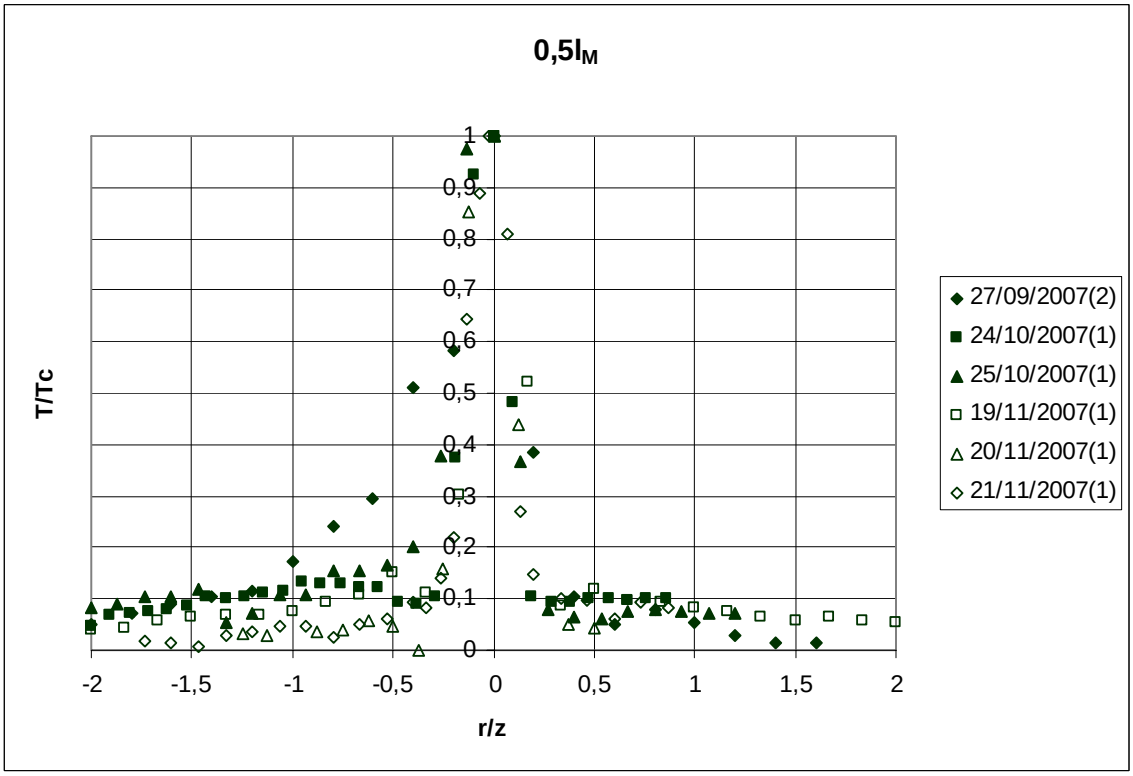
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

3.2 Περιοχή $z = 0.5l_M$

Η περιοχή αυτή βρίσκεται πολύ κοντά στο ακροφύσιο και οι ταχύτητες είναι μεγάλες. Η θερμοκρασία είναι υψηλή στον άξονα αλλά ελαττώνεται απότομα σε σχετικά μικρή απόσταση από αυτόν και παραμένει σε χαμηλά επίπεδα και σχεδόν σταθερή στα άκρα. Το διάγραμμα τύρβης έχει τριγωνική μορφή με μία υποτυπώδη συμμετρία και η μέγιστη τιμή που παρατηρείται στον άξονα (0.16) είναι η ελάχιστη από τις τέσσερις περιοχές (σχήμα 3.3).

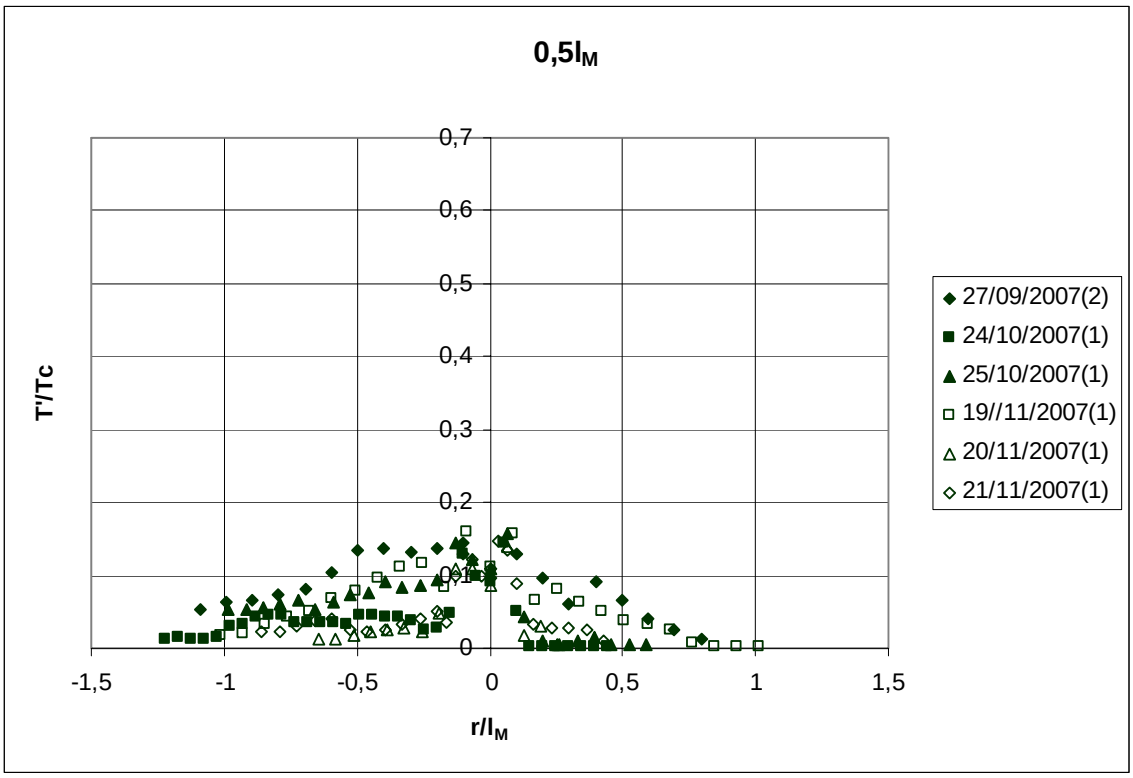
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

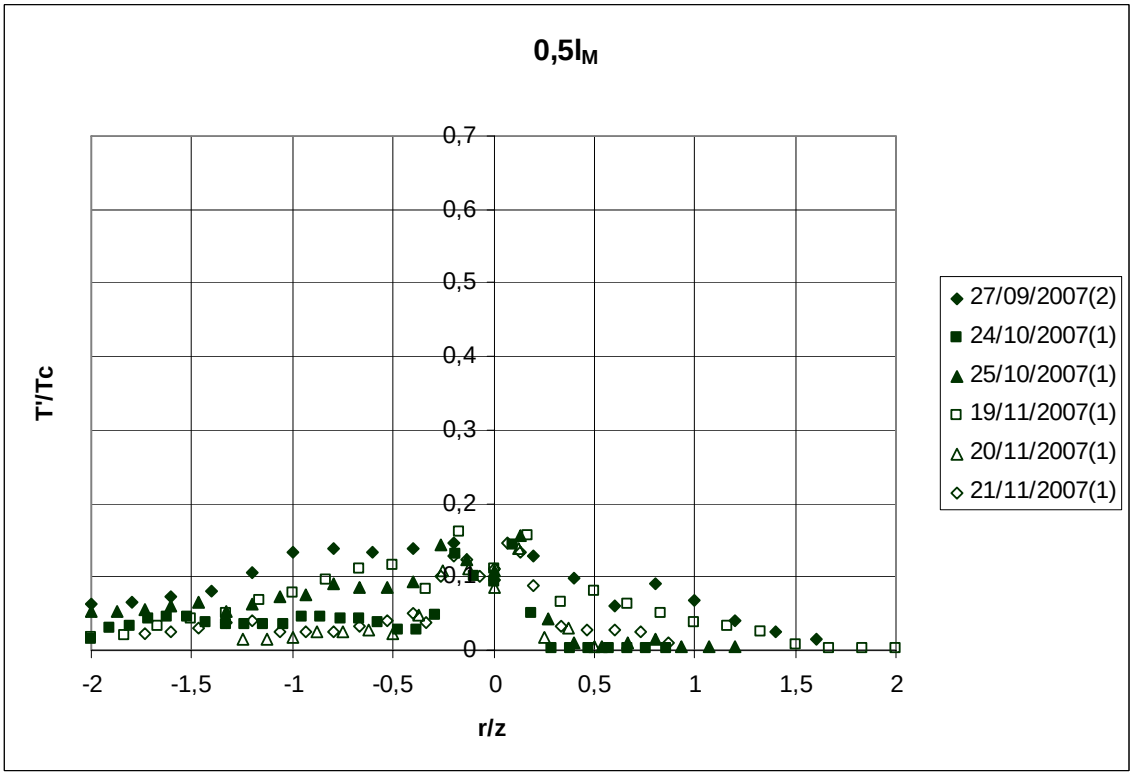




Σχήμα 3.3 a,b Αδιάστατο διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (a) και r/z (b) σε βάθος $0.5l_M$.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203





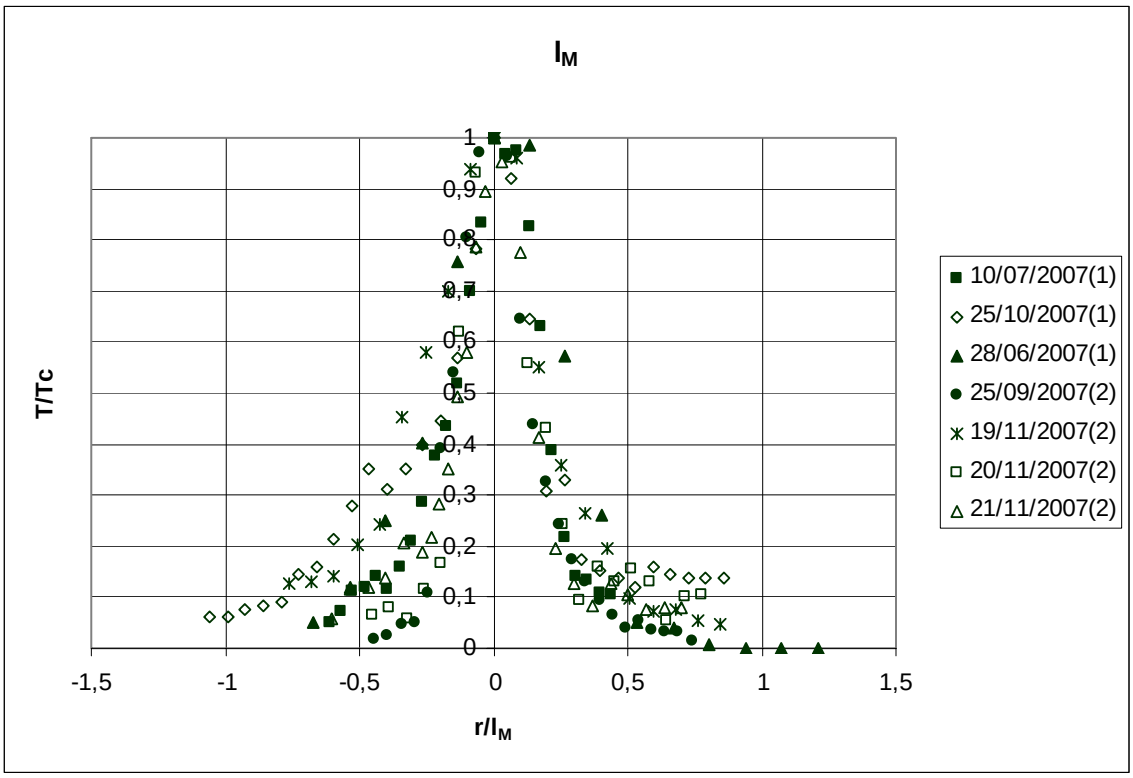
Σχήμα 3.3 c,d Αδιάστατο διάγραμμα τύρβης συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (c) και r/z (d) σε βάθος $0.5l_M$.

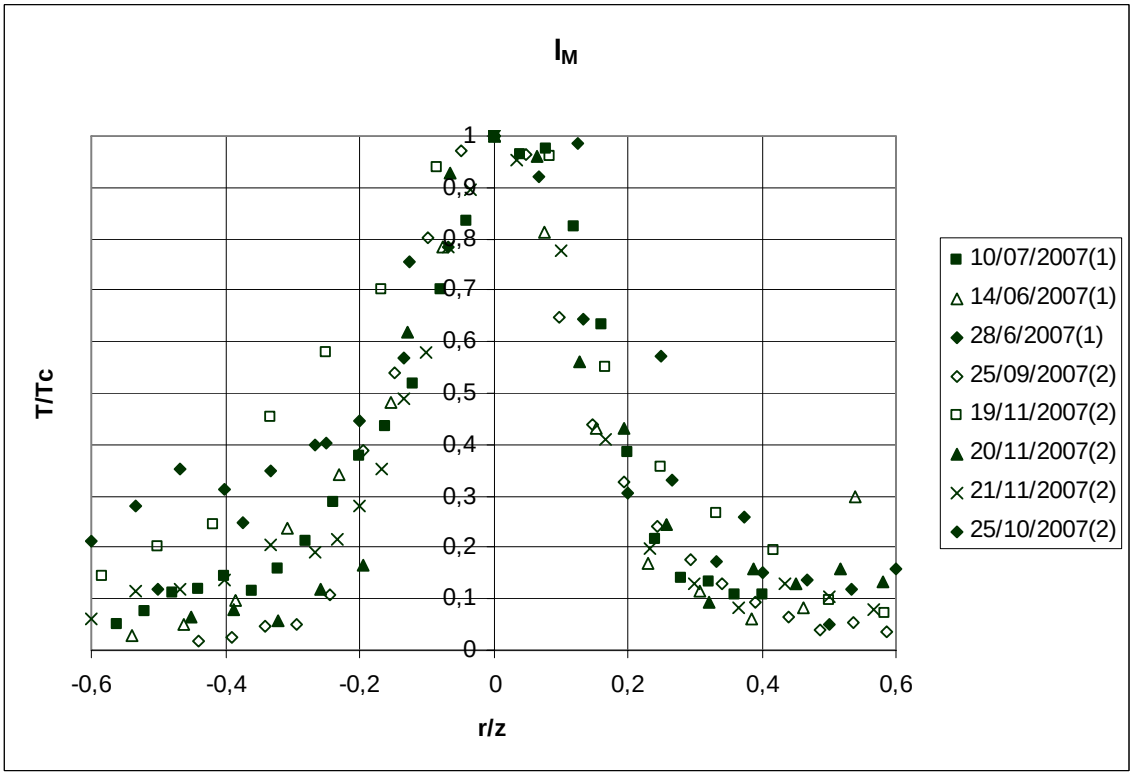
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

3.3 Περιοχή z = l_M

Στην περιοχή αυτή η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη (γενικά μιλώντας z/D>20). Το διάγραμμα των θερμοκρασιών έχει κωνική μορφή. Στην περιοχή της κατερχόμενης φλέβας οι θερμοκρασίες, όσο απομακρυνόμαστε από τον άξονα, ελαττώνονται απότομα ενώ στην περιοχή της δακτυλιοειδούς ανερχόμενης ροής συνεχίζουν να ελαττώνονται αλλά με πολύ ήπιο ρυθμό. Το διάγραμμα τύρβης εξακολουθεί να έχει τριγωνική μορφή αλλά η τύρβη είναι πολύ πιο έντονη (σχήμα 3.4).

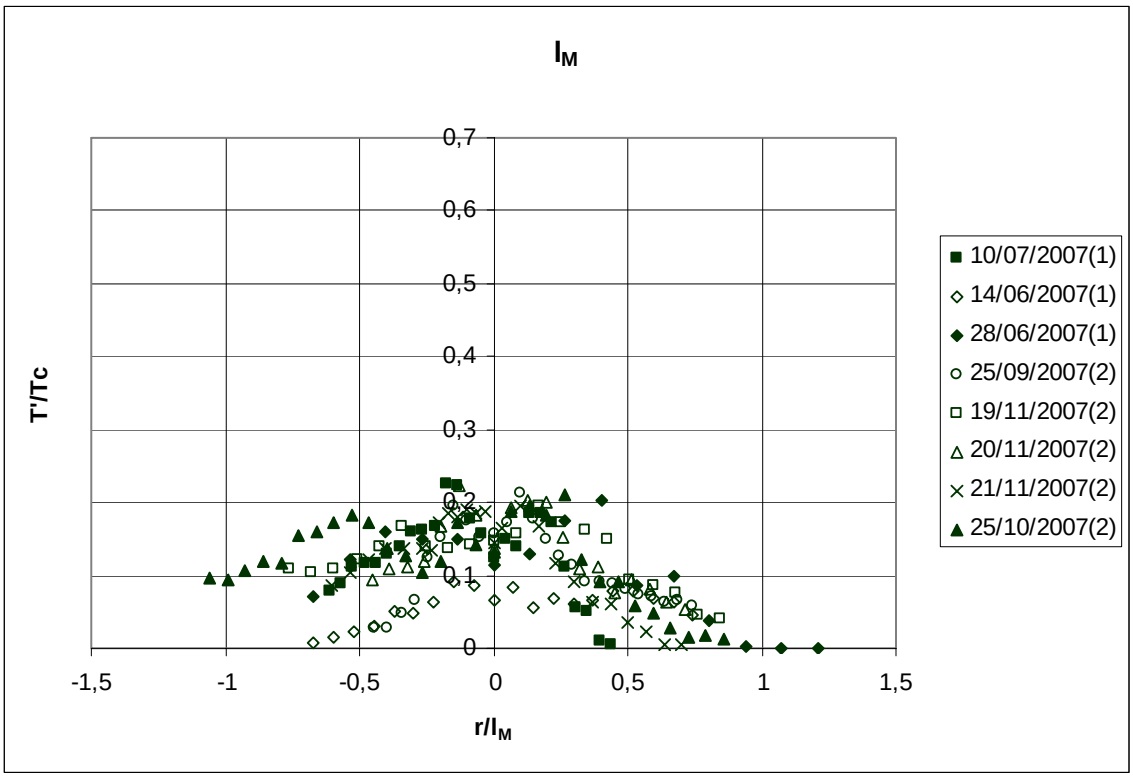
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

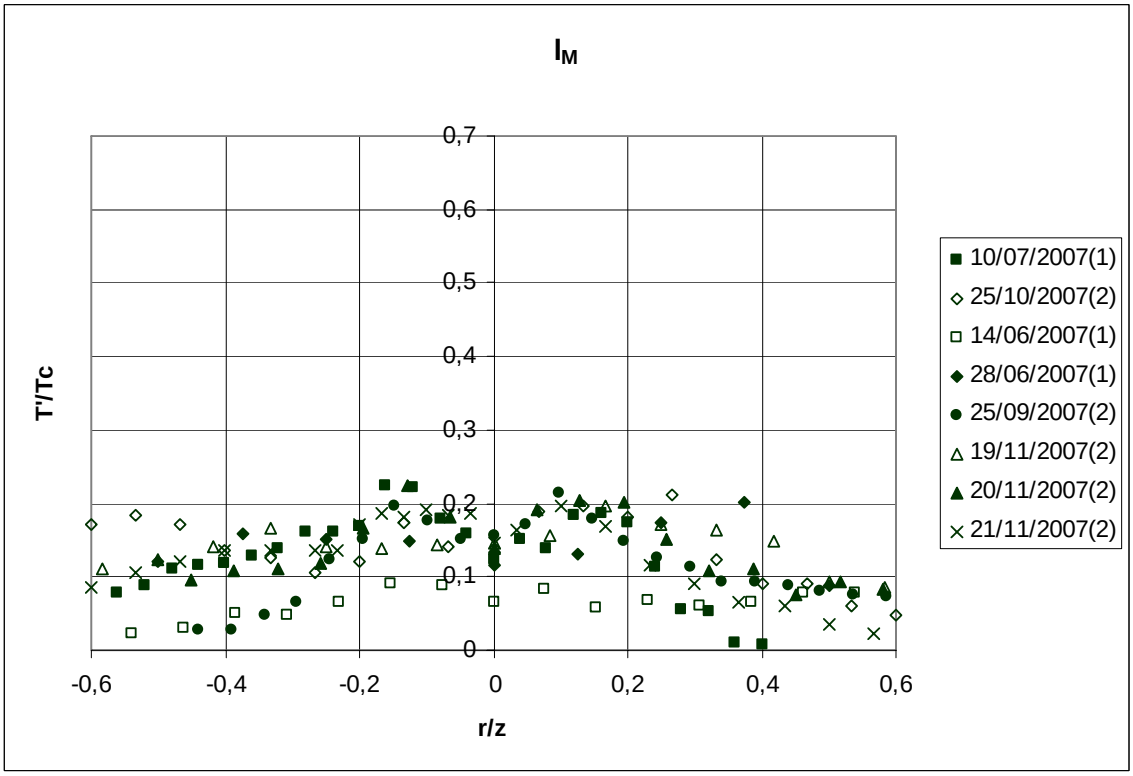




Σχήμα 3.4 a,b Αδιάστατο διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (a) και r/z (b) σε βάθος l_M.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203





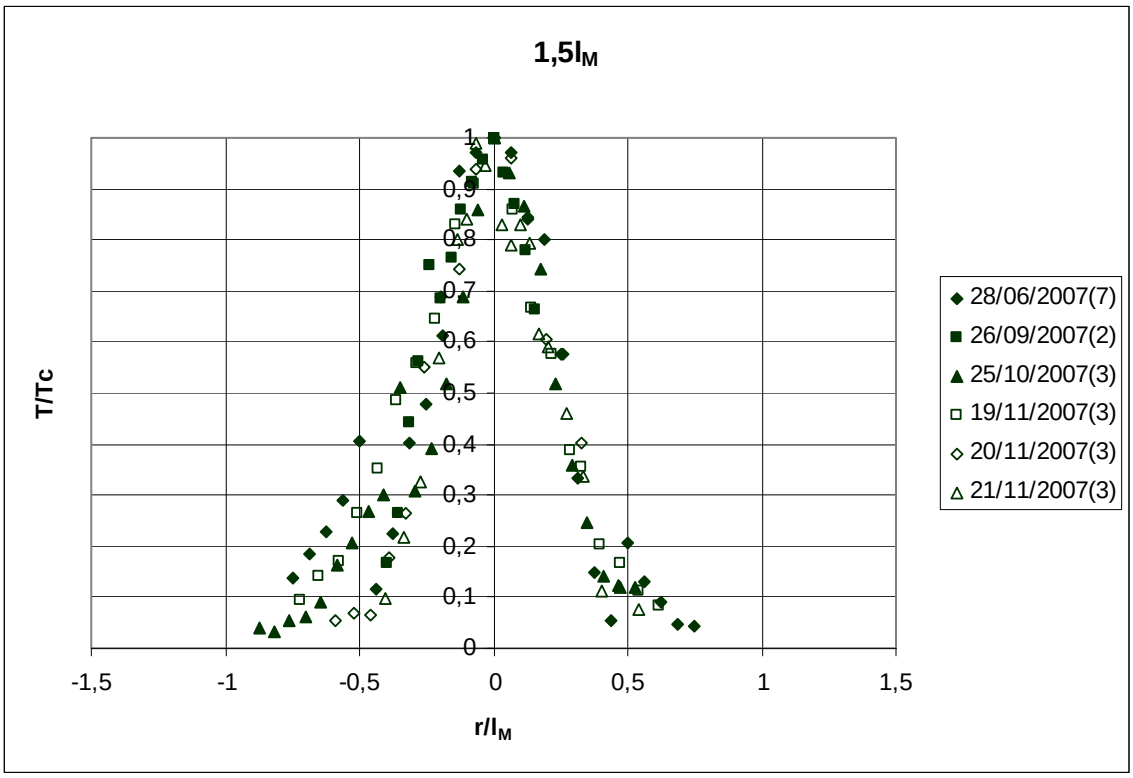
Σχήμα 3.4 c,d Αδιάστατο διάγραμμα τύρβης συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (c) και r/z (d) σε βάθος l_M.

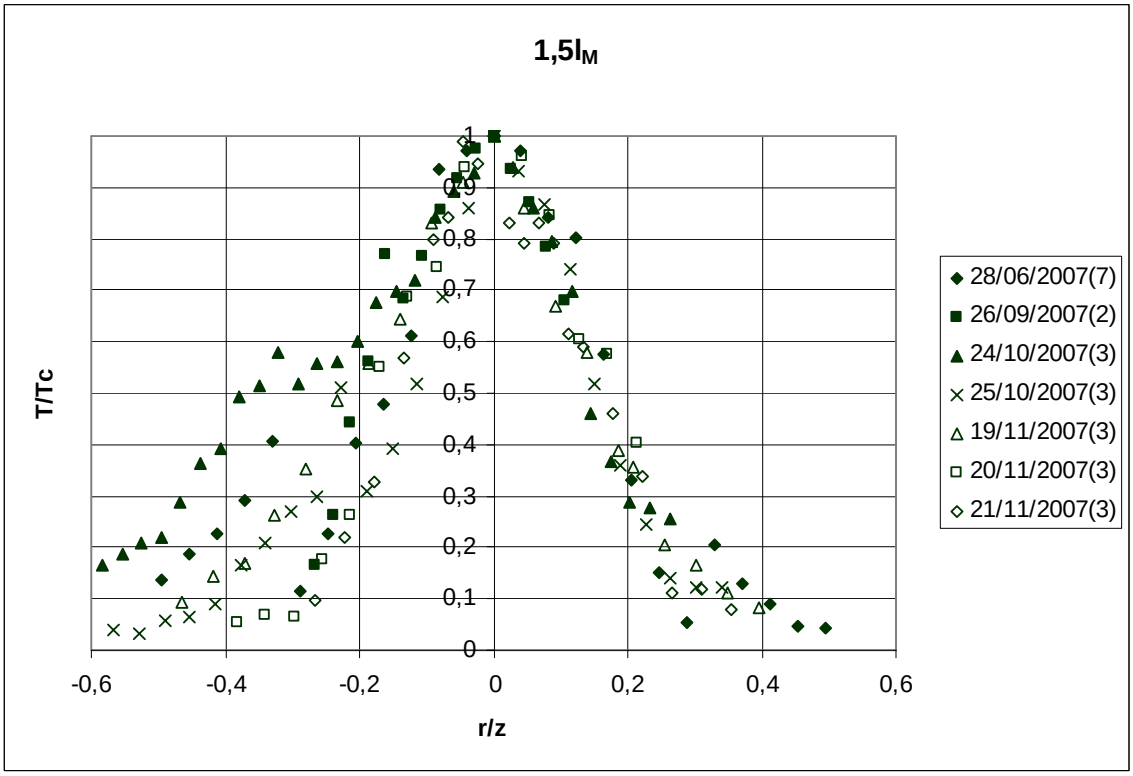
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

3.4 Περιοχή $z = 1.5l_M$

Η θερμοκρασία ελαττώνεται μακριά από τον άξονα με σχεδόν σταθερό ρυθμό. Στην περιοχή αυτή η ορμή της φλέβας έχει αρχίσει να ελαττώνεται σημαντικά και να επηρεάζεται από την ανωστική δύναμη και πιθανώς από εξωτερικές δυνάμεις (π.χ. Coriollis), οι οποίες εκτρέπουν τη ροή, γι'αυτό και το διάγραμμα της θερμοκρασίας δεν παρουσιάζει συμμετρία. Το διάγραμμα της τύρβης είναι ακανόνιστο και κάθε πείραμα έχει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά (σχήμα 3.5).

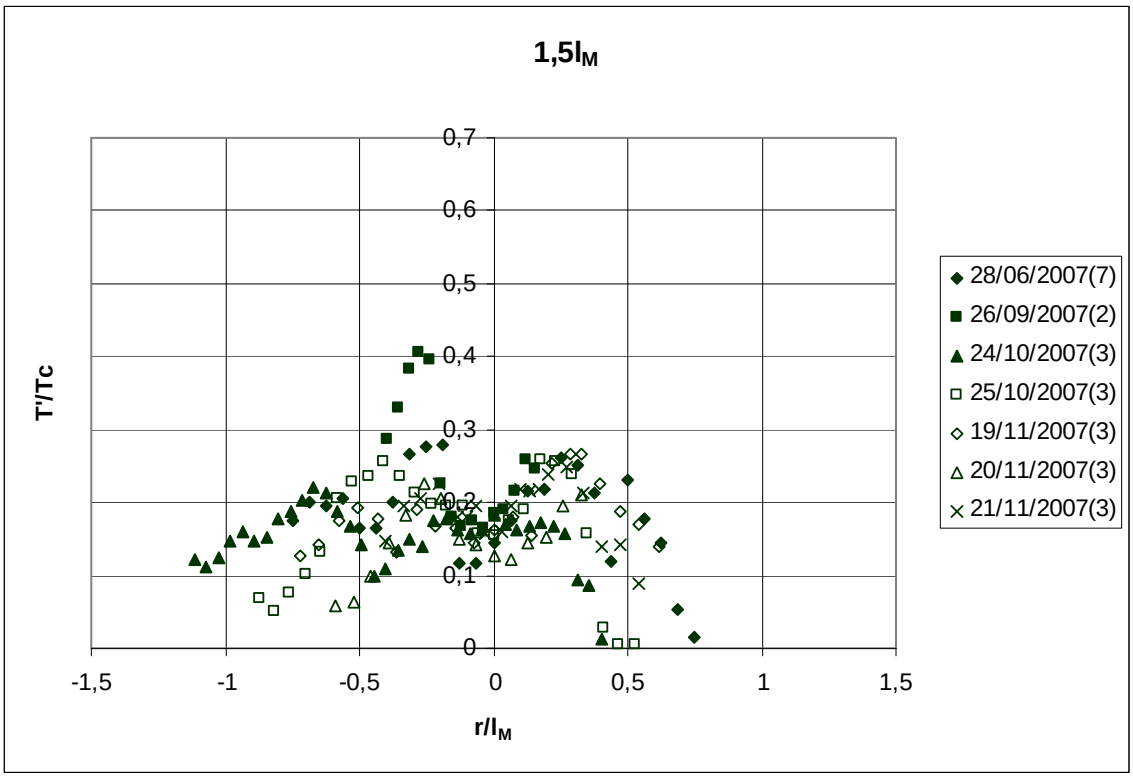
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

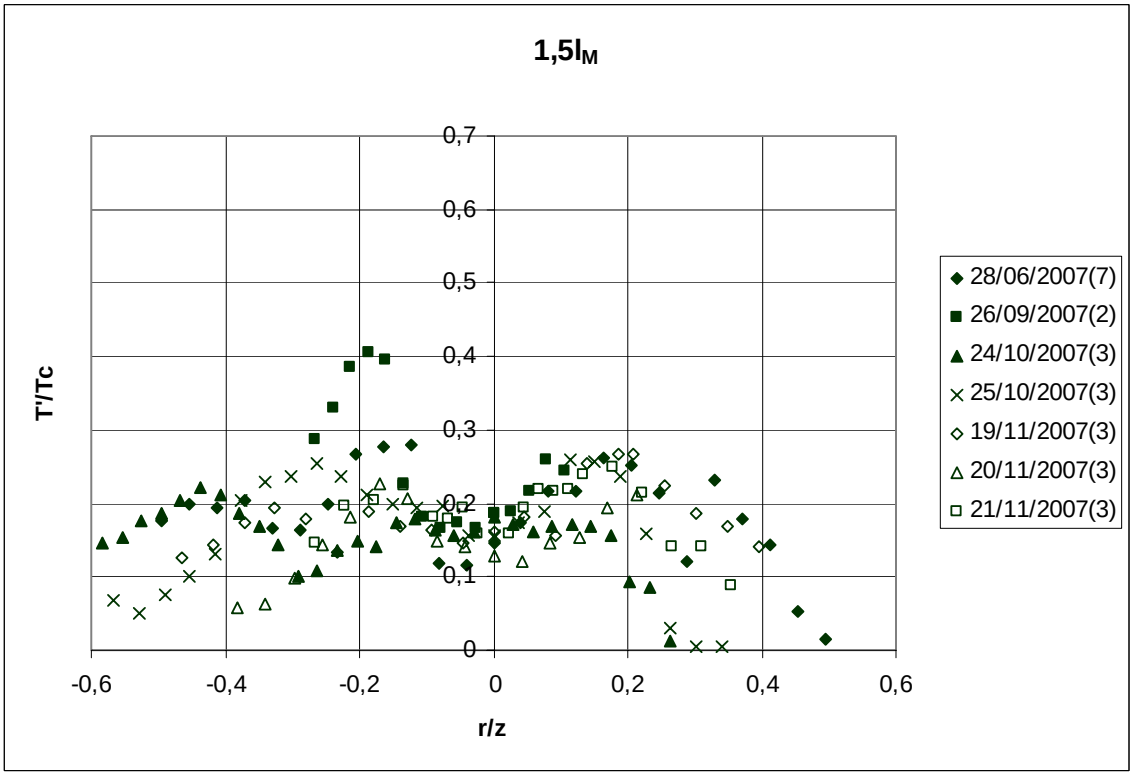




Σχήμα 3.5 a,b Αδιάστατο διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (a) και r/z (b) σε βάθος $1.5l_M$.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203





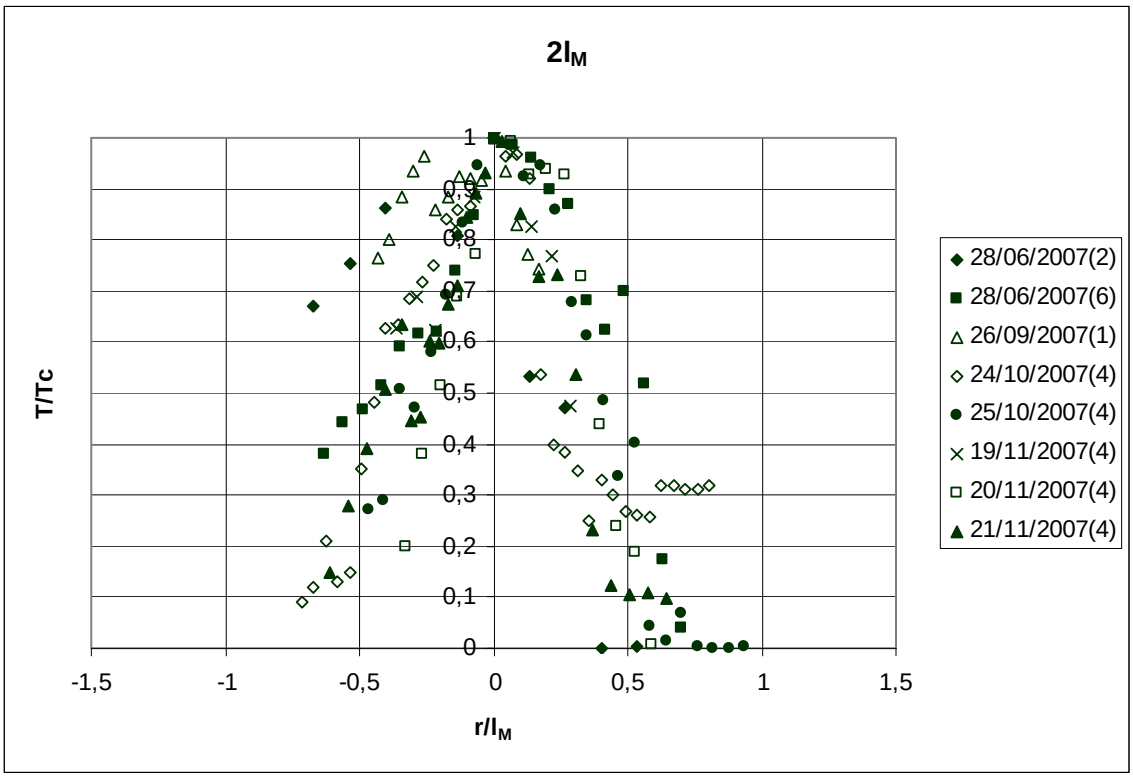
Σχήμα 3.5 c,d Αδιάστατο διάγραμμα τύρβης συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (c) και r/z (d) σε βάθος $1.5l_M$.

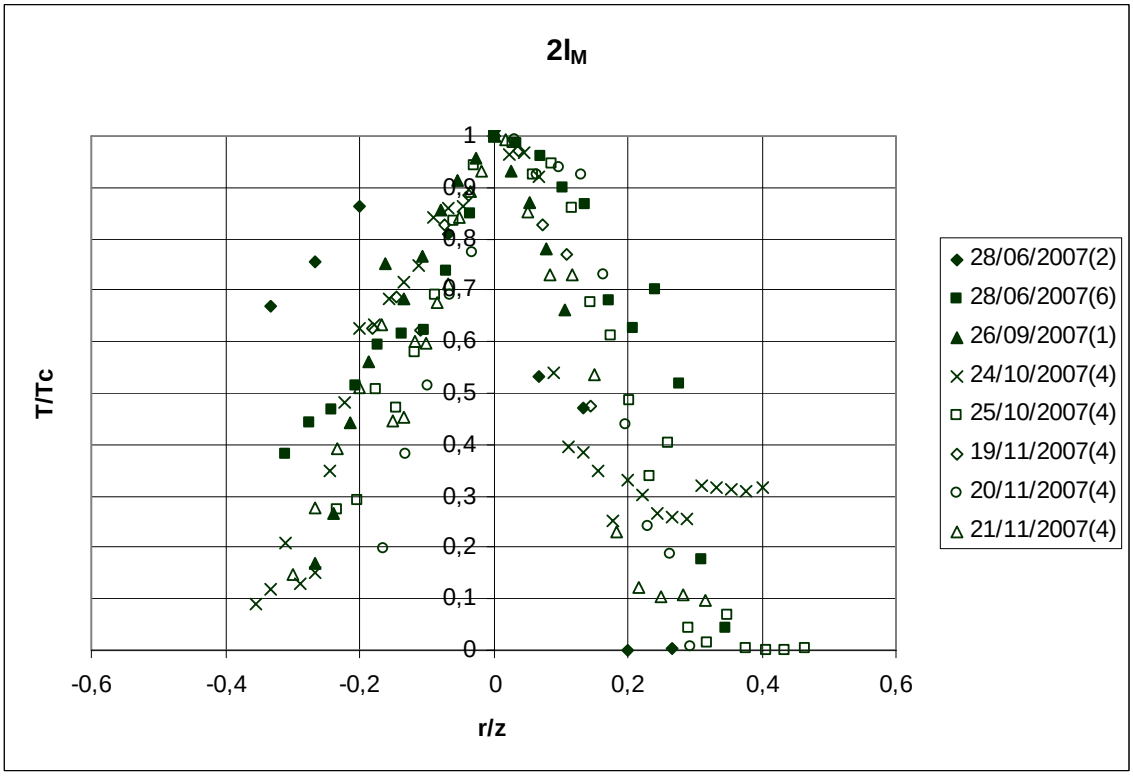
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

3.5 Περιοχή $z = 2l_M$

Στην περιοχή αυτή κυριαρχούν οι ανωστικές δυνάμεις οι οποίες εκτρέπουν τη ροή προς την επιφάνεια και η φλέβα συμπεριφέρεται ως πλούμιο. Το διάγραμμα της θερμοκρασίας είναι ακανόνιστο αλλά εξακολουθεί να διακρίνεται η μείωση της θερμοκρασίας μακριά από τον άξονα. Η τύρβη είναι έντονη και υπάρχει τυχαία κίνηση ρευστού προς όλες τις κατευθύνσεις (σχήμα 3.6).

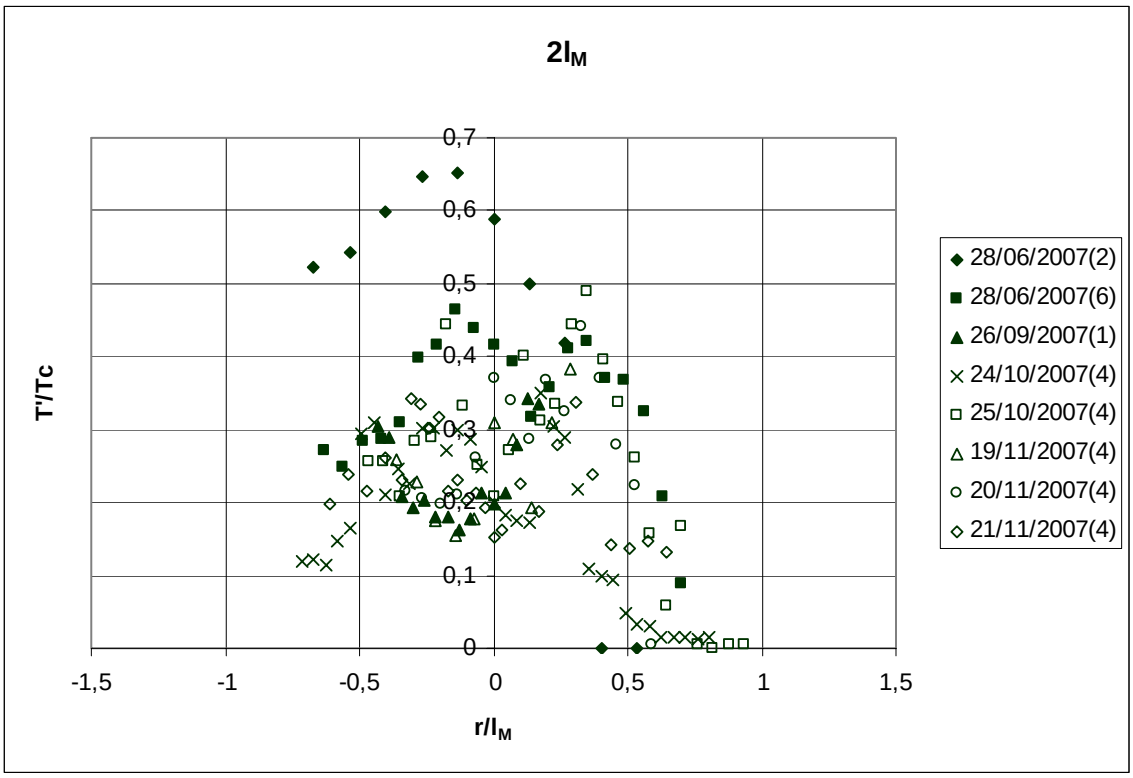
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

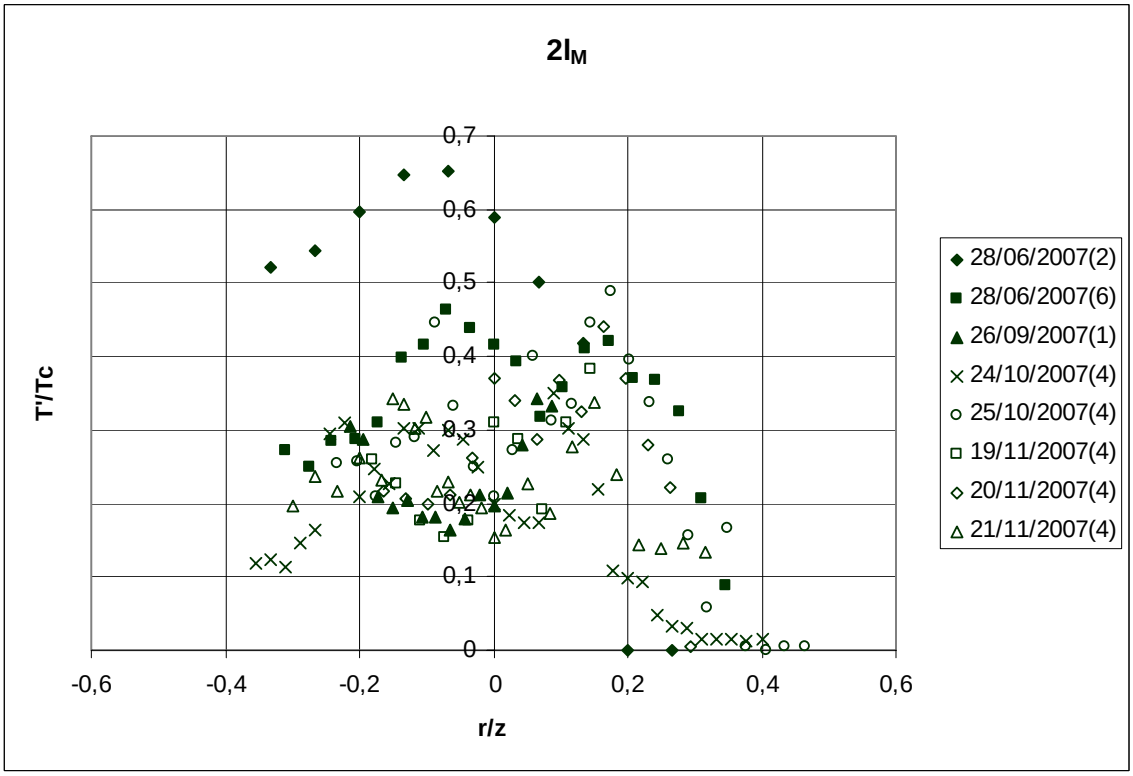




Σχήμα 3.6 a,b Αδιάστατο διάγραμμα θερμοκρασίας συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (a) και r/z (b) σε βάθος $2l_M$.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203





Σχήμα 3.6 c,d Αδιάστατο διάγραμμα τύρβης συναρτήσει του αδιάστατου βάθους r/l_M (c) και r/z (d) σε βάθος $2l_M$.

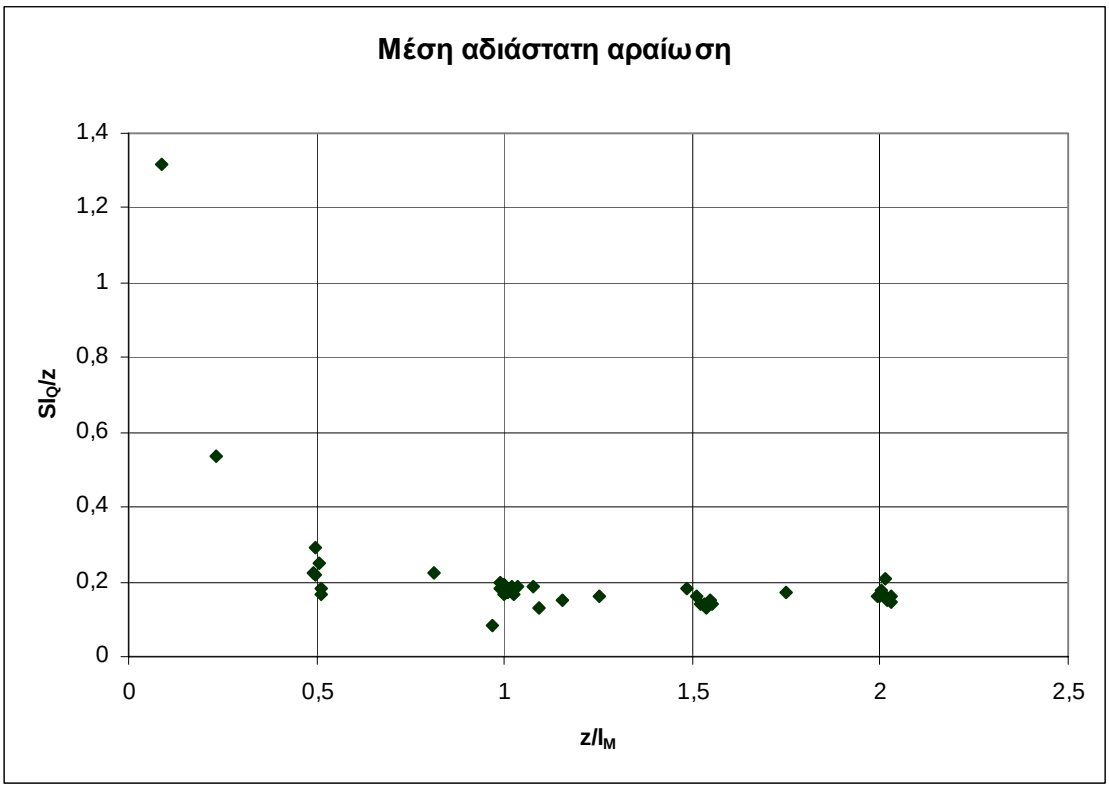
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα θερμοκρασίας που προέκυψαν έχουν μεγαλύτερο εύρος (η αδιάστατη απόσταση r/z φτάνει μέχρι την τιμή 0.60) από τα αντίστοιχα διαγράμματα σε θερμαινόμενες φλέβες με θετική άνωση όπου η απόσταση r/z δεν ξεπερνάει την τιμή 0.3 (Papanicolaou & List 1987). Αυτό προφανώς οφείλεται στο ότι η φλέβα εκτρέπεται προς τα άνω και τα όρια της ανερχόμενης ροής εκτείνονται πέραν του r/z=0.3. Επίσης τα προφίλ θερμοκρασιών στην περιοχή r/z<0.2 έχουν απότομες κλίσεις, πράγμα το οποίο υποδηλώνει ότι αυτή είναι περίπου η ακτινική απόσταση η οποία αποτελεί το όριο της κατερχόμενης από την ανερχόμενη ροή.

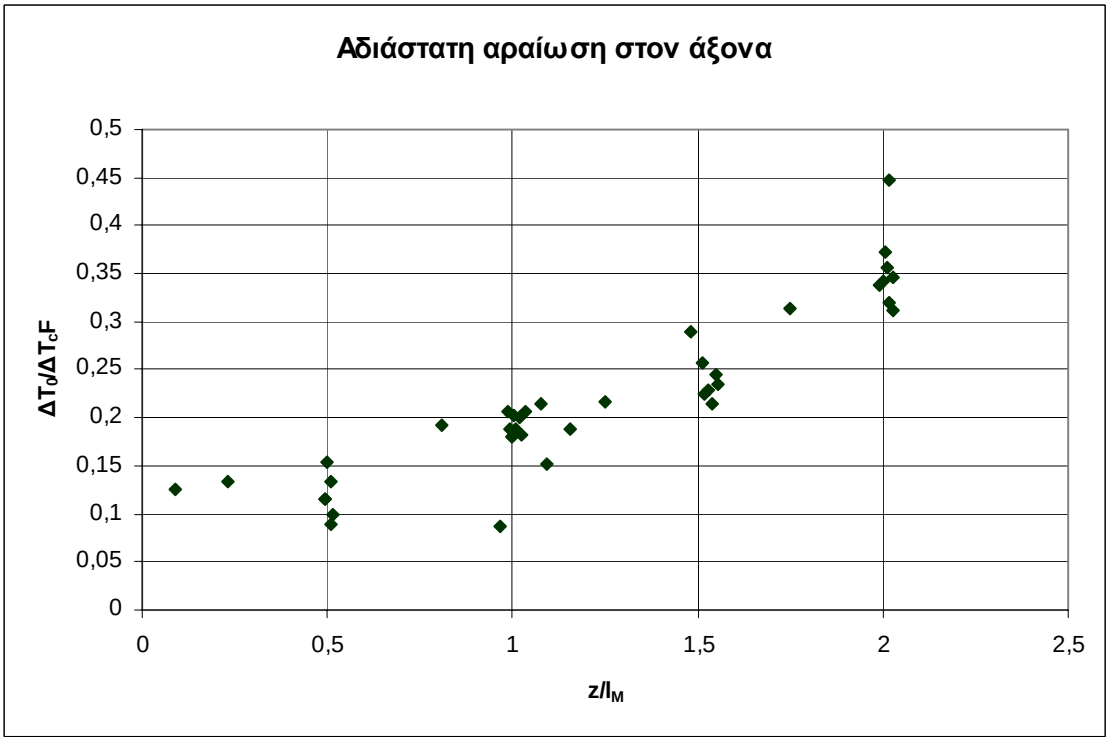
Τα διαγράμματα της τύρβης εμφανίζουν και αυτά μεγαλύτερο εύρος απ' ότι στις φλέβες με θετική άνωση. Η μεγάλη διασπορά που παρατηρείται, ιδίως στις περιοχές $1.5l_M$ και $2l_M$, οφείλεται στην αστάθεια της ροής γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Η ροή δεν παρουσίαζε συμμετρία αλλά είχε την τάση να κλίνει προς μια κατεύθυνση, ιδίως στο βάθος σταθεροποίησης. Για να μην υπάρξει τόσο μεγάλη διασπορά, η δειγματοληψία έπρεπε να γίνει για χρόνο μεγαλύτερο από 40 sec σε κάθε θέση, πράγμα αδύνατον καθώς η διεπιφάνεια του αναμεμιγμένου ρευστού θα κατέβαινε και θα αλληλεπιδρούσε με την ανερχόμενη ροή επηρεάζοντας την ομοιογένεια του νερού του αποδέκτη.

Η αδιάστατη αραίωση στον άξονα της φλέβας προβάλλεται συναρτήσει της αδιάστατης απόστασης z/l_M (σχήματα 3.7 και 3.8). Για τιμές $z/l_M>1$ η κανονικοποιημένη αραίωση κυμαίνεται μεταξύ 0.15~0.17, τιμές οι οποίες είναι πολύ κοντά στην τιμή 0.165 που υπολόγισαν σε θερμή φλέβα με θετική άνωση οι Papanicolaou & List (1987). Η υπολογιζόμενη τιμή της μέσης αραίωσης από το μονοδιάστατο μοντέλο των Papanicolaou & Kokkalis (2008) είναι περίπου 0.285 δηλαδή 1.7 με 1.9 φορές μεγαλύτερη από αυτήν που μετρήθηκε πειραματικά στην παρούσα εργασία. Σε φλέβες με θετική άνωση όπου οι μέσες χρονικά τιμές της ταχύτητας και της θερμοκρασίας ή της συγκέντρωσης ακολουθούν κατανομή κατά Gauss, ο λόγος αραίωσης στον άξονα διά την μέση αραίωση είναι περίπου ίσος με 1.4. Οι κατανομές της θερμοκρασίας, στην παρούσα εργασία έχουν μία περιοχή στην οποία η θερμοκρασία υπερβαίνει την τιμή $0.4T_c$ ενώ στο μεγαλύτερο μέρος ισχύει $T<0.4T_c$. Συνεπώς, στην προκειμένη περίπτωση, ο λόγος T/T_c υπερβαίνει την τιμή 1.4.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 3.7 Μέση αδιάστατη αραίωση.



Σχήμα 3.8 Αδιάστατη αραίωση στον άξονα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Σε θερμαινόμενες φλέβες με θετική άνωση, οι μετρήσεις θερμοκρασίας κατά πλάτος της φλέβας μπορούν να προσομοιωθούν με καμπύλη Gauss, η οποία εκφράζει την θεωρητική κατανομή πιθανότητας εμφανίσεως των θερμοκρασιών αυτών, σύμφωνα με την σχέση:

$$T = T_c e^{-r/b} \tag{3.1}$$

όπου:

T: Η χρονικά μέση θερμοκρασία.

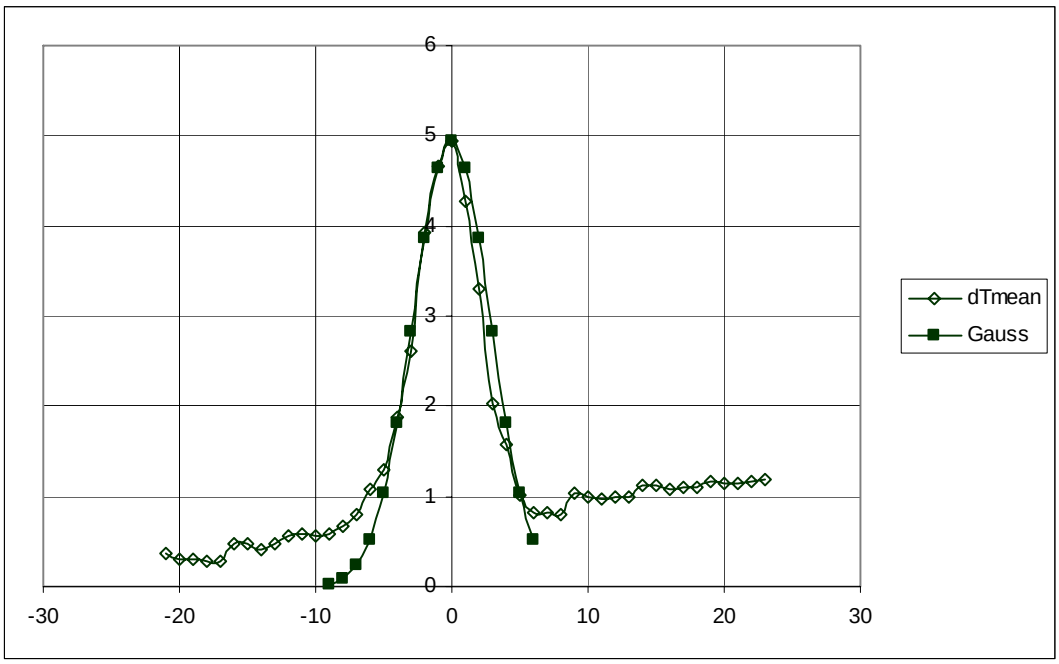
T_c: Η χρονικά μέση θερμοκρασία στον άξονα.

r: Ακτινική απόσταση από τον άξονα της φλέβας.

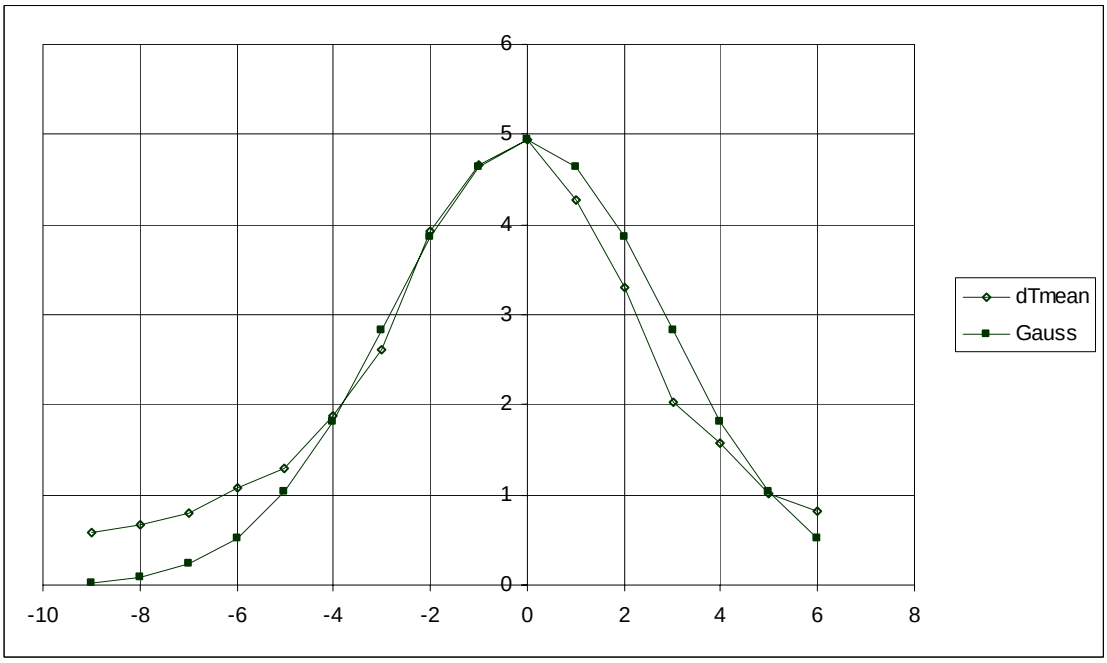
b: Πλάτος φλέβας.

Οι Seban, Behnia και Abreu (1978) έδειξαν ότι σε κατακόρυφες φλέβες με αρνητική άνωση, η προσομοίωση αυτή δεν είναι δυνατή. Η κατανομή Gauss περιγράφει επαρκώς τις θερμοκρασίες στην περιοχή της κατερχόμενης ροής όμως δεν λαμβάνει υπ’ όψη την αλληλεπίδραση με την ανερχόμενη ροή. Η επάρκεια των προβλέψεων από τις ολοκληρωτικές θεωρίες για τέτοιες περιπτώσεις είναι απλώς συμπτωματική. Στην πραγματικότητα η ανάμιξη θερμού νερού της κατερχόμενης ροής με ψυχρό νερό της ανερχόμενης ροής επηρεάζει την θερμοκρασία της φλέβας. Η προσομοίωση με καμπύλη Gauss ισχύει μόνο για ένα πολύ μικρό εύρος της φλέβας, κοντά στον άξονα, στην περιοχή της κατερχόμενης ροής. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώθηκε στην παρούσα εργασία όπου έγινε προσομοίωση στις μετρήσεις του πειράματος 24/10/2007 (2). Από το σχήμα 3.9 φαίνεται ότι η προσομοίωση είναι δυνατή μόνο στην περιοχή του άξονα της φλέβας και πάλι χωρίς μεγάλη ακρίβεια.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 3.9(a) Προσομοίωση δεδομένων θερμοκρασίας με καμπύλη Gauss (πέιραμα 24/10/2007 (2)).



Σχήμα 3.9(b) Μεγέθυνση του σχήματος 3.8(a) στην περιοχή πλησίον του άξονα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

3.6 Βιντεοσκόπηση – Όρια φλέβας

Για τον ακριβή προσδιορισμό του πλάτους της φλέβας έγιναν τρία επιπλέον πειράματα, τα οποία κινηματογραφήθηκαν με ψηφιακή βιντεοκάμερα. Συγκεκριμένα έγινε ένα πείραμα για κάθε διατομή ακροφυσίου. Η κάθε κινηματογράφηση διήρκεσε περίπου πέντε λεπτά και ξεκινάει από τη στιγμή που ανοίγει ο διακόπτης της φλέβας ώστε να περιλαμβάνει όλα τα στάδια ανάπτυξης της ροής. Οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων φαίνονται στον πίνακα 3.4. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων δεν έγιναν μετρήσεις θερμοκρασίας.

A/A	Ημερομηνία	D (cm)	F (l/min)	T_a (^oC)	T_0 (^oC)
1	11/10/2007	0.75	1.20	24.20	67.20
2	11/10/2007	0.50	0.80	24.80	67.50
3	11/10/2007	1.00	1.60	25.20	67.90

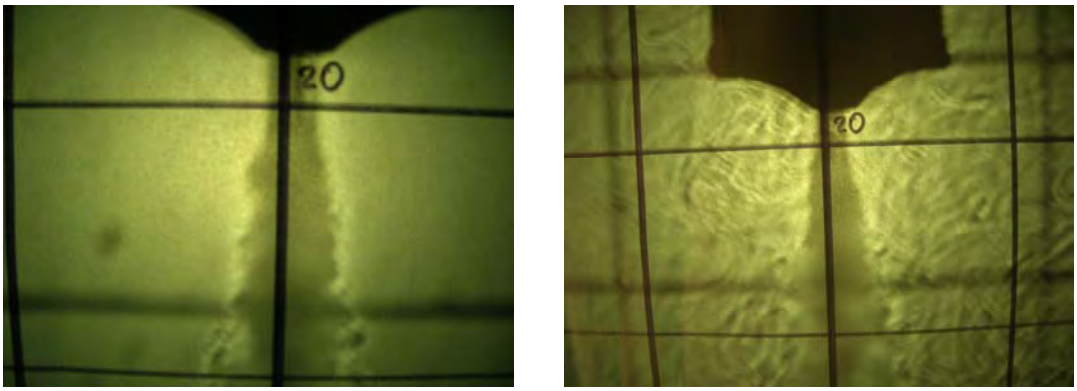
Πίνακας 3.4 Αρχικές συνθήκες βιντεοσκοπημένων πειραμάτων.

Από την προβολή των βιντεοσκοπήσεων έγινε γραφικά ο προσδιορισμός των ορίων της φλέβας ενώ με μετρήσεις βάθους και πλάτους της φλέβας επάνω στις φωτογραφίες υπολογίστηκε η γωνία φ που σχηματίζει η κατερχόμενη ροή με τον άξονα (σχήμα 3.11). Με δεδομένη τη γωνία αυτή είναι δυνατός ο υπολογισμός του πλάτους της κατερχόμενης ροής σε οποιαδήποτε απόσταση από το ακροφύσιο για κάθε μία από τις τρεις διατομές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 3.5.

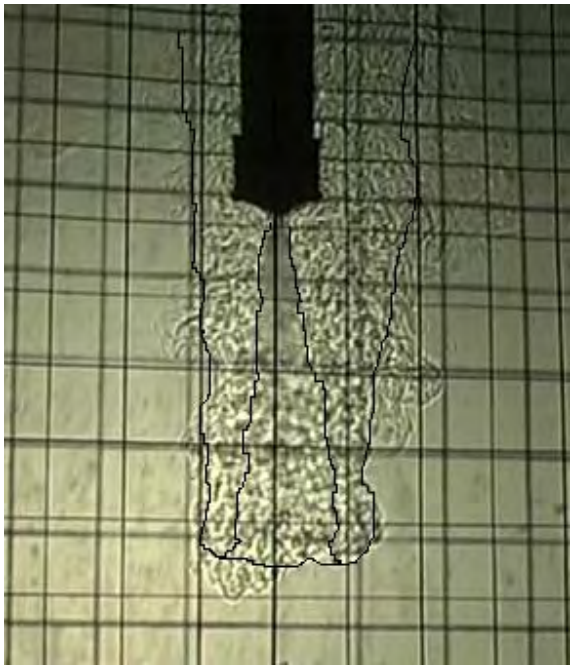
D (cm)	z (cm)	r (cm)	tanφ	φ (deg)
0.50	9.50	1.00	0.105	6.00
0.75	9.50	2.50	0.263	14.74
1.00	9.50	4.00	0.421	21.73

Πίνακας 3.5 Υπολογισμός γωνίας της φλέβας στο σημείο εξόδου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 3.10 (a) & (b) Λεπτομέρεια της φλέβας κατά το αρχικό στάδιο (a) και κατά το στάδιο μόνιμης δίαιτας (b) όπου διακρίνεται η ανερχόμενη ροή που περικλείει την κατερχόμενη φλέβα



Σχήμα 3.11 Φωτογραφία της φλέβας όπου διακρίνονται οι περιοχές της ανερχόμενης και της κατερχόμενης ροής καθώς και η γωνία φ

3.7 Επιπρόσθετα πειράματα

Από τα σαράντα έξι πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, τα τριάντα πέντε αφορούσαν μετρήσεις στις χαρακτηριστικές περιοχές $0.5l_M$, l_M, $1.5l_M$ και $2l_M$. Τα υπόλοιπα έντεκα πραγματοποιήθηκαν στις θέσεις $0.25l_M$, $0.75l_M$, $1.25l_M$ και $1.75l_M$ καθώς και στην έξοδο της φλέβας αλλά και στην περιοχή πάνω από αυτήν (interface). Τα πειράματα αυτά φαίνονται συνοπτικά στον πίνακα 3.6. Τα διαγράμματα θερμοκρασίας που προέκυψαν στις περιοχές κάτω από το ακροφύσιο είναι ανάλογα με αυτά των χαρακτηριστικών περιοχών, ενώ η αδιάστατη αραίωση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

έχει υπολογιστεί στον πίνακα 3.2. Ένα αντιπροσωπευτικό διάγραμμα μετρήσεων θερμοκρασίας στην περιοχή $1.25/_M$ παρατίθεται στο σχήμα 3.12. Όσον αφορά στην περιοχή πάνω από το ακροφύσιο (interface) δεν είναι δυνατός ο υπολογισμός της αδιάστατης αραίωσης στον άξονα διότι οι μετρήσεις λαμβάνονται δεξιά και αριστερά του ακροφυσίου. Η μέση αραίωση υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (1.16) αφού προηγουμένως έχει υπολογισθεί η μέση θερμοκρασία για κάθε πείραμα (πίνακας 3.7). Η ίδια μεθοδολογία εφαρμόστηκε και σε πειράματα που έγιναν στο επίπεδο του ακροφυσίου (πίνακας 3.8).

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ημερομηνία	**Αριθμός**	**D (cm)**	**F (l/min)**	**z_{sur} (cm)**	**Z (cm)**	**Position**	**T_a (^oC)**	**T_0 (^oC)**
28/6/2007	Πείραμα 8	0.75	2.00	10.50	-10.00	interface	29.39	68.90
10/7/2007	Πείραμα 2	0.75	1.00	10.50	-10.00	interface	28.24	45.00
12/7/2007	Πείραμα 1	0.75	1.20	20.50	0.00	nozzle	26.61	55.20
25/9/2007	Πείραμα 1	0.50	1.20	42.70	22.20	1,25Lm	27.79	71.90
26/9/2007	Πείραμα 3	0.50	2.00	69.00	48.50	1,75Lm	25.24	73.30
27/9/2007	Πείραμα 1	1.00	2.00	21.50	1.00	nozzle	25.31	65.00
27/9/2007	Πείραμα 3	1.00	1.60	27.50	7.00	0,75Lm	26.58	68.40
27/9/2007	Πείραμα 4	1.00	1.40	10.50	-10.00	interface	27.10	68.50
28/9/2007	Πείραμα 1	1.00	1.20	22.40	1.90	0,25Lm	25.26	56.30
28/9/2007	Πείραμα 2	1.00	0.80	20.50	0.00	nozzle	25.54	55.90
28/9/2007	Πείραμα 3	1.00	1.00	15.50	-5.00	interface	25.64	56.90

Πίνακας 3.6 Αρχικές συνθήκες πειραμάτων

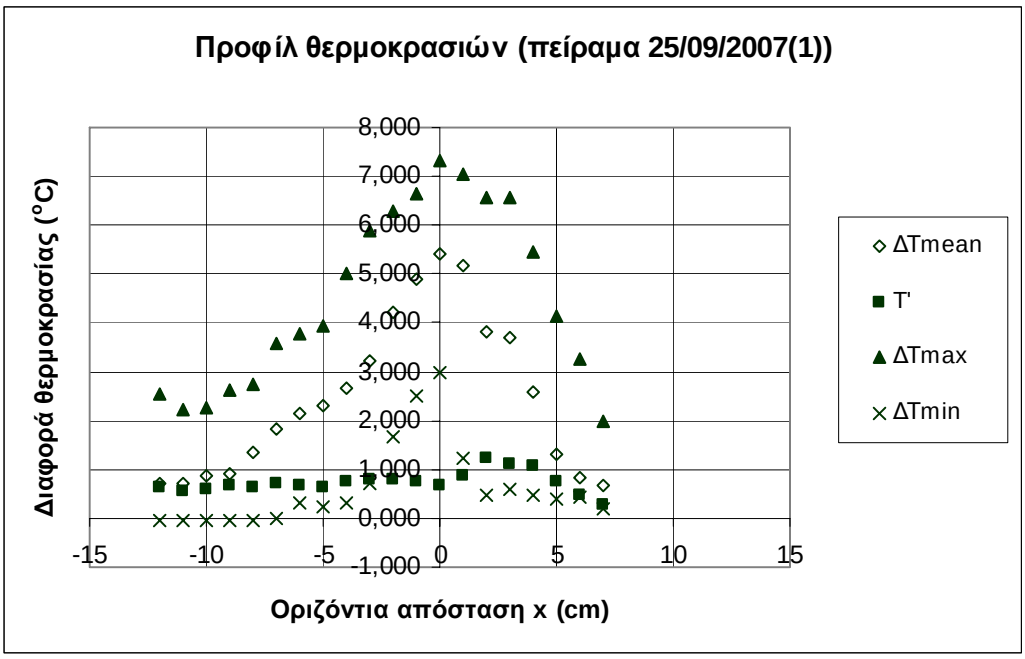
Πείραμα	**T_{mean} (^oC)**	**T_a (^oC)**	**T_0 (^oC)**	**Αραίωση**
28/6/2007	30.87	29.39	68.90	26.78
10/7/2007	28.75	28.24	45.00	32.58
27/9/2007	28.84	27.10	68.50	23.80
28/9/2007	26.29	25.64	56.90	47.98

Πίνακας 3.7 Υπολογισμός αραίωσης στην περιοχή πάνω από το ακροφύσιο

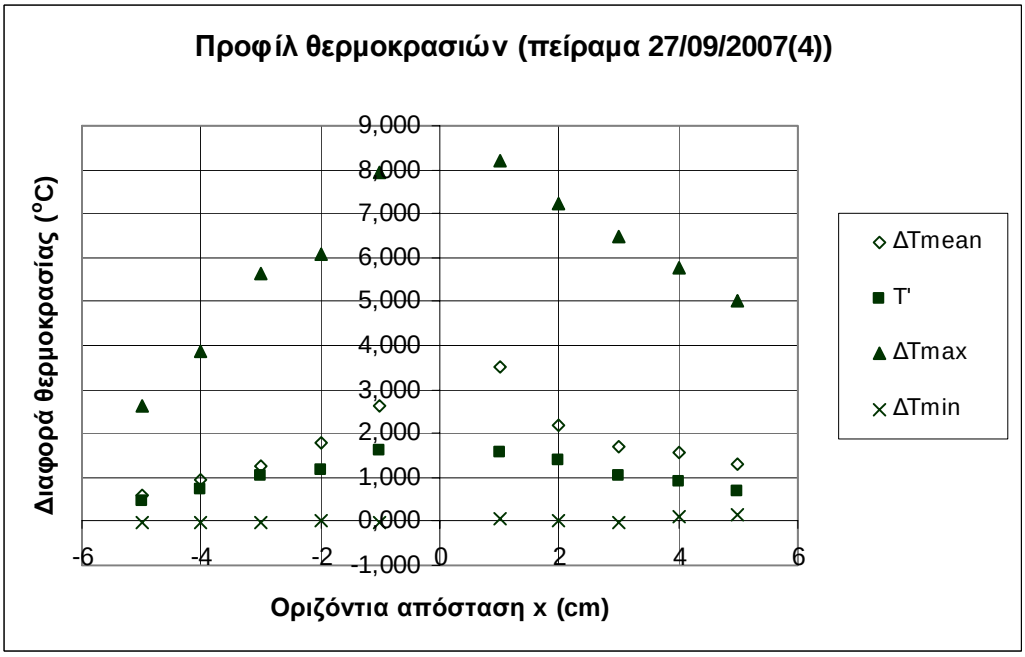
Πείραμα	**T_{mean} (^oC)**	**T_a (^oC)**	**T_0 (^oC)**	**Αραίωση**
12/7/2007	28.26	26.61	55.20	17.33
28/9/2007	35.33	25.54	55.90	3.10

Πίνακας 3.8 Υπολογισμός αραίωσης στο επίπεδο του ακροφυσίου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

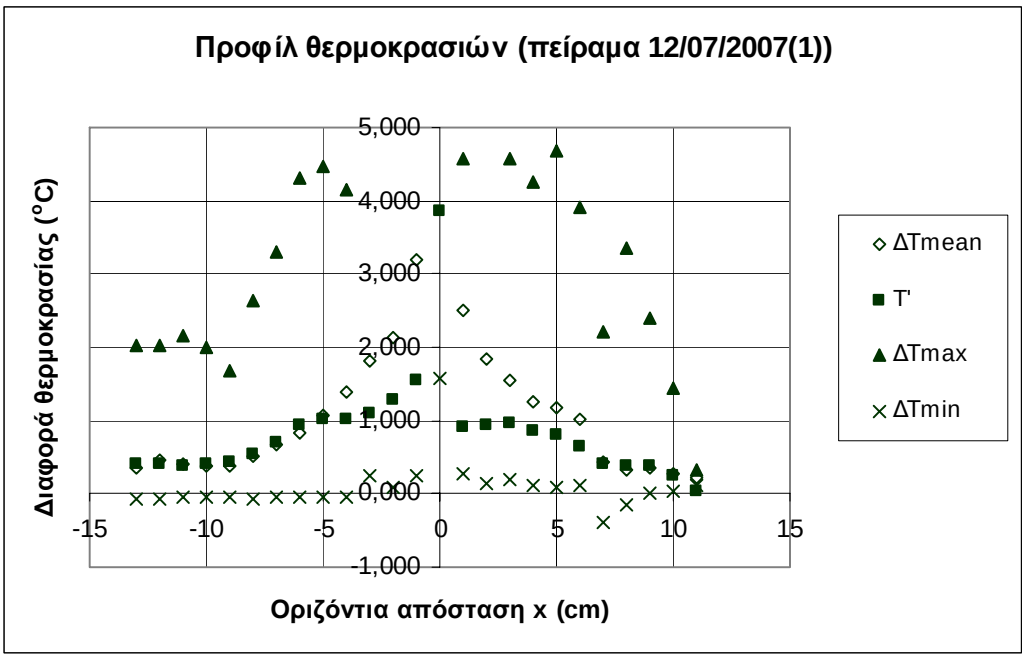


Σχήμα 3.12 Μέση θερμοκρασία, ένταση τύρβης μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία στην περιοχή 1.25/$_M$ (πείραμα 25/09/2007 (1)).



Σχήμα 3.13 Μέση θερμοκρασία, ένταση τύρβης μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία στην περιοχή ανάντη του ακροφυσίου (πείραμα 27/09/2007 (4)).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203



Σχήμα 3.14 Μέση θερμοκρασία, ένταση τύρβης μέγιστη και ελάχιστη θερμοκρασία στο επίπεδο του ακροφυσίου (z=0) (πείραμα 12/07/2007 (1)).

3.8 Σφάλματα

Τα σφάλματα είναι αναπόφευκτα σε κάθε πειραματική διαδικασία και οφείλονται κυρίως στην αδυναμία του ανθρώπινου παράγοντα. Οι κύριες αιτίες σφαλμάτων είναι δυνατόν να οφείλονται (i) σε λανθασμένη ρύθμιση (calibration)του οργάνου και (ii) σε σφάλμα αναγνωσιμότητας του οργάνου. Παράγοντες που επηρεάζουν επίσης τις μετρήσεις είναι η περιοχή μετρήσεων, η υστέρηση, η διακριτότητα, η επαναληψιμότητα και η γραμμικότητα του οργάνου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πιθανά σφάλματα στις μετρήσεις μπορεί να οφείλονται στην λάθος ανάγνωση των αναλογικών θερμομέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για την ρύθμιση των θερμοστοιχείων ταχείας απόκρισης, σε θόρυβο που να προέρχεται από το ηλεκτρικό δίκτυο του εργαστηρίου και επηρεάζει το σήμα των thermistors, σε αιωρούμενα σωματίδια που υπάρχουν μέσα στη δεξαμενή και επηρεάζουν τις μετρήσεις των thermistors. Σημαντικό εμπόδιο αποτέλεσε ο μηχανικός βραχίονας ο οποίος εμπόδιζε την ανάπτυξη της ροής. Τέλος, ενδεχόμενο σφάλμα στον προσδιορισμό της θέσης του βραχίονα μέσα στην δεξαμενή και τον υπολογισμό του βάθους σταθεροποίησης της φλέβας οφείλεται στην διάταξη οπτικοποίησης της φλέβας και ιδιαίτερα στον ακριβή σχεδιασμό του κανάβου επάνω στην πλευρά της δεξαμενής και στην προβολή του εμπρόσθιου κανάβου στην πίσω πλευρά της δεξαμενής, η οποία καμπυλώνεται λόγω της διάθλασης του φωτός μέσα στο νερό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία οδήγησε στην εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

1) Στην περιοχή $z/l_M=2$ η ροή διακόπτεται λόγω μεταβολής του βάθους σταθεροποίησης της φλέβας. Για το λόγο αυτό, στην επεξεργασία της χρονοσειράς χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι τιμές $T=T_a+0.05^oC$.

2) Το προφίλ θερμοκρασίας σε φλέβες με αρνητική άνωση έχει μεγαλύτερο εύρος απ' ότι σε φλέβες με θετική άνωση (0.6 έναντι 0.3).

3) Το κανονικοποιημένο διάγραμμα τύρβης έχει μεγαλύτερο εύρος από το αντίστοιχο φλέβας με θετική άνωση αλλά οι μέγιστες τιμές είναι περίπου οι ίδιες. Στην περιοχή σταθεροποίησης της ροής, όπου υπερισχύουν οι ανωστικές δυνάμεις, η μέγιστη ένταση της τύρβης είναι διπλάσια.

4) Η κανονικοποιημένη αραίωση στον άξονα της φλέβας κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.15~0.17 για $z/l_M>1$. Οι τιμές αυτές είναι παρόμοιες με αυτές που έχουν παρατηρηθεί σε φλέβες με θετική άνωση. Ο λόγος της αραίωσης στον άξονα της φλέβας προς τη μέση αραίωση είναι μεγαλύτερος του 1.4 που αποτελεί τυπική τιμή για φλέβες με θετική άνωση και κατανομή κατά Gauss της μέσης χρονικά συγκέντρωσης και ταχύτητας σε μια εγκάρσια διατομή από τον άξονα της φλέβας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΥΡΒΗΣ

Οι τυρβώδεις ροές αποτελούν ρευστομηχανικά συστήματα τα οποία είναι δύσκολο να περιγραφούν από μια αναλυτική λύση. Η τύρβη είναι φαινόμενο μη γραμμικό με δυσνόητους μηχανισμούς ανάπτυξης και τα συστήματα τυρβωδών ροών είναι χαοτικά και μη προβλέψιμα. Στην παρούσα εργασία η διερεύνηση της τύρβης έγινε με τη θεώρηση ότι αποτελεί την τυπική απόκλιση των παρατηρημένων τιμών θερμοκρασίας. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο εξετάζεται μια στοχαστική διαδικασία ανάλυσης της τύρβης με δεδομένα τις χρονοσειρές θερμοκρασίας.

5.1 Ανάλυση χρονοσειρών

Σε αρκετές πειραματικές διαδικασίες ή σε προσομοιώσεις φυσικών φαινομένων, η έλλειψη αρκετών πρωτογενών στοιχείων (π.χ. μετρήσεων) έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία περιγραφής της συμπεριφοράς του φαινομένου προς μελέτη. Πολλές φορές η έλλειψη μετρήσεων είναι αναπόφευκτη λόγω των συνθηκών του πειράματος όπως στην περίπτωση της παρούσας εργασίας όπου η διάρκεια των μετρήσεων δεν ξεπερνούσε τα 40 δευτερόλεπτα λόγω επιρροής της διεπιφάνειας (interface) της ροής. Για την υπέρβαση των δυσκολιών αυτών εισήχθησαν νέες θεωρίες όπως η στατιστική, η θεωρία πιθανοτήτων, η θεωρία του χάους, η ανάλυση χρονοσειρών κ.ά. οι οποίες δίνουν ικανοποιητικές εξηγήσεις στην συμπεριφορά των φυσικών φαινομένων αλλά αποτελούν ταυτόχρονα και το υπόβαθρο για τη δημιουργία μαθηματικών μοντέλων περιγραφής και πρόβλεψης.

Πολλές φορές σε ένα δυναμικό σύστημα δεν είναι γνωστές οι εξισώσεις που περιγράφουν τη δυναμική του παρά μόνο μερικές μετρήσιμες ποσότητες συναρτήσει του χρόνου, οι χρονοσειρές. Χρονοσειρά είναι οι διατεταγμένες σε αυστηρή χρονολογική ακολουθία πραγματοποιήσεις (μετρήσεις) μιας μεταβλητής. Η τοποθέτηση των γεγονότων κατά χρονική ακολουθία είναι σημαντική διότι λαμβάνεται υπ’ όψη η επίδραση των παλαιότερων γεγονότων πάνω στις τιμές των τωρινών ή και των μελλοντικών. Η ιδιότητα αυτή των γεγονότων να εξαρτώνται από προηγούμενες τιμές ονομάζεται μνήμη της χρονοσειράς. Άλλες ιδιότητες των χρονοσειρών είναι η ομοιογένεια, η μονιμότητα, η τάση, η περιοδικότητα, η εμμονή κ.ά.

Στο συγκεκριμένο πείραμα έγινε γραμμική ανάλυση χρονοσειρών στα δεδομένα ενός αντιπροσωπευτικού πειράματος. Συγκεκριμένα επιλέχθηκαν οι χρονοσειρές των πειραμάτων 25/10/2007 (2) και 25/10/2007 (3) όπου το βάθος των μετρήσεων είναι l_M και $1.5l_M$ αντίστοιχα και η τύρβη πλήρως ανεπτυγμένη. Οι μέθοδοι ανάλυσης χρονοσειρών που εφαρμόστηκαν αποτελούν τις δύο βασικές μεθόδους γραμμικής ανάλυσης χρονοσειρών, η φασματική ανάλυση και η ανάλυση αυτοσυσχέτισης - ετεροσυσχέτισης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

5.2 Συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης - ετεροσυσχέτισης

Αυτοσυσχέτιση (autocorrelation) τ τάξης μιας χρονοσειράς είναι η συσχέτιση των τιμών της με την ίδια σειρά μετατοπισμένη κατά τ χρονικά διαστήματα. Στη γενική περίπτωση μιας μη μόνιμης χρονοσειράς, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μιας μεταβλητής $U(t) = \overline{U} + u(t)$ σε δύο διαφορετικούς χρόνους t_1 και t_2 μπορεί να ορισθεί ως:

$$R(t_1, t_2) = \overline{u(t_1)u(t_2)}$$

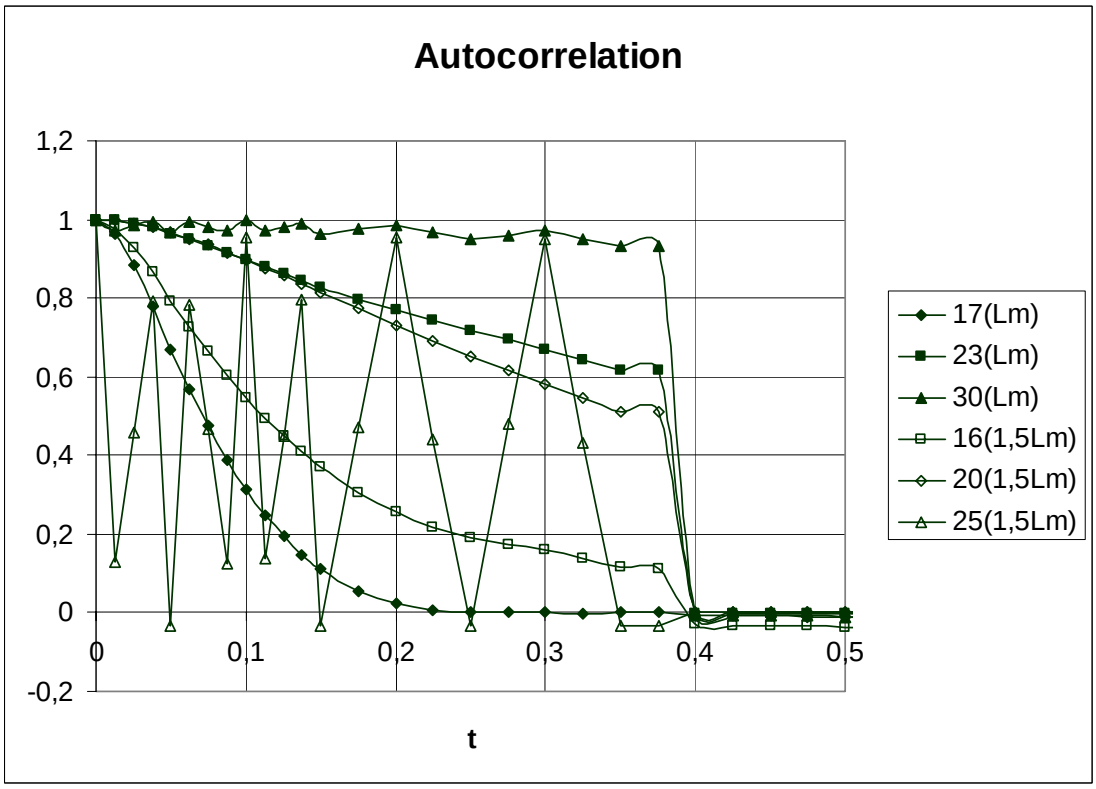
Για μια μόνιμη χρονοσειρά με χρονική υστέρηση $\tau = t_1 - t_2$ η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης μπορεί να γραφτεί ως:

$$R(\tau) = \overline{u(t)u(t+\tau)}$$

Η κανονικοποιημένη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ορίζεται ως:

$$r(\tau) = \frac{\overline{u(t)u(t+\tau)}}{u^2}; \; u^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} u^2(t_i)$$

όπου u^2 είναι η μέση τετραγωνική τιμή (variance).



Σχήμα 5.1 Αυτοσυσχέτιση χρονοσειρών σε βάθος l_M και $1.5l_M$ στον άξονά, στο όριο και εκτός της φλέβας

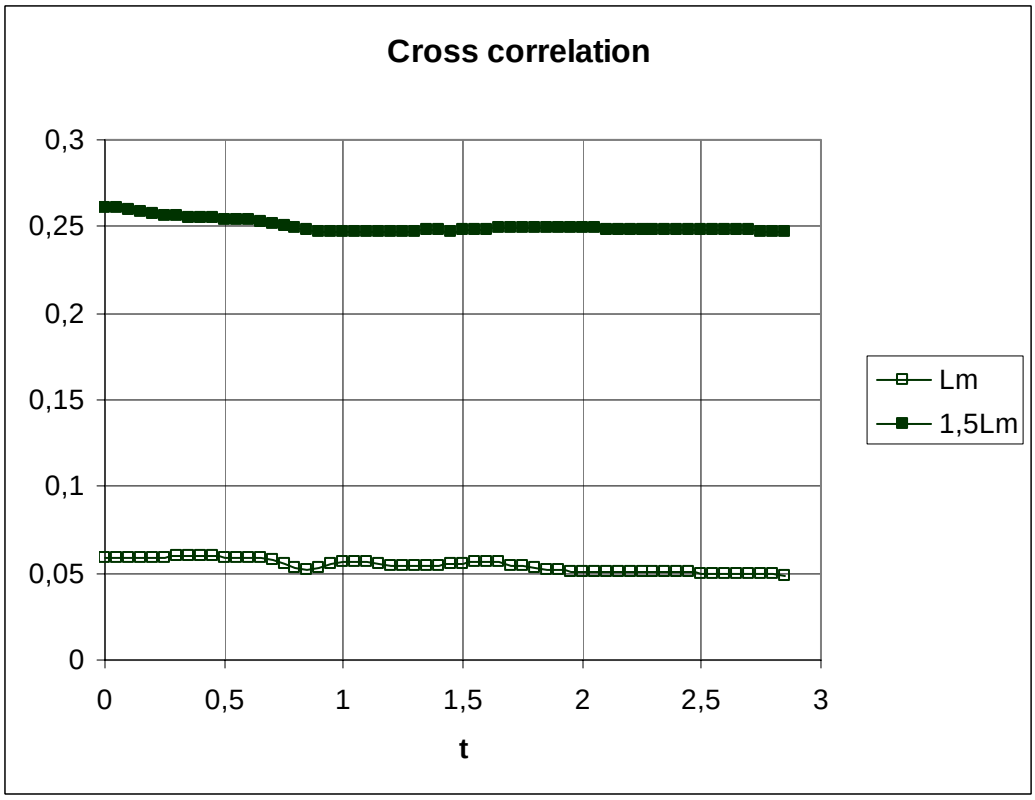
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

Στο σχήμα 5.1 φαίνεται το διάγραμμα αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς σε δύο βάθη l_M και $1.5l_M$ και σε τρεις αποστάσεις για κάθε βάθος, στον άξονα της φλέβας (περιοχή 16 και 17), στην περιοχή της ανερχόμενης ροής (περιοχή 23 και 20) και στο όριο της φλέβας (περιοχή 30 και 25). Το διάγραμμα μηδενίζεται για πρώτη φορά σε χρόνο τ=0.4 sec. Ο χρόνος αυτός είναι αρκετά μικρός που σημαίνει ότι οι τιμές της χρονοσειράς είναι ασυσχέτιστες για χρόνους που υπερβαίνουν 0.50 sec. Η χρονοσειρά δεν έχει μνήμη πέραν των 0.50 sec και η κάθε τιμή δεν εξαρτάται από την προηγούμενη.

Ανάλογα με την αυτοσυσχέτιση μπορεί να οριστεί και η ετεροσυσχέτιση (cross-correlation) ως:

$$C(\tau) = \overline{u(t)\upsilon(t+\tau)}$$

μεταξύ δύο μεταβλητών u(t) και υ(t). Στο σχήμα 5.2 φαίνεται το διάγραμμα ετεροσυσχέτισης των χρονοσειρών στην περιοχή 16 (άξονας της φλέβας) και 17 (1cm δίπλα).



Σχήμα 5.2 Ετεροσυσχέτιση χρονοσειρών στον άξονα της φλέβας και 1cm δίπλα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

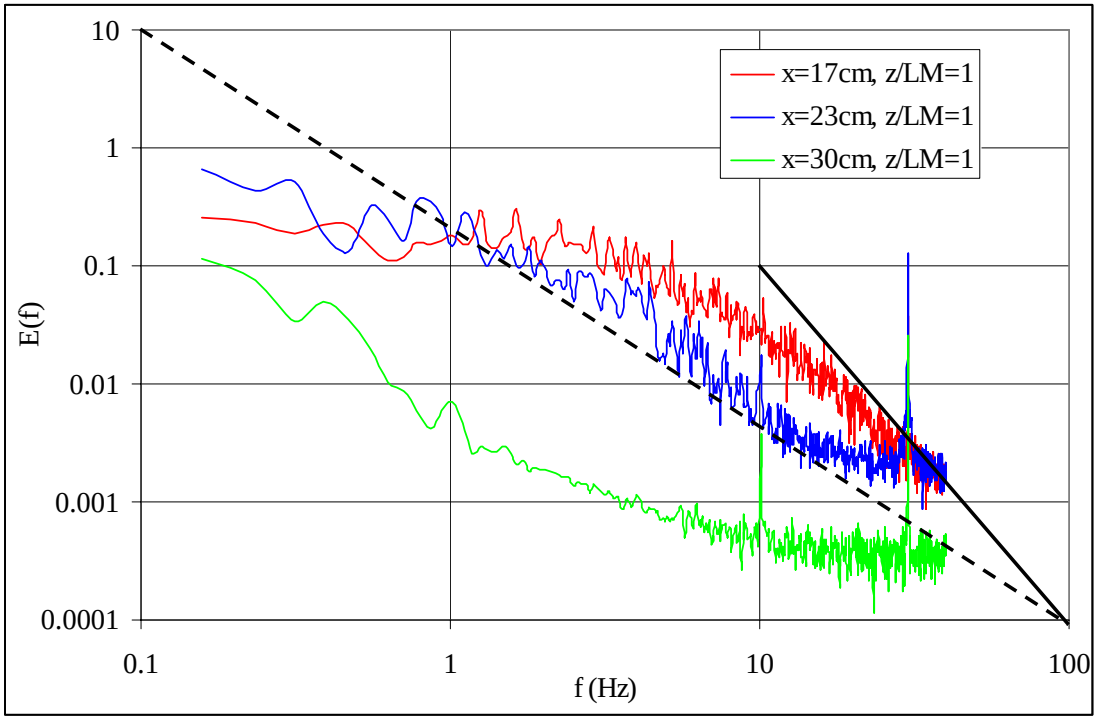
5.3 Φασματική ανάλυση

Η φασματική ανάλυση είναι η ανάλυση της χρονοσειράς στο πεδίο των συχνοτήτων. Είναι χρήσιμη στην ανίχνευση τυχόν περιοδικότητας στην χρονοσειρά (η ύπαρξη αιχμής στο φάσμα σε μια συγκεκριμένη συχνότητα ω δηλώνει την ύπαρξη περιοδικοτήτων με βασική συχνότητα ω) και η μορφή του φάσματος, μετά την αφαίρεση των περιοδικοτήτων, δίνει πληροφορίες για το στοχαστικό ομοίωμα που θα παραστήσει την υπόλοιπη σειρά.

Το ενεργειακό φάσμα (power spectrum) προκύπτει από τον συνεχή μετασχηματισμό Fourier:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(t) e^{2\pi i \omega t} dt$$

όπου R(t) η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης. Η ανάλυση έγινε για τρεις περιοχές της φλέβας, στον άξονα (περιοχή 16), στην περιοχή της ανερχόμενης ροής (περιοχή 20) και επάνω στο όριο της φλέβας (περιοχή 25). Στην περίπτωση ομογενούς τύρβης έχει εκτιμηθεί θεωρητικά από τον Kolmogorov ότι, σε λογαριθμικό διάγραμμα, το φάσμα ισχύος παρουσιάζει κλίση -5/3.

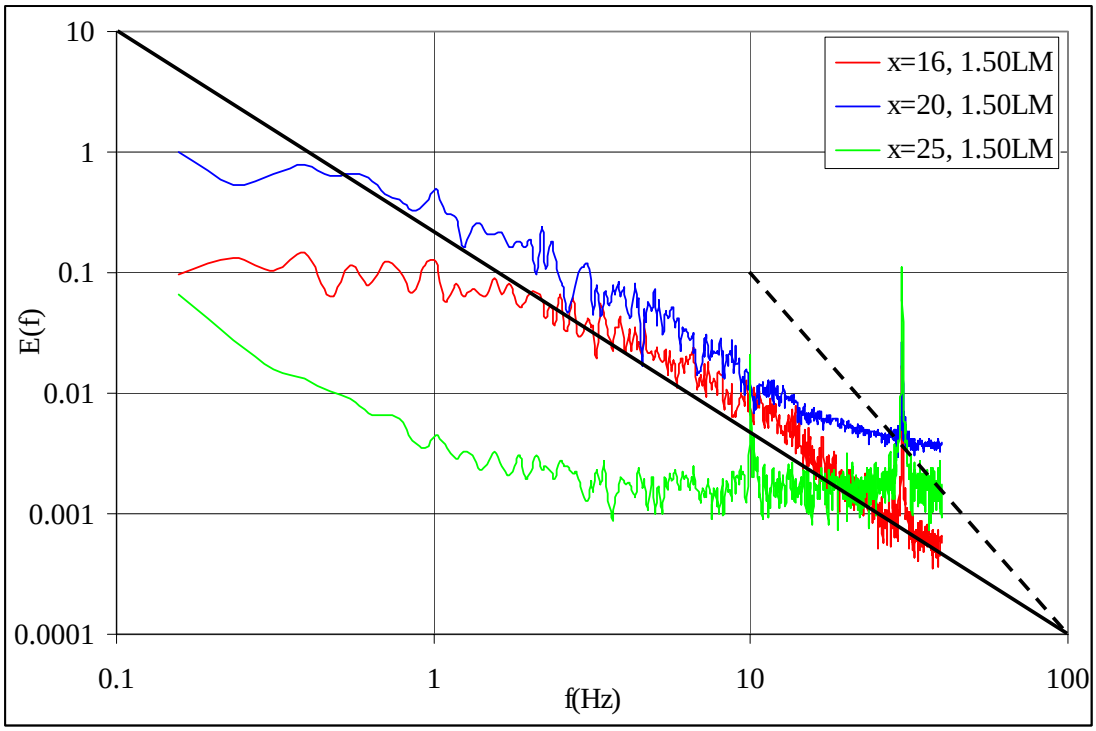


Σχήμα 5.3 Ενεργειακό φάσμα της τύρβης (πείραμα 25/10/2007(2))σε απόσταση l_M από το ακροφύσιο. Διακεκομμένη γραμμή με κλίση -5/3, συνεχής γραμμή με κλίση -3/1.

Από το σχήμα 5.3 φαίνεται ότι στην περιοχή 17 που βρίσκεται ο άξονας της φλέβας, το ενεργειακό φάσμα ακολουθεί την κλίση -5/3 στις χαμηλές συχνότητες (μέχρι 15 Hz) ενώ σε συχνότητες μεγαλύτερες των 15 Hz προσεγγίζει την κλίση -3. Παρόμοια συμπεριφορά έχει και το φάσμα της περιοχής 23 που βρίσκεται εντός των ορίων της φλέβας, στην περιοχή της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

ανερχόμενης ροής, με τη διαφορά ότι η κλίση για συχνότητες μεγαλύτερες του 1 Hz γίνεται πιο ομαλή. Εντελώς ακανόνιστη συμπεριφορά εμφανίζει η περιοχή 25 που βρίσκεται στο όριο της φλέβας. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζει και το ενεργειακό φάσμα της τύρβης σε βάθος 1.5l_M (σχήμα 5.4) με εξαίρεση ότι η εκτός άξονα περιοχή έχει μεγαλύτερη ισχύ.



Σχήμα 5.4 Ενεργειακό φάσμα της τύρβης (πείραμα 25/10/2007(3)) σε απόσταση 1.50l_M από το ακροφύσιο. Διακεκομμένη γραμμή με κλίση -3, συνεχής γραμμή με κλίση -5/3.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Π.Ν. Παπανικολάου, και Γ.Π. Παλαμιτζόγλου, (2006). Οριζόντια κυκλική ανωστική φλέβα σε ομογενή ακίνητο αποδέκτη. 10° Πανελλήνιο Συνέδριο Ε.Υ.Ε., Ξάνθη, 12-16 Δεκεμβρίου, 2006, Τόμος Α, 395 - 402.
2. G. Abraham, (1967). Jets with negative buoyancy in homogeneous fluid, J*. Hyd. Res.* 5(4), 235-248.
3. W.D. Baines, J.S. Turner and I.H. Campbell, (1990). Turbulent fountains in an open chamber, *J. Fluid Mech.,* 212, 557-592.
4. L.J. Bloomfield and R.C. Kerr, (2000). A theoretical model of a turbulent fountain*. J. Fluid Mech.*, 424, 197-216.
5. L.J. Bloomfield and R.C. Kerr, (1998). Turbulent fountains in a stratified fluid. *J. Fluid Mech*. 358, 335-356.
6. J.D. Demetriou, 1978.Turbulent diffusion of vertical water jets with negative buoyancy (In Greek), Ph.D. Thesis, National Technical University of Athens.
7. H.B. Fischer, E.J. List, R.C.Y. Koh, J. Imberger and N.H. Brooks, (1979). Mixing in inland and coastal waters, Academic Press.
8. G.H. Jirka, (2004). Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows Part 1: Single round jet, *Env. Fluid Mechanics*, 4, 1-56.
9. T.J. Kokkalis, 2006. Vertical turbulent jets of negative buoyancy in a calm homogeneous ambient, (In Greek), M.Sc. Thesis, Hydrodynamics and Environmental Engineering Laboratory, University of Thessaly.
10. N.E. Kotsovinos, 1975. A study of the entrainment and turbulence in a plane buoyant jet. Report No. KH-R-32, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.
11. W.R. Lindberg, (1994). Experiments on negatively buoyant jets, with and without cross-flow, in: P.A. Davies and M.J. Valente Neves (Eds.) Recent Research Advances in the Fluid Mechanics of Turbulent Jets and Plumes, NATO, Series E: Applied sciences, 255, Kluwer Academic Publishers, 131-145.
12. E. J. List, 1982. Mechanics of turbulent buoyant jets and plumes. Turbulent Buoyant Jets and Plumes (W. Rodi Editor), Pergamon, 1-68.
13. S.N. Michas and P.N. Papanicolaou, (2008) Heated horizontal buoyant jets into a calm uniform ambient. (Submitted to the 5th Eurotherm Conference).
14. L. Pantzlaff and R.M. Lueptow, (1999). Transient positively and negatively buoyant turbulent round jets, *Exp. Fluids*, 27, 117-125.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203

15. P.N. Papanicolaou and T.J. Kokkalis (2008) “Vertical buoyancy preserving and non preserving fountains, in a homogeneous calm ambient” (Int. J. Heat Mass Trans. In press.).
16. P.N. Papanicolaou and E.J. List, (1987). Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30, 2059-2071.
17. P.N. Papanicolaou and E.J. List, (1988). Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *J. Fluid Mech*., 195, 341-391.
18. R.A. Seban, M.M. Behnia and K.E. Abreu, (1978). Temperatures in a heated jet discharged downward, *Int. J. Heat Mass Trans*., 21, 1453-1458.
19. J.S. Turner, (1966). Jets and plumes with negative or reversing buoyancy, *J. Fluid Mech*., 26, 779-792.
20. H. Zhang and R.E. Baddour, (1998). Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large Froude numbers, Technical Note No. 12147, *J. Hyd. Eng*., *ASCE,* 124(5), 550-553.
21. P. K. Kundu, I. M. Cohen , Fluid Mechanics, second edition.
22. D R. Brillinger, Time series, Data analysis and theory.
23. Μ. Α. Μιμίκου, Τεχνολογία υδατικών πόρων.
24. Γ. Μπεργελές, Δ. Παπαντώνης, Σ. Τσαγγάρης, Τεχνικές μετρήσεις ρευστομηχανικών μεγεθών.
25. H. Tennekes and J. L. Lumley, A first course in turbulence.
26. P. A. Libby, Introduction to turbulence.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
16/04/2024 11:05:25 EEST - 3.14.70.203