



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

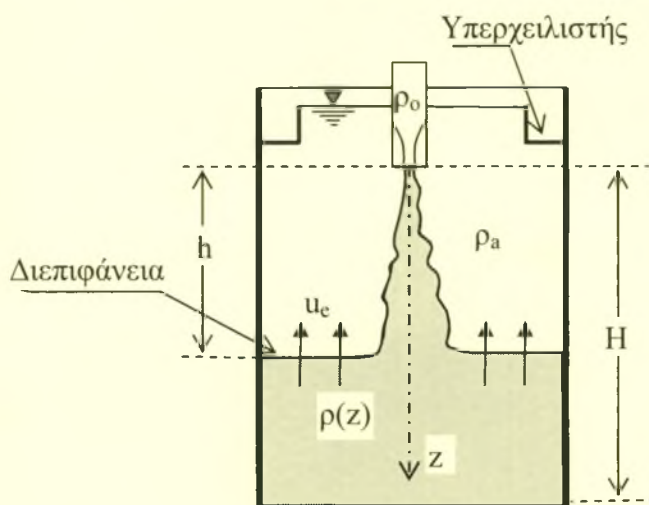
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΜΙΧΑΛΗ Ν. ΦΡΑΓΚΟΥ

**ΑΝΑΜΕΙΞΗ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΑΚΙΝΗΤΟ
ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΑΠΟ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΑΝΩΣΤΙΚΗ ΦΛΕΒΑ**



**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2005



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.:	3644/1
Ημερ. Εισ.:	9-06-2006
Δωρεά:	Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός:	ΠΤ-ΠΜ
	2005
	ΦΡΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν σύγγραμμα δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την υποστήριξη του καθηγητή μου

Παπανικολάου Παναγιώτη
τον οποίο και ευχαριστώ θερμά.

Οι επιστημονικές του συμβουλές πάνω στο θέμα της συμπεριφοράς των φλεβών, υπήρξαν κρίσιμες για τη διεκπεραίωση του παρόντος συγγράμματος.

Ευχαριστώ επίσης τον

Παπά Ηλία

για την τεχνική υποστήριξη στο εργαστήριο, η οποία υπήρξε πολύτιμη, καθώς και τον

Καραμπερόπουλο Δημήτρη

για την βοήθεια και τις συμβουλές σε θέματα ηλεκτρονικής υποστήριξης καθώς και

όλους τους καθηγητές που είχα μέχρι εδώ για τις γνώσεις που μου παρείχαν ώστε να μπορέσω να φέρω επιτυχώς σε πέρας ένα τέτοιο σύγγραμμα.

Επίσης τη συμφοιτήτρια μου

Φωτάκη Ζωή

για την πολύτιμη βοήθεια στις μετρήσεις και την παρέα της κατά τη διάρκεια της εργασίας.



Αφιέρωση

Αφιερώνω την παρούσα εργασία μου στους γονείς μου που μου συμπαραστάθηκαν όλα αυτά τα χρόνια της φοιτητικής μου ζωής και όχι μόνο. Θέλω να πιστεύω πως ότι έκανα δεν θα χαθεί με το πέρασμα του χρόνου και ελπίζω να έχω μελλοντικά τη δυνατότητα να συνεχίσω το παρόν θέμα ή να ασχοληθώ με κάτι παρόμοιο. Ελπίζω να πρόσφερα και εγώ έστω και ένα πετραδάκι σε αυτό το ‘Κολοσσαίο’ που λέγεται επιστήμη και να βγούνε χρήσιμα συμπεράσματα για κάποιους τομείς ή να δοθεί η αφορμή έστω για κάποια περαιτέρω σχετική έρευνα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν κατά καιρούς με την μελέτη τυρβωδών φλεβών και τον τρόπο που αυτές διαχέονται στο περιβάλλον. Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε μια σειρά πειραμάτων με σκοπό τη διερεύνηση της ανάμειξης κατακόρυφα εκτοξευόμενης ανωστικής φλέβας μέσα σε περιορισμένο χώρο σε ρευστό σε ηρεμία. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Υδρομηχανικής και Περιβαλλοντικής Τεχνικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Χρησιμοποιήθηκαν κυκλικά ακροφύσια διαμέτρων 3mm, 5mm, 1cm και 1.5cm καθώς επίσης ένα τριγωνικό, ένα τετραγωνικό και ένα ορθογωνικής διατομής με υδραυλικές ακτίνες $R=0.256$, $R=0.265$ και $R=0.277$ αντίστοιχα. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε σε μια ειδικά κατασκευασμένη δεξαμενή εσωτερικών διαστάσεων 60cm x 40cm x 40cm από plexiglass πάχους 1.25cm., η οποία διαθέτει εξωτερικό υπερχειλιστή στο άνω μέρος.

Στην δεξαμενή που περιέχει νερό με πυκνότητα ρ_a , διοχετεύεται κατακόρυφη φλέβα νερού πυκνότητας $\rho_o > \rho_a$, έτσι που να ικανοποιείται η παραδοχή του Boussinesq, δηλαδή η πυκνομετρική διαφορά είναι τόσο μικρή που να μην επηρεάζει την εξίσωση ορμής της φλέβας εάν αντικαταστήσουμε την πυκνότητα ρ_o με ρ_a και αντίστροφα. Η φλέβα νερού χρωματίστηκε με ειδική κόκκινη ουσία. Καθώς η φλέβα διοχετεύεται στο δοχείο του νερού προσκρούει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα στον πυθμένα και αρχίζει σιγά σιγά να διαμορφώνεται μια διεπιφάνεια ανάμεσα στο βαρύτερο (αναμειγμένο) και το ελαφρύτερο νερό η οποία ανέρχεται με την πάροδο του χρόνου.

Έγινε καταγραφή της απόστασης της διεπιφάνειας από το ακροφύσιο και του αντίστοιχου χρόνου για κάθε πείραμα. Σε κάθε σειρά πειραμάτων (κυκλική, τριγωνική, τετραγωνική και ορθογωνική διατομή ακροφυσίου) έγινε προσπάθεια να καλυφθεί μια ικανοποιητική περιοχή του αριθμού Richardson. Οι τιμές του αριθμού Richardson κυμάνθηκαν μεταξύ των 0.01 και 1 περίπου. Από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων προσδιορίστηκε η θέση της διεπιφάνειας σαν συνάρτηση του χρόνου σε αδιαστατοποιημένη μορφή. Παράλληλα με τη βοήθεια της διαστατικής ανάλυσης και της θεωρίας των List & Imberger (1973) κατασκευάστηκε μαθηματικό μοντέλο πρόγνωσης της στάθμης της διεπιφάνειας.

Η φλέβα αρχικά διαθέτει ορμή και άνωση. Η συμπεριφορά της εξαρτάται από την αδιάστατη απόσταση z/l_M από το ακροφύσιο εκροής (Papanicolaou & List 1988). Στην περίπτωση μας εξαρτάται από το λόγο h/l_M όπου h είναι η απόσταση του πυθμένα από τη στάθμη εκβολής της φλέβας. Εάν $h/l_M \ll 1$, τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα (jet). Εάν $h/l_M \gg 1$, τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν πλούμιο και εάν $1 < h/l_M < 10$ τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν ανωστική φλέβα, που αποτελεί μια ενδιαμέση κατάσταση των παραπάνω. Το μοντέλο εφαρμόστηκε στα πειραματικά δεδομένα και έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, πολύ κοντά σε αυτά των μετρήσεων.

Συμπερασματικά καταλήξαμε στο ότι όσο μικρότερος είναι ο αρχικός αριθμός του Richardson της ροής, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας (jet), ενώ συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο στην περίπτωση του πλουμίου. Για μεγάλους αδιάστατους χρόνους η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό (έχει ασυμπτωτικά την ίδια κλίση στο λογαριθμικό διάγραμμα) για όλους τους αρχικούς αριθμούς Richardson της ροής. Παρατηρούμε επίσης πως καθώς αυξάνεται ο αριθμός Richardson, ο ρυθμός αύξησης του ύψους της

διεπιφάνειας μειώνεται σε σχέση με το χρόνο. Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά η διεξαγωγή των πειραμάτων, η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Γενικά-Τυρβώδης εκτοξευόμενη φλέβα	1
1.2	Απλές φλέβες χερίς ή με άνωση (jets - plumes) – ορισμοί	1
1.3	Χαρακτηριστικές κλίμακες της ροής	2
1.4	Σκοπός της παρούσας εργασίας	4
1.5	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	5
1.6	Διαστατική ανάλυση	12
2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	14
2.1	Πειραματική διάταξη	14
2.2	Πειραματικές Μετρήσεις	28
2.3	Πειραματική διαδικασία προσδιορισμού της στάθμης της διεπιφάνειας-Ένα τυπικό πείραμα	30
2.4	Περιγραφή ενός τυπικού πειράματος	31
3.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΑΝΑΛΥΣΗ	37
3.1	Πειράματα και Επεξεργασία	37
3.2	Σφάλματα	63
4.	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ	64
4.1	Προσδιορισμός της στάθμης της διεπιφάνειας στο χρόνο	64
4.2	Μη κυκλικές κατακόρυφες φλέβες	72
4.3	Προσδιορισμός της ταχύτητας της διεπιφάνειας στο χρόνο	83
5.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
6.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89
7.	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	91

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά - τυρβώδης εκτοξευόμενη φλέβα

Εκτοξευόμενη φλέβα ή δέσμη (jet) είναι μια φλέβα ρευστού που διαχέεται σε ομοειδές ρευστό με την ίδια ή διαφορετική πυκνότητα. Τυρβώδης σημαίνει ότι στο πεδίο ροής της φλέβας υπάρχει χρονική διακύμανση της ταχύτητας και συγκέντρωσης κάποιας ουσίας που μεταφέρει η εκτοξευόμενη φλέβα. Τα χαρακτηριστικά και η ρευστοδυναμική συμπεριφορά των εκτοξευόμενων φλεβών εξαρτώνται από τους παρακάτω παράγοντες:

- (i) παράμετροι (χαρακτηριστικά) της φλέβας
- (ii) παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού και
- (iii) γεωμετρικές παράμετροι.

Στα χαρακτηριστικά των φλεβών περιλαμβάνονται η αρχική κατανομή ταχύτητας και ένταση τύρβης της φλέβας, η ογκομετρική παροχή και ορμή της φλέβας καθώς και η συγκέντρωση μεταφερόμενων ουσιών, όπως θερμοκρασία κλπ. Στις περιβαλλοντικές παραμέτρους περιλαμβάνονται η πυκνομετρική διαφορά φλέβας και αποδέκτη, η στρωμάτωση (θερμική ή πυκνομετρική), η κίνηση στον αποδέκτη κλπ. Οι δε γεωμετρικές παράμετροι περιλαμβάνουν τη μορφή και προσανατολισμό των φλεβών, την αλληλεπίδραση με άλλες φλέβες, καθώς και τη συμπεριφορά της φλέβας σχετικά με τα όρια του αποδέκτη.

Οι εκτοξευόμενες τυρβώδεις φλέβες εμφανίζονται στη φύση υπό μορφή

- φυσικών υποθαλάσσιων φλεβών (sea-vents)
- κατά την έκρηξη ηφαιστειών

ή άλλες φορές είναι τεχνητές που προέρχονται από ανθρωπογενείς ενέργειες και εμφανίζονται

- σε καμινάδες
- σε πυρκαγιές μικρής ή μεγάλης κλίμακας
- σε υποθαλάσσιους διαχυτήρες διάθεσης αποβλήτων από μονάδες βιολογικού καθαρισμού λυμάτων
- στην εξάτμιση των αυτοκινήτων και αεροσκαφών αλλά και βλημάτων,
- στο fuel injection των αυτοκινήτων (διφασική φλέβα ή spray), κλπ.

1.2 Απλές φλέβες χωρίς ή με άνωση (jets - plumes) – ορισμοί.

Σαν απλή εκτοξευόμενη φλέβα (jet) ορίζεται η παροχή ρευστού από οπή ή σχισμή σε ένα μεγάλο όγκο του ίδιου ή παρόμοιου ρευστού. Η απλή ανωστική φλέβα (plume) είναι παρόμοια με το jet αλλά προκαλείται από μια πηγή δυναμικής ενέργειας που παρέχει στο ρευστό κάποια θετική ή αρνητική άνωση. Ανωστική φλέβα (buoyant jet) ονομάζεται αυτή που εμπεριέχει τις ιδιότητες της απλής φλέβας (jet) και της απλής ανωστικής (plume), έχει δηλαδή και αρχική ορμή και αρχική άνωση.

Έστω μία κυκλική ανωστική κατακόρυφη φλέβα(jet)διαμέτρου D και πυκνότητας ρ_o που εκβάλλει μέσα σε ήρεμο ομογενή αποδέκτη με πυκνότητα ρ_a ($\rho_o > \rho_a$). Η αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας Q , η ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού, ορμή M (specific mass flux) και η κινηματική ή ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού, άνωση B (specific buoyancy flux) και οι αντίστοιχες διαστάσεις τους εκφράζονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} W \quad [L^3/T] \quad (1-1)$$

$$M = QW \quad [L^4/T^2] \quad (1-2)$$

$$B = \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gQ \quad [L^4/T^3] \quad (1-3)$$

αντίστοιχα, όπου W είναι η αρχική μέση ταχύτητα εξόδου και ρ_o είναι η πυκνότητα του ρευστού της φλέβας στο ακροφύσιο.

Με βάση τους ορισμούς στην αρχή της παραγράφου και τις παραπάνω αρχικές συνθήκες της φλέβας, μπορούμε να ορίσουμε σαν απλή φλέβα (jet) αυτή για την οποία αρχικά $B = 0$ (ή εναλλακτικά $M \gg B$, $B \rightarrow 0$), σαν πλούμιο τη φλέβα για την οποία αρχικά $M = 0$ (ή εναλλακτικά $B \gg M$, $M \rightarrow 0$) και σαν ανωστική φλέβα αυτή που αρχικά έχει σημαντικού μεγέθους ειδική ορμή και άνωση ($M \neq 0$ και $B \neq 0$).

Όταν αρχικά $M \gg B$, τότε στη φλέβα υπερισχύει η αρχική ορμή με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα. Όταν $B \gg M$, τότε στη φλέβα υπερισχύει η ορμή που προήλθε από την ανωστική δύναμη με αποτέλεσμα να συμπεριφέρεται σαν πλούμιο. Όταν M και B είναι της ίδιας τάξης μεγέθους η φλέβα συμπεριφέρεται σαν ανωστική φλέβα.

1.3 Χαρακτηριστικές κλίμακες της ροής.

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

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}} \quad (1-4)$$

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

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B_{1/2}} \quad (1-5)$$

Ο λόγος των δύο παραπάνω κλιμάκων μήκους ονομάζεται αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας και ορίζεται

$$R_o = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{\sqrt{\varepsilon'_o D}}{W} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{F_o} \quad (1-6)$$

Στην παραπάνω σχέση F_o είναι ο πυκνομετρικός αριθμός του Froude και η ανωστική επιτάχυνση $g'_o = [(\Delta\rho)_o/\rho_o]g$.

Σε απόσταση z αρκετών διαμέτρων από το ακροφύσιο-πηγή όπου η φλέβα έχει αναπτυχθεί πλήρως, από τις κατανομές της μέσης ταχύτητας $w = w(r,z)$ και της (μέσης) διαφοράς πυκνότητας $\Delta\rho = \Delta\rho(r,z)$ μπορούμε να υπολογίσουμε την ογκομετρική παροχή $\mu(z)$ (δηλαδή τον όγκο του ρευστού που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου), την ειδική ορμή ρευστού $m(z)$ που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου και την ειδική άνωση ρευστού $\beta(z)$ που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου που διέρχονται από μία διατομή A με τα ολοκληρώματα

$$\mu = \int_A w dA \quad (1-7)$$

$$m = \int_A w^2 dA \quad (1-8)$$

$$\beta = \int_A g(\Delta\rho/\rho_o) w dA \quad (1-9)$$

όπου

w η κατανομή της μέσης ταχύτητας στη διατομή A ,

$\Delta\rho$ είναι η κατανομή της διαφοράς ανάμεσα στην μέση τιμή πυκνότητας της φλέβας και του περιβάλλοντος ρευστού στη διατομή A , και

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Με βάση αυτές τις τρεις παραμέτρους της ροής ορίζουμε τον αριθμό Richardson της ροής $Ri(z)$ σε απόσταση z από το ακροφύσιο από τη σχέση

$$Ri(z) = \frac{\mu\beta^{1/2}}{m^{5/4}} \quad (1-10)$$

Σε μια απλή φλέβα $R = R_o = 0$, επειδή $\beta = 0$ παντού. Σε μια ανωστική φλέβα για αδιάστατη απόσταση $z/l_M < 1$ από το ακροφύσιο (περιοχή απλής φλέβας), οι Papanicolaou & List (1988) από μετρήσεις έδειξαν ότι $Ri(z) \sim z$. Για αδιάστατη απόσταση $z/l_M > 10$ από το ακροφύσιο (περιοχή πλουμίου) προτείνουν την τιμή $R_p=0.63$, που αποτελεί και την οριακή τιμή του αριθμού Richardson.

1.4 Σκοπός της παρούσας εργασίας

Στις παραπάνω παραγράφους αναφερθήκαμε σε φλέβες που διαχέονται σε ομογενή, ακίνητο αποδέκτη που εκτείνεται στο άπειρο. Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε μια κατακόρυφη (προς τα κάτω) φλέβα με θετική άνωση, που διαχέεται σε ένα περιορισμένο ακίνητο όγκο ρευστού. Συγκεκριμένα, θα μελετήσουμε κατακόρυφη φλέβα βαρύτερη από το ρευστό του δοχείου που κατευθύνεται προς τα κάτω από το κέντρο του άνω ορίου ενός ορθογωνικού δοχείου.

Οι μεταβλητές του προβλήματος είναι:

1. Ο αρχικός αριθμός Richardson (Ri) της φλέβας, και
2. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του ακροφυσίου

Η πρώτη σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας jet κυκλικής διατομής, διαμέτρων 5mm, 10mm και 15mm και πυκνότητα ύδατος του jet από 1.011gr/cc ως 1.013gr/cc. Η δεύτερη πειραμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας jet κυκλικής διατομής, διαμέτρων 3mm, 5mm, 10mm και 15mm και πυκνότητα ύδατος του jet από 1.020gr/cc ως 1.021gr/cc. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές πειραμάτων με ακροφύσια jet τριγωνικής, τετραγωνικής και ορθογωνικής με πυκνότητες του ύδατος του jet 1.010gr/cc, 1.012gr/cc και 1.022gr/cc αντίστοιχα. Πριν από κάθε πείραμα γινότανε μέτρηση της θερμοκρασίας του καθαρού νερού της κύριας δεξαμενής και υπολογισμός της πυκνότητας του ύδατος αυτού βάσει της σχέσης

$$\rho_{\text{ύδατος}} = -0.0047T^2 - 0.0149T + 1000.4$$

Η επιθυμητή πυκνότητα της φλέβας επιτεύχθηκε με την προσθήκη αλατιού (NaCl) σε κατάλληλη ποσότητα. Έτσι είχαμε διατήρηση της αρχικής ειδικής άνωσης B καθ' όλο το μήκος της φλέβας, δηλαδή $\beta(z) = B$.

Σε όλα τα παραπάνω πειράματα έγινε προσπάθεια τόσο με τη βοήθεια των παροχών όσο και με τις πυκνότητες να καλυφθεί κάθε φορά μια ικανοποιητική περιοχή του αριθμού Richardson. Έτσι για κάθε τύπο ακροφυσίου καλύφθηκε μια ικανοποιητική περιοχή του αρχικού αριθμού Richardson με τιμές από 0.01 έως περίπου 1.

Η παραπάνω ροή προσομοιώνει την ανάμειξη από σημειακή πηγή σε κλειστό χώρο με εφαρμογές ψύξη ή θέρμανση και τη διάχυση καπνού από πυρκαγιές..

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι:

1. η καταγραφή του χρόνου πλήρους ανάμειξης του δοχείου, και
2. η ταχύτητα της διεπιφάνειας αναμειγμένου και μη αναμειγμένου ρευστού,

Στην αρχή του κάθε πειράματος-μέτρησης μετρώνται η θερμοκρασία του ύδατος προκειμένου να μας είναι γνωστή η πυκνότητά του την κάθε φορά. Για κάθε ακροφύσιο μετράται η ένδειξη του ροομέτρου που λειτουργεί, η απόσταση από το ακροφύσιο όπου η φλέβα γίνεται τυρβώδης (breakdown), και καταγράφονται ο χρόνος συναρτήσεως του ύψους μέσα στην κύρια δεξαμενή που βρίσκεται το χρωματισμένο νερό του jet. Οι μετρήσεις του χρόνου-ύψους γίνονται τακτικά και συνεχώς μέχρις ότου φτάσουμε στην πλήρωση σχεδόν της κύριας δεξαμενής.

Ενδεικτικά έχει γίνει και βιντεοσκόπηση πολλών μετρήσεων με τη βοήθεια μιας ψηφιακής βιντεοκάμερας ενώ όλα τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί και καταγραφεί. Η κύρια δεξαμενή φωτίζεται με προβολείς για καλύτερη βιντεοσκόπηση και μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων. Η καταγραφή του χρόνου έγινε με ψηφιακό χρονόμετρο ενώ η θέση του χρωματισμένου ύδατος προσδιοριζόταν με τη βοήθεια του κανάβου που είχε σχεδιαστεί στα τοιχώματα του δοχείου εξ αρχής. Σημειώνουμε επίσης ότι δεν υπάρχει εναλλαγή ρευστού, παρά ότι η ποσότητα νερού που εισρέει από τη φλέβα υπερχειλίζει.

1.5 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων και ερευνών έχει πραγματοποιηθεί και από άλλους επίσης ερευνητές προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά φλεβών με ή χωρίς άνωση(jets-plumes).

Οι ερευνητές G.R.Hunt, P.Cooper και P.F.Linden (2001) και οι Baines και Turner (1968) ασχολήθηκαν σε μια τέτοιου είδους εργασία την οποία παρουσιάζουμε περιληπτικά αμέσως παρακάτω.

Η θερμική στρωματοποίηση που παράγεται από μια πηγή θερμότητας στο δάπεδο σε ένα περιορισμένο χώρο παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την δημιουργία του εξαερισμού. Στα κτήρια μπορούμε να θεωρήσουμε πολλές πηγές θερμότητας, π.χ. υπολογιστές, εργαζόμενοι κ.λπ., και η γνώση του κατακόρυφου αναπτυσσόμενου προφίλ θερμοκρασίας που παράγεται από αυτές τις πηγές απαιτείται πριν από η ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα και τα επίπεδα άνεσης των εργαζομένων επηρεαστούν. Γενικά, αυτές οι πηγές μπορούν να ταξινομηθούν ως

- «καθαρές» πηγές άνωσης, π.χ. μια πυρκαγιά λόγω ηλεκτρισμού, ένα καλοριφέρ με καυτό νερό ως σύστημα θέρμανσης, ή ως
- «εξανασκασμένες» πηγές άνωσης που χαρακτηρίζονται από αρχική μη μηδενική ορμή της πηγής, π.χ. σε ένα σύστημα θέρμανσης στο οποίο ο θερμός αέρας εγχέεται στο χώρο.

Η στρωματοποίηση που παράγεται από μια πηγή καθαρής θερμότητας σε μια κλειστή, μη εξαεριζόμενη περιοχή που περιέχει αρχικά κρύο αέρα ομοιόμορφης θερμοκρασίας έχει μελετηθεί από τους Baines και Turner (1968) οι οποίοι θα αναφέρονται από εδώ και στο εξής ως B&T.

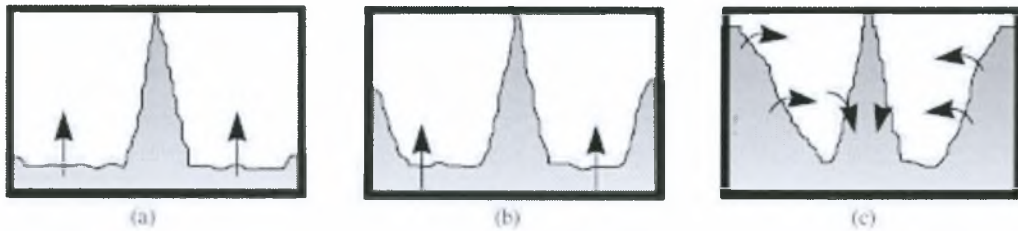
Χρησιμοποιώντας ένα αλατούχο πλούμιο σε μια δεξαμενή ύδατος σε αντιστοιχία μιας πηγή θερμότητας στον αέρα, οι B&T παρατήρησαν και μέτρησαν την αναπτυσσόμενη κατακόρυφη στρωματοποίηση. Τα πειράματά τους γίνανε για μια σειρά των αναλογιών H/R (ύψος δωματίων H , χαρακτηριστική οριζόντια διάσταση R). Το αυξανόμενο τυρβώδες πλούμιο διαδίδεται πέρα από ανώτατο όριο για να σχηματίσει ένα θερμό στρώμα αέρα, ενώ χωρίζεται με ένα οριζόντιο αρχικό «μέτωπο» (ή θερμική διεπιφάνεια) από τη στρώση του κρύου ρευστού από κάτω. Η αναταραχή στο ζεστό πάνω στρώμα δημιουργεί αναμειξείς και το θερμό ρευστό γίνεται μέρος του μη τυρβώδους περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, το πλούμιο ανεβαίνει διαμέσου του αυξανόμενου θερμού στρώματος και φτάνει στο ανώτατο όριο πιο θερμό από προηγουμένως. Κατά συνέπεια, η εκροή από το πλούμιο είναι θερμότερη και εμφανίζεται επάνω από την θερμή περιοχή, η οποία μετατοπίζεται προς τα κάτω, και αναπτύσσεται μια σταθερή στρωματοποίηση. Οι B&T εντόπισαν τη θέση του

αρχικού μετώπου και χρησιμοποιώντας τη θεωρία περί πλουμίων (Morton *et al.* 1956) έδειξαν ότι η σχέση μεταξύ του αρχικού μετώπου ύψους $z=z_0$ του πάνω στρώματος και του χρόνου t που χρειάζεται το πλούμιο για να φτάσει το ανώτατο όριο, δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$\frac{z_0}{H} = \left[\frac{4a}{5} \left(\frac{18a}{5\pi} \right)^{1/3} \frac{tH^{2/3}B_0^{1/3}}{R^2} + 1 \right]^{-3/2} \quad (1-11)$$

για $\frac{H}{R} < 1$

όπου B_0 δείχνει την αρχική άνωση και a ($=0,083$, Turner) είναι ο πειραματικά καθορισμένος συντελεστής συμπαράσυρσης του πλουμίου. Για μεγάλους λόγους H/R , οι B&T παρατήρησαν ότι η αρχική εκροή από το πλούμιο κινείται κάθετα προς τα κάτω στο πιο δροσερό κάτω στρώμα, μέχρι να συγκρουστεί με τους πλευρικούς τοίχους της δεξαμενής, και ότι αυτή η κίνηση επηρεαζόταν από το πλούμιο. Αυτό οδήγησε στη μίξη και σε μια γενική ανατρεπτική κίνηση που αυξανόταν καθώς αυξανόταν και ο λόγος H/R .



Σχήμα 1. 1 Γενική ανατρεπτική κίνηση που αυξάνεται καθώς αυξάνεται και ο λόγος H/R . Hunt *et al.* (2001).

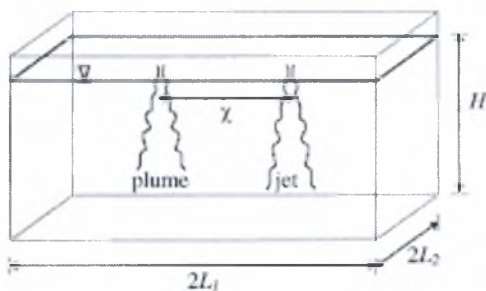
Η σταθεροποίηση της άνωσης στο ανώτατο στρώμα αντιτάσσεται στην ορμή της ροής που παράγεται κοντά στο πλούμιο, και οι B&T υποστήριζαν ότι αυτή η ροή θα μπορούσε να εκτραπεί προς τα κάτω, ένα μέτρο της τάσης προς την ανατροπή είναι η αναλογία των δυνάμεων αδράνειας και άνωσης I/B (ή πυκνομετρικός αριθμός Froude), δηλαδή,

$$\frac{I}{B} = \frac{9a}{10} \left(\frac{H}{R} \right)^2 \quad (1-12)$$

Οι B&T βρήκαν πως $H/R = 1$ μπορεί να είναι η μέγιστη τιμή για την οποία το συγκεκριμένο μοντέλο (δεξαμενής-νερού) μπορεί να πάρει και, επομένως, η περιοριστική τιμή από την παράμετρο I/B είναι περίπου 0.1, πχ. η δύναμη αδράνειας χρειάζεται μόνο να είναι περίπου 10% της δύναμης άνωσης για να αποτρέψει την παραπάνω συμπεριφορά. Για λόγους $H/R < 1$, το βάθος από το στρώμα που διαμορφώνεται από το αρχικό πλούμιο είναι μικρό έναντι του ύψους H και οι ανατρεπτικές κινήσεις είναι αμελητέες.

Για τους μεγαλύτερους λόγους διάστασης ($1 \leq H/R \leq 6$) μια αυξανόμενη ανατροπή παρατηρείται, ενώ η γεωμετρία του χώρου διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στην ανάμειξη. Για λόγους $H/R \geq 6$, η στρωμάτωση αλλάζει εντυπωσιακά. Οι G.R.Hunt, P.Cooper και P.F.Linden εξέτασαν τη στρωμάτωση που δημιουργείται από μια «καθαρή» ανωστική πηγή. Στην πράξη, εντούτοις, πραγματικές πηγές θέρμανσης και ψύξης σε ένα σύστημα εξαερισμού συχνά περιλαμβάνουν αρχικές ανωστικές ροές και πλούμια.

Συνδυάζοντας τις ανωστικές ροές και τα πλούμια, ένας αριθμός ερωτήσεων προκύπτει, όπως π.χ. το πώς η ισορροπία μεταξύ άνωσης και ορμή μιας ενιαίας πηγής ή παρεχόμενα χωριστά από δύο χωριστές πηγές έχουν επιπτώσεις στη μίξη, στη στρωμάτωση και την ατμοσφαιρική ποιότητα σε ένα δωμάτιο. Για να καθοριστεί η παραπάνω εξάρτηση του σχηματισμού και της στρωμάτωσης στην ορμή της πηγής (πλούμιο) M_0 και την άνωση B_0 εκτελέστηκαν νέα πειράματα. Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση εσώκλειστης εξαναγκασμένης ανωστικής φλέβας. Κατόπιν επέκτεινανε περαιτέρω την έννοια, χρησιμοποιώντας μία δεξαμενή που γεμίζει με νερό και με την εξέταση δύο διαφορετικών πηγών ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο, δηλαδή, μια πηγή ροής ορμής μόνο (ένα jet) και μια ανωστική ροή μόνο (ένα πλούμιο). Το κίνητρο για την εξέταση αυτής της τελευταίας διάταξης των δύο πηγών ήταν να καθοριστεί πώς η στρωμάτωση τροποποιείται ως αποτέλεσμα της χωρικής διανομής των ροών της πηγής.



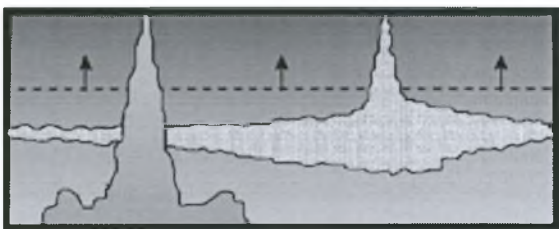
Σχήμα 1.2α Δύο διαφορετικές πηγές ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο, μια πηγή ροής ορμής μόνο (ένα jet) και μια ανωστική ροή μόνο (ένα πλούμιο) Hunt *et al.* (2001).



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 1.2β Αλληλεπίδραση δύο διαφορετικών πηγών ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο, συνδυασμοί jet-plume Hunt *et al.* (2001).

Περιέγραψαν λοιπόν τα αποτελέσματα μιας πειραματικής μελέτης η οποία εξετάζει τη στρωμάτωση που δημιουργείται από μια ροή μηδενικής ορμής (πλούμιο) της οποίας η πηγή βρίσκεται στον πυθμένα σε έναν κλειστό χώρο με λόγο διάστασης (H/L) μικρότερο της μονάδας. Λόγω της έλλειψης πηγής jet, μια στρωματοποιημένη περιοχή θερμού ρευστού σχηματίζεται στο ανώτατο όριο που χωρίζεται με μια οριζόντια διεπιφάνεια από το πιο κρύο ρευστό στο κάτω μέρος. Η κάθοδος της διεπιφάνειας είναι αρχικά ραγδαία και ο ρυθμός καθόδου μειώνεται καθώς η δεξαμενή γεμίζει. Αύξηση της αρχικής ορμής οδηγεί σε αύξηση της ανάμειξης και των ανατρεπτικών κινήσεων, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το θερμό στρώμα να κατεβαίνει γρηγορότερα απ' ότι για τη ροή μηδενικής ορμής και είναι κατά μέσον όρο πιο ψυχρό. Οι Baines and Turner παρατήρησαν ότι η κλίμακα της ανατρεπτικής κίνησης αυξάνεται καθώς αυξάνεται ο λόγος διάστασης και επιπλέον, το ποιοτικό αποτέλεσμα της αύξησης της M_0 είναι ισοδύναμο με την αύξηση του λόγου διάστασης του χώρου. Η κάθετη κλίμακα της ανατρεπτικής κίνησης χαρακτηρίζεται από το αδιάστατο μήκος του jet και τον λόγο διάστασης. Εάν δύο χαρακτηριστικές οριζόντιες κλίμακες μήκους είναι διαθέσιμες, π.χ., σε ένα δωμάτιο ορθογωνικής διατομής, ο μικρότερος των λόγων διάστασης καθορίζει η αρχική έκταση της ανατρεπτικής κίνησης. Για λόγους $L_j/H \ll 1$ στα jet, η κίνηση μέσα στη δεξαμενή περιγράφηκε καλά από το μοντέλο του «δοχείου που γεμίζει» (filling box model) των B&T με την ροή αρχικής ορμής να αντιμετωπίζεται με την εξέταση ανοδικού πλουμίου. Το εσωτερικό είναι σταθερά στρωματοποιημένο και η θερμοκρασία και η κατακόρυφη κλίση θερμοκρασίας αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο.

Για περιπτώσεις στις οποίες τα μήκη των jet είναι αρκετά μεγαλύτερα από το ύψος δωματίων, η θερμότητα από την πηγή είναι διανεμημένη σε όλο τον εσωτερικό χώρο, λόγω της ορμής και ένα οριζόντιο αρχικό μέτωπο κατεβαίνει όπως παρατηρήθηκε.

Μπορούμε να διακρίνουμε δύο πιθανότητες βασιζόμενοι στη φύση της εισαγόμενης θερμότητας. Εάν σε μια πηγή διατηρείται σταθερή η θερμότητα, τα αποτελέσματα της ροής με ορμή μικραίνουν με το πέρασμα του χρόνου και το εσωτερικό στρωματώνεται. Η μορφή της στρωμάτωσης καθορίζεται έπειτα από το μικρότερο όριο L_j/H στους μεγάλους χρόνους και η θερμοκρασία στο εσωτερικό αυξάνεται συνεχώς. Το μήκος L_j/H , που είναι γνωστό και ως θερμικό μήκος, μετράει τις ιδιότητες της στρωματοποίησης ενός εξαναγκασμένου πλουμίου.

$$\frac{L_j}{H} = \frac{M_0^{3/4}}{HB^{1/4}} \quad (1.13)$$

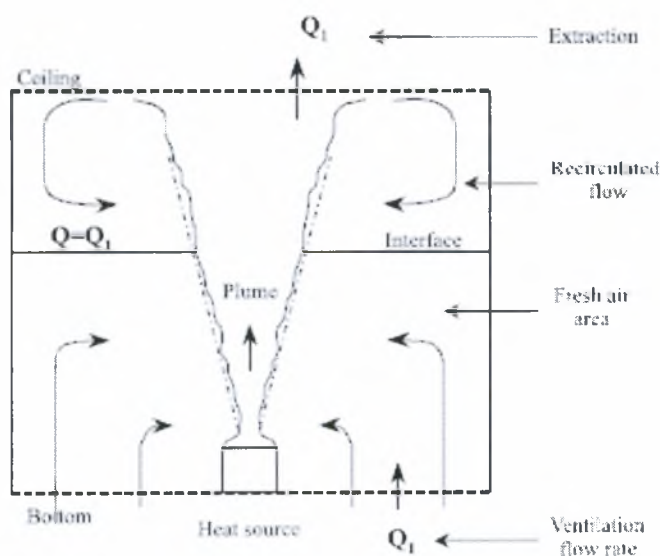
Από την άλλη μεριά, εάν η εισαγωγή είναι τέτοια που μια παροχή διατηρεί σταθερή θερμοκρασία, το εσωτερικό παραμένει καλά αναμεμιγμένο πάντα και τελικά φτάνει να πάρει την τιμή της παρεχόμενης θερμοκρασίας.

Όταν ροές με άνωση και ροές με ορμή (plumes-jets) εισάγονται από ξεχωριστές πηγές, η αναπτυσσόμενη θερμική στρωμάτωση είναι διαφορετική από αυτή που δημιουργείται από από μια ισοδύναμη ενιαία πηγή. Η αρχική παραγόμενη ανάμειξη που προκαλεί το jet βασίζεται αυστηρά στο διαχωρισμό και στις σχετικές δυνάμεις των πηγών. Στους μεγάλους χρόνους, μια ροή σταθερής θερμότητας παράγει μια στρωμάτωση ανεξάρτητη από τη ροή του jet.

Γενικά μπορούμε να πούμε πως οι B&T ασχολήθηκαν με τη μελέτη των συνδυασμένων ροών πλουμίων και jet σε ένα συγκεκριμένο χώρο μαζί.. Έχουμε εστιάσει εδώ στις μορφές της στρωμάτωσης, με το στόχο την απομόνωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίδραση της άνωσης στη στρωμάτωση και αποτελέσματα ανάμειξης λόγω της ορμής στη φλέβα. Σε ένα πραγματικό κτήριο και άλλοι παράγοντες θα επηρεάσουν τη στρωμάτωση, μεταφορές ειδικότερα ακτινοβολίας και θερμότητας μεταξύ των τοίχων και ο εσωτερικός αέρας. Εντούτοις, αυτοί είναι σχεδόν απίθανο να αλλάξουν τα βασικά χαρακτηριστικά της ροής που περιγράφονται εδώ, διότι πρόκειται για απλούς παράγοντες οι οποίοι αποτελούν εν μέρει μια απάντηση για τη στρωμάτωση που δημιουργείται από τις εσωτερικές πηγές.

Οι Auban *et al.* (2001) ασχολήθηκαν επίσης με μια παρόμοια κατάσταση προσπαθώντας να προσδιορίσουν τη στρωμάτωση που δημιουργείται από ένα ανωστικό πλούμιο στη βάση ενός κλειστού χώρου, όπως επίσης και με τον προσδιορισμό του ύψους και του πάχους της διεπιφάνειας που δημιουργείται.

Θεωρητικές και πειραματικές μελέτες πλουμίων σε περιορισμένο στρωματοποιημένο περιβάλλον έχουνε πολυάριθμες εφαρμογές, ειδικά στους εξαερισμούς δωματίων. Η αρχή του εξαερισμού βασίζεται στην παρουσία πηγών θερμότητας στην περιοχή του δωματίου. Κάθε μια από αυτές τις πηγές δημιουργεί μια ροή αέρα παροχής Q , η οποία παρασύρει τον περιβάλλον αέρα, και αυξάνεται συνεχώς. Μια παροχή Q_1 φρέσκου αέρα εισέρχεται στο κατώτερο τμήμα ενός χώρου και αυτή η ίδια ροή κατευθύνεται στο ανώτερο τμήμα. Εάν η Q_1 είναι μεγαλύτερη από το ρυθμό ροής του πλουμίου Q στο ανώτατο όριο, μια κατακόρυφη θερμοκρασιακή στρωμάτωση δημιουργείται στο συγκεκριμένο χώρο. Ο εξαερισμός ενός χώρου με δεδομένο ρυθμό ροής έχει σχεδιαστεί προκειμένου να διατηρήσει το ύψος αυτής της σταθερής στρωμάτωσης. Η ροή, υπό καθεστώς σταθερότητας, δείχνει επιπλέον δύο κύριες περιοχές σχετικά ομοιόμορφης θερμοκρασίας, μια περιοχή χαμηλά φρέσκου αέρα λόγω του πλουμίου και μια πιο θερμή περιοχή ανακυκλούμενου αέρα.



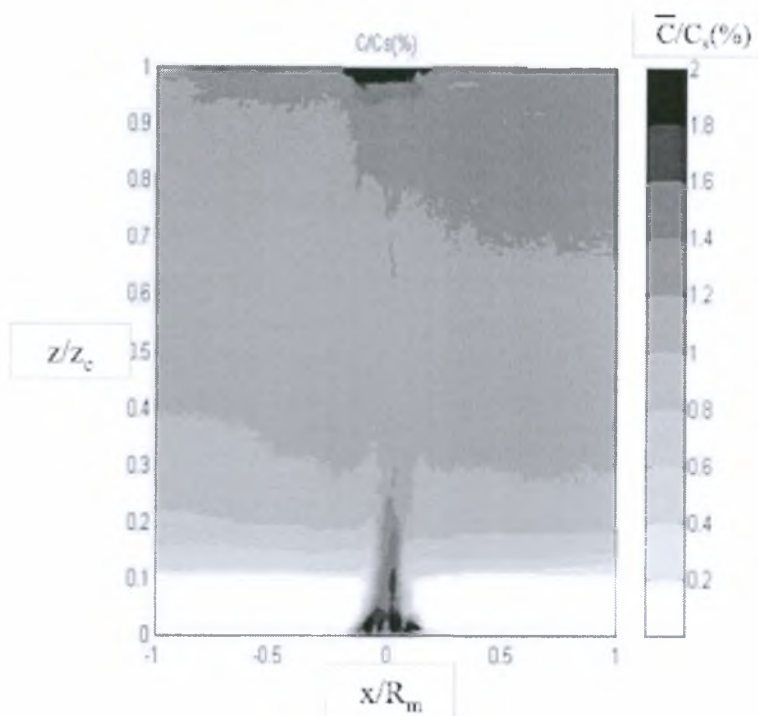
Σχήμα 1.3 Πλούμιο θερμού ρευστού σε περιορισμένο εξαεριζόμενο χώρο, Auban *et al.* (2001).

Το ύψος της πυκνομετρικής στρωμάτωσης πρέπει να αντιστοιχεί στο επίπεδο για το οποίο ο ρυθμός παρασυρόμενης ροής λόγω του πλουμίου είναι ισοδύναμος με το ρυθμό ροής φρέσκου αέρα (ροή εξαερισμού). Σ' αυτό το ύψος στρωμάτωσης, η πραγματική κατάσταση δε δείχνει καμία ασυνέχεια θερμοκρασίας. Οι δύο περιοχές ροής χωρίζονται μεταξύ τους από μια διεπιφάνεια (interface) στην οποία η θερμοκρασία ποικίλει ανάλογα με το ύψος. Στην χαμηλότερη περιοχή φαίνεται πως το πλούμιο αναπτύσσεται με έναν τρόπο όμοιο με εκείνον που αναπτύσσεται σε ένα ομοιόμορφο περιβάλλον. Στην ανώτερη περιοχή, η ροή ανανεώνεται μέσω της ανακυκλούμενης κίνησης του ρευστού και η πυκνότητα είναι σταθερή. Σ' αυτή την περιοχή, η ροή δεν χαρακτηρίζεται πια ως ανωστική αλλά ως ροή με ορμή (jet). Η ανωστική ροή του τυρβώδους πλουμίου έχει μελετηθεί εκτεταμένα εδώ και πολλά χρόνια. Πειραματικά, μελετώνται ροές είτε θερμικής ανάμειξης πλουμίων ή ανωστικών jet (ροή αρχικής ορμής). Αυτά τα πλούμια μελετήθηκαν σε ελεύθερη διαμόρφωση σε ένα περιβάλλον της ομοιόμορφης πυκνότητας.

Υποθέτοντας μια κατά μέσο όρο παρόμοια συμπεριφορά, είναι έπειτα δυνατό, βασιζόμενοι σε διαστατική ανάλυση να περιγράψουμε τη συμπεριφορά μιας πλήρους αναπτυσσόμενης τυρβώδους ροής (πλούμιο) από συσχετισμούς μόνο δύο παραμέτρων. Η πρώτη είναι η απόσταση από την πηγή και η δεύτερη είναι η αρχική άνωση B.

Περιέγραψαν λοιπόν τη ροή ενός πλουμίου σε έναν συγκεκριμένο κλειστό χώρο στον οποίο οι συνθήκες εξαερισμού έχουν ως αποτέλεσμα την κάθετη στρωμάτωση. Στη μελέτη έγινε προσπάθεια να αναπαραχθούν πραγματικές συνθήκες. Η ροή αρχικής ορμής παράγεται μέσω εκτοξευόμενης αιθανόλης στο νερό. Η ροή αυτή χρωματίζεται με μια φθορίζουσα ουσία. Η στρωμάτωση δημιουργείται μέσω μιας καθαρής ροής από μια πηγή και εξαντλώντας αυτήν την ίδια ροή μέσω του ανώτατου ορίου. Η περιοχή που επηρεάζεται από τη ροή ανιχνεύεται από το φθορισμό της ουσίας που μεταφέρει η φλέβα (Planar Laser Induced Fluorescence-PLIF). Το πεδίο ταχύτητας μετράται με τη βοήθεια ενός ταχυμέτρου σωματιδίων λέιζερ (laser Doppler velocimeter-LDV).

Κατόπιν επαλήθευσης του περάματος στο περιβάλλον με γνωστά αποτελέσματα, τα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παρουσίασαν χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας και επέτρεψαν τον προσδιορισμό της ταπείνωσης της διεπιφάνειας και τον προσδιορισμό του πάχους της. Η διατύπωση των νόμων που περιγράφουν το ύψος στρωμάτωση ως μια συνάρτηση ποικίλων παραμέτρων παρουσιάζεται κατόπιν και επεκτείνεται στο συγκεκριμένο πείραμα, στο οποίο αυτό το ύψος βρίσκεται στην περιοχή κοντά στην πηγή.



Σχήμα 1.4 Η στρωματοποίηση που δημιουργείται σε περιορισμένο χώρο, Auban *et al.* (2001).

Η ακριβής εξομοίωση ενός θερμικού πλουμίου σε περιορισμένο χώρο πραγματοποιήθηκε με βάση την ισότητα των πειραματικών με τον αριθμό Rayleigh (Ra). Ο αριθμός Ra προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$Ra = g \frac{1}{\alpha \nu} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_f} \right) D_s^2 \quad (1.14)$$

Όπου D_s η διάμετρος της πηγής, α η ποσότητα του ελαφρού ρευστού στο ρευστό αναφοράς, π.χ. αιθανόλη στο νερό, ν κινηματικό ιξώδες του νερού, ενώ η πυκνότητα ρ_f δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_f = \frac{\rho + \rho_0}{2} \quad (1.15)$$

Η προσθήκη ροής βοηθητικού εξαερισμού έκανε πιθανή τη δημιουργία συνθηκών στρωμάτωσης στον εσώκλειστο χώρο, ώστε να εξομοιωθεί μια εγκατάσταση μετατοπιζομένου εξαερισμού.

Η εισαγωγή φθορίζουσας ουσίας στο ύψος της πηγής έδωσε τη δυνατότητα να προσδιοριστεί η κατακόρυφη πυκνομετρική στρωμάτωση με τη βοήθεια λέιζερ που ανιχνεύει την παραπάνω φθορίζουσα ουσία. Κριτήρια που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της ανύψωσης και του πάχους της διεπιφάνειας, με ακρίβεια, καθορίστηκαν με βάση τη στατιστική επεξεργασία των διακυμάνσεων της συγκέντρωσης.

Βασίζόμενοι σε αυτά τα κριτήρια, οι υποθέσεις που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιβλιογραφία για να περιγράψουν το ύψος στρωμάτωσης ως συνάρτηση της άνωσης

και του ρυθμού ροής του εξαερισμού, ελέγχθηκαν στην πλήρως αναπτυγμένη περιοχή του πλουμίου. Τα αποτελέσματα αυτά επεκτάθηκαν στην περιοχή κοντά στην πηγή, όπου ήταν αναγκαίο να υιοθετηθεί η χαρακτηριστική διάσταση της πηγής για τον προσδιορισμό του παραπάνω ύψους.

Σε πραγματικές συνθήκες, αρκετές φορές, το ανώτατο όριο ύψους είναι μεγαλύτερο από τη χαρακτηριστική διάσταση της πηγής, πράγμα το οποίο δείχνει πως οι εδώ καθιερωμένοι νόμοι αποτελούν μια σημαντική συμβολή στο σχέδιο εγκατάστασης συστημάτων εξαερισμού.

Ένας μεγάλος αριθμός πειραμάτων και ερευνών έχει πραγματοποιηθεί και από άλλους επίσης ερευνητές προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά φλεβών με ή χωρίς άνωση (jets-plumes). Η δική μας προσοχή στην παρούσα εργασία θα επικεντρωθεί στη συμπεριφορά κατακόρυφης προς τα κάτω φλέβας, η οποία διαχέεται σε ομογενές ρευστό μικρότερης πυκνότητας. Μελετάται ο χρόνος πλήρωσης της δεξαμενής σε πρώτη φάση, όπως επίσης και η αλατότητα καθ' ύψος συναρτήσει του χρόνου και του ύψους. Πολλά παρόμοια παλιότερα πειράματα σχετικά με φλέβες ασχολήθηκαν με τη μελέτη των χαρακτηριστικών της εκάστοτε φλέβας, τη μέτρηση της ταχύτητας αλλά και της συγκέντρωσης διαφόρων ουσιών σε διάφορα σημεία της περιοχής του φαινομένου και προτείνανε διάφορες σχέσεις. Οι

Bradbury και Wright (1975) μέτρησαν τα χαρακτηριστικά της τύρβης μιας εναέριας φλέβας (air jet) σε απόσταση μεγαλύτερη των 25 διαμέτρων από το στόμιο της φλέβας με χρήση της μεθόδου laser Doppler. Οι Becker *et al.* (1967) χρησιμοποιώντας μια τεχνική σκέδασης φωτός μέτρησε συγκεντρώσεις καπνού από λάδι φλέβα αέρα (air jet) παρουσιάζοντας αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας. Οι Forstal και Gaylord (1955) αλλά και ο Kiser (1963) μέτρησαν ταχύτητες και συγκεντρώσεις αλατιού μέσα σε ένα ρευστό καθώς ένα jet με διαφορετική αλατότητα διαχέοταν μέσα σε αυτό. Οι Hinze και Zijnen (1949) μέτρησαν την κύρια ταχύτητα, τη θερμοκρασία αλλά και συγκεντρώσεις κυκλικού jet αέρα χρησιμοποιώντας διαφορετικό αέριο ως ανιχνευόμενη ουσία. Οι Rosenweig *et al.* (1961) μέτρησαν συγκεντρώσεις καπνού σε jet αέρα. Πολλοί ακόμα επιστήμονες ασχολήθηκαν με τέτοιου είδους πειράματα και έρευνες. Ενδεικτικά αναφέρουμε μερικούς ακόμα : Birch *et al* (1978), Ribeiro και Whitelaw (1975), Lau *et al.* (1979).

1.6 Διαστατική ανάλυση

Κυκλική φλέβα με αρχικά χαρακτηριστικά πυκνότητα ρ_0 , παροχή Q , και διάμετρο D , εισέρχεται σε δοχείο με νερό πυκνότητας ρ_a . Η αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας Q , η ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού, ορμή M (specific mass flux) και η κινηματική ή ειδική, ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού, άνωση B (specific buoyancy flux) και οι αντίστοιχες διαστάσεις τους εκφράζονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} W \quad [L^3/T] \quad (1-16)$$

$$M = QW \quad [L^4/T^2] \quad (1-17)$$

$$B = \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gQ \text{ [L}^4/\text{T}^3] \quad (1-18)$$

αντίστοιχα, όπου W είναι η αρχική μέση ταχύτητα εξόδου και ρ_o είναι η πυκνότητα του ρευστού της φλέβας στο ακροφύσιο.

Ορίζουμε δύο κλίμακες χρόνου:

$$T = \frac{M}{B} \quad (1-19)$$

$$\tau = \frac{V_{\text{δοχείου}}}{Q} \quad (1-20)$$

Έχουμε επίσης και μια κλίμακα μήκους l_M που εμπεριέχει εκτός από τα αδρανειακά και τα ανωστικά χαρακτηριστικά της φλέβας και ορίζεται από τη σχέση:

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (1-21)$$

Μπορούμε να κάνουμε τον παρακάτω διαχωρισμό, όσον αφορά στο χαρακτηρισμό της φλέβας, αναλόγως με το αν το χαρακτηριστικό μήκος l_M είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο του H (όπου H είναι η απόσταση του πυθμένα από τη στάθμη εκβολής της φλέβας) :

- Όταν $l_M \gg H$ τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν jet
- Όταν $l_M \ll H$ τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν πλούμιο

Το ζητούμενο μας είναι να προσδιοριστεί η αδιάστατη στάθμη h/l_m σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/τ ή t/T .

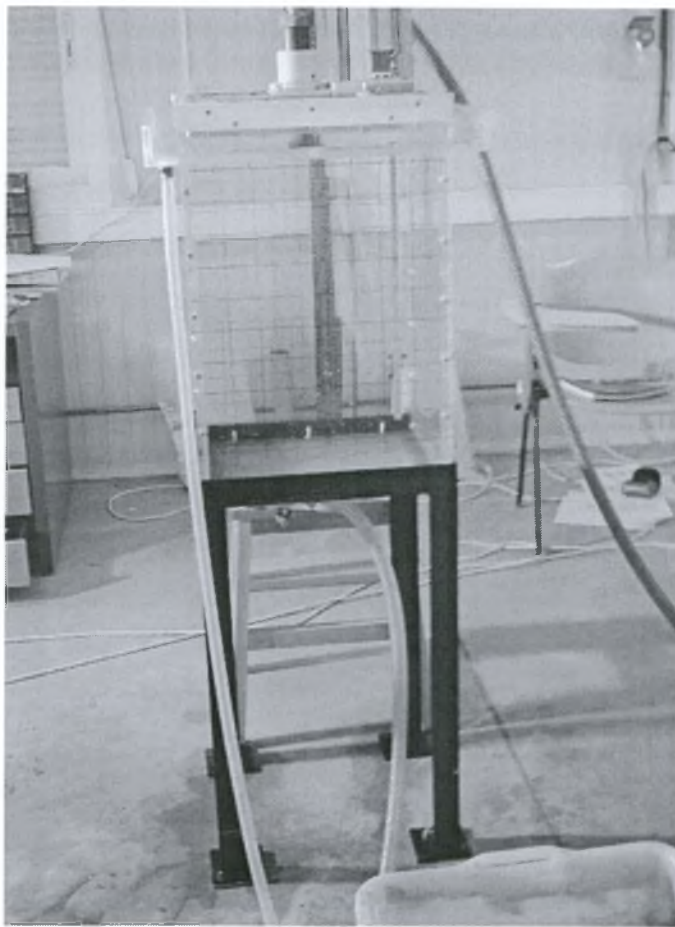
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική συσκευή αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα :

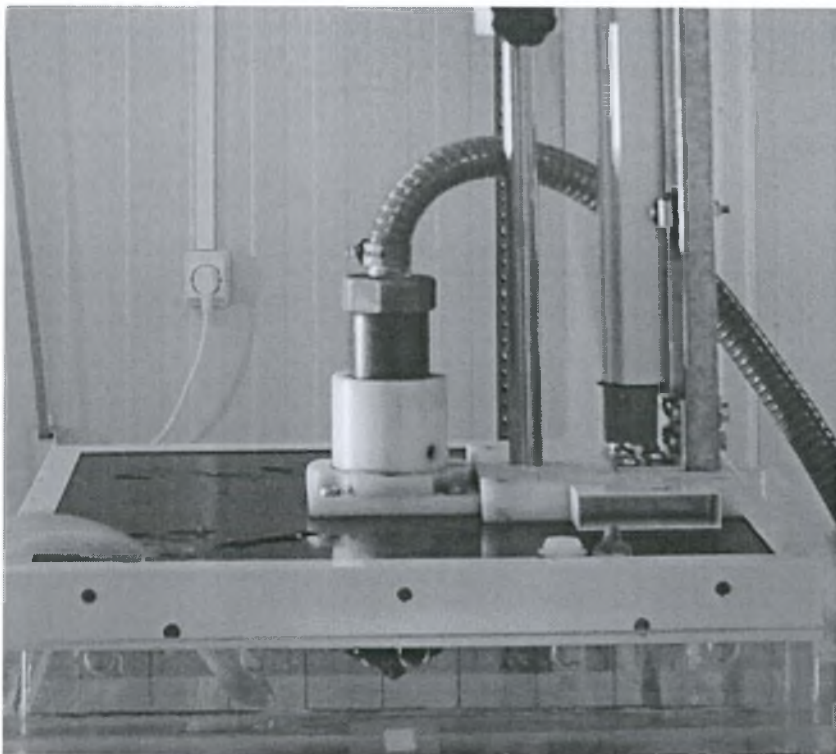
- ορθογωνική δεξαμενή από plexiglass,
- διάταξη δημιουργίας του jet (jet plenum),
- έναν αισθητήρα που μετράει ηλεκτρική αγωγιμότητα και επομένως τη συγκέντρωση αλατιού στο νερό,
- μία διάταξη που καταγράφει με μεγάλη ακρίβεια για τη θέση του παραπάνω αισθητήρα μέσα στη δεξαμενή,
- μία ειδικά διαμορφωμένη ξύλινη βάση πάνω στην οποία στηρίζονται οι παραπάνω μηχανισμοί αλλά και που εξασφαλίζει και την αλλαγή θέσης τους για τις ανάγκες των μετρήσεων,
- τρία ροόμετρα,
- μία βάνα ακριβείας για τη ρύθμιση της παροχής,
- μια δευτερεύουσα δεξαμενή για την τροφοδοσία της φλέβας από το δοχείο σταθερής στάθμης,
- μια αντλία,
- δύο προβολείς των 1000Watts ο καθένας,
- μια ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και κάποια γυάλινα βαθμονομημένα δοχεία και
- μια βιντεοκάμερα .

Ορθογωνική δεξαμενή (plexiglass). Η εν λόγω δεξαμενή έχει οριζόντια τετραγωνική διατομή και είναι κατασκευασμένη από plexiglass πάχους 1.25cm. Οι εξωτερικές διαστάσεις της είναι 62.5cm x 42.5cm x 42.5cm. Στα 57.2cm από τον πυθμένα υπάρχει περιμετρική υπερχειλίση, από όπου το πλεονάζον νερό οδηγείται στην αποχέτευση μέσω ενός πλαστικού σωλήνα. Οι εσωτερικές διαστάσεις της δεξαμενής είναι 60cm x 40cm x 40cm. Η δεξαμενή είναι τοποθετημένη σε υπερυψωμένη, ειδικά διαμορφωμένη για το σκοπό, βάση. Η δεξαμενή φωτίζεται με δύο προβολείς των 1000Watts ο καθένας, για την οπτικοποίηση των μετρήσεων και τις ανάγκες βιντεοσκοπήσεων. Στην μπροστινή αλλά και στην πίσω διαφανή πλευρά έχει σχεδιαστεί κάναβος με κατακόρυφη και οριζόντια ισοδιάσταση κανάβου 5cm, ενώ για τις ανάγκες των μετρήσεων στην απέναντι πλευρά επικολλήθηκε μετρητική ταινία δίπλα από τον κάναβο. Έτσι καθορίζεται το επίπεδο του ακροφυσίου και η κατακόρυφη απόσταση από αυτό ή η οριζόντια από τον άξονα της φλέβας. Το ακροφύσιο απέχει $H = 51.9\text{cm}$ από τον πυθμένα της δεξαμενής. Η μέγιστη χωρητικότητα της δεξαμενής μέχρι το ύψος της υπερχειλίσης είναι 91.52 λίτρα.



Φωτογραφία 2.1 Ορθογωνική δεξαμενή

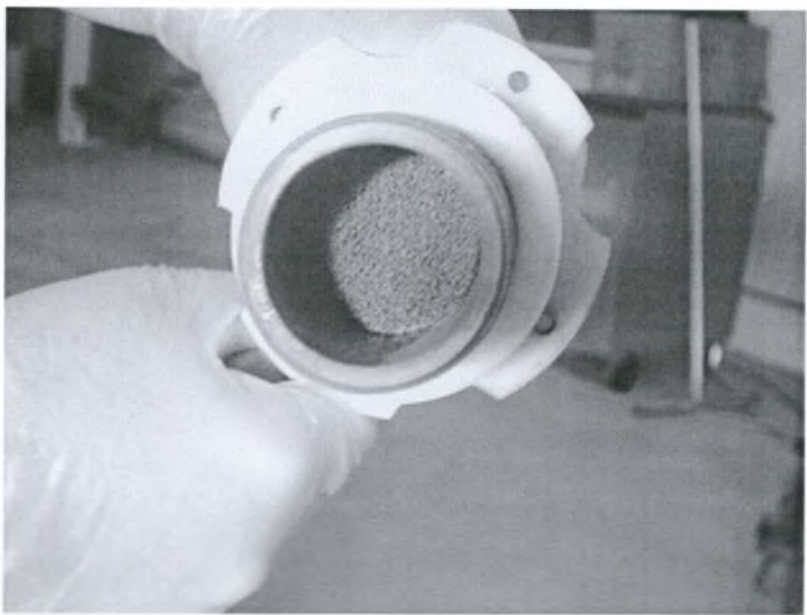
Διάταξη δημιουργίας της φλέβας. Ο μηχανισμός δημιουργίας της φλέβας είναι τοποθετημένος πάνω σε ειδικά διαμορφωμένη ξύλινη επιφάνεια η οποία τοποθετείται στο πάνω μέρος της δεξαμενής. Η διάταξη δημιουργίας της φλέβας αποτελείται από ένα σωλήνα από PVC διαμέτρου 4 cm, στα άκρα του οποίου έχει προσαρμοστεί ορειχάλκινο τεμάχιο εισόδου του νερού της φλέβας και ορειχάλκινο τεμάχιο με σπείρωμα για την εφαρμογή των ακροφυσίων. Γύρω από το σωλήνα PVC έχει τοποθετηθεί ένας άσπρος πλαστικός δακτύλιος ο οποίος εφαρμόζει πάνω στην ξύλινη βάση και συγκρατεί το jet στο επιθυμητό ύψος, επιτρέποντας ταυτόχρονα και διόρθωση του ύψος του jet μέσω ειδικών σφιγκτήρων που διαθέτει στο πλάι. Το τμήμα εισόδου του νερού συνδέεται με εύκαμπτο διαφανή σωλήνα διαμέτρου Φ10. Το εσωτερικό του σωλήνα PVC περιέχει ένα σύστημα που αποτελείται από σπόγγο πάχους 2cm, ενώ ακολουθούν κυψελίδες (Honeycomb) πάχους 5cm για καταστροφή των μεγάλων τυρβωδών δινών μέσα στη συσκευή δημιουργίας της φλέβας. Στο τεμάχιο εξόδου (Papanicolaou, 1994) προσαρμόζονται τα ακροφύσια από τα οποία γίνεται η εκροή της φλέβας. Τα χαρακτηριστικά των ακροφυσίων περιγράφονται παρακάτω.



Φωτογραφία 2.2 Συσκευή δημιουργίας της φλέβας (jet plenum).

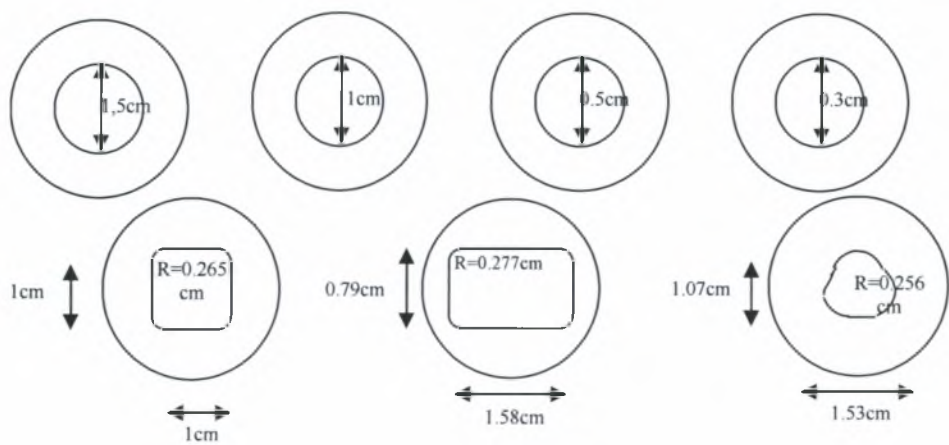


Φωτογραφία 2.3 Κυψελίδες (Honeycomb) πάχους 5cm.



Φωτογραφία 2.4 Σπόγγος πάχους 2cm

Ακροφύσια που χρησιμοποιήθηκαν

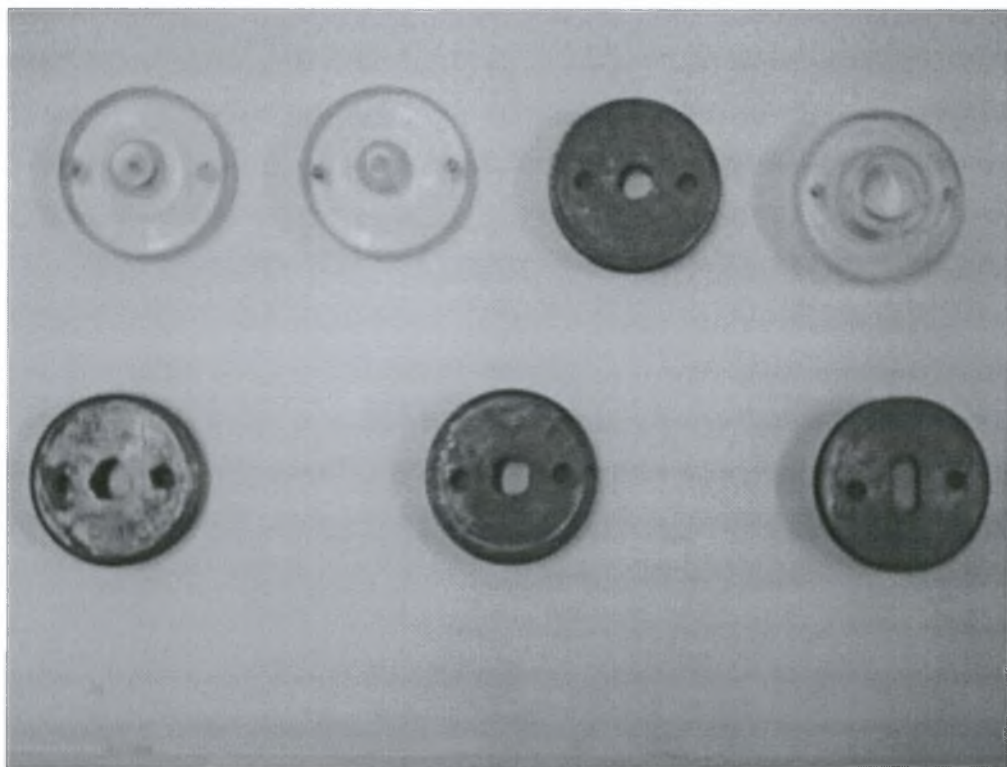


Σχήμα 2.1 Ακροφύσιο Τριγωνικής διατομής με στρογγυλεμένες γωνίες

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ακροφυσίων που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο πείραμα.

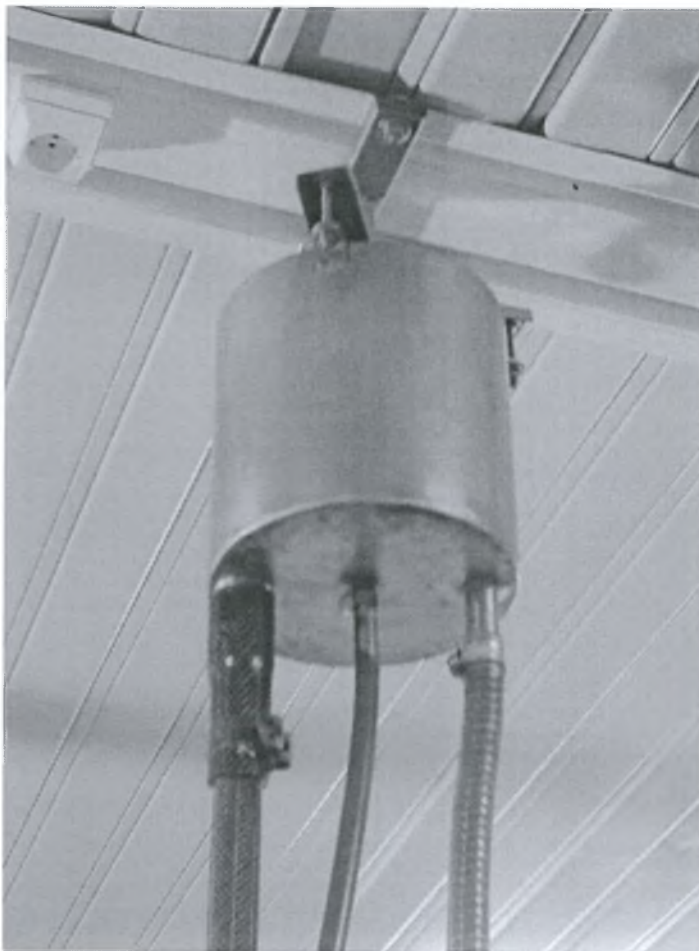
Τύπος ακροφυσίου	Διάμετρος ακροφυσίου D (cm)	Εμβαδόν A (cm ²)	Βρεχόμενη περίμετρος P(cm)	Υδραυλική ακτίνα R(cm)
κυκλικό	1.50	1.76600	4.710	0.3750
κυκλικό	1.00	0.78540	3.140	0.2500
κυκλικό	0.50	0.19635	1.570	0.1250
κυκλικό	0.30	0.07068	0.943	0.0750
Τριγωνικό (ισοσκελές)	Πλευρά 1.53cm	0.89860	3.513	0.2558
τετραγωνικό	1cmx1cm	0.92270	3.485	0.2648
ορθογωνικό	1.58cmx0.79	1.17090	4.225	0.2770

Πίνακας 2.1 Υδραυλικά χαρακτηριστικά των ακροφυσίων.



Φωτογραφία 2.5 Ακροφύσια που χρησιμοποιήθηκαν.

Δοχείο σταθερής στάθμης (σταθερού φορτίου). Το δοχείο σταθερής στάθμης είναι ένα ανοξείδωτο κυλινδρικό δοχείο αναρτημένο από την οροφή του εργαστηρίου Υδροδυναμικής και Περιβαλλοντικής Τεχνικής. Στο εσωτερικό του δοχείου αυτού υπάρχει σωλήνας υπερχειλίσης, ενώ στον πυθμένα του υπάρχουν τρεις απολήξεις σωλήνων διαφορετικών διαμέτρων. Το δοχείο τροφοδοτείται με χρωματισμένο νερό με τη βοήθεια βυθιζόμενης αντλίας από μια άλλη δεξαμενή όπου παρασκευάζεται το διάλυμα της φλέβας. Όταν το δοχείο σταθερής στάθμης υπερχειλίζει, σταθερή στάθμη, τότε το ροόμετρο ρυθμίζεται έτσι ώστε η φλέβα να έχει συγκεκριμένη και σταθερή παροχή, ενώ το πλεονάζον διάλυμα υπερχειλίζει πάλι στη δεξαμενή παρασκευής του διαλύματος της φλέβας. Για να λειτουργεί σωστά το δοχείο σταθερής στάθμης θα πρέπει κάθε φορά η παροχή της αντλίας, με την οποία το τροφοδοτούμε από την δευτερεύουσα δεξαμενή, να είναι μεγαλύτερη από την παροχή της φλέβας ώστε να λειτουργεί πάντα η υπερχειλίση και να έχουμε σταθερό πιεζομετρικό ύψος.



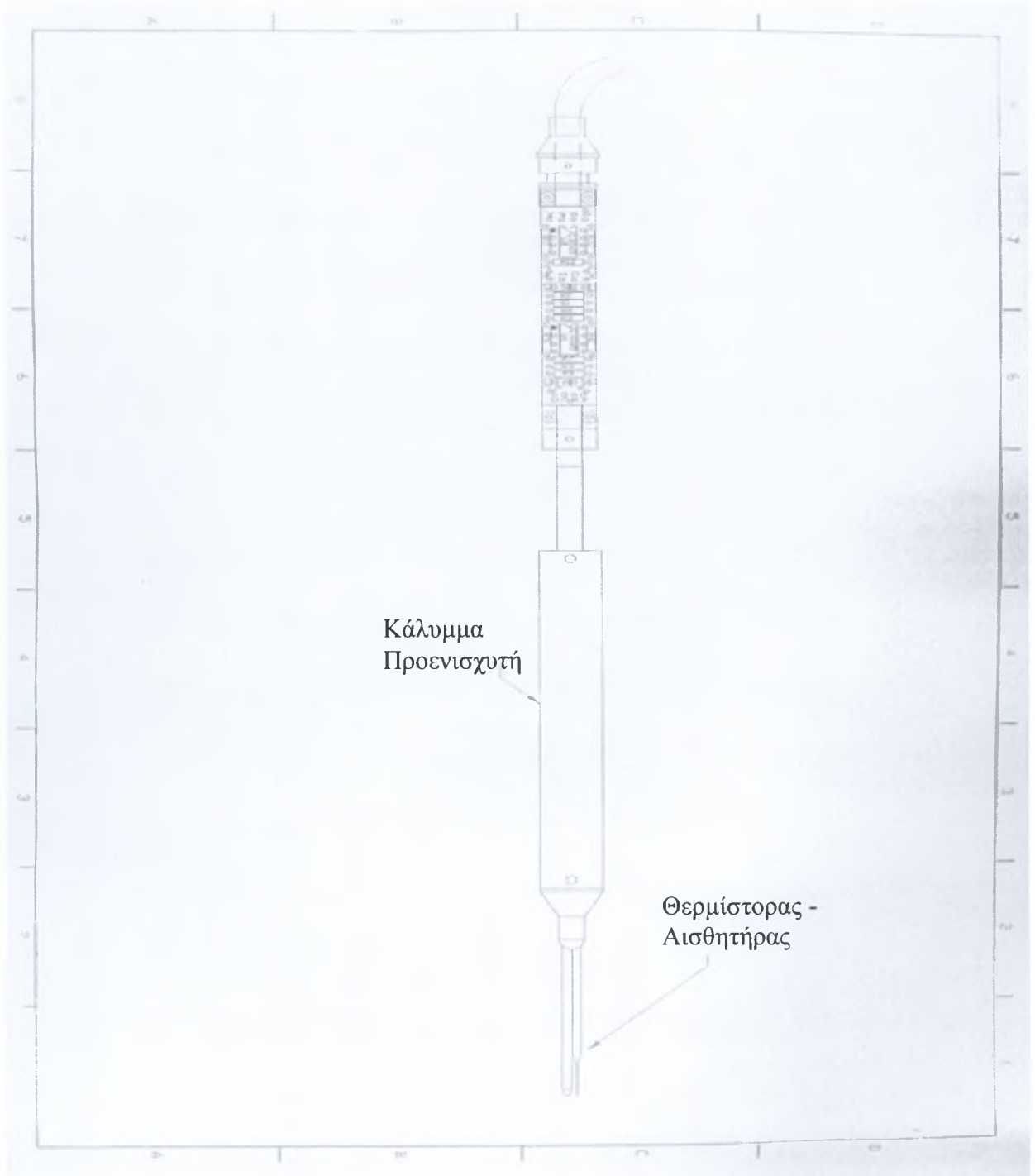
Φωτογραφία 2.6 Δοχείο σταθερής στάθμης.

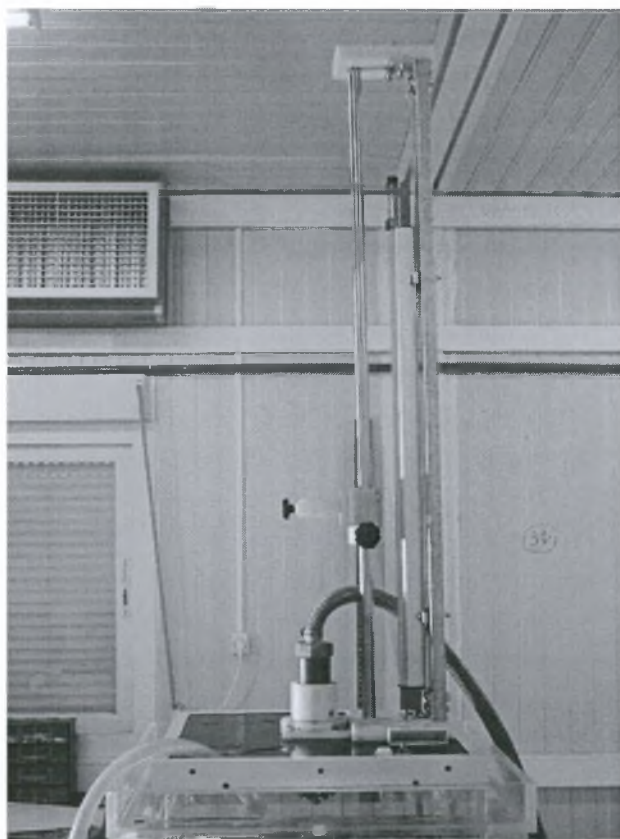
Αισθητήρας μέτρησης αλατότητας (Head, 1983 probe). Ο αισθητήρας μέτρησης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι το MicroScale Conductivity – Temperature Instrument Model 125 (MSCTI), της εταιρίας Precision Measurement Engineering. Έχει σχεδιαστεί για να μετράει την θερμοκρασία και την ηλεκτρική αγωγιμότητα των υδατικών διαλυμάτων που περιέχουν αγωγή ιόντα. Το MSCTI παρέχει ανάλογα αποτελέσματα διαφοράς δυναμικού που είναι συναρτήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ή της θερμοκρασίας. Το όργανο προορίζεται για χρήση σε κινούμενο ρευστό όπου η χωρική ανάλυση και η χρονική απόκριση είναι πολύ μικρές. Πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται σε φρέσκα καθαρά διαλύματα, χωρίς αιωρούμενα σωματίδια, διαφορετικά μεγάλα σωματίδια μπορεί να αγκιστρωθούν στα ηλεκτρόδια του αισθητήρα προκαλώντας αλλαγές στη ρύθμιση. Η τοποθέτηση του αισθητήρα θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η ροή να κινείται αντίθετα από την κατεύθυνση των αισθητήρων. Ο προσανατολισμός είναι λιγότερο ευπαθής στην μόλυνση. Φερτά που αγκιστρώνονται στα ηλεκτρόδια μπορούν μερικές φορές να αφαιρεθούν αν ο αισθητήρας τοποθετηθεί κάτω από μια βρύση ή αν χρησιμοποιηθεί ροή υπό πίεση.

Επίσης πρέπει να αποφεύγονται διαλύματα που περιέχουν λάδι ή γλίτσα. Τα ηλεκτρόδια αγωγιμότητας είναι επικαλυμμένα με πλατίνα για να αυξήσουν την ικανότητά τους να διαπεράσουν ηλεκτρικό ρεύμα μέσα στο διάλυμα. Η επικάλυψη αυτή είναι σαν σπόγγος και αν γεμίσει με λάδι ή γλίτσα, τότε τα ηλεκτρόδια θα έχουν δυσκολία να άγουν ηλεκτρισμό. Στην περίπτωση αυτή ανάβει η ένδειξη Phase Error στον αποκωδικοποιητή του αισθητήρα.

Ο χρόνος που εκτίθεται ο αισθητήρας στον αέρα μετά τη ρύθμιση του πρέπει να ελαττώνεται, διαφορετικά θα υπάρξουν αλλαγές αν ο χρόνος έκθεσης στον αέρα είναι μεγαλύτερος από μερικά δευτερόλεπτα. Όταν μετακινείται ο αισθητήρας από το ένα διάλυμα στο άλλο, το γεγονός ότι μια μικρή σταγόνα προσκολλάται στα ηλεκτρόδια τα προστατεύει. Ο αισθητήρας πρέπει πάντα να ξεπλένεται με καθαρό νερό μετά τη χρήση, ενώ δεν πρέπει να εκτίθεται στο νερό άσκοπα.

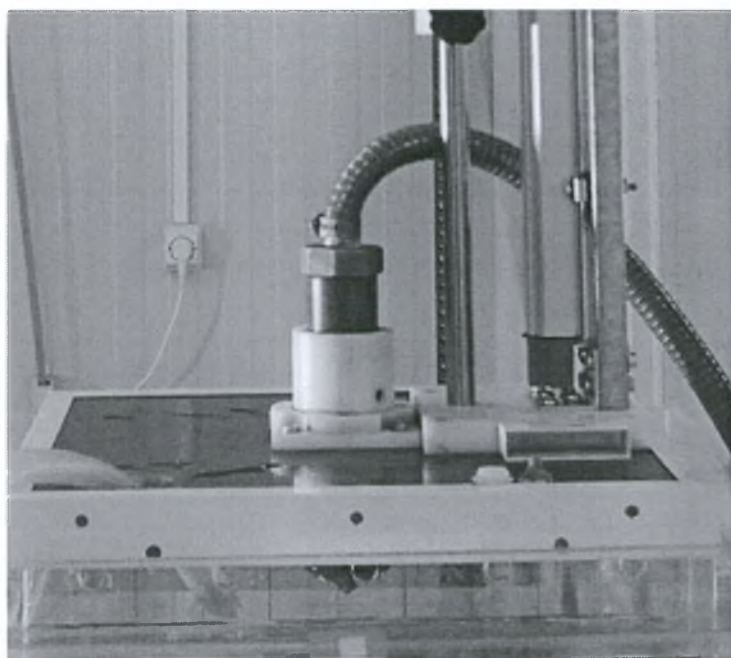
Ο προενισχυτής είναι ανθεκτικός στο νερό και μπορεί να βυθιστεί όπως και το καλώδιο. Αντίθετα ο συνδετήρας στην ηλεκτρονική γέφυρα δεν είναι ανθεκτικός στο νερό και σε καμιά περίπτωση δεν πρέπει να εισέλθει νερό. Αν συμβεί κάτι τέτοιο ο αισθητήρας θα καταστραφεί μόνιμα. Παρατίθεται το σχέδιο του αισθητήρα.





Φωτογραφία 2.7 Διάταξη μηχανισμού προσδιορισμού θέσης

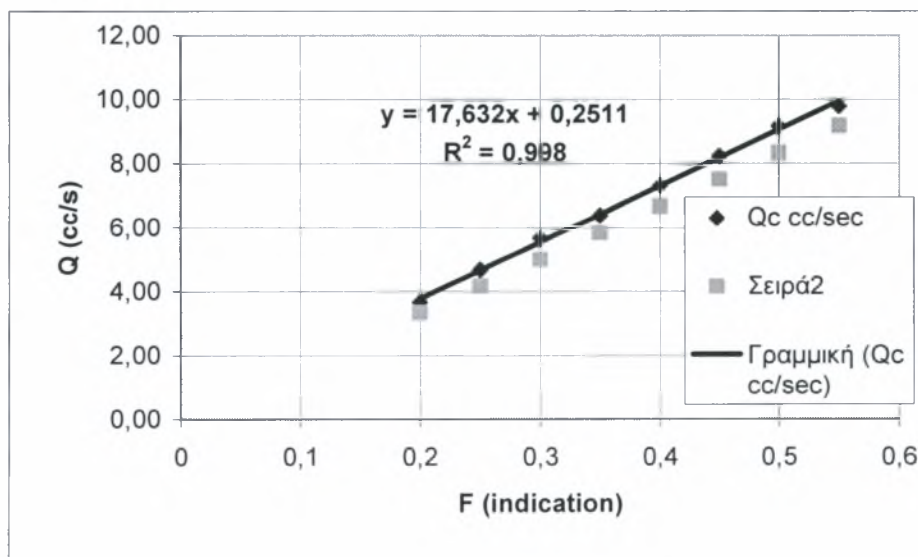
Ειδικά διαμορφωμένη ξύλινη βάση (καπάκι). Για τις ανάγκες των μετρήσεων κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία μιας ειδικά διαμορφωμένης βάσης από ξύλο πάνω στην οποία να μπορούν να στηριχθούν όλοι οι παραπάνω μηχανισμοί μέτρησης θέσης-αλατότητας αλλά και το ίδιο το jet. Η βάση αυτή διαθέτει επίσης και οπές σε άλλες θέσεις στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν τα μετρητικά όργανα και το jet και να γίνουν μετρήσεις και σε άλλες περιοχές μέσα στη συγκεκριμένη δεξαμενή.



Φωτογραφία 2.8 Ειδικά διαμορφωμένη ξύλινη βάση (καπάκι)

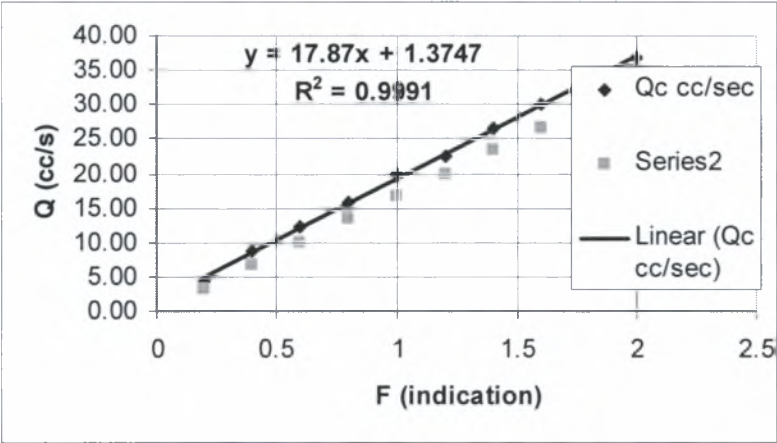
Ροόμετρα-ρύθμιση ροομέτρων. Το ροόμετρο είναι το όργανο ρύθμισης της παροχής της φλέβας. Αποτελείται από έναν κατακόρυφο διαφανή διαβαθμισμένο σωλήνα, μέσα στον οποίο κινείται μία μεταλλική ή πλαστική σφαίρα, η οποία ανάλογα με την εισερχόμενη παροχή (δυναμική άνωση) στο ροόμετρο σταθεροποιείται στην εκάστοτε στάθμη. Η είσοδος στο ροόμετρο συνδέεται με την δεξαμενή σταθερής στάθμης ενώ η έξοδος με τον εύκαμπτο σωλήνα που τροφοδοτεί το jet. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν 3 ροόμετρα. Το 1ο επιτρέπει μέτρηση παροχών από 0.06-0.55 lt/min, το 2ο ροόμετρο από 0.2-2 lt/min και το 3ο από 2-10 lt/min. Η παροχή ελέγχεται με μια σφαιρική βάνα ανάντη και με μια βάνα ακριβείας με βερνιέρο κατάντη των ροομέτρων. Η ρύθμιση των ροομέτρων έγινε με τη βοήθεια ενός ογκομετρικού σωλήνα χωρητικότητας 2 λίτρων και ενός χρονομέτρου. Έγιναν συνολικά τρεις ρυθμίσεις μία για κάθε ροόμετρο. Η ρύθμιση έγινε ως εξής. Για κάθε παροχή (ένδειξη του σωλήνα του ροομέτρου) μετρήθηκε ο χρόνος για να πληρωθεί ο ογκομετρικός σωλήνας μέχρι τη στάθμη που αντιστοιχεί σε όγκο ενός (1) ή δύο (2) λίτρων ή άλλων ενδιαμέσων τιμών. Οι τιμές που προέκυψαν φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν για κάθε ροόμετρο ξεχωριστά.

ΈΝΔΕΙΞΗ	T	V		QC	ΈΝΔΕΙΞΗ
lt/min	s	ml	lt	cc/sec	cc/sec
0,2	249,71	915	0,915	3,66	3,33
0,25	207,75	970	0,97	4,67	4,17
0,3	167,86	950	0,95	5,66	5,00
0,35	147,06	940	0,94	6,39	5,83
0,4	128,33	940	0,94	7,32	6,67
0,45	115,4	950	0,95	8,23	7,50
0,5	99,24	910	0,91	9,17	8,33
0,55	95,99	940	0,94	9,79	9,17



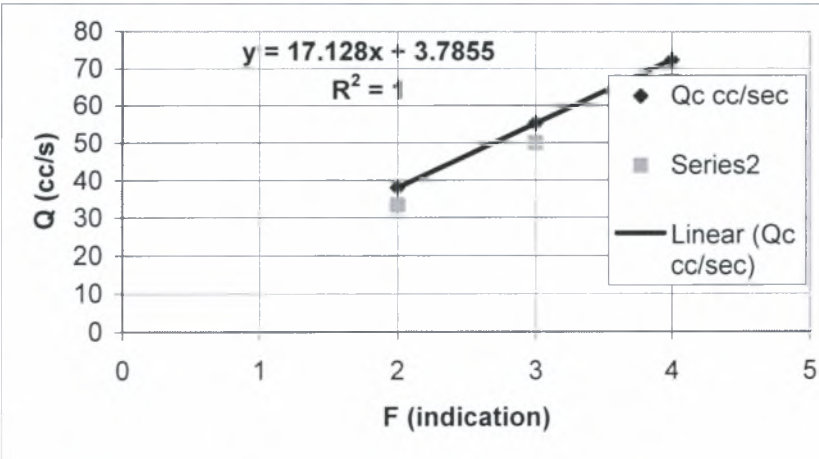
Πίνακας 2.2 Ρύθμιση 1^{ου} ροομέτρου

ΈΝΔΕΙΞΗ	T	V		QC	ΈΝΔΕΙΞΗ
lt/min	s	ml	lt	cc/sec	cc/sec
0,2	215,07	930	0,93	4,32	3,33
0,4	104,19	920	0,92	8,83	6,67
0,6	75,55	925	0,925	12,24	10,00
0,8	58,89	925	0,925	15,71	13,33
1	46,6	920	0,92	19,74	16,67
1,2	40,44	910	0,91	22,50	20,00
1,4	33,87	900	0,9	26,57	23,33
1,6	30,56	920	0,92	30,10	26,67
1,8	28,12	940	0,94	33,43	30,00
2	24,82	915	0,915	36,87	33,33



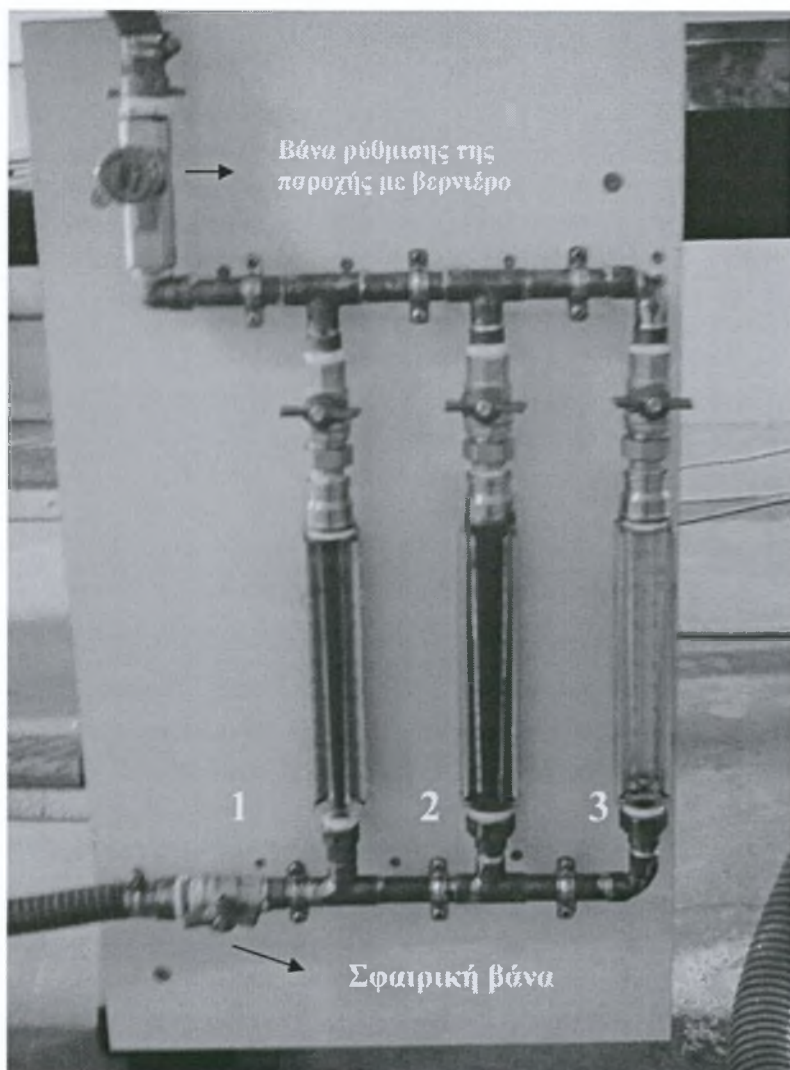
Πίνακας 2.3 Ρύθμιση 2^{ου} ροομέτρου

ΈΝΔΕΙΞΗ	T	V		QC	ΈΝΔΕΙΞΗ
lt/min	s	ml	lt	cc/sec	cc/sec
2	23,67	900	0,9	38,02281	33,33
3	17,66	975	0,975	55,20951	50,00
4	12,59	910	0,91	72,27959	66,67



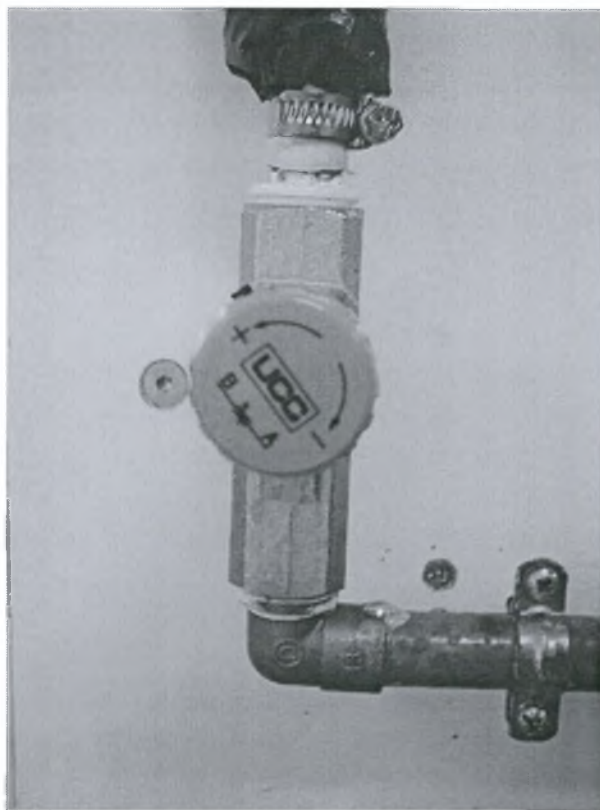
Πίνακας 2.4 Ρύθμιση 3ου ροομέτρου

Τα διαγράμματα της ρύθμισης των ροομέτρων που παρατίθενται παραπάνω προτρέπουν τη χρήση περίπου γραμμικών σχέσεων ρύθμισης, ανάμεσα στην ένδειξη και στην παροχή. Οι εξισώσεις αυτές φαίνονται στους παραπάνω πίνακες.



Φωτογραφία 2.9 Ροόμετρα

Βάνα ακριβείας. Είναι μια συρταρωτή βάνα με την οποία μπορούμε να πετυχαίνουμε με ακρίβεια την παροχή που θέλουμε. Το υλικό και ο τρόπος κατασκευής διαφέρουν πολύ από τις βάνες του εμπορίου. Την τοποθετούμε σε σειρά και μετά τα ροόμετρα, ώστε να μην υπάρχουν σημαντικές απώλειες ενέργειας στη κατάντη. Η κύρια διαφορά από τις απλές βάνες είναι η ροή μετά την έξοδο είναι ομαλή και δεν δημιουργούνται στρόβιλοι, έτσι ώστε να έχουμε μικρό διακυμάνσεις στην παροχή.



Φωτογραφία 2.10 Βάνα ακριβείας

Δευτερεύουσα δεξαμενή. Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μια δευτερεύουσα δεξαμενή για την τροφοδοσία της φλέβας από το δοχείο σταθερής στάθμης. Μέσα στη δεξαμενή αυτή τοποθετείται χρωματισμένο διάλυμα συγκεκριμένης πυκνότητας που παρασκευάζεται στο εργαστήριο. Κατόπιν τοποθετείται μέσα και η αντλία που θα ανεβάσει το πυκνότερο διάλυμα της φλέβας μέχρι το δοχείο σταθερής στάθμης.



Φωτογραφία 2.11 Δευτερεύουσα δεξαμενή

Αντλία. Την αντλία την τοποθετούμε στην δευτερεύουσα δεξαμενή και με την βοήθεια της τροφοδοτούμε το δοχείο σταθερής στάθμης. Έχει κυλινδρικό σχήμα και είναι κατασκευασμένη από πλαστικό. Η αναρρόφηση γίνεται από τον πυθμένα της, ενώ η παροχή εξόδου βρίσκεται στο πλάι όπου υπάρχει και μια βάννα για τη ρύθμιση της παροχής. Διαθέτει διακόπτη υδραργύρου για αυτόματη διακοπή λειτουργίας όταν η στάθμη του νερού μειωθεί σε δεδομένο ύψος.



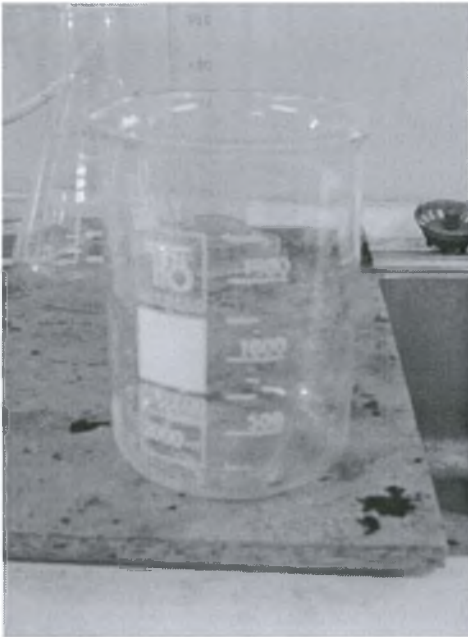
Φωτογραφία 2.12 Αντλία

Δύο προβολείς των 1000Watts. Οι προβολείς χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για τον επαρκή φωτισμό της κύριας δεξαμενής προκειμένου να πετύχουμε ακριβείς μετρήσεις, αλλά και για τις ανάγκες της βιντεοσκόπησης ορισμένων πειραμάτων.

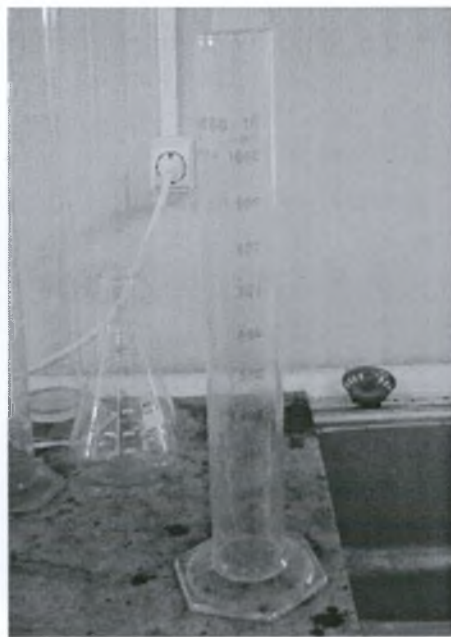


Φωτογραφία 2.13 Προβολείς

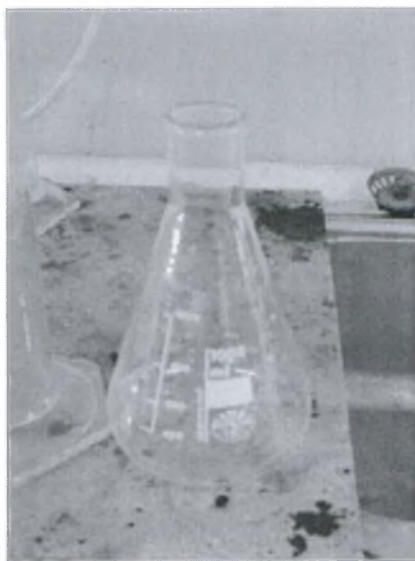
Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και κάποια γυάλινα βαθμονομημένα δοχεία.
Προκειμένου να δημιουργηθούν τα απαραίτητα διαλύματα συγκεκριμένης πυκότητας αλλά και για να πραγματοποιηθεί ο σωστός χρωματισμός τους, για τις ανάγκες των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν μια ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας και κάποια γυάλινα βαθμονομημένα δοχεία. Η ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας μπορεί να μετρήσει βάρος μέχρι 2kg και σε αυτή ζυγίζεται το αλάτι και το χρώμα. Τα γυάλινα βαθμονομημένα δοχεία χρησιμεύουν στη μέτρηση συγκεκριμένων ποσοτήτων νερού ή διαλύματος.



Φωτογραφία 2.14 Δοχείο 1.



Φωτογραφία 2.15 Δοχείο 2.



Φωτογραφία 2.16 Δοχείο 3.



Φωτογραφία 2.17 Ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας.

Βιντεοκάμερα. Τέλος για τις ανάγκες των βιντεοσκοπήσεων αλλά και ορισμένων φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε μια βιντεοκάμερα Panasonic μοντέλο XM1.



Φωτογραφία 2.18 Βιντεοκάμερα Panasonic.

2.2 Πειραματικές Μετρήσεις

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας προγραμματίστηκαν να γίνουν δύο σειρές πειραμάτων. Και στις δύο σειρές θα μελετηθούν φλέβες με πυκνότητα μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του περιβάλλοντος υγρού στο οποίο διαχέεται. Στην πρώτη σειρά πειραμάτων μελετάται ο χρόνος πλήρωσης της δεξαμενής από ρευστό μεγαλύτερης πυκνότητας που εισέρχεται στην κύρια δεξαμενή μέσω ενός jet. Στη δεύτερη σειρά των μετρήσεων μελετάται η πυκνότητα (αλατότητα) καθ' ύψος συναρτήσει του χρόνου και του ύψους.

Πρώτη σειρά πειραμάτων Για την διεξαγωγή των πειραμάτων της πρώτης σειράς ακολουθήθηκε αναλυτικά η παρακάτω διαδικασία: Αρχικά έγινε πλήρωση της κύριας δεξαμενής με καθαρό νερό βρύσης μέχρι το ύψος της στάθμης υπερχειλίσης. Στη συνέχεια παρασκευάστηκε το διάλυμα της φλέβας που περιείχε αλάτι, για να

πετύχουμε την επιθυμητή πυκνότητα, και κόκκινο χρώμα. Το διάλυμα αυτό παρασκευάστηκε στη δευτερεύουσα δεξαμενή σε μεγάλη ποσότητα προκειμένου να επαρκέσει για ικανοποιητικό αριθμό πειραμάτων. Επίσης το ακροφύσιο από το οποίο έγινε η εκροή της φλέβας ήταν κατακόρυφο προς τα κάτω, ούτως ώστε η φλέβα να είναι κατακόρυφη. Για την αποφυγή της αναρρόφησης αέρα στο ακροφύσιο, έως ότου να ανέλθει η στάθμη του νερού μέσα στην κύρια δεξαμενή μέχρι την υπερχειλίση, η συσκευή από την οποία γίνεται η εκροή της φλέβας αναποδογυρίζεται και αφήνεται να γεμίσει πλήρως με το διάλυμα της φλέβας και το στόμιο του ακροφυσίου σφραγίζεται. Όταν γεμίσει η κύρια δεξαμενή επαρκώς με νερό, το σφραγισμένο ακροφύσιο τοποθετείται με τη σφραγισμένη πλευρά κατακόρυφα μέσα στο νερό και αποσφραγίζεται.

Συνολικά διεξήχθησαν 5 ομάδες πειραμάτων και ειδικότερα πενήντα ένα (51) ξεχωριστά πειράματα. Η πρώτη ομάδα πειραμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας φλέβες κυκλικής διατομής, διαμέτρων 5mm, 10mm και 15mm και πυκνότητα ύδατος της φλέβας από 1.011gr/cc ως 1.013gr/cc. Η δεύτερη ομάδα πειραμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας φλέβες κυκλικής διατομής, διαμέτρων 3mm, 5mm, 10mm και 15mm και πυκνότητα ύδατος της φλέβας από 1.020gr/cc ως 1.021gr/cc. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν τρεις ομάδες πειραμάτων για φλέβες τριγωνικής, τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής με πυκνότητες του ύδατος της φλέβας 1.010gr/cc, 1.012gr/cc και 1.022gr/cc αντίστοιχα. Πριν από κάθε πείραμα μετρούσαμε τη θερμοκρασία του νερού της κύριας δεξαμενής απ' όπου υπολογίζαμε την πυκνότητά του βάσει της σχέσης

$$\rho_a = -0.0047T^2 - 0.0149T + 1000.4 \text{ (gr/lit)}$$

Σε όλα τα παραπάνω πειράματα έγινε προσπάθεια τόσο με τη βοήθεια των παροχών όσο και με τις πυκνότητες να καλυφθεί κάθε φορά μια ικανοποιητική περιοχή του αριθμού Richardson. Έτσι σε κάθε πείραμα και καλύφθηκε μια ικανοποιητική περιοχή του αριθμού Ri με τιμές από 0.01 έως περίπου 1.

Ρύθμιση αισθητήρα μέτρησης αλατότητας (Head-probe, 1983)

Από το ομογενές διάλυμα συγκεκριμένης αλατότητας που έχει παρασκευαστεί προηγουμένως, λαμβάνεται μια ποσότητα σε ογκομετρικό σωλήνα των 500ml και μετράται η πυκνότητά του με πυκνόμετρο και η τιμή της πυκνότητας αναγράφεται σε κωνικό δοχείο όπου και αποθηκεύεται ποσότητα διαλύματος ίση με 200ml. Το υπόλοιπο διάλυμα που απομένει στον δοκιμαστικό σωλήνα αραιώνεται με καθαρό νερό και μετράται ξανά η πυκνότητα του, η τιμή της οποίας αναγράφεται σε νέο κωνικό δοχείο όπου και εισάγεται ποσότητα ίση με 200ml. Με τον τρόπο αυτό το διάλυμα αραιώνεται διαδοχικά όλο και περισσότερο έως ότου φτάσει σε μια ελάχιστη πυκνότητα, πχ. 1.002gr/cc. Σχηματίζεται συνεπώς μια σειρά κωνικών δοχείων με διαφορετικές (γνωστές) πυκνότητες, διαλύματος NaCl. Με τον αισθητήρα του Head (1983) μετράται η ηλεκτρική αγωγιμότητα των διαλυμάτων. Η έξοδος του αποκωδικοποιητή του σήματος του αισθητήρα οδηγείται σε ένα βολτόμετρο με το οποίο μετράται η διαφορά δυναμικού (σε Volts), σαν συνάρτηση της πυκνότητας (συγκέντρωσης NaCl διαλύματος). Όσο πυκνότερο είναι το διάλυμα, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητά του σε αλάτι, τόσο μικρότερη είναι η διαφορά δυναμικού του διαλύματος. Η μεταβολή είναι περί τα +5 της φλέβας Volts για

καθαρό νερό, ενώ περί τα -5 Volts για διάλυμα NaCl με πυκνότητα 1.016 kg/l. Η σχέση που συνδέει πυκνότητα με διαφορά δυναμικού είναι γραμμική για την περιοχή πυκνοτήτων του πειράματος, της μορφής

$$\rho = A(\Delta V) + \beta$$

όπου A, β σταθερές

ρ η πυκνότητα του διαλύματος και ΔV η ένδειξη του βολτομέτρου.

2.3 Πειραματική διαδικασία προσδιορισμού της στάθμης της διεπιφάνειας- Ένα τυπικό πείραμα

Παρασκευή διαλύματος φλέβας Για δεδομένη διάμετρο ακροφυσίου D και τη θερμοκρασία T (πυκνότητα ρ_a) της δεξαμενής διάχυσης, επιθυμούμε να εκτελέσουμε ένα πείραμα για δεδομένο αριθμό Richardson της φλέβας R_o . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με επιλογή δύο μεταβλητών:

1. Της πυκνότητας ρ_o της φλέβας και
2. Της παροχής της φλέβας

Εάν επιλεγεί η πυκνότητα ρ_o της φλέβας τότε από τη σχέση:

$$R_o = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{\sqrt{g'_o D}}{W} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/4} \frac{1}{F_o}$$

επιλέγουμε την ταχύτητα εξόδου W και επομένως την παροχή

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

χρησιμοποιώντας το κατάλληλο ροόμετρο.

Σε κυλινδρικό δοχείο διαλύεται σε νερό κόκκινο χρώμα και μαζί ποσότητα άλατος τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πυκνότητα της φλέβας σε σχέση με την πυκνότητα του υγρού της κύριας δεξαμενής όπου γίνεται η διάχυση. Έτσι μετρώντας την ποσότητα άλατος και χρώματος σε συγκεκριμένη ποσότητα νερού βρίσκαμε την αναλογία άλατος, χρώματος και νερού σε μεγαλύτερες ποσότητες. Οι μετρήσεις των ποσοτήτων άλατος και χρώματος γίνανε με τη βοήθεια ηλεκτρονικής ζυγαριάς ακριβείας του εργαστηρίου. Η πυκνότητα του διαλύματος της φλέβας κάθε φορά μετράται με πυκνόμετρο. Όταν επιτευχθεί η επιθυμητή τιμή της πυκνότητας της φλέβας, το διάλυμα αντλείται στην δεξαμενή σταθερής στάθμης μέσω της αντλίας που διαθέτουμε. Μόλις αρχίσει η υπερχειλίση στη δεξαμενή σταθερής στάθμης και το πλεόνασμα διοχετεύεται από τον σωλήνα υπερχειλίσης στο δοχείο του υγρού της φλέβας είναι δυνατή η επίτευξη σταθερής παροχής φλέβας. Τυχόν υπάρχων αέρας στο κύκλωμα της φλέβας αφαιρείται με την ανατροπή της συσκευής του ακροφυσίου έξω από την κύρια δεξαμενή και την εξολοκλήρου πλήρωση αυτής με το διάλυμα αλατόνευρο. Στη συνέχεια σφραγίζεται το στόμιο του ακροφυσίου και τοποθετείται μέσα στην κύρια δεξαμενή, με το σφραγισμένο στόμιο προς τα κάτω, ούτως ώστε να καλύπτεται όλο το ακροφύσιο με νερό οπότε αποφεύγεται η διείσδυση αέρα μέσα στη συσκευή της φλέβας.

Εκτέλεση πειράματος. Στην αρχή του κάθε πειράματος-μέτρησης μετρώνται η θερμοκρασία του ύδατος του δοχείου προκειμένου να υπολογιστεί η πυκνότητά του την κάθε φορά. Για κάθε ακροφύσιο μετράται η ένδειξη του ροομέτρου που χρησιμοποιείται, η απόσταση από το ακροφύσιο που η φλέβα γίνεται τυρβώδης (breakdown), και καταγράφεται η στάθμη της διεπιφάνειας του αναμειγμένου νερού σαν συνάρτηση του χρόνου. Ειδικότερα ανοίγουμε τη βάνα και ταυτόχρονα αρχίζει να λειτουργεί και το ροόμετρο. Εδώ θα πρέπει να προσδιορίσουμε το χρόνο μέχρι η φλέβα να αγγίξει τον πυθμένα. Στη συνέχεια δημιουργείται μια διεπιφάνεια τη στάθμη της οποίας προσδιορίζουμε χρονικά. Οι μετρήσεις του χρόνου-στάθμης διεπιφάνειας γίνονται τακτικά και συνεχώς μέχρις ότου φτάσουμε στην πλήρωση σχεδόν της κύριας δεξαμενής. Ενδεικτικά έχει γίνει και βιντεοσκόπηση πολλών μετρήσεων με τη βοήθεια μιας ψηφιακής βιντεοκάμερας ενώ όλα τα δεδομένα έχουν συλλεχθεί και καταγραφεί. Η δεξαμενή φωτίζεται με προβολείς για καλύτερη οπτικοποίηση της ροής και μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Η καταγραφή του χρόνου έγινε με ψηφιακό χρονόμετρο ενώ το ύψος της διεπιφάνειας του χρωματισμένου ύδατος προσδιοριζόταν με τη βοήθεια του κανάβου που είχε σχεδιαστεί εξ αρχής πάνω στη δεξαμενή και της κλίμακας στο πλαϊνό τοίχωμα της δεξαμενής.

2.4 Περιγραφή ενός τυπικού πειράματος

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί το πείραμα 24 διάχυσης κυκλικής φλέβας που έγινε στις 16/07/2005 και ώρα 16:35μμ. Για το συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήσαμε το κυκλικό ακροφύσιο με διάμετρο 5mm. Αρχικά γεμίζουμε την κύρια δεξαμενή με πόσιμο νερό μέχρι να αρχίσει να λειτουργεί η υπερχειλίση, ώστε να έχουμε σταθερή στάθμη κατά τη διάρκεια του πειράματος. Στη συνέχεια στη δευτερεύουσα δεξαμενή ανάμιξης δημιουργούμε το διάλυμα της φλέβας από όπου το αντλούμε και το διοχετεύουμε μέσω του δοχείου σταθερής στάθμης στην κύρια δεξαμενή. Για να δημιουργήσουμε την επιθυμητή πυκνότητα της φλέβας, διαλύουμε μικρές δεδομένες ποσότητες αλατιού, οι οποίες έχουν προηγουμένως ζυγιστεί, μέχρι να επιτύχουμε το διάλυμα με την πυκνότητα που επιθυμούμε. Για να μπορούμε να παρατηρούμε καλύτερα τότε συμβαίνει η εισροή, χρωματίζουμε το διάλυμα της φλέβας με μικρή ποσότητα κόκκινου υδροχρώματος. Κατόπιν με ένα αναδευτήρα ανακατεύουμε καλά το διάλυμα ώστε να γίνει ομογενές, λαμβάνουμε ένα μικρό δείγμα από τη δεξαμενή διάλυσης και μετράμε τη πυκνότητα του. Η τιμή της πυκνότητας ήταν 1.021 gr/cc η οποία είναι μέσα στα επιθυμητά όρια.

Κατόπιν τοποθετούμε την αντλία μέσα στη δεξαμενή ανάμιξης και το σωλήνα υπερχειλίσης του δοχείου σταθερής στάθμης. Θέτουμε την αντλία σε λειτουργία και μόλις υπερχειλίσει το δοχείο σταθερής πίεσης ρυθμίζουμε το ροόμετρο μας στην παροχή που θέλουμε να έχουμε στη διάρκεια του πειράματος. Στη συνέχεια τοποθετούμε το ακροφύσιο στη δεξαμενή ανάμιξης, αφού προηγουμένως εξαερώσουμε το σύστημα. Τοποθετούμε στο ακροφύσιο ένα φελλό για να εμποδίσουμε την εισροή αέρα στο σύστημα κλείνουμε τη βάνα του ροομέτρου και γρήγορα το τοποθετούμε κατακόρυφα στο πάνω μέρος της δεξαμενής στην ειδική οπή της ξύλινης βάσης (καπάκι), με τον άξονα της φλέβας κάθετο στην ελεύθερη επιφάνεια και σε τέτοιο βάθος ώστε να είναι βυθισμένο στο νερό ολόκληρο, για την αποφυγή της αναρρόφησης αέρα. Αφαιρούμε το φελλό και περιμένουμε να ηρεμήσει

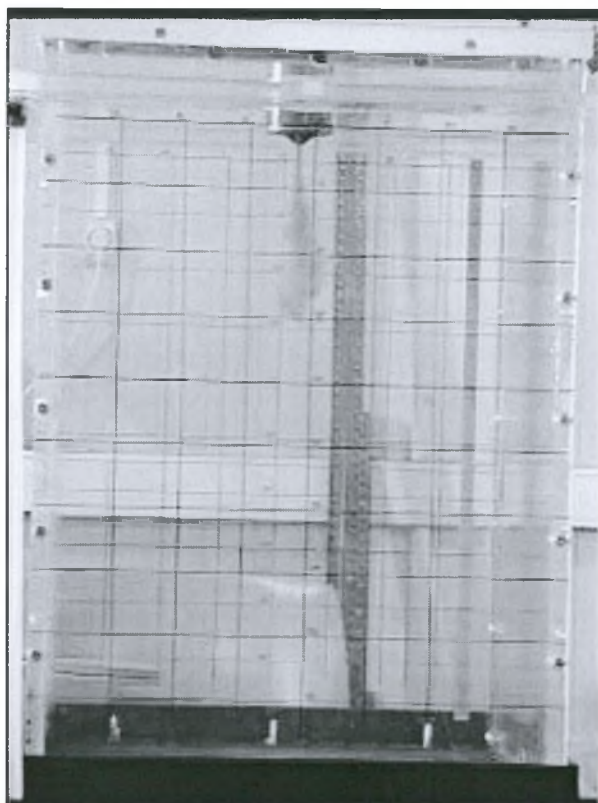
το υγρό της δεξαμενής. Παράλληλα απέναντι από τη μπροστινή πλευρά της κύριας δεξαμενής και σε απόσταση 2,5 περίπου μέτρων από τον κατακόρυφο άξονα της συσκευής της φλέβας τοποθετείται μια ψηφιακή βιντεοκάμερα ενώ όλη η πειραματική διάταξη φωτίζεται με έναν προβολέα των 1000Watt. Ανάβουμε τον προβολέα και μετράμε τη θερμοκρασία του υγρού της κύριας δεξαμενής η οποία είναι 27 βαθμούς Κελσίου.

Η παροχή μέσω της βάνας ακριβείας προρυθμίζεται σε στην ένδειξη που χρειαζόμαστε για τη μέτρηση, πριν τοποθετηθεί το ακροφύσιο στην τελική του θέση, είτε στην κύρια δεξαμενή στο τέλος της προηγούμενης μέτρησης, είτε στη δεξαμενή του διαλύματος. Αφού ηρεμήσει το νερό της κύριας δεξαμενής ανοίγουμε το ροόμετρο, ξεκινάμε συγχρόνως το χρονόμετρο και ελέγχουμε αν η τιμή της παροχής είναι ίση με αυτή που αρχικά ρυθμίσαμε. Κατά τη διάρκεια του πειράματος ελέγχουμε συχνά την ένδειξη της παροχής του ροομέτρου έτσι ώστε να εξασφαλίζουμε σταθερή παροχή συνεχώς. Οι μετρήσεις που έγιναν καταγράφονται σε ειδικά διαμορφωμένο πίνακα και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

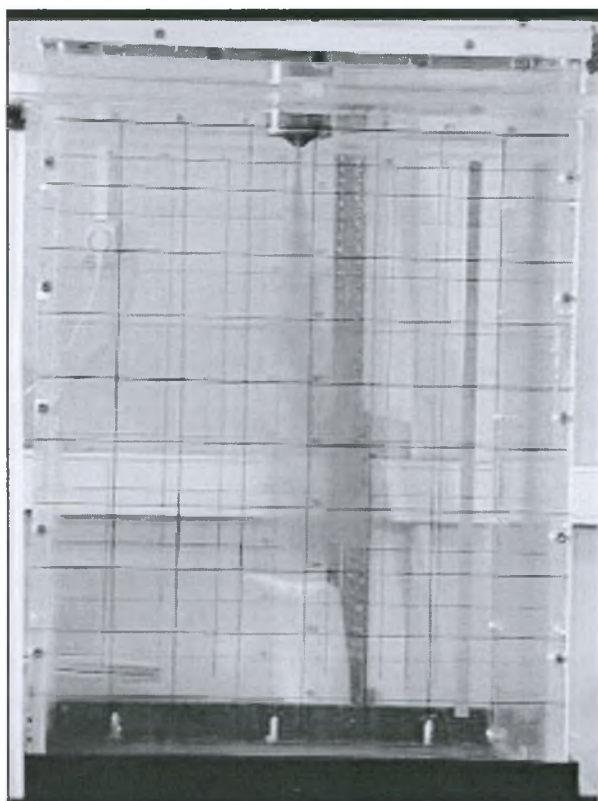
Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποιες διαδοχικές φωτογραφίες από το παραπάνω πείραμα 24.

DATE	16/7/2005	
TIME	16:35	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	24η	
T°C	27	
rho-jet (gr/cc)	1021	
διάμετρος jet (mm)	5	
ένδειξη παροχής 1ου ροομέτρου (lt/min)	0.40	
Breakdown (cm από το ακροφύσιο)	2.5	
αριθμός μέτρησης	χρόνος t (sec)	απόσταση ή προφίλ χρώματος από το ακροφύσιο (cm)
1	11	51,9 (η φλέβα αγγίζει τον πυθμένα)
2	21	45
3	30	40
4	41	35
5	53	30
6	90	25
7	162	20
8	230	15
9	365	10
10	425	8
11	500	6,5 (η διεπιφάνεια πλησιάζει το στόμιο εκροής της φλέβας)

Πίνακας 2.5 Μετρήσεις πειράματος 24



Φωτογραφία 2.19 $t=3\text{sec}$



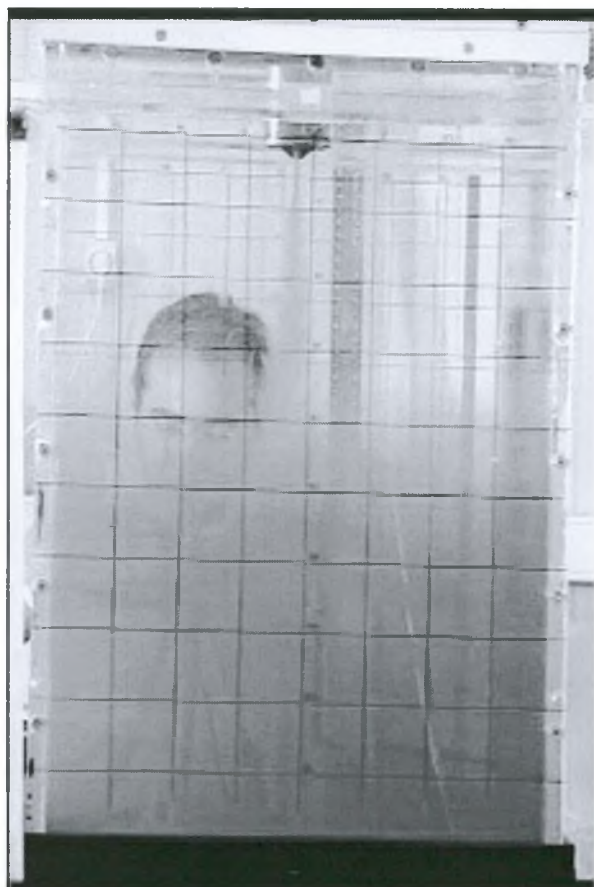
Φωτογραφία 2.20 $t=7\text{sec}$



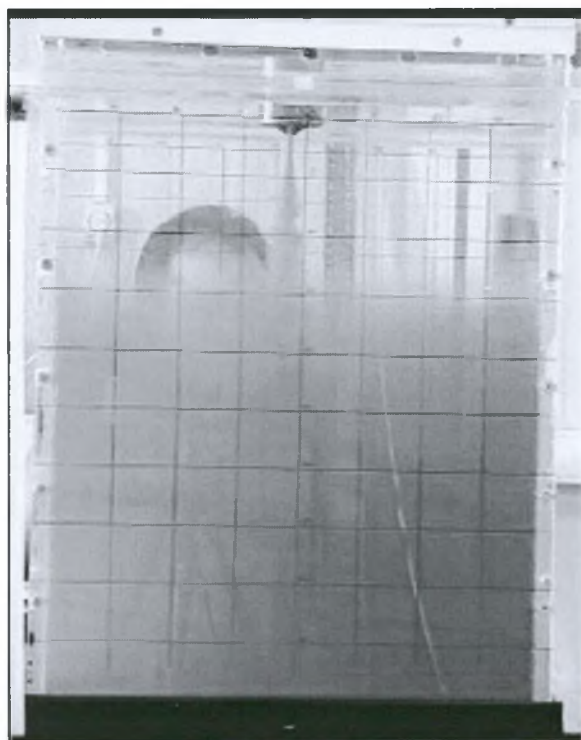
Φωτογραφία 2.21 $t=53\text{sec}$, $h=30\text{cm}$



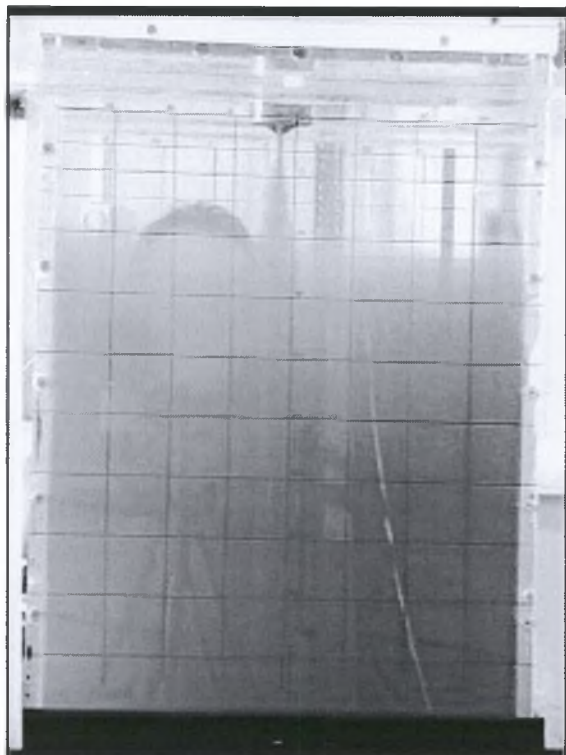
Φωτογραφία 2.22 $t=90\text{sec}$, $h=25\text{cm}$



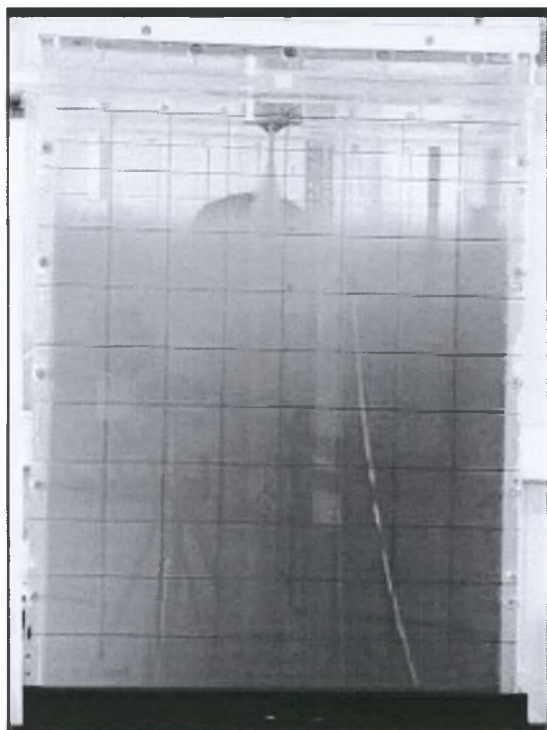
Φωτογραφία 2.23 $t=162\text{sec}$, $h=20\text{cm}$



Φωτογραφία 2.24 $t=230\text{sec}$, $h=15\text{cm}$



Φωτογραφία 2.25 $t=320\text{sec}$, $h=11\text{cm}$



Φωτογραφία 2.26 $t=365\text{sec}$, $h=10\text{cm}$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1 Πειράματα και Επεξεργασία.

Στους πίνακες Α.1 έως Α.51 που βρίσκονται στο παράτημα παρουσιάζονται όλα τα αρχικά δεδομένα των μετρήσεων. Ειδικότερα στους πίνακες Α.1 έως Α.31 τα στοιχεία για τα ακροφύσια με κυκλική διατομή και κατόπιν ακολουθούν, Α.32 έως Α.40 για το ακροφύσιο τριγωνικής διατομής, Α.40 έως Α.46 για το ακροφύσιο τετραγωνικής διατομής και Α.47 έως Α.51 για το ακροφύσιο ορθογωνικής διατομής.

Στους πίνακες 3.2 έως 3.5 που ακολουθούν παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Ειδικότερα στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται τα στοιχεία για τα ακροφύσια με κυκλική διατομή και οι πίνακες 3.3, 3.5 και 3.5 για τα ακροφύσια τριγωνικής, τετραγωνικής και ορθογωνικής διατομής αντίστοιχα.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τη λίστα με τις μεταβλητές που εμφανίζονται στους πίνακες.

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ	ΣΧΕΣΕΙΣ
D	Διάμετρος διατομής ή ισοδύναμη διάμετρος (cm)	$D = 4R$
A	Εμβαδόν διατομής (cm ²)	
P	Βρεχόμενη περίμετρος (cm)	
R	Υδραυλική ακτίνα (cm)	$R = A/P$
T _a	Θερμοκρασία νερού δοχείου (°C)	
F	Ένδειξη παροχής ροομέτρου	
Q	Παροχή φλέβας (cc/s)	Ροόμετρο 1 ^ο $Q = 17.632F + 0.2511$ Ροόμετρο 2 ^ο $Q = 17.87F + 1.3747$ Ροόμετρο 3 ^ο $Q = 17.128F + 3.7855$
W	Μέση ταχύτητα εξόδου της φλέβας από το ακροφύσιο (cm /s)	$W = \frac{4Q}{\pi D^2}$

ρ_a	Πυκνότητα νερού δοχείου	$\rho_o = -0.0047T^2 - 0.0149T + 1000.4$
ν	Κινηματικό ιξώδες ($T = 15 \div 65 \text{ }^\circ\text{C}$)	$\nu = 0.0225 - 0.0039 \times T^{0.3855} + (8 \times 10^{-7} \times T^2 - 3 \times 10^{-5} \times T + 10^{-4})$
ρ_o	Πυκνότητα εκτοξευόμενης φλέβας (Kg/m^3)	
M	ειδική ορμή (cm^4/s^2)	$M = QW$
B	Ανωστική δύναμη (cm^4/s^3)	$B = 981 \frac{\Delta\rho}{\rho_o} Q$
$\Delta\rho$	Διαφορά πυκνότητας	$\rho_o - \rho$
Re	Αριθμός Reynolds	$Re = \frac{WD_{eq}}{\nu}; D_{eq} = 4R = 4(A/P)$
l_Q	Χαρακτηριστική κλίμακα μήκους	$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}}$
l_M	Χαρακτηριστική κλίμακα μήκους	$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}}$
R_o	Αρχικός αριθμός Richardson	$R_o = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}} = \frac{l_Q}{l_M}$
t	Χρόνος (s)	
T	Κλίμακα χρόνου (s)	$T = \frac{M}{B}$
τ	Συνολικός χρόνος πλήρωσης της κύριας δεξαμενής (s)	$\tau = \frac{V}{Q}$
T_o	Χρόνος που χρειάζεται η φλέβα να φτάσει στον πυθμένα της κύριας δεξαμενής (s)	

Πίνακας 3.1 Σύμβολα-επεξηγήσεις-τύποι.

RUN	Date	T _a (°C)	D(cm)	F	Q (cc/s)	W (cm/s)	ρ _a	ρ _o	M (cm ⁴ /s ²)	B (cm ⁴ /s ³)	ν (cm ² /s)	Re	l _Q	l _M	R _o	T
Exp_#_1	14_07_05	26	0,50	0,35	6,42	32,71	996,84	1012	210,06	94,41	0,00867	1887	0,443	5,679	0,078	2,23
Exp_#_2		26	0,50	0,50	9,07	46,18	996,84	1012	418,70	133,29	0,00867	2664	0,443	8,017	0,055	3,14
Exp_#_3		26	0,50	0,25	4,66	23,73	996,84	1012	110,55	68,49	0,00867	1369	0,443	4,120	0,108	1,61
Exp_#_4		26	0,50	0,55	9,95	50,67	996,84	1012	504,08	146,25	0,00867	2923	0,443	8,797	0,050	3,45
Exp_#_5		26	0,50	1,50	28,18	143,52	996,84	1012	4044,30	414,24	0,00867	8280	0,443	24,917	0,018	9,76
Exp_#_6		26	0,50	0,65	12,99	66,16	996,84	1012	859,41	190,96	0,00867	3817	0,443	11,486	0,039	4,50
Exp_#_7		26	1,00	0,75	14,78	18,81	996,84	1012	278,03	217,23	0,00867	2171	0,886	4,620	0,192	1,28
Exp_#_8		26	1,00	0,50	10,31	13,13	996,84	1012	135,33	151,55	0,00867	1515	0,886	3,223	0,275	0,89
Exp_#_9	15_07_05	25	1,00	0,55	9,95	12,67	997,09	1013	126,02	153,28	0,00886	1429	0,886	3,038	0,292	0,82
Exp_#_10		25	1,00	0,45	8,19	10,42	997,09	1013	85,31	126,12	0,00886	1176	0,886	2,500	0,355	0,68
Exp_#_11		25	1,00	0,35	6,42	8,18	997,09	1013	52,52	98,95	0,00886	923	0,886	1,961	0,452	0,53
Exp_#_12		25	1,00	0,30	5,54	7,05	997,09	1013	39,09	85,37	0,00886	796	0,886	1,692	0,524	0,46
Exp_#_13		26	1,00	0,25	4,66	5,93	996,84	1013	27,64	72,93	0,00867	684	0,886	1,411	0,628	0,38
Exp_#_14		27	1,00	0,20	3,78	4,81	996,57	1013	18,17	60,10	0,00848	567	0,886	1,135	0,781	0,30
Exp_#_15		27	1,50	0,55	9,95	5,63	996,57	1013	56,01	158,28	0,00848	996	1,329	1,627	0,817	0,35
Exp_#_16		27	1,50	0,45	8,19	4,63	996,57	1013	37,92	130,23	0,00848	820	1,329	1,339	0,993	0,29
Exp_#_17	16_07_05	25	0,30	0,60	12,10	171,13	997,09	1021	2070,15	277,90	0,00886	5794	0,266	18,410	0,014	7,45
Exp_#_18		26	0,30	0,80	15,67	221,70	996,84	1021	3474,12	363,84	0,00867	7674	0,266	23,723	0,011	9,55
Exp_#_19		26	0,30	0,50	9,07	128,27	996,84	1021	1163,07	210,52	0,00867	4440	0,266	13,726	0,019	5,52
Exp_#_20		27	0,30	0,30	5,54	78,38	996,57	1021	434,31	130,05	0,00848	2774	0,266	8,342	0,032	3,34
Exp_#_21		27	0,30	0,20	3,78	53,44	996,57	1021	201,87	88,66	0,00848	1891	0,266	5,688	0,047	2,28
Exp_#_22		27	0,50	0,55	9,95	50,67	996,57	1021	504,08	233,51	0,00848	2988	0,443	6,962	0,064	2,16
Exp_#_23		27	0,50	0,45	8,19	41,69	996,57	1021	341,24	192,13	0,00848	2459	0,443	5,728	0,077	1,78
Exp_#_24		27	0,50	0,40	7,30	37,20	996,57	1021	271,69	171,43	0,00848	2194	0,443	5,111	0,087	1,58
Exp_#_25		27	0,50	0,35	6,42	32,71	996,57	1021	210,06	150,74	0,00848	1929	0,443	4,494	0,099	1,39
Exp_#_26		27	0,50	0,90	16,12	82,10	996,57	1021	1323,41	378,36	0,00848	4842	0,443	11,280	0,039	3,50
Exp_#_27	17_07_05	26	1,00	0,45	8,19	10,42	996,84	1020	85,31	182,36	0,00867	1203	0,886	2,079	0,426	0,47
Exp_#_28		27	1,00	0,35	6,42	8,18	996,57	1020	52,52	144,71	0,00848	964	0,886	1,622	0,546	0,36
Exp_#_29		27	1,00	0,30	5,54	7,05	996,57	1020	39,09	124,85	0,00848	832	0,886	1,399	0,633	0,31
Exp_#_30		27	1,00	0,25	4,66	5,93	996,57	1020	27,64	104,98	0,00848	700	0,886	1,176	0,753	0,26
Exp_#_31		27	1,00	0,20	3,78	4,81	996,57	1020	18,17	85,12	0,00848	567	0,886	0,954	0,929	0,21

Πίνακας 3.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με κυκλικές διατομές.

τ	h/l_M	$t(s)$	t/T	t/τ	RUN
12955	9,16	14	6,3	0,0011	Exp_#_1
9176	6,49	8	2,5	0,0009	Exp_#_2
17858	12,62	20	12,4	0,0011	Exp_#_3
8363	5,91	13	3,8	0,0016	Exp_#_4
2952	2,09	5	0,5	0,0017	Exp_#_5
6405	4,53	9	2,0	0,0014	Exp_#_6
5630	11,26	12	9,4	0,0021	Exp_#_7
8070	16,13	17	19,0	0,0021	Exp_#_8
8363	17,12	14	17,0	0,0017	Exp_#_9
10164	20,80	16	23,7	0,0016	Exp_#_10
12955	26,52	20	37,7	0,0015	Exp_#_11
15016	30,73	23	50,2	0,0015	Exp_#_12
17858	36,84	20	52,8	0,0011	Exp_#_13
22025	45,81	20	66,2	0,0009	Exp_#_14
8363	31,95	16	45,2	0,0019	Exp_#_15
10164	38,84	20	68,7	0,0020	Exp_#_16
6878	2,82	6	0,8	0,0009	Exp_#_17
5309	2,19	5	0,5	0,0009	Exp_#_18
9176	3,79	8	1,4	0,0009	Exp_#_19
15016	6,23	11	3,3	0,0007	Exp_#_20
22025	9,14	13	5,7	0,0006	Exp_#_21
8363	7,47	10	4,6	0,0012	Exp_#_22
10164	9,08	10	5,6	0,0010	Exp_#_23
11391	10,17	11	6,9	0,0010	Exp_#_24
12955	11,57	12	8,6	0,0009	Exp_#_25
5161	4,61	6	1,7	0,0012	Exp_#_26
10164	25,02	9,5	20,3	0,0009	Exp_#_27
12955	32,07	17	46,8	0,0013	Exp_#_28
15016	37,17	16	51,1	0,0011	Exp_#_29
17858	44,20	19	72,2	0,0011	Exp_#_30
22025	54,52	19	89,0	0,0009	Exp_#_31

Πίνακας 3.2 (συνέχεια) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με κυκλικές διατομές.

RUN	Date	T _a (°C)	D(cm)	F	Q (cc/s)	W (cm/s)	ρ _a	ρ _o	M (cm ⁴ /s ²)	B (cm ⁴ /s ³)	v (cm ² /s)	Re	l _Q	l _M	R _o	T
Exp_#_32	21_07_05	27	0,8986	0,5	9,0671	10,09	996,571	1010	91,489	118,262	0,00848	1069	0,948	2,720	0,348	0,77
Exp_#_33	21_07_06	28	0,8986	0,35	6,4223	7,15	996,298	1010	45,900	85,472	0,00830	774	0,948	1,907	0,497	0,54
Exp_#_34	21_07_07	28	0,8986	0,25	4,6591	5,18	996,298	1010	24,157	62,006	0,00830	562	0,948	1,384	0,685	0,39
Exp_#_35	21_07_08	28	0,8986	0,2	3,7775	4,20	996,298	1010	15,880	50,273	0,00830	455	0,948	1,122	0,845	0,32
Exp_#_36	21_07_09	28	0,8986	1,1	21,0317	23,40	996,298	1010	492,246	279,902	0,00830	2535	0,948	6,246	0,152	1,76
Exp_#_37	21_07_10	28	0,8986	2	38,0415	42,33	996,298	1010	1610,456	506,278	0,00830	4585	0,948	11,298	0,084	3,18
Exp_#_38	21_07_11	28	0,8986	3	55,1695	61,39	996,298	1010	3387,129	734,227	0,00830	6650	0,948	16,385	0,058	4,61
Exp_#_39	21_07_12	28	0,8986	4	72,2975	80,46	996,298	1010	5816,747	962,177	0,00830	8715	0,948	21,473	0,044	6,05

Πίνακας 3.3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με τριγωνική διατομή.

τ	h/l _M	t(s)	t/T	t/τ	RUN	Δισοδύναμο
9176	19,12	14	18,1	0,0015	Exp_#_32	1,0232
12955	27,26	17	31,7	0,0013	Exp_#_33	
17858	37,58	17	43,6	0,0010	Exp_#_34	
22025	46,35	27	85,5	0,0012	Exp_#_35	
3956	8,32	11	6,3	0,0028	Exp_#_36	
2187	4,60	8	2,5	0,0037	Exp_#_37	
1508	3,17	5	1,1	0,0033	Exp_#_38	
1151	2,42	4	0,7	0,0035	Exp_#_39	

Πίνακας 3.3 (συνέχεια) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με τριγωνική διατομή.

RUN	Date	T _a (°C)	D(cm)	F	Q (cc/s)	W (cm/s)	ρ _a	ρ _o	M (cm ⁴ /s ²)	B (cm ⁴ /s ³)	ν (cm ² /s)	Re	l _Q	l _M	R _o	T
Exp_#_40	21_07_05	28	0,9227	3	55,1695	59,79	996,298	1012	3298,660	839,7355	0,00830	6650	0,961	15,020	0,06395	3,93
Exp_#_41	21_07_06	28	0,9227	1	19,2447	20,86	996,298	1012	401,386	292,9238	0,00830	2320	0,961	5,240	0,18333	1,37
Exp_#_42	21_07_07	28	0,9227	0,5	9,0671	9,83	996,298	1012	89,100	138,0104	0,00830	1093	0,961	2,469	0,38911	0,65
Exp_#_43	21_07_08	28	0,9227	0,35	6,4223	6,96	996,298	1012	44,701	97,7539	0,00830	774	0,961	1,749	0,54936	0,46
Exp_#_44	21_07_09	28	0,9227	0,25	4,6591	5,05	996,298	1012	23,526	70,9162	0,00830	562	0,961	1,268	0,75726	0,33
Exp_#_45	21_07_10	28	0,9227	0,2	3,7775	4,09	996,298	1012	15,465	57,4974	0,00830	455	0,961	1,028	0,93400	0,27

Πίνακας 3.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με τετραγωνική διατομή.

τ	h/l _M	t(s)	t/T	t/τ	RUN	Δισοδύναμο
1508	3,46	14	3,6	0,0093	Exp_#_40	1,0592
4323	9,92	17	12,4	0,0039	Exp_#_41	
9176	21,06	17	26,3	0,0019	Exp_#_42	
12955	29,74	27	59,0	0,0021	Exp_#_43	
17858	40,99	11	33,2	0,0006	Exp_#_44	
22025	50,56	8	29,7	0,0004	Exp_#_45	

Πίνακας 3.4 (συνέχεια) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με τετραγωνική διατομή.

RUN	Date	T _a (°C)	D(cm)	F	Q (cc/s)	W (cm/s)	ρ _a	ρ _o	M (cm ⁴ /s ²)	B (cm ⁴ /s ³)	v (cm ² /s)	Re	I _Q	I _M	R _o	T
Exp # 46	21 07 05	28	1,1709	1	19,24	16,44	996,298	1022	316,30	474,78	0,0083	2320	1,082	3,442	0,314	0,67
Exp # 47	21 07 06	28	1,1709	0,55	9,95	8,50	996,298	1022	84,53	245,44	0,0083	1199	1,082	1,779	0,608	0,34
Exp # 48	21 07 07	28	1,1709	0,4	7,30	6,24	996,298	1022	45,56	180,19	0,0083	880	1,082	1,306	0,828	0,25
Exp # 49	21 07 08	28	1,1709	0,3	5,54	4,73	996,298	1022	26,22	136,69	0,0083	668	1,082	0,991	1,092	0,19
Exp # 50	21 07 09	28	1,1709	3	55,17	47,12	996,298	1022	2599,43	1361,08	0,0083	6650	1,082	9,868	0,110	1,91
Exp # 51	21 07 10	28	1,1709	4	72,30	61,75	996,298	1022	4464,03	1783,64	0,0083	8715	1,082	12,931	0,084	2,50

Πίνακας 3.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με ορθογωνική διατομή.

τ	h/I _M	t(s)	t/T	t/τ	RUN	Δισοδύναμο
4323	15,11	14	21,0	0,0032	Exp_#_46	1,108
8363	29,22	17	49,4	0,0020	Exp_#_47	
11391	39,80	17	67,2	0,0015	Exp_#_48	
15016	52,47	27	140,8	0,0018	Exp_#_49	
1508	5,27	11	5,8	0,0073	Exp_#_50	
1151	4,02	8	3,2	0,0070	Exp_#_51	

Πίνακας 3.5 (συνέχεια) Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων με ορθογωνική διατομή.

Η βασική δομή όλων των πινάκων είναι η ίδια. Στην πρώτη στήλη αριστερά αναγράφεται ο αύξων αριθμός του κάθε πειράματος και ακολουθεί η ημερομηνία διεξαγωγής του. Στην τρίτη στήλη βρίσκονται η θερμοκρασία σε βαθμούς κελσίου (T°C). Στην τέταρτη στήλη αναγράφεται η διάμετρος του jet (D σε cm) για τις κυκλικές διαμέτρους ενώ το για τις υπόλοιπες διατομές αναγράφεται το εμβαδόν A (σε cm²). Στην πέμπτη στήλη αναγράφεται η ένδειξη του ροομέτρου (indic F σε l/min) που χρησιμοποιείται κάθε φορά και ακολουθεί η υπολογισμένη παροχή Q (cc/s) βάσει της εξίσωσης που προκύπτει από τη ρύθμιση του ροομέτρου και αντιστοιχεί στην εξίσωση του ροομέτρου που χρησιμοποιείται κάθε φορά.

1ο Ροόμετρο:

$$Q = 17.632F + 0.2511 \quad (3-1)$$

2ο Ροόμετρο:

$$Q = 17.87F + 1.3747 \quad (3-2)$$

3ο Ροόμετρο :

$$Q = 17.128F + 3.7855 \quad (3-3)$$

Στην έβδομη στήλη υπολογίζεται η μέση ταχύτητα εξόδου της φλέβας από το ακροφύσιο W (cc/s) βάσει της σχέσης 3-6:

$$W = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (3-4)$$

Στις δυο επόμενες στήλες αναγράφεται η πυκνότητα της κύριας και της δευτερεύουσας δεξαμενής αντίστοιχα. Η τιμή της πυκνότητας του καθαρού νερού της κύριας δεξαμενής (rho-amb) καθώς και η τιμή του κινηματικού ιξώδους υπολογίζονται συναρτήσει της θερμοκρασίας από τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{\text{υδατος}} = -0.0047T^2 - 0.0149T + 1000.4 \quad (3-5)$$

$$\nu = 0.0225 - 0.0039 \times T^{0.3855} + (8 \times 10^{-7} \times T^2 - 3 \times 10^{-5} \times T + 10^{-4}) \quad (3-6)$$

η οποία ισχύει για T από 15-65 °C

Στη στήλη εννιά βρίσκεται η πυκνότητα του υγρού της φλέβας (rho-jet) αντίστοιχα, που έχει μετρηθεί με πυκνόμετρο.

Στις στήλες που ακολουθούν υπολογίζονται η ειδική ορμή M (cm⁴/s²) και η ανωστική δύναμη B (cm⁴/s³) από τις σχέσεις:

$$M = QW \quad (3-7)$$

$$B = 981 \frac{\Delta \rho}{\rho_o} Q \quad (3-8)$$

αντίστοιχα. Όπου Δρ η διαφορά αλατότητας (Kg/m³) της δευτερεύουσας από την κύρια δεξαμενή (ρ_ο).

Στη συνέχεια υπολογίζονται ο αριθμός Reynolds

$$Re = \frac{WD_{eq}}{\nu}; D_{eq} = 4R = 4(A/P) \quad (3-9)$$

και στις δύο επόμενες στήλες υπολογίζονται η χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους l_Q και l_M ,

$$l_Q = \frac{Q}{\sqrt{M}} \quad (3-10)$$

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (3-11)$$

Στην επόμενη στήλη υπολογίζεται ο αρχικός αριθμός Richardson από τη σχέση

$$Ri = \frac{QB^{1/2}}{M^{5/4}} = \frac{l_Q}{l_M} \quad (3-12)$$

Στην 17^η στήλη αυτού του πίνακα βρίσκεται μία κλίμακα χρόνου T βάσει της σχέσης :

$$T = \frac{M}{B} \quad (3-13)$$

Στη συνέχεια των πινάκων υπολογίζονται τα τ , το οποίο υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\tau = \frac{\nabla}{Q} \quad (3-14)$$

Στο τέλος υπολογίζονται τα H/l_M , t/T και t/τ . Στα τριγωνικά, τετραγωνικά και ορθογωνικά ακροφύσια χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς, όπου χρειάζεται, η ισοδύναμη διάμετρος, η οποία υπολογίζεται στο τέλος των παραπάνω πινάκων βάσει των σχέσεων :

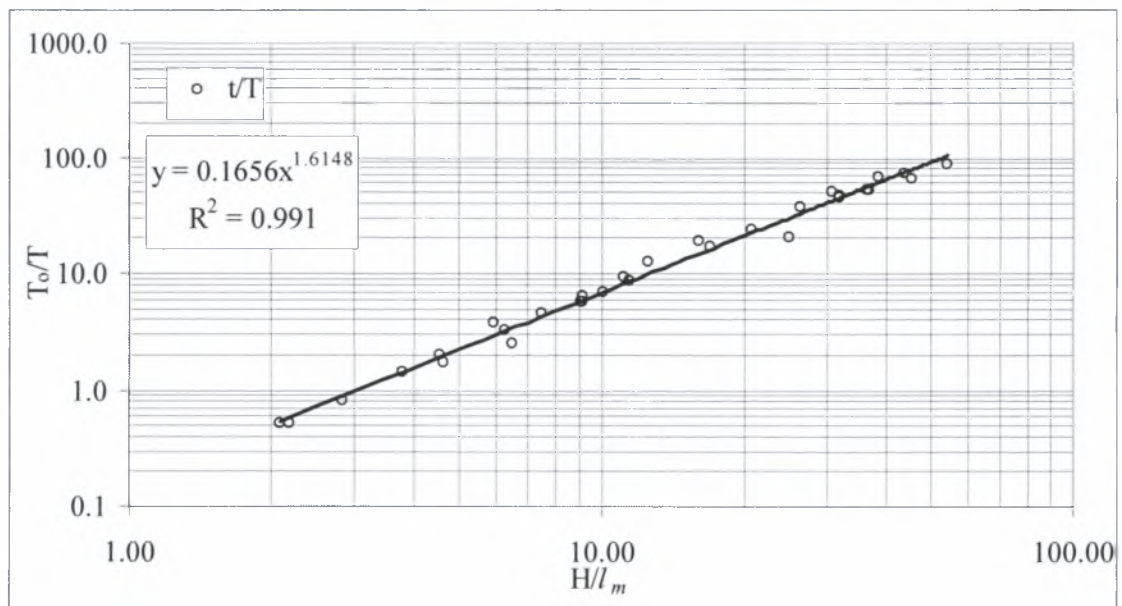
$$D = 4R \quad (3-15)$$

και

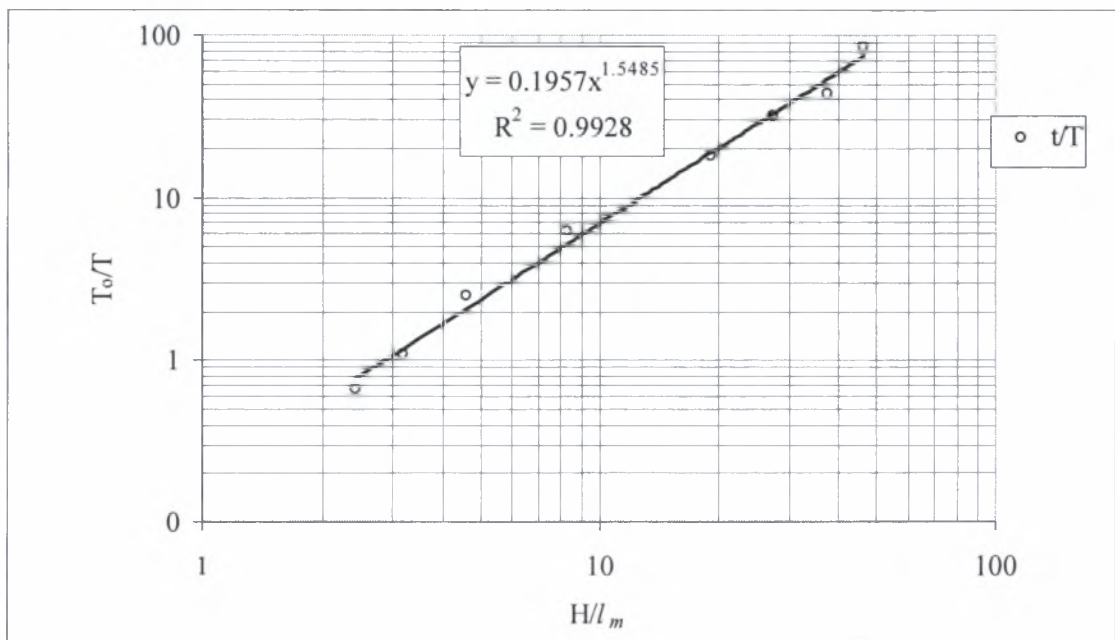
$$R = \frac{A}{P} \quad (3-16)$$

όπου R η υδραυλική ακτίνα, A το εμβαδόν της μη κυκλικής διατομής και P η βρεχόμενη περίμετρος.

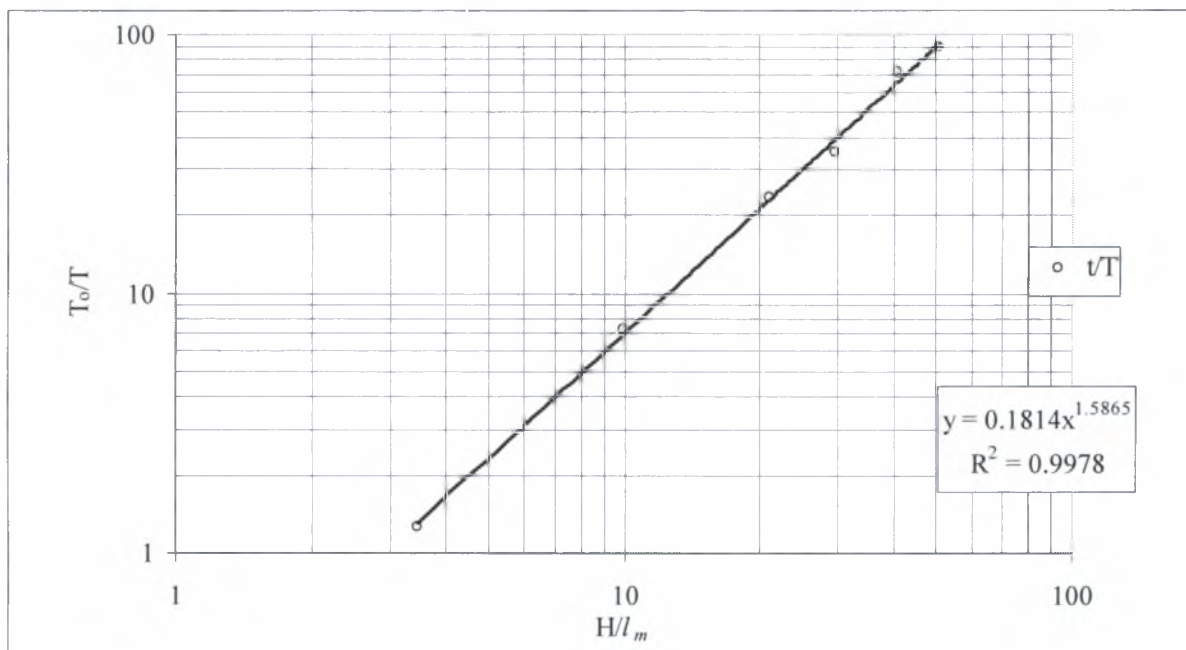
Στη συνέχεια παραθέτουμε τα διαγράμματα t/T ($=T_0/T$) και H/l_M σε λογαριθμική κλίμακα για όλες τις κατηγορίες των ακροφυσίων του πειράματος. Παρατηρούμε πως η σχέση που συνδέει το χρόνο με το ύψος της διεπιφάνειας είναι γραμμική σε κάθε περίπτωση.



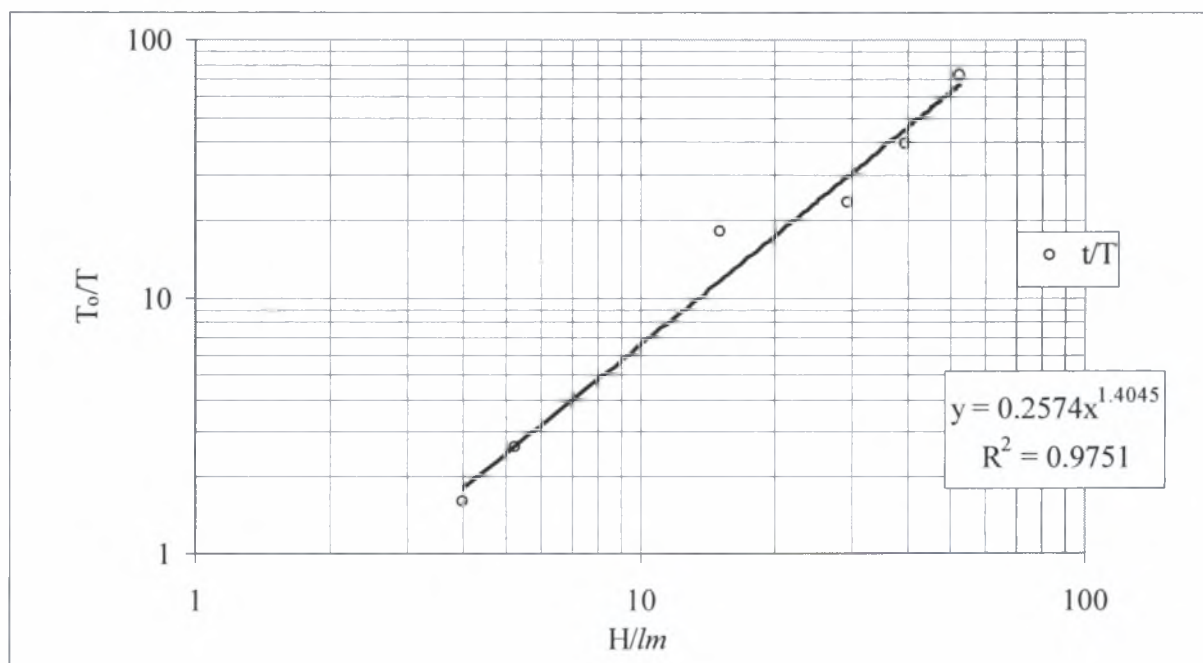
Διάγραμμα 3.1 Αδιάστατος χρόνος T_0/T , ($T=M/B$) επαφής της φλέβας με τον πυθμένα, σαν συνάρτηση του ενεργού αδιάστατου βάθους δοχείου H/l_M για κυκλικά ακροφύσια.



Διάγραμμα 3.2 Αδιάστατος χρόνος T_0/T , ($T=M/B$) επαφής της φλέβας με τον πυθμένα, σαν συνάρτηση του ενεργού αδιάστατου βάθους δοχείου H/l_M για τριγωνικό ακροφύσιο.



Διάγραμμα 3.3 Αδιάστατος χρόνος T_0/T , ($T=M/B$) επαφής της φλέβας με τον πυθμένα, σαν συνάρτηση του ενεργού αδιάστατου βάθους δοχείου H/l_M για τετραγωνικό ακροφύσιο.



Διάγραμμα 3.4 Αδιάστατος χρόνος T_0/T , ($T=M/B$) επαφής της φλέβας με τον πυθμένα, σαν συνάρτηση του ενεργού αδιάστατου βάθους δοχείου H/l_M για ορθογωνικό ακροφύσιο.

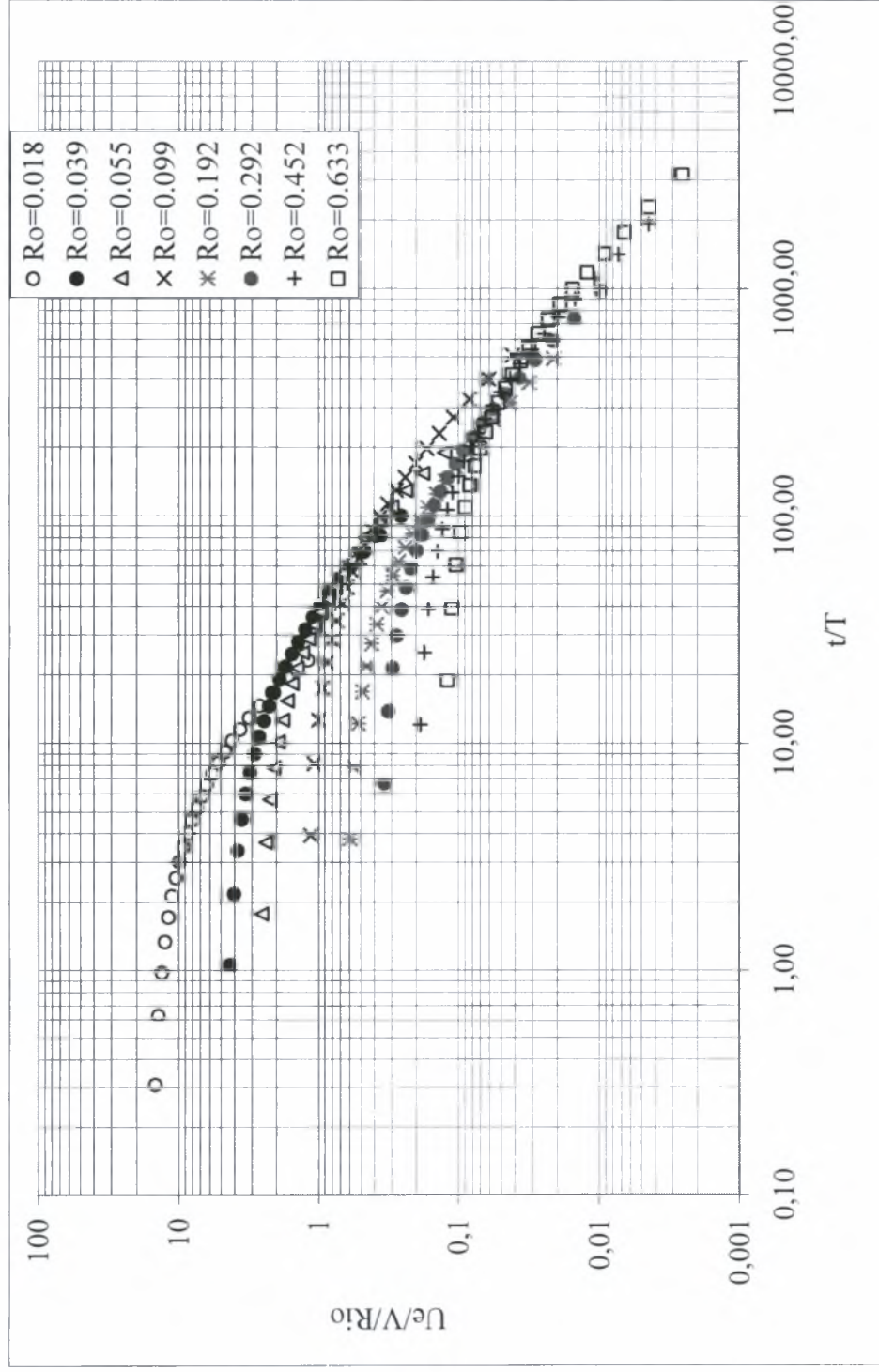
Παρουσιάζουμε παρακάτω τον συγκεντρωτικό πίνακα 3.6 με τις εξισώσεις που περιγράφουν την αδιαστατοποιημένης απόσταση H/l_M της διεπιφάνειας από τον κάθε τύπο ακροφυσίου σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), όπου y ο χρόνος και x το ύψος της διεπιφάνειας.

Τριγωνικές φλέβες	$y = 0.1957 \cdot x^{1.5485}$
Τετραγωνικές φλέβες	$y = 0.1814 \cdot x^{1.5865}$
Ορθογωνικές φλέβες	$y = 0.2574 \cdot x^{1.4045}$
Κυκλικές φλέβες	$y = 0.1656 \cdot x^{1.6148}$

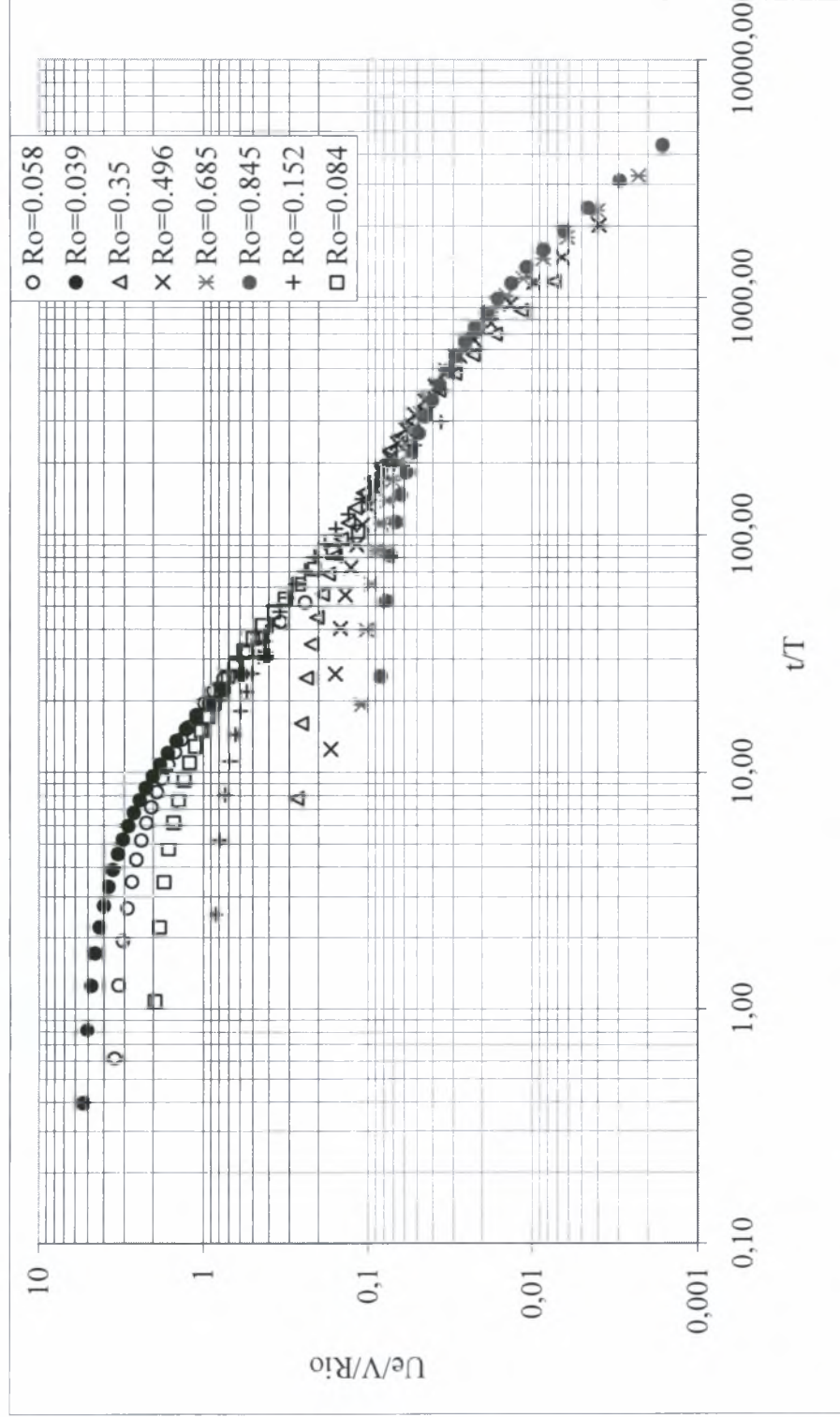
Πίνακας 3.6 Σχέσεις T_o/T - H/l_M .

Στη συνέχεια με τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου του πειράματος έγινε προσπάθεια να γίνει συσχετισμός μεταξύ της αδιάστατης ταχύτητας ανόδου της διεπιφάνειας και του αδιάστατου χρόνου. Έτσι προέκυψαν τα διαγράμματα.3.5 ως 3.8.

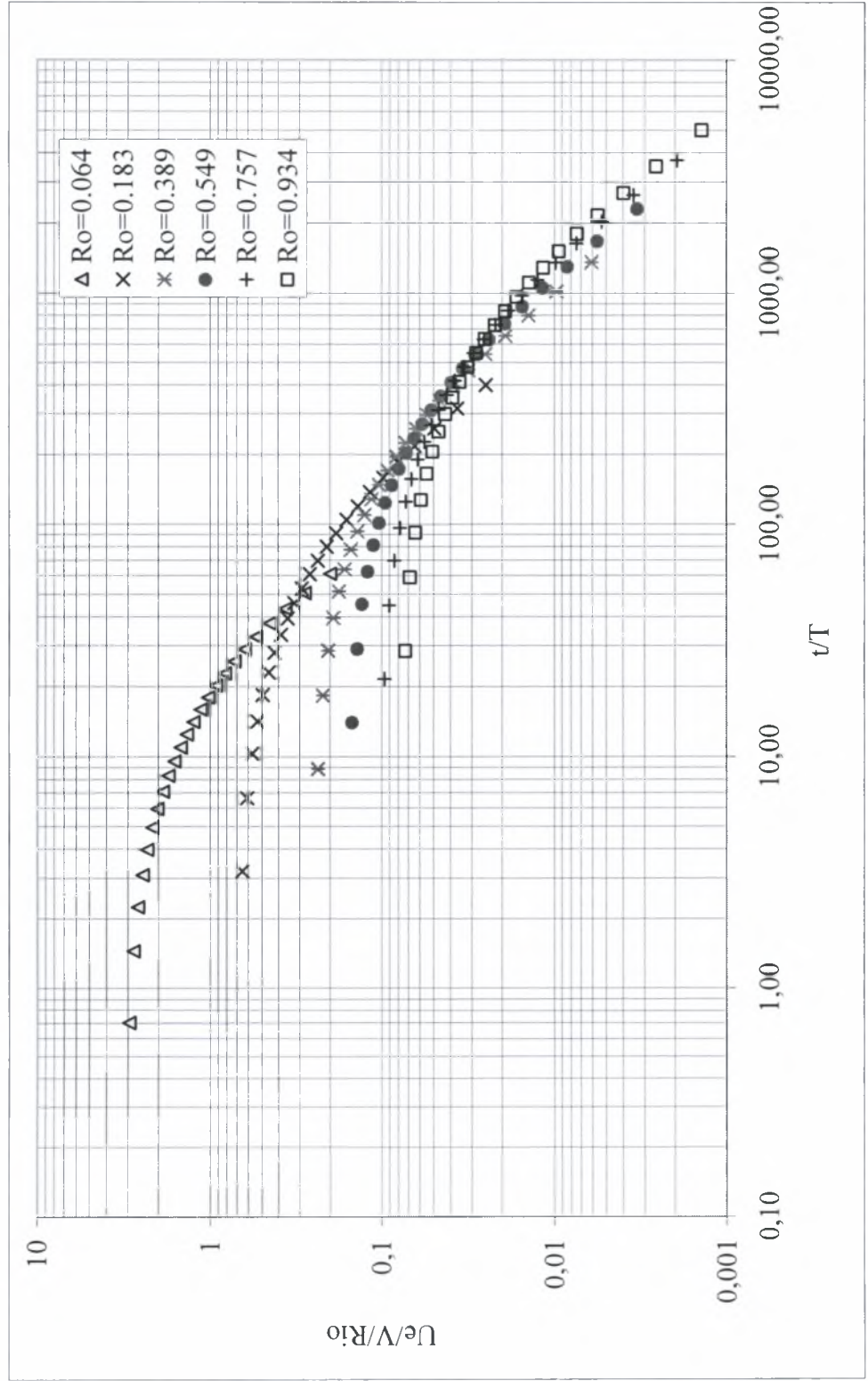
Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_c/(VR_o)$ όπου $V = B^{1/2}/M^{1/4}$ είναι μια κλίμακα ταχύτητας που βασίζεται στις αρχικές παραμέτρους της φλέβας, σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.018 έως 0.633 (περίπου αριθμός Richardson ενός πλουμίου). Στη συνέχεια παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τριγωνική, τετραγωνική και ορθογωνική διατομή ακροφυσίου. Παρατηρούμε ότι όσο μικρότερος είναι ο αρχικός αριθμός του Richardson της ροής τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας (jet), ενώ συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο στην περίπτωση του πλουμίου. Επίσης, για μεγάλους αδιάστατους χρόνους η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό (έχει ασυμπτωτικά την ίδια κλίση στο λογαριθμικό διάγραμμα) για όλους τους αρχικούς αριθμούς Richardson της ροής.



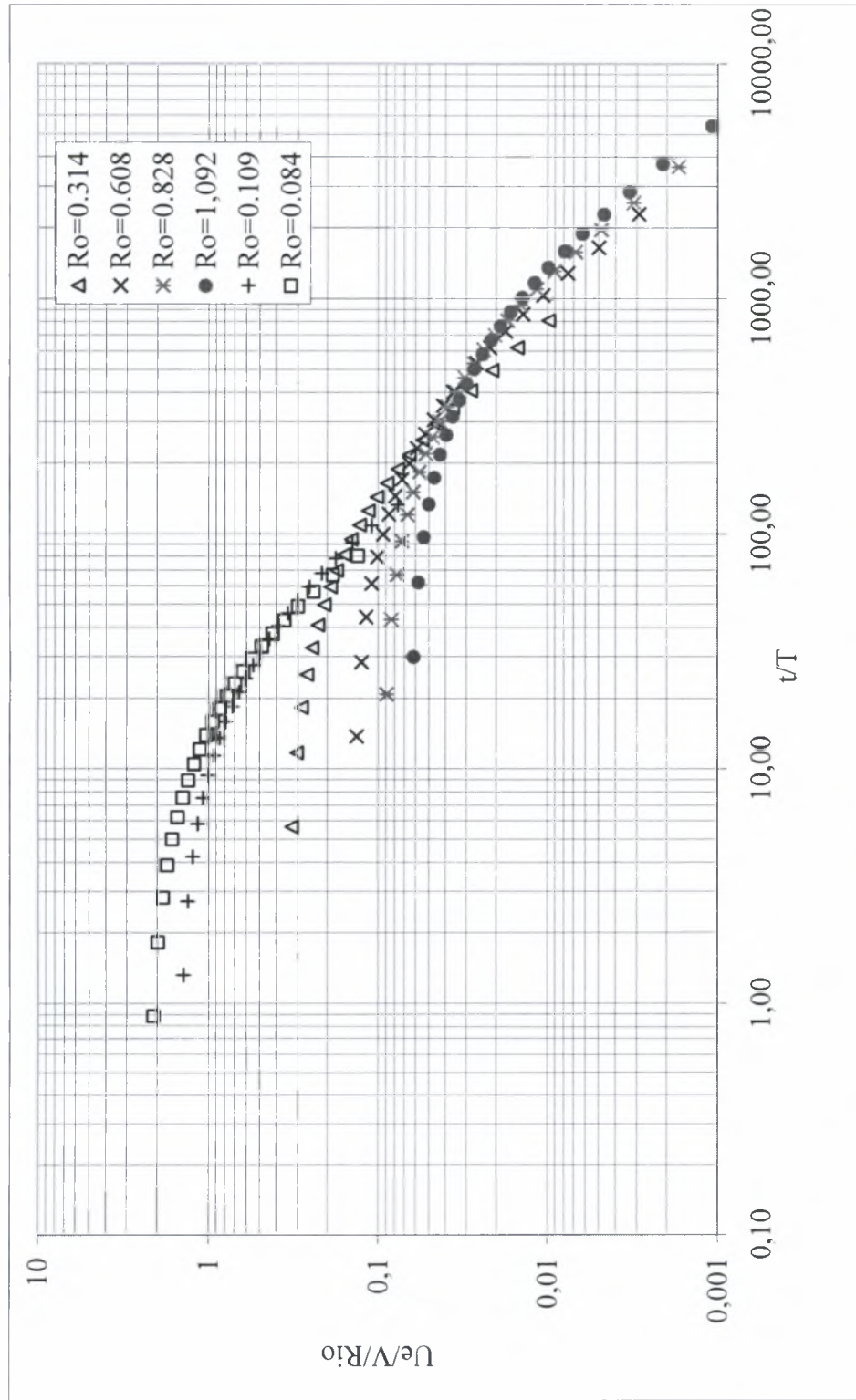
Διάγραμμα 3.5 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.018 έως 0.633 (κυκλικές διατομές).



Διάγραμμα 3.6 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.039 έως 0.845 (τριγωνική διατομή).

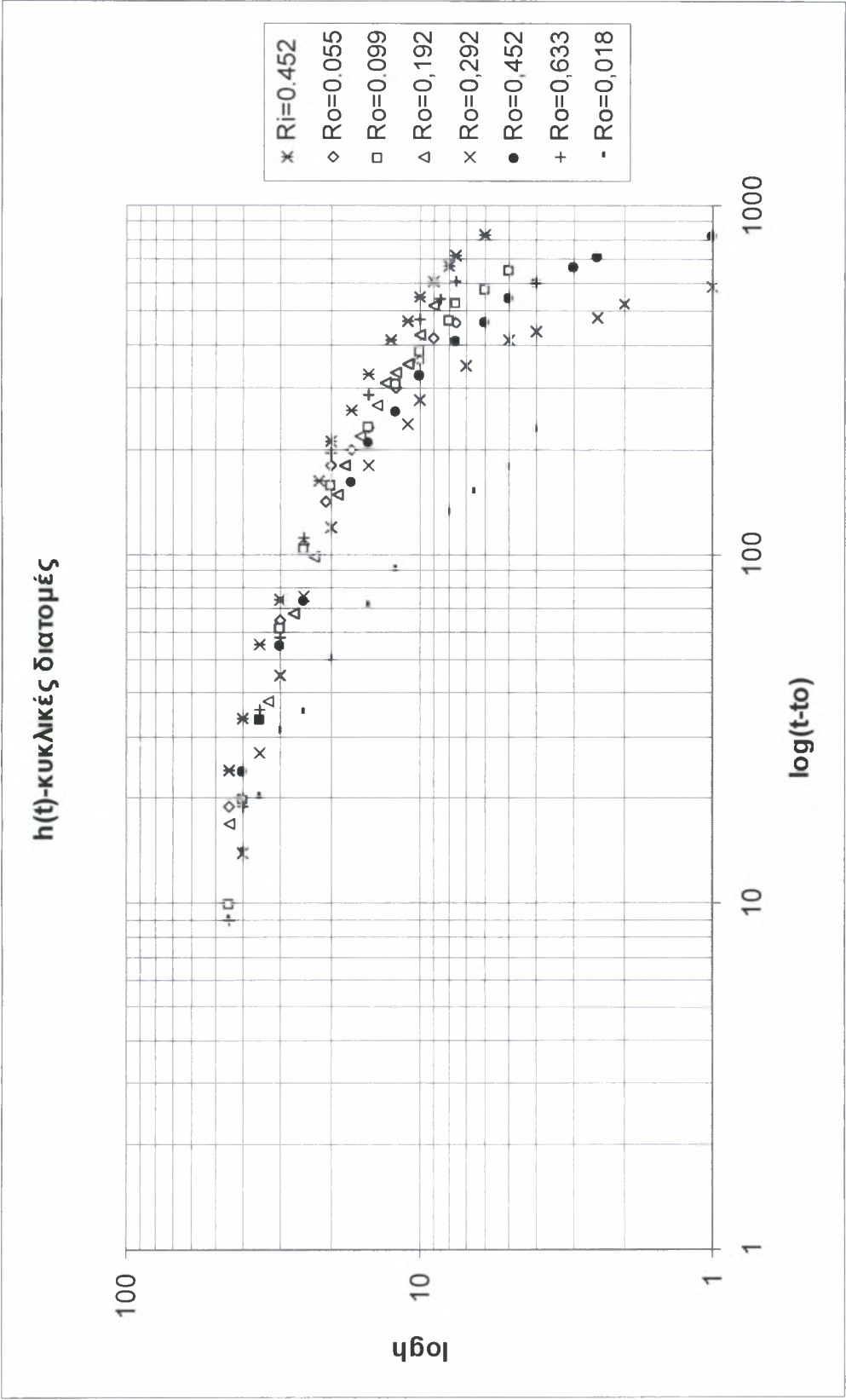


Διάγραμμα 3.7 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.064 έως 0.934 (τετραγωνικής διατομής).

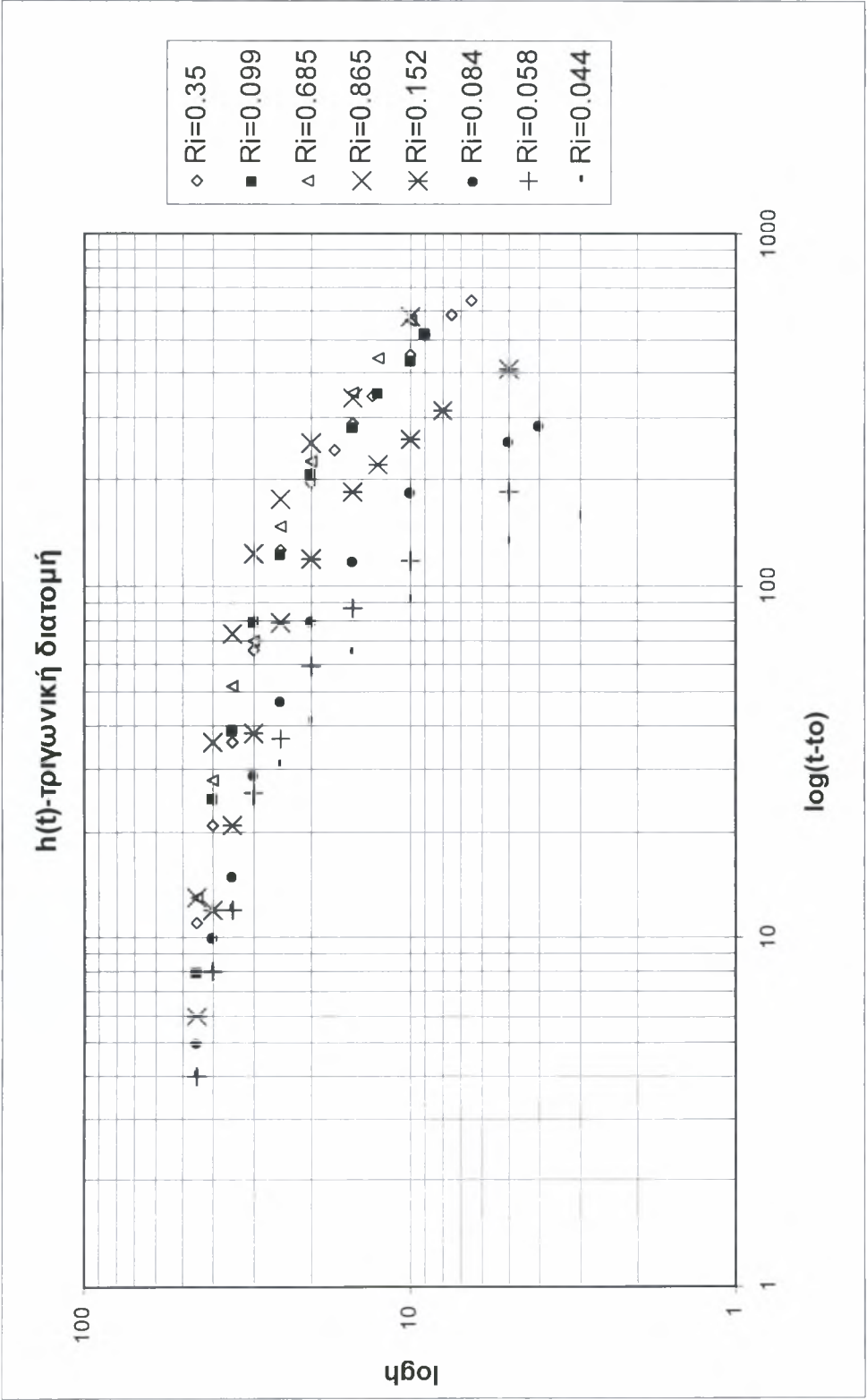


Διάγραμμα 3.8 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.084 έως 1.092 (ορθογωνικής διατομής)

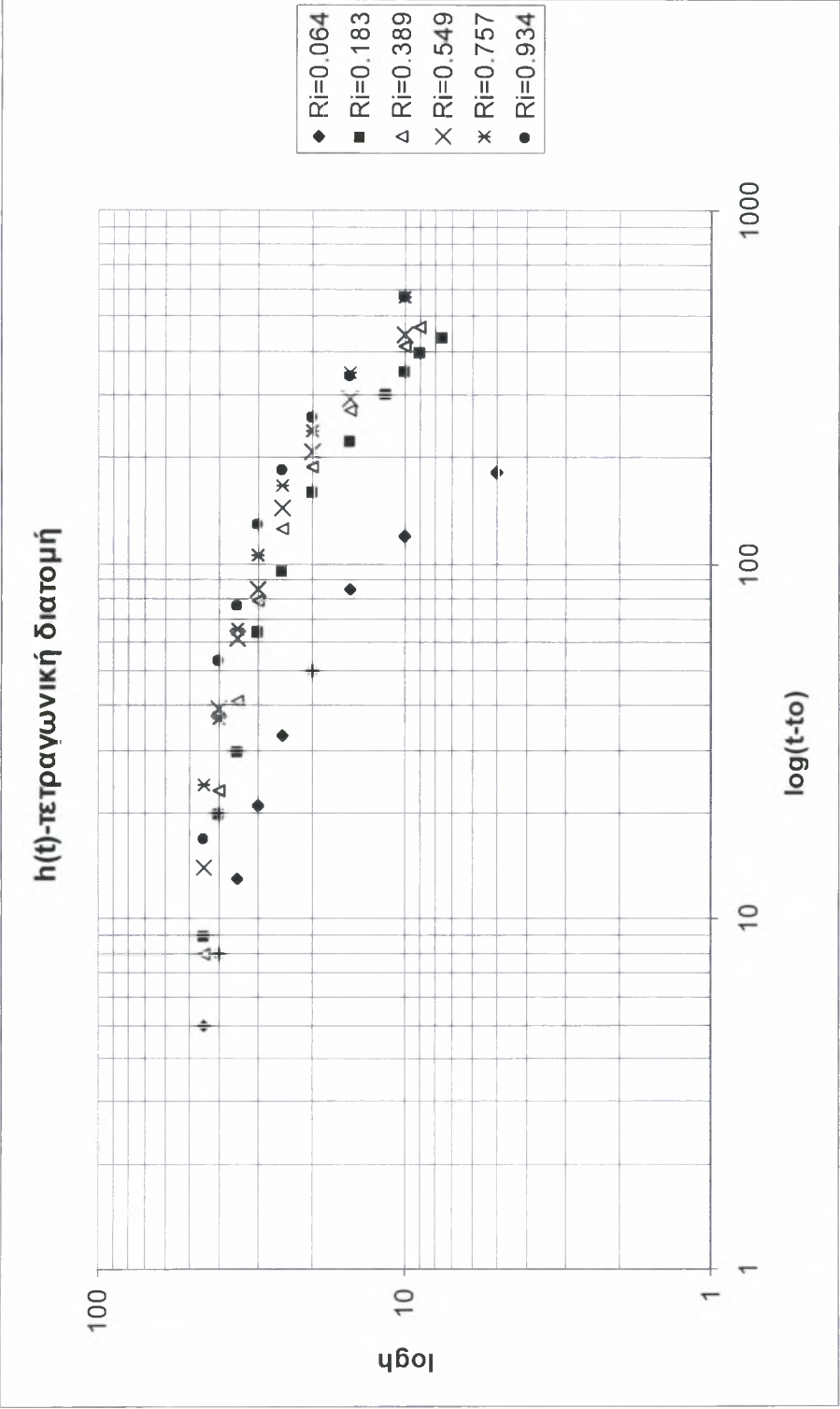
Ακολούθως, με την επεξεργασία των δεδομένων του πειράματος έγινε προσπάθεια να συσχετιστεί το ύψος της διεπιφάνειας h με τον καθαρό χρόνο $t-t_0$ για κάθε πείραμα και να προσδιοριστεί μία εξίσωση κάθε φορά που θα μας δίνει το ύψος της διεπιφάνειας σε κάθε χρόνο. Έτσι προέκυψαν επίσης και τα διαγράμματα 3.9 ως 3.12.



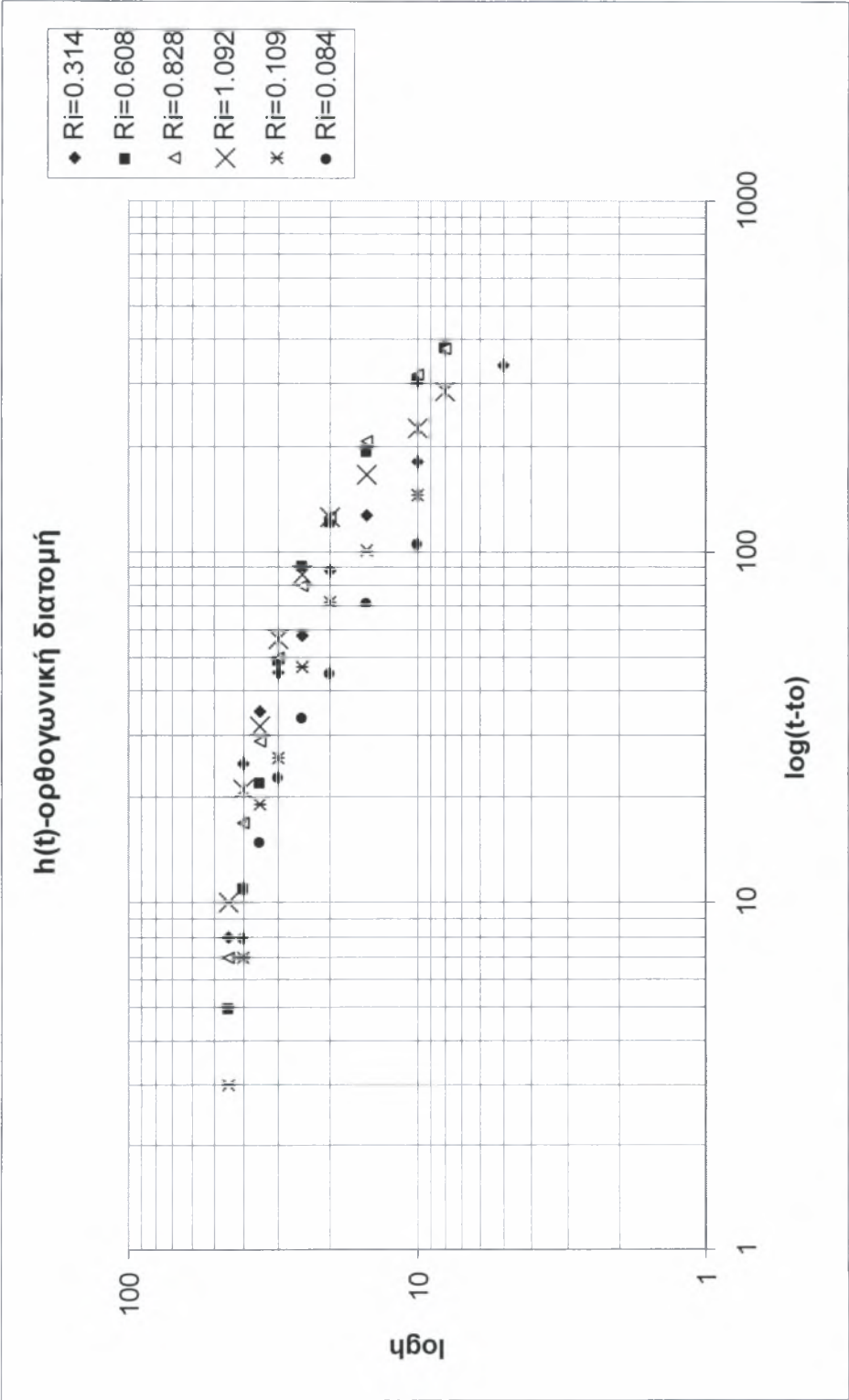
Διάγραμμα 3.9 Το ύψος της διεπιφάνειας h σε σχέση με τον καθαρό χρόνο $t-t_0$ για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.018 έως 0.633 (κυκλικές διατομές).



Διάγραμμα 3.10 Το ύψος της διεπιφάνειας h σε σχέση με τον καθαρό χρόνο t-t₀ για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.058 έως 0.865 (τριγωνική διατομή).



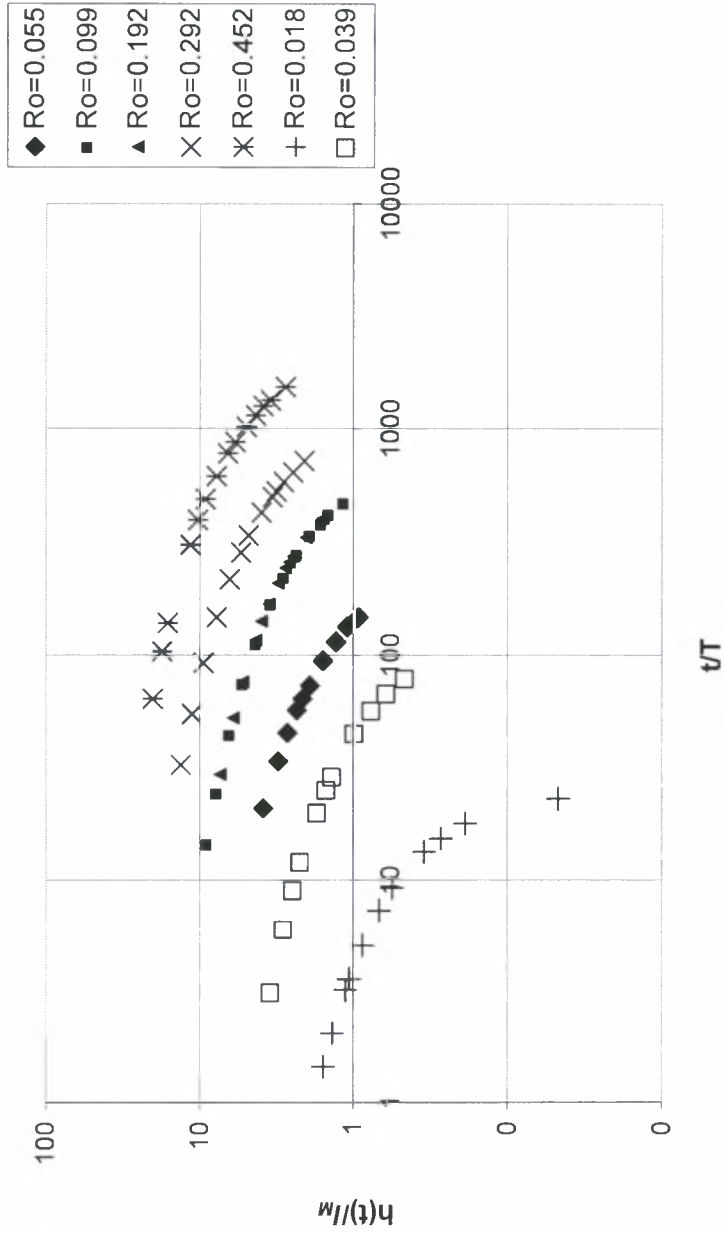
Διάγραμμα 3.11 Το ύψος της διεπιφάνειας h σε σχέση με τον καθαρό χρόνο $t-t_0$ για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.064 έως 0.934 (τετραγωνική διατομή).



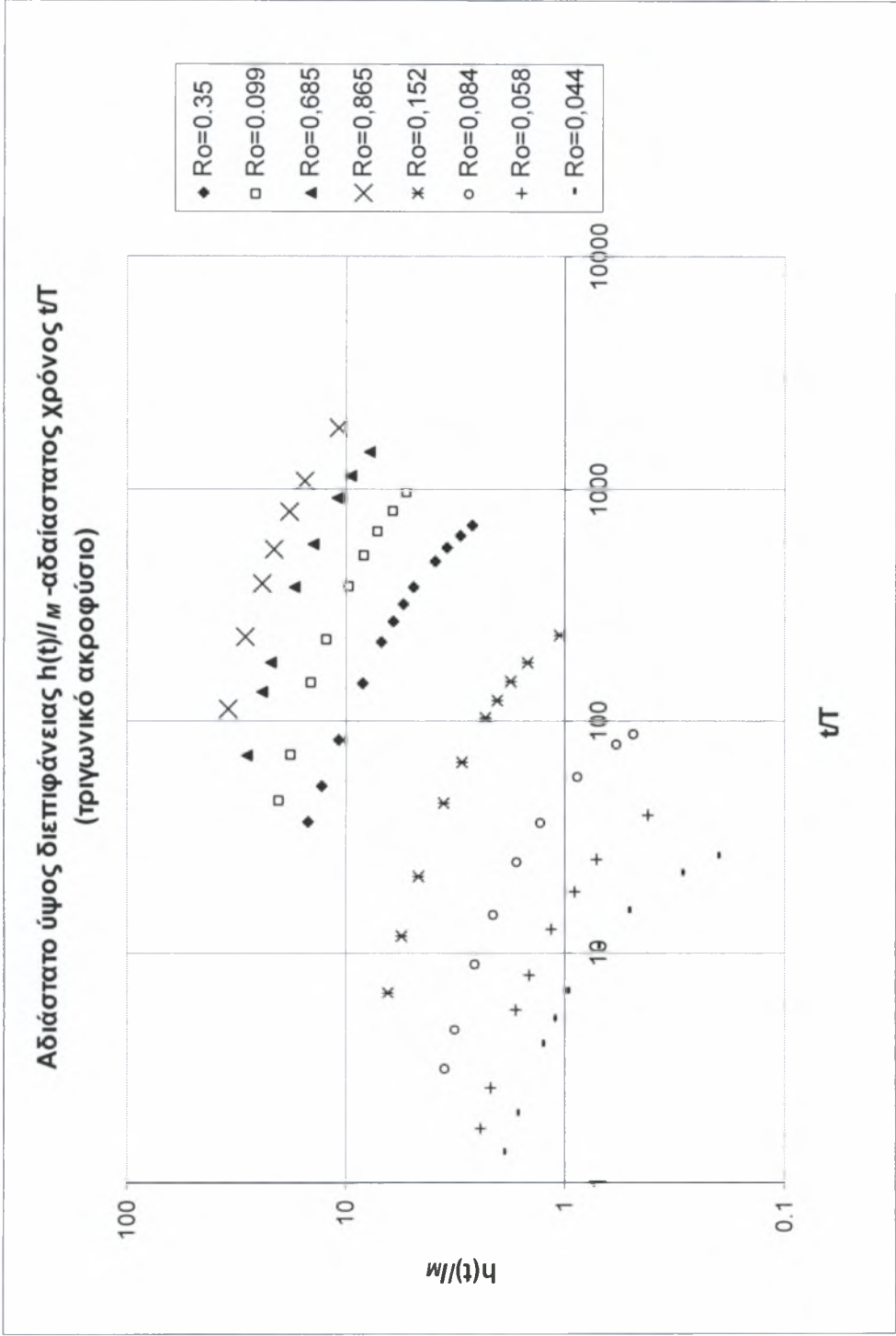
Διάγραμμα 3.12 Το ύψος της διεπιφάνειας h σε σχέση με τον καθαρό χρόνο $t-t_0$ για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.084 έως 1.092 (ορθογωνική διατομή).

Από τα διαγράμματα 3.9-3.12 παρατηρούμε πως καθώς αυξάνεται ο αριθμός Ri , ο ρυθμός αύξησης του ύψους της διεπιφάνειας μειώνεται σε σχέση με το χρόνο. Έτσι σε έναν δεδομένο χρόνο t , μεταξύ δύο φλεβών με $R_{o1} > R_{o2}$, το ύψος της διεπιφάνειας στην πρώτη θα είναι μικρότερο της δεύτερης. Αυτό γίνεται επίσης εύκολα αντιληπτό και από τα αντίστοιχα αδιάστατα διαγράμματα 3.13-3.16 που ακολουθούν.

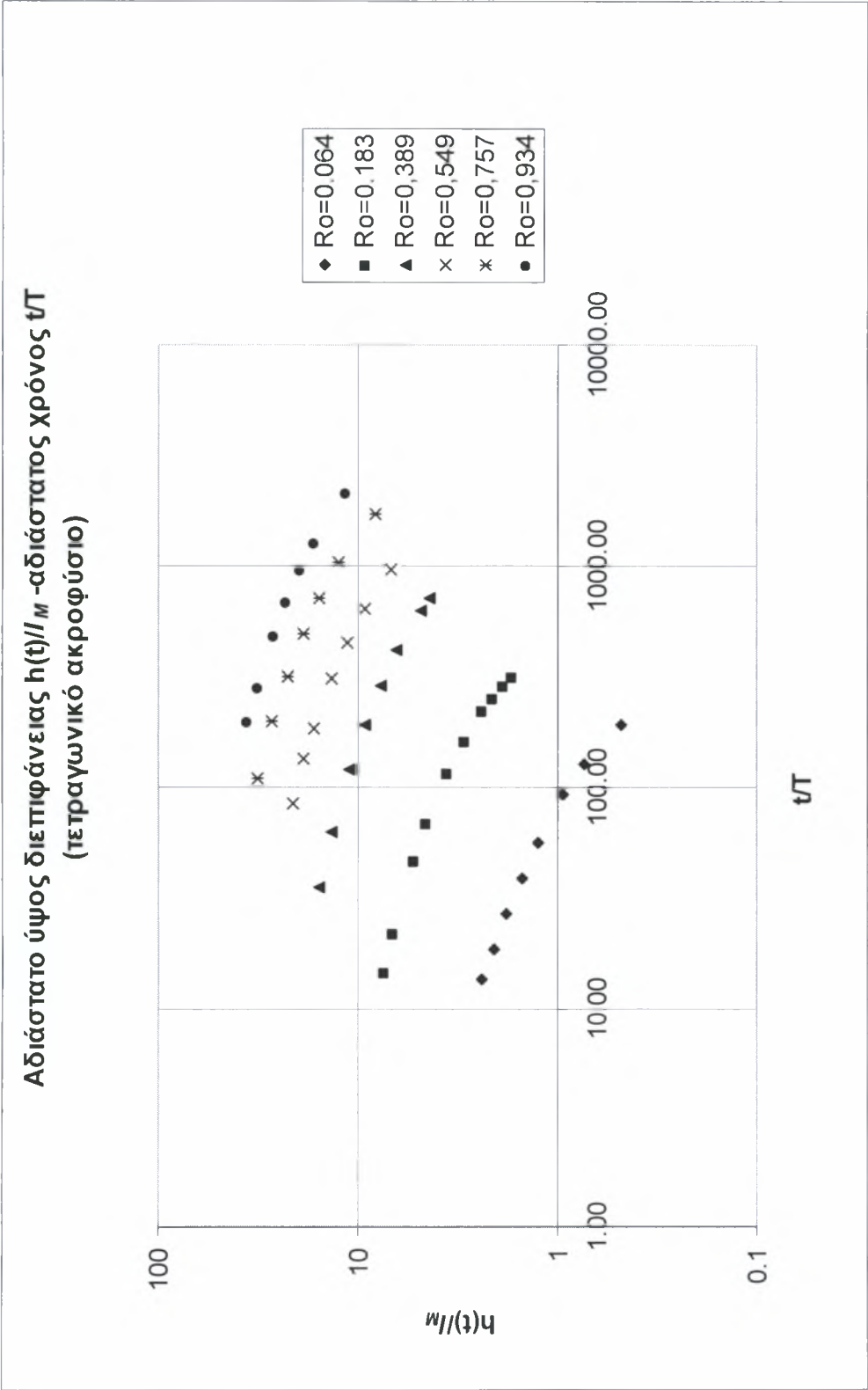
Αδιάστατο ύψος διεπιφάνειας $h(t)/l_M$ -αδιάστατος χρόνος t/T
(κυκλικά ακροφύσια)



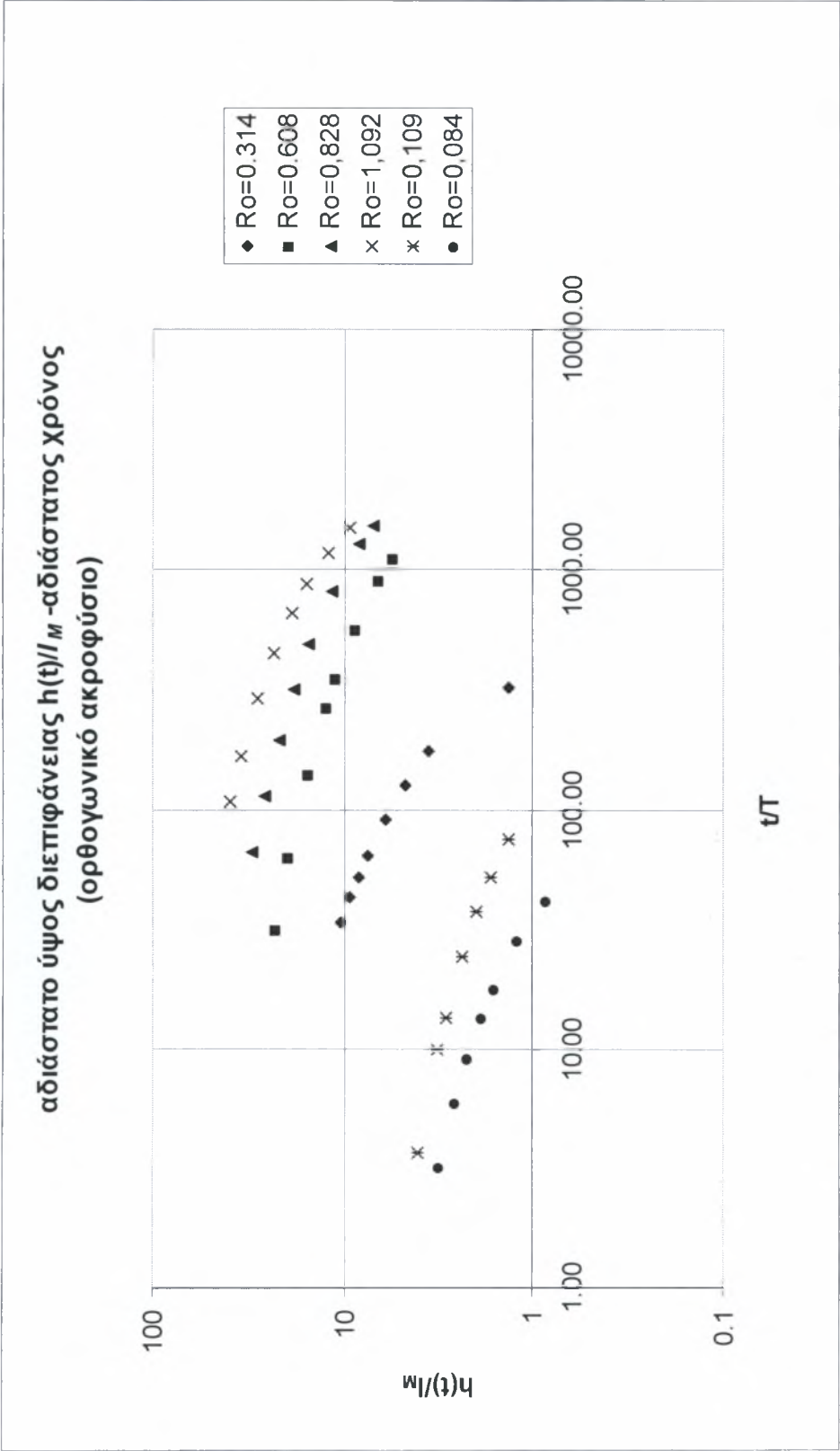
Διάγραμμα 3.13 Το αδιάστατο ύψος της διεπιφάνειας $h(t)/l_M$ σε σχέση με τον αδιάστατο χρόνο t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.018 έως 0.452 (κυκλική διατομή).



Διάγραμμα 3.14 Το αδιάστατο ύψος της διεπιφάνειας $h(t)/l_M$ σε σχέση με τον αδιάστατο χρόνο t/Γ για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.044 έως 0.865 (τριγωνική διατομή).



Διάγραμμα 3.15 Το αδιάστατο ύψος της διεπιφάνειας $h(t)/l_M$ σε σχέση με τον αδιάστατο χρόνο t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.064 έως 0.934 (τετραγωνική διατομή).



Διάγραμμα 3.16 Το αδιάστατο ύψος της διεπιφάνειας $h(t)/l_M$ σε σχέση με τον αδιάστατο χρόνο t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.084 έως 1.092 (ορθογωνική διατομή).

3.2 Σφάλματα

Κάθε πείραμα έγινε με ιδιαίτερη προσοχή και πολλές φορές ώστε να υπάρχουν όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα. Επίσης θα πρέπει να τονιστεί η προγενέστερη εμπειρία πάνω σε αυτό το είδος πειραμάτων, από το μάθημα του 9^{ου} Εξαμήνου σπουδών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας Πειραματική Υδραυλική, καθώς και η πολύ καλή συνεργασία του προσωπικού του εργαστηρίου. Παρόλα αυτά είναι αναπόφευκτα ορισμένα σφάλματα στις μετρήσεις.

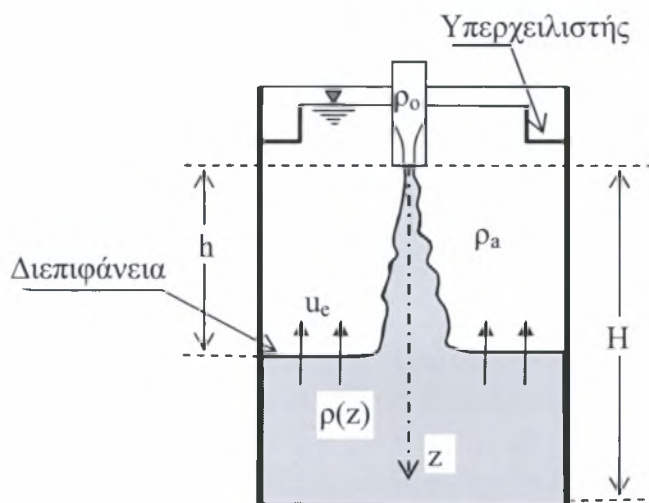
Πρώτα από όλα υπάρχει περιθώριο λάθους στη μέτρηση της αλατότητας με το πυκνόμετρο. Η βαθμίδα του πυκνόμετρου είναι ανά $0,001 \text{ kg/m}^3$ και η εκτίμηση γίνεται με το μάτι, έτσι έχουμε σφάλμα περίπου της τάξης του $\pm 0.0005 \text{ kg/m}^3$. Για παράδειγμα, αν η αλατότητα στη πραγματικότητα είναι 1.0053 kg/m^3 , η μέτρησή μας λόγω κακής εκτίμησης και λόγω της αναρρίχησης του νερού μπορεί να είναι το πολύ 1.0058 kg/m^3 έτσι το σφάλμα είναι της τάξης του $\pm 0.5 \text{ gr/l}$. Αντιθέτως με μεγάλη ακρίβεια υπολογίζεται η πυκνότητα του γλυκού νερού της κύριας δεξαμενής με βάση τη σχέση που προαναφέραμε, συναρτήσει της θερμοκρασίας η οποία μετράται με ειδικό αναλογικό θερμόμετρο υδραργύρου.

Στη μέτρηση της παροχής με το ροόμετρο πάλι υπεισέρχονται σφάλματα, γιατί η ακριβής ένδειξη εκτιμάται από τη θέση της μεταλλικής σφαίρας με το μάτι. Υπάρχουν κάποιες αυξομειώσεις στην ένδειξη γιατί η ροή δεν είναι τελείως ομαλή και τέλος και υπεισέρχονται κάποια σφάλματα από την καμπύλη ρύθμισης. Οι πειραματικές μετρήσεις που έγιναν για τη ρύθμιση του ροομέτρου δείχνουν ότι τα σφάλματα κυμαίνονται περί το $\pm 5\%$.

Επίσης πρέπει να αναφέρουμε το γεγονός ότι η μέτρηση του ύψους της διεπιφάνειας του αναμειγνύμενου ύδατος μέσα στην κύρια δεξαμενή, έγινε με τη βοήθεια του κανάβου που είχε αρχικά σχεδιαστεί στα τοιχώματα και σίγουρα υπεισέρχονται σφάλματα καθώς οι μετρήσεις γίνονται με το μάτι.

Το διάλυμα της κύριας δεξαμενής θα πρέπει να είναι κάθε φορά τελείως ακίνητο και ομογενές. Για να πετύχουμε όμως το διάλυμα να είναι πάντα ομογενές θα πρέπει κάθε φορά να το ανακατεύουμε καλά με τον αναδευτήρα. Με δεδομένο ότι δεν έγιναν μετρήσεις της αλατότητας στην παρούσα φάση, η ακριβής εκτίμηση του ποσοστού σφάλματος είναι αδύνατη. Θεωρούμε πάντως ότι το υγρό του ήρεμου αποδέκτη πριν την έναρξη του πειράματος είναι ομογενές.

4. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ



Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται ένα δοχείο που περιέχει νερό με πυκνότητα ρ_a , στο οποίο διοχετεύεται φλέβα νερού πυκνότητας $\rho_o > \rho_a$, έτσι που να ικανοποιείται η παραδοχή του Boussinesq, δηλαδή η πυκνομετρική διαφορά είναι τόσο μικρή που να μην επηρεάζει την εξίσωση ορμής της φλέβας εάν αντικαταστήσουμε την πυκνότητα ρ_o με ρ_a και αντίστροφα, αλλά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον υπολογισμό των ανωστικών δυνάμεων (δηλαδή της αυξημένης βαρύτητας $g'_o = (\Delta\rho / \rho_o)g$). Εάν η φλέβα είναι κυκλική διαμέτρου D με ομοιόμορφη ταχύτητα εξόδου στο ακροφύσιο W , η παροχή ρευστού Q (αμετάβλητη στο χρόνο) είναι

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} W \quad (4.1)$$

Η ειδική (ανά μονάδα μάζας του ρέοντος ρευστού) ορμή και ειδική ανωστική δύναμη M και B αντίστοιχα είναι

$$M = QW \quad (4.2)$$

$$B = \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gQ. \quad (4.3)$$

Κατά την ανάμειξη του νερού της φλέβας με το ελαφρύτερο νερό του δοχείου, το (βαρύτερο) αναμειγμένο ρευστό συγκεντρώνεται κοντά στον πυθμένα (κάτω από τη διεπιφάνεια). Εάν θεωρήσουμε ότι η πυκνότητα της κατώτερης στρώσης είναι περίπου ενιαία (δεν υφίσταται πυκνομετρική στρωμάτωση παρά μόνο στην περιοχή της διεπιφάνειας) σύμφωνα με τις μετρήσεις των Auban *et al.* (2001) και Hunt & Linden (2001), η διεπιφάνεια έχει πολύ μικρό πάχος, ενώ η ανάμειξη γίνεται κατά μήκος της φλέβας στο τμήμα μεταξύ ακροφυσίου και διεπιφάνειας.

Έστω ότι η στιγμή που το μέτωπο της φλέβας αγγίζει τον πυθμένα του δοχείου είναι η αρχή μέτρησης του χρόνου ($t = 0$), για την οποία ισχύει ότι η διεπιφάνεια ταυτίζεται με τον πυθμένα ($h(0) = H$). Τη χρονική στιγμή $t > 0$, η διεπιφάνεια βρίσκεται σε απόσταση $h(t)$ από το στόμιο της φλέβας, ο δε όγκος του αναμειγμένου

ρευστού του δοχείου με το ρευστό της φλέβας που βρίσκεται κάτω από τη διεπιφάνεια είναι

$$\forall(t) = (H - h)S, \quad (4.4)$$

όπου S είναι το εμβαδόν της οριζόντιας διατομής του δοχείου. Τη χρονική στιγμή t επομένως ισχύουν τα εξής:

(α) Εξίσωση διατήρησης της μάζας του αλατιού. Η μάζα του αλατιού που έχει συσσωρευθεί στην περιοχή κάτω από τη διεπιφάνεια ($h(t) < z < H$) σε χρόνο t μετά την αρχική πρόσκρουση της φλέβας στον πυθμένα είναι

$$Y(t) = Q Ct, \quad (4.5)$$

όπου C είναι η αρχική συγκέντρωση του αλατιού στο νερό της φλέβας.

(β) Εξίσωση συνέχειας. Ο όγκος τού νερού κατά τη χρονική στιγμή t είναι

$$\forall(t) = (H - h)S, \quad (4.6)$$

ενώ κατά τη χρονική στιγμή $t + dt$ είναι

$$\forall(t + dt) = V(t) + \mu(h)dt, \quad (4.7)$$

όπου $\mu(h)$ είναι η παροχή ρευστού της φλέβας που διέρχεται από τη διεπιφάνεια.

Κατά τη χρονική στιγμή t , η μέση συγκέντρωση αλατιού στην κατώτερη στρώση θα είναι

$$c(t) = \frac{Q Ct}{\forall(t)} = \frac{Q Ct}{(H - h)S}. \quad (4.8)$$

Εάν θεωρήσουμε ότι $C \sim (\Delta\rho)_0 = \rho_0 - \rho_a$ και $c(t) \sim \Delta\rho(t) = \rho(t) - \rho_a$, όπου $\rho(t)$ είναι η μέση πυκνότητα της κατώτερης αναμειγμένης ζώνης, από την παραπάνω σχέση έχουμε ότι

$$\Delta\rho(t) = \rho(t) - \rho_a = \frac{Q(\Delta\rho)_0 t}{\forall(t)} = \frac{Q(\Delta\rho)_0 t}{(H - h)S}. \quad (4.10)$$

4.1 Προσδιορισμός της στάθμης της διεπιφάνειας στο χρόνο.

Θα πρέπει να προσδιορίσουμε την παροχή της φλέβας στο επίπεδο της διεπιφάνειας, έτσι ώστε να υπολογίσουμε την παροχή $\mu(h)$ κατά τη χρονική στιγμή t , όταν η απόσταση της διεπιφάνειας από το ακροφύσιο είναι $h(t)$.

Η φλέβα αρχικά διαθέτει ορμή και άνωση. Η συμπεριφορά της όπως συζητήθηκε στην εισαγωγή εξαρτάται από την αδιάστατη απόσταση z/l_M από το ακροφύσιο εκροής (Paranicolaou και List 1988). Στην περίπτωση μας εξαρτάται από το λόγο h/l_M . Εάν $h/l_M \ll 1$, τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή φλέβα (jet). Εάν $h/l_M \gg 1$, τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν πλούμιο και εάν $1 < h/l_M < 10$ τότε η φλέβα συμπεριφέρεται σαν ανωστική φλέβα, που αποτελεί μια ενδιαμέση κατάσταση των παραπάνω.

Οι List και Imberger (1973), διετύπωσαν μια γενικευμένη θεωρία που ισχύει και για τους τρεις τύπους φλέβας που αναφέραμε παραπάνω. Συγκεκριμένα, με διαστατική ανάλυση και με βάση ορισμένες μετρήσεις έδειξαν ότι η παροχή και η ορμή μιας

ανωστικής κυκλικής φλέβας στην οποία όμως η ανωστική δύναμη διατηρείται, μπορούν να εκφραστούν από τις εξισώσεις

$$\frac{m}{M} = \left\{ 1 + \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{2/3} \quad (4.11)$$

και

$$\frac{\mu}{Q} = \frac{z}{z_o} \left\{ 1 + \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \left[\left(\frac{z}{z_o} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{1/3} \quad (4.12)$$

όπου

$$z_o = \frac{Q}{C_p \sqrt{M}} = \frac{l_Q}{C_p} \text{ και } C_p = \frac{\mu}{z \sqrt{m}} = \sqrt{2\pi} \frac{b}{z}. \quad (4.13\alpha, \beta)$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις και την κλίμακα μήκους μιας ανωστικής φλέβας $l_M = M^{3/4}/B^{1/2}$ οι εξισώσεις (4.11) και (4.12) γράφονται ως

$$\frac{m}{M} = \left\{ 1 + \left[\left(\frac{z}{l_M} \frac{C_p}{R_p} \right)^2 - \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \right] \right\}^{2/3} \quad (4.11\alpha)$$

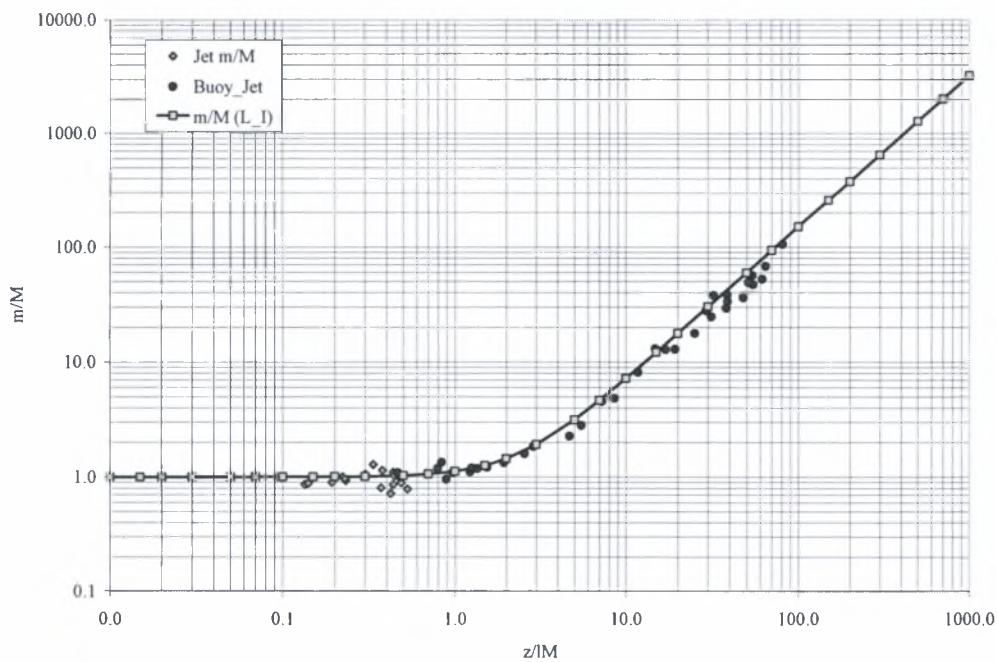
και

$$\frac{\mu}{Q} = \frac{z}{l_M} \frac{C_p}{R_o} \left\{ 1 + \left[\left(\frac{z}{l_M} \frac{C_p}{R_p} \right)^2 - \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \right] \right\}^{1/3}. \quad (4.12\alpha)$$

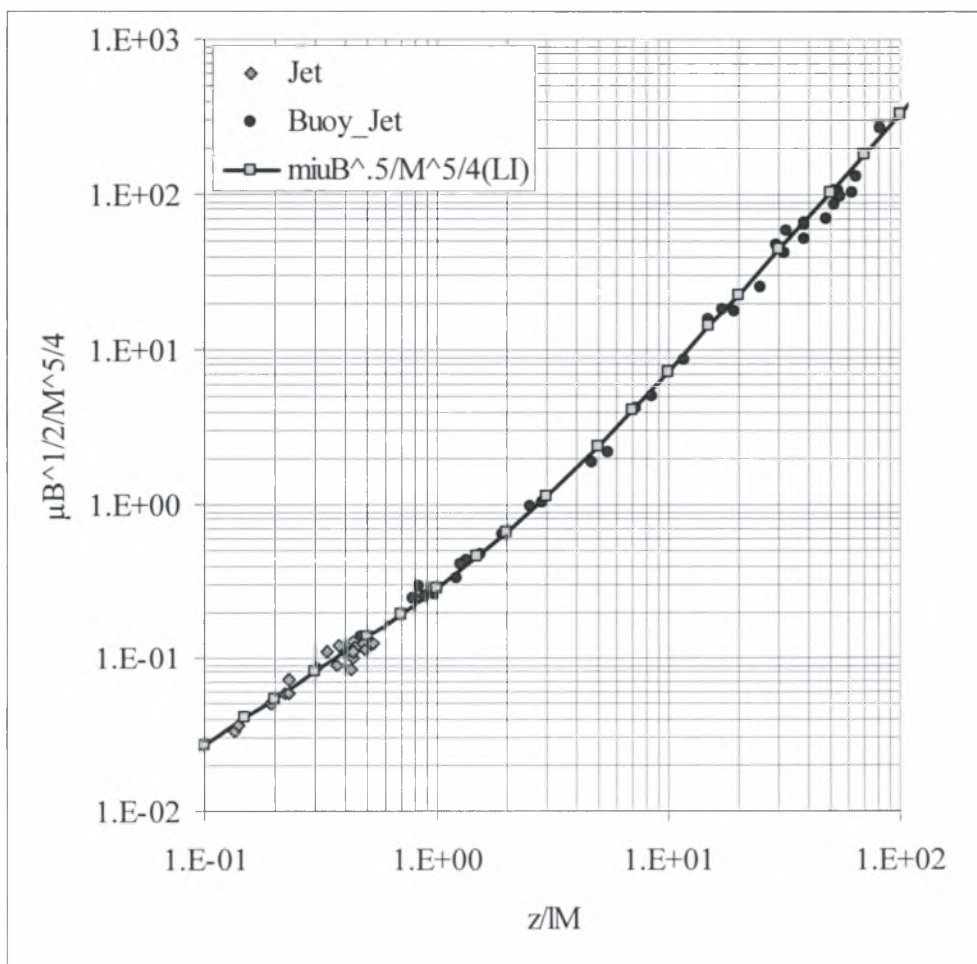
Στις παραπάνω εξισώσεις R_o είναι ο αρχικός αριθμός Richardson της φλέβας και R_p είναι ο οριακός αριθμός Richardson ενός πλουμίου. C_p είναι μια παράμετρος ενδεικτική της κατά πλάτος ανάπτυξης της φλέβας, ενώ b είναι το ‘πλάτος’ της φλέβας, που ορίζεται σαν την απόσταση από τον άξονα όπου η μέση ταχύτητα είναι $(1/e)w(z)$, όπου $w(z)$ είναι η μέση ταχύτητα στον άξονα της φλέβας και e η βάση των Νεπέρων λογαρίθμων. Εάν χρησιμοποιήσουμε τις παραμέτρους που μέτρησαν οι Papanicolaou και List (1988), δηλαδή $C_p = 0.27$ και $R_p = 0.63$, προκύπτει ότι οι παραπάνω σχέσεις μπορούν με μεγάλη ακρίβεια να προσεγγίσουν την αδιαστατοποιημένη παροχή και ορμή ανωστικών φλεβών που προέκυψαν από τις μετρήσεις των παραπάνω συγγραφέων όπως άλλωστε φαίνεται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα 1 και 2.

Χρησιμοποιούμε επομένως την παραπάνω σχέση για τον προσδιορισμό της παροχής της φλέβας σε απόσταση $h(t)$ από το στόμιο, δηλαδή

$$\frac{\mu(h)}{Q} = \frac{h}{l_M} \frac{C_p}{R_o} \left\{ 1 + \left[\left(\frac{h}{l_M} \frac{C_p}{R_p} \right)^2 - \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \right] \right\}^{1/3}. \quad (4.13)$$



Διάγραμμα 4.1 Αδιαστατοποιμένη ορμή ανωστικής φλέβας σαν συνάρτηση της αδιαστατοποιημένης απόστασης z/l_M από το ακροφύσιο της φλέβας.



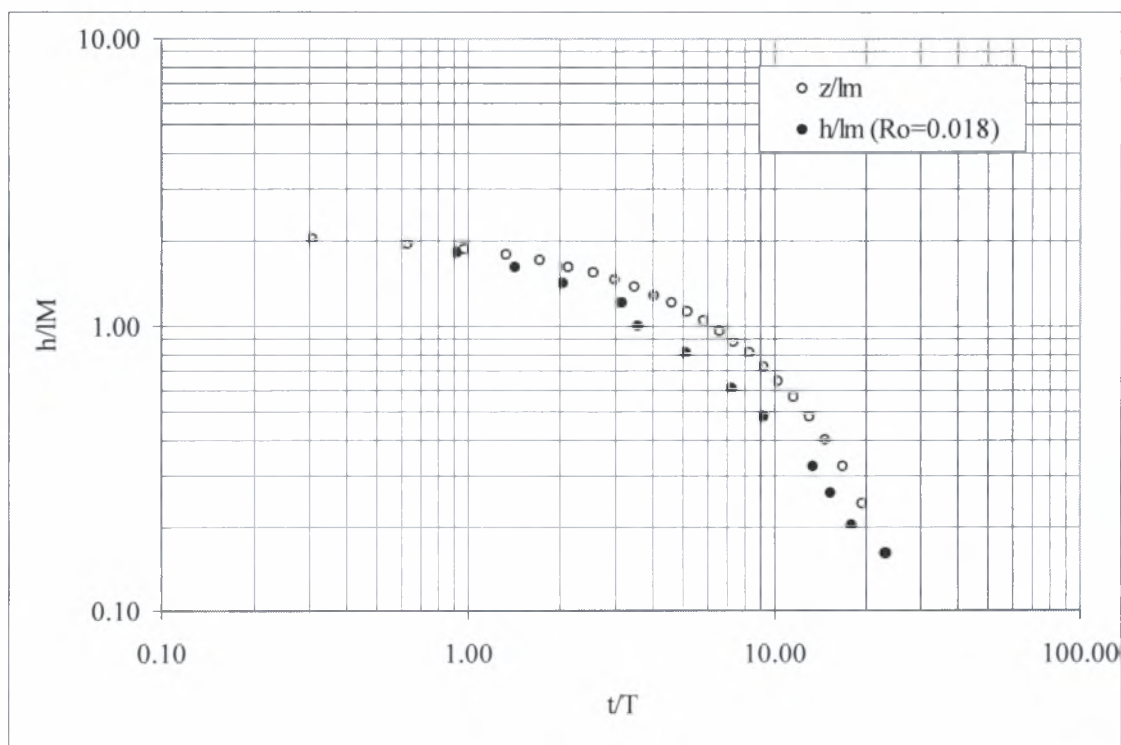
Διάγραμμα 4.2 Αδιαστατοποιμένη παροχή $\mu(z)B^{1/2}/M^{5/4}$ ανωστικής φλέβας σαν συνάρτηση της αδιαστατοποιημένης απόστασης z/l_M από το ακροφύσιο της φλέβας.

Μεταβάλλοντας το h ανά εκατοστό, μπορούμε να προσδιορίσουμε το χρόνο t που χρειάζεται η διεπιφάνεια να μετακινηθεί κατά 1 εκατοστό θεωρώντας ότι η παροχή είναι σταθερή ανάμεσα στις στάθμες $h(t)$ και $h(t) + 1\text{cm}$ από τη σχέση (4.7)

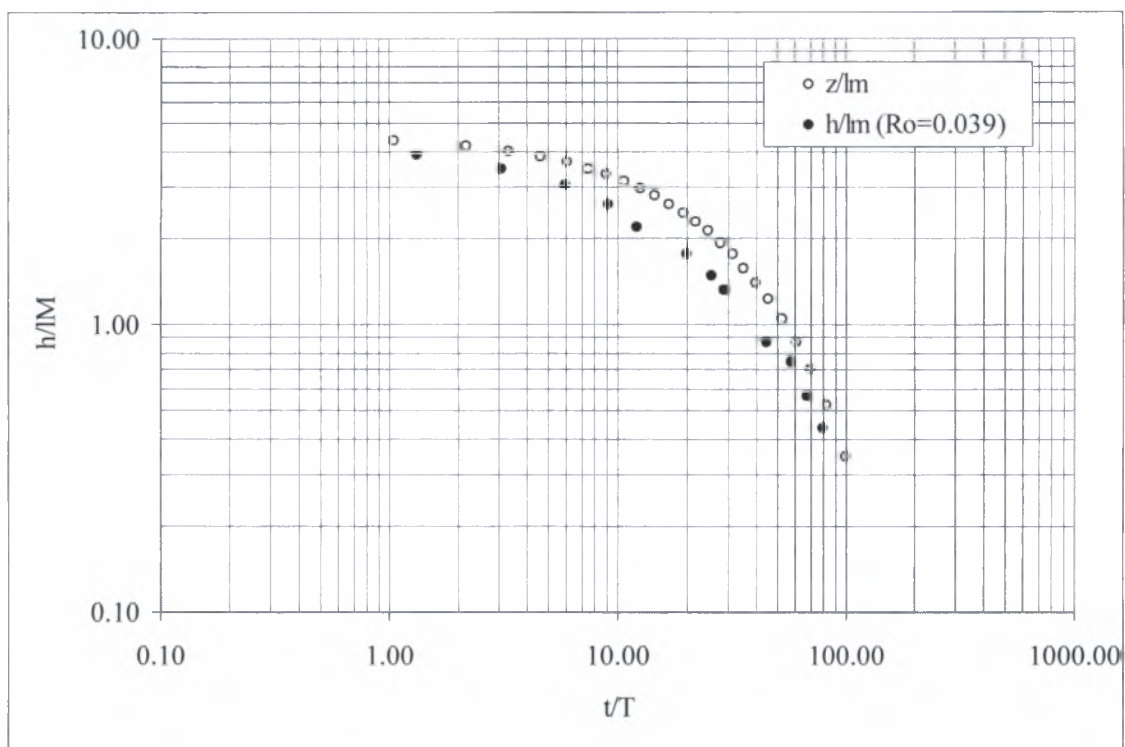
$$\Delta t = \frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\mu(h)} = \frac{[h(t + \Delta t) - h(t)]S}{\mu(h)} \quad (4.14)$$

όπου S είναι το εμβαδόν της οριζόντιας τομής του ορθογωνικού δοχείου ($40 \times 40 \text{ cm}^2$).

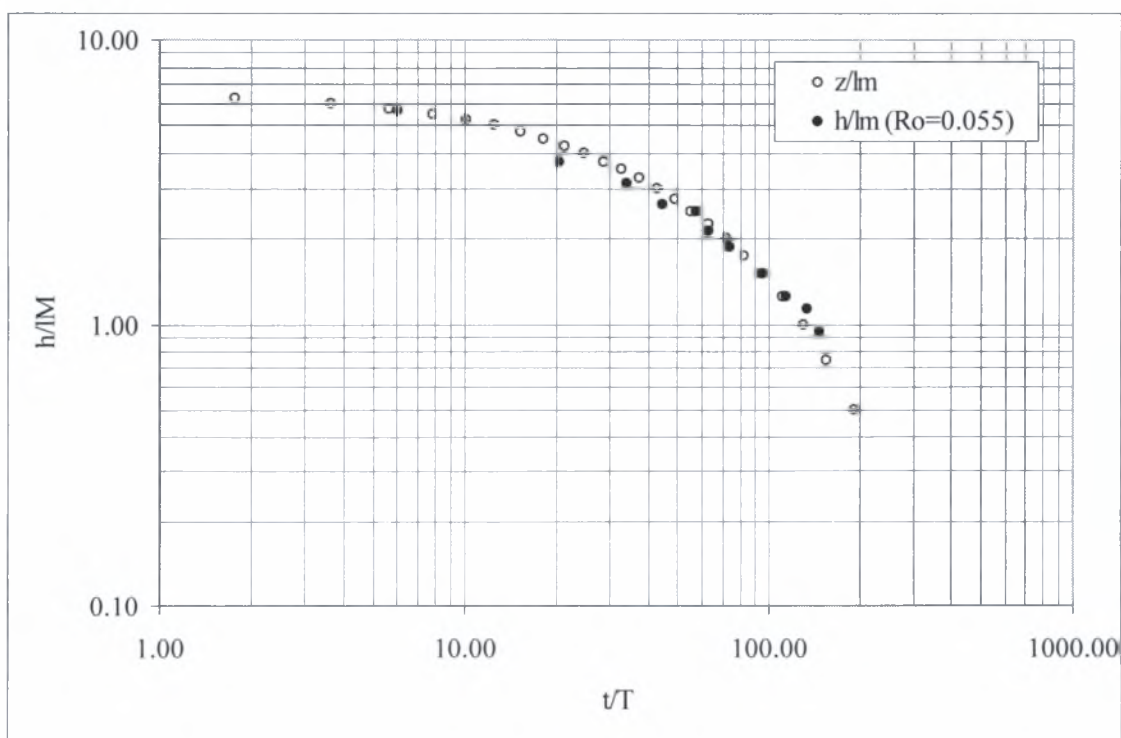
Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται σε αδιάστατη μορφή τα πειραματικά δεδομένα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου για αριθμούς Richardson στην περιοχή μεταξύ 0.018 (jets) και 0.633 (πλούμια). Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου και των πειραματικών μετρήσεων σε κυκλικές ανωστικές φλέβες που διαχέονται σε ομογενή αποδέκτη βρίσκονται κοντά, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε περιγράφει την στάθμη της διεπιφάνειας στο χρόνο με ικανοποιητική ακρίβεια. Ιδιαίτερα για μικρούς αρχικούς αριθμούς του Richardson της φλέβας υπάρχουν αποκλίσεις στην πρόγνωση του μοντέλου σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις. Όταν ο αριθμός Richardson $Ro > 0.10$, δηλαδή για αρχικά ανωστικές κυκλικές φλέβες και πλούμια, η πρόγνωση της στάθμης της διεπιφάνειας με το μοντέλο δεν διαφέρει ουσιαστικά από την μετρημένη στάθμη.



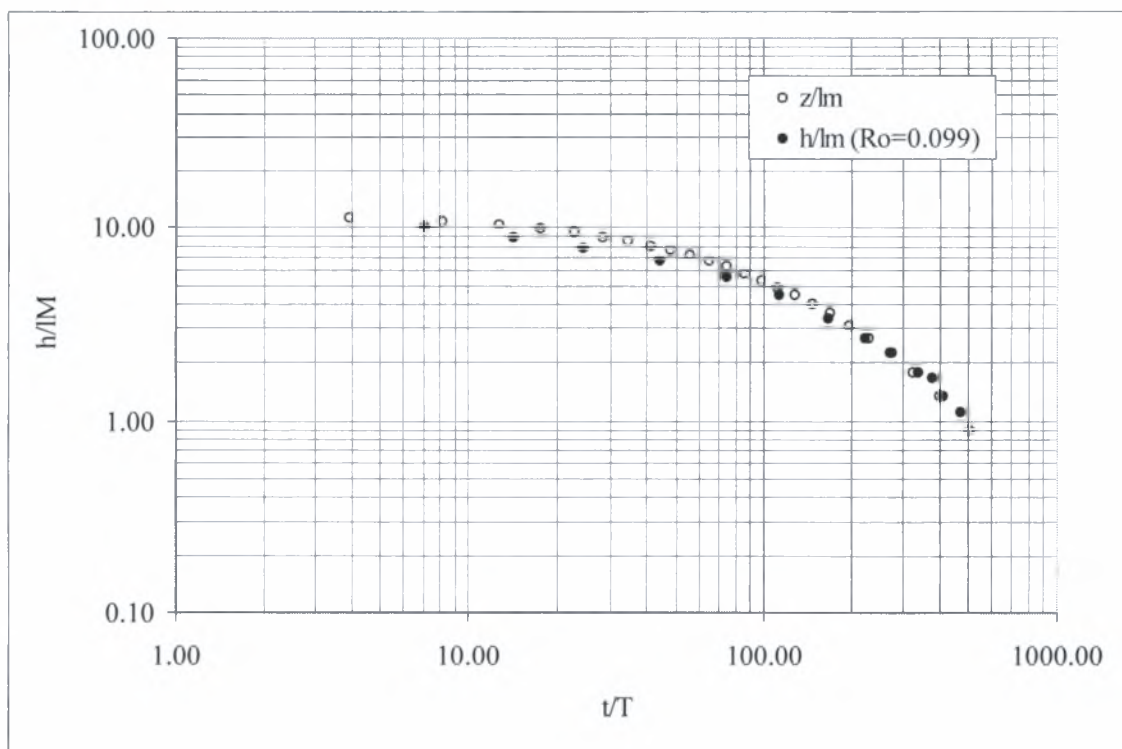
Διάγραμμα 4.3 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.018$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



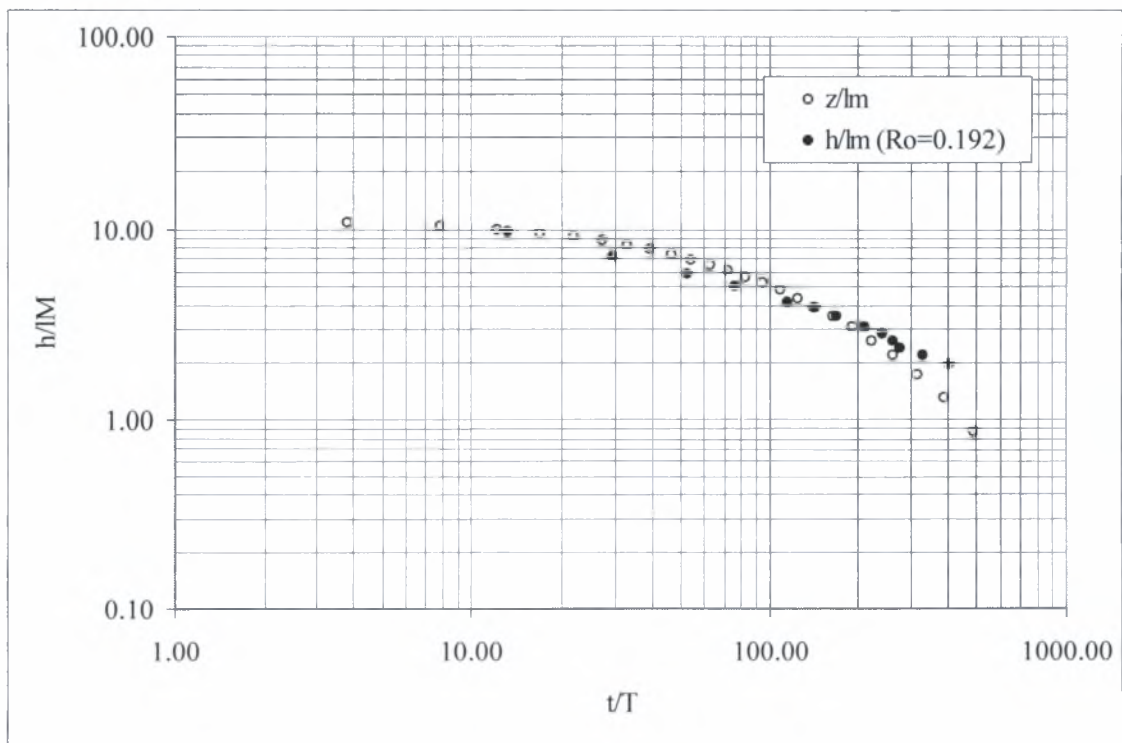
Διάγραμμα 4.4 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.039$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



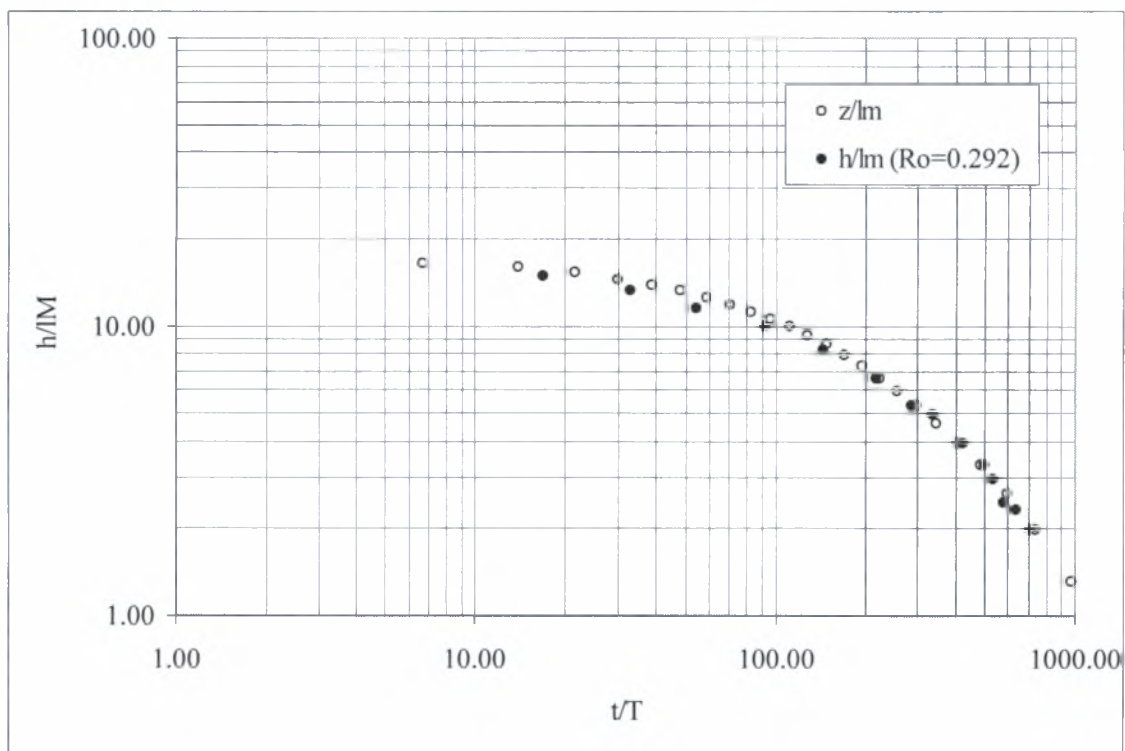
Διάγραμμα 4.5 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.055$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



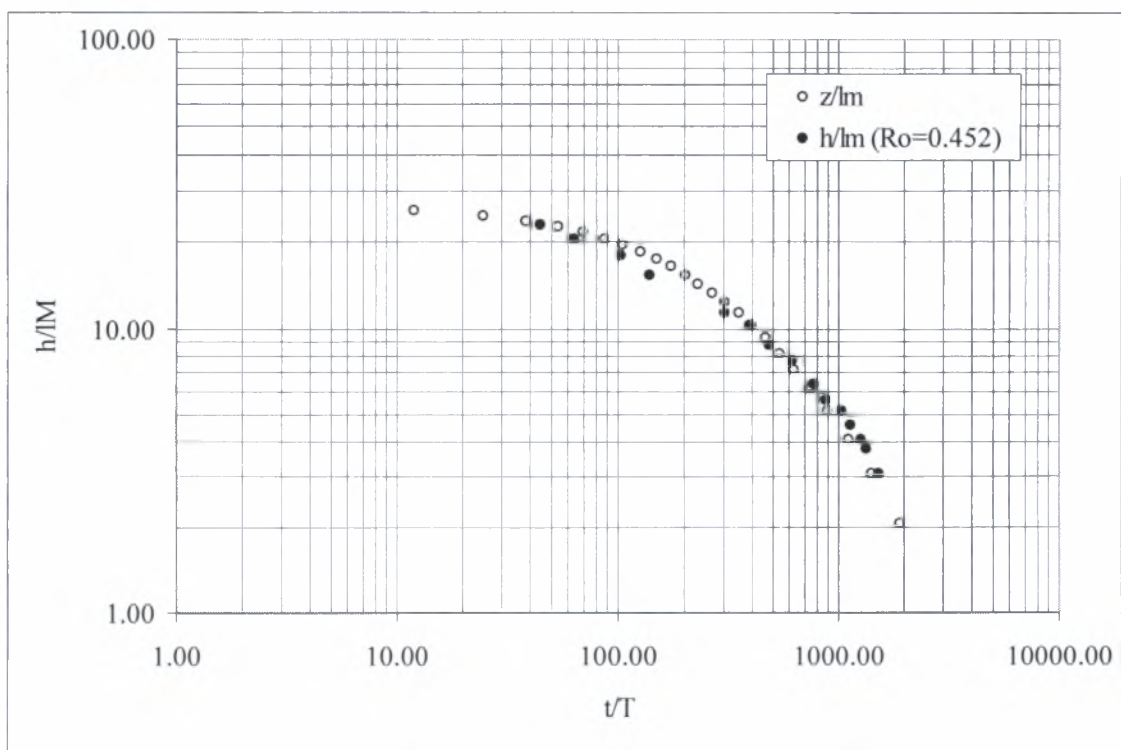
Διάγραμμα 4.6 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.099$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



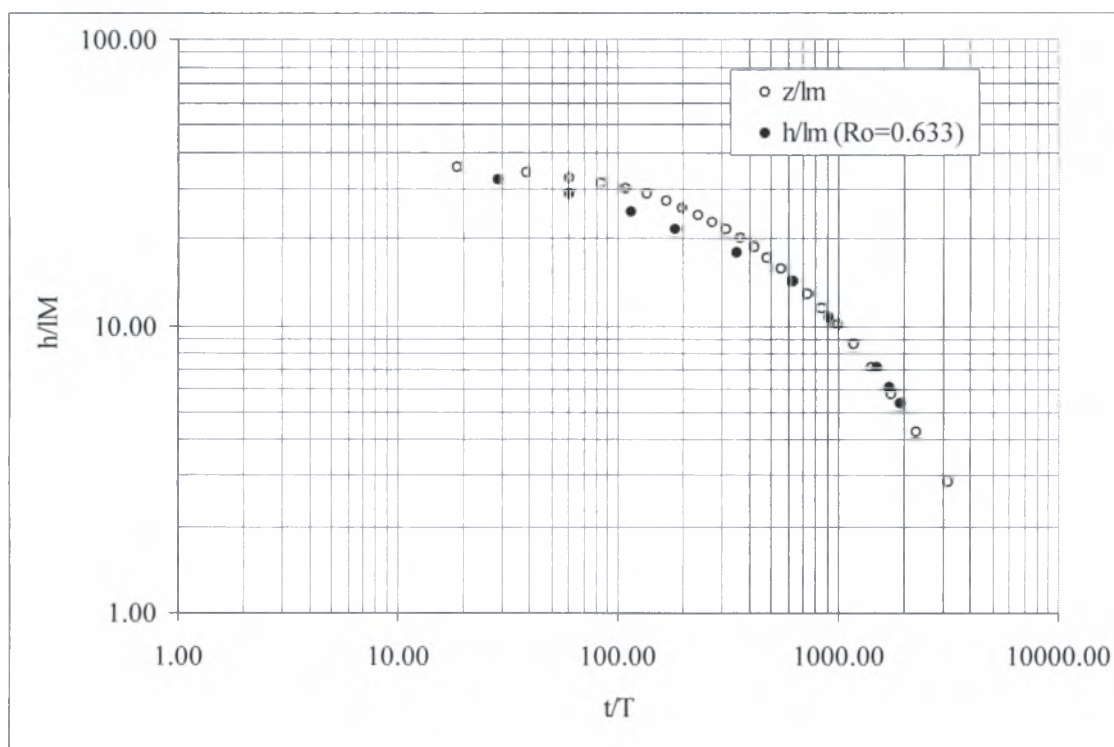
Διάγραμμα 4.7 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.192$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



Διάγραμμα 4.8 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.292$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



Διάγραμμα 4.9 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.452$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



Διάγραμμα 4.10 Αδιαστατοποιμένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το κυκλικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.633$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).

4.2 Μη κυκλικές κατακόρυφες φλέβες.

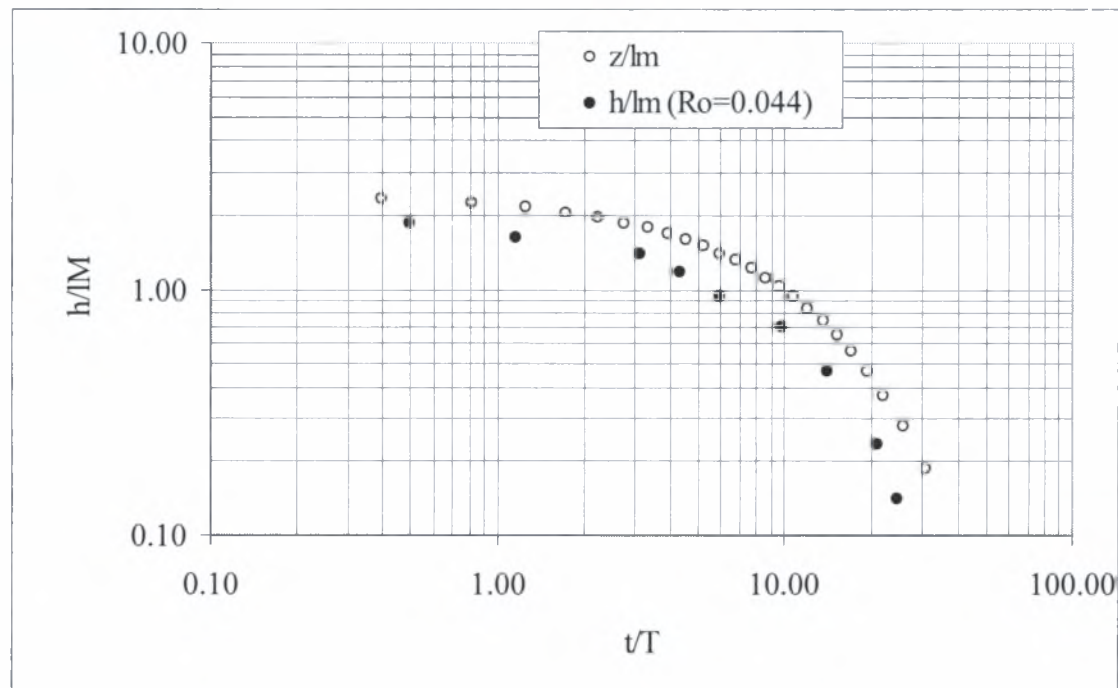
Ακολουθούν τα διαγράμματα για τριγωνική, τετραγωνική και ορθογωνική διατομή ακροφυσίου αντίστοιχα, στα οποία φαίνονται επίσης σε αδιάστατη μορφή τα πειραματικά δεδομένα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα του παρόντος μοντέλου για αριθμούς Richardson στην περιοχή μεταξύ 0.044(jets) και 0.845 (πλούμια) για τα κυλικά ακροφύσια, 0.183 και 0.934 για τα τετραγωνικά ακροφύσια και 0.084 και 1.092 για τα ακροφύσια ορθογωνικής διατομής.

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου και των πειραματικών μετρήσεων σε τριγωνικές φλέβες αποκλίνουν από τις μετρήσεις για όλους σχεδόν τους αρχικούς αριθμούς Richardson της φλέβας, εκτός από αυτούς στην περιοχή του πλουμίου. Συγκεκριμένα, το μοντέλο δείχνει βραδύτερους ρυθμούς ανάμειξης στις περιοχές της απλής και της ανωστικής φλέβας, ενώ στην περιοχή του πλουμίου ο ρυθμός ανάμειξης της πρόγνωσης συμπίπτει με τις μετρήσεις.

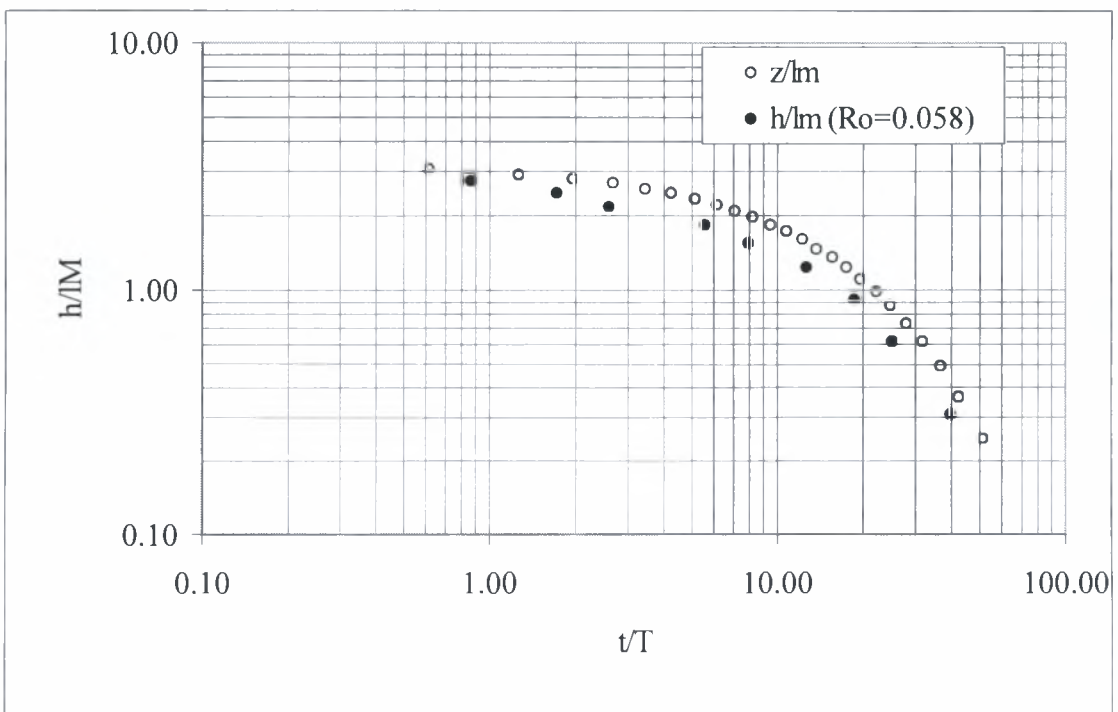
Όσον αφορά στις φλέβες από το τετραγωνικό ακροφύσιο, για $Ro < 0.25$ το μοντέλο μας δίνει ταχύτερους ρυθμούς ανάμειξης σε σχέση με τις μετρήσεις, ενώ για $Ro > 0.25$ η πρόγνωση είναι εξαιρετική σε σχέση με τις μετρήσεις.

Οι μετρήσεις σε ορθογωνικές (με λόγο πλευρών 2:1) ανωστικές φλέβες που διαχέονται σε ομογενή αποδέκτη δείχνουν ταχύτερους ρυθμούς ανάμειξης σε σχέση με την πρόγνωση του μοντέλου σε ολόκληρη την περιοχή, δηλαδή από τις απλές φλέβες μέχρι και τα πλούμια. Οι Ho & Gutmark (1987) έχουν μετρήσει μεγαλύτερους συντελεστές συμπαράσυρσης (ταχύτερο ρυθμό ανάμειξης) σε απλές

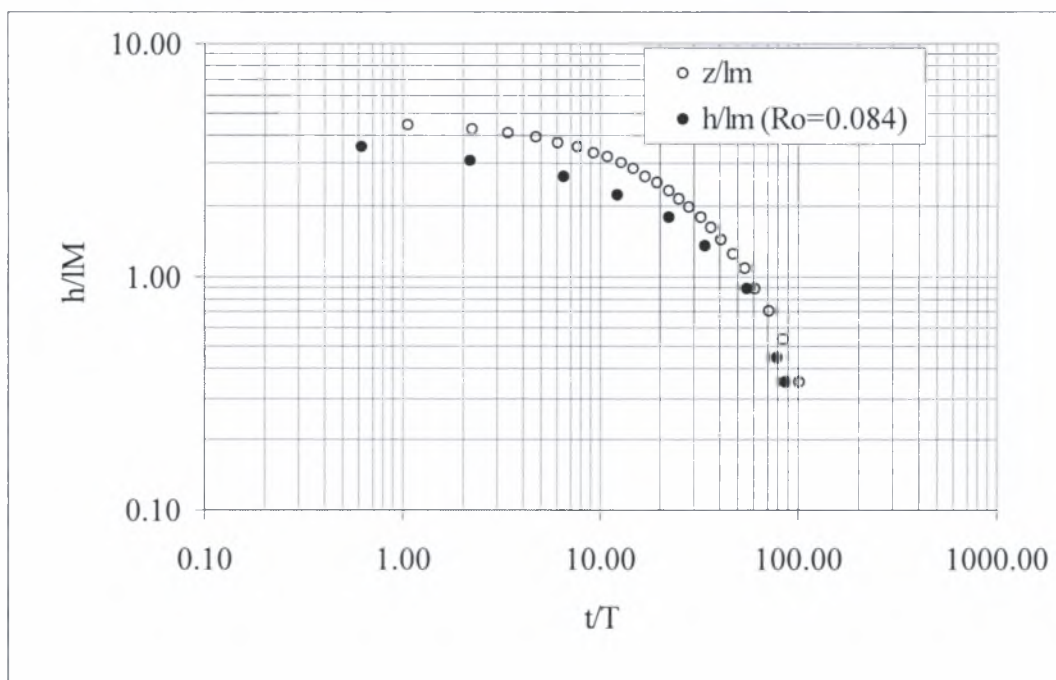
ελλειπτικές φλέβες με λόγο αξόνων 2:1, σε σχέση με τις αξονοσυμμετρικές απλές φλέβες.



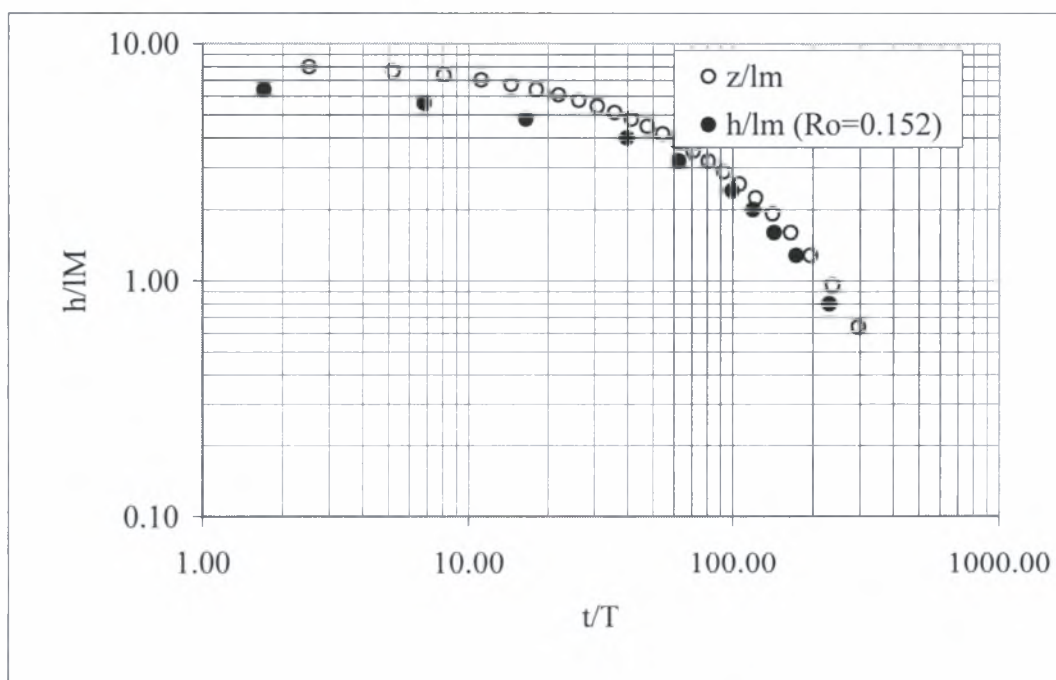
Διάγραμμα 4.11 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.044$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



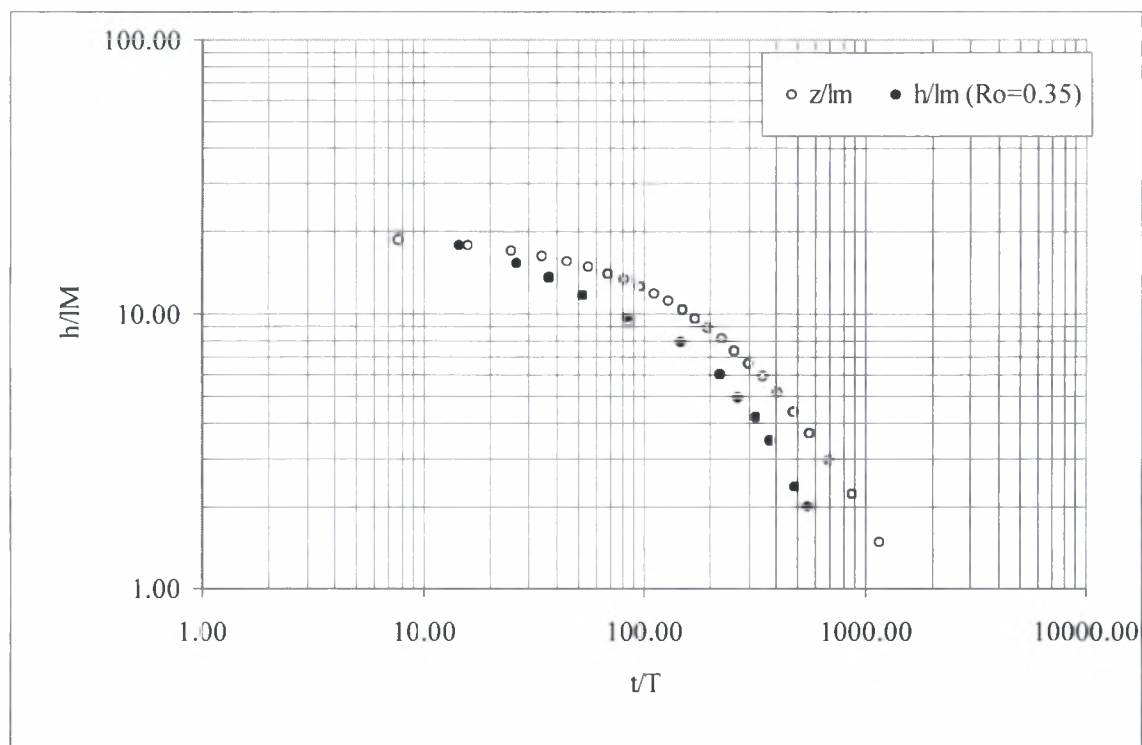
Διάγραμμα 4.12 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.058$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



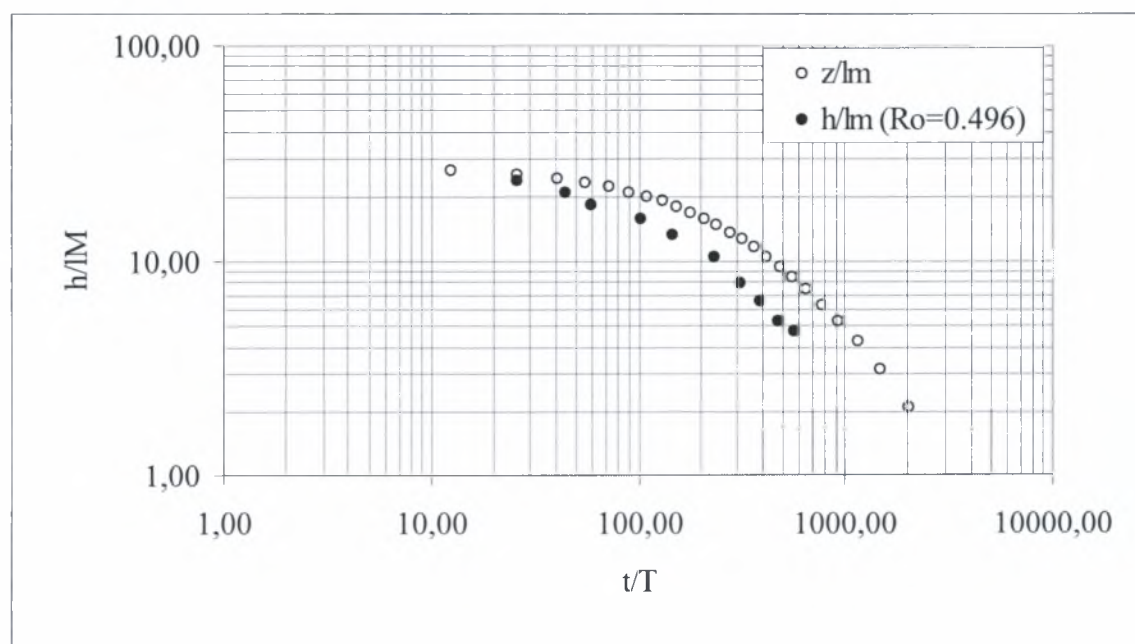
Διάγραμμα 4.13 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.084$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



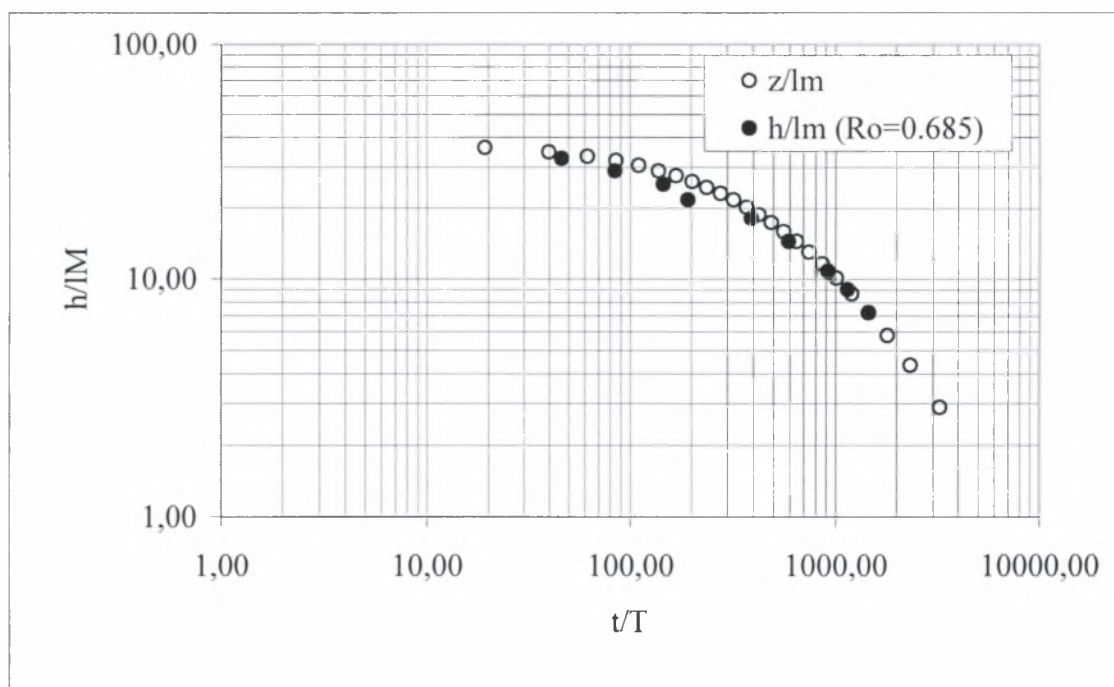
Διάγραμμα 4.14 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.152$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



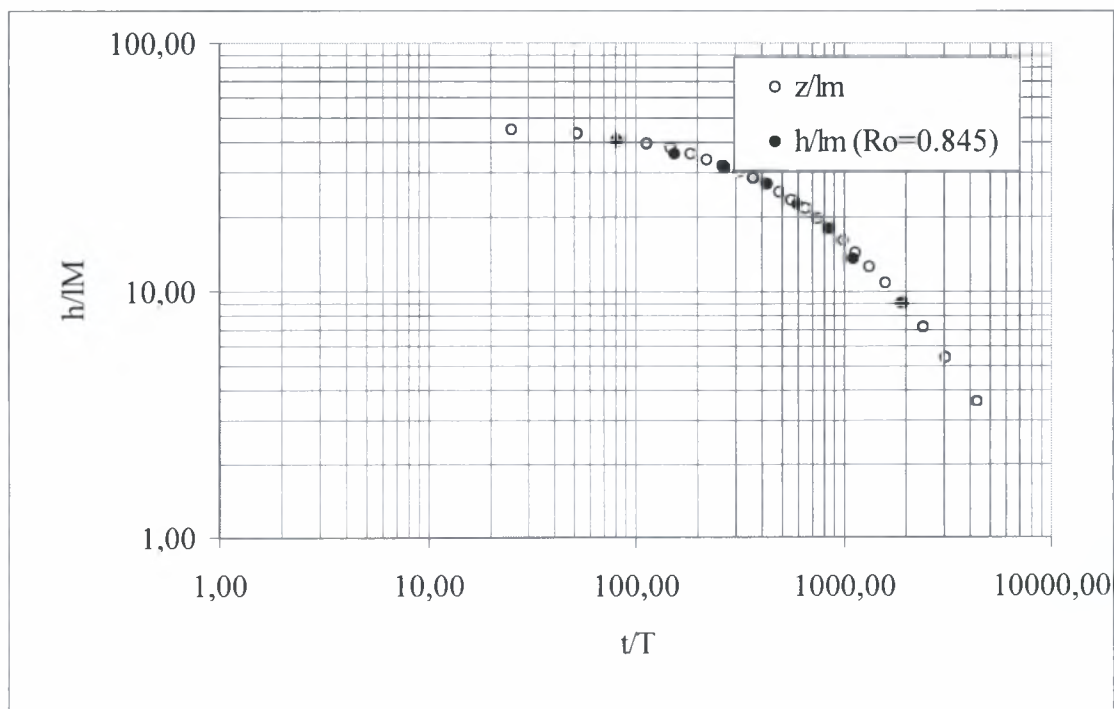
Διάγραμμα 4.15 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.35$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



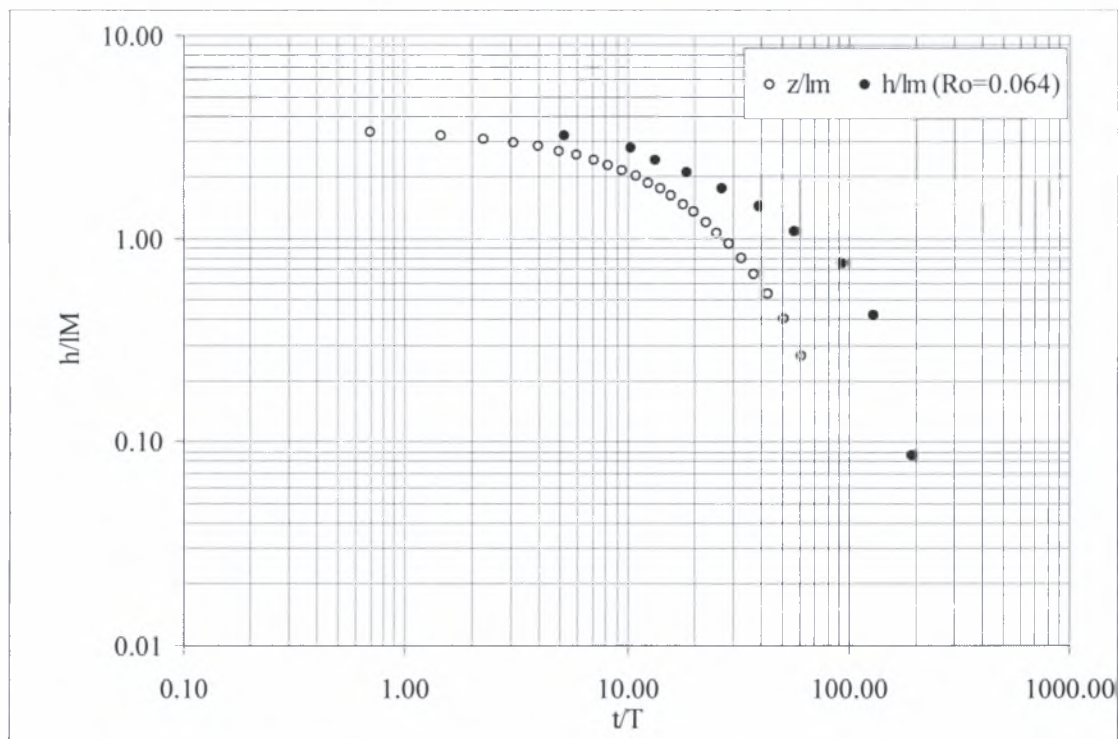
Διάγραμμα 4.16 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.496$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



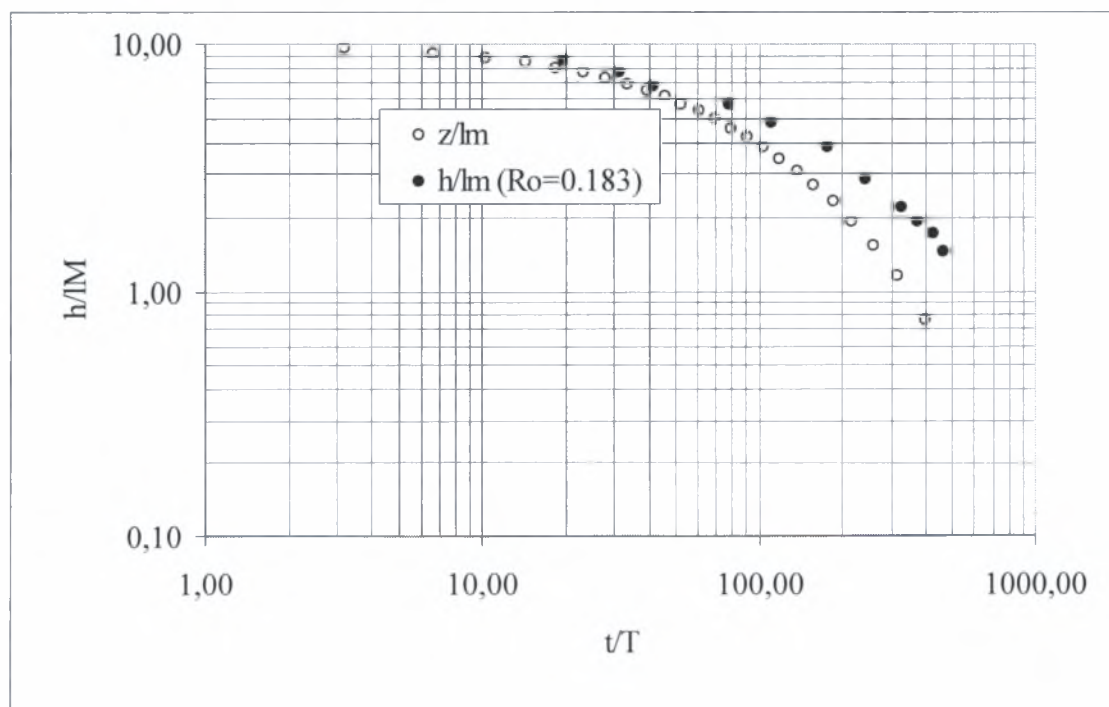
Διάγραμμα 4.17 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.685$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



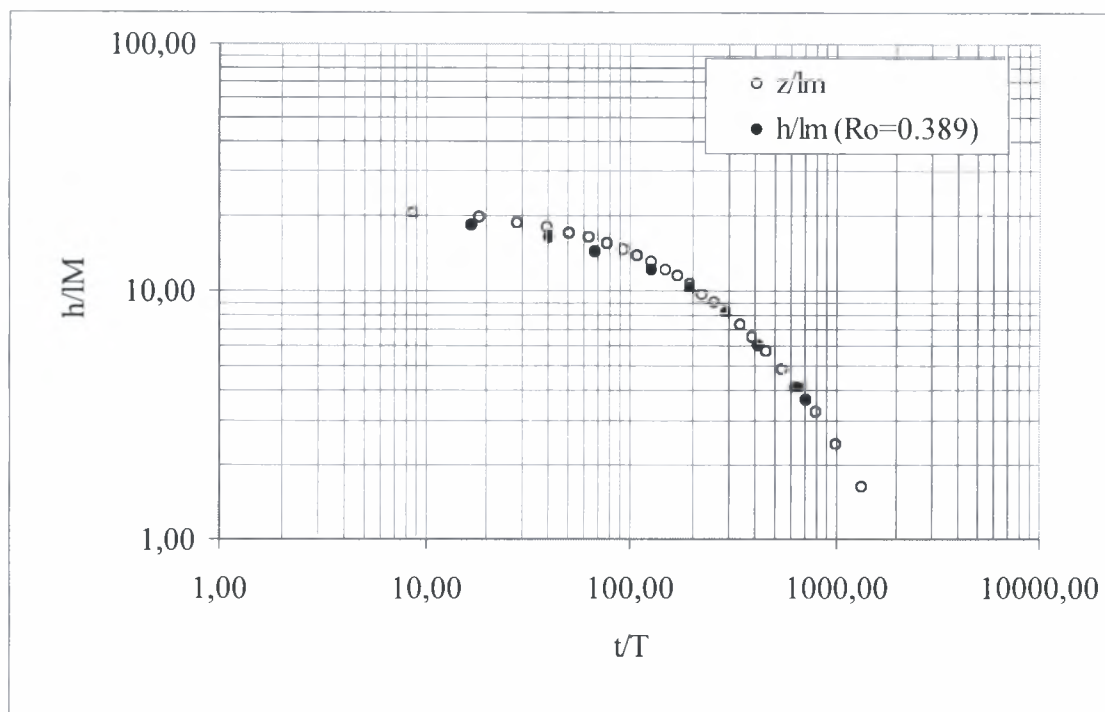
Διάγραμμα 4.18 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τριγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.845$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



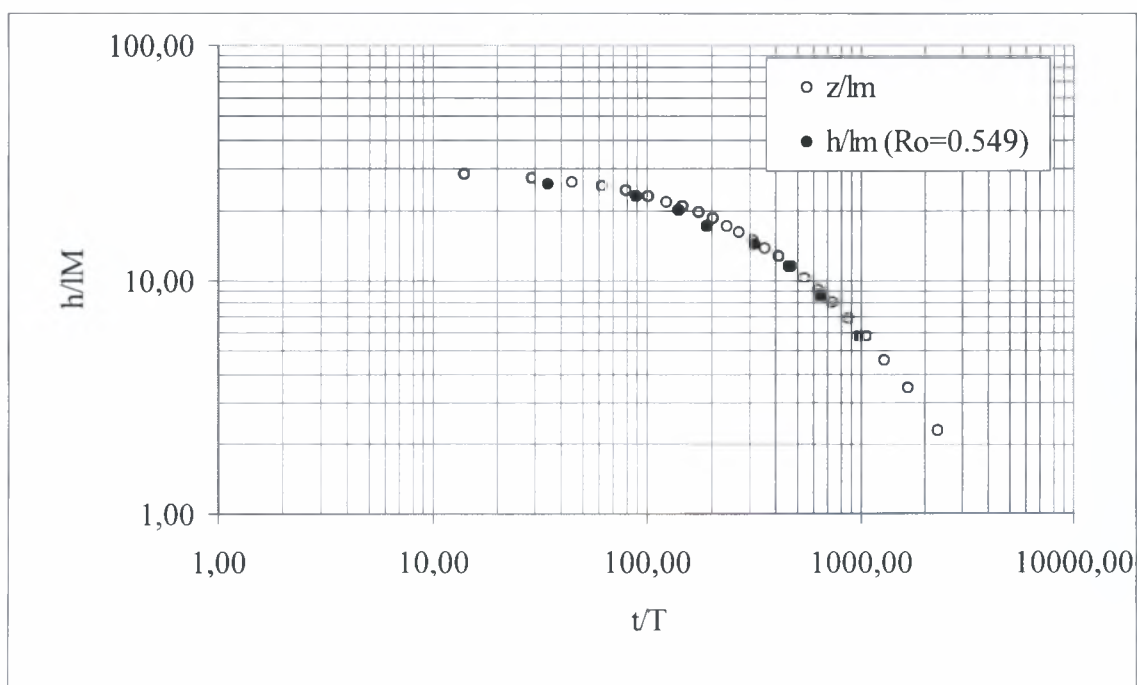
Διάγραμμα 4.19 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τετραγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.064$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



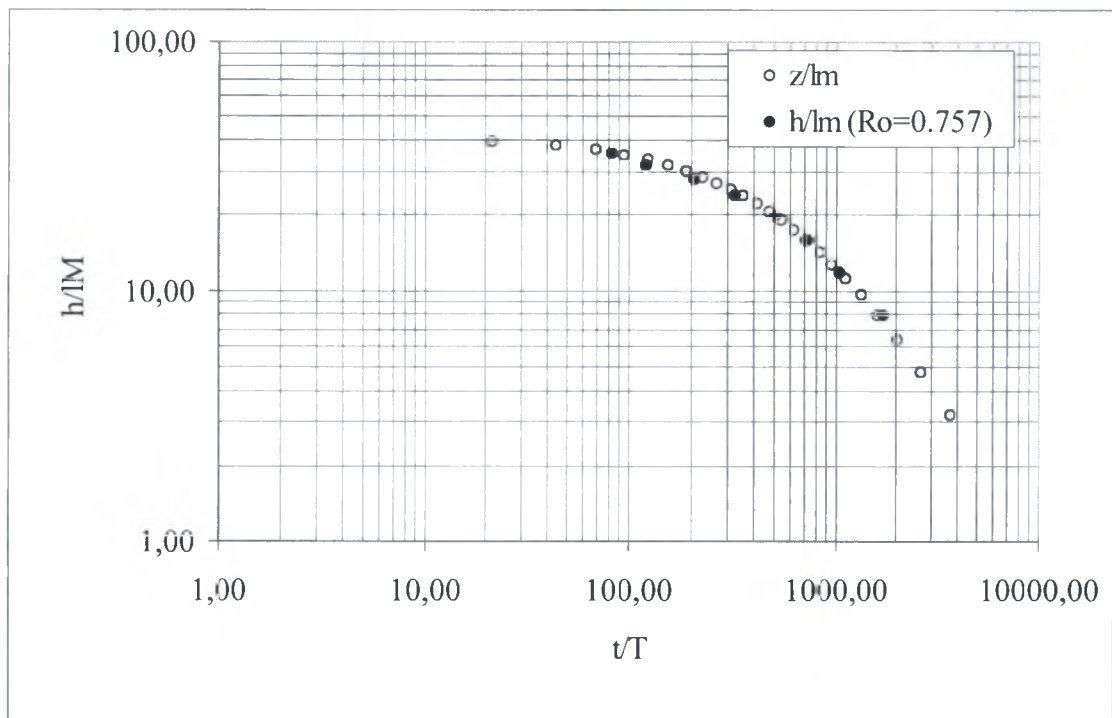
Διάγραμμα 4.20 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τετραγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.183$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



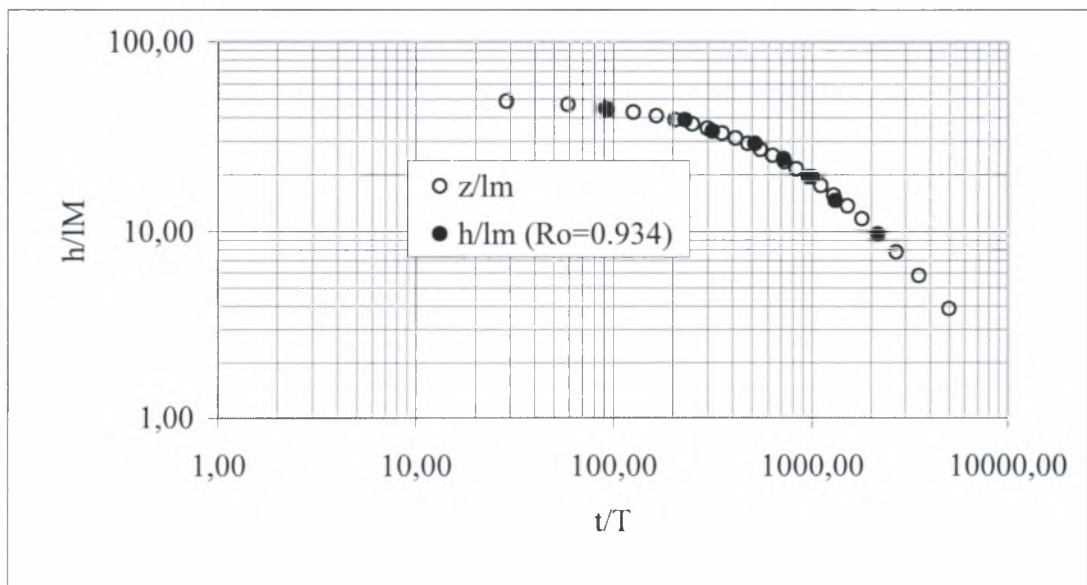
Διάγραμμα 4.21 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τετραγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.389$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



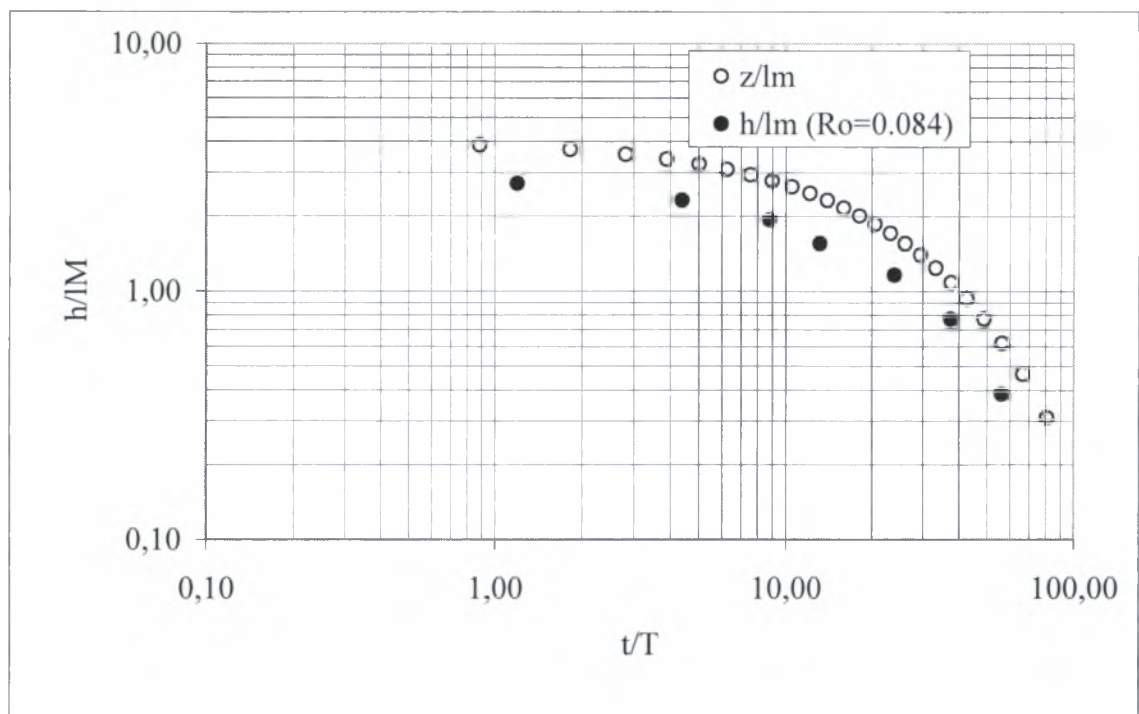
Διάγραμμα 4.22 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τετραγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.549$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



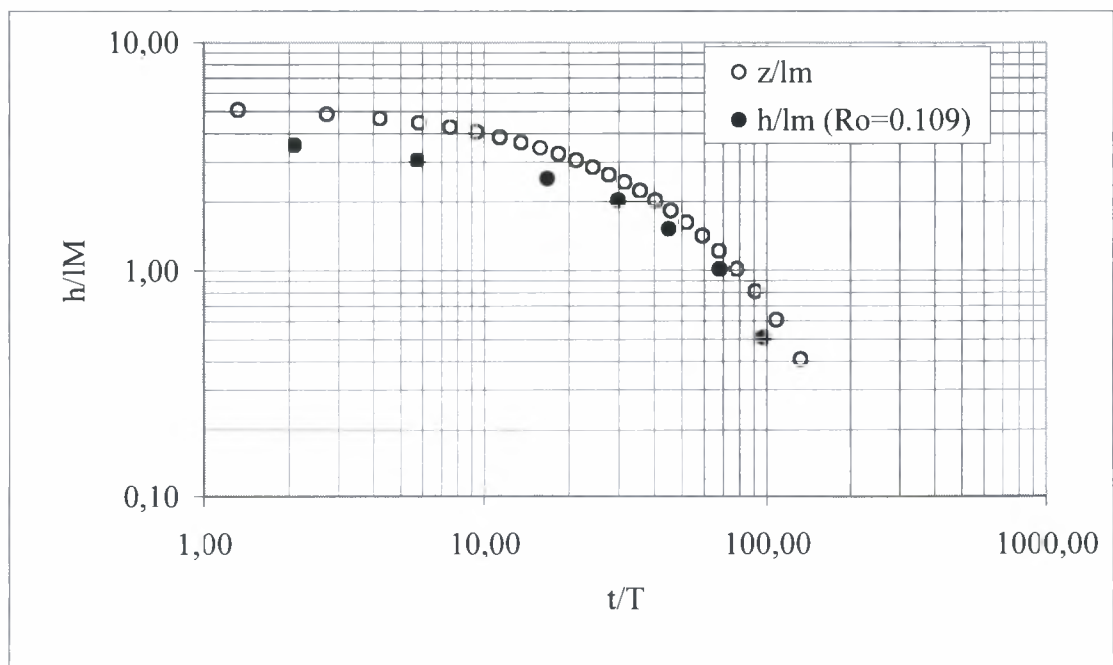
Διάγραμμα 4.23 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τετραγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.389$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



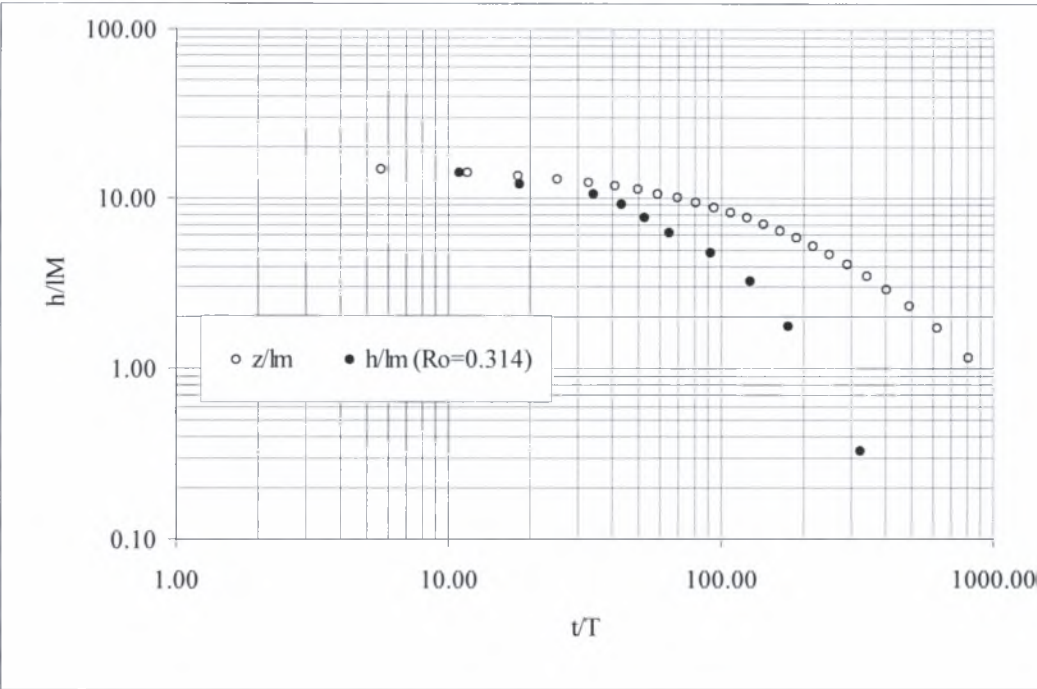
Διάγραμμα 4.24 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το τετραγωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.934$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



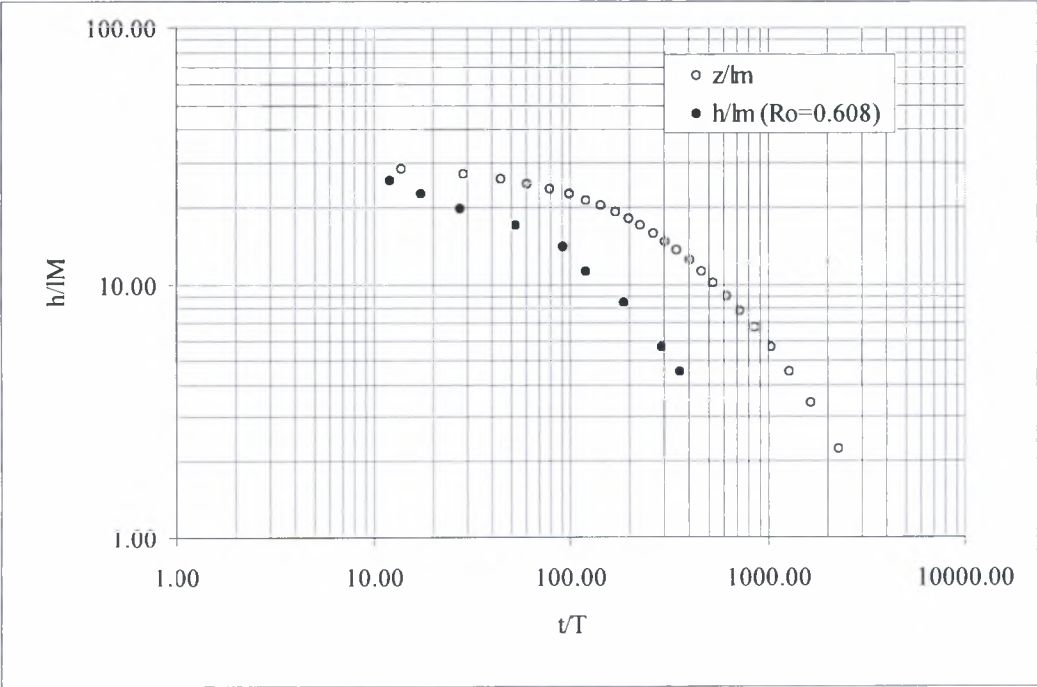
Διάγραμμα 4.25 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το ορθογωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.084$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



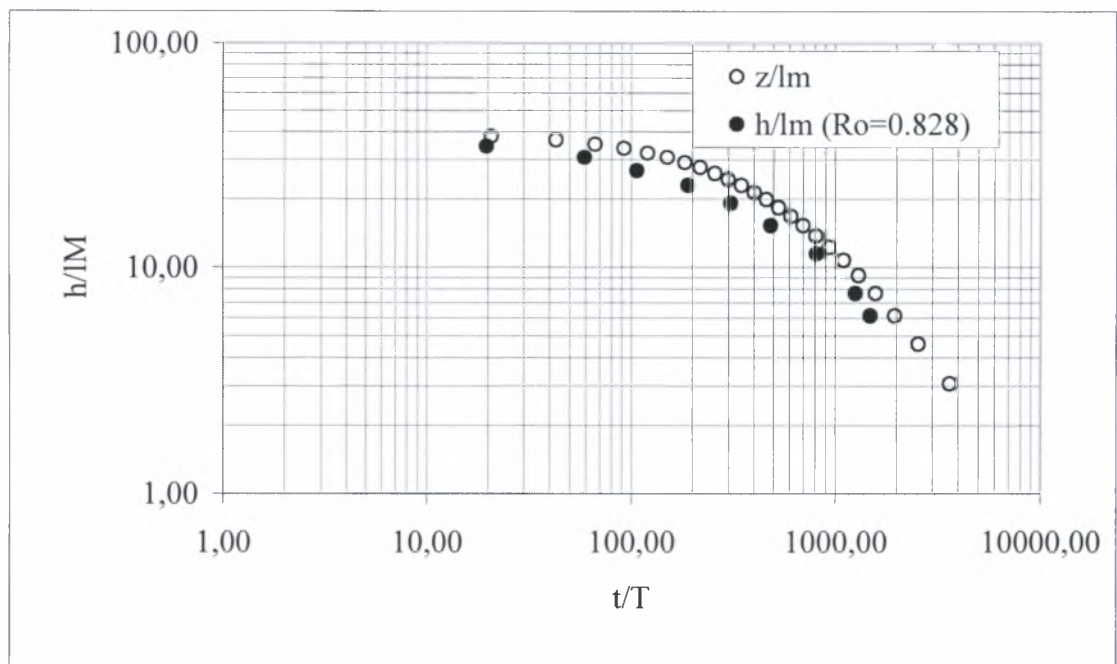
Διάγραμμα 4.26 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το ορθογωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.109$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



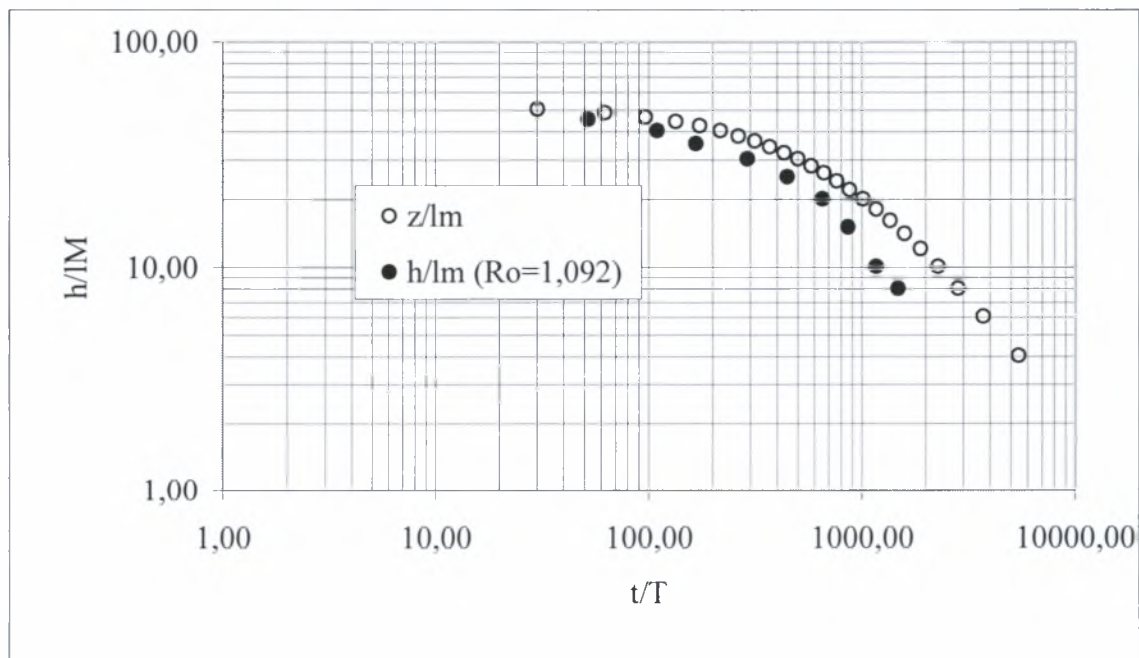
Διάγραμμα 4.27 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το ορθογωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.314$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



Διάγραμμα 4.28 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το ορθογωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.608$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



Διάγραμμα 4.29 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το ορθογωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 0.828$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).



Διάγραμμα 4.30 Αδιαστατοποιημένη απόσταση $h(t)/l_M$ της διεπιφάνειας από το ορθογωνικό ακροφύσιο σαν συνάρτηση του αδιαστατοποιημένου χρόνου t/T ($T=M/B$), για $Ro = 1.092$, ($h(t)/l_M$ – πείραμα, z/l_M – μοντέλο).

4.3 Προσδιορισμός της ταχύτητας της διεπιφάνειας στο χρόνο.

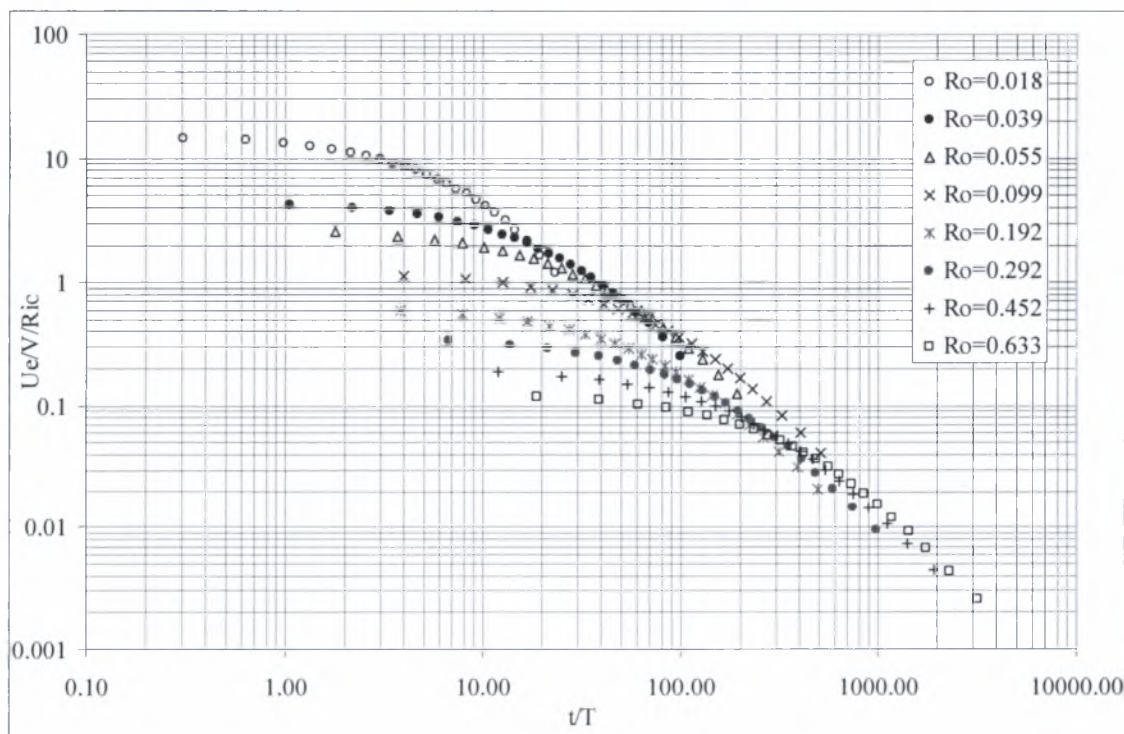
Η ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας είναι

$$u_e(h) = \frac{dh}{dt}. \quad (4.15)$$

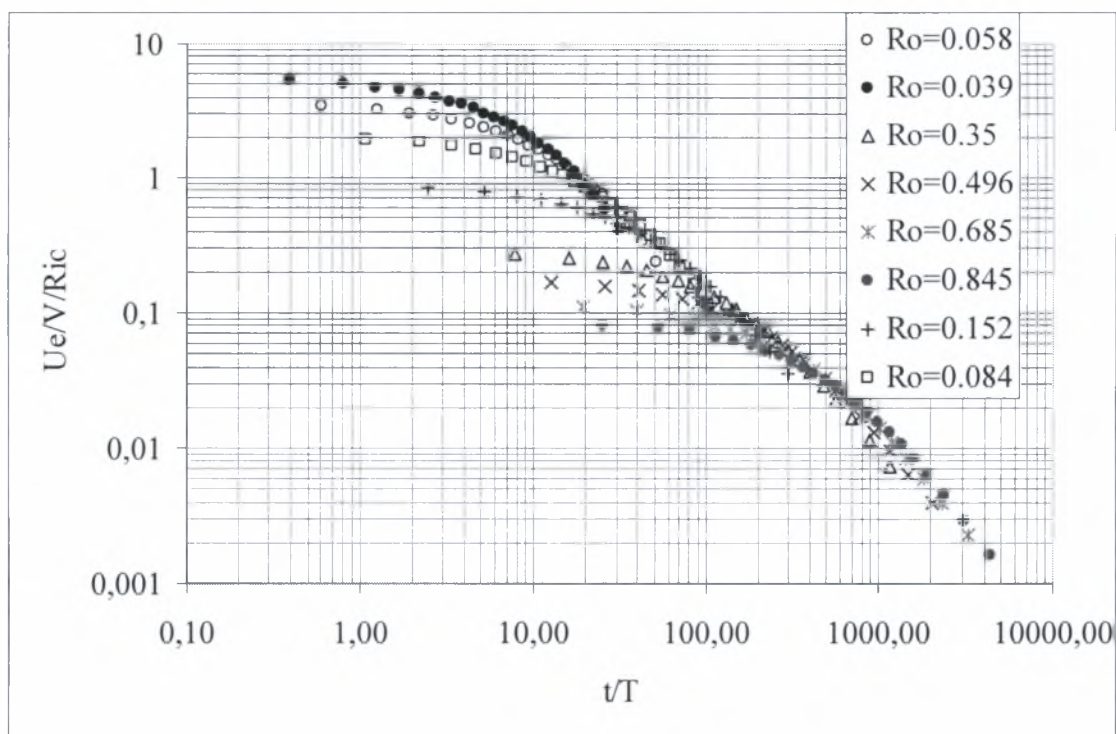
Η χαρακτηριστική ταχύτητα της ροής μπορεί να εκτιμηθεί από τα αρχικά δεδομένα της φλέβας ότι είναι

$$V = \frac{B^{1/2}}{M^{1/4}}. \quad (4.16)$$

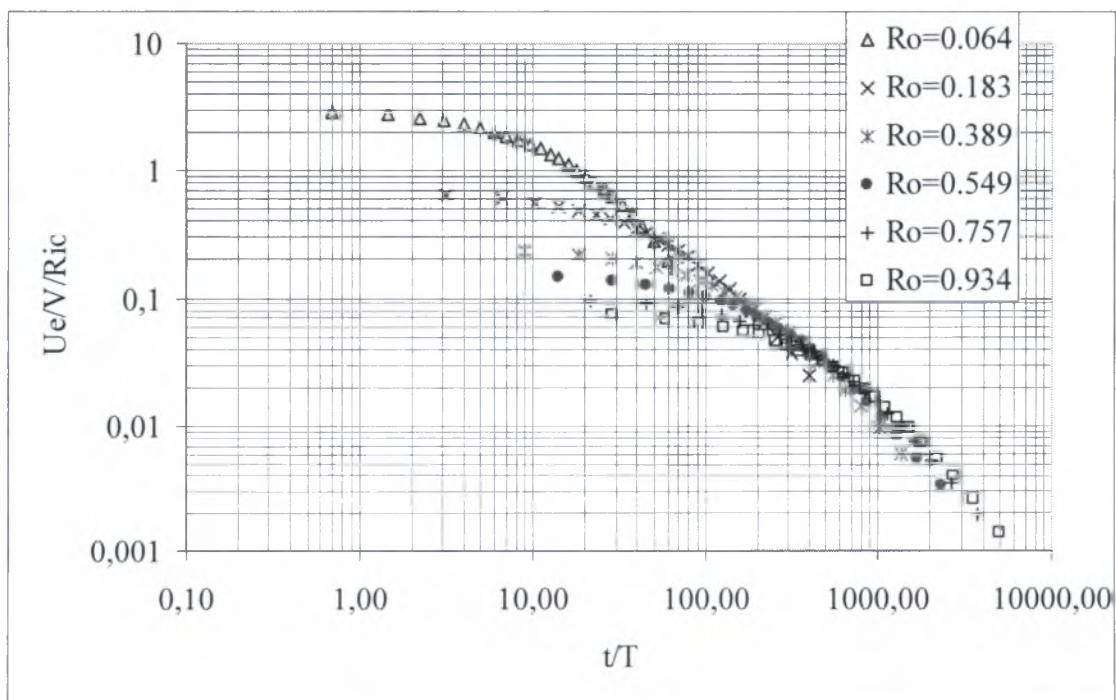
Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνεται η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.018 έως 0.633 (περίπου αριθμός Richardson ενός πλουμίου). Στη συνέχεια παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα διαγράμματα για τριγωνική, τετραγωνική και ορθογωνική διατομή ακροφυσίου. Παρατηρούμε ότι όσο μικρότερος είναι ο αρχικός αριθμός του Richardson της ροής τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας (jet), ενώ συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο στην περίπτωση του πλουμίου. Επίσης, για μεγάλους αδιάστατους χρόνους η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό (έχει ασυμπτωτικά την ίδια κλίση στο λογαριθμικό διάγραμμα) για όλους τους αρχικούς αριθμούς Richardson της ροής.



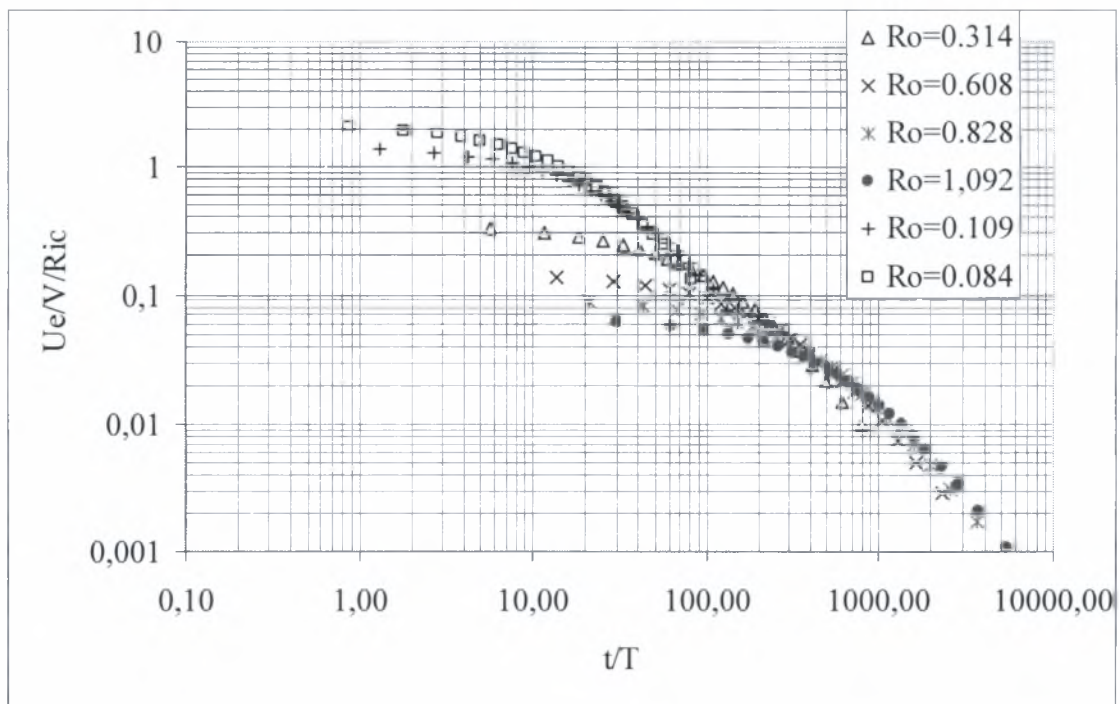
Διάγραμμα 4.31 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.018 έως 0.633 (κυκλικές διατομές).



Διάγραμμα 4.32 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.039 έως 0.845 (τριγωνική διατομής).



Διάγραμμα 4.33 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e/(VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.064 έως 0.934 (τετραγωνικής διατομής).



Διάγραμμα 4.34 Η αδιάστατη ταχύτητα της διεπιφάνειας διηρημένη με τον αρχικό αριθμό του Richardson $u_e / (VR_o)$ σαν συνάρτηση του αδιάστατου χρόνου t/T για αρχικούς αριθμούς του Richardson της ροής από 0.084 έως 1.092 (ορθογωνικής διατομής).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Θεωρούμε ότι σε ένα δοχείο με περιορισμένες διαστάσεις όπου το βάθος είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με την οριζόντια διάσταση του δοχείου, γίνεται ανάμειξη που προκαλείται από κατακόρυφη ανωστική φλέβα. Εάν το ύψος H του δοχείου είναι περίπου όσο η χαρακτηριστική κλίμακα μήκους της φλέβας l_M ο ρυθμός ανάμειξης είναι ταχύτερος (ανάμειξη με απλή φλέβα) απ' ό,τι όταν $H \gg l_M$. Στην τελευταία περίπτωση έχουμε ανάμειξη ενός πλουμίου με το ρευστό δοχείου περιορισμένου όγκου.

Μελετήθηκε η ανάμειξη σε δοχείο περιορισμένου όγκου που προκαλείται από κατακόρυφες ανωστικές φλέβες με τέσσερις τύπους ακροφυσίων, κυκλικά, τριγωνικά, τετραγωνικά και ορθογωνικά με λόγο πλευρών 2:1. Στους τρεις τελευταίους τύπους ακροφυσίων οι γωνίες είναι στρογγυλευμένες. Οι φλέβες που χρησιμοποιήθηκαν (για όλες τις περιπτώσεις των ακροφυσίων), καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή, από τις απλές (jets), τις ανωστικές (buoyant jets) έως και τα πλούμια.

Στα πειράματα που διεξήχθησαν καταγράφηκε η στάθμη της διεπιφάνειας αναμειγμένου και μή αναμειγμένου ρευστού σαν συνάρτηση του χρόνου. Η ταχύτητα με την οποία μετακινείται η διεπιφάνεια αναμειγμένου και μή αναμειγμένου ρευστού σε ένα δοχείο με περιορισμένο όγκο εξαρτάται από τις διαστάσεις του δοχείου και τον τύπο της φλέβας που προκαλεί την ανάμειξη. Επίσης, όπως φάνηκε από τα πειραματικά δεδομένα, εξαρτάται και από τον τύπο του ακροφυσίου που χρησιμοποιήθηκε.

Εφαρμόστηκε ένα μοντέλο πρόγνωσης της στάθμης της διεπιφάνειας, βασισμένο στη θεωρία των List & Imberger (1973) για κυκλικές φλέβες.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι κοντά στα δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων σε κυκλικές ανωστικές φλέβες, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε περιγράφει την στάθμη της διεπιφάνειας στο χρόνο με ικανοποιητική ακρίβεια. Για αρχικούς αριθμούς του Richardson της φλέβας $R_0 < 0.10$ υπάρχουν αποκλίσεις στην πρόγνωση του μοντέλου σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις. Όταν ο αριθμός Richardson $R_0 > 0.10$, δηλαδή για αρχικά ανωστικές κυκλικές φλέβες και πλούμια, η πρόγνωση της στάθμης της διεπιφάνειας με το μοντέλο δεν διαφέρει ουσιαστικά από την μετρημένη στάθμη.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου και των πειραματικών μετρήσεων αποκλίνουν από τις μετρήσεις σε τριγωνικές φλέβες, για όλους σχεδόν τους αρχικούς αριθμούς Richardson της φλέβας, εκτός από αυτούς στην περιοχή του πλουμίου. Το μοντέλο δείχνει βραδύτερους ρυθμούς ανάμειξης στις περιοχές της απλής και της ανωστικής φλέβας, ενώ στην περιοχή του πλουμίου ο ρυθμός ανάμειξης της πρόγνωσης συμπίπτει με τις μετρήσεις.

Στις φλέβες από το τετραγωνικό ακροφύσιο, για $R_0 < 0.25$ το μοντέλο μας δίνει ταχύτερους ρυθμούς ανάμειξης σε σχέση με τις μετρήσεις, ενώ για $R_0 > 0.25$ η πρόγνωση είναι εξαιρετική σε σχέση με τις μετρήσεις.

Οι ορθογωνικές (με λόγο πλευρών 2:1) ανωστικές φλέβες που διαχέονται σε ομογενή αποδέκτη, δείχνουν ταχύτερους ρυθμούς ανάμειξης σε σχέση με την πρόγνωση του μοντέλου σε ολόκληρη την περιοχή, δηλαδή από τις απλές φλέβες μέχρι και τα πλούμια. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με τις μετρήσεις των Ho & Gutmark (1987) σε απλές ελλειπτικές φλέβες με λόγο αξόνων 2:1, πράγμα που σημαίνει ότι ακόμη και ανωστικές φλέβες από πεπλατυσμένα στόμια με λόγο διαστάσεων 2:1, προκαλούν ταχύτερους ρυθμούς διάλυσης απ' ό,τι οι αντίστοιχες αξονοσυμμετρικές.

Η κατακόρυφη ταχύτητα της διεπιφάνειας εξαρτάται από τον αρχικό αριθμό του Richardson R_0 της ροής. Όσο μικρότερος είναι ο R_0 , τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας, ενώ συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο στην περίπτωση του πλουμίου. Επίσης, για μεγάλους αδιάστατους χρόνους η αδιαστατοποιημένη ταχύτητα ανόδου της διεπιφάνειας μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό (έχει ασυμπτωτικά την ίδια κλίση στο λογαριθμικό διάγραμμα) για όλους τους αρχικούς αριθμούς Richardson της ροής.

Όταν αυξάνεται ο R_0 , ο ρυθμός αύξησης του ύψους της διεπιφάνειας μειώνεται σε σχέση με το χρόνο. Έτσι για δύο φλέβες με $R_{01} > R_{02}$, το ύψος της διεπιφάνειας της πρώτης θα είναι μικρότερο της δεύτερης μετά από την ανάμειξη που προκαλείται για έναν δεδομένο χρόνο t , τον ίδιο και για τις δύο φλέβες.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abbiss, J.B., Bradbury, L.J.S., and Wright, M.P., 1975. *Measurements on a an axisymmetric jet using a photon correlator*. In Proc. Of the LDA symposium, Copenhagen, 319-335
- Auban, O., Lemoine, F., Vallete, P., and Fontaine J.R., 2001. *Simulation by solutal convection of a thermal plume in a confined stratified environment, application to displacement ventilation*. Int. J. Heat Mass Transfer, **44**, 4679-4691
- Baines W.D., & Turner J.S., 1968. *Turbulent buoyant convection from a source in a confined region*. J. Fluid Mech., **37**, 51–80.
- Barnett S.J., 1991. *The dynamics of buoyant releases in confined spaces*. Ph.D. thesis. The University of Cambridge, 166 pp.
- Becker, H.A., Hottel, H.C., and Williams, G.C. , 1967. *On the light scattering technique for the study of turbulence and mixing*. J. Fluid Mech., **30**, 259-284.
- Birch, A.D., Brown, D.R., Dodson, M.G., and Thomas, J.R., 1978. *The turbulent concentration field of a methane jet*. J. Fluid Mech., **88**, 431-449.
- Bloomfield L.J., Kerr R.C., 1998. *Turbulent fountains in a stratified fluid*. Journal of Fluid Mechanics, **385**:335–56.
- Caulfield, C. P. & Woods, A.W., 1995. *Plumes with non-monotonic mixing behaviour*. Geophys. Astrophys. Fluid Dyn., **79**, 173-199.
- Forstall, W. and Gaylord, E.W., 1955. *Momentum and mass transfer in a submerged water jet*. J. Appl. Mech., **22**, 161-164.
- Germeles, A. E., 1975. *Forced plumes and mixing of liquids in tanks*. J. Fluid Mech., **71**, 601-623.
- Hinze, J. O. and van der Hegge Zijen, B.G. 1949. *Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetric jet*. Appl. Sci. Res., **A1**, 435-461.
- Ho, C.M. & Gutmark. E., 1987. *Vortex induction and entrainment in a small-aspect-ratio elliptic jet*. J. Fluid Mech., **179**, 383.
- Hunt G.R., Linden P.F. *Steady-state flows in an enclosure ventilated by buoyancy forces assisted by wind*. Journal of Fluid Mechanics 2001, **426**,355–86.
- Hunt, G. R., Cooper, P. & Linden, P. F., 2001. *Thermal stratification produced by plumes and jets in enclosed spaces*. Building Environ, **36**, 871-882.
- Hunt, G. R., & Kaye, N. G., 2001. *Virtual origin correction for lazy turbulent plumes*. J. Fluid Mech., **435**, 377-396.
- Lau, J.C., Morris, P.J., and Fisher, M.J., 1979. *Measurements in subsonic and supersonic free jets using a laser velocimeter*. J. Fluid Mech., **93**, 1-27.
- List, E. J., 1982. *Turbulent jets and plumes*. Annu. Rev. Fluid Mech., **14**, 189-212.
- List, E.J. & Imberger, J., 1973. *Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes*. ASCE J. Hyd. Div. **99** (9), 1461 - 1474.

- Morton B.R., Taylor G.I., Turner J.S., 1956. *Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources*. Proceedings of the Royal Society A, **234**, 1–23.
- Morton BR, 1959. *Forced plumes*. Journal of Fluid Mechanics, **5**, 151–63.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J., 1988. *Investigations of round vertical turbulent buoyant jets*. J. Fluid Mech., **195**, 341–391.
- Papanicolaou, P.N., 1984. E.J., *Mass and momentum transport in a turbulent buoyant vertical axisymmetric jet*. Rep. KH-R-46, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Inst. of Technology, Pasadena, California.
- Παπανικολάου, Π.Ν., 2002. *Σημειώσεις Πειραματικής Υδραυλικής*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Rosenweig, R.E., Hottel, H.C., and Williams, G.C. 1961. *Smoke scattered light measurement of turbulent concentration fluctuations*. Chem. Eng. Sci., **15**, 111–129.
- Ribeiro, M.M. and Whitelaw, J.H., 1980. *The structure of turbulent jets*. Proc. Roy. Soc. London, **A370**, 281–301.
- Turner JS., 1986. *Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows*. Journal of Fluid Mechanics, **173**, 431–71.
- Turner J.S., 1966. *Jets and plumes with negative or reversing buoyancy*. Journal of Fluid Mechanics, **26**, 779–92.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Ξένα Σύμβολα

A	Εμβαδόν διατομής (cm^2)
B	Ανωστική δύναμη (cm^4/s^3)
D	Διάμετρος διατομής ή ισοδύναμη διάμετρος (cm)
F	Ένδειξη παροχής ροομέτρου
l_Q	Χαρακτηριστική κλίμακα μήκους (cm)
l_M	Χαρακτηριστική κλίμακα μήκους (cm)
M	Ειδική ορμή (cm^4/s^2)
h	Απόσταση διεπιφάνειας από το στόμιο εκροής της φλέβας
P	Βρεχόμενη περίμετρος (cm)
Q	Παροχή φλέβας (cc/s)
R	Υδραυλική ακτίνα (cm)
Re	Αριθμός Reynolds
R_o	Αρχικός αριθμός Richardson
T_a	Θερμοκρασία νερού δοχείου ($^{\circ}\text{C}$)
t	Χρόνος (s)
T	Κλίμακα χρόνου (s)
τ	Συνολικός χρόνος πλήρωσης της κύριας δεξαμενής (s)
T_o	Χρόνος που χρειάζεται η φλέβα να φτάσει στον πυθμένα της κύριας δεξαμενής (s)
W	Μέση ταχύτητα εξόδου της φλέβας από το ακροφύσιο (cm/s)

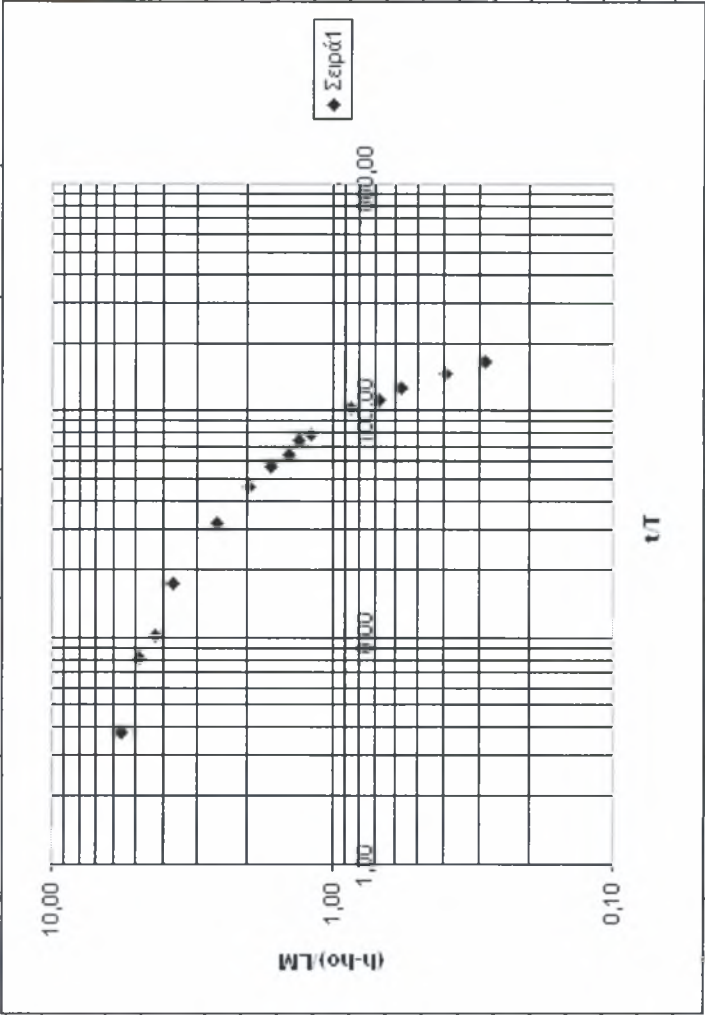
Ελληνικά Σύμβολα

$\Delta\rho$	Διαφορά πυκνότητας
ρ_a	Πυκνότητα νερού δοχείου (Kg/m^3)
ρ_o	Πυκνότητα εκτοξευόμενης φλέβας (Kg/m^3)
ν	Κινηματικό ιξώδες

JET KYKΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 3Η									

JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 4Η									
			rho-amb	rho-jet	ToC							
			996,8354	1012,000	26							
										V_KIV. ΙΞΩΔΕΣ		
										0,00866659		
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	rho-jet	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re	IM	IQ	Ri	T (s)
0,5	0,55	9,9487	50,67	996,8354	1012,000	504,084	146,2466	2923,2	8,797	0,443	0,050371021	3,45
breakdown ho (cm)	2,5											
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm								
13	51,9	49,4	3,77	5,62								
28	45	42,5	8,12	4,83								
35	40	37,5	10,15	4,26								
60	35	32,5	17,41	3,69								
110	25	22,5	31,91	2,56								
158	20	17,5	45,84	1,99								
195	17	14,5	56,57	1,65								
220	15	12,5	63,83	1,42								
255	14	11,5	73,98	1,31								
270	13	10,5	78,33	1,19								
353	10	7,5	102,41	0,85								
388	8,5	6	112,57	0,68								
435	7,5	5	126,20	0,57								
500	6	3,5	145,06	0,40								
570	5	2,5	165,37	0,28								

t/T	(h-ho)/lm
3,77	5,62
8,12	4,83
10,15	4,26
17,41	3,69
31,91	2,56
45,84	1,99
56,57	1,65
63,83	1,42
73,98	1,31
78,33	1,19
102,41	0,85
112,57	0,68
126,20	0,57
145,06	0,40
165,37	0,28



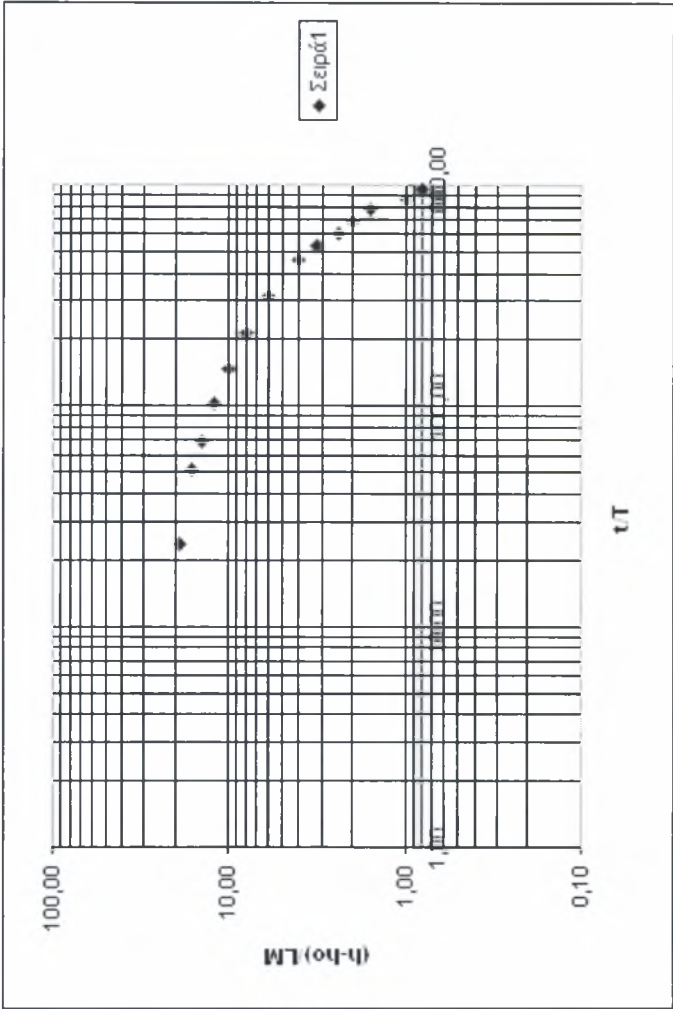
JET KYKAIKHΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 5H									
												</

JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 6Η						
			rho-amb	rho-jet	ToC				
			996,8354	1012,000	26				
						V_KIV. ιξώδες			
						0,00866659			
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re	IQ	IM
0,5	0,65	12,9902	66,16	996,8354	859,413	190,9569	3816,9	0,443	11,486
breakdown ho (cm)	2,5								
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h- ho)/lm					
9	51,9	49,4	2,00	4,30					
15	45	42,5	3,33	3,70					
23	40	37,5	5,11	3,26					
36	35	32,5	8,00	2,83					
50	30	27,5	11,11	2,39					
64	25	22,5	14,22	1,96					
100	20	17,5	22,22	1,52					
124	17	14,5	27,55	1,26					
140	15	12,5	31,11	1,09					
211	10	7,5	46,88	0,65					
267	8,5	6	59,33	0,52					
315	6,5	4	69,99	0,35					
367	5	2,5	81,55	0,22					

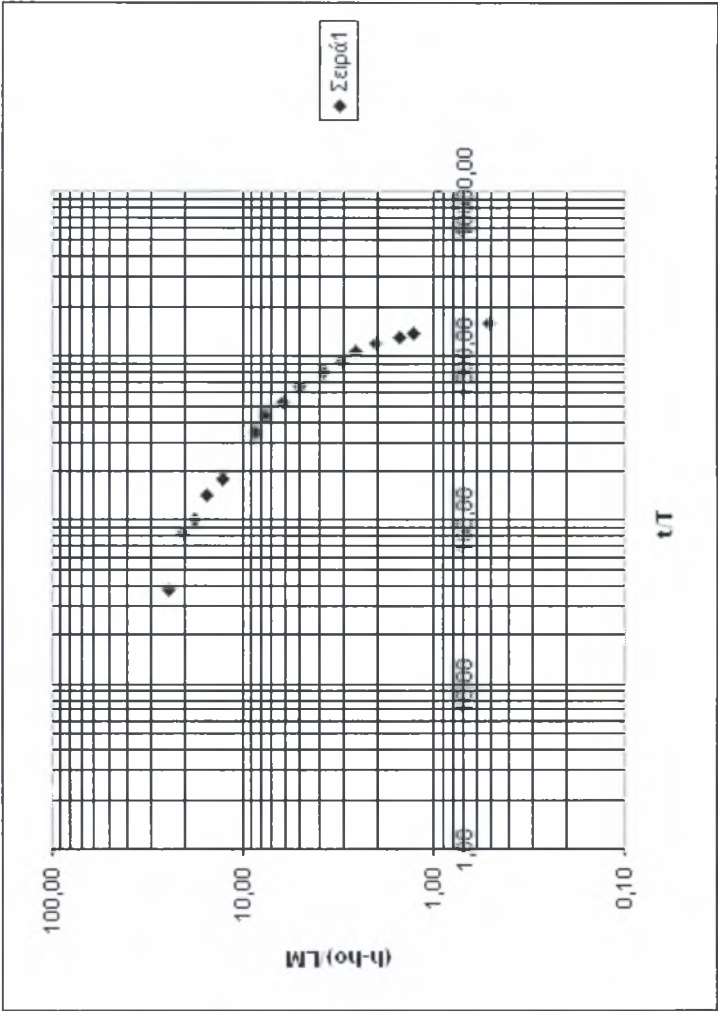
JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 7Η									
			rho-amb	rho-jet	ToC							
			996,8354	1012,000	26							
						V_KIV. ιξώδες						
						0,00866659						
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	rho-jet	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re	IM	IQ	Ri	T (s)
1	0,75	14,7772	18,81	996,8354	1012,000	278,032	217,2259	2171,0	4,620	0,886	0,191835919	1,28
breakdown ho (cm)	5											
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm								
12	51,9	46,9	9,38	10,15								
29	45	40	22,66	8,66								
50	33	28	39,06	6,06								
80	27	22	62,50	4,76								
110	23	18	85,94	3,90								
160	19	14	125,01	3,03								
192	18	13	150,01	2,81								
229	16	11	178,92	2,38								
280	14	9	218,76	1,95								
322	13	8	251,58	1,73								
345	12	7	269,55	1,52								
365	11	6	285,17	1,30								
437	10	5	341,43	1,08								
530	9	4	414,09	0,87								

t/T	(h-ho)/LM
0	100,00
10	10,00
20	4,00
30	2,50
40	1,80
50	1,40
60	1,10
70	0,90
80	0,75
90	0,65
100	0,50

JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 10Η				
			rho-amb	rho-jet	ToC		
			997,09	1013,000	25		
						V. KIV. ΙΞΩΔΕΣ	
						0,00886129	
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re
1	0,45	8,1855	10,42	997,09	85,310	126,1174	1176,1
breakdown ho (cm)	5						
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm			
16	51,9	46,9	23,65	18,76			
35	45	40	51,74	16,00			
47	40	35	69,48	14,00			
70	35	30	103,48	12,00			
100	30	25	147,83	10,00			
146	25	20	215,84	8,00			
213	20	15	314,89	6,00			
312	15	10	461,24	4,00			
363	13	8	536,64	3,20			
406	11	6	600,21	2,40			
463	10	5	684,47	2,00			
520	9	4	768,74	1,60			
585	7,5	2,5	864,83	1,00			
645	7	2	953,53	0,80			

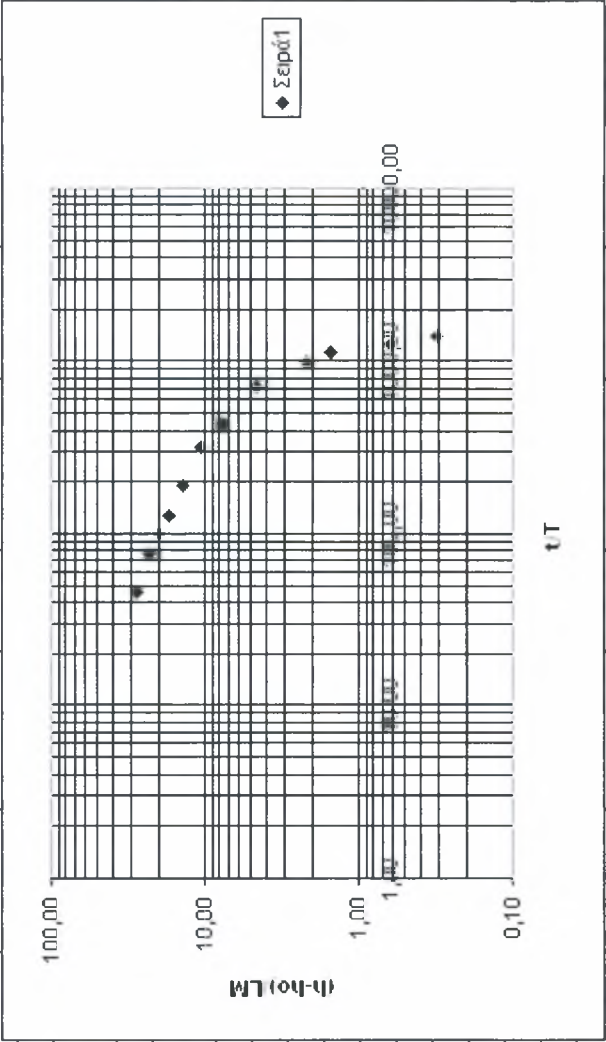


JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 11Η				
			rho-amb	rho-jet	ToC		
			997,09	1013,000	25		
						V_KIV. Ιξώδες	
						0,00886129	
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re
1	0,35	6,4223	8,18	1013,000	52,516	98,9510	922,8
breakdown ho (cm)	5						
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm			
20	51,9	46,9	37,68	23,91			
44	45	40	82,91	20,40			
54	40	35	101,75	17,85			
75	35	30	141,32	15,30			
94	30	25	177,12	12,75			
183	22	17	344,81	8,67			
230	20	15	433,37	7,65			
278	17	12	523,81	6,12			
348	15	10	655,70	5,10			
430	12,5	7,5	810,21	3,82			
485	11	6	913,84	3,06			
566	10	5	1066,46	2,55			
630	9	4	1187,05	2,04			
690	8	3	1300,10	1,53			
736	7,5	2,5	1386,78	1,27			
840	6	1	1582,74	0,51			



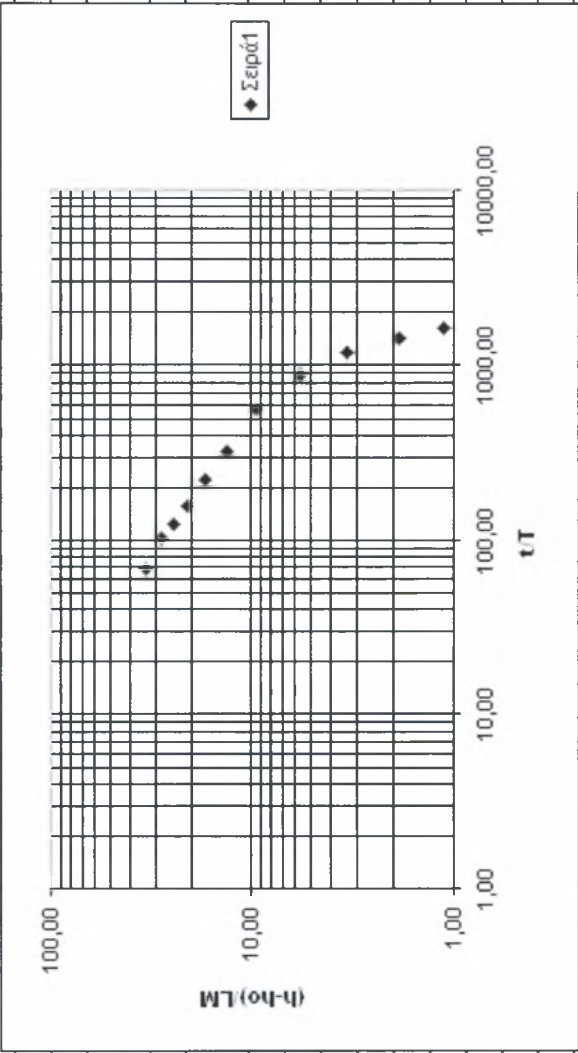
JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				ΜΕΤΡΗΣΗ 13H						
										</

JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				ΜΕΤΡΗΣΗ 15H									

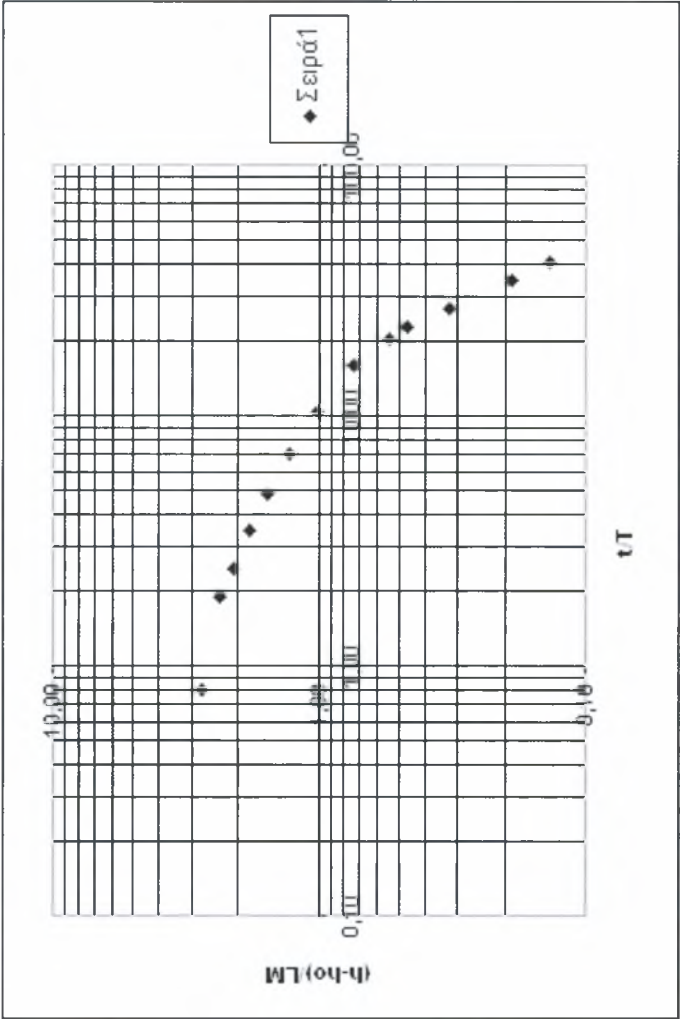


JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 16H									
			rho-amb	rho-jet	ToC							
			996,5714	1013,000	27							
									V_KIV. ΙΞΩΔΕΣ			
									0,00847830			
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	rho-jet	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re	IQ	IM	Ri	T (s)
1,5	0,45	8,1855	4,63	996,5714	1013,000	37,916	130,2283	819,5	1,329	1,339	0,992831037	0,29
breakdown ho (cm)	7,5											
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm								
20	51,9	44,4	68,69	33,16								
30	45	37,5	103,04	28,01								
36	40	32,5	123,65	24,27								
46	35	27,5	158,00	20,54								
64	30	22,5	219,82	16,80								
95	25	17,5	326,30	13,07								
165	20	12,5	566,72	9,34								
255	15	7,5	875,85	5,60								
347	12	4,5	1191,84	3,36								
413	10	2,5	1418,53	1,87								
475	9	1,5	1631,48	1,12								

</



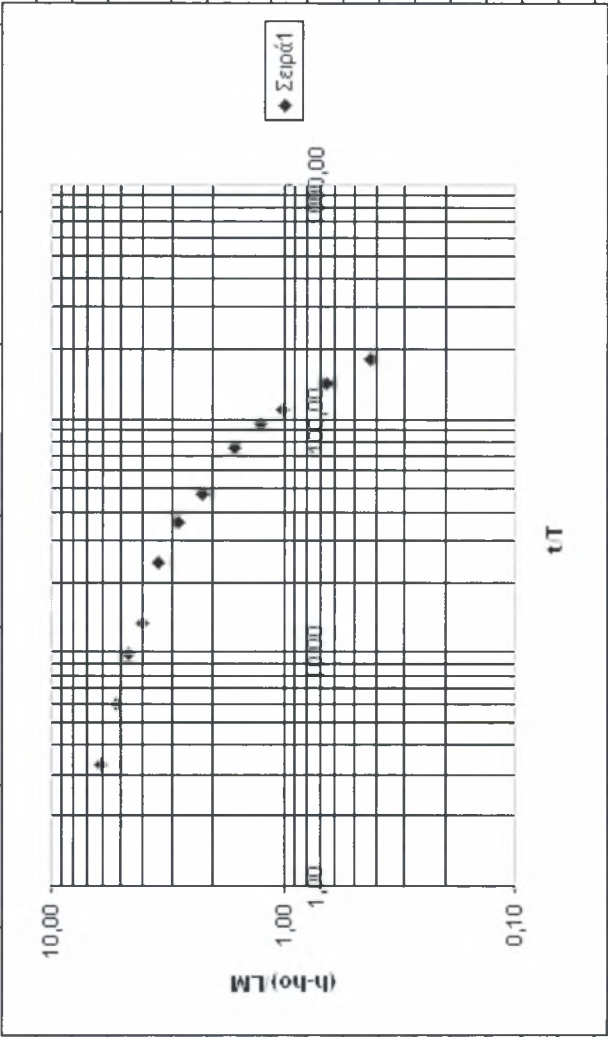
JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 17Η			
			rho-amb	rho-jet	T°C	
			997,09	1021,000	25	
						V ΚΙΝ. ΙΞΙΩΔΕΣ
						0,00886129
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	B(cm ⁴ /s ³)	Re
0,3	0,6	12,0967	171,13	997,09	2070,148	5793,7
breakdown ho (cm)	1,5					
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm		
6	51,9	50,4	0,81	2,74		
14	45	43,5	1,88	2,36		
18	40	38,5	2,42	2,09		
26	35	33,5	3,49	1,82		
36	30	28,5	4,83	1,55		
52	25	23,5	6,98	1,28		
78	20	18,5	10,47	1,00		
118	15	13,5	15,84	0,73		
150	11,5	10	20,14	0,54		
170	10	8,5	22,82	0,46		
200	7,5	6	26,85	0,33		
260	5	3,5	34,90	0,19		
304	4	2,5	40,81	0,14		



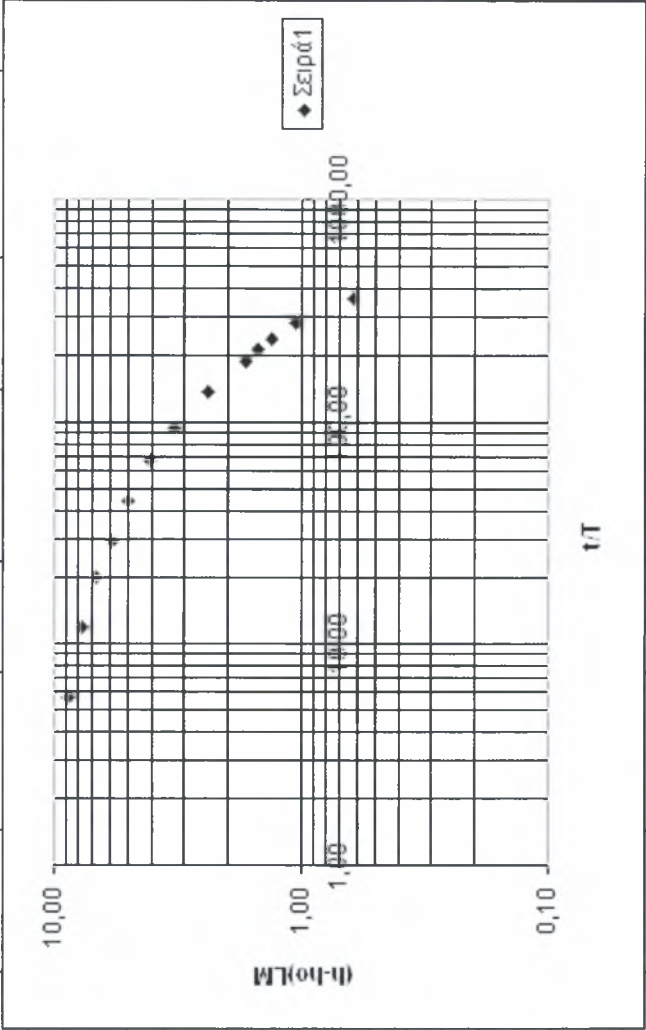
JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				ΜΕΤΡΗΣΗ 18Η									
				rho-amb	rho-jet	ToC							
				996,8354	1021,000	26							
							V_KIV. Ιξώδες						
							0,00866659						
D(cm)		indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	rho-jet	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re	IQ	IM	Ri	T (s)
0,3		0,8	15,6707	221,70	996,8354	1021,000	3474,117	363,8407	7674,1	0,266	23,723	0,011206978	9,55
breakdown ho (cm)		1,5											
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm									
5	51,9	50,4	0,52	2,12									
15	40	38,5	1,57	1,62									
23	35	33,5	2,41	1,41									
31	30	28,5	3,25	1,20									
43	25	23,5	4,50	0,99									
53	20	18,5	5,55	0,78									
83	15	13,5	8,69	0,57									
126	10	8,5	13,20	0,36									
202	5	3,5	21,16	0,15									
230	4	2,5	24,09	0,11									

Scatter plot showing the relationship between $\frac{h-ho}{lm}$ (Y-axis) and $\frac{t}{T}$ (X-axis). The data points represent 'Σειρά 1'.

JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 20Η									
			</									



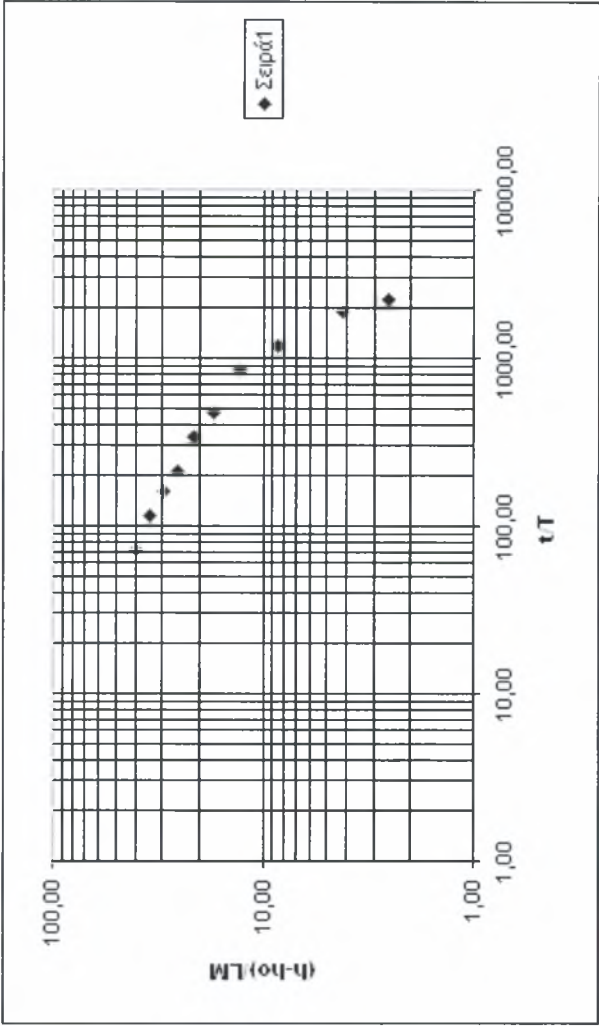
JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 21Η									
			rho-amb	rho-jet	ToC							
			996,5714	1021,000	27							

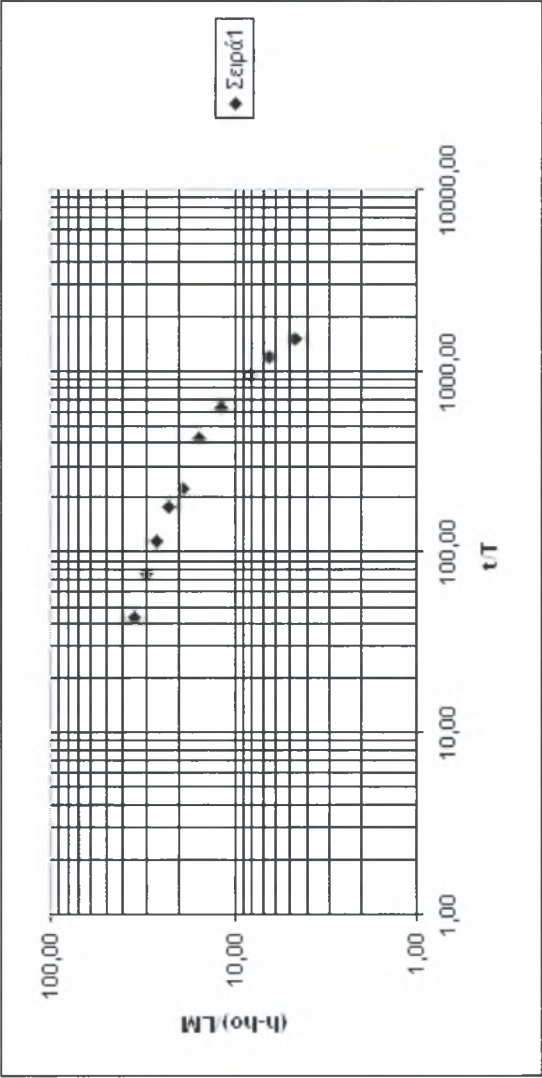


JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				ΜΕΤΡΗΣΗ 28H							
				rho-amb	rho-jet	ToC					
				996,5714	1020,000	27					
							V_KIV. ΙΣΩΔΕΣ				
							0,00847830				
D(cm)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	rho-jet	M (cm4/s2)	B(cm4/s3)	Re	IM	Ri	T (s)
1	0,35	6,4223	8,18	996,5714	1020,000	52,516	144,7124	964,5	1,622	0,546486389	0,36
breakdown ho (cm)	5										
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm							
17	51,9	46,9	46,85	28,92							
30	45	40	82,67	24,67							
41	40	35	112,98	21,58							
52	35	30	143,29	18,50							
69	30	25	190,14	15,42							
108	25	20	297,60	12,33							
185	20	15	509,78	9,25							
270	15	10	744,01	6,17							
474	10	5	1306,15	3,08							
543	8	3	1496,28	1,85							

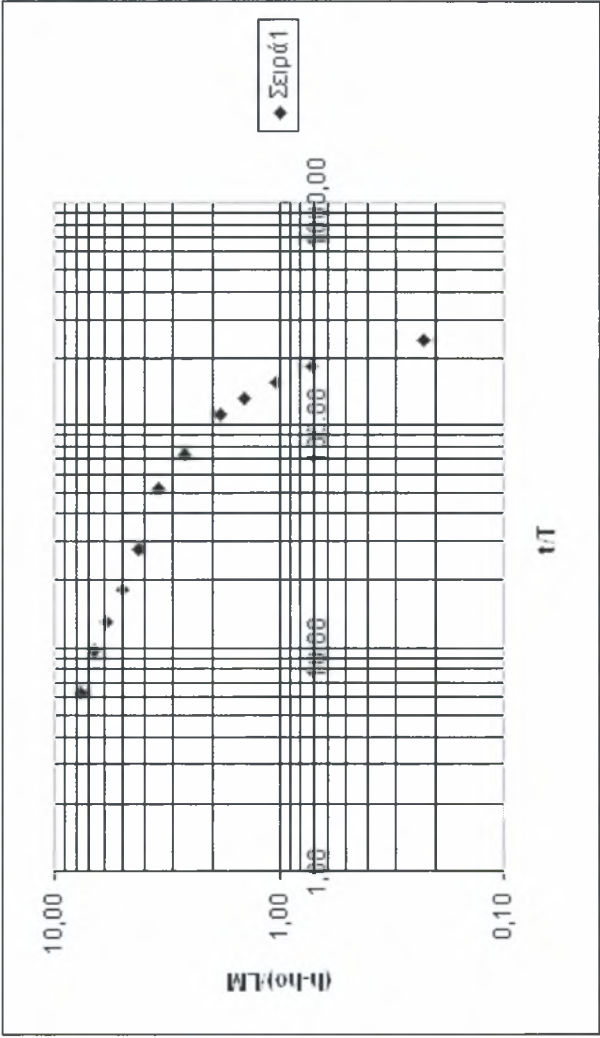
t/T	(h-ho)/lm
10	20
20	15
30	12
40	10
50	8
100	4
200	2
500	1,5
1000	1,2

JET ΚΥΚΛΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				ΜΕΤΡΗΣΗ 30Η							



JET ΤΡΙΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				ΜΕΤΡΗΣΗ 34Η									
					rho-amb	rho-jet	T°C						
					996,298	1010,000	28						
A(cm ⁴)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	rho-jet	M (cm ⁴ /s ²)	B(cm ⁷ /s ³)	ν κιν. ιξωδες	Re	Iq	Im	Ri	T (s)
0,8986	0,25	4,6591	5,18	996,298	1010,000	24,157	62,0060	0,00829613	561,6	0,948	1,384	0,685049233	0,39
breakdown ho (cm)	3,5812												
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/Im									
17	51,9	48,3188	43,64	34,92									
30	45	41,4188	77,00	29,93									
45	40	36,4188	115,51	26,32									
69	35	31,4188	177,11	22,71									
87	30	26,4188	223,31	19,09									
165	25	21,4188	423,53	15,48									
243	20	16,4188	623,74	11,87									
371	15	11,4188	952,29	8,25									
460	12,5	8,9188	1180,74	6,45									
582	10	6,4188	1493,89	4,64									

JET ΤΡΙΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			ΜΕΤΡΗΣΗ 36Η										
				rho-amb	rho-jet	T°C							
				996,298	1010,000	28							
A(cm ²)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb	rho-jet	M (cm ⁴ /s ²)	B(cm ⁴ /s ³)	ν_κιν. ιξώδες	Re	I _Q	I _M	Ri	T (s)
0,8986	1,1	21,0317	23,40	996,298	1010,000	492,246	279,9020	0,00829613	2535,1	0,948	6,246	0,151757246	1,76
breakdown ho (cm)	3,5812												
t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/I _M									
11	51,9	48,3188	6,25	7,74									
17	45	41,4188	9,67	6,63									
23	40	36,4188	13,08	5,83									
32	35	31,4188	18,20	5,03									
49	30	26,4188	27,86	4,23									
90	25	21,4188	51,18	3,43									
130	20	16,4188	73,92	2,63									
195	15	11,4188	110,88	1,83									
230	12,5	8,9188	130,78	1,43									
272	10	6,4188	154,67	1,03									
325	8	4,4188	184,80	0,71									
425	5	1,4188	241,66	0,23									



JET ΤΡΙΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

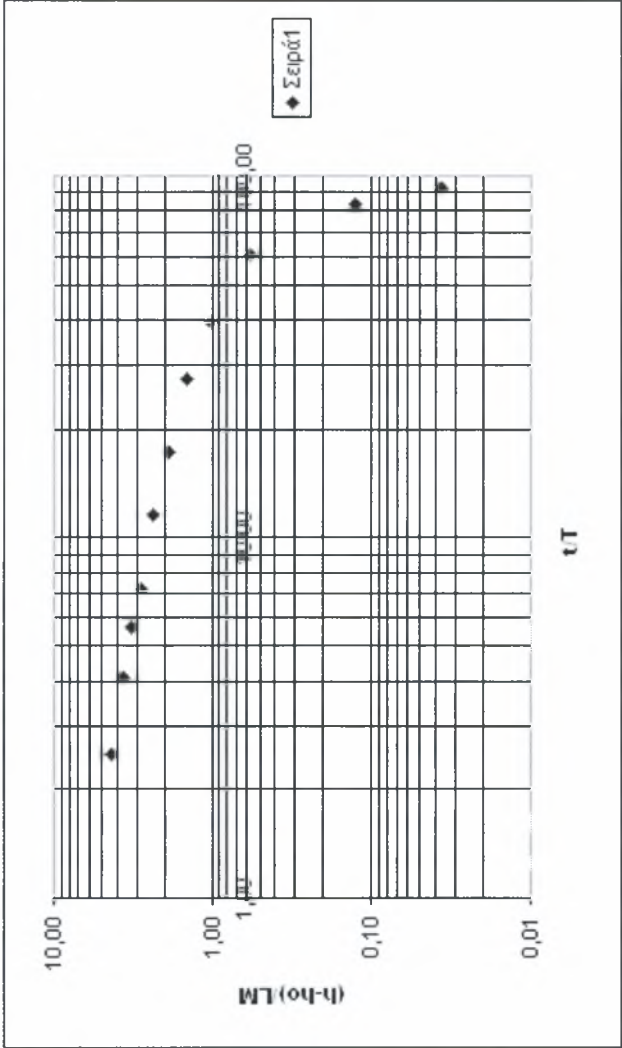
ΜΕΤΡΗΣΗ 37Η

A(cm ²)	indic F(l/min)	Q(cc/sec)	U(cm/sec)	rho-amb					Re	l _q	l _M	Ri	T (s)
					rho-jet	rho-jet	T°C						
0,8986	2	38,0415	42,33	996,298	996,298	1010,000	28		4585,5	0,948	11,298	0,083900816	3,18

breakdown ho
(cm)

3,5812

t (s)	h (cm)	h-ho	t/T	(h-ho)/lm
8	51,9	48,3188	2,51	4,28
13	45	41,4188	4,09	3,67
18	40	36,4188	5,66	3,22
23	35	31,4188	7,23	2,78
37	30	26,4188	11,63	2,34
55	25	21,4188	17,29	1,90
88	20	16,4188	27,66	1,45
125	15	11,4188	39,30	1,01
193	10	6,4188	60,67	0,57
266	5	1,4188	83,62	0,13
294	4	0,4188	92,42	0,04



JET ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ				ΜΕΤΡΗΣΗ 48H									
				</									

