

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

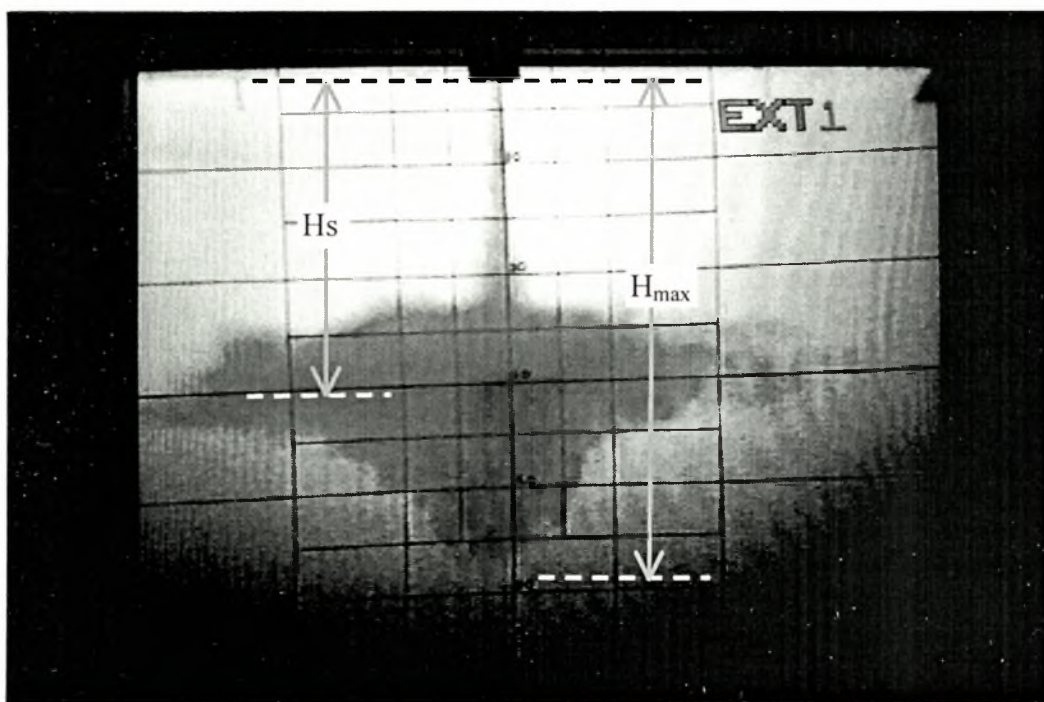
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗ

ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΚΥΚΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΡΘΩΓΩΝΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

ΣΕ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΣΤΡΩΜΑΤΩΜΕΝΟ ΑΠΟΔΕΚΤΗ



ΚΥΡΙΑΚΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΙΔΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ
ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2002



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»

Αριθ. Εισ.: 2307/1
Ημερ. Εισ.: 15-07-2002
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2002
ΚΩΝ

αρ. εισ. 329



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ



004000062888

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της τυρβώδους διάχυσης ανωστικών κυκλικών και ορθογωνικών φλεβών σε γραμμικά στρωματωμένο ήρεμο αποδέκτη.

Έγιναν δύο σειρές πειραμάτων που αφορούν τη

(α) διάχυση της φλέβας σε ομογενή αποδέκτη και (β) διάχυση της φλέβας σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη.

Στα πειράματα σε ομογενή αποδέκτη χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά ακροφύσια κυκλικό, ορθογωνικό, τριγωνικό και τετραγωνικό. Από οπτικές παρατηρήσεις που έγιναν δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στη γωνία διάχυσης των φλεβών.

Στο γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη χρησιμοποιήθηκαν μόνο η κυκλική και ορθογωνική διατομή ακροφυσίου. Για τη δημιουργία της γραμμικής στρωμάτωσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική των δύο δεξαμενών που πρότειναν οι Oster και Yamamoto (1963). Το συνεχώς μειωμένης πυκνότητας νερό, αποτίθεται επιφανειακά στον αποδέκτη, με ειδικά διαμορφωμένους πλωτήρες, ώστε να επιτυγχάνεται ακτινική διάχυση. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκε ένα γραμμικό προφίλ πυκνότητας το οποίο μετρήθηκε με ειδικό αισθητήρα αλατότητας (Head, 1983). Τα αρχικά ανωστικά και κινηματικά χαρακτηριστικά της φλέβας μεταβάλλονταν από πείραμα σε πείραμα ώστε να καλύψουν όλη την περιοχή από απλή φλέβα έως πλούμιο.

Τα πειράματα καταγράφηκαν σε ψηφιακή βιντεοκάμερα από όπου λήφθηκαν οι μετρήσεις για το μέγιστο ύψος ανύψωσης (MYA) και το επίπεδο διάχυσης των φλεβών. Από την επεξεργασία των δεδομένων διαπιστώθηκε ότι στην περιοχή καθαρής φλέβας η ορθογωνική φλέβα συμπαρασύρει μεγαλύτερο όγκο περιβάλλοντος ρευστού, ενώ στην περιοχή του πλουμίου δεν φαίνεται να παρουσιάζουν διαφορές.

Τα αποτελέσματα της κυκλικής φλέβας είναι σύμφωνα με αυτά που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενα πειράματα.

Ένα μονοδιάστατο μοντέλο που προβλέπει το MYA σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, βασίζεται στην παρατήρηση ότι στην περιοχή της απλής φλέβας, ο συντελεστής συμπαράσυρσης πρέπει να είναι περίπου 50% του αντίστοιχου που ισχύει για ομογενή αποδέκτη.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα ερχότανε εις πέρας χωρίς την ανεκτίμητη βοήθεια του επιβλέποντα καθηγητή μου Παναγιώτη Παπανικολάου, Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, τον οποίο θα ήθελα να ευχαριστήσω για την άψογη συνεργασία, τη συμπαράσταση και την άριστη καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ερρίκο Σταπουντζή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια στο θέμα της οπτικοποίησης.

Ακόμη ευχαριστώ τους καθηγητές του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών για τις πολύτιμες γνώσεις. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Αντώνη Διακόπουλο, τον Λέκτορα Νικήτα Μυλόπουλο καθώς και τον Επίκουρο Καθηγητή Ευριπίδη Μυστακίδη για τη βοήθεια και το ενδιαφέρον τους.

Ευχαριστώ τον Ηλία Παπά για την άκρως καθοριστική και σημαντική συμβολή του στο στήσιμο της πειραματικής διάταξης, τον Υδραυλικό Τομέα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών για την υλικοτεχνική υποστήριξη του εργαστηρίου Υδρομηχανικής και Περιβαλλοντικής Τεχνικής, καθώς επίσης και τον Αλέκο Κουτσελίνη για την άψογη συνεργασία του.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τους φοιτητές του Υδραυλικού τομέα για τη συμπαράσταση και τη βοήθεια.

Τέλος ευχαριστώ θερμά τους γονείς μου, οι οποίοι με στήριξαν ηθικά και μου έδωσαν τα απαραίτητα εφόδια ώστε να ολοκληρώσω επιτυχώς τις σπουδές μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Γενικά - τυρβώδης εκτοξευόμενη φλέβα.....	1
1.2	Απλές φλέβες χωρίς ή με άνωση (jets ή plumes) – ορισμοί.....	1
1.3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	3
1.4	Διαστατική ανάλυση και θεωρητικές εκτιμήσεις.....	4
1.5	Ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης κατακόρυφης κυκλικής φλέβας.....	5
1.6	Σκοπός του πειράματος.....	8
2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	9
2.1	Πειραματική διάταξη.....	9
2.2	Σύστημα δημιουργίας γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης.....	16
2.3	Ρύθμιση ροομέτρου.....	23
2.4	Πειραματικές μετρήσεις.....	25
2.6	Δημιουργία στρωμάτωσης.....	31
2.7	Μέτρηση προφίλ πυκνότητας.....	31
2.8	Παρασκευή διαλύματος φλέβας.....	31
2.9	Εκτέλεση πειράματος.....	32
2.10	Περιγραφή Τυπικού Πειράματος.....	32
2.11	Ανάκτηση αποτελεσμάτων.....	36
3.	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ.....	38
4.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	44
4.1	Αδιάστατο ΜΥΑ τυρβώδους ανωστικής φλέβας.....	44
5.	ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	55
6.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	65
7.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	67

Ελληνικά σύμβολα

β	ειδική άνωση ρευστού (ανά μονάδα μάζας) που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου (specific buoyancy flux)
$\Delta\rho$	είναι η κατανομή της διαφοράς ανάμεσα στην μέση τιμή πυκνότητας της φλέβας και του περιβάλλοντος ρευστού στη διατομή A
ΔV	διαφορά δυναμικού
θ	η αδιάστατη διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στην μέση αξονική τιμή και το περιβάλλον ρευστό ($= [\rho_c(z) - \rho_a(z)] / \rho_0$)
λ	είναι ο λόγος του πλάτους 1/e-συγκέντρωσης προς το λόγο του πλάτους της 1/e-ταχύτητας ($= b_c / b_w$)ρ χαρακτηριστική πυκνότητα σε κάποιο σημείο του πεδίου ροής
μ	όγκος ρευστού που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου (specific mass flux ή volume flux)
ρ_0	αρχική πυκνότητα ρευστού της φλέβας
ρ_a	πυκνότητα περιβάλλοντος ρευστού

Αγγλικά σύμβολα

a	συντελεστής συμπαράσυρσης
A	εμβαδόν της διατομής του ακροφυσίου
b(z)	είναι το πλάτος του jet καθορισμένο ως η απόσταση από τον άξονα όπου η μέση ταχύτητα παίρνει την τιμή $w(b) = w_c(z)/e$ ($e=2.718..$) και καλείται 1/e-πλάτος ταχύτητας,
b_c	πλάτος συγκέντρωσης
b_w	πλάτος ταχύτητας
B	αρχική άνωση της φλέβας
C_p	παράμετρος πλάτους της φλέβας ($\mu / z m^{1/2}$)
D	διάμετρος του ακροφυσίου
D_{eq}	ισοδύναμη διάμετρος του ακροφυσίου
f	ένδειξη ροομέτρου
g	είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.
H_{max}	μέγιστο ύψος ανύψωσης
H_s	στάθμη οριζόντιας διάχυσης
l_M	κλίμακα μήκους ($= M^{3/4} / B^{1/2}$)
L_j, L_p	χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους

$L_j = H_{\max} (M / N)^{1/2}$ χαρακτηριστική κλίμακα μήκους με βάση την κινηματική ορμή
M

$L_p = H_{\max} (N^{3/8} / B^{1/4})$ χαρακτηριστική κλίμακα μήκους με βάση την κινηματική
άνωση B

m ειδική ορμή ρευστού (ανά μονάδα μάζας) που διέρχεται από μια διατομή της
φλέβας στη μονάδα χρόνου (specific momentum flux)

M αρχική ειδική ορμή της φλέβας

N συχνότητα άνωσης [= - (g / ρ₀) (dp / dz)]

P βρεχόμενη περίμετρος του ακροφυσίου

Q αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας

R υδραυλική ακτίνα του ακροφυσίου

Re αριθμός Reynolds

Ri αριθμός Richardson

t χρόνος

V όγκος

w η κατανομή της μέσης ταχύτητας στη διατομή A

w_c(z) η μέση ταχύτητα στον άξονα της φλέβας

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

		Σελίδα
Διάγραμμα 4.1	Αδιάστατο ΜΥΑ κυκλικής ανωστικής φλέβας. Διαφορετικά σύμβολα ανά πείραμα	45
Διάγραμμα 4.2	Αδιάστατο ΜΥΑ ορθογωνικής ανωστικής φλέβας. Διαφορετικά σύμβολα ανά πείραμα.	46
Διάγραμμα 4.3	Αδιάστατο ΜΥΑ κυκλικής φλέβας $o-H_m/L_j$, $\bullet-H_m/L_p$	47
Διάγραμμα 4.4	Αδιάστατο ΜΥΑ ορθογωνικής ανωστικής φλέβας. $\square-H_m/L_j$, $\blacksquare-H_m/L_p$	48
Διάγραμμα 4.5	Σύγκριση ΜΥΑ κυκλικής φλέβας από προηγούμενες εργασίες, παρούσα εργασία και υπολογισμό.	49
Διάγραμμα 4.6α	Σύγκριση αδιάστατου ΜΥΑ H_m/L_j , κυκλικής και ορθογωνικής φλέβας	51
Διάγραμμα 4.6β	Σύγκριση αδιάστατου ΜΥΑ $-H_m/L_p$ κυκλικής και ορθογωνικής φλέβας	52
Διάγραμμα 4.7	Αδιάστατο ύψος διασποράς κυκλικής φλέβας	53
Διάγραμμα 4.8	Αδιάστατο ύψος διασποράς ορθογωνικής φλέβας	54
Διάγραμμα 5.1	Σύγκριση μετρημένου ΜΥΑ (Papanicolaou <i>et al.</i> (1990) και υπολογισμένου με το πρώτο μοντέλο (Wong, 1998).	59
Διάγραμμα 5.2	Σύγκριση μετρημένου ΜΥΑ (Papanicolaou <i>et al.</i> (1990) και υπολογισμένου με το δεύτερο μοντέλο.	60
Διάγραμμα 5.3	Σύγκριση προβλεπόμενου ΜΥΑ από το πρώτο (Wong) και δεύτερο (Present) μοντέλο.	61
Διάγραμμα 5.4	Σύγκριση μετρούμενου ΜΥΑ και υπολογισμένου (α) με $a=0.0025$ και $\lambda_j=1.194$, (β) με $a_p=0.08545$ και $\lambda_p=1.067$, (γ) με $a_j=0.0545$ και $\lambda_j=1.194$	62
Διάγραμμα 5.5α	Σύγκριση αδιάστατου μετρούμενου ΜΥΑ H_m/L_j από (α) Papanicolaou <i>et al.</i> (1990), (β) παρούσα εργασία, (γ) αποτελέσματα μοντέλου με μεταβλητά a και λ .	64
Διάγραμμα 5.5β	Σύγκριση αδιάστατου μετρούμενου ΜΥΑ H_m/L_p από (α) Papanicolaou <i>et al.</i> (1990), (β) παρούσα εργασία, (γ) αποτελέσματα μοντέλου με μεταβλητά a και λ .	65

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 την μορφή και προσανατολισμό των φλεβών, 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 ηφαιστείων

ή 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
- στο fuel injection των αυτοκινήτων (διφασική φλέβα ή spray), κλπ.

1.2 Απλές φλέβες χωρίς ή με άνωση (jets ή 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. Παρακάτω δίνονται ορισμοί και συμβολισμοί ορισμένων χαρακτηριστικών των φλεβών

- ρ χαρακτηριστική πυκνότητα σε κάποιο σημείο του πεδίου ροής
- μ όγκος ρευστού που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου (specific mass flux ή volume flux)
- m ειδική ορμή ρευστού (ανά μονάδα μάζας) που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου (specific momentum flux)
- β ειδική άνωση ρευστού (ανά μονάδα μάζας) που διέρχεται από μια διατομή της φλέβας στη μονάδα χρόνου (specific buoyancy flux)

Η μάζα, ορμή και άνωση που διέρχονται από μια διατομή A στο πεδίο ροής μιας εκτοξευόμενης φλέβας υπολογίζονται με τα ολοκληρώματα

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

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

και

$$\rho\beta = \int_A g(\Delta\rho) w dA \quad (1-3)$$

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.

Στην παρούσα εργασία ερευνάται το μέγιστο ύψος ανύψωσης κυκλικών και ορθογωνικών φλεβών σε ένα στρωματωμένο περιβάλλον ρευστό με γραμμικό προφίλ πυκνότητας, που βρίσκεται σε ηρεμία. Μια κυκλική φλέβα αναμένουμε να ανυψώνεται ψηλότερα από μια αντίστοιχη ορθογωνική με τα ίδια αρχικά κινηματικά χαρακτηριστικά. Το αποτέλεσμα αναμένεται ανάλογο προηγούμενων μετρήσεων σε ελλειπτικές φλέβες με λόγο αξόνων 2:1 που συμπαρασύρουν σχεδόν το διπλάσιο περιβάλλον ρευστό από τις αντίστοιχες κυκλικές (Ho and Gutmark 1987). Πειράματα έχουν δείξει ότι το τελικό αδιάστατο ύψος ανύψωσης είναι το ίδιο και στο κυκλικό και στο ελλειπτικό πλούμιο (Paranicolaou *et al.* 1990), που σημαίνει ότι συμπαρασύρουν τον ίδιο όγκο περιβάλλοντος ρευστού όταν διαχέονται κατακόρυφα σε γραμμικά στρωματωμένο ήρεμο αποδέκτη. Οι αδιάστατες παράμετροι του ύψους ανύψωσης βρέθηκαν να είναι διαφορετικές στις απλές φλέβες και στα πλούμια για τους δύο τύπους ακροφυσίων κυκλικού και ελλειπτικού. Τα δεδομένα πιστοποιούν την ασυμπτωτική ανάλυση που έγινε για τις δύο ασυμπτωτικές περιπτώσεις, μιας απλής φλέβας (jet) και ενός πλουμίου (plume).

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Ο μηχανισμός της ανύψωσης μιας ανωστικής φλέβας σε ένα στρωματωμένο ρευστό είναι αντικείμενο μεγάλου θεωρητικού και πρακτικού ενδιαφέροντος, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε εκροές επεξεργασμένων λυμάτων στη θάλασσα ή σε λίμνες καθώς επίσης στο σχεδιασμό καπνοδόχων, κλπ. Εφόσον και η ατμόσφαιρα και οι ωκεανοί είναι πυκνομετρικά στρωματωμένοι, μια ανωστική φλέβα καθώς συμπαρασύρει και αναμειγνύεται με το περιβάλλον ρευστό, ανέρχεται κατακόρυφα έως ένα υψόμετρο όπου η άνωση μηδενίζεται. Η μη μηδενική (ακόμα) κινηματική ορμή της θα την ωθήσει σε ένα μεγαλύτερο υψόμετρο, έως ότου η αρνητική πλέον άνωση θα τη μηδενίσει. Στη βιβλιογραφία αυτό ορίζεται σαν το « μέγιστο ύψος ανύψωσης – ΜΥΑ» (Terminal height of rise-THR) μιας ανωστικής φλέβας σε ένα πυκνομετρικά στρωματωμένο ρευστό. Συνεπώς, αφού στο σημείο ΜΥΑ η φλέβα είναι βαρύτερη από το περιβάλλον ρευστό, θα βυθιστεί και θα διασκορπιστεί οριζόντια σε κάποιο υψόμετρο όπου η πυκνότητα της φλέβας είναι ίδια με αυτή του περιβάλλοντος ρευστού.

Το μέγιστο ύψος ανύψωσης μιας ανωστικής φλέβας σε ένα στρωματωμένο αποδέκτη μελετήθηκε για περισσότερο από τρεις δεκαετίες. Πειραματικές και υπολογιστικές έρευνες, που σχετίζονται με την απλούστερη δυνατή στρωμάτωση του περιβάλλοντος, το γραμμικό πυκνομετρικό προφίλ, έχουν γίνει από διάφορους ερευνητές. Οι περισσότερες απ' αυτές τις εργασίες αναφέρονται από τους Fischer *et al.* (1979) και Wood *et al.* (1993). Έρευνες που αφορούν το ΜΥΑ κυκλικών φλεβών έχουν γίνει από τους Morton *et al.* (1956), Crawford & Leonard (1962), Fan (1967) και Wong & Wright (1988). Έρευνες που αφορούν το ΜΥΑ διδιάστατων φλεβών (από σχισμές) έχουν γίνει από τους Wright & Wallace (1979) και Chen *et al.* (1980). Επίσης, οι διάφορες μαθηματικές εκφράσεις της ανύψωσης κατακόρυφου πλουμίου σε ένα στρωματωμένο ήρεμο περιβάλλον έχουν παρουσιαστεί από τους Briggs (1969) και Csanady (1973).

Μια λίστα από παραμέτρους που αφορούν το μέγιστο ύψος ανύψωσης αξονοσυμμετρικών και διδιάστατων απλών φλεβών και πλουμίων σε ένα γραμμικά - πυκνομετρικά στρωματωμένο ρευστό προτείνεται από τους Fischer *et al.* (1979) και Chen & Rodi (1980). Δύο πειραματικές μελέτες (Wright & Wallace, 1979 και Chen *et al.* 1980) προτείνουν λίγο-πολύ τις ίδιες σταθερές αναλογίας για το ΜΥΑ μιας διδιάστατης φλέβας σε γραμμικό προφίλ πυκνότητας και για τις δύο ασυμπτωτικές ροές, τις απλές φλέβες και τα πλούμια, σταθερές που είναι διαφορετικές για κάθε περίπτωση. Οι Fischer *et al.* (1979) βασιζόμενοι σε δεδομένα από διαφορετικές έρευνες, προτείνουν την ίδια σταθερά 3.8 για το αδιάστατο μέγιστο ύψος ανύψωσης των κατακόρυφων κυκλικών απλών φλεβών και πλουμίων. Οι Chen & Rodi θεωρούν ότι η σταθερά για κυκλικά πλούμια είναι 5. Οι Wong & Wright (1988) προτείνουν τις σταθερές 3.6 και 4.5 για jets και plumes αντίστοιχα, ενώ ο Papanicolaou *et al.* (1990) τις 3.50 και 4.65 αντίστοιχα. Πειράματα έγιναν και σε ανωστικές φλέβες (μεταβατική κατάσταση της ροής από jet σε plume) από τους Fan (1967) και Fox (1970), όπου η ροή αρχικά ήταν περισσότερο ροή απλής φλέβας ή μεταβατικής παρά ροή πλουμίου, σύμφωνα με την ανάλυση που ακολουθεί και τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας. Πρόσφατα οι Bloomfield & Kerr (1998, 1999), ερεύνησαν κατακόρυφες κυκλικές φλέβες με αρνητική άνωση (fountains) σε γραμμικά στρωματωμένο και με σκαλοπάτι πυκνότητας ήρεμο αποδέκτη.

1.4 Διαστατική ανάλυση και θεωρητικές εκτιμήσεις

Μια κυκλική ανωστική φλέβα διαμέτρου D και πυκνότητας ρ_o εκβάλλει μέσα σε ήρεμο ρευστό με γραμμική στρωμάτωση πυκνότητας με συχνότητα άνωσης $N^{1/2}$:

$$N = -\frac{g}{\rho_o} \frac{d\rho}{dz} \quad (1-4)$$

σε ένα υψόμετρο όπου η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού είναι ρ_a . Στην παραπάνω εξίσωση, ρ_o είναι η πυκνότητα αναφοράς, z είναι η κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο της φλέβας και g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας. Η αρχική ογκομετρική παροχή της φλέβας, η ειδική ορμή (ανά μονάδα βάρους του ρέοντος ρευστού) και άνοση (ανά μονάδα βάρους του ρέοντος ρευστού) και οι αντίστοιχες διαστάσεις τους είναι :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi D^2}{4} W \quad [L^3/T] \\ M &= QW \quad [L^4/T^2] \\ B &= \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gQ \quad [L^4/T^3] \end{aligned} \quad (1-5)$$

αντίστοιχα, όπου W είναι η αρχική μέση ταχύτητα της φλέβας και ρ_o είναι η πυκνότητα του ρευστού της φλέβας στο ακροφύσιο . Μια κλίμακα μήκους βασισμένη στα αρχικά κινηματικά χαρακτηριστικά της ανωστικής φλέβας ορίζεται (Fischer *et al.* 1979) ως :

$$l_M = \frac{M^{3/4}}{B^{1/2}} \quad (1-6)$$

Όταν το l_M είναι μεγάλο συγκριτικά με τη διάμετρο του ακροφυσίου της φλέβας η ροή μπορεί να αναφέρεται σαν απλή φλέβα (jet), ενώ όταν είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με τη διάμετρο του ακροφυσίου, σαν πλούμιο.

Αν το μέγιστο (τελικό) ύψος ανύψωσης μιας φλέβας σε γραμμικά στρωματωμένη πυκνότητα με συχνότητα άνωσης $N^{1/2}$ οριστεί σαν H_{\max} , τότε σε μια αρχικά **απλή φλέβα** (jet), $B=0$, με αρχική ογκομετρική παροχή Q και ειδική ορμή M είναι $H_{\max}=f(M, Q, N)$. Εφόσον είναι $q(z) \gg Q(0)$ για μεγάλη απόσταση z (μακριά από το ακροφύσιο) η αρχική ογκομετρική παροχή γρήγορα θα «ξεχαστεί» από τη φλέβα, έτσι ώστε $H_{\max}=f(M, N)$. Επομένως, με βάση το θεώρημα του Buckingham έχουμε τρεις παραμέτρους, τις H_{\max} , M , N και δύο θεμελιώδεις διαστάσεις τις L , T , επομένως ($3-2=1$) ένα αδιάστατο μονώνυμο το

$$H_{\max} \frac{N^{1/4}}{M} = a = \text{σταθερά} \quad (1-7)$$

Το μέγιστο ύψος ανύψωσης ενός **απλού πλουμίου** ($M=0$) σε ρευστό με γραμμική στρωμάτωση πυκνότητας θα είναι $H_{\max}=f(B, Q, N)=f(B, N)$. Δεδομένου ότι η αρχική παροχή $Q = 0$ προκύπτει από το θεώρημα του Buckingham το ακόλουθο μονώνυμο

$$H_{\max} \frac{N^{3/8}}{B^{1/4}} = b = \text{σταθερά} \quad (1-8)$$

Αν καθορίσουμε τώρα τις χαρακτηριστικές κλίμακες μήκους μιας απλής φλέβας και ενός πλούμιου, σε ρευστό με γραμμική στρωμάτωση πυκνότητας, σαν L_j και L_p αντίστοιχα έχουμε ότι:

$$L_j = \frac{M}{N}^{1/4} \quad \text{και} \quad L_p = \frac{B^{1/4}}{N^{3/8}} \quad (1-9)$$

Μια **ανωστική φλέβα** με αρχικά κινηματικά χαρακτηριστικά Q , M , και B που εκρέει σε ένα περιβάλλον με γραμμικό προφίλ πυκνότητας N , θα ανυψωθεί έως ένα ύψος $H_{\max} = f(M, B, Q, N) = f(M, B, N)$, δεδομένου ότι η αρχική παροχή του όγκου της φλέβας αμελείται σε απόσταση μερικών διαμέτρων κατόπιν του ακροφύσιου. Στην παραπάνω εξίσωση και σε μεγάλες αποστάσεις από το ακροφύσιο, εμπλέκονται τέσσερις παράμετροι (H_{\max} , M , B , και N) και δύο διαστάσεις (L , T), προκύπτουν επομένως δύο αδιάστατα μονώνυμα. Αυτά είναι τα H_{\max}/L_j , ή H_{\max}/L_p και $(M/B)N^{1/2}$. Συνεπώς η διαστατική ανάλυση προβλέπει ότι τα παραπάνω αδιάστατα μονώνυμα σχετίζονται ως:

$$\frac{H_{\max}}{L_j}, \frac{H_{\max}}{L_p} = f \frac{M}{B} N^{1/2} \quad (1-10)$$

Σε μια απλή φλέβα, ισχύει $(M/B)N^{1/2} \gg 1$ και η ασυμπτωτική εξίσωση (1.7), ενώ σε ένα πλούμιο ισχύει $(M/B)N^{1/2} \ll 1$ και η εξίσωση (1.8). Αν διαιρεθούν και τα δύο μέλη της εξίσωσης (1.7) με L_p τότε

$$\frac{H_{\max}}{L_p} = a \frac{L_j}{L_p} = a \frac{M}{B} N^{1/2}^{1/4} \quad (1-11)$$

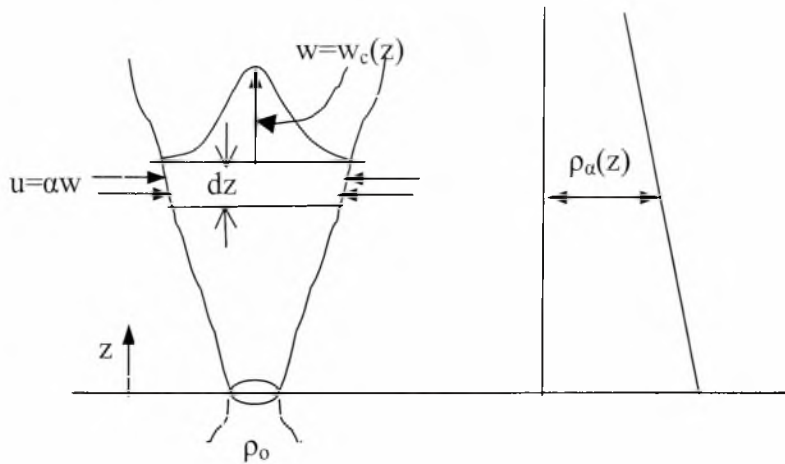
που σημαίνει ότι το αδιάστατο MYA μιας απλής φλέβας (jet) είναι ανάλογο του αδιάστατου όρου $((M/B)N^{1/2})^{1/4}$. Κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί ναδειχθεί ότι σε ένα πλούμιο για $(M/B)N^{1/2} \ll 1$

$$\frac{H_{\max}}{L_j} = a \frac{L_p}{L_j} = a \frac{M}{B} N^{1/2}^{-1/4} \quad (1-12)$$

δηλαδή το αδιάστατο MYA είναι ανάλογο του $((M/B)N^{1/2})^{-1/4}$. Η διαστατική θεώρηση αυτής της παραγράφου θα είναι οδηγός για τα πειράματα και την ανάλυση τους που ακολουθεί.

1.5 Ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης κατακόρυφης κυκλικής φλέβας

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται μια κυκλική κατακόρυφη ανωστική φλέβα σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη. Οι εξισώσεις της κίνησης για μια κυκλική κατακόρυφη ανωστική φλέβα που εκβάλλει σε ένα πυκνομετρικά στρωματωμένο ρευστό είναι (Fischer *et al.* 1979)



Σχήμα 1.1 Κατακόρυφη φλέβα σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη.

$$\frac{d}{dz}(\pi b^2 w) = 2\pi\alpha b w$$

$$\frac{d}{dz} \frac{\pi}{2} b^2 w^2 = \pi g \lambda^2 b \vartheta \quad (1-13)$$

$$\frac{d}{dz} \pi g \frac{\lambda^2}{1 + \lambda^2} b^2 w \vartheta = -g \frac{d\rho_a}{dz} \pi b^2 w$$

όπου

$w = w_c(z)$ η μέση ταχύτητα στον άξονα του jet,

$b = b(z)$ το πλάτος του jet καθορισμένο ως η απόσταση από τον άξονα όπου η μέση ταχύτητα παίρνει την τιμή $w(b) = w_c(z)/e$ ($e=2.718..$) και καλείται 1/e-πλάτος ταχύτητας,

$\lambda = b_c/b_w$ ο λόγος του πλάτους 1/e-συγκέντρωσης προς το λόγο του πλάτους της 1/e-ταχύτητας ,

$\rho_a = \rho_a(z) = \rho_0(1-\epsilon z)$ η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού σαν συνάρτηση του βάθους ,

$\vartheta = \vartheta_c(z)$

$$= (\rho_c(z) - \rho_a(z)) / \rho_0$$

$$= \Delta\rho_c(z) / \rho_0$$

η αδιάστατη διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στην μέση αξονική τιμή και το περιβάλλον ρευστό, και

ρ_0 κάποια πυκνότητα αναφοράς (π.χ. η αρχική πυκνότητα του jet)

Το παραπάνω σύστημα εξισώσεων προκύπτει από τις μέσες χρονικές εξισώσεις της κίνησης (συνέχεια, z-ορμή και διατήρηση της άνωσης) με αντικατάσταση της Gaussian (Γκαουσιανής) κατανομής της μέσης ταχύτητας και του προφίλ της μέσης πυκνομετρικής διαφοράς

$$w(r, z) = w_c(z) \exp -\frac{r^2}{b_w^2} \quad (1-14\alpha)$$

$$\vartheta(r, z) = \vartheta_c(z) \exp -\frac{r^2}{b_c^2} \quad (1-14\beta)$$

και με τη χρήση της υπόθεσης της συμπαράσυρσης που προτείνεται από τον G.I. Taylor, δηλαδή η ταχύτητα με την οποία εισρέει περιβάλλον ρευστό στο πεδίο ροής της φλέβας είναι ανάλογη της μέσης ταχύτητας στον άξονα

$$u_c = \alpha w_c(z) \quad (1-15)$$

στην ολοκληρωματική μορφή των εξισώσεων, θεωρώντας ότι η ολοκλήρωση εκτείνεται στο άπειρο, π.χ.

$$\begin{aligned} \rho\mu(z) &= \int_A \rho w(r, z) dA = \int_0^\infty \rho w(r, z) 2\pi r dr = \rho\pi b^2 w \\ \rho m(z) &= \int_A \rho w^2(z) dA = \int_0^\infty \rho w^2(r, z) 2\pi r dr = \rho \frac{\pi b^2 w^2}{2} \end{aligned} \quad (1-16)$$

$$\rho\beta(z) = \int_A g\vartheta(r, z)w(r, z) dA = \int_0^\infty g\vartheta(r, z)w(r, z) 2\pi r dr = \pi \frac{\Delta\rho}{\rho_o} gwb^2 \frac{\lambda^2}{1+\lambda^2}.$$

Για τις παραπάνω σχέσεις ισχύει $b=b_w$ και $\lambda=b_c/b_w$. Αν οι μεταβλητές w , b και ϑ εκφραστούν σε όρους των μ , m και β , το σύστημα των παραπάνω εξισώσεων γίνεται

$$\begin{aligned} \frac{d\mu}{dz} &= 2\sqrt{2\pi} \alpha m^{1/2} \\ \frac{dm}{dz} &= \pi g \frac{1+\lambda^2}{2} \frac{\mu\beta}{m} \\ \frac{d\beta}{dz} &= -N\mu \end{aligned} \quad (1-17)$$

με αρχικές συνθήκες στο ακροφύσιο

$$\begin{aligned} \mu(0) &= Q = \frac{\pi D^2}{4} W \\ m(0) &= M = \frac{\pi D^2}{4} W^2 \\ \beta(0) &= B = \frac{\rho_a - \rho_o}{\rho_o} gQ \end{aligned} \quad (1-18)$$

όπου W είναι η μέση ταχύτητα στο χείλος του ακροφύσιου.

Ακολουθώντας τους List & Imberger (1973) η απόσταση z_o από το ακροφύσιο όπου τοποθετείται η θεωρητική αρχή (origin) των $m(0) = M$ και $\mu(0) = Q$ μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (παράμετρος πλάτους της φλέβας)

$$C_p = \frac{\mu}{zm^{1/2}} \quad (1-19)$$

που είναι σταθερά, ίση με $C_p = 0.27$ (Papanicolaou and List, 1988). Συνεπώς

$$C_p = \frac{Q}{z_o M^{1/2}} \quad z_o = \frac{Q}{C_p M^{1/2}} = \frac{\ell_Q}{C_p}; \quad \ell_Q = Q / \sqrt{M}. \quad (1-20)$$

Επομένως το παραπάνω σύστημα εξισώσεων μπορεί να ολοκληρωθεί αρχίζοντας από το z_o με αρχικές συνθήκες αυτές που περιγράψαμε νωρίτερα. Ο υπολογισμός τερματίζεται όταν η ορμή της φλέβας μηδενιστεί.

1.6 Σκοπός του πειράματος

Ο σκοπός της παρούσας πειραματικής εργασίας είναι η σύγκριση του μέγιστου ύψους ανύψωσης ενός κυκλικού και ενός ορθογωνικού jet με τα ίδια αρχικά κινηματικά χαρακτηριστικά του όγκου, της ορμής και της ανωστικής δύναμης σε ένα γραμμικά στρωματωμένο περιβάλλον ρευστό σε ηρεμία. Προηγούμενα πειράματα έχουν δείξει ότι ελλειπτικές φλέβες με λόγο αξόνων 2:1 συμπαρασύρουν περισσότερο όγκο του περιβάλλοντος ρευστού απ' ότι οι κυκλικές φλέβες. Συνεπώς, σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη οι φλέβες με ορθογωνικό στόμιο και λόγο πλευρών 2:1, αναμένεται να φτάσουν στο μέγιστο ύψος ανύψωσης γρηγορότερα από ότι οι αντίστοιχες κυκλικές, αφού οι πρώτες διαλύονται γρηγορότερα. Στην περίπτωση αυτή θα μπορούσαμε να σχεδιάσουμε αποδοτικότερους διαχυτήρες επεξεργασμένων λυμάτων μικρότερου μήκους, με ορθογωνικά στόμια, και συνεπώς πιο οικονομικούς, που θα παρέχουν την ίδια αρχική διάλυση με αυτούς που έχουν μεγαλύτερο μήκος. Ένας άλλος στόχος είναι να καθοριστεί το αδιάστατο μέγιστο ύψος ανύψωσης σε κυκλικά jet και πλούμια καθώς και το ύψος διάχυσης της φλέβας και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά που έχουν παρατηρηθεί από άλλους ερευνητές.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική συσκευή- αποτελείται από τα εξής επιμέρους τμήματα :

- μια ορθογωνική δεξαμενή από plexiglass, όπου λαμβάνει χώρα η γραμμική στρωμάτωση,
- μια συσκευή δημιουργίας του jet,
- ένα ροόμετρο,
- έναν αισθητήρα που μετράει ηλεκτρική αγωγιμότητα και επομένως τη συγκέντρωση αλατιού στο νερό,
- ένα δοχείο σταθερής στάθμης,
- μια δεξαμενή για την τροφοδοσία της φλέβας από το δοχείο σταθερής στάθμης,
- ένα σύστημα δημιουργίας γραμμικής στρωμάτωσης που αποτελείται από δυο δεξαμενές για την δημιουργία στρωμάτωσης, έναν ηλεκτροκίνητο αναδευτήρα, αντλία νερού, ένα πλέγμα και δύο επιφανειακούς διαχυτήρες.

Δεξαμενή στρωμάτωσης. Η δεξαμενή στρωμάτωσης έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου, είναι κατασκευασμένη από plexiglass πάχους 1.50cm. Οι εξωτερικές διαστάσεις της είναι 100cm x 60cm x 80cm. Στα 77cm από τον πυθμένα υπάρχει περιμετρική υπερχειλίση, από όπου το πλεονάζον νερό οδηγείται στην αποχέτευση μέσω μπρούντζινου σωλήνα. Οι εσωτερικές διαστάσεις της δεξαμενής είναι 97cm x 57cm x 77cm. Η δεξαμενή είναι τοποθετημένη σε υπερυψωμένη βάση. Σε δύο κάθετες πλευρές έχει τοποθετηθεί γαλακτερό αδιαφανές plexiglass για τη διάχυση φωτεινών δεσμών που χρησιμοποιούνται για τη φωτογραφική αποτύπωση της διαχεόμενης φλέβας. Ο φόντος της δεξαμενής για το λόγο αυτό φωτίζεται με δύο προβολείς των 1000Watts ο καθένας, ενώ στην μπροστινή διαφανή πλευρά έχει σχεδιαστεί κάναβος μετρήσεων μήκους, όπου καθορίζεται το επίπεδο του ακροφυσίου και η κατακόρυφη απόσταση από αυτό ή η οριζόντια από τον άξονα της φλέβας. Το ακροφύσιο αυτό βρίσκεται στα 70cm από τον πυθμένα της δεξαμενής. Η κατακόρυφη ισοδιάσταση του κανάβου είναι 10cm, ενώ η οριζόντια είναι 5cm.



Φωτο 2.1 Δεξαμενή στρωμάτωσης

Συσκευή δημιουργίας του jet. Ο μηχανισμός δημιουργίας της φλέβας είναι τοποθετημένος πάνω σε γαλβανισμένη τραβέρσα και 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. Το τμήμα εισόδου του νερού συνδέεται με εύκαμπτο διαφανή σωλήνα διαμέτρου Φ10. Το εσωτερικό του σωλήνα PVC έχει γεμιστεί εν μέρει με σπόγγο για την μείωση της τύρβης κατά την έξοδο της φλέβας από το ακροφύσιο. Στο τεμάχιο εξόδου (Paranicolaou, 1994) προσαρμόζονται τα ακροφύσια από τα οποία γίνεται η εκροή της φλέβας. Τα χαρακτηριστικά των ακροφυσίων περιγράφονται παρακάτω.

Ακροφύσιο Κυκλικής Διατομής

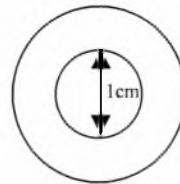
Η διατομή αυτή έχει διάμετρο 1cm,

εμβαδόν $A=\pi/4=0.7854 \text{ cm}^2$,

βρεχόμενη περίμετρο $P=\pi D=3.14 \text{ cm}$

και υδραυλική ακτίνα

$R=A/P=0.25\text{cm}$.



Σχήμα 2.1 Κυκλική διατομή

Ακροφύσιο Ορθογωνικής διατομής με στρογγυλεμένες γωνίες (slot)

Η διατομή αυτή έχει εμβαδόν $A=1.58 \times 0.79 - 4 \times (0.3)^2 + \pi(0.3)^2$

$A=1.1709 \text{ cm}^2$

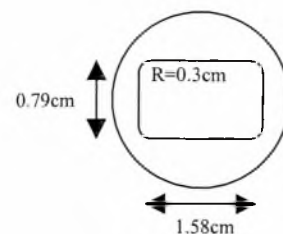
βρεχόμενη περίμετρο

$P=2 \times (1.58 - 0.6 + 0.79 - 0.6) + \pi \times 0.6$

$P=4.225 \text{ cm}$ και

υδραυλική ακτίνα

$R=A/P=0.277\text{cm}$



Σχήμα 2.2 Ορθογωνική διατομή

Ακροφύσιο Τετραγωνικής διατομής με στρογγυλεμένες γωνίες

Η διατομή αυτή έχει εμβαδόν

$$A=1^2-0.3^2 \times 4+\pi(0.3)^2$$

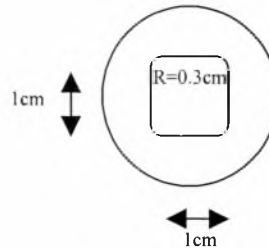
$$A=0.9227 \text{ cm}^2$$

βρεχόμενη περίμετρο

$$P=4 \times 1-4 \times 2 \times 0.3+\pi(0.6)$$

$$P=3.485 \text{ cm και}$$

$$\text{υδραυλική ακτίνα } R=A/P=0.2648 \text{ cm}$$



Σχήμα 2.3 Τετραγωνική διατομή

Ακροφύσιο Τριγωνικής διατομής με στρογγυλεμένες γωνίες

Η διατομή αυτή έχει εμβαδόν

$$A=1/2 \times (1.37 \times 1.5819)-3 \times (0.1559)+\pi(0.3)^2$$

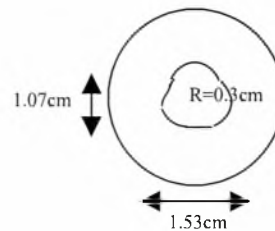
$$A=0.8986 \text{ cm}^2$$

βρεχόμενη περίμετρο

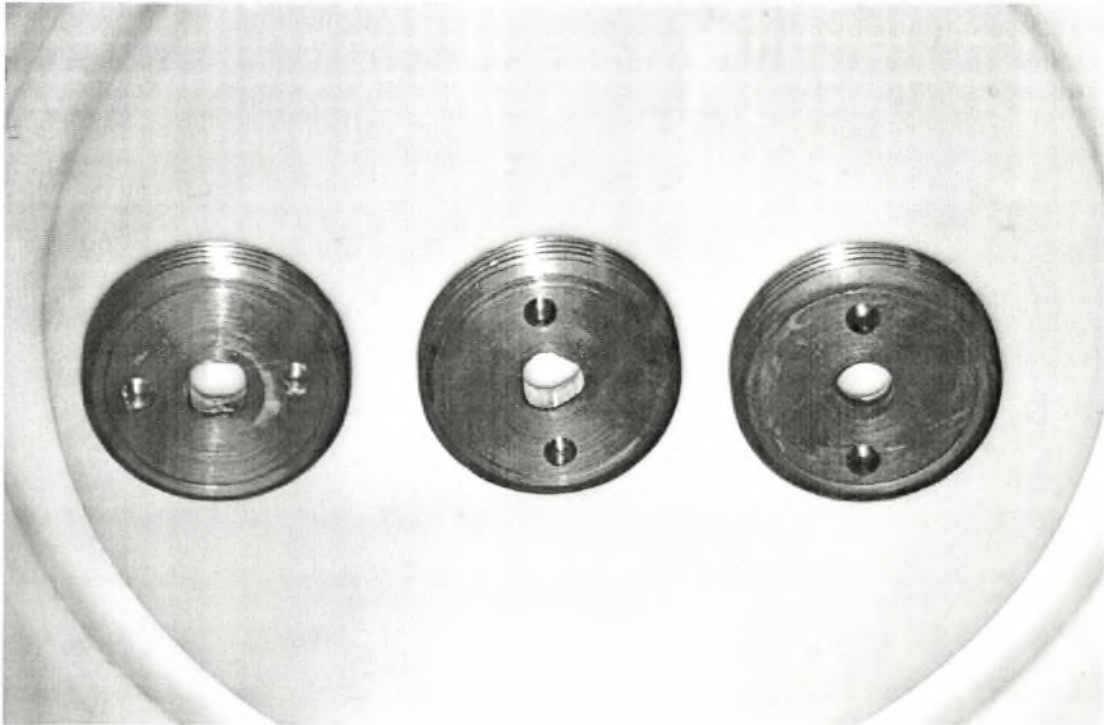
$$P=3 \times 1.5819-6 \times (0.6) \cos 30+\pi(0.6)$$

$$P=3.513 \text{ cm και}$$

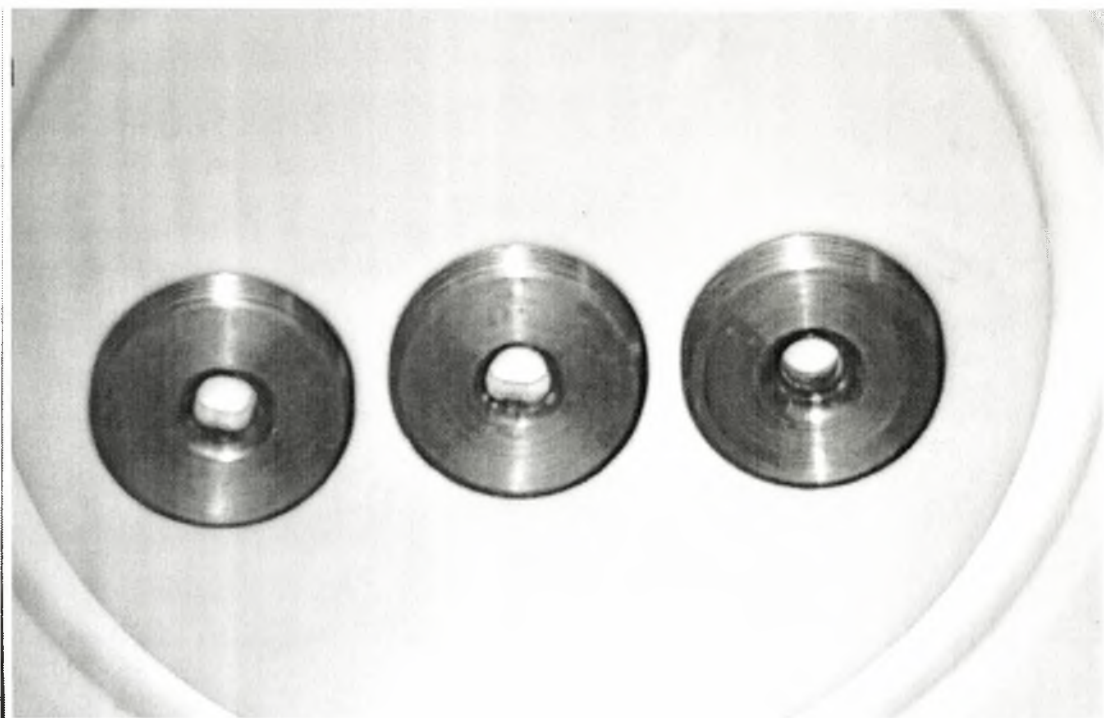
$$\text{υδραυλική ακτίνα } R=A/P=0.2558 \text{ cm}$$



Σχήμα 2.4 Τριγωνική διατομή

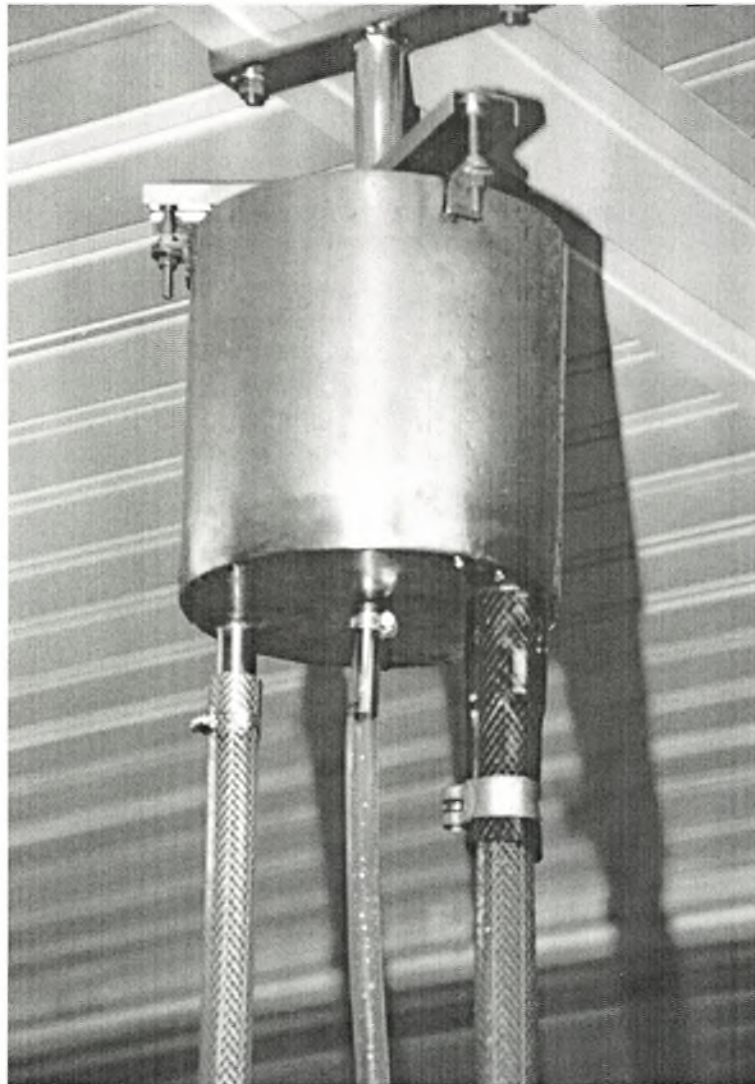


Φωτο 2.2 Ακροφύσια, όψη από την πλευρά εξόδου της φλέβας



Φωτο 2.3 Ακροφύσια, όψη από την στρογγυλεμένη πλευρά εισόδου της φλέβας

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 υπερχειλίσεως, 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 υπερχειλίσει, 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.



Φωτο 2.4 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 αγώγιμα 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.

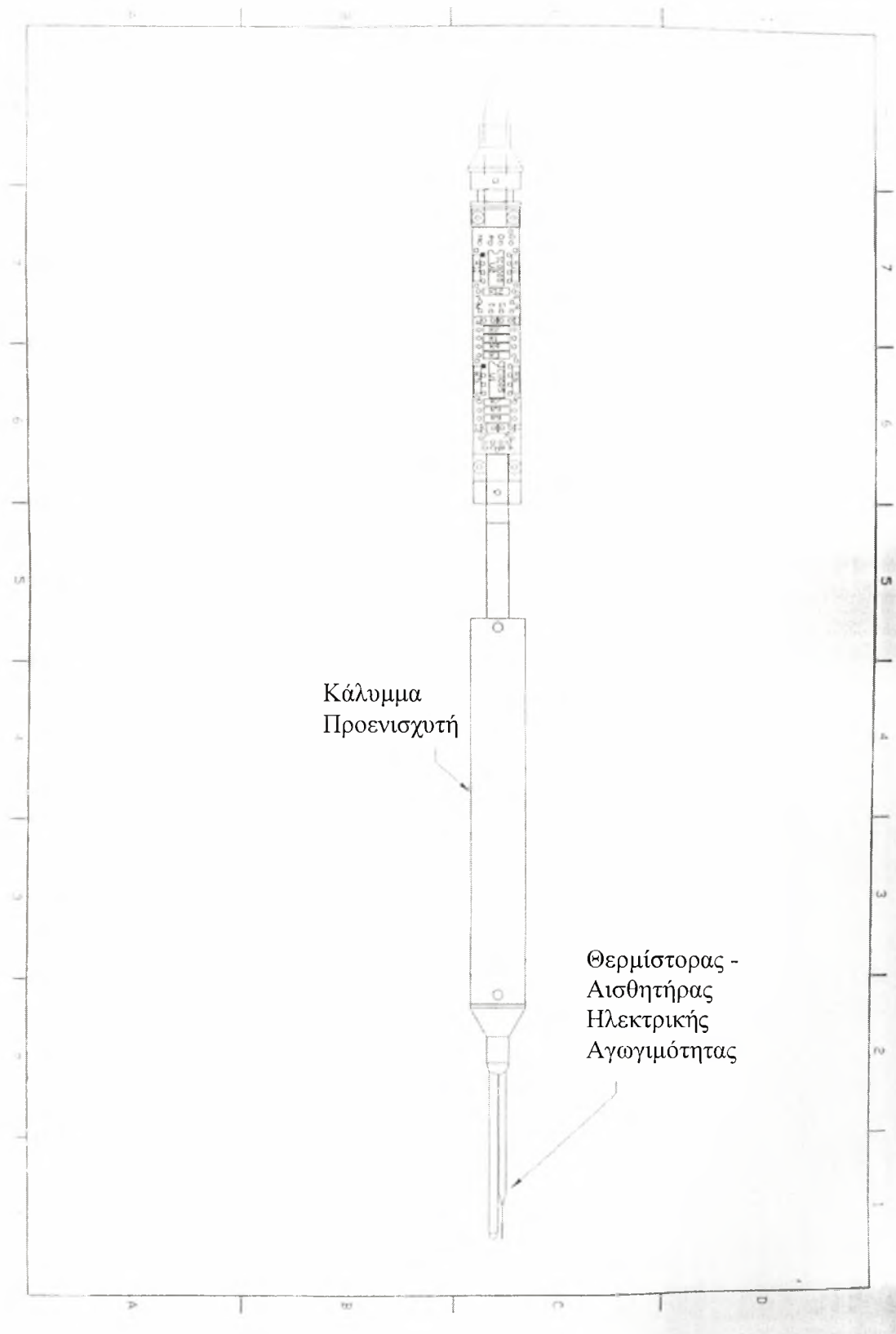
Πρέπει πάντα να χρησιμοποιείται σε φρέσκα καθαρά διαλύματα, χωρίς αιωρούμενα σωματίδια, διαφορετικά μεγάλα σωματίδια μπορεί να αγκυστρωθούν στα ηλεκτρόδια του αισθητήρα προκαλώντας αλλαγές στη ρύθμιση. Η τοποθέτηση του αισθητήρα θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να δείχνει άμεσα αντίθετα προς τη ροή.

Ο προσανατολισμός είναι λιγότερο ευπαθής στην μόλυνση. Φερτά που πιάνονται στα ηλεκτρόδια μπορούν μερικές φορές να αφαιρεθούν αν ο αισθητήρας τοποθετηθεί κάτω από μια βρύση η 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 ικανότητα 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.



Σχήμα 2.6 Αισθητήρας μέτρησης αγωγιμότητας και θερμοκρασίας

2.2 Σύστημα δημιουργίας γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης.

Η δημιουργία της γραμμικής πυκνομετρικής στρωμάτωσης έγινε με βάση τις τεχνικές που πρότειναν οι Oster & Yamamoto (1963). Συγκεκριμένα προτείνονται δύο μέθοδοι. Θα περιγραφεί αυτή που εφαρμόστηκε.

Γραμμική στρωμάτωση με ανάμιξη

Προκειμένου να αποφευχθεί η ανούσια διαδικασία του εναλλασσόμενου ανακατέματος και να καταστρατηγηθεί η ανάγκη της μακράς αναμονής για τη μόνιμη σταθερή κατάσταση, κάποιος θα μπορούσε να επανέλθει στις διαδικασίες ανάμιξης που δίνουν πρακτικά στιγμιαία την επιθυμητή κατανομή της πυκνότητας. Μια στιγμιαία γραμμική διαβάθμιση μπορεί να επιτευχθεί με μια από τις δύο γενικές διαδικασίες ανάμιξης. Στη μέθοδο αυτή ένα από τα υγρά εισάγεται με σταθερή παροχή μέσα στο δοχείο ανάμιξης που περιέχει το δεύτερο υγρό και το μίγμα ρέει μέσα στον σωλήνα διαβάθμισης με διαφορετική παροχή. Στην άλλη μέθοδο τα δύο υγρά εισάγονται στον σωλήνα διαβάθμισης με διαφορετικές παροχές το καθένα.

Θεωρούνται οι εξής συνθήκες ροής για την χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Έστω ότι από το δοχείο (1) ρέει υγρό (1) μέσα στο δοχείο ανάμιξης (2) με σταθερή παροχή u_1 . Για πρακτικούς λόγους θεωρούμε ότι οι όγκοι των υγρών (1) και (2) μπορούν να προστεθούν (π.χ. ιδανικά διαλύματα). Η πυκνότητα ρ_2 της εκροής από το δοχείο ανάμιξης με παροχή u_2 ποικίλει με τον χρόνο σύμφωνα με τη σχέση :

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{\rho_1 u_1 - \rho_2 u_2}{V_2} + \frac{\rho_2 (u_2 - u_1)}{V_2} = \frac{(\rho_1 - \rho_2) u_1}{V_2} \quad (2-1)$$

όπου V_2 είναι ο όγκος του υγρού στο δοχείο ανάμιξης σε κάθε χρονική στιγμή t . Ο πρώτος όρος στα δεξιά της ισότητας περιγράφει τη συγκέντρωση της μάζας στο δοχείο (2) και ο δεύτερος όρος περιγράφει την συμβολή λόγω της αλλαγής του όγκου. Ο ρυθμός μεταβολής του όγκου του υγρού στο δοχείο (2) υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{dV_2}{dt} = u_1 - u_2 \quad (2-2)$$

και ο ρυθμός μεταβολής του όγκου V ως προς το χρόνο του υγρού στη στήλη, είναι απλά u_2 . Σε αυτές τις εξισώσεις ρ_1 , u_1 και u_2 είναι σταθερές ανεξάρτητες από τον χρόνο ενώ οι ρ_2 , V_2 και V μεταβάλλονται με τον χρόνο. Συνεπώς, ολοκληρώνοντας την εξίσωση (2-2) έχουμε

$$V_2(t) = (u_1 - u_2)t + V_2^0 \quad (2-3)$$

όπου V_2^0 είναι ο αρχικός όγκος του υγρού 2. Εισάγοντας αυτή την τιμή του $V_2(t)$ στην εξίσωση (2-1) και ολοκληρώνοντας έχουμε:

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2^0 - \rho_1}^{-1} = \frac{(u_1 - u_2)t + V_2^0}{V_2^0}^{u_1/u_2 - u_1} \quad (2-4)$$

όπου ρ_2^0 είναι η πυκνότητα του υγρού στο δοχείο 2 στην αρχή του χρόνου. Η εξίσωση (2-4) ισχύει μόνο για $u_2 < u_1$ ενώ για $u_2 = u_1$ με ολοκλήρωση της (2-1) έχουμε :

$$\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2^o} = \exp \frac{V}{V_2^o} \quad (2-5)$$

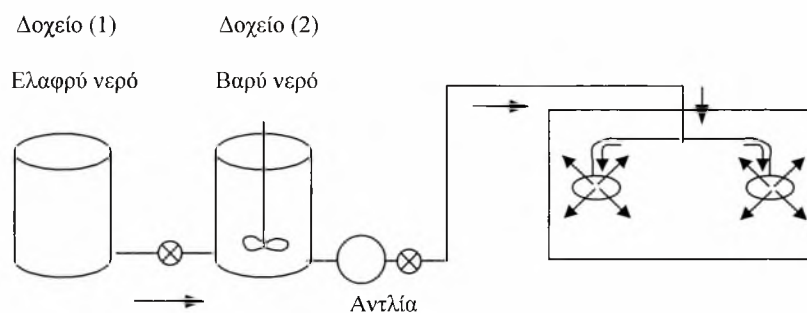
Ιδιαίτερο ενδιαφέρον φαίνεται όταν $u_2 = 2u_1$ π.χ. η εκροή στον σωλήνα διαβάθμισης είναι διπλάσια του ρυθμού στον οποίο το υγρό 1 μπαίνει στο δοχείο ανάμειξης. Τότε η εξίσωση (2-4) γίνεται :

$$\rho_2 = \rho_2^o - \frac{\rho_2^o - \rho_1}{2V_2^o} u_2 t \quad (2-6)$$

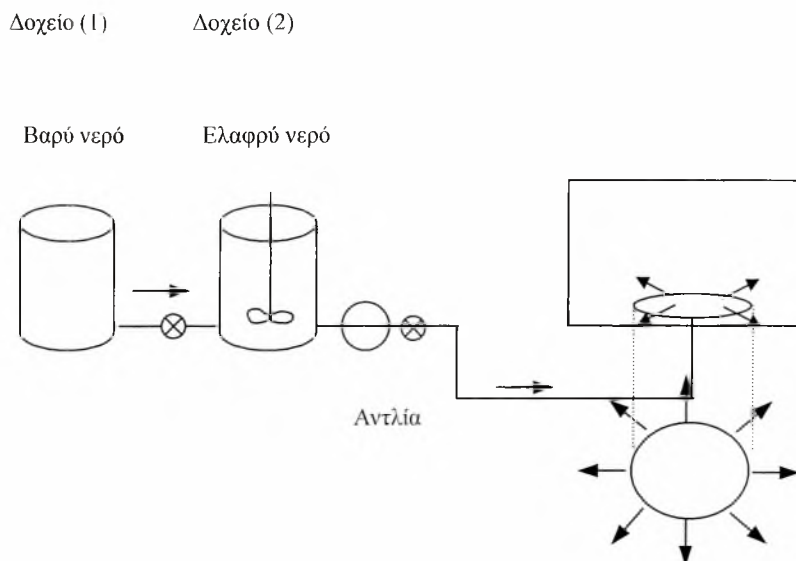
Αυτό σημαίνει ότι παράγεται μια γραμμική διαβάθμιση της πυκνότητας μιας και $u_2 t$ είναι ο όγκος του υγρού μέσα στη στήλη. Η εξίσωση (2-5) δεν είναι ιδιαίτερης σημασίας εκτός αν ο όγκος του δοχείου ανάμειξης είναι πολύ μεγαλύτερος από τον από αυτόν της στήλης στην οποία περίπτωση στην επέκταση της εκθετικής, προσεγγίζεται μια συνθήκη γραμμικής διαβάθμισης. Η εξίσωση (2-6) δείχνει ότι η πυκνομετρική διαβάθμιση είναι μεγαλύτερη, όταν η διαφορά στις πυκνότητες ρ_1 και ρ_2^o των αναδευόμενων υγρών και όσο είναι μικρός ο αρχικός όγκος V_2^o του υγρού (2).

Όταν το υγρό (1) είναι το πυκνότερο, το μίγμα εισάγεται στην στήλη από τον πυθμένα έτσι ώστε όταν η στήλη γεμίσει το λιγότερο πυκνό μίγμα να ανυψωθεί. Από την άλλη πλευρά, αν το υγρό (1) είναι ελαφρύτερο, τότε το μίγμα εισάγεται από την επιφάνεια έτσι ώστε το βαρύτερο υγρό να παραμένει κοντά στον πυθμένα και το ελαφρύτερο μίγμα να βρίσκεται από πάνω.

Ακολουθεί η σχηματική απεικόνιση της μεθόδου



Σχήμα 2.6 Στρωμάτωση με ακτινική διάχυση

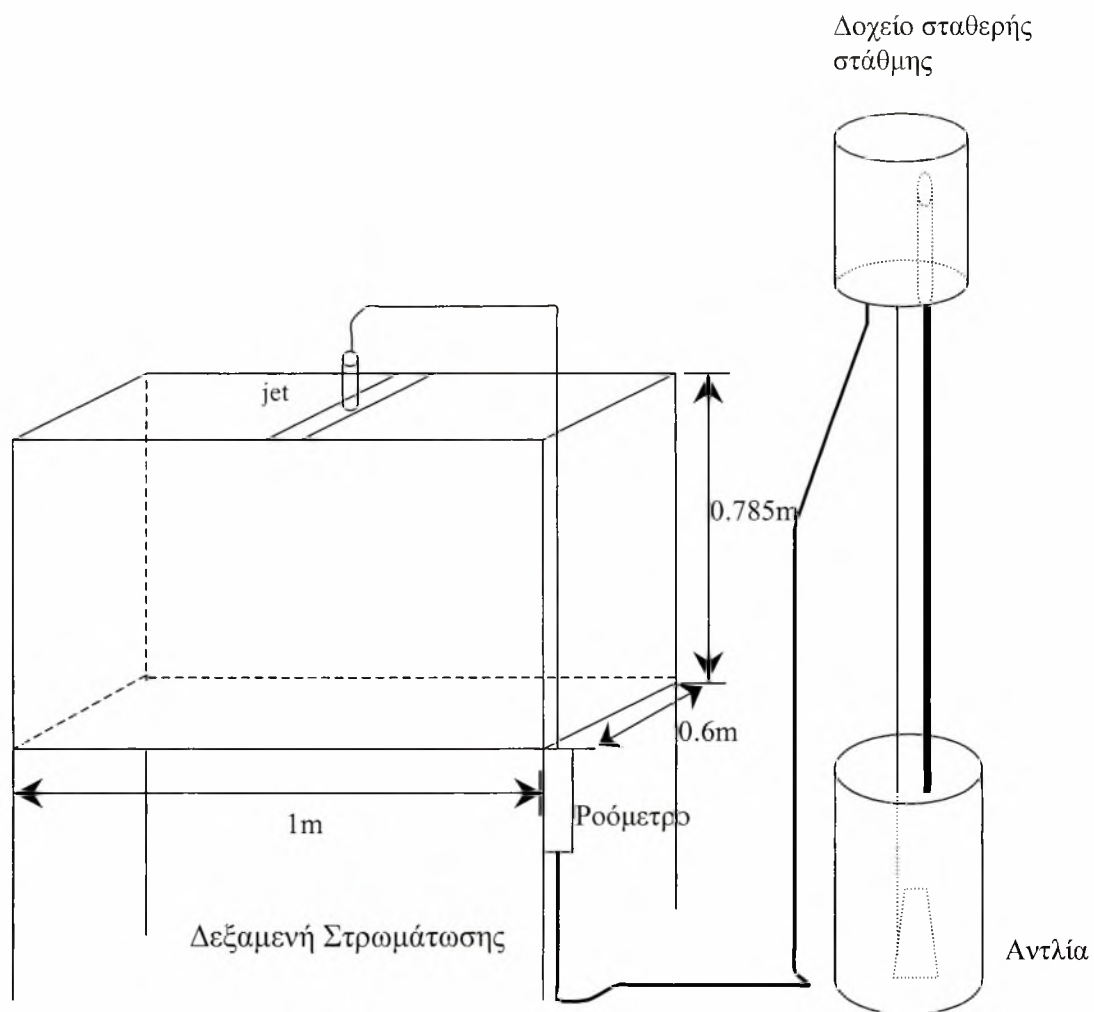


Σχήμα 2.7 Στρωμάτωση με ακτινική διάχυση - Capped hole technique.

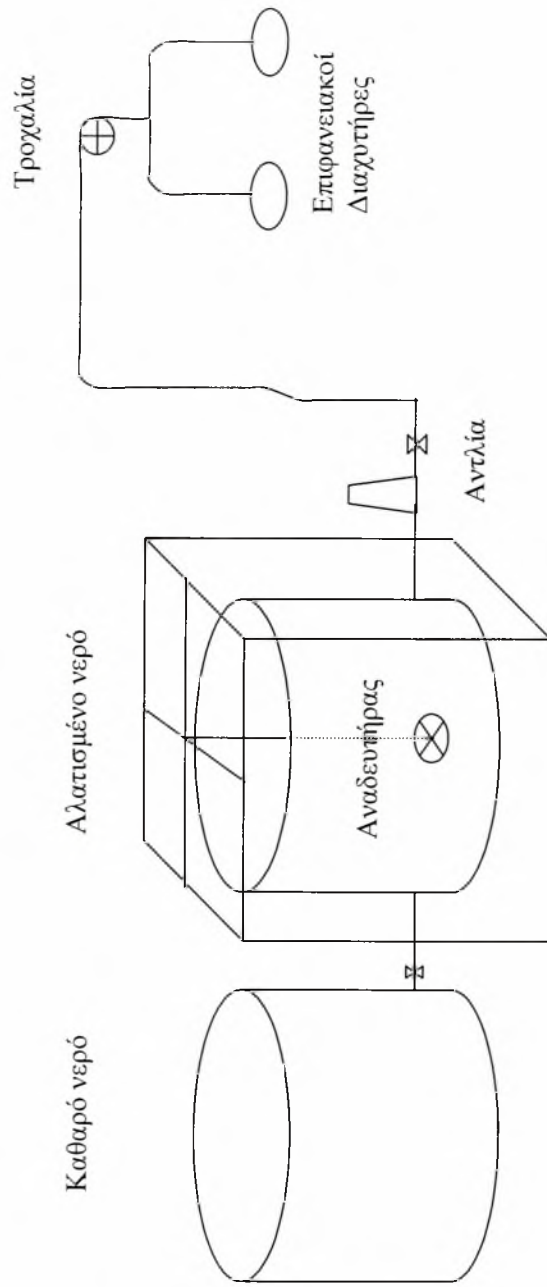
Για τη δημιουργία της γραμμικής στρωμάτωσης στο παρόν πείραμα γίνεται χρήση δύο κυλινδρικών δεξαμενών με διάμετρο πυθμένα 97cm και ύψος 61cm. Οι δύο δεξαμενές συνδέονται μεταξύ τους με εύκαμπτο διαφανή σωλήνα στην άκρη του οποίου υπάρχει βάννα. Στη δεξαμενή (2) το ρευστό ανακατεύεται συνεχώς από ένα μηχανοκίνητο αναδευτήρα. Στη δεξαμενή αυτή παρασκευάζεται το αρχικό διάλυμα από NaCl και νερό, στην επιθυμητή πυκνότητα. Η άλλη κυλινδρική δεξαμενή (1) πληρώνεται με καθαρό νερό, μέχρι τη στάθμη της δεξαμενής (2). Η δικλείδα σύνδεσης των δοχείων (1) και (2) ανοίγει συγχρόνως με την έναρξη λειτουργίας της αντλίας. Έτσι το ελαφρύτερο νερό αναμιγνύεται στο δοχείο (2) με τον αναδευτήρα με το βαρύτερο νερό, μειώνοντας συνεχώς την πυκνότητα. Το διάλυμα από το δοχείο (2) αντλείται στη δεξαμενή στρωμάτωσης με μια εξωτερική αντλία της οποίας η παροχή ρυθμίζεται από μια βάννα στην έξοδο της αντλίας (αγωγός κατάθλιψης). Ο σωλήνας που μεταφέρει το διάλυμα χωρίζεται στα δύο με τη χρήση ενός T. Οι δύο αυτοί εύκαμπτοι σωλήνες καταλήγουν σε δύο πλωτούς κυκλικούς δίσκους στο κέντρο των οποίων υπάρχει χάλκινο διάτρητο σωληνάκι, στο οποίο προσαρμόζονται. Για την αποφυγή φαινομένων ανάμειξης κατά την εκροή του διαλύματος από τους διάτρητους σωλήνες η επιφάνεια των πλωτών δίσκων καλύπτεται με ειδικό σπόγγο μέσα από τον οποίο διέρχεται το διάλυμα προτού διασκορπιστεί στην επιφάνεια του αποδέκτη.

Σημειώνεται ότι για την αποφυγή βύθισης των πλωτήρων στην κύρια δεξαμενή με συνέπεια την διαταραχή και ανάμειξη κατά τη στρωμάτωση, ο σωλήνας αναρτάται από μια τροχαλία για τη ρύθμιση του ύψους.

Ακολουθούν διαγράμματα και φωτογραφίες με την πειραματική διάταξη και τις επί μέρους συσκευές.



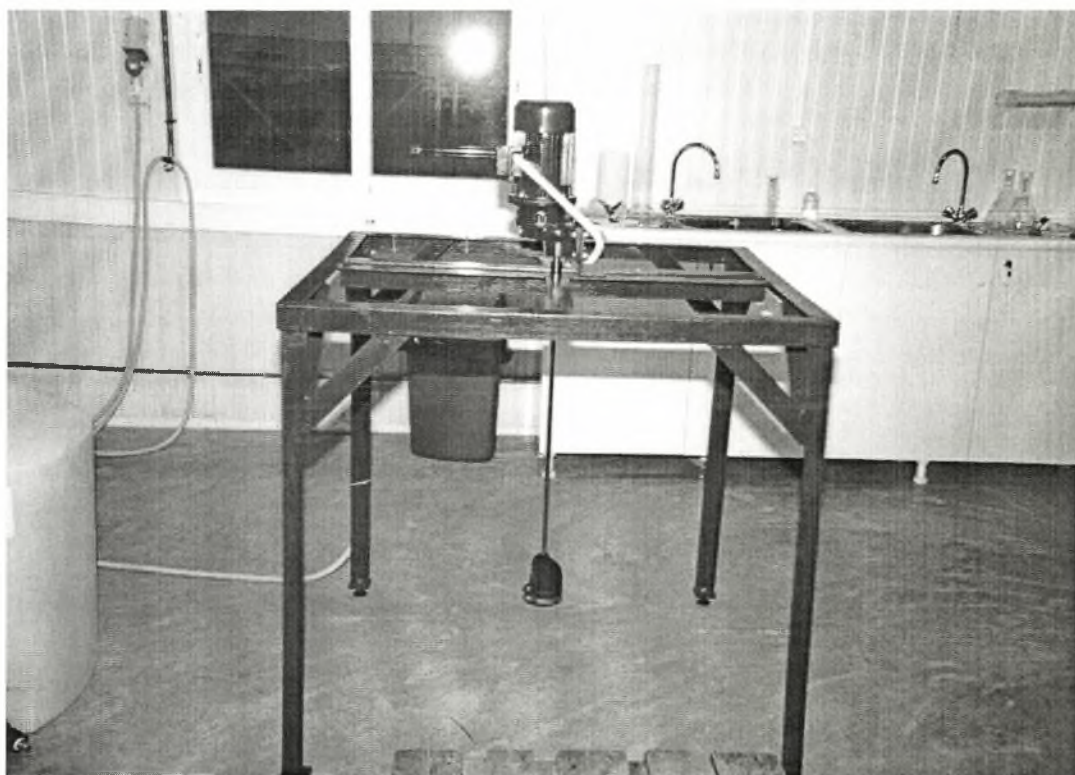
Σχήμα 2.7 Πειραματική διάταξη



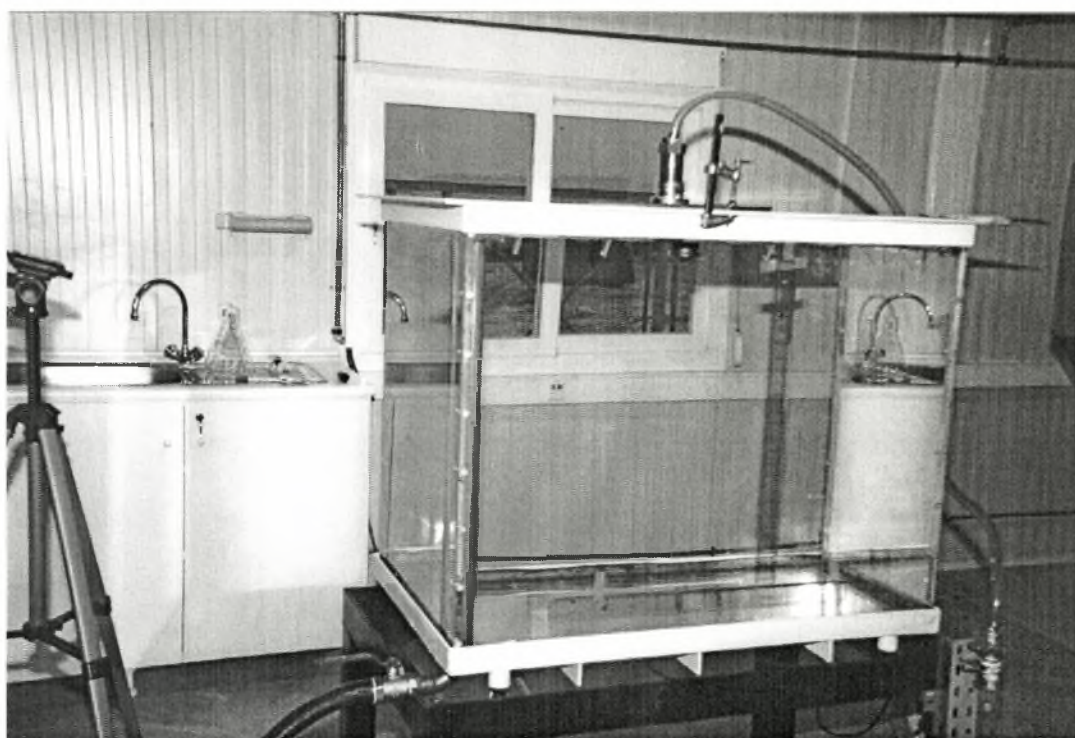
Σχήμα 2.8 Σύστημα δημιουργίας γραμμικής στρωμάτωσης



Φωτο 2.5 Δεξαμενή στρωμάτωσης



Φωτο 2.6 Μηχανοκίνητος αναδευτήρας



Φωτο 2.7 Δεξαμενή στρωμάτωσης

2.3 Ρύθμιση ροομέτρου

Το ροόμετρο είναι το όργανο ρύθμισης της παροχής της φλέβας. Αποτελείται από έναν κατακόρυφο διαφανή διαβαθμισμένο σωλήνα, μέσα στον οποίο κινείται ένας μεταλλικός κώνος, ο οποίος ανάλογα με την εισερχόμενη παροχή (δυναμική άνωση) στο ροόμετρο σταθεροποιείται στην εκάστοτε στάθμη. Η μετρούμενη παροχή κυμαίνεται από 15 l/h έως 150 l/h ανά 5 l/h. Η είσοδος στο ροόμετρο συνδέεται με την δεξαμενή σταθερής στάθμης ενώ η έξοδος με τον εύκαμπτο σωλήνα που τροφοδοτεί το jet.

Η παροχή ελέγχεται με μια σφαιρική βάνα. Η ρύθμιση του ροομέτρου έγινε με τη βοήθεια ενός ογκομετρικού σωλήνα χωρητικότητας 2 λίτρων και ενός χρονομέτρου. Έγιναν συνολικά τρεις ρυθμίσεις από τις οποίες επιλέχθηκε η αρτιότερη. 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. Οι τιμές που προέκυψαν φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 2.1 1^η Ρύθμιση

Ρύθμιση Ροομέτρου 2001_1			
Ένδειξη	T	Q	V
l/h	Min	Cc/sec	1000cc
20	115,16	8,684	
30	79,95	12,508	
40	64,38	15,533	
50	52,5	19,048	
60	45,46	21,997	
70	39,57	25,272	
80	36,25	27,586	
90	32,02	31,230	
100	29,39	34,025	
110	26,77	37,355	
120	25,59	39,078	
130	23,67	42,248	
140	22,33	44,783	
150	20,77	48,146	

Πίνακας 2.2 2^η Ρύθμιση

Ρύθμιση Ροομέτρου 2001_2			
Ένδειξη	t	Q	V
l/h	s	cc/s	2000cc
20	232,48	8,60	
30	165,11	12,11	
40	130,23	15,36	
50	110,92	18,03	
60	93,83	21,32	
70	84,19	23,76	
80	74,26	26,93	
90	67,53	29,62	
100	61,98	32,27	
110	57,09	35,03	
120	51,82	38,60	
130	48,51	41,23	
140	45,7	43,76	
150	42,61	46,94	

Η τρίτη ρύθμιση έγινε με παρόμοιο τρόπο. Για ορισμένες ενδείξεις του ροομέτρου μετρήθηκε ο χρόνος πλήρωσης μετρημένου όγκου. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται αυτές οι μετρήσεις.

Πίνακας 2.3 3^η Ρύθμιση

Ρύθμιση Ροομέτρου 2002				
Ένδειξη	t	Q	V	Q
L/h	sec	θεωρ	cc	cc/s
20	108,7	5,56	920	8,46
31	88,81	8,61	1070	12,05
40	90,18	11,11	1345	14,91
53	89,26	14,72	1700	19,05
62	83,86	17,22	1825	21,76
74	68,95	20,56	1720	24,95
90	65,75	25,00	1940	29,51
104,5	60,2	29,03	1940	32,23
120	50,68	33,33	1910	37,69
134	45,92	37,22	1920	41,81
145	41,11	40,28	1840	44,76

Το διάγραμμα της ρύθμισης του ροομέτρου που παρατίθεται προτρέπει τη χρήση περίπου γραμμικής σχέσης ρύθμισης, ανάμεσα στην ένδειξη και στην παροχή.

$$Q = -9 \times 10^{-5} f^2 + 0.3056 f + 2.941$$

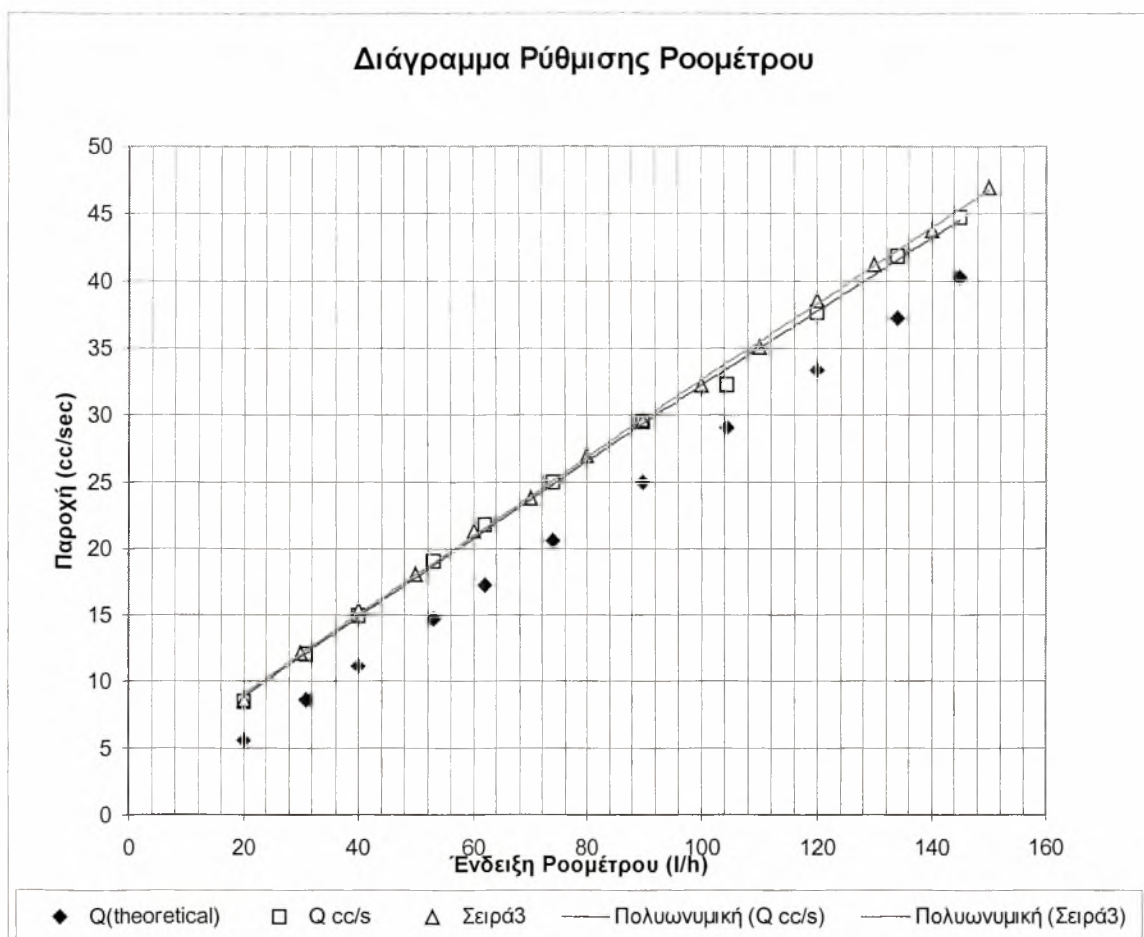
που είναι η γραμμή ελαχίστων τετραγώνων της σειράς 3, η οποία δίνει την παροχή Q (cc/sec) και προκύπτει από τις ενδείξεις x της δεύτερης ρύθμισης του ροομέτρου. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2 = 0.9995$.

Ο συνδυασμός της πρώτης, της δεύτερης και της τρίτης ρύθμισης δίνει την εξίσωση

$$Q = -0.0001 f^2 + 0.3091 f + 2.6865$$

με μεγαλύτερο σφάλμα απόκλισης (συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0.9986$).

Κατά τη διάρκεια της ρύθμισης, ο σωλήνας από τον οποίο διέρχεται η μετρούμενη παροχή, έπρεπε να είναι πλήρης με νερό και να μην περιέχει αέρα, συνθήκη παρόμοια με τη συνθήκη λειτουργίας της φλέβας.



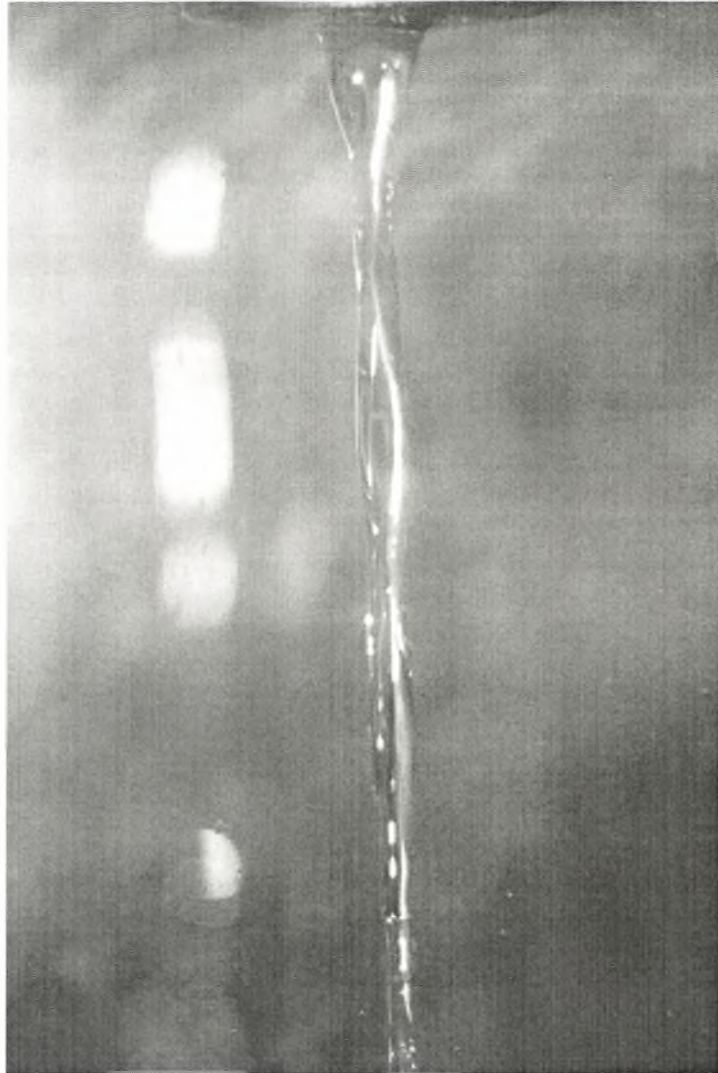
Διάγραμμα 2.1 Ρύθμιση Ροομέτρου

2.4 Πειραματικές μετρήσεις

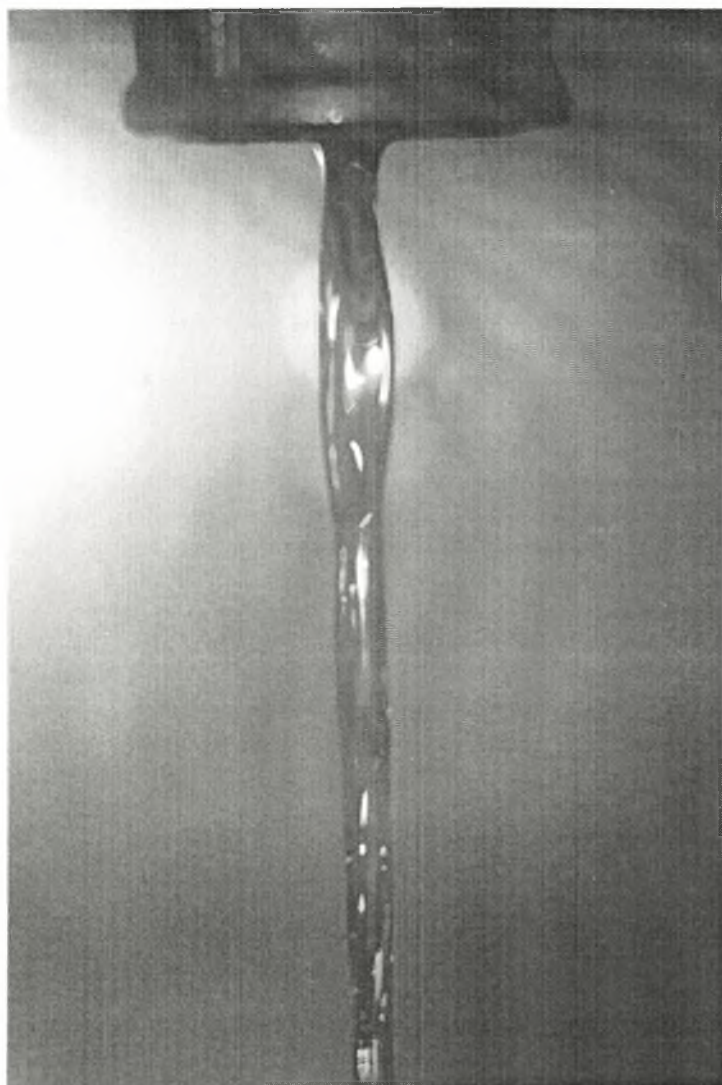
Έγιναν δύο σειρές πειραμάτων. Η πρώτη σειρά περιλαμβάνει πειράματα φλεβών σε ομογενές περιβάλλον ρευστό, ενώ η δεύτερη σειρά πειράματα σε γραμμικά στρωματομένο περιβάλλον. Για τη βιντεοσκόπηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή βιντεοκάμερα και για τη βέλτιστη απόδοση στις καταγραφόμενες εικόνες ο φωτισμός της δεξαμενής ενισχύθηκε με δύο προβολείς 1000 watt ο καθένας.

Ροή φλέβας στον αέρα. Η ροή της φλέβας στον αέρα μελετήθηκε στην κυκλική και την ορθογωνική διατομή. Κατά την έξοδο της φλέβας από την κυκλική διατομή παρατηρήθηκε απλά η αναμενόμενη αξονική συμμετρία, το δε πλάτος της φλέβας μειώνεται με την κατακόρυφη απόσταση από το οριζόντιο ακροφύσιο. Κατά την έξοδο της φλέβας από το ακροφύσιο ορθογωνικής διατομής, παρατηρείται κυματοειδείς μεταβολή του πλάτους της φλέβας σαν συνάρτηση της απόστασης, και από τις δύο όψεις παρατήρησης, τη στενή και την πλατύτερη πλευρά του ορθογωνικού ακροφυσίου. Η αυξομείωση αυτή αποτελεί φαινόμενο χωρικής αστάθειας της φλέβας, που πιθανά οφείλεται στην περιστροφή της. Για αριθμό Reynolds $Re=776$ δεν παρατηρείται κανενός είδους αστάθεια, όταν $Re=1035$ παρατηρείται κάποια διακύμανση στο πλάτος

της φλέβας (οριακή αστάθεια), ενώ όταν $Re=1293$ η αστάθεια της ροής είναι ευκρινής. Ακολούθως, παρατίθενται φωτογραφίες με το φαινόμενο της αστάθειας της ροής κατά την εκροή φλέβας από την ορθογωνική διατομή



Φωτο 2.8 Αστάθεια ροής, παρατήρηση από την πλευρά της μεγάλης διάστασης της φλέβας



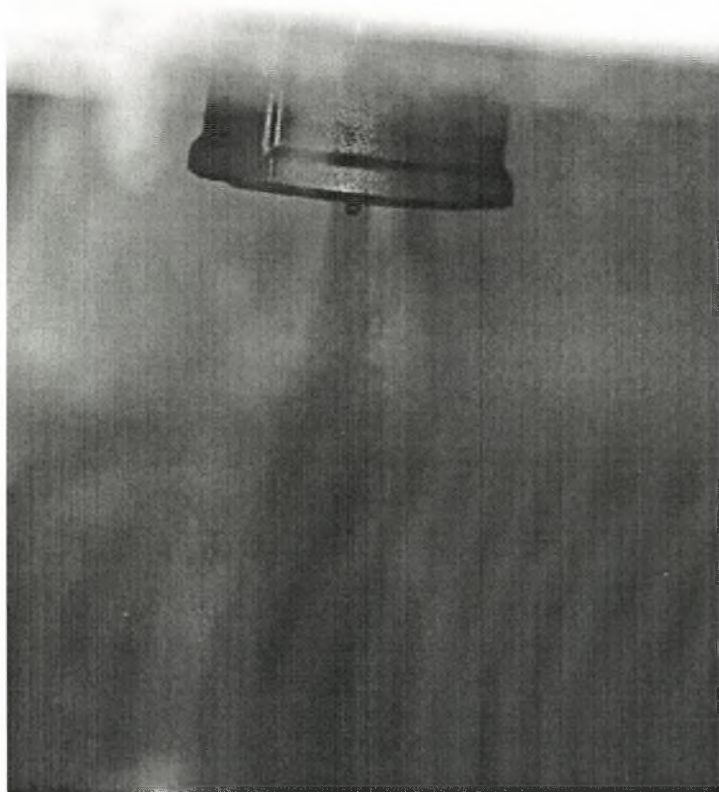
Φωτο 2.9 Αστάθεια ροής, παρατήρηση από την πλευρά της μικρής διάστασης της φλέβας

Πρώτη σειρά πειραμάτων – Διάχυση της φλέβας σε ομογενή αποδέκτη

Σκοπός της συγκεκριμένης σειράς πειραμάτων είναι να εξεταστεί η γωνία διάχυσης της φλέβας σαν συνάρτηση της διατομής του ακροφυσίου. Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία : Έγινε πλήρωση της κύριας δεξαμενής με καθαρό νερό έως τη στάθμη υπερχειλίσης. Το διάλυμα της φλέβας περιείχε ελάχιστο αλάτι και χρώμα. Επίσης το ακροφύσιο από το οποίο έγινε η εκροή της φλέβας ήταν οριζόντιο, 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 οριζόντια μέσα στο νερό και αποσφραγίζεται.

Συνολικά διεξήχθησαν τέσσερα πειράματα, ένα για κάθε προσαρμοζόμενη διατομή του ακροφυσίου. Στο πρώτο πείραμα προσαρμόστηκε στο ακροφύσιο η ορθογωνική διατομή με στρογγυλεμένες γωνίες, και παρατηρήσαμε τη φλέβα για παροχές 20, 33, 45, 65, 76, 100, 120, 137 l/h (ένδειξη του ροομέτρου). Στο δεύτερο πείραμα προσαρμόστηκε στο ακροφύσιο η τριγωνική διατομή με στρογγυλεμένες γωνίες, και παρατηρήσαμε τη φλέβα για παροχές 30, 55, 80, 100, 120, 140, 149 l/h (ένδειξη του ροομέτρου). Στο τρίτο πείραμα προσαρμόστηκε στο ακροφύσιο η κυκλική διατομή λήφθηκαν μετρήσεις για παροχές 21, 41, 70, 105, 130, 140 l/h (ένδειξης του ροομέτρου). Στο τέταρτο πείραμα προσαρμόστηκε στο ακροφύσιο η τετραγωνική διατομή με στρογγυλεμένες γωνίες, και παρατηρήσαμε τη φλέβα για παροχές 25, 70, 90, 115, 134, 150 l/h της ένδειξης του ροομέτρου. Για την βιντεοσκόπηση των πειραμάτων η κάμερα τοποθετήθηκε σε απόσταση 1.28 μέτρων από του κατακόρυφου άξονα της συσκευής της φλέβας

Από την παρατήρηση της διάχυσης των παραπάνω φλεβών σε ομογενή αποδέκτη σημειώνουμε ότι δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στη γωνία διάχυσης της φλέβας. Η μακροσκοπική άποψη όλων των φλεβών ήταν η ίδια χωρίς να παρουσιαστεί κάποια εξαιρετικά διαφορετική συμπεριφορά στην τυρβώδη διάχυση. Ακολουθεί τυπική φωτογραφία



Φωτο 2.10 Γωνία διάχυσης φλέβας

Δεύτερη σειρά πειραμάτων – Διάχυση σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη

Στη δεύτερη σειρά πειραμάτων (διάχυση φλέβας σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη) έγινε χρήση μόνο δύο ακροφυσίων από τα τέσσερα, του κυκλικού και του ορθογωνικού με στρογγυλεμένες γωνίες. Κατά την διενέργεια της συγκεκριμένης σειράς των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε όλη η πειραματική διάταξη.

Για την δημιουργία της στρωμάτωσης μέσα στην δεξαμενή χρησιμοποιήθηκαν οι δύο μεγάλες κυλινδρικές δεξαμενές. Η διαδικασία περιγράφεται στη συνέχεια. Αρχικά γεμίζουμε με καθαρό νερό και τις δύο κυλινδρικές δεξαμενές μέχρι τα 45 εκατοστά από το πυθμένα και στη συνέχεια ανοίγουμε τη βάνα του σωλήνα σύνδεσης των δεξαμενών. Όταν οι στάθμες των δεξαμενών εξομοιωθούν, η βάνα ξανακλείνει και προσθέτουμε αλάτι (NaCl) στην κυλινδρική δεξαμενή που είναι τοποθετημένη κάτω από τον ηλεκτροκίνητο αναδευτήρα. Η ποσότητα αλάτος που προστίθεται είναι συνάρτηση της επιθυμητής κλίσης της πυκνότητας (dp/dz) και κυμαίνεται από 4kg έως 8kg. Μετά την προσθήκη αλάτος γίνεται έντονη ανάδευση για την πλήρη ανάμειξη και ομογενοποίηση του διαλύματος.

2.5 Ρύθμιση αισθητήρα μέτρησης αλατότητας (Head-probe, 1983)

Από το παραπάνω ομογενές διάλυμα 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 πυκνότητά 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 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.

2.6 Δημιουργία στρωμάτωσης

Το στάδιο της ρύθμισης του αισθητήρα ακολουθεί η δημιουργία του γραμμικού προφίλ στρωμάτωσης. Μέσα στην κύρια δεξαμενή τοποθετούμε τους πλωτούς δίσκους διάχυσης του διαλύματος NaCl. Μόλις η στάθμη του διαλύματος μέσα στην κύρια δεξαμενή ανέλθει μερικά εκατοστά πάνω από τον πυθμένα, ανοίγεται η βάννα που βρίσκεται στο συνδετήριο σωλήνα των δύο μεγάλων κυλινδρικών δεξαμενών ώστε να εισέρχεται καθαρό νερό μέσα στο διάλυμα NaCl, το οποίο πρέπει να σημειωθεί ότι βρίσκεται υπό συνεχή ανάδευση για να διατηρείται η ομογενές. Το συνεχώς αραιούμενο διάλυμα μεταφέρεται διαμέσου των πλωτών δίσκων στην κύρια δεξαμενή. Επειδή η ταχύτητα εκροής του διαλύματος που συνεχώς αραιώνεται είναι πολύ μικρή, δεν υπάρχει ανάμειξη και το ελαφρύτερο νερό παραμένει στην επιφάνεια. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μια διαβάθμιση στην πυκνότητα του διαλύματος καθ' ύψος της κύριας δεξαμενής, το πυκνότερο διάλυμα βρίσκεται στον πυθμένα, ενώ όσο η στάθμη του διαλύματος πλησιάζει προς την υπερχειλίση, τόσο η πυκνότητα της μειώνεται. Λόγω των εξαιρετικά μικρών ταχυτήτων εκροής του διαλύματος, ο χρόνος που απαιτείται για να γεμίσει η κύρια δεξαμενή κατά την δημιουργία στρωμάτωσης αγγίζει τις δυο ώρες. Όταν η στάθμη του διαλύματος μέσα στην κύρια δεξαμενή φτάσει στην υπερχειλίση, διακόπτουμε την παροχή του διαλύματος NaCl, και με πολύ προσοχή απομακρύνονται οι πλωτοί δίσκοι, γιατί η παραμικρή διαταραχή της ελεύθερης επιφάνειας μπορεί να προκαλέσει ανάμειξη, με πιθανή αλλοίωση στο επιθυμητό προφίλ της πυκνομετρικής διαβάθμισης.

2.7 Μέτρηση προφίλ πυκνότητας

Για την εύρεση του πυκνομετρικού προφίλ, τοποθετούμε μέσα στην γεμάτη κύρια δεξαμενή του αισθητήρα, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος σε κατακόρυφο βαθμονομημένο κανόνα. Αρχικά λαμβάνεται μέτρηση του δυναμικού σε βάθος 8.5 εκατοστών από την ελεύθερη επιφάνεια, που αντιστοιχεί στο επίπεδο του ακροφυσίου. Στη συνέχεια λαμβάνονται μετρήσεις ανά 5 εκατοστά, δηλαδή στα 13.5 στα 18.5 μέχρι και βάθος 53.5 εκατοστών. Το μετρούμενο αυτό δυναμικό με βάση τη ρύθμιση του αισθητήρα μέτρησης της αγωγιμότητας ανάγεται σε πυκνότητα. Στη συνέχεια κατασκευάζεται το γράφημα στάθμης / πυκνότητας και παρατηρούμε την γραμμικότητα στο προφίλ της στρωμάτωσης της πυκνότητας. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η κλίση του γραμμικού προφίλ της πυκνότητας dp/dz και η συχνότητα άνωσης (παράμετρος N).

2.8 Παρασκευή διαλύματος φλέβας

Σε κυλινδρικό δοχείο διαλύεται σε νερό κόκκινο υδρόχρωμα μαζί ποσότητα άλατος τέτοια ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή πυκνότητα της φλέβας σε σχέση με την πυκνομετρική στρωμάτωση της κύριας δεξαμενής. Ειδικότερα για την δημιουργία πλουμίου, του οποίου κύριο χαρακτηριστικό είναι η άνωση, η πυκνότητα του διαλύματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τη μετρούμενη πυκνότητα στο επίπεδο του ακροφυσίου στην κύρια δεξαμενή. Στην περίπτωση της απλής φλέβας (jet) που η άνωση είναι αμελητέα, η πυκνότητα της φλέβας πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή, δηλαδή ελάχιστα μεγαλύτερη από την πυκνότητα του περιβάλλοντος στο επίπεδο του

ακροφυσίου. 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. Μόλις αρχίσει η υπερχειλίση στη δεξαμενή σταθερής στάθμης και το πλεόνασμα διοχετεύεται από τον σωλήνα υπερχειλίσεως στο δοχείο του υγρού της φλέβας είναι δυνατή η επίτευξη σταθερής παροχής φλέβας. Τυχών υπαρχών αέρας στο κύκλωμα της φλέβας αφαιρείται με την ανατροπή της συσκευής του ακροφυσίου έξω από την κύρια δεξαμενή και την εξολοκλήρου πλήρωση αυτής με διάλυμα. 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.

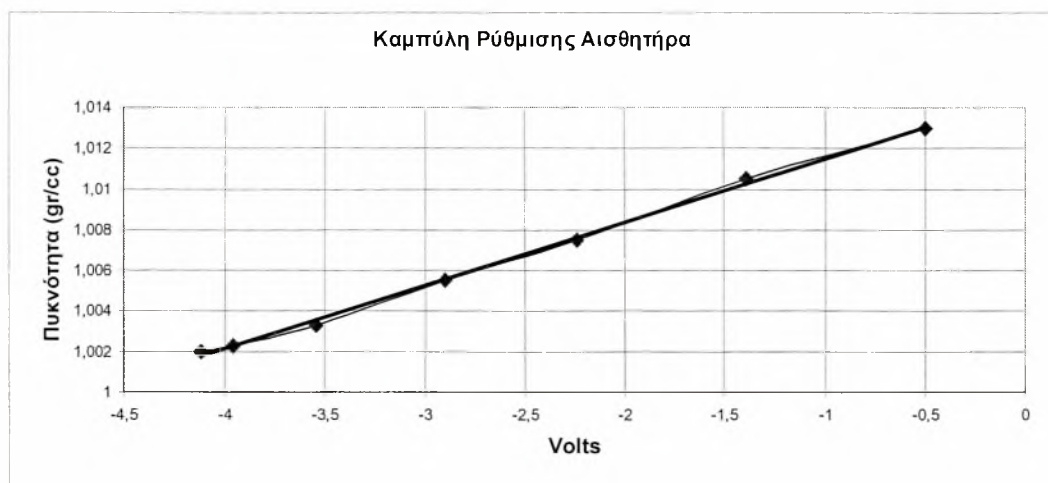
2.9 Εκτέλεση πειράματος

Για διάφορες παροχές της φλέβας σε μια συγκεκριμένη στρωμάτωση πυκνότητας, μετράται το μέγιστο ύψος διάχυσης και το οριζόντιο επίπεδο διάχυσης όπου η άνωση είναι ουσιαστικά μηδενική. Τα πειράματα καταγράφονται παράλληλα με ψηφιακή βιντεοκάμερα, ενώ η κύρια δεξαμενή φωτίζεται με προβολείς για καλύτερη βιντεοσκόπηση. Μετά τη λήψη των μετρήσεων παρατηρείται στρωμάτωση του αναμειγμένου κόκκινου διαλύματος της φλέβας σε ορισμένο πυκνομετρικό ύψος της δεξαμενής όπου και παρατηρείται ένα σκαλοπάτι στο γραμμικό προφίλ της πυκνότητας. Για να επιτελέσουμε και δεύτερο πείραμα πρέπει να γίνουν δύο πράγματα : (1) να αλλάξουμε το χρώμα του υγρού της φλέβας σε μπλε ή μαύρο (σκουρότερο για καλύτερη ευκρίνεια) και (2) να ξαναδημιουργήσουμε γραμμικό προφίλ πυκνότητας στο ίδιο νερό καταστρέφοντας το πυκνομετρικό σκαλοπάτι. Το τελευταίο επιτυγχάνεται με τη χρήση ανοξειδωτής σήτας (grid) με διάκενο 5 cm, η οποία με αργό ανεβοκατέβασμα μέσα στην γεμάτη κύρια δεξαμενή κατανέμει ομοιόμορφα την πυκνότητα του στρωματωμένου διαλύματος της φλέβας δημιουργώντας ένα νέο προφίλ γραμμικής πυκνομετρικής διαβάθμισης. Το προφίλ αυτό μετράται με τον ήδη ρυθμισμένο αισθητήρα και από την μετατροπή των διαφορών δυναμικού σε κάθε υψομετρική θέση λαμβάνεται ένα γραμμικό προφίλ πυκνότητας πιο απότομο από το αρχικό. Ανάλογα με την απαίτηση των πειραματικών δεδομένων παρασκευάζεται το διάλυμα της φλέβας, και χρωματίζεται μπλε ή μαύρο, και επαναλαμβάνεται η πειραματική παρατήρηση του ΜΥΑ για διάφορες παροχές.

2.10 Περιγραφή Τυπικού Πειράματος

Στην ενότητα αυτή θα περιγραφεί το πείραμα διάχυσης κυκλικής φλέβας που έγινε στις 15/4/2002 με κωδικό EXP9-1 και EXP9-2. Αρχικά γεμίσαμε τις δύο δημιουργίας στρωμάτωσης με καθαρό νερό έως την ένδειξη των 45 cm. Μόλις εξισορρόπησαν οι στάθμες απομονώθηκαν. Προσθέσαμε άλατι στην δεξαμενή όπου βρίσκεται ο μηχανοκίνητος αναδευτήρας και τέθηκε σε λειτουργία η ανάδευση. Λήφθηκε διάλυμα από την δεξαμενή αυτή μετρήθηκε η πυκνότητα του που είχε τιμή 1.013 gr/cc. Στη συνέχεια αραιώθηκε σταδιακά δίνοντας διαδοχικά τις εξής τιμές πυκνότητας 1.0105 gr/cc, 1.0075 gr/cc, 1.005 gr/cc, 1.0031 gr/cc, 1.0023 gr/cc και 1.002 gr/cc.

Τα διαλύματα αυτά μετρήθηκαν με τον αισθητήρα, και έδωσαν τις εξής αντίστοιχες τιμές σε volts $-0.5V$, $-1.390V$, $-2.239V$, $-2.901V$, $-3.545V$, $-3.961V$, και $-4.118V$. Στη συνέχεια φτιάχτηκε το γράφημα πυκνότητας / ένδειξης του βολτομέτρου.



Διάγραμμα 2.2 Καμπύλη Ρύθμισης Αισθητήρα μέτρηση της συγκέντρωσης NaCl και επομένως της πυκνότητας του διαλύματος

Η γραμμή των ελαχίστων τετραγώνων έχει εξίσωση

$$\rho = 0.0031(\Delta V) + 1.0146$$

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

Στη συνέχεια τίθεται σε λειτουργία η αντλία για τη μεταφορά του διαλύματος στην δεξαμενή στρωμάτωσης ενώ ταυτόχρονα ανοίγεται και η βάνα που συνδέει τις δυο κυλινδρικές δεξαμενές και για τη σταδιακή αραιώση του διαλύματος. Παράλληλα έχουν τοποθετηθεί οι πλωτήρες διάχυσης μέσα στη δεξαμενή στρωμάτωσης και έτσι αυτή γεμίζει με το συνεχώς αραιωμένο διάλυμα. Μόλις γεμίσει η δεξαμενή, οι πλωτήρες απομακρύνονται και λαμβάνεται το προφίλ της πυκνότητας με τη βοήθεια του ήδη ρυθμισμένου αισθητήρα. Τα αποτελέσματα της καθ' ύψος μέτρησης της πυκνότητας φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα και το αντίστοιχο γραμμικό προφίλ πυκνότητας του αποδέκτη με εξίσωση :

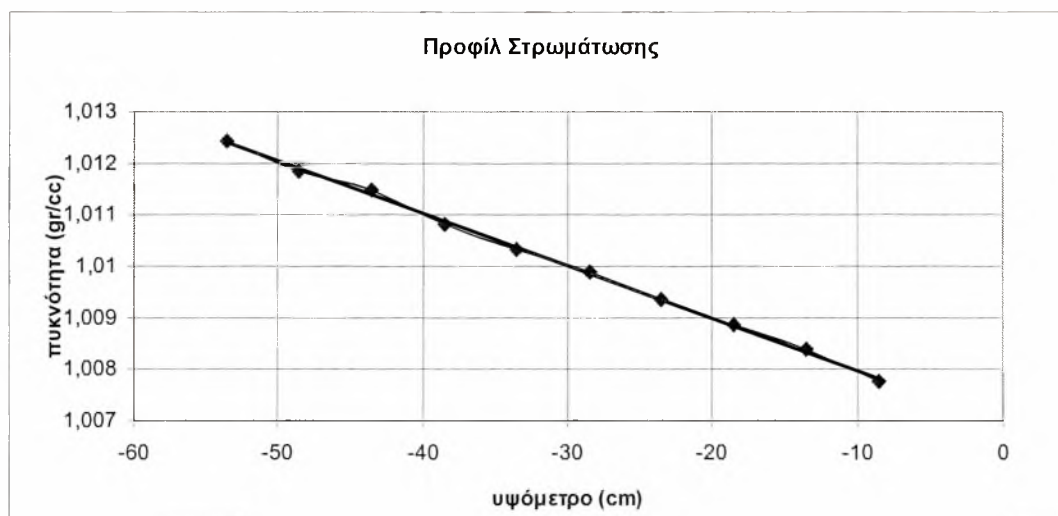
$$\rho = \rho_a + Kz, \text{ όπου } \rho_a = \rho_0(z=0)$$

Η πυκνότητα του περιβάλλοντος στη στάθμη του ακροφυσίου ρ_a που προκύπτει για $z=8.50$ cm (στάθμη ακροφυσίου). Στη συνέχεια παρασκευάζεται το διάλυμα του jet με πυκνότητα ελάχιστα μεγαλύτερη από την πυκνότητα του περιβάλλοντος, η τιμή της οποίας είναι 1.008 gr/cc και χρωματίζεται κόκκινο. Μετά τροφοδοτούμε το δοχείο σταθερής στάθμης με το διάλυμα της φλέβας. Μόλις αρχίσει η υπερχειλίση ανοίγουμε τη σφαιρική δικλείδα για την τροφοδοσία της φλέβας. Ρυθμίζεται το ροόμετρο στην ένδειξη 30 l/h και λαμβάνουμε την πρώτη μέτρηση του μέγιστου ύψους ανύψωσης της φλέβας μετά από χρονικό διάστημα ορισμένων δευτερολέπτων. Στη συνέχεια μεταβάλλουμε την παροχή του ροομέτρου στις ενδείξεις 44 l/h, 88 l/h, 114 l/h και 134

l/h. Οι μετρήσεις του ΜΥΑ για κάθε παροχή καταγράφονται με ψηφιακή βιντεοκάμερα από όπου λαμβάνονται και τα ακριβή ύψη ανύψωσης της φλέβας καθώς και τα οριζόντια επίπεδα διάχυσης. Οι τιμές των ΜΥΑ για τις τιμές των παραπάνω παροχών είναι αντίστοιχα 25.5 cm, 29.5 cm, 36 cm, 42 cm και 46.5 cm.

Πίνακας 2.4 Δεδομένα στρωμάτωσης

Δεδομένα Στρωμάτωσης		
Υψόμετρο	C-Volts	Πυκνότητα
(cm)		(gr/cc)
-8,5	-2,205	1,007765
-13,5	-2,0375	1,008384
-18,5	-1,884	1,00886
-23,5	-1,727	1,009346
-28,5	-1,553	1,009886
-33,5	-1,413	1,01032
-38,5	-1,25	1,010825
-43,5	-1,041	1,011473
-48,5	-0,919	1,011851
-53,5	-0,732	1,012431



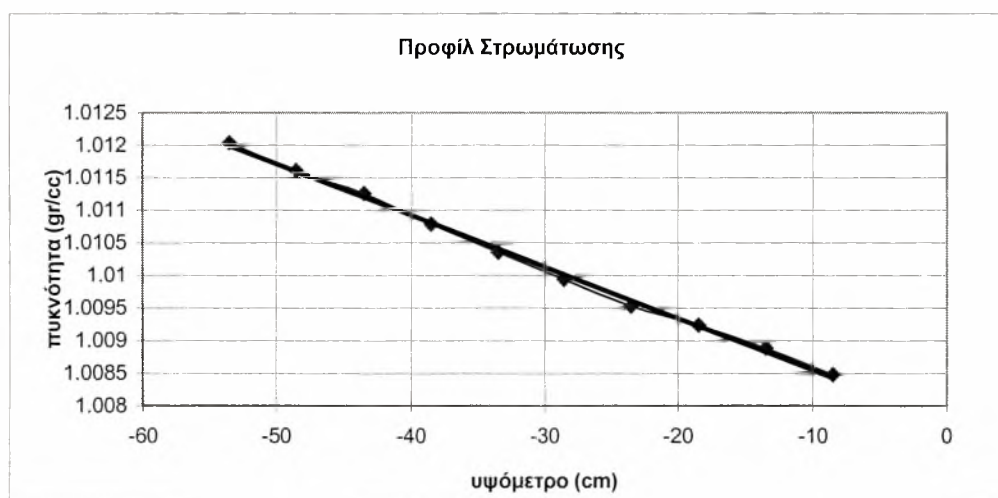
Διάγραμμα 2.3 Γραμμικό προφίλ πυκνότητας

Για την εξοικονομήσουμε χρόνο δεν αδειάζουμε τη δεξαμενή στρωμάτωσης. Έχει εισαχθεί όμως το διάλυμα της φλέβας, που είναι συγκεκριμένης πυκνότητας. Στο ύψος που η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού είναι ίδια με την πυκνότητα της φλέβας στο προφίλ της γραμμικής στρωμάτωσης παρατηρείται ένα «σκαλοπάτι», οπότε το

προφίλ δεν είναι απόλυτα γραμμικό. Για την ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας του διαλύματος της φλέβας, χρησιμοποιούμε σήτα την οποία κινούμε ανοδικά και καθοδικά με αργές χειρονακτικές κινήσεις γύρω στις 10 με 15 φορές. Η καινούργια βαθμίδα πυκνότητας είναι μικρότερη από την αναμενόμενη, αλλά ακόμα παραμένει γραμμική εξαιτίας της κατακόρυφης ανάμειξης (Fernando 1992). Μετά την εξομάλυνση μετράμε ξανά το προφίλ της στρωμάτωσης και παίρνουμε τις ακόλουθες τιμές. Παρατηρείται ότι το προφίλ αυτό είναι πιο απότομο από το προηγούμενο.

Πίνακας 2.4 Δεδομένα στρωμάτωσης

Δεδομένα Στρωμάτωσης		
Υψόμετρο (cm)	C-Volts	Πυκνότητα (gr/cc)
-8,5	-1,974	1,008481
-13,5	-1,877	1,008881
-18,5	-1,762	1,009238
-23,5	-1,667	1,009532
-28,5	-1,535	1,009942
-33,5	-1,402	1,010354
-38,5	-1,263	1,010785
-43,5	-1,111	1,011256
-48,5	-0,999	1,011603
-53,5	-0,858	1,01204

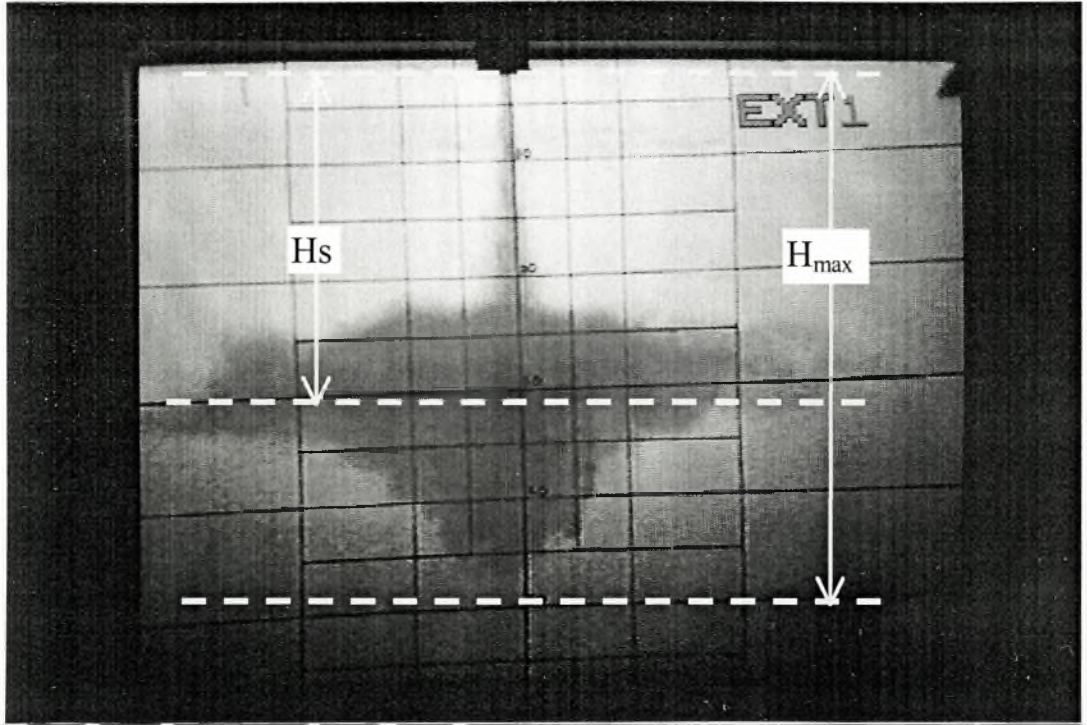


Διάγραμμα 2.4 Γραμμικό προφίλ πυκνότητας

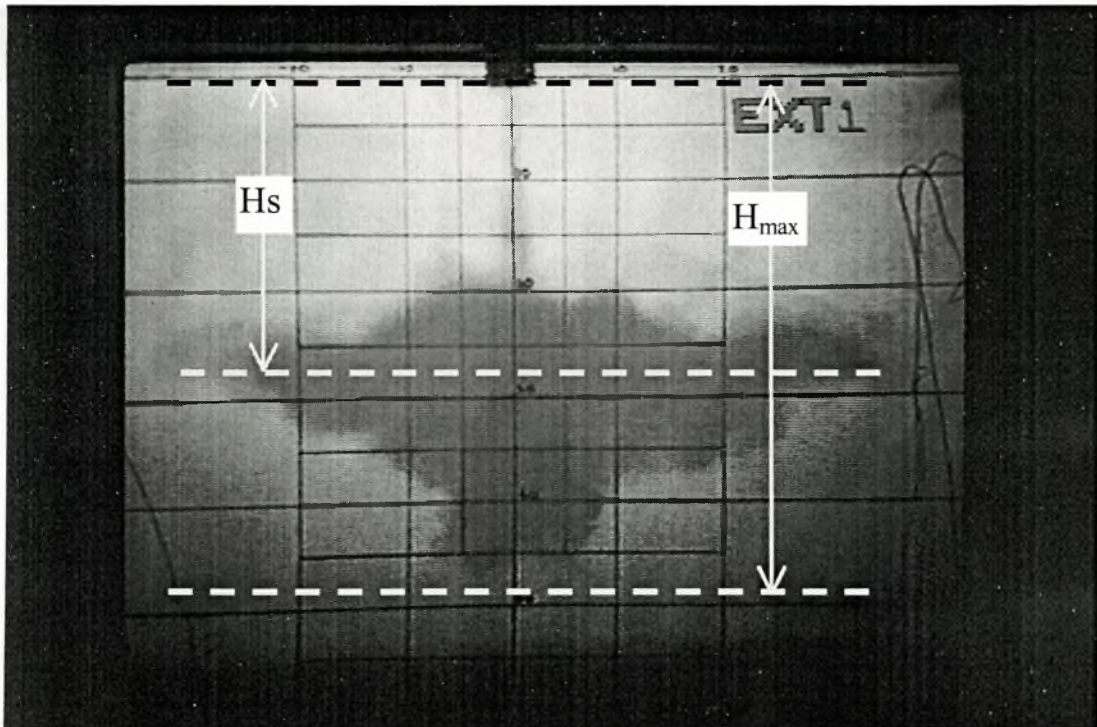
Παρασκευάζεται ομοίως διάλυμα φλέβας με πυκνότητα 1.0075 gr/cc και λαμβάνονται οι ακόλουθες μετρήσεις. Για τις εξής ενδείξεις του ροομέτρου 23 l/h, 43 l/h, 70 l/h, 109 l/h, 138 l/h το ΜΥΑ είναι αντίστοιχα 21.5cm, 26.5 cm, 33.5 cm, 40.5 cm, 45 cm.

2.11 Ανάκτηση αποτελεσμάτων

Το σύστημα καταγραφής αποτελείται από μια video camera, ένα video cassette recorder και μια οθόνη τηλεόρασης. Το ρευστό της φλέβας βάφτηκε κόκκινο ή μπλε χρησιμοποιώντας υδρόχρωμα και methylen blue αντίστοιχα, και το μέγιστο ύψος ανύψωσης της φλέβας μετρήθηκε στην οθόνη με βάση τον κλίμακα της δεξαμενής στρωμάτωσης. Κάθε φλέβα βιντεοσκοπήθηκε για ένα περίπου λεπτό για κάθε παροχή και σαν μέγιστο ύψος ανύψωσης θεωρήθηκε ο μέσος όρος των διακυμάνσεων των μεγίστων τιμών κατά τη διάρκεια της σταθερής παροχής. Για κάθε γέμισμα της δεξαμενής έγιναν δύο πειράματα ένα με το ρευστό της φλέβας βαμμένο κόκκινο και ένα με το ρευστό βαμμένο μπλε.



Φωτο 2.11 Κυκλική φλέβα σε γραμμικά στρωματομένο αποδέκτη. Σημειώνονται το ΜΥΑ (H_{max}) και το επίπεδο οριζόντιας διάχυσης H_s .



Φωτο 2.12 Ορθογωνική (1:2) φλέβα σε γραμμικά στρωματομένο αποδέκτη. Σημειώνονται το ΜΥΑ (H_{max}) και το επίπεδο οριζόντιας διάχυσης H_s .

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Στους πίνακες 3.1 και 3.2 που ακολουθούν παρουσιάζονται όλα τα αρχικά δεδομένα καθώς και τα αποτελέσματα των μετρήσεων, για την κυκλική και την ορθογωνική φλέβα αντίστοιχα. Συγκεκριμένα στην πρώτη στήλη αναγράφεται η ημερομηνία που έγινε το πείραμα, στη δεύτερη στήλη φαίνεται ο κωδικός του πειράματος. Ακολουθεί η στήλη με την ένδειξη f του ροομέτρου, στη συνέχεια υπολογίζεται η παροχή σε (cc/s) βάσει της εξίσωσης της που προκύπτει από τη ρύθμιση του ροομέτρου, που είναι :

$$Q = -(9 \times 10^{-5}) f^2 + 0.3056 f + 2.941 \quad (3-1)$$

Στις επόμενες τέσσερις στήλες αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διατομής του ακροφύσιου από το οποίο εξέρχεται η φλέβα. Το εμβαδόν A , η βρεχόμενη περίμετρος P , η υδραυλική ακτίνα R και η ισοδύναμη διάμετρος D_{eq} , που για την κυκλική φλέβα είναι η διάμετρος της διατομής, ενώ για την ορθογωνική διατομή $D_{eq} = 4R$. Ακολουθούν οι στήλες με την πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού ρ_a στο επίπεδο του ακροφύσιου ($z=0$), όπως προέκυψε από το προφίλ της πυκνότητας, η πυκνότητα της φλέβας ρ_o και ο λόγος $\Delta\rho/\rho_o$ της αδιαστατοποιημένης ανωστικής δύναμης στο επίπεδο του ακροφύσιου. Στην επόμενη στήλη υπολογίζεται μέση ταχύτητα εξόδου της φλέβας από το ακροφύσιο W , ενώ στη διπλανή στήλη υπολογίζεται ο συντελεστής πυκνομετρικής στρωμάτωσης N (s^{-2}) βάσει του τύπου

$$N = -\frac{g}{\rho_o} \frac{d\rho}{dz}, \quad (3-2)$$

όπου $d\rho/dz$ είναι η κλίση K της ευθείας που προκύπτει από τη σχέση υπολογισμού της πυκνότητας σαν συνάρτηση του βάθους

$$\rho = \rho_a + Kz; \rho_a = \rho_a(z = 0)$$

Στις στήλες που ακολουθούν υπολογίζονται η ειδική ορμή M και η ανωστική δύναμη B από τις σχέσεις :

$$M = QW \quad (\text{cm}^4/\text{s}^2) \quad (3-3)$$

και

$$B = 981 \frac{\Delta\rho}{\rho_o} Q \quad (\text{cm}^4/\text{s}^3) \quad (3-4)$$

αντίστοιχα, ενώ στη συνέχεια υπολογίζονται ο αρχικός αριθμός Richardson και ο αριθμός Reynolds από τις γνωστές σχέσεις

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

και

$$Re = \frac{WD_{eq}}{\nu}; D_{eq} = 4R = 4(A/P) \quad (3-6)$$

αντίστοιχα.

Ακολουθούν οι στήλες με το μέγιστο ύψος H_{\max} καθώς και επίπεδο διάχυσης H_s και στις στήλες που ακολουθούν υπολογίζονται οι αδιάστατοι όροι

$$\frac{M}{B} N^{1/2} \quad (3-7)$$

$$H_{\max} \frac{N}{M}^{1/4} = \frac{H_{\max}}{L_j} \quad (3-8)$$

και

$$H_{\max} \frac{N^{3/8}}{B^{1/4}} = \frac{H_{\max}}{L_p} \quad (3-9)$$

Τα πειραματικά δεδομένα (ρυθμίσεις, προφίλ πυκνότητας και μετρήσεις) κάθε πειράματος παρουσιάζονται με κάθε λεπτομέρεια στο Παράρτημα.

Πίνακας 3.1 Αρχικά χαρακτηριστικά και μετρήσεις κυκλικής φλέβας

Ημερομηνία	Κωδικός Περιβάλλοντος	Ένδειξη Ροόμετρου	Q	A	P	R	D _{ση}	ρ _s	ρ _h	Δρ/ρ _s	W	N	M	B	Rt(0)	Re	H _{max}	H _s	[M/E]N ^{1/2}	H _m /L _j	H _m /L _p
		l/h	cm/s	cm ²	cm	cm	cm	gr/l	gr/l		cm/s	(s ⁻²)	cm ⁴ /s ²	cm ⁴ /s ³			cm	cm			
3/28/02	EXP1-1	150	46.756	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0082	1.0192	0.0109	59.53	0.1295	2783.46	500.44	0.052	5177	55.00	33.00	2.002	4.542	5.403
	EXP1-2	120	38.317	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0082	1.0192	0.0109	48.79	0.1295	1869.37	410.12	0.063	4242	51.50	32.00	1.640	4.698	5.317
	EXP1-3	21	9.319	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0082	1.0192	0.0109	11.87	0.1295	110.57	99.74	0.260	1032	27.00	20.00	0.399	4.995	3.970
4/5/02	EXP2-1	150	46.756	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0054	1.0150	0.0095	59.53	0.1002	2783.46	437.97	0.048	5177	58.00	49.50	2.012	4.493	5.351
	EXP2-2	125	39.735	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0054	1.0150	0.0095	50.59	0.1002	2010.26	372.20	0.057	4399	52.00	42.00	1.710	4.370	4.987
	EXP2-3	76	25.647	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0054	1.0150	0.0095	32.65	0.1002	837.49	240.23	0.088	2840	40.00	35.00	1.104	4.184	4.288
	EXP2-4	65	22.425	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0054	1.0150	0.0095	28.55	0.1002	640.28	210.05	0.101	2483	38.00	30.00	0.965	4.250	4.213
	EXP2-5	26	10.826	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0054	1.0150	0.0095	13.78	0.1002	149.22	101.41	0.209	1199	30.00	25.00	0.466	4.830	3.990
	EXP2-6	15	7.505	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0054	1.0150	0.0095	9.56	0.1002	71.71	70.30	0.302	831	25.00	20.00	0.323	4.834	3.644
4/6/02	EXP3-1	30	12.028	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0175	0.0105	15.31	0.1026	184.21	124.22	0.198	1332	33.00	19.50	0.475	5.069	4.209
	EXP3-2	90	29.716	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0175	0.0105	37.84	0.1026	1124.33	306.89	0.080	3290	45.00	25.00	1.173	4.398	4.578
	EXP3-3	130	41.148	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0175	0.0105	52.39	0.1026	2155.80	424.95	0.058	4556	52.00	32.00	1.625	4.319	4.876
	EXP3-4	150	46.756	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0175	0.0105	59.53	0.1026	2783.46	482.87	0.051	5177	58.00	38.00	1.846	4.519	5.288
4/8/02	EXP4-1	24	10.224	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0043	1.0140	0.0097	13.02	0.0773	133.08	96.87	0.223	1132	32.00	23.00	0.382	4.968	3.905
	EXP4-2	74	25.063	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0043	1.0140	0.0097	31.91	0.0773	799.77	237.47	0.091	2775	46.00	35.00	0.936	4.561	4.487
	EXP4-3	124	39.452	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0043	1.0140	0.0097	50.23	0.0773	1981.71	373.80	0.058	4368	55.50	40.00	1.474	4.386	4.833
	EXP4-4	144	45.081	0.785	3.140	0.250	1.000	1.0043	1.0140	0.0097	57.40	0.0773	2587.62	427.14	0.050	4991	57.50	48.00	1.684	4.251	4.843
4/9/02	EXP5-1-1	40	15.021	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0097	1.0102	0.0005	19.13	0.1464	287.28	7.30	0.034	1663	25.50	15.00	15.064	3.831	7.548
	EXP5-1-2	85	28.267	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0097	1.0102	0.0005	35.99	0.1464	1017.33	13.73	0.018	3130	30.50	18.50	28.347	3.341	7.708
	EXP5-1-3	120	38.317	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0097	1.0102	0.0005	48.79	0.1464	1869.37	18.61	0.013	4242	38.50	22.00	38.426	3.622	9.017
	EXP5-1-4	144	45.081	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0097	1.0102	0.0005	57.40	0.1464	2587.62	21.90	0.011	4991	42.00	27.50	45.209	3.643	9.445
4/9/02	EXP5-2-1	30	12.028	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0112	1.0125	0.0013	15.31	0.1078	184.21	15.17	0.069	1332	25.00	13.00	3.987	3.888	5.494
	EXP5-2-2	55	19.477	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0112	1.0125	0.0013	24.80	0.1078	483.00	24.56	0.043	2156	30.50	27.00	6.456	3.728	5.942
	EXP5-2-3	113	36.325	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0112	1.0125	0.0013	46.25	0.1078	1680.01	45.81	0.023	4022	40.00	31.00	12.040	3.580	6.689
	EXP5-2-4	130	41.148	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0112	1.0125	0.0013	52.39	0.1078	2155.80	51.89	0.020	4556	44.00	35.00	13.639	3.700	7.110
	EXP5-2-5	150	46.756	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0112	1.0125	0.0013	59.53	0.1078	2783.46	58.97	0.018	5177	48.00	38.00	15.497	3.787	7.513
4/10/02	EXP6-1	26	10.826	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0060	0.0015	13.78	0.1030	149.22	15.86	0.083	1199	21.00		3.020	3.404	4.488
	EXP6-2	60	20.953	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0060	0.0015	26.68	0.1030	558.99	30.69	0.043	2320	30.00		5.846	3.496	5.435
	EXP6-3	87	28.847	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0060	0.0015	36.73	0.1030	1059.53	42.26	0.031	3194	36.50		8.048	3.625	6.105
	EXP6-4	120	38.317	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0060	0.0015	48.79	0.1030	1869.37	56.13	0.023	4242	41.50		10.690	3.576	6.466
	EXP6-5	137	43.119	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0060	0.0015	54.90	0.1030	2367.27	63.17	0.021	4774	45.50		12.030	3.696	6.883
4/10/02	EXP7-1	27	11.127	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0050	0.000498	14.17	0.1161	157.63	5.43	0.046	1232	18.50		9.885	3.048	5.404
	EXP7-2	35	13.527	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0050	0.000498	17.22	0.1161	232.97	6.61	0.038	1498	22.00		12.017	3.287	6.120
	EXP7-3	59	20.658	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0050	0.000498	26.30	0.1161	543.37	10.09	0.025	2287	26.50		18.353	3.204	6.631
	EXP7-4	90	29.716	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0050	0.000498	37.84	0.1161	1124.33	14.51	0.017	3290	35.00		26.400	3.528	7.997
	EXP7-5	138	43.400	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0045	1.0050	0.000498	55.26	0.1161	2398.21	21.19	0.012	4805	45.00		38.557	3.754	9.353

Πίνακας 3.1 Αρχικά χαρακτηριστικά και μετρήσεις κυκλικής φλέβας (συνέχεια)

Ημερομηνία	Κωδικός Περίμετρος	Ένδειξη Ροομέτρου	Q	A	P	R	D _{ση}	ρ _s	ρ _w	Ap/ρ _s	W	N	M	B	Rt(0)	Re	H _{max}	H _s	[M/β]N ^{1/2}	H _m /L _v	H _m /L _p
		l/h	cc/s	cm ²	cm	cm	cm	gr/l	gr/l		cm/s	(s ⁻²)	cm ⁴ /s ²	cm ⁴ /s ²	cm ⁴ /s ³		cm				
4/11/02	EXP8-1-1	25	10.525	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0080	1.0082	0.000198	13.40	0.1399	141.04	2.049	0.031	1165	20.00		25.753	3.549	7.986
	EXP8-1-2	40	15.021	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0080	1.0082	0.000198	19.13	0.1399	287.28	2.924	0.022	1663	25.00		36.755	3.714	9.144
	EXP8-1-3	75	25.355	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0080	1.0082	0.000198	32.28	0.1399	818.52	4.935	0.013	2807	31.50		62.040	3.602	10.109
	EXP8-1-4	111	35.754	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0080	1.0082	0.000198	45.52	0.1399	1627.62	6.959	0.009	3959	38.00		87.485	3.659	11.190
	EXP8-1-5	140	43.961	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0080	1.0082	0.000198	55.97	0.1399	2460.63	8.557	0.007	4867	41.50		107.567	3.604	11.606
4/11/02	EXP8-2-1	28	11.427	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0093	1.0100	0.0007	14.55	0.1062	166.26	7.775	0.053	1265	20.50		6.968	3.259	5.295
	EXP8-2-2	45	16.511	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0093	1.0100	0.0007	21.02	0.1062	347.09	11.234	0.037	1828	26.50		10.068	3.505	6.243
	EXP8-2-3	90	29.716	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0093	1.0100	0.0007	37.84	0.1062	1124.33	20.218	0.021	3290	35.00		18.120	3.450	7.118
	EXP8-2-4	100	32.601	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0093	1.0100	0.0007	41.51	0.1062	1353.24	22.181	0.019	3609	36.00		19.879	3.388	7.154
	EXP8-2-5	123	39.168	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0093	1.0100	0.0007	49.87	0.1062	1953.34	26.649	0.016	4337	41.00		23.883	3.520	7.782
	EXP8-2-6	147	45.919	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0093	1.0100	0.0007	58.47	0.1062	2684.75	31.242	0.013	5084	45.20		28.000	3.584	8.245
4/15/02	EXP9-1-1	30	12.028	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0080	0.001092	15.31	0.1006	184.21	12.891	0.064	1332	25.50		4.533	3.898	5.688
	EXP9-1-2	44	16.213	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0080	0.001092	20.64	0.1006	334.70	17.376	0.047	1795	29.50		6.110	3.884	6.107
	EXP9-1-3	88	29.137	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0080	0.001092	37.10	0.1006	1080.93	31.226	0.026	3226	36.00		10.980	3.536	6.437
	EXP9-1-4	114	36.610	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0080	0.001092	46.61	0.1006	1706.50	39.235	0.021	4053	42.00		13.796	3.680	7.053
	EXP9-1-5	134	42.275	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0069	1.0080	0.001092	53.83	0.1006	2275.55	45.307	0.018	4681	46.50		15.931	3.752	7.575
4/15/02	EXP9-2-1	23	9.922	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0078	1.0079	9.92E-05	12.63	0.0772	125.35	0.97	0.023	1099	21.50		36.051	3.387	8.298
	EXP9-2-2	43	15.915	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0078	1.0079	9.92E-05	20.26	0.0772	322.51	1.55	0.014	1762	26.50		57.827	3.296	9.088
	EXP9-2-3	70	23.892	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0078	1.0079	9.92E-05	30.42	0.0772	726.80	2.33	0.010	2645	33.50		86.809	3.400	10.380
	EXP9-2-4	109	35.182	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0078	1.0079	9.92E-05	44.80	0.0772	1576.00	3.42	0.007	3895	40.50		127.830	3.388	11.391
	EXP9-2-5	138	43.400	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0078	1.0079	9.92E-05	55.26	0.0772	2398.21	4.22	0.005	4805	45.00		157.688	3.389	12.010
4/16/02	EXP10-1-1	30	12.028	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0063	1.0110	0.004671	15.31	0.06605	184.21	55.11	0.132	1332	33.50		0.859	4.610	4.438
	EXP10-1-2	53	18.885	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0063	1.0110	0.004671	24.05	0.06605	454.10	86.53	0.084	2091	38.50		1.349	4.228	4.557
	EXP10-1-3	100	32.601	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0063	1.0110	0.004671	41.51	0.06605	1353.24	149.37	0.049	3609	49.00		2.328	4.096	5.059
	EXP10-1-4	132	41.712	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0063	1.0110	0.004671	53.11	0.06605	2215.31	191.12	0.038	4618	51.50		2.979	3.806	5.000
	EXP10-1-5	150	46.756	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0063	1.0110	0.004671	59.53	0.06605	2783.46	214.23	0.034	5177	59.00		3.339	4.118	5.567
4/16/02	EXP10-2-1	24	10.224	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0074	1.0320	0.024419	13.02	0.04318	133.08	244.91	0.354	1132	51.00		0.113	6.845	3.988
	EXP10-2-2	76	25.647	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0074	1.0320	0.024419	32.65	0.04318	837.49	614.38	0.141	2840	60.00		0.283	5.084	3.709
	EXP10-2-3	128	40.583	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0074	1.0320	0.024419	51.67	0.04318	2097.03	972.19	0.089	4493	65.00		0.448	4.378	3.583
	EXP10-2-4	50	17.996	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0074	1.0320	0.024419	22.91	0.04318	412.35	431.10	0.201	1992	55.00		0.199	5.564	3.715
	EXP10-2-5	20	9.017	0.7854	3.140	0.250	1.000	1.0074	1.0320	0.024419	11.48	0.04318	103.52	216.01	0.401	998	35.00		0.100	5.002	2.810

Πίνακας 3.2 Αρχικά χαρακτηριστικά και μετρήσεις ορθογωνικής φλέβας

Ημερομηνία	Κωδικός Περιβάλλοντος	Ένδειξη Ροομέτρου	Q	A	P	R	D _{ει}	ρ _s	ρ ₀	Δρ/ρ _s	W	N	M	B	Re	H _{max}	H _s	[M/B]N ^{1/2}	H _{opt} /L _j	H _{opt} /L _p
		l/h	cc/s	cm ²	cm	cm	cm	gr/l	gr/l		cm/s	(s ⁻²)	cm ⁴ s ⁻²	cm ⁴ s ⁻³		cm	cm			
4/17/02	EXP11-1-1	149	46.477	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0079	1.0085	0.000595	39.69	0.106	1844.705	27.142	3826	42.00	24.00	22.122	3.656	7.930
	EXP11-1-2	98	32.026	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0079	1.0085	0.000595	27.35	0.106	875.863	18.702	2637	34.00	20.00	15.244	3.566	7.046
	EXP11-1-3	50	17.996	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0079	1.0085	0.000595	15.37	0.106	276.567	10.509	1482	27.00	16.50	8.566	3.777	6.462
4/17/02	EXP11-2-1	137	43.119	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0139	0.005454	36.82	0.090	1587.751	230.711	3550	47.50	31.00	2.066	4.123	4.943
	EXP11-2-2	90	29.716	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0139	0.005454	25.38	0.090	754.096	158.998	2446	42.00	22.00	1.424	4.392	4.797
	EXP11-2-3	45	16.511	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0139	0.005454	14.10	0.090	232.799	88.342	1359	33.00	13.59	0.791	4.629	4.366
	EXP11-2-4	15	7.505	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0139	0.005454	6.41	0.090	48.098	40.155	618	26.00	18.00	0.360	5.410	4.189
	EXP11-2-5	150	46.756	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0139	0.005454	39.93	0.090	1866.894	250.171	3849	51.50	40.00	2.240	4.293	5.252
4/22/02	EXP12-1-1	145	45.361	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0056	1.0090	0.003381	38.74	0.07792	1757.136	150.454	3734	49.00	30.00	3.260	3.999	5.373
	EXP12-1-2	98	32.026	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0056	1.0090	0.003381	27.35	0.07792	875.863	106.223	2637	43.00	28.00	2.302	4.176	5.144
	EXP12-1-3	48	17.403	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0056	1.0090	0.003381	14.86	0.07792	258.624	57.721	1433	32.00	23.00	1.251	4.216	4.459
	EXP12-1-4	25	10.525	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0056	1.0090	0.003381	8.99	0.07792	94.596	34.909	866	25.00	20.00	0.756	4.235	3.950
	EXP12-1-5	116	37.180	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0056	1.0090	0.003381	31.75	0.07792	1180.467	123.318	3061	47.00		2.672	4.236	5.416
4/22/02	EXP12-2-1	132	41.712	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0069	1.0070	9.93E-05	35.62	0.03821	1485.826	4.064	3434	50.00	29.00	71.464	3.561	10.352
	EXP12-2-2	80	26.813	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0069	1.0070	9.93E-05	22.90	0.03821	613.956	2.612	2207	41.50	26.00	45.938	3.686	9.596
	EXP12-2-3	40	15.021	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0069	1.0070	9.93E-05	12.83	0.03821	192.684	1.463	1237	29.00	20.50	25.735	3.441	7.751
	EXP12-2-4	22	9.621	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0069	1.0070	9.93E-05	8.22	0.03821	79.042	0.937	792	21.00	15.00	16.483	3.114	6.274
	EXP12-2-5	150	46.756	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0069	1.0070	9.93E-05	39.93	0.03821	1866.894	4.555	3849	52.50		80.106	3.531	10.564
4/23/02	EXP13-1-1	36	13.826	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0094	1.0100	0.000594	11.81	0.13272	163.245	8.062	1138	20.00	10.00	7.377	3.377	5.566
	EXP13-1-2	63	21.837	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0094	1.0100	0.000594	18.65	0.13272	407.208	12.733	1798	26.50	13.50	11.650	3.561	6.578
	EXP13-1-3	93	30.583	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0094	1.0100	0.000594	26.12	0.13272	798.762	17.834	2518	30.50	15.50	16.317	3.463	6.960
	EXP13-1-4	105	34.037	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0094	1.0100	0.000594	29.07	0.13272	989.331	19.848	2802	33.50	20.00	18.159	3.605	7.443
	EXP13-1-5	135	42.557	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0094	1.0100	0.000594	36.34	0.13272	1546.614	24.816	3504	38.00	22.50	22.705	3.657	7.984
	EXP13-1-6	150	46.756	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0094	1.0100	0.000594	39.93	0.13272	1866.894	27.264	3849	41.00	28.00	24.945	3.765	8.414
4/23/02	EXP13-2-1	44	16.213	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0112	1.0170	0.005736	13.85	0.07927	224.483	91.228	1335	37.00	23.50	0.693	5.072	4.627
	EXP13-2-2	80	26.813	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0112	1.0170	0.005736	22.90	0.07927	613.956	150.871	2207	45.00	28.50	1.146	4.797	4.963
	EXP13-2-3	114	36.610	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0112	1.0170	0.005736	31.26	0.07927	1144.562	205.996	3014	50.50	32.00	1.564	4.607	5.152
	EXP13-2-4	130	41.148	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0112	1.0170	0.005736	35.14	0.07927	1445.915	231.531	3388	53.00	37.50	1.758	4.561	5.252
	EXP13-2-5	150	46.756	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0112	1.0170	0.005736	39.93	0.07927	1866.894	263.086	3849	55.50		1.988	4.480	5.327
4/24/02	EXP14-1-1	32	12.628	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0115	0.003267	10.78	0.09325	136.183	65.253	1040	28.00	17.00	0.637	4.529	4.047
	EXP14-1-2	74	25.063	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0115	0.003267	21.40	0.09325	536.411	129.505	2063	39.00	23.50	1.265	4.478	4.749
	EXP14-1-3	103	33.463	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0115	0.003267	28.58	0.09325	956.258	172.913	2755	44.00	27.50	1.689	4.372	4.984
	EXP14-1-4	120	38.317	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0115	0.003267	32.72	0.09325	1253.800	197.995	3154	48.00	30.00	1.934	4.458	5.256
	EXP14-1-5	137	43.119	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0115	0.003267	36.82	0.09325	1587.751	222.808	3550	49.50	37.00	2.176	4.333	5.263
4/24/02	EXP14-2-1	42	15.618	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0075	1.0080	0.000496	13.34	0.05515	208.290	7.603	1286	28.00	13.50	6.434	3.572	5.689
	EXP14-2-2	70	23.892	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0075	1.0080	0.000496	20.40	0.05515	487.474	11.632	1967	35.00	17.50	9.842	3.610	6.394
	EXP14-2-3	100	32.601	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0075	1.0080	0.000496	27.84	0.05515	907.627	15.872	2684	39.50	28.00	13.430	3.488	6.676
	EXP14-2-4	118	37.749	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0075	1.0080	0.000496	32.24	0.05515	1216.881	18.378	3108	43.00	28.00	15.550	3.528	7.006
	EXP14-2-5	149	46.477	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0075	1.0080	0.000496	39.69	0.05515	1844.705	22.627	3826	48.00	30.00	19.146	3.549	7.425

Πίνακας 3.2 Αρχικά χαρακτηριστικά και μετρήσεις ορθογωνικής φλέβας (συνέχεια)

Ημερομηνία	Κωδικός Πειράματος	Έκθεση Προμήτρου	Q	A	P	R	D _{ση}	ρ _s	ρ _i	Δρ/ρ _s	W	N	M	B	Ri(θ)	Re	H _{max}	H _s	[M/B]N ^{1/2}	H _{irr/L_i}	H _{irr/L_p}
		l/h	α/s	cm ²	cm	cm	cm	gr/l	gr/l		cm ³ /s	(s ⁻²)	cm ⁴ /s ²	cm ⁴ /s ³			cm	cm			
	EXP15-1-1	40	15.021	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0089	1.0390	9.91E-05	12.83	0.13925	192.684	1.461	0.035	1237	20.00	10.00	49.230	3.279	8.686
	EXP15-1-2	65	23.425	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0089	1.0390	9.91E-05	19.15	0.13925	429.440	2.180	0.017	1846	26.00	12.00	73.495	3.489	10.216
	EXP15-1-3	94	30.872	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0089	1.0390	9.91E-05	26.36	0.13925	813.917	3.002	0.012	2542	29.50	14.00	101.180	3.374	10.700
	EXP15-1-4	114	36.610	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0089	1.0390	9.91E-05	31.26	0.13925	1144.562	3.560	0.010	3014	32.00	18.50	119.984	3.361	11.123
	EXP15-1-5	140	43.961	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0089	1.0390	9.91E-05	37.54	0.13925	1650.366	4.275	0.009	3619	36.50	20.00	144.077	3.498	12.120
	EXP15-1-6	150	46.756	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0089	1.0390	9.91E-05	39.93	0.13925	1866.894	4.546	0.008	3849	38.00	26.00	153.238	3.531	12.425
	EXP15-1-7	25	10.525	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0089	1.0390	9.91E-05	8.99	0.13925	94.596	1.023	0.036	866			34.494	0.000	0.000
	EXP15-2-1	28	11.427	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0103	1.0156	0.005246	9.76	0.09618	111.515	58.808	0.242	941	34.00	22.50	0.588	5.827	5.102
	EXP15-2-2	55	19.477	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0103	1.0156	0.005246	16.63	0.09618	323.952	100.234	0.142	1603	41.50	28.00	1.002	5.448	5.451
	EXP15-2-3	85	28.267	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0103	1.0156	0.005246	24.14	0.09618	682.335	145.469	0.098	2327	47.00	30.00	1.455	5.121	5.624
	EXP15-2-4	115	36.895	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0103	1.0156	0.005246	31.51	0.09618	1162.451	189.872	0.075	3037	49.00	33.00	1.899	4.673	5.486
	EXP15-2-5	125	39.735	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0103	1.0156	0.005246	33.93	0.09618	1348.299	204.487	0.070	3271	53.00	36.00	2.045	4.871	5.825
	EXP15-2-6	150	46.756	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0103	1.0156	0.005246	39.93	0.09618	1866.894	240.621	0.059	3849		40.00	2.406	0.000	0.000
	EXP16-1-1	30	12.028	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0142	0.007951	10.27	0.09531	123.548	93.815	0.283	990	30.00	19.00	0.407	5.000	3.992
	EXP16-1-2	70	23.892	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0142	0.007951	20.40	0.09531	487.474	186.350	0.142	1967	42.00	24.50	0.808	4.966	4.708
	EXP16-1-3	91	30.005	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0142	0.007951	25.62	0.09531	768.851	234.031	0.113	2470	46.00	28.50	1.014	4.854	4.871
	EXP16-1-4	110	35.468	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0142	0.007951	30.29	0.09531	1074.284	276.638	0.096	2920	48.00	32.00	1.199	4.658	4.875
	EXP16-1-5	120	38.317	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0142	0.007951	32.72	0.09531	1253.800	298.860	0.089	3154	50.00	38.00	1.295	4.669	4.981
	EXP16-1-6	138	43.400	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0062	1.0142	0.007951	37.06	0.09531	1608.501	338.504	0.078	3573	53.00		1.467	4.650	5.118
	EXP16-2-1	20	9.017	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0290	0.000595	7.70	0.03437	69.435	5.263	0.103	742	22.00	12.00	2.446	3.282	4.104
	EXP16-2-2	39	14.723	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0290	0.000595	12.57	0.03437	185.103	8.594	0.063	1212	29.50	13.00	3.993	3.444	4.868
	EXP16-2-3	55	19.477	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0290	0.000595	16.63	0.03437	323.952	11.369	0.048	1603	33.00	18.00	5.283	3.349	5.078
	EXP16-2-4	94	30.872	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0290	0.000595	26.36	0.03437	813.917	18.020	0.030	2542	44.00	25.00	8.374	3.547	6.034
	EXP16-2-5	115	36.895	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0290	0.000595	31.51	0.03437	1162.451	21.535	0.025	3037	47.00	28.00	10.007	3.466	6.164
	EXP16-2-6	145	45.361	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0084	1.0290	0.000595	38.74	0.03437	1757.136	26.477	0.021	3734	55.00	30.00	12.304	3.658	6.850
	EXP17-1-1	25	10.525	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0074	1.0140	0.006552	8.99	0.11623	94.596	67.644	0.293	866	26.00	15.00	0.477	4.868	4.045
	EXP17-1-2	52	18.589	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0074	1.0140	0.006552	15.87	0.11623	295.089	119.472	0.166	1530	36.00	22.00	0.842	5.072	4.858
	EXP17-1-3	80	26.813	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0074	1.0140	0.006552	22.90	0.11623	613.956	172.329	0.115	2207	39.50	25.00	1.215	4.633	4.864
	EXP17-1-4	121	38.601	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0074	1.0140	0.006552	32.96	0.11623	1272.449	248.090	0.080	3178	43.00	28.00	1.749	4.204	4.834
	EXP17-1-5	140	43.961	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0074	1.0140	0.006552	37.54	0.11623	1650.366	282.540	0.070	3619	46.50	30.00	1.991	4.260	5.060
	EXP17-1-6	147	45.919	1.171	4.225	0.277	1.109	1.0074	1.0140	0.006552	39.21	0.11623	1800.683	295.126	0.067	3780	48.00		2.080	4.302	5.167

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Αδιάστατο ΜΥΑ τυρβώδους ανωστικής φλέβας.

Από το μετρημένο μέγιστο ύψος ανύψωσης και τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος ρευστού υπολογίστηκαν οι αδιάστατες παραμέτροι $(M/B)N^{1/2}$, H_m/L_j και H_m/L_p , χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (1-7), (1-8) και (1-10). Στα διαγράμματα 4.1 και 4.2 φαίνεται το αδιάστατο ΜΥΑ μιας κυκλικής και μιας ορθογωνικής φλέβας αντίστοιχα ως προς $(M/B)N^{1/2}$, χρησιμοποιώντας διαφορετικά σύμβολα ανά πείραμα. Στα διαγράμματα 4.3 και 4.4 φαίνεται το ΜΥΑ H_m/L_j και H_m/L_p για την κυκλική και ορθογωνική φλέβα αντίστοιχα. Από τη διαστατική ανάλυση του πρώτου κεφαλαίου και τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι διαγράμματα για $(M/B)N^{1/2} > 10$ το αδιάστατο ύψος H_m/L_j λαμβάνει μια σταθερή τιμή και για τους δύο τύπους στομίου, επομένως πρόκειται περί μιας αρχικά απλής φλέβας (jet). Η σταθερά αδιάστατη τιμή του ΜΥΑ είναι

$$H_{\max} \left(\frac{N}{M} \right)^{1/4} = 3.55 \quad (4.1)$$

όπου στην παρένθεση φαίνεται η τιμή για την ορθογωνική φλέβα.

Επίσης, για $(M/B)N^{1/2} < 1$, το αδιάστατο ύψος H_m/L_p λαμβάνει σταθερή τιμή και για τους δύο τύπους στομίου

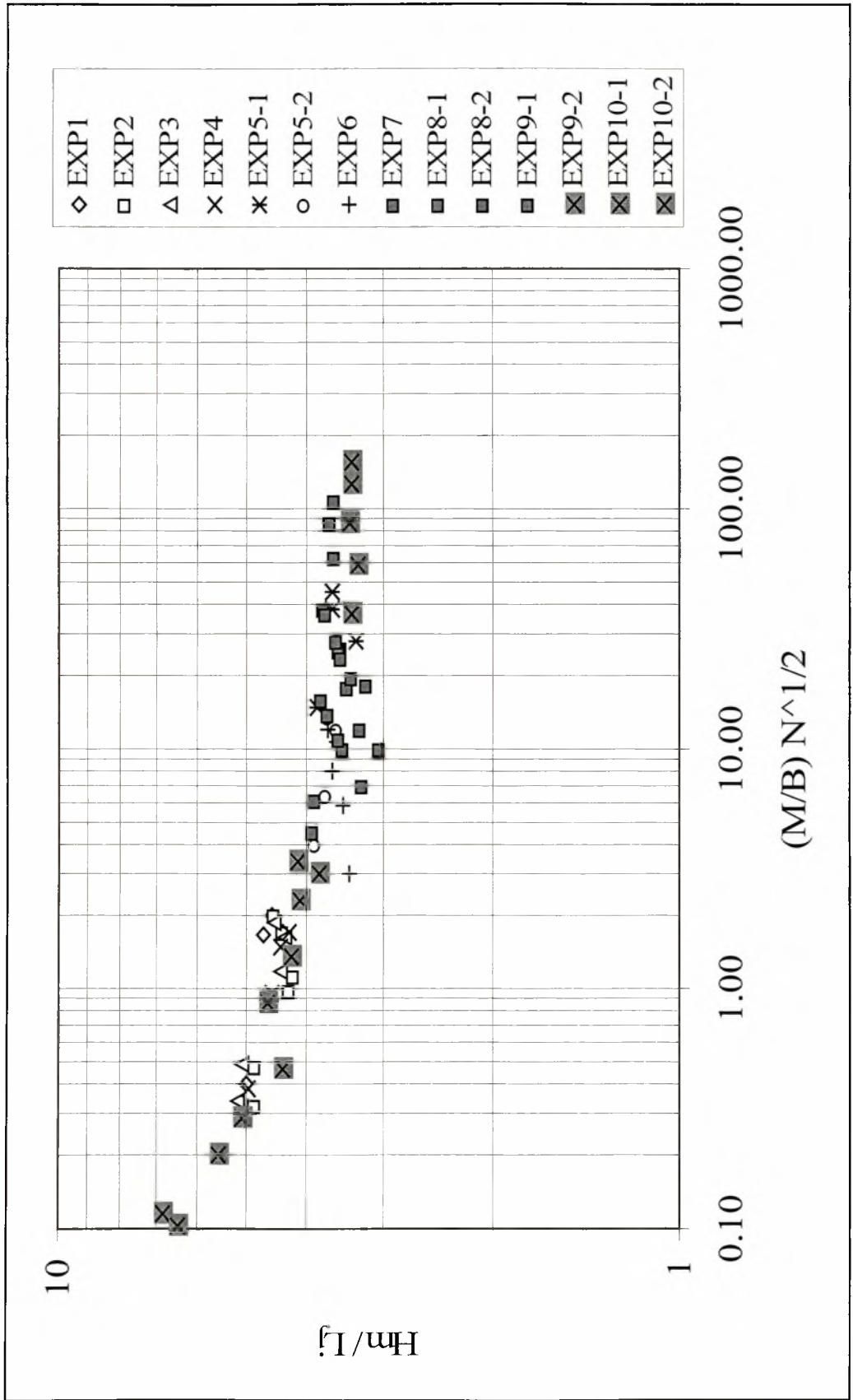
$$H_{\max} \frac{N^{3/8}}{B^{1/4}} = 4.00 \quad (4.2)$$

όπου στην παρένθεση φαίνεται η τιμή για την ορθογωνική φλέβα. Πρόκειται επομένως, σύμφωνα με τη διαστατική ανάλυση, περί μιας αρχικά ανωστικής φλέβας (plume).

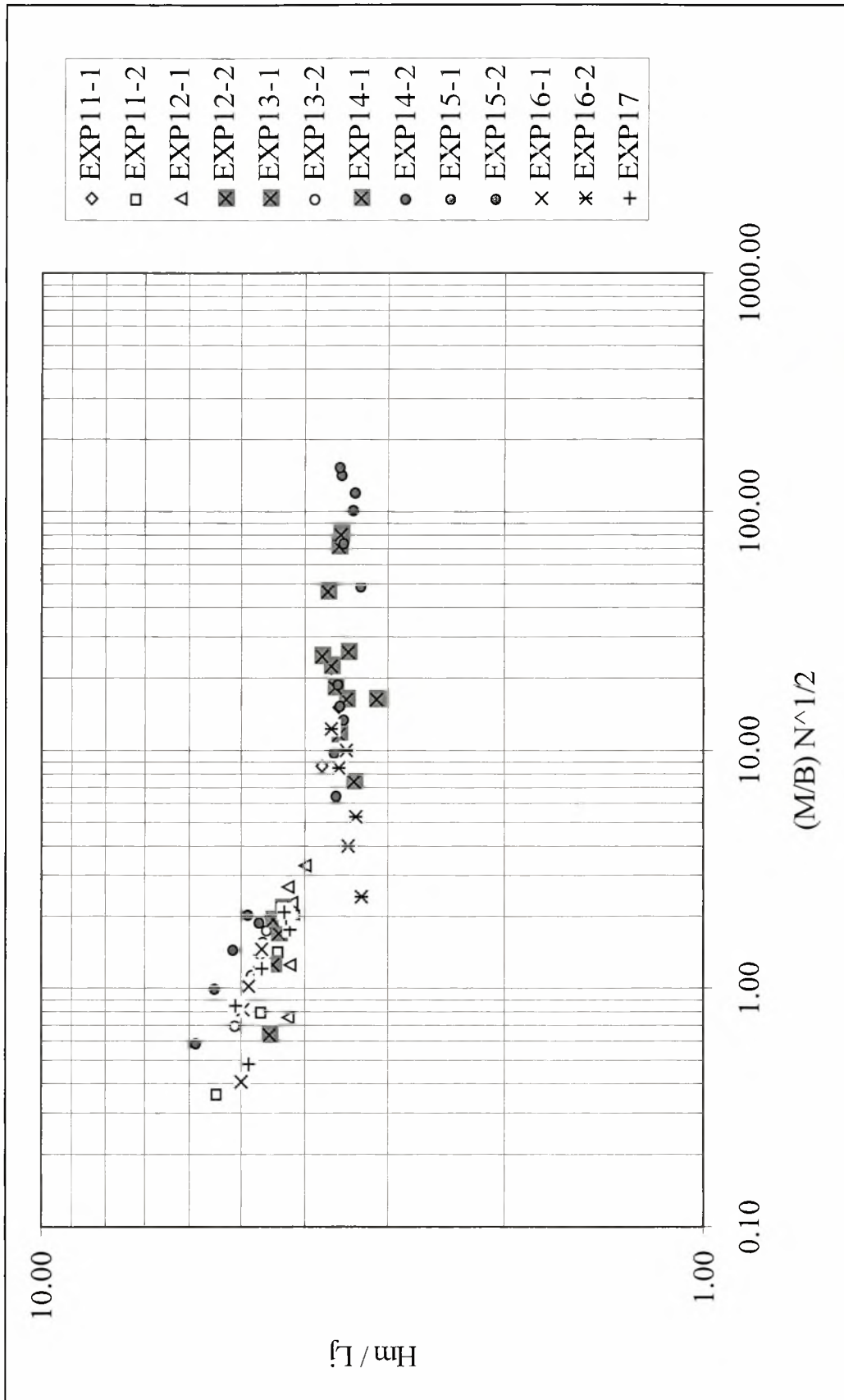
Τα πειραματικά δεδομένα του παρόντος πειράματος για κυκλικές φλέβες είναι σύμφωνα με αυτά των Wong & Wright (1988), Papanicolaou *et al.* (1990), Fan (1967), και των Abraham & Eysink (1969) όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 4.5.

Συγκεκριμένα οι πειραματικές σταθερές που προέκυψαν για τις απλές φλέβες και τα πλούμια φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί. Υπάρχει διαφορά των σταθερών της παρούσας εργασίας και των προηγούμενων στην περιοχή του πλουμίου, όπου θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διασπορά των δεδομένων των Wong & Wright (1988) και Papanicolaou *et al.* (1990), είναι μεγαλύτερη στην περιοχή αυτή απ' αυτήν της παρούσας εργασίας.

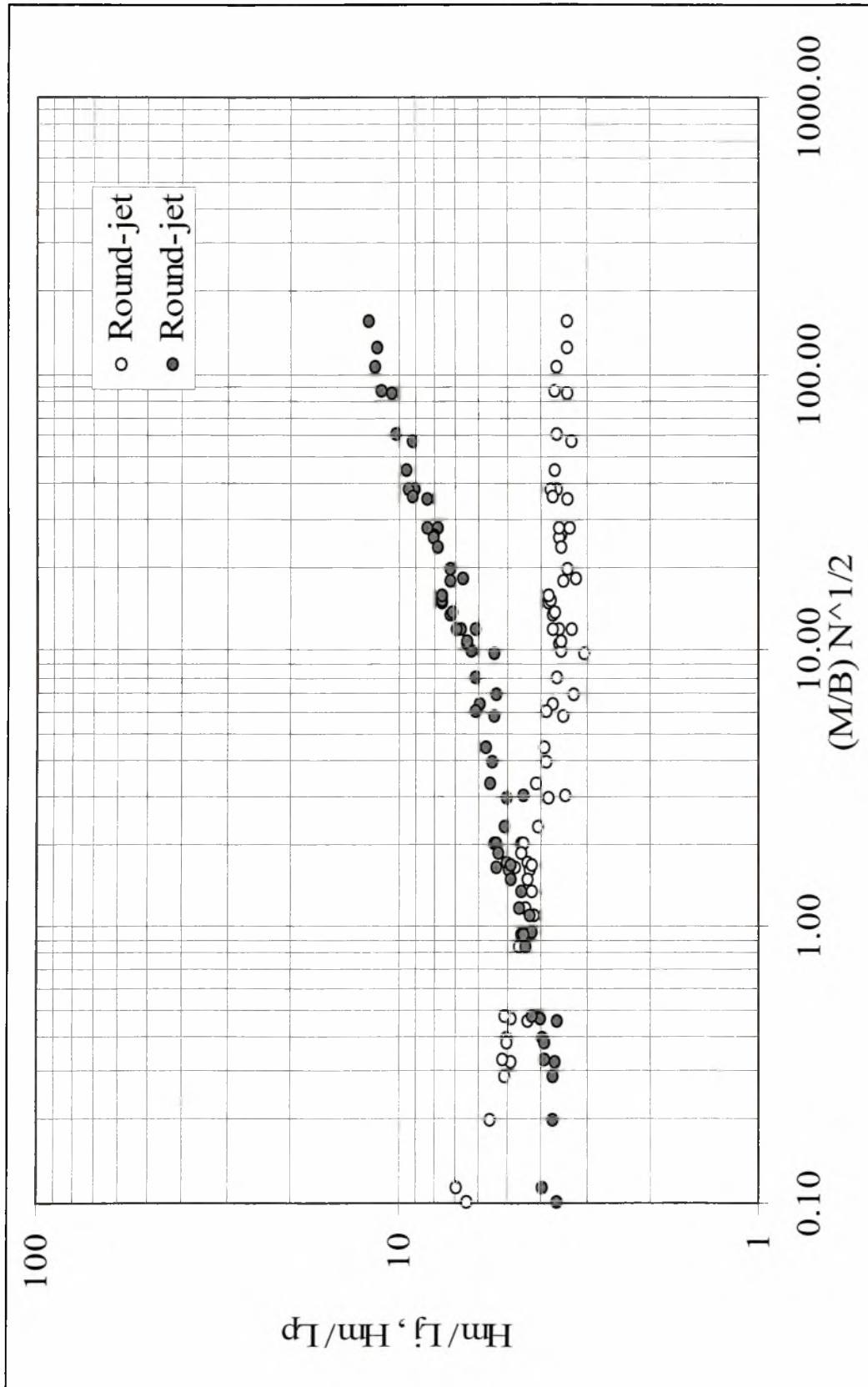
Συγγραφέας	H_m/L_j , $(M/B)N^{1/2} > 10$	H_m/L_p , $(M/B)N^{1/2} < 1$
Παρούσα εργασία	3.55	4.00
Wong & Wright (1988)	3.60	4.50
Papanicolaou <i>et al.</i> (1990)	3.50	4.65
Προτεινόμενες από Fischer <i>et al.</i> (1979)	3.80	3.80



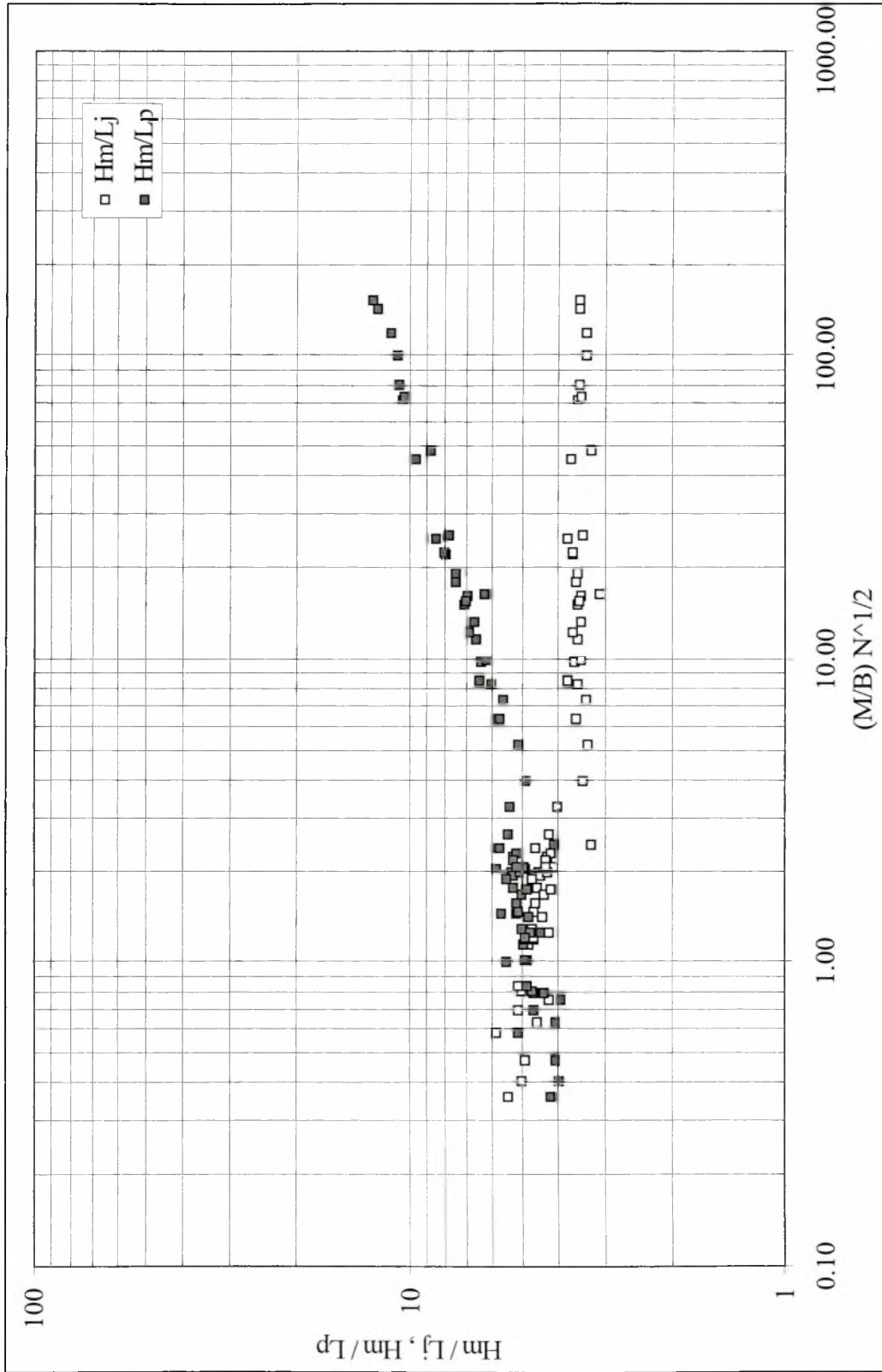
Διάγραμμα 4.1 Αδιάστατο ΜΥΑ κυκλικής ανωστικής φλέβας. Διαφορετικά σύμβολα ανά πείραμα



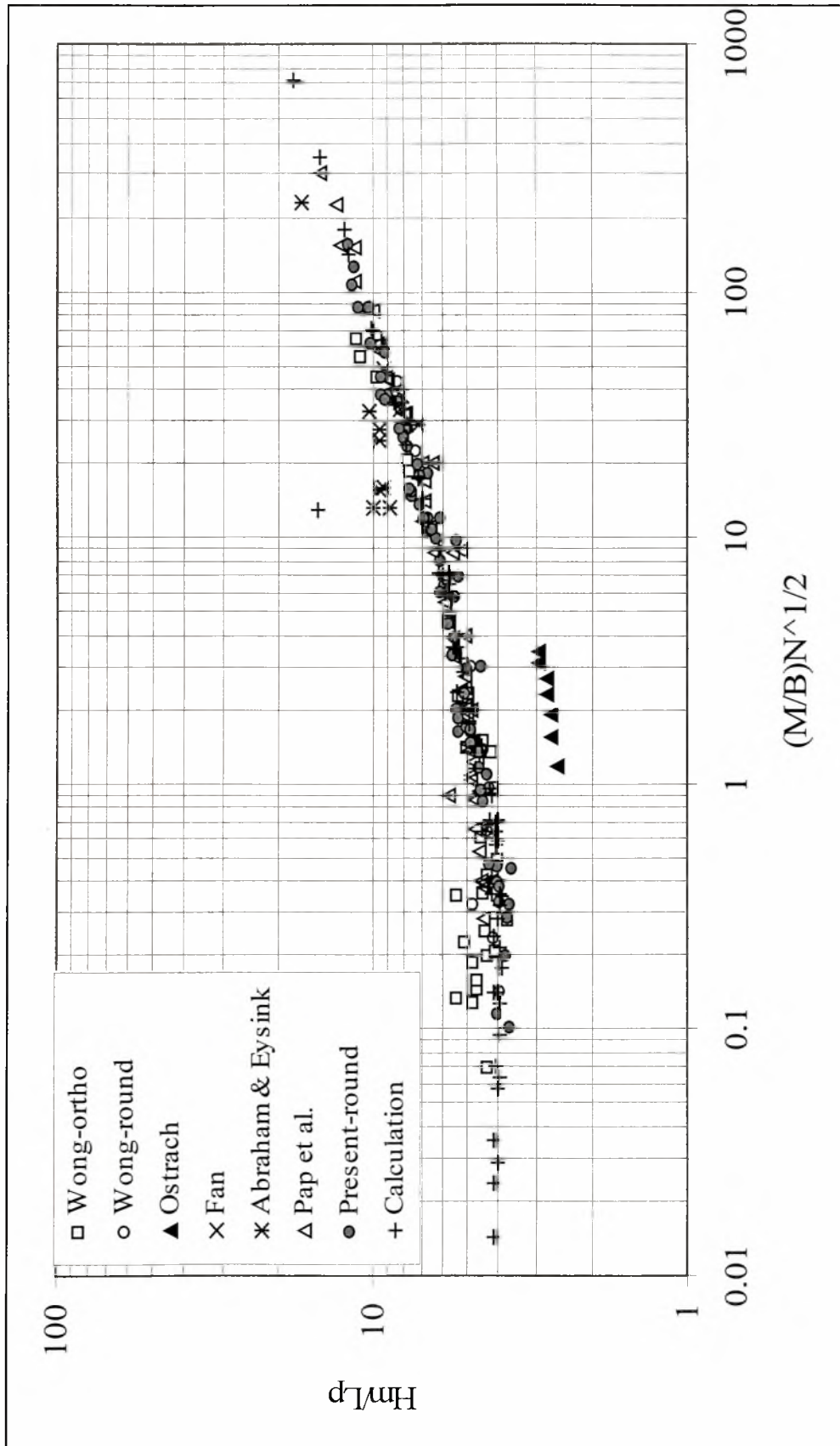
Διάγραμμα 4.2 Αδιάστατο ΜΥΑ ορθογωνικής ανωσττικής φλέβας. Διαφορετικά σύμβολα ανά πείραμα.



Διάγραμμα 4.3 Αδιάστατο ΜΥΑ κυκλικής φλέβας ο- H_m/L_j , ●- H_m/L_p



Διάγραμμα 4.4 Αδιάστατο MYA ορθογωνικής ανωστικής φλέβας, \square - H_m/L_j , \blacksquare - H_m/L_p



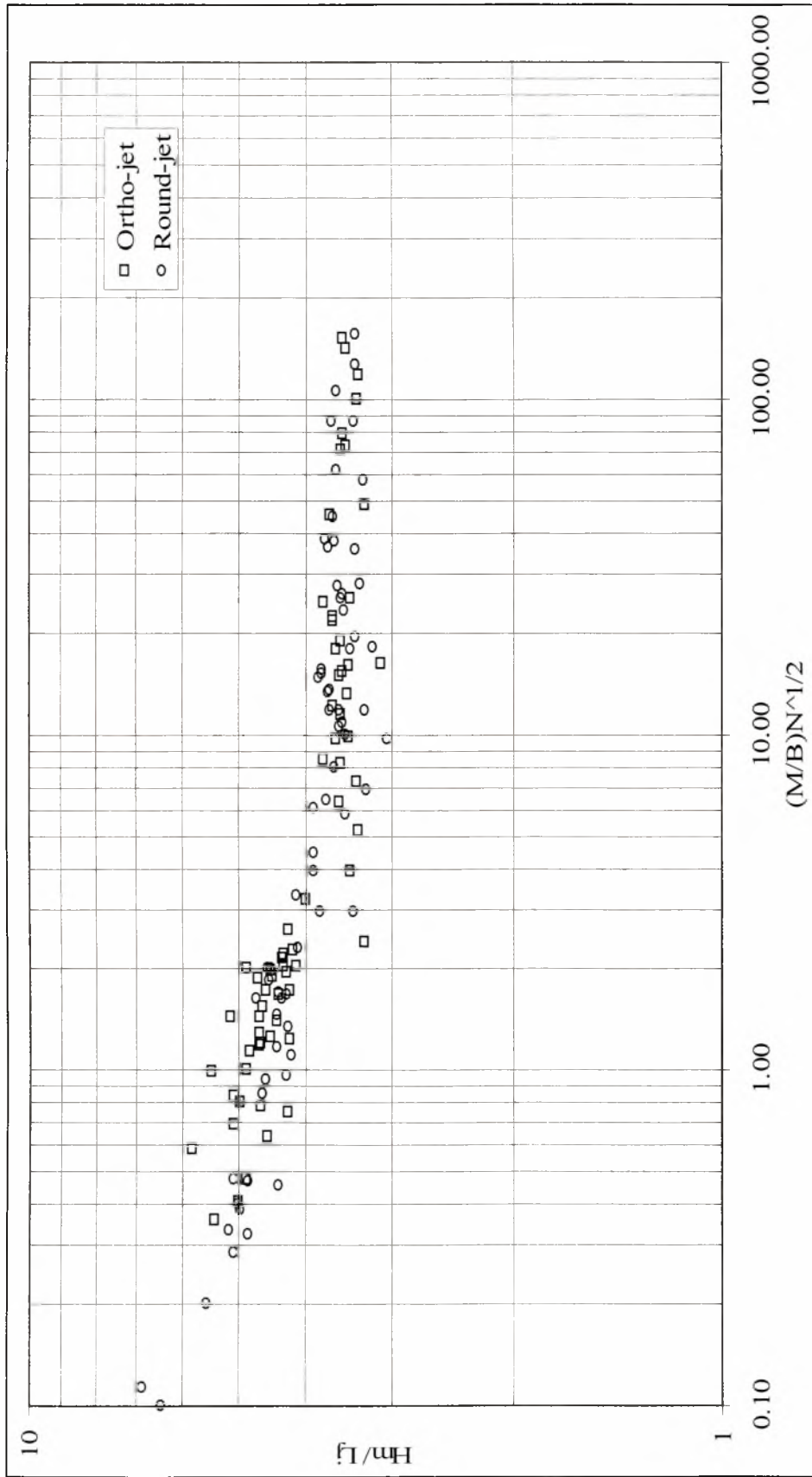
Διάγραμμα 4.5 Σύγκριση ΜΥΑ κυκλικής φλέβας από προηγούμενες εργασίες, παρούσα εργασία και υπολογισμό.

Σαν πρώτο συμπέρασμα επομένως θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε τη φλέβα σαν απλή (jet) ή ανωστική (plume) αρχικά, όταν η αδιάστατη παράμετρος $(M/B)N^{1/2}$ είναι μεγαλύτερη από την τιμή 10 ή μικρότερη από την τιμή 1 αντίστοιχα. Η παράμετρος αυτή χαρακτηρίζει τον τύπο της φλέβας αρχικά, επειδή περιλαμβάνει τα αρχικά κινηματικά και ανωστικά χαρακτηριστικά της M και B , καθώς και την παράμετρο N της γραμμικής στρωμάτωσης του αποδέκτη όπου διαχέεται.

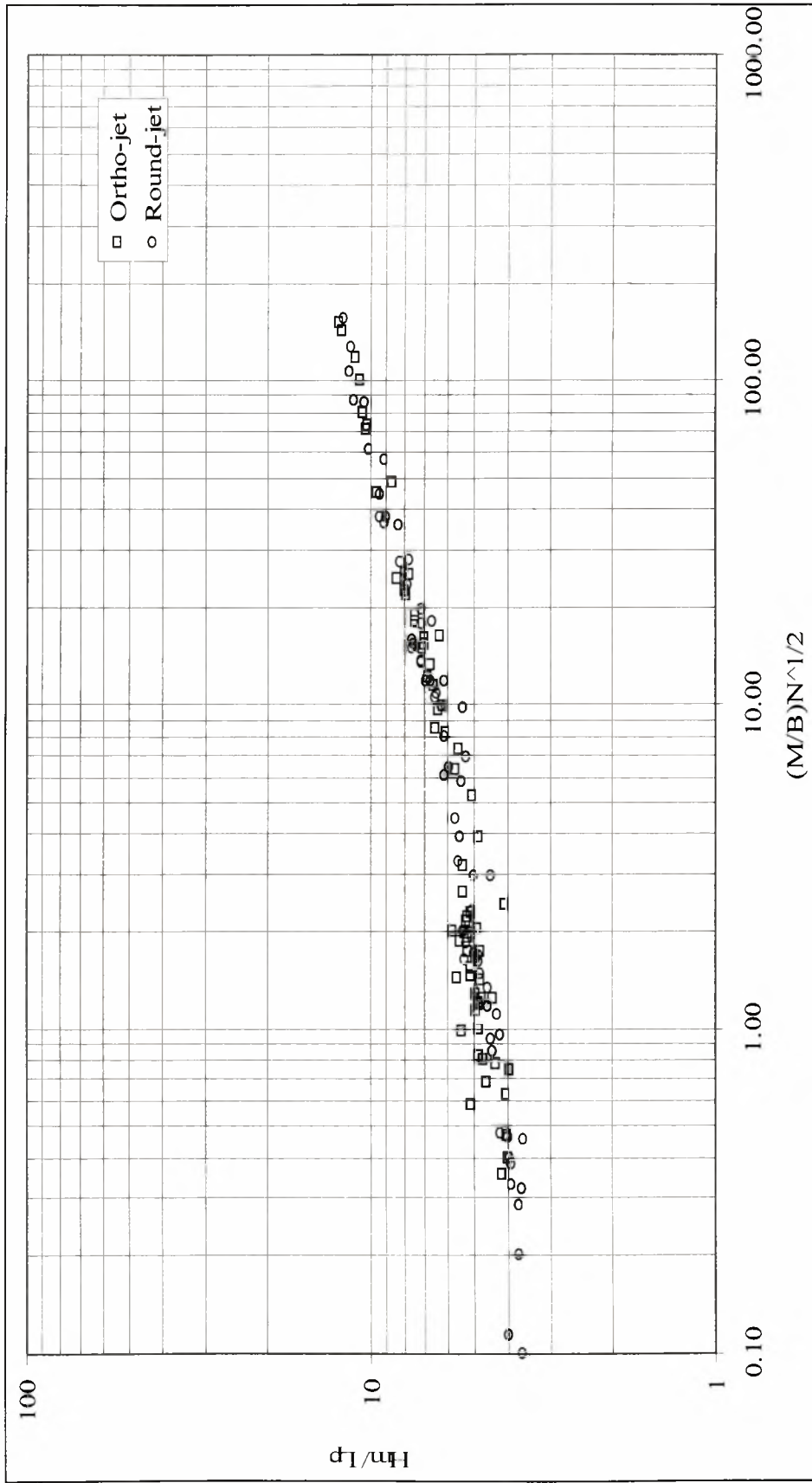
Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι στην περίπτωση μιας αρχικά ανωστικής φλέβας, η διάχυση δεν επηρεάζεται από τη μορφή της φλέβας, ενώ στην περίπτωση μιας απλής φλέβας το αδιάστατο MYA είναι κατά τι μικρότερο στην ορθογωνική φλέβα, αλλά όχι όσο διαφορετικό (3.08) που έχει προκύψει για την αντίστοιχη ελλειπτική (Papanicolaou *et al.* 1990). Οι παραπάνω σταθερές προέκυψαν υπολογίζοντας τη μέση τιμή του αδιάστατου MYA , για τα σημεία του διαγράμματος που βρίσκονται στις περιοχές $(M/B)N^{1/2} < 1$ (jet) και $(M/B)N^{1/2} > 10$ (plume). Για τη σύγκριση των διαφορών των αδιάστατων MYA των δύο τύπων ακροφυσίου, παραθέτουμε τα διαγράμματα 4.6α και 4.6β. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές στα πειραματικά δεδομένα και των δύο ακροφυσίων.

Μια επί πλέον παρατήρηση που μπορεί να γίνει σχετικά με τις παραπάνω σταθερές είναι ότι η διασπορά των δεδομένων είναι σχετικά μεγάλη, ειδικότερα δε στην περιοχή του ορθογωνικού πλουμίου. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι για κάθε μια γραμμική στρωμάτωση του αποδέκτη, μεταβάλλαμε την παροχή της φλέβας αρκετές φορές (4 έως 5), πράγμα που ίσως δημιουργεί τη διασπορά των δεδομένων επειδή η φλέβα για κάθε μια αύξηση της παροχής διέρχεται από «σκαλοπάτια» τοπικά πυκνότητας κατά τη διεργασία της διάχυσης.

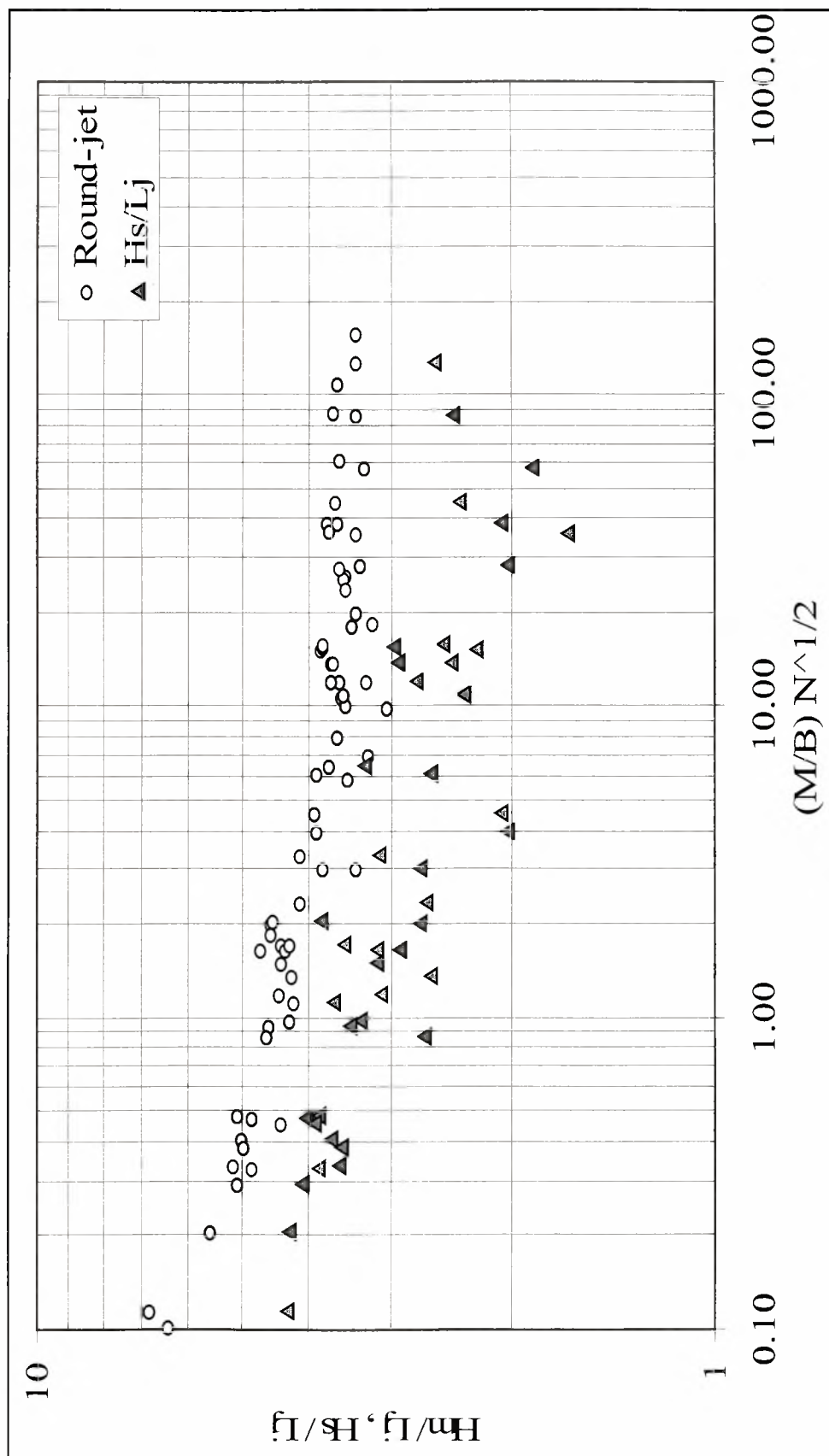
Σχετικά με το αδιάστατο ύψος διάχυσης και των δύο φλεβών H_s/L_j , παρατηρούμε από τα διαγράμματα 4.7 και 4.8 ότι αυτό μειώνεται στην περιοχή του πλουμίου, ενώ στην περιοχή της αρχικά απλής φλέβας η τιμή του μάλλον σταθεροποιείται. Βεβαίως, υπάρχει μεγάλη διασπορά στα πειραματικά δεδομένα που οφείλεται στον τρόπο διεξαγωγής του πειράματος, σύμφωνα με τα προαναφερόμενα για τη διασπορά των δεδομένων του αδιάστατου MYA .



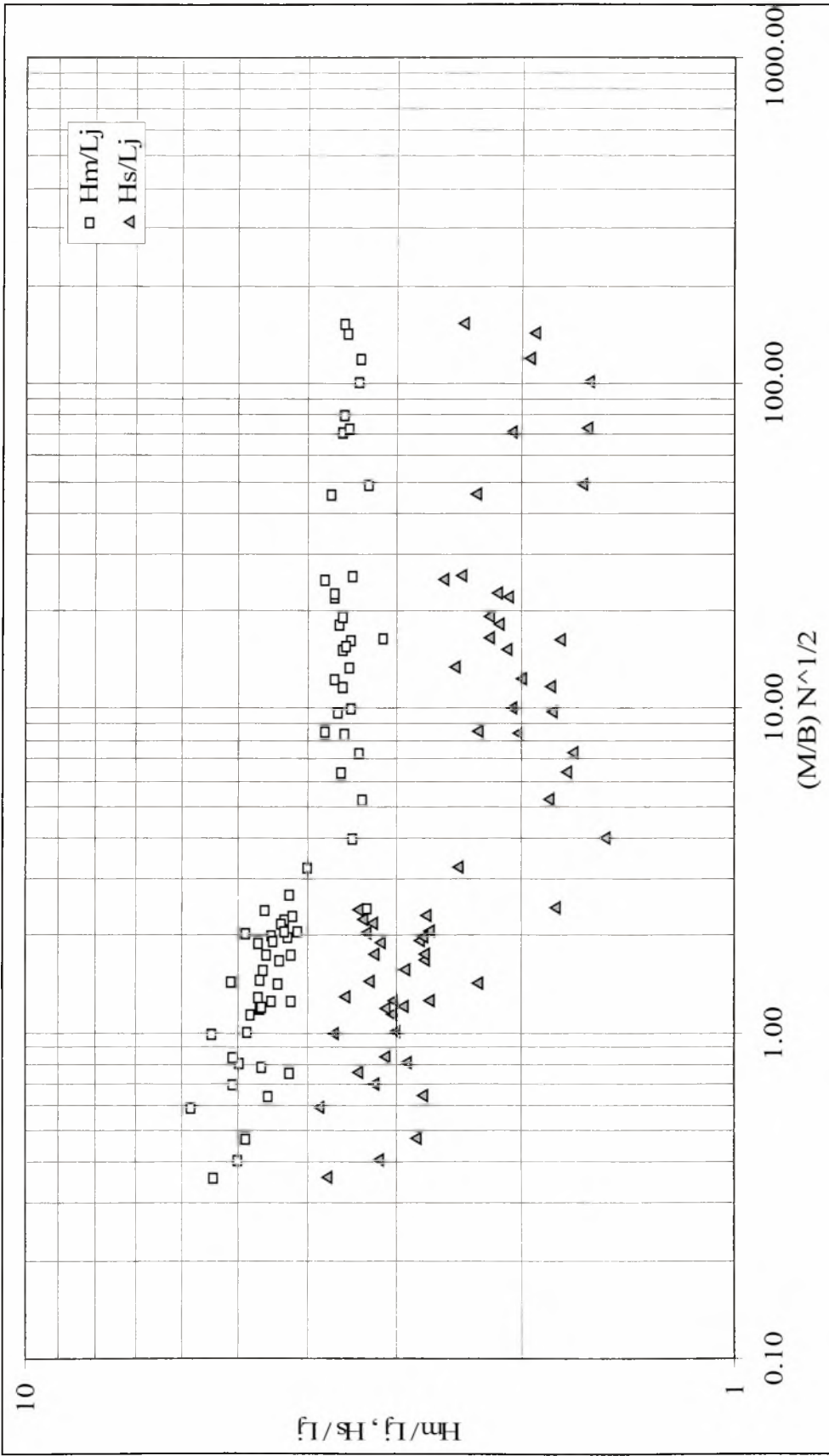
Διάγραμμα 4.6α Σύγκριση αδιάστατου M/A , H_m/L_j , κυκλικής και ορθογωνικής φλέβας



Διάγραμμα 4.6β Σύγκριση αδιάστατου $M/A - H_m/L_p$ κυκλικής και ορθογωνικής φλέβας



Διάγραμμα 4.7 Αδιάστατο ύψος διασποράς κυκλικής φλέβας



Διάγραμμα 4.8 Αδιάστατο ύψος διασποράς ορθογωνικής φλέβας

5. ΤΟ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων (1-17) θεωρήσαμε ότι το προφίλ της πυκνότητας δεν αλλάζει κατά μήκος της φλέβας, που συμπαράσφρει περιβάλλον ρευστό μέχρι το μέγιστο ύψος ανύψωσης (MYA). Στη συνέχεια η φλέβα δεν συμπαράσφρει άλλο ρευστό και κατέρχεται μέχρι το υψόμετρο που η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού είναι ίδια με εκείνη της φλέβας, όπου εξαπλώνεται πλευρικά χωρίς περαιτέρω ανάμιξη.

Για την επίλυση του συστήματος εξισώσεων (1-17) που αποτελεί ανάλυση σε μια διάσταση, πρέπει να γίνουν διάφορες υποθέσεις που αφορούν στον συντελεστή συμπαράσφρησης α , όπως επίσης και στον λόγο των πλατών διαφοράς πυκνότητας και ταχύτητας λ . Ο συντελεστής συμπαράσφρησης α ποικίλει με κατά μήκος του άξονα z , ανάλογα με το αν η φλέβα οδηγείται από την ορμή ή την άνωση. Αν η φλέβα οδηγείται από την ορμή, συμπεριφέρεται ασυμπτωτικά σαν μια καθαρά (μη – ανωστική) φλέβα και ο συντελεστής συμπαράσφρησης μπορεί να ληφθεί σαν σταθερά, ($\alpha_j = 0.0545$, σύμφωνα με τους Papanicolaou & List, 1988). Αν η φλέβα οδηγείται από την άνωση, δηλαδή αν η ορμή που έχει προέλθει από την επίδραση της άνωσης στη φλέβα είναι μεγαλύτερη από την αρχική ορμή της φλέβας, τότε αυτή συμπεριφέρεται ασυμπτωτικά σαν πλούμιο (ανωστική) και ο συντελεστής συμπαράσφρησης μπορεί να θεωρηθεί σταθερά ($\alpha_p = 0.0875$, Papanicolaou & List, 1988). Στην μεταβατική περιοχή από απλή φλέβα σε πλούμιο, ο συντελεστής συμπαράσφρησης μεταβάλλεται και μπορεί να υπολογιστεί από κάποια από τις σχέσεις που προτείνονται από τους Fischer *et al.* (1979). Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήσαμε για τον μεταβλητό συντελεστή συμπαράσφρησης τη σχέση

$$\alpha = \alpha_j \exp \left[\ln \left(\frac{\alpha_p}{\alpha_j} \right) \left(\frac{Ri(z)}{R_p} \right)^2 \right] \quad (5-1)$$

που προτείνεται από τους Fischer *et al.* (1979), όπου $Ri(z)$ είναι ο αριθμός Richardson της ροής σε απόσταση z από το ακροφύσιο και R_p είναι αριθμός Richardson ενός πλουμίου (σταθερά). Κατά τον ίδιο τρόπο, ο λόγος του πλάτους του πλουμίου λ είναι μεταβλητός, εφόσον σε απλή φλέβα $\lambda_j = 0.129/0.108 = 1.194$ και στα πλούμια $\lambda_p = 0.112/0.105 = 1.067$ (σύμφωνα με τους Papanicolaou & List, 1987, 1988). Θα μπορούσαμε πιθανά να χρησιμοποιήσουμε μια σχέση όμοια με την παραπάνω για την μετάβαση από jet σε πλούμιο

$$\lambda = \lambda_j \exp \left[\ln \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_j} \right) \left(\frac{Ri(z)}{R_p} \right)^2 \right] \quad (5-2)$$

που δίνει τις αντίστοιχες ασυμπτωτικές τιμές για τα jet και τα πλούμια, και μπορεί να πιστοποιηθεί από τα δεδομένα των Papanicolaou & List (1988).

Εάν καθοριστεί ο τύπος της φλέβας σαν συνάρτηση του αριθμού Richardson της φλέβας, σημαίνει ότι από τις παραπάνω εξισώσεις μπορούμε να υπολογίσουμε τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή συμπαράσφρησης α και του λόγου πλάτους λ . Ο αριθμός Richardson μιας φλέβας υπολογίζεται από τη σχέση (ορισμός)

$$Ri(z)^2 = \frac{\mu^2 \beta}{m^{5/2}} \quad (5-3)$$

ή σαν συνάρτηση της απόστασης από το ακροφύσιο, σύμφωνα με τη σχέση που προτάθηκε από τους List & Imberger (1973)

$$Ri(z) = R_p \frac{z}{z_o} \left[1 + \left(\frac{R_o}{R_p} \right)^2 \left(\left\{ \frac{z}{z_o} \right\}^2 - 1 \right) \right]^{-1/2} \quad (5-4)$$

όπου $R_o = QB^{1/2} / M^{5/2}$ είναι ο αρχικός αριθμός Richardson. Στην πρώτη περίπτωση ο αριθμός Richardson παίρνει ακόμα και αρνητικές τιμές, όταν η άνωση γίνεται αρνητική. Στην δεύτερη περίπτωση μπορεί να πάρει μόνο θετικές τιμές που περιορίζονται από την τιμή R_p . Εξ' ορισμού, η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή (jet), όταν οδηγείται από την αρχική ορμή M , και σαν πλούμιο όταν η ορμή που παράγεται από την άνωση είναι κυρίαρχη. Στην δεύτερη περίπτωση, δεν έχει σημασία αν το πλούμιο είναι θετικά ή αρνητικά ανωστικό, το μόνο που έχει σημασία είναι η συμπεριφορά της φλέβας σαν πλούμιο, π.χ. ο συντελεστής συμπαράσυρσης είναι αυτός ενός πλουμίου.

Αν χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις (5-1) και (5-3) για τον προσδιορισμό του συντελεστή συμπαράσυρσης μιας ανωστικής φλέβας σε ένα γραμμικά στρωματομένο ήρεμο περιβάλλον, ο a αρχικά θα αυξάνεται μέχρι να μηδενιστεί η άνωση. Ύστερα θα μειωθεί στην τιμή a_j όταν η άνωση μηδενιστεί, και θα συνεχίσει να μειώνεται, καθώς η άνωση θα είναι αρνητική. Βέβαια όταν $\beta = 0$, η φλέβα συμπεριφέρεται ήδη σαν πλούμιο και ο συντελεστής συμπαράσυρσης θα πρέπει να είναι a_p . Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4-6), ο συντελεστής συμπαράσυρσης αυξάνεται μέχρι το β να γίνει μηδέν, έπειτα μειώνεται μέχρι το μέγιστο ύψος ανύψωσης της φλέβας (ΜΥΑ) πέραν του οποίου δεν υπάρχει συμπαράσυρση. Παρόμοια, ο λόγος πλάτους λ της ανωστικής φλέβας συμπεριφέρεται ανάλογα, αν χρησιμοποιήσουμε τις εξισώσεις (5-3) ή (5-4) για τον υπολογισμό του από τη σχέση (5-2).

Αντί να λύσουμε το σύστημα των εξισώσεων (1-17), μπορούμε να λύσουμε ένα σύστημα εξισώσεων με αγνώστους τις μεταβλητές $w(z)$, $b(z)=b_w(z)$ και $\theta(z)$, που προκύπτει διαφορίζοντας το αριστερό μέλος των εξισώσεων (1-17) και εκφράζοντας την παροχή, την ορμή και την άνωση σαν συναρτήσεις των w , b και θ . Το νέο σύστημα εξισώσεων είναι

$$\begin{aligned} \frac{db}{dz} &= 2\alpha - \frac{g\lambda^2}{\rho_o} \frac{b}{w^2} \vartheta \\ \frac{dw}{dz} &= \frac{2g\lambda^2}{\rho_o} \frac{\vartheta}{w} - 2\alpha \frac{w}{b} \\ \frac{d\vartheta}{dz} &= -\frac{1+\lambda^2}{\lambda^2} \rho_o \frac{d\varepsilon}{dz} - \alpha \frac{2\vartheta}{b} = -\frac{1+\lambda^2}{\lambda^2} \rho_o \frac{N}{g} - \alpha \frac{2\vartheta}{b} \end{aligned} \quad (5-5)$$

με διαφορετικές φυσικά αρχικές συνθήκες από το προηγούμενο.

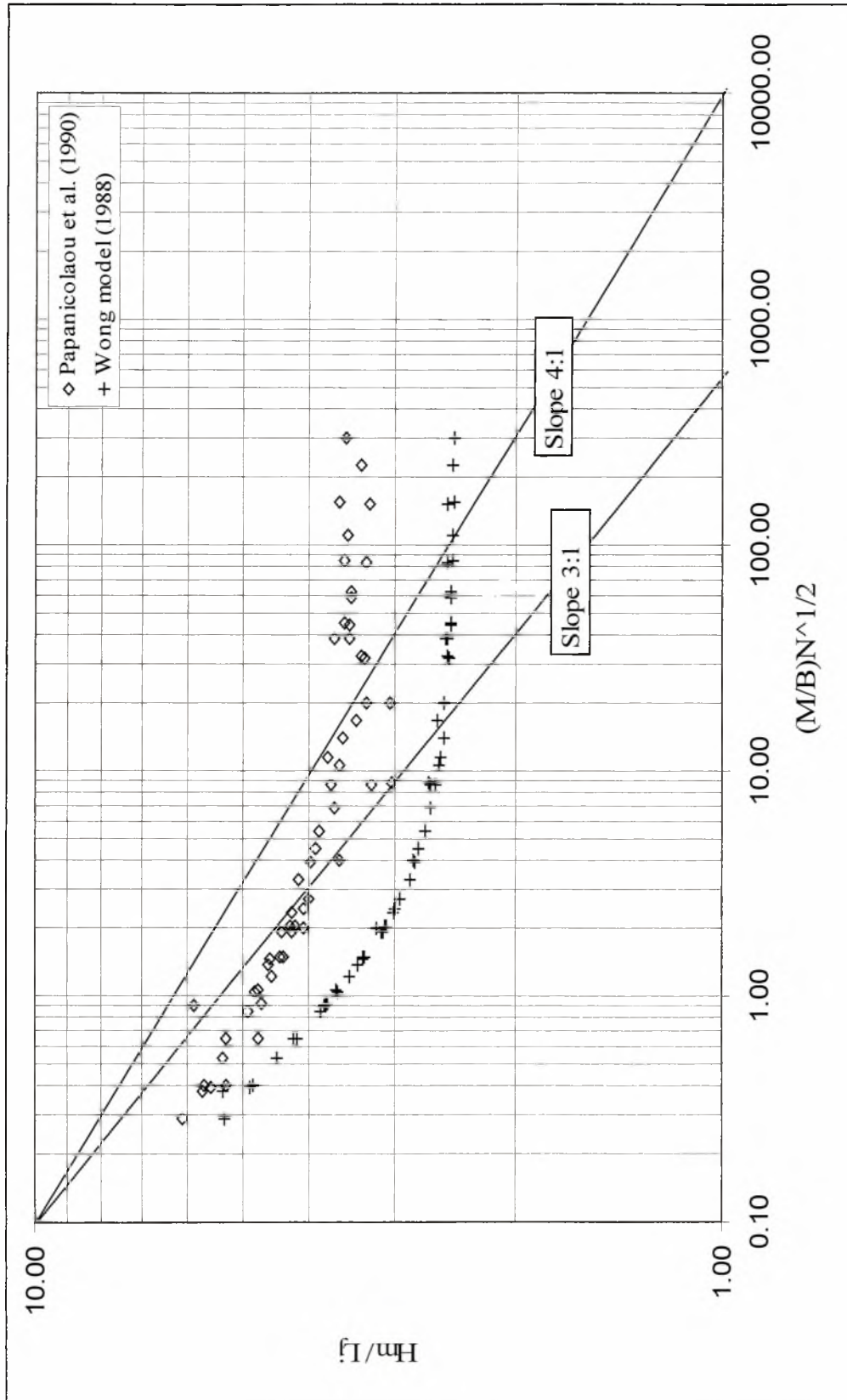
Στή συνέχεια θα παρουσιάσουμε τα επί μέρους μοντέλα υπολογισμού του ΜΥΑ, με βάση της διάφορες παραδοχές που κάνουμε. Τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για πιστοποίηση των μοντέλων αυτών, εκτός από τα δεδομένα του

παρόντος πειράματος, είναι αυτά των Papanicolaou *et al.* (1990), των Wong & Wright (1988), του Fan(1967), και των Abraham & Eysink(1969).

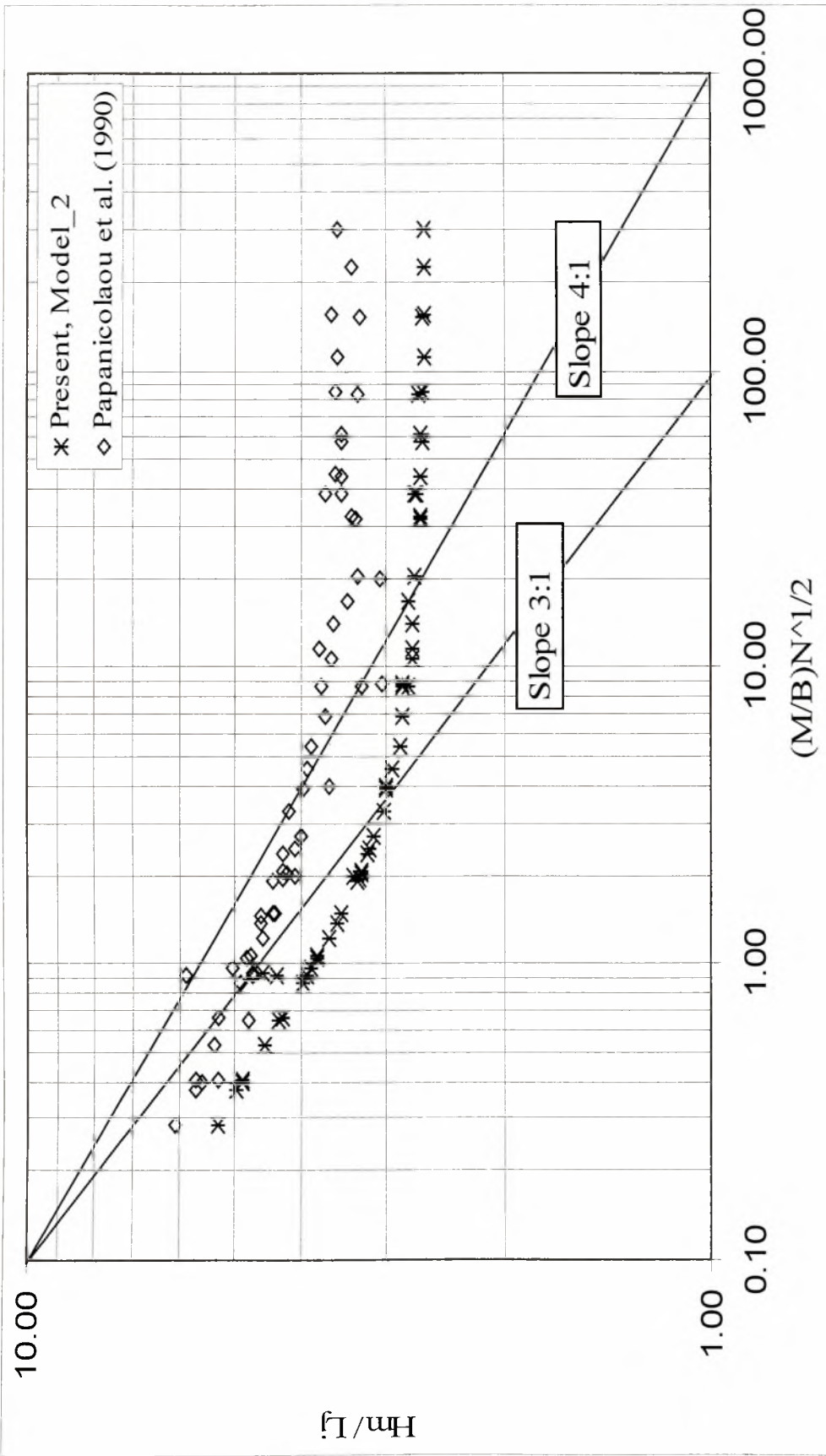
Πρώτο μοντέλο. Είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε από τους Wong & Wright (1988). Υποθέτουμε τις αρχικές τιμές των Q , $M;B$ και N στο σύστημα των εξισώσεων (1-17). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι αρχικές τιμές των Q , $M;B$ και N από τα πειράματα των Papanicolaou (1990), καθώς και τα πειραματικά δεδομένα τους για σύγκριση. Για τον υπολογισμό των a και λ με τις εξισώσεις (5-1) και (5-2) αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκε ο τοπικός αριθμός Richardson της εξίσωσης (5-3). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών φαίνονται στο διάγραμμα 5.1, μαζί με τα πειραματικά δεδομένα. Εκτός από την ασυμφωνία (συστηματικά χαμηλότερες τιμές) που βρέθηκε επίσης και από τους Wong & Wright (1988), παρατηρείται ότι η κλίση του αδιάστατου ύψους ανύψωσης στην περιοχή του πλουμίου ($MN^{1/2}/B < 1$), είναι μάλλον $-1/3$ παρά $1/4$ που έχει προβλεφθεί από τη διαστατική ανάλυση. Είναι φανερό ότι οι χαμηλότερες τιμές του H_{max} που προβλέφθηκαν από αυτό το μοντέλο οφείλονται πιθανών στην υπερεκτίμηση του συντελεστή συμπαράσυρσης.

Δεύτερο μοντέλο. Χρησιμοποιήθηκαν οι αρχικές τιμές των Q , $M;B$ και N από τα πειράματα των Papanicolaou (1990), καθώς και τα πειραματικά δεδομένα τους για σύγκριση. Για τον προσδιορισμό των a και λ , ο τοπικός αριθμός Richardson της εξίσωσης (5-4), που είναι μια συνάρτηση της απόστασης από το ακροφύσιο, θα αντικατασταθεί στις εξισώσεις (5-1) και (5-2) αντίστοιχα. Είναι καλύτερη υπόθεση απ' αυτή του προηγούμενου μοντέλου, επειδή η φλέβα συμπεριφέρεται σαν πλούμιο όταν η ορμή που παράγει η άνωση κυριαρχήσει της αρχικής, συνεχίζει δε να συμπεριφέρεται σαν πλούμιο έως το ύψος όπου η πυκνότητα της φλέβας και του αποδέκτη εξισώνονται. Μόλις η αρνητική άνωση αρχίσει να επηρεάζει τη ροή, η συνάρτηση συμπαράσυρσης είναι ανάλογη του τοπικού αριθμού Richardson υψωμένου σε κάποια δύναμη, όπως π.χ. $Ri^{-3/2}$ (Fernando 1991). Χωρίς παραπέρα υποθέσεις που να αφορούν την συνάρτηση συμπαράσυρσης, χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις (5-1) και (5-2) και τα αρχικά δεδομένα της υποθετικής φλέβας, η πρόβλεψη του μεγίστου ύψους ανύψωσης φαίνεται στο διάγραμμα 5.2. Στο διάγραμμα 5.3 οι προβλέψεις του πρώτου μοντέλου σχεδιάστηκαν σε αντιπαράθεση αυτών του δεύτερου μοντέλου, και βρέθηκαν να είναι χαμηλότερες, παρότι στο δεύτερο μοντέλο ο συντελεστής συμπαράσυρσης αυξάνεται με τον τοπικό αριθμό του Richardson.

Τρίτο μοντέλο. Για την επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (1-17) υποθέσαμε μια φλέβα διαμέτρου 2 cm, σε γραμμικά στρωματωμένο υγρό με σταθερή πυκνομετρική κλίση, όπου μεταβάλλαμε τις κινηματικές παραμέτρους της ροής έτσι ώστε να επιτύχουμε διάφορες τιμές της αδιάστατης παραμέτρου $(M/B)N^{1/2}$, από περίπου 0.01 έως 1000. Για τον προσδιορισμό των a και λ , οι υποθέσεις που κάναμε αρχικά, είναι παρόμοιες με αυτές του Fan (1967), π.χ. ότι τα a και το λ παίρνουν σταθερές τιμές. Ας θεωρήσουμε λοιπόν ότι ο συντελεστής συμπαράσυρσης a και ο λόγος του πλάτους λ της φλέβας λαμβάνουν σταθερές τιμές. Στην περίπτωση της απλής φλέβας, είναι $a_j = 0.0545$ και $\lambda_j = 1.194$, ενώ στα πλούμια $a_p = 0.0875$ και $\lambda_p = 1.067$. Χρησιμοποιώντας αυτά τα δύο σετ των παραμέτρων, παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του πλουμίου τα αριθμητικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τα πειραματικά, ενώ στην περίπτωση της απλής φλέβας, το προβλεπόμενο μέγιστο ύψος ανύψωσης είναι πολύ χαμηλότερο.

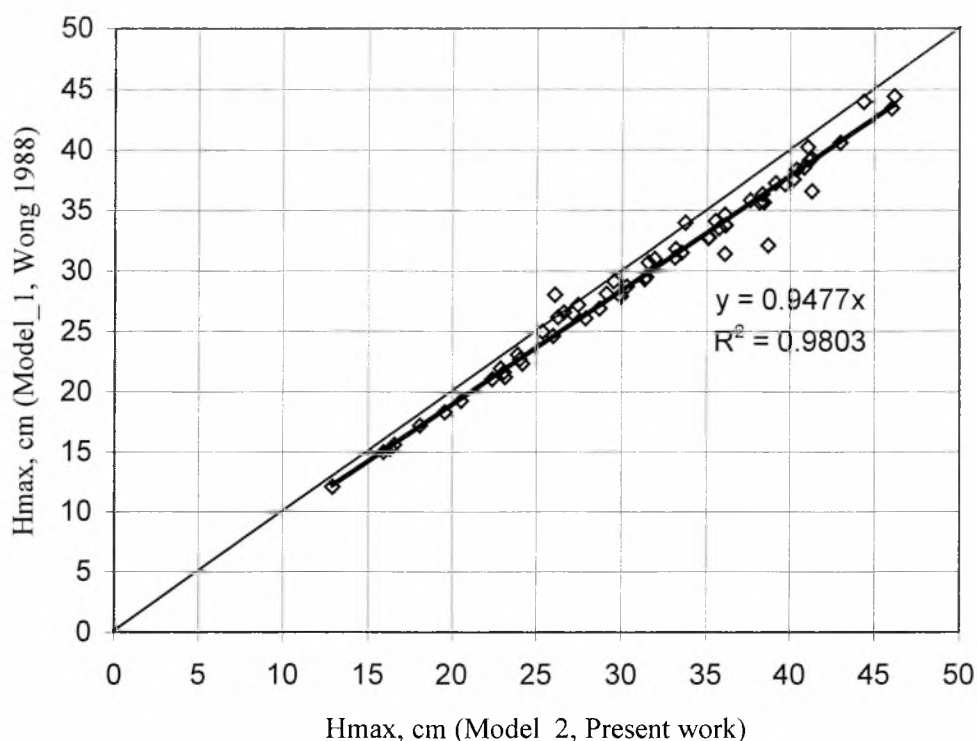


Διάγραμμα 5.1 Σύγκριση μετρημένου ΜΥΑ (Papanicolaou *et al.* (1990) και υπολογισμένου με το πρώτο μοντέλο (Wong, 1998).



Διάγραμμα 5.2 Σύγκριση μετρημένου ΜΥΑ (Papanicolaou *et al.* (1990) και υπολογισμένου με το δεύτερο μοντέλο.

Αυτό σημαίνει είτε ότι αν χρησιμοποιηθεί $a = 0.025$ (ένας κατά πολύ μικρότερος συντελεστής συμπαράσυρσης), τότε τα αριθμητικά αποτελέσματα συμπίπτουν με τα πειραματικά δεδομένα.

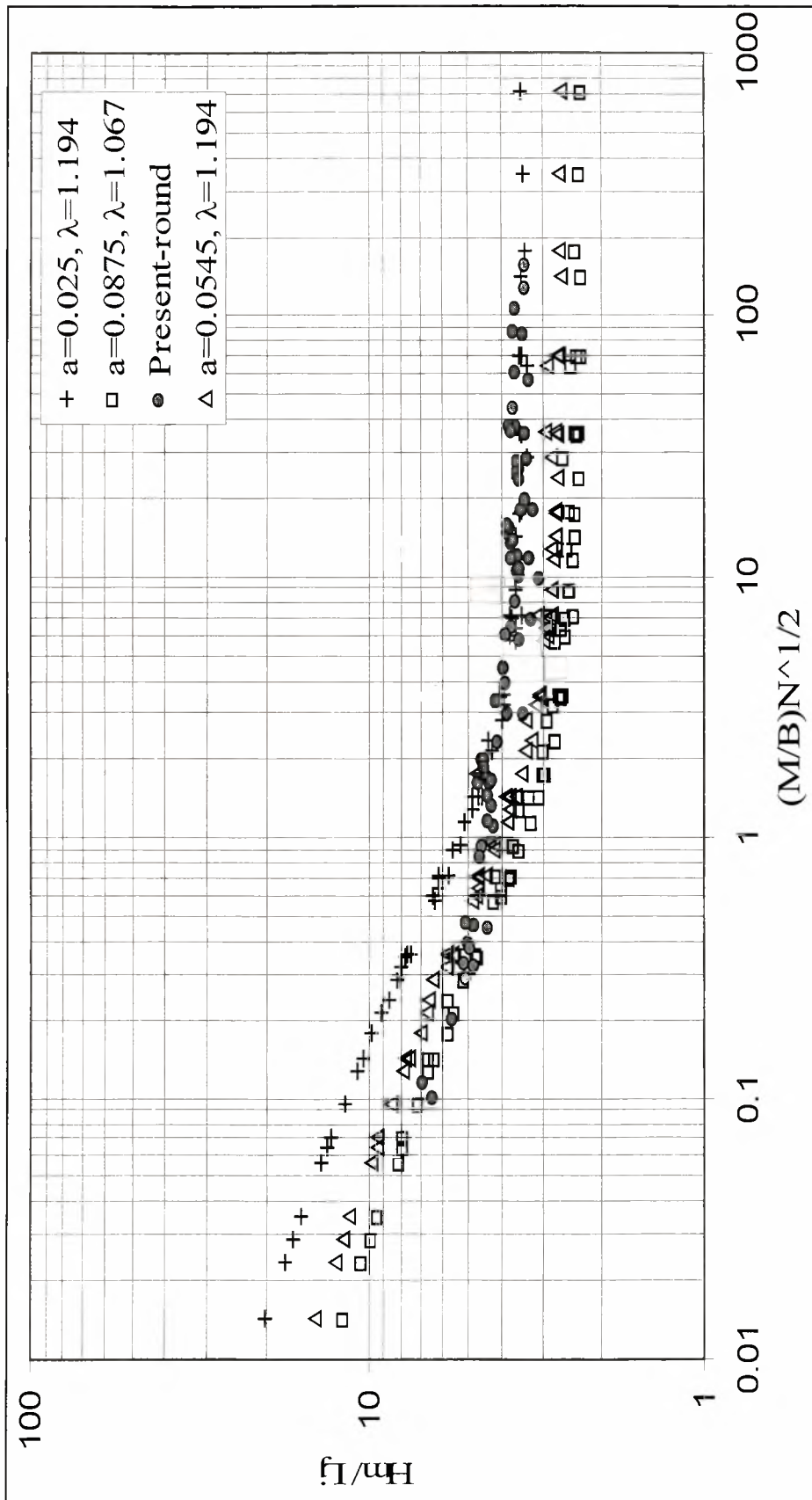


Διάγραμμα 5.3 Σύγκριση προβλεπόμενου MYA από το πρώτο (Wong) και δεύτερο (Present) μοντέλο.

Όλα τα προαναφερθέντα παραπάνω εμφανίζονται στο διάγραμμα 5.4. Παρατηρούμε ότι τα a και λ ενός πλουμίου δίνουν καλά αποτελέσματα όταν $(M/B)N^{1/2} < 1$. Τα a και λ μιας απλής φλέβας δίνουν καλά αποτελέσματα μόνο σε ένα τμήμα της μεταβατικής ζώνης περί το $(M/B)N^{1/2} = 0.50$. Το μειωμένο $a = 0.025$ και λ μιας απλής φλέβας δίνουν καλά αποτελέσματα όταν $(M/B)N^{1/2} > 1$. Επίσης, και για τις τρεις περιπτώσεις, η κλίση της ασυμπτωτικής ευθείας στην περιοχή του πλουμίου είναι 3:1 αντι 4:1 που προβλέπει η διαστατική ανάλυση.

Αυτή η θεώρηση ενός σταθερού συντελεστή συμπαράσυρσης καθ'όλο το μήκος ανάπτυξης της φλέβας, δεν είναι σωστή γιατί όταν η ορμή που παράγεται από την άνωση γίνει συγκρίσιμη με την αρχική ορμή, σημαίνει ότι η ροή συμπεριφέρεται σαν πλούμιο. Επίσης, όταν η άνωση γίνει αρνητική, η ορμή της φλέβας μειώνεται συνεχώς μέχρι το σημείο που η ροή φτάνει στο μέγιστο ύψος όπου $m = 0$. Χρησιμοποιώντας όμως τον μειωμένο αυτό συντελεστή συμπαράσυρσης, η πρόβλεψη του μοντέλου είναι πολύ ακριβής για την περιοχή της απλής φλέβας.

Αναφορικά με τις τρεις αυτές προβλέψεις της ροής, jets, πλούμια και μεταβατική περιοχή φλεβών, η πρόβλεψη του μοντέλου συμπίπτει με τα πειραματικά δεδομένα όταν γίνεται χρήση των παρακάτω δεδομένων.

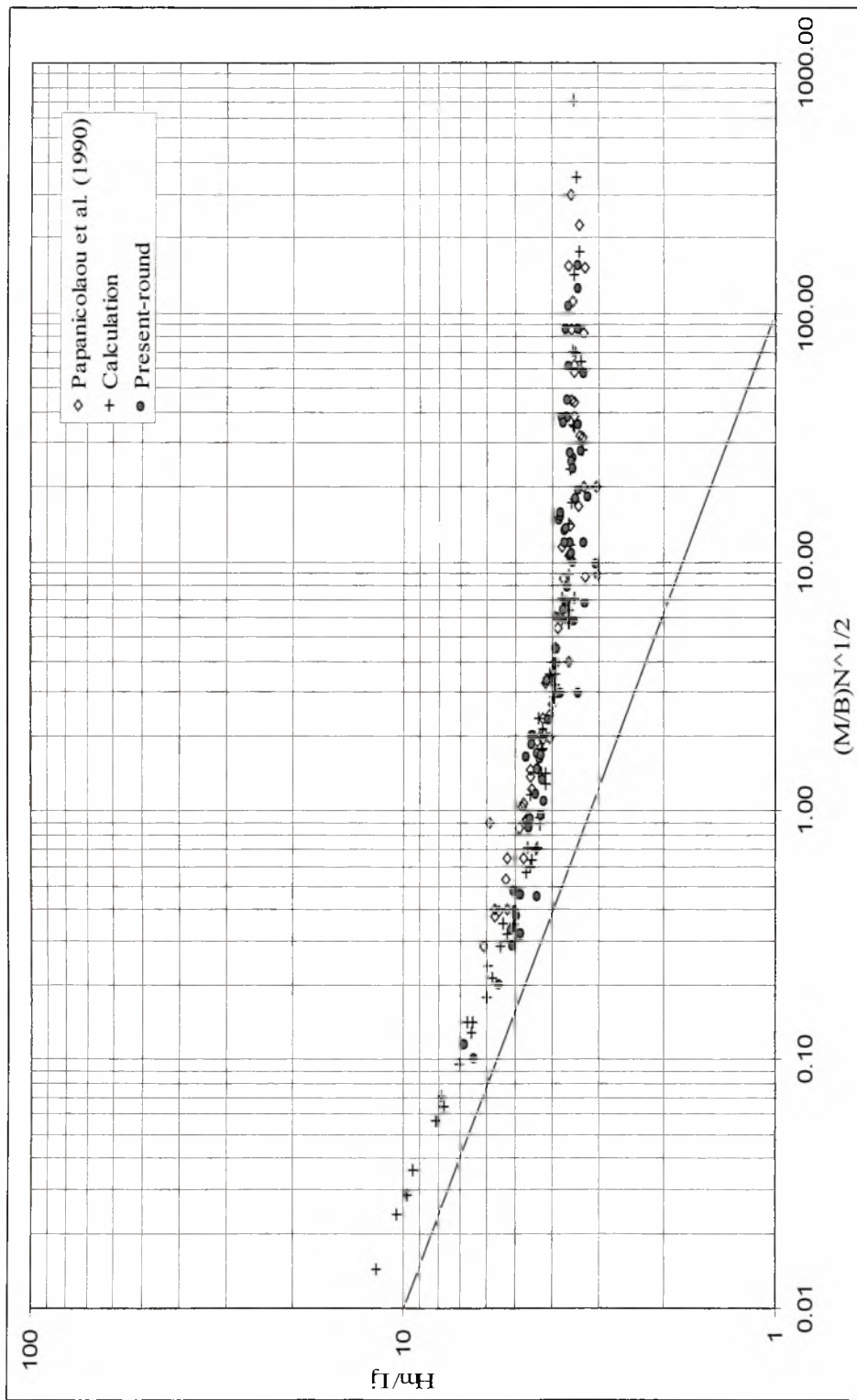


Διάγραμμα 5.4 Σύγκριση μετρούμενου ΜΥΑ και υπολογισμένου (α) με $a=0.0025$ και $\lambda_j=1.194$, (β) με $a_p=0.08545$ και $\lambda_p=1.067$, (γ) με $a_j=0.0545$ και $\lambda_j=1.194$

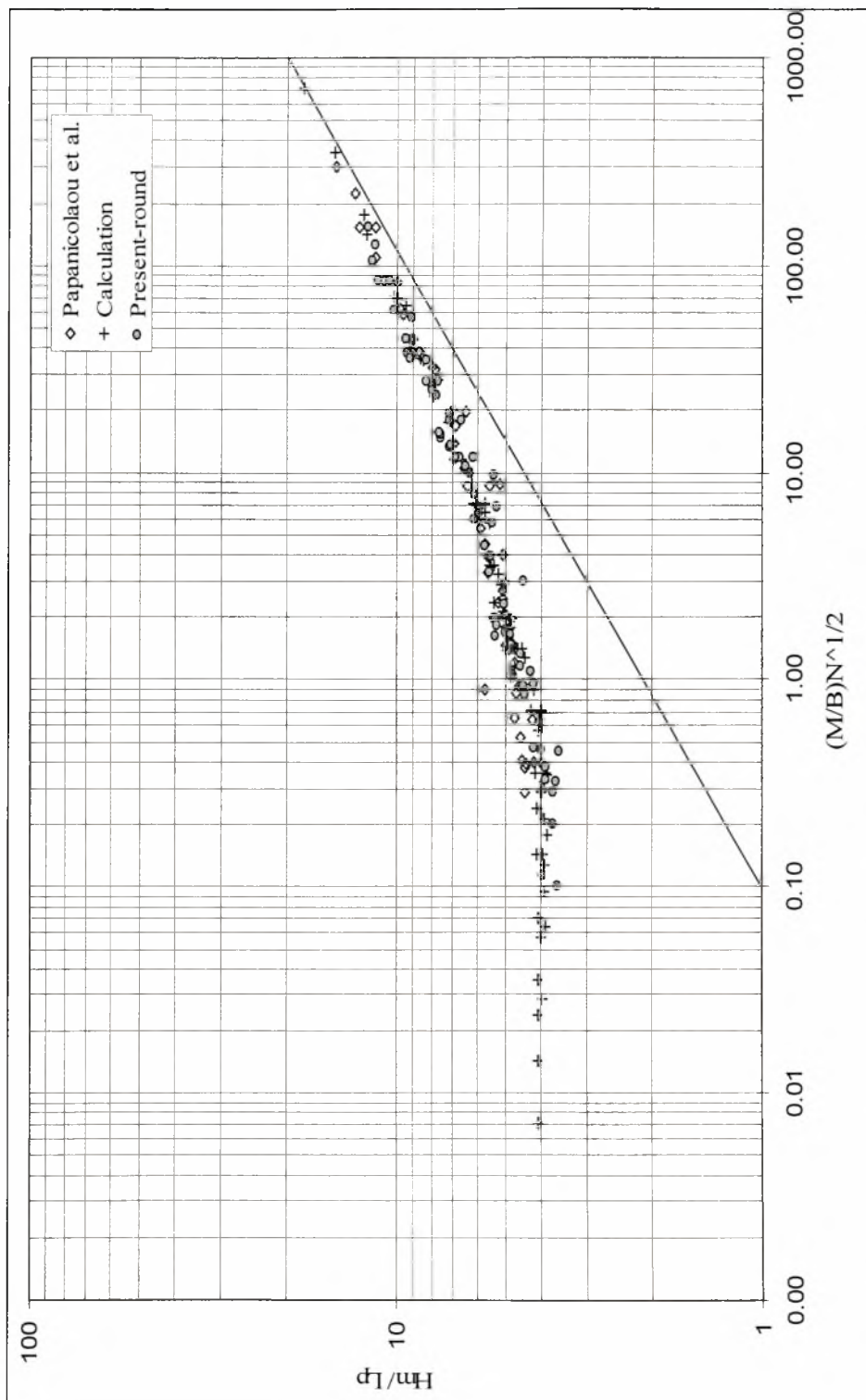
Τύπος ροής	a	λ
$(M/B)N^{1/2} < 0.10$ (plumes)	0.0875	1.067
$(M/B)N^{1/2} > 2$ (jets)	0.025	1.194
$0.10 < (M/B)N^{1/2} < 2$ (transistion)	$\alpha_p \exp \left[\ln \left(\frac{0.025}{\alpha_p} \right) \left(\frac{(M/B)N^{1/2}}{2} \right)^2 \right]$	$\lambda_p \exp \left[\left(\frac{\lambda_p}{\lambda_j} \right) \left(\frac{(M/B)N^{1/2}}{2} \right)^2 \right]$

Αυτό το μοντέλο είναι καθαρά μαθηματικό και δουλεύει για κάθε είδους αρχικές συνθήκες ροής, με την προϋπόθεση το περιβάλλον ρευστό να βρίσκεται σε ηρεμία και να είναι γραμμικά στρωματωμένο. Η φυσική του μοντέλου μπορεί να θεωρηθεί ακριβής όταν η ροή αρχικά οδηγείται από την άνωση (πλούμιο) δηλαδή όταν $(M/B)N^{1/2} < 0.10$. Στη μεταβατική περιοχή, $0.10 < (M/B)N^{1/2} < 2$, ο συντελεστής συμπαράσυρσης του περιβάλλοντος ρευστού μεταβάλλεται μεταξύ 0.0875 και 0.025. Στη συνέχεια για $(M/B)N^{1/2} > 2$, ο συντελεστής συμπαράσυρσης λαμβάνει μια μέση τιμή 0.025 σε ολόκληρη την περιοχή μιας πλήρως ανεπτυγμένης απλής φλέβας.

Επίσης από τα διαγράμματα 5.5α και 5.5β, όπου εμφανίζονται τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου με τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας, είναι προφανής η σύμπτωση των αριθμητικών και πειραματικών δεδομένων. Παρ' όλα αυτά, το μοντέλο προς το παρόν αποτελεί ένα μαθηματικό εργαλείο πρόγνωσης, χωρίς να άπτεται κατά 100% του φυσικού φαινομένου.



Διάγραμμα 5.5α Σύγκριση αδιάστατου μετρούμενου $M/A H_m/L_j$ από (α) Papanicolaou *et al.* (1990), (β) παρούσα εργασία, (γ) αποτελέσματα μοντέλου με μεταβλητά a και λ .



Διάγραμμα 5.5β Σύγκριση οδιάστατου μετρούμενου $M/A H_m/L_p$ από (α) Papanicolaou *et al.* (1990), (β) παρούσα εργασία, (γ) αποτελέσματα μοντέλου με μεταβλητά a και λ .

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Έχει μελετηθεί πειραματικά το μέγιστο ύψος ανύψωσης (ΜΥΑ) μιας κυκλικής και μιας ορθογωνικής με λόγο αξόνων 1:2 ανωστικής φλέβας, σε ένα ήρεμο αποδέκτη με γραμμική πυκνομετρική στρωμάτωση. Από τα πειραματικά δεδομένα και τα αδιαστατοποιημένα σύμφωνα με τη διαστατική ανάλυση ΜΥΑ, συμπεραίνουμε ότι τα αρχικά κινηματικά χαρακτηριστικά της φλέβας και η κλίση του προφίλ πυκνότητας του αποδέκτη, χαρακτηρίζουν τη ροή με $(M/B)N^{1/2} > 10$ ως απλής φλέβας, ενώ τη ροή με $(M/B)N^{1/2} < 1$ ως πλούμιου. Η ροή για την οποία ισχύει $1 < (M/B)N^{1/2} < 10$ θεωρείται σαν μεταβατική, και χαρακτηρίζεται ως ροή ανωστικής φλέβας σε ένα ήρεμο γραμμικά στρωματωμένο περιβάλλον. Δηλαδή, σαν απλή φλέβα (jet) ορίζεται αυτή για την οποία ο λόγος της κινηματικής ορμής M ως προς την ανωστική δύναμη B λαμβάνει πολύ μεγάλες τιμές ($M \rightarrow \infty$). Σαν ανωστική φλέβα (plume ή πλούμιο) χαρακτηρίζεται αυτή για την οποία ο λόγος της κινηματικής ορμής M ως προς την ανωστική δύναμη B λαμβάνει πολύ μικρές τιμές ($M \rightarrow 0$). Επομένως, τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας M και B και η βαθμίδα πυκνότητας του αποδέκτη N , προκαθορίζουν τη συμπεριφορά της σαν απλή, πλούμιο ή ανωστική (μεταβατική) φλέβα.

Η παραπάνω κατηγοριοποίηση της φλέβας είναι παρόμοια με αυτή που προτάθηκε ενωρίτερα (Papanicolaou & List 1987, 1988) και αφορά μια ανωστική φλέβα που διαχέεται σε ομογενή ήρεμο αποδέκτη. Στην περίπτωση αυτή, από τα αρχικά χαρακτηριστικά της φλέβας M και B ορίζουμε την κλίμακα μήκους l_M (εξίσωση 1-6) και ο λόγος της απόστασης z από την πηγή προς την χαρακτηριστική κλίμακα μήκους z/l_M , χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η συμπεριφορά της ανωστικής φλέβας. Το μόνο χαρακτηριστικό του περιβάλλοντος ρευστού που λαμβάνεται υπόψη, είναι η πυκνότητά του ρ_a που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κινηματικής άνωσης B της φλέβας. Όταν υπερिσχύει η ορμή της άνωσης ($M \gg B$ ή $z/l_M < 1$) η φλέβα συμπεριφέρεται σαν απλή, (jet), ενώ όταν ($M \ll B$ ή $z/l_M > 10$) η φλέβα συμπεριφέρεται σαν πλούμιο.

Και τα δύο κυκλικά και ορθογωνικά jets και πλούμια μετρήθηκαν να έχουν αδιάστατα ύψη ανύψωσης που ακολουθούν την ασυμπτωτική ανάλυση. Με τον παραπάνω προσδιορισμό της συμπεριφοράς της ροής σαν απλής φλέβας ή πλουμίου, απαντάμε ερωτήσεις του παρελθόντος, που αφορούσαν στις σταθερές αναλογίας και στον χαρακτηρισμό των φλεβών.

Μια κυκλική φλέβα με τα ίδια κινηματικά χαρακτηριστικά ενώ ανυψώνεται υψηλότερα από ότι η αντίστοιχη ελλειπτική με λόγο αξόνων 1:2, δεν φαίνεται να διαφέρει πολύ από μια ορθογωνική σε ένα γραμμικά στρωματωμένο περιβάλλον, παρά μόνο στην περιοχή $(M/B)N^{1/2} > 10$ όπου η ορθογωνική φλέβα με λόγο αξόνων 1:2 συμπαρασύρει περισσότερο ρευστό από το περιβάλλον, με αποτέλεσμα να μην ανέρχεται όσο ψηλά ανέρχεται μια κυκλική. Αυτό οδηγεί στο αποτέλεσμα οι κατακόρυφα εκτοξευόμενες ορθογωνικές φλέβες σε ένα γραμμικά στρωματωμένο ήρεμο περιβάλλον συμπαρασύρουν περισσότερο περιβάλλον ρευστό από ότι οι κυκλικές. Το ύψος ανύψωσης και των δύο κυκλικού και ορθογωνικού πλουμίου σε ένα ήρεμο γραμμικά στρωματωμένο περιβάλλον μετράται να είναι περίπου το ίδιο, που σημαίνει ότι αν η ροή είναι αρχικά πλούμιο, ο τύπος του διαχυτήρα (κυκλικός ή

ορθογωνικός) δεν θα επηρεάσει την αρχική διάλυση. Επίσης σημαίνει ότι ορθογωνικά πλούμια με λόγο άξονα 2:1 που εκβάλλουν κατακόρυφα σε αποδέκτη με γραμμική στρωμάτωση πυκνότητας, συμπαρασύρουν σχεδόν τον ίδιο όγκο περιβάλλοντος ρευστού με τα κυκλικά.

Από τα διαγράμματα 4.7 και 4.8 όμως, φαίνεται ότι το ύψος διάχυσης μιας κυκλικής φλέβας είναι αισθητά υψηλότερο απ' αυτό μιας ορθογωνικής, ιδιαίτερα στην περιοχή των απλών φλεβών. Αυτό σημαίνει ότι η ορθογωνική φλέβα συμπαρασύρει αισθητά περισσότερο περιβάλλον ρευστό και επομένως διαλύεται γρηγορότερα από την αντίστοιχη κυκλική, με αποτέλεσμα να διαχέεται σε χαμηλότερο ύψος (όπου η πυκνότητα του περιβάλλοντος ρευστού είναι μεγαλύτερη). Οι Ho & Gutmark (1987) περιέγραψαν την αστάθεια της ελλειπτικής φλέβας σαν την αιτία μεγαλύτερου συντελεστή συμπαράσυρσης.

Στο παρόν πείραμα, είναι εξασφαλισμένο ότι στα πλούμια ο αρχικός αριθμός του Richardson ήταν αρκετά υψηλός, αλλά χαμηλότερος από 0.50 (οριακή τιμή περί τα 0.65) έτσι ώστε να αποφεύγεται διείσδυση του περιβάλλοντος ρευστού μέσα στο ακροφύσιο της φλέβας. Έτσι στα πλούμια, το στόμιο του ακροφυσίου έρρεε πλήρες, για χαμηλές αρχικές παροχές της φλέβας. Μια πηγή σφάλματος στο πείραμα είναι πιθανά η υποεκτίμηση της αρχικής ορμής της φλέβας M , ειδικά όταν ο αριθμός του Reynolds της ροής ήταν μικρότερος από 2000 (πλούμια). Το προφίλ ταχύτητας εξόδου της φλέβας θεωρήθηκε ότι είναι ομοιόμορφο για όλες τις ταχύτητες εξόδου της φλέβας και για τους δύο τύπους ακροφυσίου. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί σαν σωστή υπόθεση (Papanicolaou 1994) για την περίπτωση της κυκλικής φλέβας, αλλά όχι και για αυτή της ορθογωνικής. Το ποσοστό σφάλματος δεν μπορεί να προσδιοριστεί παρά μόνο με τη μέτρηση της ταχύτητας του ορθογωνικού ακροφυσίου.

Το μονοδιάστατο μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε για τον προσδιορισμό του MYA , δουλεύει ικανοποιητικά στην περιοχή του πλουμίου θεωρώντας τον συντελεστή συμπαράσυρσης a_p του πλουμίου. Στην περίπτωση όμως της απλής φλέβας, πρέπει να μειωθεί αισθητά (από $a_p = 0.0545$ σε 0.025) για να δώσει καλά αποτελέσματα. Αυτό σημαίνει μάλλον ότι στην περίπτωση της απλής φλέβας, όταν η άνωση γίνεται αρνητική, δεν υπάρχει ουσιαστικά συμπαράσυρση του περιβάλλοντος ρευστού. Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις τα απλά μοντέλα δεν ακολουθούν τις προβλέψεις της διαστατικής ανάλυσης. Το τρίτο μοντέλο, εκτός από την καλή πρόβλεψη του MYA , αν και εν μέρει είναι τελείως μαθηματικό, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τη φυσική κατά 100%, δίνει πάρα πολύ καλά αποτελέσματα.

Παρά την εκτεταμένη περιοχή που κάλυψε η παρούσα έρευνα της ροής δύο τύπων φλεβών σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη, υπάρχουν αρκετά πράγματα που θα πρέπει να γίνουν στο μέλλον έτσι ώστε να αποκωδικοποιηθεί η φυσική που διέπει το φαινόμενο. Πρώτα πρώτα θα πρέπει να πιστοποιηθεί η ειδική ορμή της φλέβας για μη κυκλικά ακροφύσια, με τη μέτρηση της κατανομής της ταχύτητας στο ακροφύσιο. Θα πρέπει επίσης κατά κάποιο τρόπο, έμμεσο ή άμεσο να μετρηθεί ο συντελεστής συμπαράσυρσης μιας ανωστικής φλέβας σε γραμμικά στρωματωμένο αποδέκτη. Στη συνέχεια θα πρέπει να μελετηθεί η χωρική αστάθεια της ορθογωνικής φλέβας κατά την έξοδο από το ακροφύσιο και να πιστοποιηθεί αν αυτή είναι η αιτία του ταχύτερου ρυθμού διάλυσης.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abraham, G., 1960. *Jet diffusion in stagnant ambient fluid*. Proc. ASCE, J. Hyd. Div., **86**, 1-13.
- Abraham, G. and Eysink, W.D., 1969. *Jets issuing into fluid with density gradient*, J. Hyd. Res., **7** (2), pp.145-175.
- Albertson, M.L., Dai, Y.B., Jensen, R.A., & Rouse, H., 1950. *Diffusion of submerged jets*. Trans. ASCE, **115**, 639-664.
- Bloomfield, L.J., Kerr, R.C., 1999. *Turbulent fountains in a confined stratified environment*. J. Fluid Mech., **389**, pp. 27-54.
- Bloomfield, L.J., Kerr, R.C., 1998. *Turbulent fountains in a stratified fluid*. J. Fluid Mech., **358**, pp.335-356.
- Briggs, G.A. (1969). *Plume rise*. TID 25075, Clearinghouse of Federal Scientific and Technical Information, Springfield, VA.
- Chen, C.J. and Rodi, W. 1980. *Vertical turbulent buoyant jets - A review of experimental data*. Pergamon Press, 83 pp.
- Chen, J.-C., Papanicolaou, P.N., and List, E.J. 1980. *Two dimensional buoyant jets in stratified fluid*. ASCE J. Hyd. Div. **106**, 1720.
- Crawford, T.V. and Leonard, A.S., 1962. *Observations of buoyant plumes in calm stably stratified air*. J. Appl. Meteorology, **1**, 251.
- Csanady, G.T., 1973. *Effect of plume rise on ground level pollution*. Atmos.Env. **7**, 1.
- Davies, P.A., & Valente-Neves, M.J., Editors, 1994. *Recent research advances in the fluid mechanics of turbulent jets and plumes*. Kluwer.
- Fan, L-N., 1967. *Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids*. Rep. No. KH-R-15. W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Inst. of Technology, Pasadena, California.
- Fan, L-N., 1967. *Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids*. *Technical Rep.* KH-R-18, W.M. Keck Laboratory of Hydraulics and Water Resources, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Fernando, H.J.S., 1991. *Turbulent mixing in stratified fluids*. Ann. Rev. Fluid Mech. **23**, 455-493.
- Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J., and Brooks, N.H., 1979. *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press.
- Fox, D.G., 1970. *Forced plumes in a stratified fluid*. J. Geophys. Res., **75**, 6818.
- Gutmark, E., and Schadow, K.C., 1987. *Flow characteristics of orifice and tapered jets*. Phys. Fluids, **30**, 3488.
- Head, M.J., 1983. *The use of miniature 4-electrode conductivity probes for high resolution measurements of turbulent density or temperature variations in salt stratified water flows*. Ph. D. Thesis, U.C. San Diego.

- Hirst, E., 1971. *Buoyant jets discharged to quiescent stratified ambients*. J. Geophys. Res., **76** (30), pp.7375-7384.
- Ho, C.-M. and Gutmark, E., 1987. *Vortex induction and entrainment in a small-aspect-ratio elliptic jet*. J. Fluid Mech. **179**, 383.
- List, E.J. & Imberger, J., 1973. *Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes*. ASCE J. Hyd. Div. **99** (9), 1461 - 1474.
- List, E.J. & Imberger, J., 1975. *Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes. Closure*. ASCE J. Hyd. Div. **101** (9), 617 - 620.
- List, E.J., 1982. *Turbulent jets and plumes*. Ann. Rev. Fluid Mech. **14**, 189-212.
- List, E.J., 1982. *Mechanics of turbulent buoyant jets and plumes*. In **Turbulent buoyant jets and plumes**. by W. Rodi, Pergamon.
- Morton, B.R., Taylor, G.I. and Turner, J.S. (1956). *Turbulent gravitational convection from maintained instantaneous sources*. Proc. R. Soc. London, **A234**, 1.
- Oster, G. and Yamamoto, M., 1963. *Density gradient techniques*. Chem. Rev. **63**, 257.
- Ostrach, S., Prahl, J., and Tong, T., 1977. *The discharge of a submerged buoyant jet into a stratified environment*. Water Heat Management and Utilization, S.S. Lee and S. Sengupta, Eds., **2**, pp. 1513-1533.
- Papanicolaou, P.N., 2002. *On the terminal height of rise of vertical round buoyant jets in a linear density – stratified fluid*. (In preparation)
- Παπανικολάου, Π.Ν., 1998. *Τυρβώδεις Εκτοξευόμενες Φλέβες (Turbulent buoyant jets)*. Συνοπτική Θεώρηση. Σημειώσεις για το Προγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του ΕΜΠ «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων».
- Papanicolaou, P.N., 1994. *A piston driven jet for the study of the zone of flow establishment*. Exp. Fluids, **17**, 287-289.
- Papanicolaou, P.N., and Gharib, M., 1994. *Growth of a round jet, under local Reynolds number gradients*. (From NATO Recent Research Advances in the Fluid Mechanics of Turbulent Jets and Plumes). P.A. Davies and M.J. Valente Neves Editors, Kluwer, Series E: Applied Sciences, **255**, 177-190.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J., 1987. *Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets*. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. **30**, no. 10, 2057-71.
- Papanicolaou, P.N., and List, E.J., 1988. *Investigations of round vertical turbulent buoyant jets*. J. Fluid Mech., **195**, 341-391.
- Papanicolaou, P.N., Synolakis, C.E., and Hodge, D., 1990. *The maximum height of rise of elliptical and round buoyant jets in a linear density – stratified fluid*, School of Engineering, University of Southern California, Los Angeles.
- Precision Measurement Engineering , 1997. *MicroScale Conductivity – Temperature Instrument Model 125*. Operator’s Manual (Rev. 1,01 –Aug-97). 1827 Hawk View Dr., Encinitas, CA, USA.

- Rodi, W., Ed., 1982. *Turbulent buoyant jets and plumes*. Pergamon.
- Rouse, H., Yih, C.S., & Humphreys, H.W., 1952. *Gravitational convection from a boundary source*. *Tellus* **4**, 201 - 210.
- Wong, D.R., and Wright, S.J. 1988. *Submerged Turbulent jets in stagnant linearly stratified fluids*. *J. Hyd. Res.*, **26** (2), pp. 199-223.
- Wright, S.J., and Wallace, R.B., 1979. *Two-dimensional buoyant jets in a stratified fluid*, ASCE, *J. Hyd. Div.*, **105** (11), pp. 1393-1406.





