



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διπλωματική Εργασία

**ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ LASER INDUCED  
FLUORESCENCE (LIF) ΣΕ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΕΣ ΚΥΚΛΙΚΕΣ  
ΤΥΡΒΩΔΕΙΣ ΑΝΩΣΤΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ**

**Κωνσταντίνος Γκούτης**

**Επιβλέπων: Ηλίας Παπακωνσταντής, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ**

Αθήνα, Μάρτιος 2023

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Ηλία Παπακωνσταντή, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ, για την πολύπλευρη βοήθειά του στην εκπόνηση της εργασίας. Οι συμβουλές και οι υποδείξεις του σε θεωρητικό και πρακτικό επίπεδο και η αδιάκοπη καθοδήγηση και υποστήριξή του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας ήταν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Παπανικολάου, πρώην Καθηγητή ΕΜΠ, που με ενέπνευσε και με ενθάρρυνε να ασχοληθώ με το αντικείμενο αυτό. Οι γνώσεις και η εμπειρία του υπήρξαν πολύτιμα εφόδια, τόσο για την πραγματοποίηση της εργασίας αυτής όσο και για την ευρύτερη ενασχόλησή μου με τα ρευστά σε προπτυχιακό επίπεδο.

Παράλληλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παναγιώτη Δημητριάδη, Διδάκτορα Μηχανικό Ε.Μ.Π. για την καίρια βοήθειά του στην κατανόηση της τεχνικής PLIF και του κώδικα επεξεργασίας και την συνεχή υποστήριξη και υπομονή του στη διεξαγωγή των πειραμάτων και την επίλυση όσων ζητημάτων προέκυψαν.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών της ροής τυρβώδους κυκλικής ανωστικής φλέβας και ειδικότερα της περιοχής όπου η ροή παρουσιάζει συμπεριφορά πλουμίου. Αρχικά παρουσιάζονται τα κυριότερα θεωρητικά στοιχεία που αφορούν στην δυναμική των ανωστικών φλεβών, γίνεται προσέγγιση των παραμέτρων της ροής μέσω της διαστατικής ανάλυσης και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά της ροής που διερευνώνται πειραματικά.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 11 πειράματα ροής τυρβωδών ανωστικών φλεβών σε πειραματική διάταξη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, που περιλαμβάνει δεξαμενή διαστάσεων 1,00 m x 0,80 m x 0,70 m. Πιο συγκεκριμένα, σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη, πραγματοποιήθηκαν 6 πειράματα τυρβωδών ανωστικών φλεβών όπου το υγρό της φλέβας ήταν νερό με θερμοκρασία στην εκροή σημαντικά υψηλότερη από το νερό του αποδέκτη ( με διαφορά θερμοκρασίας  $\Delta T$  μεταξύ 23°C και 31 °C ανά πείραμα) και 5 πειράματα στα οποία το υγρό της φλέβας ήταν νερό που διοχετευόταν μέσα σε αλατόνερο με αρχική διαφορά πυκνότητας μεταξύ 1,8% και 1,9%. Η διάμετρος του στομίου εκροής της φλέβας ήταν σταθερή σε όλα τα πειράματα και ίση με 1,5 cm. Ο πυκνομετρικός αριθμός Froude κυμάνθηκε μεταξύ 1,72 και 3,73, ενώ η ροή της φλέβας σε όλα τα πειράματα ήταν τυρβώδης με αρχικό αριθμό Reynolds μεταξύ 1222 και 3136. Τα πειράματα περιελάμβαναν οπτικοποίηση της ροής και μετρήσεις συγκέντρωσης. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκε η τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF) με χρήση της Ροδαμίνης 6G ως φθορίζουσας ουσίας. Δημιουργήθηκε επίπεδο φύλλο Laser και τα πειράματα βιντεοσκοπήθηκαν χρησιμοποιώντας κατάλληλη βιντεοκάμερα.

Από τα βίντεο των πειραμάτων έγινε εξαγωγή των στιγμιότυπων (frames) μέσω κώδικα στο λογισμικό MATLAB και προέκυψε η μέση εικόνα της ροής και η τυπική της απόκλιση. Μέσω του συσχετισμού της συγκέντρωσης της Ροδαμίνης 6G με την ένταση φθορισμού σε κάθε pixel υπολογίστηκαν οι συγκεντρώσεις σε όλο το πεδίο ροής. Έτσι προέκυψαν σε αδιάστατη μορφή οι εγκάρσιες κατανομές της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης και της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή. Οι εγκάρσιες κατανομές της μέσης συγκέντρωσης προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη θεωρητική κατανομή Gauss για το σύνολο των πειραμάτων. Από τις κατανομές της έντασης της τύρβης προέκυψε ότι για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά, η κατανομή εμφανίζει μέγιστο περίπου στο 0,4, τιμή που συμφωνεί με τις τιμές που δίνονται στη βιβλιογραφία για τη ροή πλουμίου, ενώ για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας, η μορφή της κατανομής διαφέρει από θέση σε θέση εμφανίζοντας αυξητική τάση.

Από τις κατανομές της μέσης συγκέντρωσης υπολογίστηκε το πλάτος συναρτήσεως της κατακόρυφης απόστασης από την εκροή και προέκυψε γραμμική συσχέτιση, με σταθερά αναλογίας που συμφωνεί με τις τιμές της βιβλιογραφίας για ροές πλουμίων. Επιπλέον, από τις μετρήσεις προέκυψε η μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης κατά

μήκος του άξονα της φλέβας σε αδιάστατη μορφή. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αποτελέσματα άλλης εργασίας από τη βιβλιογραφία και παρατηρήθηκαν διαφορές. Λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβολές στην ένταση φθορισμού λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και της αλατότητας, έγιναν διορθώσεις-προσαρμογές στη βαθμονόμηση και τα τελικά αποτελέσματα βρέθηκαν να συμφωνούν ικανοποιητικά με αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

## ABSTRACT

In this Diploma Thesis an experimental investigation of the characteristics of the turbulent round buoyant jet flow was conducted focusing in the region where the flow behaves like a plume. At first, the main theory elements that concern the dynamics of the buoyant jets are presented, the flow parameters are approached through dimensional analysis, and the flow characteristics that need experimental investigation are put forward.

In total, 11 experiments for the flow of turbulent buoyant jets were carried out in an experimental apparatus in the Laboratory of Applied Hydraulics of the School of Civil Engineering of NTUA, which includes a tank with dimensions 1.00 m x 0.80 m x 0.70 m. More specifically, in a stationary homogeneous ambient fluid, six (6) experiments were performed, where the jet fluid was water with a temperature at the outlet significantly higher than the ambient water (with temperature difference  $\Delta T$  ranging between 23°C and 31°C per experiment), and five (5) experiments, where the jet fluid was water which was discharged into saltwater with an initial density difference between 18.4‰ and 19.2‰. The nozzle diameter was equal to 1.5 cm in all experiments. The densimetric Froude number was ranging between 1.72 and 3.73, while the jet flow was turbulent in all experiments with the Reynolds number ranging between 1222 and 3136. The experiments included flow visualization and concentration measurements. For this purpose, the Laser Induced Fluorescence (LIF) technique was employed using Rhodamine 6G as fluorescent tracer. A planar laser sheet was created and the experiments were recorded using a suitable video camera.

The video frames were extracted using a code developed in MATLAB and the average image of the flow and its standard deviation were obtained. By correlating the concentration of Rhodamine 6G with the fluorescence intensity of each pixel, the concentrations over the entire flow field were calculated. Based on this, the transverse distributions of the mean (time-averaged) concentration and the intensity of turbulent concentration fluctuations, at various vertical distances from the outlet, were finally obtained in dimensionless form. The transverse distributions of the mean concentration satisfactorily approximate the theoretical Gaussian distribution for all experiments. From the distributions of the turbulent intensity it is obtained that for the experiments with temperature difference, the distribution shows a maximum at about 0.4, a value that is in agreement with values reported in the literature for the plume flow, while for the experiments with salinity difference the distribution shape differs for each position showing a constant increase.

From the distributions of the mean concentration the jet width was calculated as a function of the vertical distance from the outlet, and a linear relation was obtained with a constant of proportionality that is in agreement with values reported in the literature for plumes. Moreover, the variation of the minimum dilution along the jet axis was obtained in dimensionless form. The results were compared with results of a previous study and differences were found. However, taking into account the changes

in fluorescence intensity due to the increase of temperature and salinity, correction-adaption was made in the calibration and the final results were found to be in good agreement with results of the literature.

## Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ .....	1
1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3
1.3 ΔΙΑΡΘΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	3
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	4
2.1. ΟΡΙΣΜΟΙ .....	4
2.2 ΑΠΛΗ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΛΕΒΑ (JET).....	5
2.3 ΠΛΟΥΜΙΟ (PLUME) - ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΟΥΜΙΟΥ.....	8
2.4 ΑΝΩΣΤΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ (BUOYANT JETS) - ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ.....	12
2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	15
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ .....	20
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	20
3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ .....	21
3.2.1 ΚΥΡΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ -ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ .....	21
3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ-ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ.....	25
3.2.3. ΣΑΚΟΙ ΑΛΑΤΟΣ(NaCl)- ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ.....	27
3.2.4 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ.....	28
3.2.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΦΛΕΒΑΣ .....	30
3.2.6. ΚΑΜΕΡΑ, ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΒΙΝΤΕΟΣΚΟΠΗΣΗΣ.....	35
3.2.7 ΣΥΣΤΗΜΑ PLIF (PLANAR LASER INDUCED FLUORESCENCE).....	37
3.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΟΜΕΤΡΟΥ .....	40
3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	42
3.5 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	46
3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ.....	48
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	51
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	51
4.2. ΑΡΧΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....	51
4.3 ΜΕΣΗ ΚΑΙ RMS ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ.....	52
4.4 ΚΛΙΜΑΚΑ ΕΙΚΟΝΑΣ .....	55
4.5 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΜΕΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ .....	56
4.6 ΠΛΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ.....	58
4.7 ΕΝΤΑΣΗ ΤΥΡΒΗΣ.....	60

4.8 ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ $C_M$ - ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ .....	61
4.9. ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	68
5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	78
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	81
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	114



## ΣΧΗΜΑΤΑ

<b>Σχήμα 1.1</b> Διάθεση αποβλήτων και σχηματισμός τυρβωδών ανωστικών φλεβών (πηγές: <a href="https://verdeyazul.diarioinformacion.com/la-depuracion-de-aguas-sigue-fracasando-en-espana.html">https://verdeyazul.diarioinformacion.com/la-depuracion-de-aguas-sigue-fracasando-en-espana.html</a> , <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smoke_plume_from_chimney_of_power_plant.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smoke_plume_from_chimney_of_power_plant.jpg</a> ).....	2
<b>Σχήμα 1.2</b> (α): Έκρηξη του ηφαιστείου Κρακατόα 1883-Σχέδιο της εποχής, (β): Έκρηξη ηφαιστείου Hunga Tonga 2020 (πηγές: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Krakatoa">https://en.wikipedia.org/wiki/Krakatoa</a> , <a href="https://www.sciencenews.org/article/hunga-tonga-volcano-eruption-touched-space-lightning">https://www.sciencenews.org/article/hunga-tonga-volcano-eruption-touched-space-lightning</a> ).....	2
<b>Σχήμα 2.1.</b> Τυρβώδης διάχυσης απλής φλέβας (Πηγή: Παπανικολάου, 2017).....	6
<b>Σχήμα 2.2</b> Οπτικοποίηση ροής απλής φλέβας με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (Πηγή: Παπανικολάου, 2017).....	7
<b>Σχήμα 3.1</b> Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης .....	21
<b>Σχήμα 3.2.</b> Κύρια δεξαμενή-αποδέκτης.....	22
<b>Σχήμα 3.3.</b> Υπερχειλιστής τύπου V-notch .....	23
<b>Σχήμα 3.4.</b> Παροχόμετρο και σύστημα εκτροπής.....	24
<b>Σχήμα 3.5.</b> Μηχανικός αναδευτήρας κύριας δεξαμενής.....	25
<b>Σχήμα 3.6.</b> Δευτερεύουσα δεξαμενή – θερμοσίφωνα.....	26
<b>Σχήμα 3.7.</b> Αεροσυμπιεστής .....	27
<b>Σχήμα 3.8.</b> Σάκοι άλατος (NaCl) .....	28
<b>Σχήμα 3.9.</b> Βαριοπούλα- σφύρα χειρός και φαράσι .....	28
<b>Σχήμα 3.10.</b> Ψηφιακό μετρητικό όργανο YSI30 .....	29
<b>Σχήμα 3. 11.</b> Πυκνόμετρα .....	30
<b>Σχήμα 3.12.</b> Δοχείο αποθήκευσης άνυδρης Ροδαμίνης-6G .....	31
<b>Σχήμα 3.13.</b> Διάλυμα Ροδαμίνης-6G .....	32
<b>Σχήμα 3.14.</b> Ζυγαριά ακριβείας .....	32
<b>Σχήμα 3.15.</b> Θειώδες Νάτριο άνυδρο και χωνί.....	33
<b>Σχήμα 3.16.</b> Μαγνητικός αναδευτήρας.....	34
<b>Σχήμα 3.17</b> Σύριγγες λήψης Ροδαμίνης – 6G .....	35
<b>Σχήμα 3.18</b> Κάμερα Panasonic HC-V770 .....	35
<b>Σχήμα 3.19.</b> Τρίποδο τοποθέτησης κάμερας .....	36
<b>Σχήμα 3.20</b> Διάταξη δημιουργίας φύλλου laser με την τεχνική LIF.....	37
<b>Σχήμα 3.21.</b> Σύστημα PLIF- Τρίποδο, συσκευή παραγωγής Laser, περιστροφικό κάτοπτρο .....	38
<b>Σχήμα 3.22</b> Τροφοδοτικά Laser και περιστροφικού κατόπτρου.....	39
<b>Σχήμα 3.23</b> Γυαλιά απορρόφησης ακτινοβολίας.....	39
<b>Σχήμα 3.24</b> Ογκομετρικοί σωλήνες- δοχεία .....	40
<b>Σχήμα 3.25</b> Καμπύλες βαθμονόμησης παροχομέτρου.....	41

<b>Σχήμα 3.26</b> Κατακόρυφος χάρακας για διόρθωση σφαλμάτων.....	44
<b>Σχήμα 3.27</b> Θερμόμετρο επί της δευτερεύουσας δεξαμενής.....	45
<b>Σχήμα 3.28.</b> Ευθυγράμμιση συστήματος PLIF.....	45
<b>Σχήμα 3.29</b> Στιγμιότυπα από τα πειράματα Expr.6T και Expr.1S αντίστοιχα (t=100 s) .....	49
<b>Σχήμα 3.30</b> Στιγμιότυπα από τα πειράματα Expr.8T και Expr.2S αντίστοιχα (t=90 s)	49
<b>Σχήμα 3.31.</b> Στιγμιότυπα από τα πειράματα Expr.9T και Expr.4S αντίστοιχα (t=87 s)	50
<b>Σχήμα 3.32.</b> Είσοδος φυσαλίδων στην ροή (απορριφθέντα πειράματα) .....	50
<b>Σχήμα 4.1.</b> Απεικόνιση της μέσης τιμής της συγκέντρωσης σε περιβάλλον Excel πριν και μετά την επεξεργασία (Πείραμα Expr.9T).....	53
<b>Σχήμα 4.2.</b> Απεικόνιση της RMS συγκέντρωσης σε περιβάλλον Excel πριν και μετά την επεξεργασία (Πείραμα Expr.9T) .....	54
<b>Σχήμα 4.3.</b> Επεξεργασμένη εικόνα με χάρακα βυθισμένο στη δεξαμενή.....	55
<b>Σχήμα 4.4.</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.6T.....	56
<b>Σχήμα 4.5.</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.6T ύστερα από τον υπολογισμό της απομείωσης	58
<b>Σχήμα 4.6.</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.2S .....	59
<b>Σχήμα 4.7.</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.9T .....	60
<b>Σχήμα 4.8.</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.2S.....	61
<b>Σχήμα 4.9.</b> Μεταβολή της έντασης φωτεινότητας κατά μήκος του άξονα για το πείραμα Expr.3S.....	62
<b>Σχήμα 4.10.</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή (πείραμα Expr.9T) .....	63
<b>Σχήμα 4.11.</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – (πείραμα Expr.9T) σε λογαριθμικούς άξονες.....	63
<b>Σχήμα 4.12</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή (πείραμα Expr.3S) .....	64
<b>Σχήμα 4.13.</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – (πείραμα Expr.3S) σε λογαριθμικούς άξονες .....	64
<b>Σχήμα 4.14.</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Expr.9T) .....	66
<b>Σχήμα 4.15.</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Expr.9T) σε λογαριθμικούς άξονες.....	66
<b>Σχήμα 4.16.</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Expr.3S) .....	67

<b>Σχήμα 4.17.</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Expr.3S) .....	67
<b>Σχήμα 4.19</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή ύστερα από τον υπολογισμό της απομείωσης, για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά.. .....	69
<b>Σχήμα 4.20</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή ύστερα από τον υπολογισμό της απομείωσης, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας.....	70
<b>Σχήμα 4.21.</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά .....	71
<b>Σχήμα 4.22.</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας.....	71
<b>Σχήμα 4.23.</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων .....	72
<b>Σχήμα 4.24</b> Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για τα πειράματα με διαφορά θερμοκρασίας πριν την προσαρμογή –διόρθωση .....	73
<b>Σχήμα 4.25</b> Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας πριν την προσαρμογή –διόρθωση .....	73
<b>Σχήμα 4.26.</b> Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας μετά την προσαρμογή –διόρθωση .....	74
<b>Σχήμα 4.27.</b> Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για το σύνολο των πειραμάτων μετά την προσαρμογή –διόρθωση .....	74
<b>Σχήμα A.1</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.1S πριν από την προσαρμογή - διόρθωση.....	81
<b>Σχήμα A.2</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.1S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	81
<b>Σχήμα A.3</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.1S .....	82
<b>Σχήμα A.4</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.1S .....	82
<b>Σχήμα A.5</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.1S.....	83

<b>Σχήμα A.6</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.2S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	84
<b>Σχήμα A.7</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.2S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	84
<b>Σχήμα A.8</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.2S .....	85
<b>Σχήμα A.9</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.2S .....	85
<b>Σχήμα A.10</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.2S .....	86
<b>Σχήμα A.11</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.3S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	87
<b>Σχήμα A.12</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.3S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	87
<b>Σχήμα A.13</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.3S .....	88
<b>Σχήμα A.14</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα Expr.3S .....	88
<b>Σχήμα A.15</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.3S.....	89
<b>Σχήμα A.16</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.4S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	90
<b>Σχήμα A.17</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.1S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	90
<b>Σχήμα A.18</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.4S .....	91
<b>Σχήμα A.19</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.4S .....	91
<b>Σχήμα A.20</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.4S.....	92
<b>Σχήμα A.21</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.5S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	93

<b>Σχήμα A.22</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.5S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	93
<b>Σχήμα A.23</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.5S .....	94
<b>Σχήμα A.24</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.5S .....	94
<b>Σχήμα A.25</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.5S.....	95
<b>Σχήμα A.26</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.6T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	96
<b>Σχήμα A.27</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.6T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	96
<b>Σχήμα A.28</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.6T .....	97
<b>Σχήμα A.29</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.6T .....	97
<b>Σχήμα A.30</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.6T.....	98
<b>Σχήμα A.31</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.7T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	99
<b>Σχήμα A.32</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.7T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	99
<b>Σχήμα A.33</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.7T .....	100
<b>Σχήμα A.34</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.7T .....	100
<b>Σχήμα A.35</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.7T.....	101
<b>Σχήμα A.36</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.8T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	102
<b>Σχήμα A.37</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.8T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	102
<b>Σχήμα A.38</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.8T .....	103

<b>Σχήμα A.39</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.8T .....	103
<b>Σχήμα A.40</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.8T.....	104
<b>Σχήμα A.41</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.9T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	105
<b>Σχήμα A.42</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.9T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	105
<b>Σχήμα A.43</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.9T .....	106
<b>Σχήμα A.44</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.9T .....	106
<b>Σχήμα A.45</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.9T.....	107
<b>Σχήμα A.46</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.10T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	108
<b>Σχήμα A.47</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.10T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	108
<b>Σχήμα A.48</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.10T .....	109
<b>Σχήμα A.49</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.10T .....	109
<b>Σχήμα A. 50</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.10T.....	110
<b>Σχήμα A. 51</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.11T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση.....	111
<b>Σχήμα A. 52</b> Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Expr.11T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση.....	111
<b>Σχήμα A. 53</b> Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.11T .....	112
<b>Σχήμα A. 54</b> Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.11T .....	112
<b>Σχήμα A. 55</b> Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.11T.....	113

## **ΠΙΝΑΚΕΣ**

<b>Πίνακας 2.1</b> Συνοπτική παρουσίαση προτεινόμενων παραμέτρων για κυκλικό πλούμιο .....	11
<b>Πίνακας 3.1</b> Μετρήσεις και υπολογισμοί βαθμονόμησης παροχομέτρου .....	41
<b>Πίνακας 3. 2</b> Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με διαφορά αλατότητας.....	47
<b>Πίνακας 3. 3</b> Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με θερμοκρασιακή διαφορά .....	47
<b>Πίνακας 4.1</b> Παρουσίαση προτεινόμενων παραμέτρων για κυκλικά πλούμια.....	75

## ΣΥΜΒΟΛΑ

### Λατινικά Σύμβολα

A	εμβαδόν διατομής στομίου εκροής
$b_w$	πλάτος κατανομής μέσης χρονικά ταχύτητας
$b_c$	πλάτος κατανομής μέσης χρονικά συγκέντρωσης
B	Αρχική άνωση
$C_o$	αρχική συγκέντρωση στη φλέβα
$C_M$	(μέση χρονικά) συγκέντρωση στον άξονα της φλέβας
$C_{RMS}$	RMS τιμή των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης
D	διάμετρος ακροφυσίου παροχέτευσης φλέβας
$F_o$	αρχικός πυκνομετρικός αριθμός Froude
g	επιτάχυνση της βαρύτητας
$g_o'$	αρχική φαινόμενη επιτάχυνση της βαρύτητας
$l_M$	χαρακτηριστικό μήκος ανωστικής φλέβας
$l_Q$	χαρακτηριστικό μήκος απλής φλέβας
M	αρχική ειδική ορμή
m	τοπική ειδική ορμή
Q	αρχική παροχή
r	ακτινική απόσταση σε κυλινδρικό σύστημα συντεταγμένων
Re	αριθμός Reynolds
$R_i$	αριθμός Richardson
RMS	τετραγωνική ρίζα μέσης τιμής των τετραγώνων των διακυμάνσεων



S	ελάχιστη αραίωση
t	χρόνος
U	αρχική ταχύτητα φλέβας στην εκροή
u	ταχύτητα κατά τη διεύθυνση του άξονα της φλέβας
z	κατακόρυφος άξονας της φλέβας
s	αλατότητα (salinity)
$c_a$	συγκέντρωση Ροδαμίνης στον αποδέκτη πριν το πείραμα

### **Ελληνικά σύμβολα**

$v$	κινηματική συνεκτικότητα
$\mu$	τοπική ογκομετρική παροχή
$\rho$	πυκνότητα υγρού
$\rho_o$	αρχική πυκνότητα φλέβας
$\rho_a$	πυκνότητα αποδέκτη
$\Delta\rho$	πυκνομετρική διαφορά

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 ΓΕΝΙΚΑ

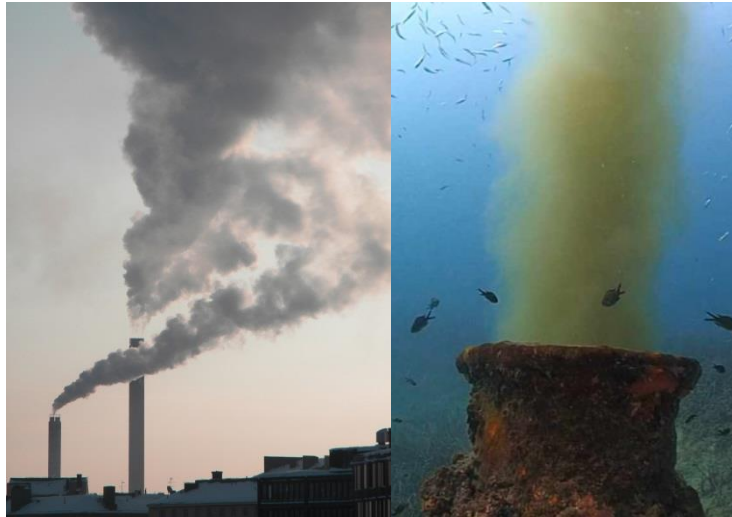
Οι τυρβώδεις ανωστικές φλέβες, την μελέτη των οποίων πραγματεύεται η παρούσα εργασία, εμφανίζονται με ποικίλους τρόπους, είτε τεχνητά ως αποτέλεσμα ανθρώπινων δραστηριοτήτων, είτε στην φύση μέσα από γεωλογικές και άλλες φυσικές διεργασίες (Παπανικολάου, 2017). Για το λόγο αυτό η μελέτη της ροής τους, έχει αποτελέσει εδώ και δεκαετίες αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής έρευνας.

Αρχικά, από τα τυπικότερα παραδείγματα τέτοιων ροών, ανθρώπινης προέλευσης, είναι τα αέρια απόβλητα των εργοστασίων που διαχέονται στην ατμόσφαιρα με την μορφή τυρβωδών ανωστικών φλεβών. Η σύσταση των αέριων λυμάτων, συχνά επιβαρυντική για τα γεινιάζοντα οικοσυστήματα, καθιστά αναγκαία τη διάθεσή τους με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη περιβαλλοντικών προβλημάτων. Για τον σκοπό αυτόν επιστρατεύεται ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων για την κατανόηση της ροής και την επίτευξη της βέλτιστης αραίωσης των αερολυμάτων.

Ένα ακόμα χαρακτηριστικό παράδειγμα ροής τυρβωδών ανωστικών φλεβών είναι η διάχυση των υγρών αποβλήτων σε υδάτινους αποδέκτες. Εξαιτίας της ευαισθησίας των υδάτινων οικοσυστημάτων σε εξωτερικές μεταβολές, όπως συσσώρευση οργανικού φορτίου ή αύξηση βακτηριδίων, είναι πρωτεύουσας σημασίας ο κατάλληλος σχεδιασμός αγωγών διάθεσης αποβλήτων. Ιδίως για τους αποδέκτες εκείνους όπου η μορφή τους δυσχεραίνει την γρήγορη ανανέωση των υδάτων τους, η εις βάθος γνώση της ροής των ανωστικών φλεβών, εξασφαλίζει την απαραίτητη αραίωση των ρυπογόνων φορτίων των λυμάτων και προστατεύει τα υδάτινα σώματα, αλλά και τα συσχετιζόμενα με αυτά, οικοσυστήματα.

Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται ροές αερολυμάτων και υγρών αποβλήτων. Διακρίνεται η δημιουργία στροβίλων και η αύξηση του μεγέθους τους καθώς απομακρύνονται από την πηγή από την οποία εκρέουν.

Σε δεύτερο επίπεδο, ως προς την φυσική τους προέλευση, τυρβώδεις ανωστικές φλέβες δύναται να παρατηρηθούν σε έντονα φυσικά φαινόμενα, όπως είναι οι πυρκαγιές ή οι ηφαιστειακές εκρήξεις (Σχήμα 1.2), επίγειες ή υποθαλάσσιες. Στις περιπτώσεις αυτές εξαιτίας των ιδιαίτερα αυξημένων θερμοκρασιών, τα αραιότερα αέρια ανεβαίνουν σε υψηλότερα στρώματα, δημιουργώντας ανωστικές ροές, και συχνά προκαλούν δέος εξαιτίας της έντασης και κλίμακας τους.



**Σχήμα 1.1** Διάθεση αποβλήτων και σχηματισμός τυρβωδών ανωστικών φλεβών (πηγές: <https://verdeyazul.diarioinformacion.com/la-depuracion-de-aguas-sigue-fracasando-en-espana.html>, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smoke\\_plume\\_from\\_chimney\\_of\\_power\\_plant.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Smoke_plume_from_chimney_of_power_plant.jpg))



(α)



(β)

**Σχήμα 1.2** (α): Έκρηξη του ηφαιστείου Κρακατόα 1883-Σχέδιο της εποχής, (β): Έκρηξη ηφαιστείου Hunga Tonga 2020 (πηγές: <https://en.wikipedia.org/wiki/Krakatoa>, <https://www.sciencenews.org/article/hunga-tonga-volcano-eruption-touched-space-lightning>)

## 1.2 ANTIKEIMENO ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την πειραματική μελέτη κατακόρυφων τυρβωδών ανωστικών φλέβων που εκρέουν από κυκλικό στόμιο σε ομογενή υδάτινο αποδέκτη (δεξαμενή με νερό), εστιάζοντας στην περιοχή ανάπτυξης του πλουμίου, όπου κυριαρχεί η επίδραση της άνωσης έναντι της ορμής. Αναλυτικότερα, πραγματοποιούνται 11 πειράματα στα οποία η απαιτούμενη πυκνομετρική διαφορά μεταξύ υγρού φλέβας και υγρού αποδέκτη επιτυγχάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της φλέβας ή με αύξηση της αλατότητας του περιβάλλοντος υγρού της δεξαμενής.

Τα πειράματα πραγματοποιούνται με την μέθοδο PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). Κατά την μέθοδο αυτή, προστίθεται ποσότητα φθορίζουσας ουσίας Ροδαμίνης 6G στο υγρό της φλέβας και στη συνέχεια επιτυγχάνεται η οπτικοποίηση της ροής μέσω διδιστατου “φύλλου” laser που τη διεγείρει οπότε εκπέμπει φως. Παράλληλα το κάθε πείραμα βιντεοσκοπείται για ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Η ένταση της ακτινοβολίας φθορισμού συσχετίζεται με την συγκέντρωση σε κάθε σημείο (Ferrier et al. 1993) οπότε προσδιορίζονται οι συγκεντρώσεις σε όλο το πεδίο της ροής.

Από κάθε πείραμα, για την περιοχή ανάπτυξης του πλουμίου, προσδιορίζεται η μορφή των κατανομών της μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης αδιαστατοποιημένης με τη μέγιστη συγκέντρωση στον άξονα της διατομής για πληθώρα διατομών, η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης, το ημιπλάτος της συγκέντρωσης καθώς και η μεταβολή του λόγου της συγκέντρωσης στον άξονα προς την αρχική συγκέντρωση στο στόμιο εκροής. Για το σύνολο των προαναφερθέντων, μορφώνονται τα σχετικά διαγράμματα όπου προστίθενται αποτελέσματα από κάθε πείραμα για βέλτιστη δυνατή εποπτεία.

## 1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η εργασία αποτελείται από 4 διαφορετικά Κεφάλαια και δύο Παραρτήματα. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία για το θέμα της εργασίας και την μορφή της. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο ορίζεται το θεωρητικό υπόβαθρο της ανωστικής φλέβας, πραγματοποιείται διαστατική ανάλυση και τίθενται τα ζητούμενα που χρήζουν πειραματικής διερεύνησης. Στο κεφάλαιο 3, περιγράφεται η πειραματική διάταξη, ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός καθώς και όλες οι προεργασίες για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Εν συνεχεία στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τυπικά αποτελέσματα από το σύνολο των πειραμάτων όπου και σχολιάζονται και συνοψίζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν. Τέλος στα παραρτήματα αναλύεται ο χρησιμοποιούμενος κώδικας προγραμματισμού για την επεξεργασία των βίντεο της ροής καθώς και διαγράμματα αποτελεσμάτων από όλα τα πειράματα.

## 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 2.1. ΟΡΙΣΜΟΙ

Με τον όρο απλή φλέβα (jet) αναφερόμαστε στην εκροή ρευστού από ένα στόμιο σε αποδέκτη με ρευστό της ίδιας πυκνότητας, όπου η ροή οφείλεται αποκλειστικά στην αρχική ορμή του εκρέοντος ρευστού. Αντιθέτως, πλούμιο (plume) ονομάζεται η ροή ρευστού χωρίς αρχική ορμή η οποία προκαλείται από πηγή άνωσης λόγω πυκνομετρικής διαφοράς του ρευστού σε σχέση με το περιβάλλον ρευστό. Στις περιπτώσεις στις οποίες η ροή χαρακτηρίζεται από διαφορά πυκνότητας καθώς και από αρχική ορμή (ποσότητα κίνησης) η ροή ονομάζεται ανωστική φλέβα (buoyant jet) και αποτελεί ευρύτερη κατηγορία δεδομένου ότι περιλαμβάνει τις προαναφερθείσες. (Fischer et al. 1979, Παπακωνσταντής 2009, Παπανικολάου 2017).

Η ρευστοδυναμική συμπεριφορά των φλεβών χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραγόντων οι σημαντικότεροι εκ των οποίων είναι (Παπακωνσταντής 2009, Παπανικολάου 2017):

- I. Τα χαρακτηριστικά της φλέβας, όπως η αρχική ταχύτητα και η κατανομή αυτής στην εκροή, η ένταση της τύρβης και η διαφορά πυκνότητας μεταξύ αποδέκτη και ρέοντος ρευστού.
- II. Οι παράμετροι του περιβάλλοντος ρευστού, όπως η ομοιογένεια ή ύπαρξη πυκνομετρικής στρωμάτωσης εξαιτίας της μεταβολής της αλατότητας και της θερμοκρασίας και η κίνηση ή όχι του αποδέκτη
- III. Οι γεωμετρικοί παράγοντες, όπως το σχήμα της φλέβας (αξονοσυμμετρική ή διδιάστατη ροή), η γωνία παροχέτευσης της ως προς το οριζόντιο επίπεδο, η εγγύτητα με τα γειτνιάζοντα στερεά όρια, την ελεύθερη επιφάνεια του αποδέκτη ή άλλες φλέβες.

Σημειώνεται ότι η ροή των φλεβών γενικά είναι είτε στρωτή (laminar flow) είτε τυρβώδης (turbulent flow) βάσει του αριθμού Reynolds Re για τον οποίο ισχύει:

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (2.1)$$

όπου U η ταχύτητα στην εκροή, D η διάμετρος του στομίου εκροής και  $\nu$  η κινηματική συνεκτικότητα (κινηματικό ιξώδες) του ρευστού της εκροής. Για τιμές  $Re > 2000$  η ροή μεταβαίνει από στρωτή σε τυρβώδη κατάσταση (Fischer et al. 1979) και χαρακτηρίζεται από χρονική διακύμανση της ταχύτητας αλλά και της συγκέντρωσης πιθανής ουσίας (δείκτη) που δύναται να μεταφέρει η υπό μελέτη φλέβα (Παπακωνσταντής 2009). Εξαιτίας της μεγάλης συχνότητας εμφάνισης τυρβωδών ροών τόσο σε φυσικές όσο και τεχνητές φλέβες ρευστού, η πειραματική μελέτη εστιάζει σχεδόν αποκλειστικά στην ανάλυση αυτών έναντι στρωτών ροών.

Εν συνεχεία παρουσιάζεται μια γενική και χρήσιμη περιγραφή των σημαντικότερων παραμέτρων στη ρευστοδυναμική των ανωστικών φλεβών (Fischer et al. 1979):

- i. Η παροχή της φλέβας  $\rho\mu$  που αντιστοιχεί στην ποσότητα του ρευστού που διέρχεται από μια διατομή στη μονάδα του χρόνου δίνεται από τον τύπο :

$$\rho\mu = \int_A \rho w \, dA \quad (2.2)$$

όπου  $A$  είναι η επιφάνεια της διατομής της φλέβας,  $w$  η μέση χρονικά ταχύτητα του ρευστού κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και  $\mu$  ονομάζεται η ειδική ή ογκομετρική παροχή της φλέβας.

- ii. Η ορμή του ρευστού που αντιστοιχεί στην ποσότητα κίνησης που διέρχεται μέσα από μια διατομή στη μονάδα του χρόνου δίνεται από την σχέση :

$$\rho m = \int_A \rho w^2 \, dA \quad (2.3)$$

όπου κατά αντιστοιχία με προηγουμένως  $m$  ορίζεται η ειδική ορμή, δηλαδή η ορμή ανά μονάδα ρέοντος ρευστού.

- iii. Η άνωση του ρευστού δίνεται από την εξίσωση:

$$\rho\beta = \int_A g\Delta\rho w \, dA \quad (2.4)$$

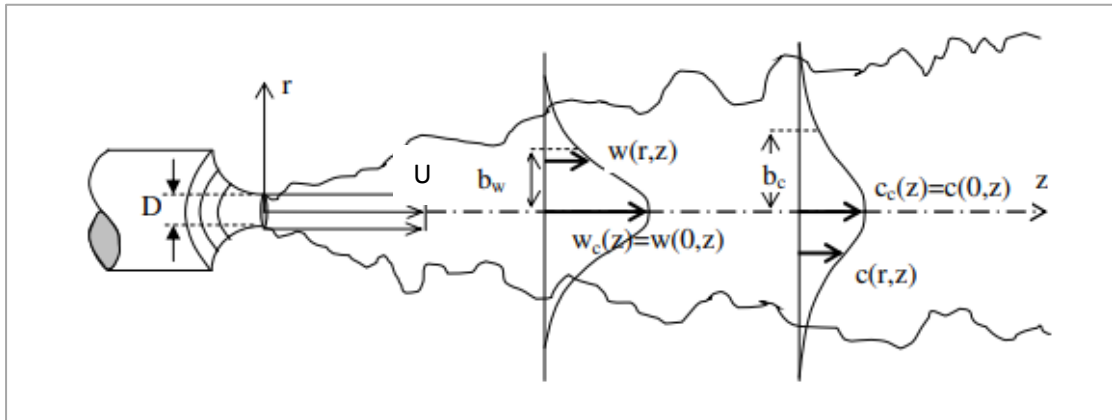
όπου  $\Delta\rho$  είναι η πυκνομετρική διαφορά του εισερχόμενου και του περιβάλλοντος ρευστού και  $\beta$  η ειδική άνωση κατά αναλογία των προηγούμενων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η μελέτη περιορίζεται στην ανάλυση της ροής κατακόρυφων τυρβωδών ανωστικών φλεβών σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη διαφορετικής πυκνότητας. Ειδικότερα το υγρό έχει αρχική ορμή στο στόμιο εκροής αλλά και άνωση που προκαλείται εξαιτίας της αυξημένης συγκέντρωσης άλατος στον αποδέκτη σε σχέση με το εισερχόμενο ρευστό. Αξίζει να σημειωθεί ότι θα πραγματοποιηθεί συνοπτική ανάλυση και των απλών φλεβών (jet) για την πληρέστερη παρουσίαση του αντικειμένου, παρόλο που η εργασία εστιάζει στο τμήμα της φλέβας όπου η ροή θα καθορίζεται πλέον μονάχα από την άνωση (συμπεριφορά πλουμίου) και όχι από την αρχική ταχύτητα εκροής της.

## 2.2 ΑΠΛΗ ΤΥΡΒΩΔΗΣ ΚΥΚΛΙΚΗ ΦΛΕΒΑ (JET)

Θεωρούμε τη ροή που δημιουργείται από την εκροή ρευστού με πυκνότητα  $\rho$  και παροχή  $Q$  από στόμιο κυκλικής διατομής με ομοιόμορφη ταχύτητα, σε ομογενή αποδέκτη ίδιας πυκνότητας  $\rho$ . Η ροή αυτή, που ονομάζεται απλή φλέβα, δεδομένου ότι έχει μόνο αρχική ορμή, αποτελεί την απλούστερη δυνατή περίπτωση αντίστοιχων ροών και έχει μελετηθεί διεξοδικά στη βιβλιογραφία. Στα Σχήματα 2.1 και 2.2

παρουσιάζεται η μορφή της και η ανάπτυξή της εντός του αποδέκτη, όπου η οπτικοποίηση της (flow visualization) επιτυγχάνεται μέσω της τεχνικής PLIF και θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.



**Σχήμα 2.1.** Τυρβώδης διάχυσης απλής φλέβας (Πηγή: Παπανικολάου, 2017)

Κατά την έξοδο από το στόμιο η αρχική ορμή της φλέβας είναι (Fischer et al. 1979, Παπανικολάου 2017):

$$\rho M = \rho Q U \quad (2.5)$$

όπου  $U$  είναι η μέση ταχύτητα του ρευστού κατά την εκροή. Ως  $Q$  ορίζεται η ογκομετρική παροχή του ρευστού (specific mass flux) κατά την εκροή από το στόμιο και είναι (Fischer et al. 1979, Παπανικολάου 2017):

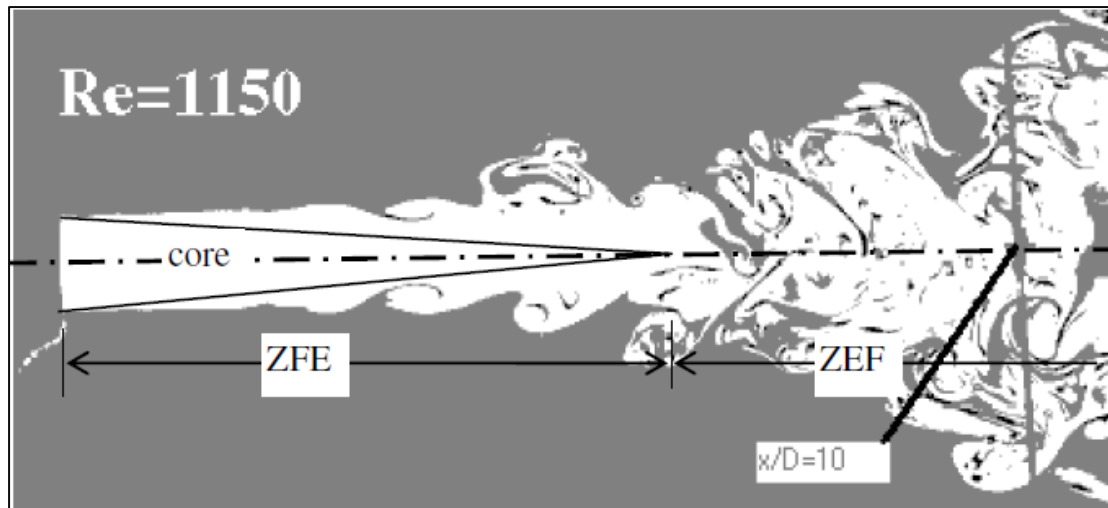
$$Q = AU \quad (2.6)$$

Ως  $M$  ορίζεται η κινηματική ή ειδική ορμή (specific momentum flux) που δίνεται από την σχέση:

$$M = QU \quad (2.7)$$

όπου  $A$  είναι η επιφάνεια της διατομής του στομίου. Στην παρούσα περίπτωση κυκλικής φλέβας διαμέτρου  $D$  η σχέση (2.6) γίνεται:

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} U \quad (2.8)$$



**Σχήμα 2.2** Οπτικοποίηση ροής απλής φλέβας με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (Πηγή: Παπανικολάου, 2017)

Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.2 η φλέβα εμφανίζει κοντά στο στόμιο ροή που ομοιάζει με στρωτή, ενώ από ένα σημείο και ύστερα παρουσιάζει δακτυλιοειδείς σχηματισμούς – στροβίλους (vortex rings) , εξαιτίας της επαφής της με το γειτνιάζον ρευστό (Παπανικολάου 2017). Στη συνέχεια η ροή γίνεται ακανόνιστη σε απόσταση που αντιστοιχεί σε 6 έως 10 διαμέτρους  $D$  από το ακροφύσιο. Η περιοχή από  $0 < z/D < 10$  ονομάζεται ζώνη ανάπτυξης της ροής (Zone of Flow Establishment- Z.F.E.) και χαρακτηρίζεται από περίπου ομοιόμορφη κατανομή της ταχύτητας ( top – hat) κάτι που φαίνεται και στο Σχήμα 2.1. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 10 διαμέτρων η ροή είναι πλήρως τυρβώδης και η περιοχή ονομάζεται ζώνη πλήρως ανεπτυγμένης ροής (Zone of Established Flow- Z.E.F.) (Fischer et al. 1979, Παπανικολάου 2017). Σημειώνεται πως εντός της ζώνης ανάπτυξης της ροής υφίσταται περιοχή που ονομάζεται πυρήνας (core), είναι κωνικού σχήματος και εντός αυτού η ταχύτητα και η συγκέντρωση πιθανής μεταφερόμενης ουσίας παραμένουν σταθερές και ίσες με τις αντίστοιχες αρχικές κατά την εκροή. Για αριθμούς Reynolds  $> 2000$  έχει βρεθεί ότι ο πυρήνας εκτείνεται σε μια από απόσταση 6 διαμέτρων περίπου από την έξοδο της φλέβας.

Στη ζώνη ανεπτυγμένης ροής (Zone of Established Flow), για  $z > 10 D$  όπου  $z$  η κατακόρυφη απόσταση από το ακροφύσιο, παρατηρείται αυτοομοιότητα στα προφίλ των κατανομών των ταχυτήτων και των συγκεντρώσεων δηλαδή σε κάθε πιθανή διατομή η μέση ταχύτητα και η συγκέντρωση δύναται να εκφραστούν βάσει μιας μέγιστης τιμής (μετρημένης στο άξονα της φλέβας) και μιας ποσότητας μήκους (Fischer et al. 1979, Παπανικολάου 2017). Ως εκ τούτου προκύπτει ότι η ταχύτητα και η συγκέντρωση εκφράζεται ως:

$$w = w_m f(z, r) \quad (2.9)$$



$$C = C_M f(z, r) \quad (2.10)$$

όπου  $w_m$  και  $C_M$  οι μέγιστες τιμές της ταχύτητας και της συγκέντρωσης αντίστοιχα στον άξονα σε κάποια θέση  $z$ ,  $r$  η ακτινική απόσταση ενός σημείου της διατομής από το σημείο τομής του επιπέδου της διατομής και του άξονα της φλέβας και  $f(z,r)$  μια συνάρτηση κατανομής με δεδομένο ότι  $f(z,0)=1$  (Παπανικολάου 2017). Από μετρήσεις έχει αποδειχθεί ότι η κατανομή είναι εκθετική της μορφής Gauss οπότε οι σχέσεις (2.9) και (2.10) γίνονται:

$$w = w_m \exp\left(-\frac{r^2}{b_w^2}\right) \quad (2.11)$$

$$C = C_M \exp\left(-\frac{r^2}{b_c^2}\right) \quad (2.12)$$

Στις εξισώσεις (2.11-2.12) έχουν εισαχθεί τα πλάτη της ταχύτητας και της συγκέντρωσης και απαιτείται να οριστούν. Ως πλάτος ονομάζουμε την ακτινική απόσταση κατά την οποία η τιμή της ταχύτητας και της συγκέντρωσης γίνεται 1/e της μέγιστης στον άξονα.

### 2.3 ΠΛΟΥΜΙΟ (PLUME) - ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΛΟΥΜΙΟΥ

Το πλούμιο καθίσταται ευκολότερο στην ανάλυση του εξαιτίας της απουσίας αρχικής ποσότητας κίνησης κατά την εκροή. Συνεπώς όλες οι μεταβλητές της ροής που θα προκύψουν θα είναι συναρτήσεις μονάχα της άνωσης, της απόστασης από την πηγή και του κινηματικού ιξώδους.

Στην εκροή – πηγή η εξίσωση (2.9) για την ειδική άνωση γίνεται (Παπανικολάου 2017):

$$B = \frac{(\rho_\alpha - \rho_o)}{\rho_\alpha} gQ = g'_o Q \quad (2.13)$$

διαστάσεων  $L^4/T^3$ , όπου  $\rho_\alpha$  είναι η πυκνότητα του ακίνητου αποδέκτη,  $\rho_o$  η αρχική πυκνότητα της φλέβας και  $g'_o$  είναι η φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας στην εκροή. Στις φλέβες θετικής άνωσης που εξετάζονται εδώ είναι  $\rho_o < \rho_\alpha$ .

Βασικό στάδιο στην μελέτη των ανωστικών φλεβών και στον καθορισμό των σχέσεων που διέπουν την συμπεριφορά τους αποτελεί η διαστατική ανάλυση (dimensional analysis). Χρησιμοποιώντας μόνο τις μεταβλητές που συμμετέχουν στην εξίσωση περιγραφής ενός φαινομένου και των διαστάσεων αυτών, είναι δυνατή η διαμόρφωση σχέσεων. Η διαστατική ανάλυση βασίζεται στην αρχή της ομοιογένειας των διαστάσεων μεταξύ των δύο μελών μιας εξίσωσης και μειώνει τον

όγκο των δεδομένων μέσω της κατάλληλης αδιαστατοποίησης αυτών αποτελώντας σημαντικό εργαλείο στην Πειραματική Υδραυλική. Εάν ένα φαινόμενο εξαρτάται από  $n$  μεταβλητές τότε μέσω της διαστατικής ανάλυσης οι μεταβλητές μπορούν να μειωθούν σε  $k$  αδιάστατες μεταβλητές μέσω της σχέσης  $n-k=m$ , όπου  $m$  ο αριθμός των βασικών διαστάσεων που διέπουν το πρόβλημα (Παπακωνσταντής 2009).

Οι βασικές διαστάσεις στην Υδραυλική είναι (Παπανικολάου 2017):

1. η μάζα ( $M$ ),
2. το μήκος ( $L$ ) και
3. ο χρόνος ( $T$ )

συνεπώς  $n=3$ . Οι μεταβλητές που υπεισέρχονται στη ροή πλουμίου και οι διαστάσεις αυτών είναι 7 και παρουσιάζονται εν συνεχεία (Παπανικολάου 2017):

- |                             |          |         |
|-----------------------------|----------|---------|
| 1. Ταχύτητα                 | $w$      | $L/T$   |
| 2. Παροχή                   | $Q$      | $L^3/T$ |
| 3. Κινηματικό Ιξώδες        | $\nu$    | $L^2/T$ |
| 4. Απόσταση                 | $z$      | $L$     |
| 5. Πυκνότητα αρχική         | $\rho_0$ | $M/L^3$ |
| 6. Πυκνότητα αποδέκτη       | $\rho_a$ | $M/L^3$ |
| 7. Επιτάχυνση της βαρύτητας | $g$      | $L/T^2$ |

Άρα σε πρώτο επίπεδο προκύπτουν 4 αδιάστατα μονώνυμα. Εντούτοις, καθώς η μελέτη του πλουμίου πραγματοποιείται σε μεγάλη απόσταση από την πηγή, η ροή καθίσταται τυρβώδης και το κινηματικό ιξώδες  $\nu$  δεν την επηρεάζει. Παράλληλα προκύπτει ότι η μάζα εντοπίζεται μονάχα στην πυκνότητα άρα ένα εκ των δύο αδιάστατων μονωνύμων θα είναι ο λόγος  $\rho_0/\rho_a$ . Συνεπώς συνδυάζοντας την σχέση της φαινομενικής βαρύτητας  $(\rho_a - \rho_0)g = (\Delta\rho)_0g$  με τον λόγο  $\rho_0/\rho_a$  προκύπτει το αδιάστατο μονώνυμο  $g_0' = (\Delta\rho)_0g / \rho_0$  που ονομάζεται φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας και οι βασικές διαστάσεις μειώνονται κατά μια. Αντικαθιστώντας την φαινομενική επιτάχυνση της βαρύτητας και την παροχή με την ειδική άνωση μέσα από την σχέση  $B=g_0'Q$  προκύπτει ότι οι μεταβλητές είναι 3: Η ταχύτητα  $w$ , το μήκος  $z$ , και η ειδική άνωση  $B$ . Άρα απομένουν 3 παράμετροι και 2 βασικές διαστάσεις συνεπώς προκύπτει 1 αδιάστατο μονώνυμο (Παπανικολάου 2017) :

$$\frac{w_m}{\frac{B}{z}} = b_1 \quad (2.14)$$

όπου  $b_1$  είναι σταθερά.

Στην απλή ανωστική φλέβα (πλούμιο) αποτελεί δεδομένο ότι η αρχική άνωση παραμένει σταθερή και ίση με  $B$  και η ορμή κατά μήκος της ροής μεταβάλλεται συνεχώς. Ισχύει ότι η ορμή καθορίζεται από την αρχική άνωση  $B$  και την απόσταση από την “πηγή”  $z$  και μέσω διαστατικής ανάλυσης προκύπτει ένα μονώνυμο της μορφής (Fischer et al. 1979, Παπανικολάου 2017):

$$m = b_2 B^{\frac{2}{3}} z^{\frac{4}{3}} \quad (2.15)$$

Ομοίως προκύπτει ότι η ογκομετρική παροχή σε ένα πλούμιο δίνεται από τη σχέση (Fischer et al. 1979):

$$\mu = b_3 B^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}} \quad (2.16)$$

όπου  $b_2, b_3$  είναι σταθερές.

Η σχέση δύναται να μορφοποιηθεί διαιρώντας με την τετραγωνική ρίζα της εξίσωσης (2.15) και προκύπτει :

$$\mu = c_p m^{\frac{1}{2}} z \quad (2.17)$$

όπου :

$$c_p = \frac{b_3}{b_2^{\frac{1}{2}}} \quad (2.18)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι βάσει της σχέσης (2.16) παρατηρείται ότι η ογκομετρική παροχή  $\mu$  στο πλούμιο αυξάνεται με τον όρο  $z^{5/3}$  ενώ στις απλές φλέβες αυξάνεται με τον όρο  $z$  (Fischer et al. 1979).

Αναφορικά με την χρονικά μέση (time-averaged) συγκέντρωση της ουσίας που δύναται να μεταφέρει η ροή, η σχέση περιγραφής της μείωσης της προκύπτει ως ακολούθως. Αν με  $Y$  συμβολίσουμε την παροχή μάζας της διαλυμένης ουσίας ίση με  $Y=QC_0$  όπου  $Q$  η αρχική ογκομετρική παροχή και  $C_0$  η συγκέντρωση στην πηγή, ισχύει ότι η μέγιστη συγκέντρωση  $C_m$  της ουσίας στον άξονα είναι συνάρτηση των παραμέτρων  $z, Y$  και  $B$  και συνεπώς προκύπτει το αδιάστατο μονόμετρο:

$$\frac{C_m}{Y} B^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}} = b_4 \quad (2.19)$$

Σημειώνεται πως στα πλούμια, η αδιαστατοποιημένη μορφή των κατανομών της μέσης ταχύτητας και συγκέντρωσης σε κατακόρυφη απόσταση  $z$  παρουσιάζει εκθετική μορφή τύπου Gauss και είναι :

$$\frac{w}{w_m} = e^{-\left(\frac{r}{b_w}\right)^2} \quad (2.20)$$

$$\frac{c}{c_M} = e^{-\left(\frac{r}{b_c}\right)^2} \quad (2.21)$$

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι σταθερές που προτείνουν οι Fischer et al. (1979) και οι Chen & Rodi (1980) οι οποίες προέκυψαν από ένα σύνολο έως τότε εργασιών καθώς και οι σταθερές που προτείνουν οι Papanicolaou & List (1987, 1988) και Wang & Law (2002).

Η μέση συγκέντρωση  $C_{av}$  ορίζεται ως :

$$\mu C_{av} = QC_0 = Y \quad (2.22)$$

Ο λόγος  $C_0/C_{av}$  ονομάζεται μέση αραίωση ενώ ο λόγος  $C_0/C_m$  ονομάζεται αραίωση στον άξονα ή ελάχιστη αραίωση. Συνδυάζοντας τις σχέσεις και προκύπτει ότι :

$$\frac{C_M}{C_{av}} = b_3 b_4 = 1.4 \quad (2.23)$$

Σημειώνεται ότι η ανωτέρω τιμή προτείνεται από τους Fischer et al. (1979) και διαφέρει ανάλογα με την εργασία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1.

Για τα πλάτη της συγκέντρωσης προκύπτει από διαστατική ανάλυση ότι είναι γραμμικές συναρτήσεις της ποσότητας  $(\frac{z}{l_M})$ :

$$\frac{b_w}{l_M} = b_5 \frac{z}{l_M} \quad (2.24)$$

$$\frac{b_c}{l_M} = b_6 \frac{z}{l_M} \quad (2.25)$$

**Πίνακας 2.1** Συνοπτική παρουσίαση προτεινόμενων παραμέτρων για κυκλικό πλούμιο

Παράμετροι	Fischer et al. (1979)	Chen & Rodi (1980)	Papanicolaou & List (1988)	Wang & Law (2002)
$b_w$	0,10 z	0,135 z	0,105 z	0,105z
$w_m$	$4,7(B/z)^{1/3}$	$3,79 (B/z)^{1/3}$	$3,85(B/z)^{1/3}$	$4,13(B/z)^{1/3}$
$\mu$	$0,15B^{1/3}z^{5/3}$		$0,14B^{1/3}z^{4/3}$	
$b_c$	0,12z	0,125z	0,112z	0,109z
$\frac{C_M}{C_0}$	$9,1 \frac{Q}{B^{1/3}z^{5/3}}$	$11 \frac{Q}{B^{1/3}z^{5/3}}$	$11,1 \frac{Q}{B^{1/3}z^{5/3}}$	$11,3 \frac{Q}{B^{1/3}z^{5/3}}$
$\frac{C_M}{C_{ave}}$	1,4		1,55	

## 2.4 ΑΝΩΣΤΙΚΕΣ ΦΛΕΒΕΣ (BUOYANT JETS) - ΔΙΑΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΩΣΤΙΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 2.1 με τον όρο ανωστική φλέβα ονομάζουμε τις ροές εκείνες που έχουν αρχική ορμή αλλά και άνωση παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά απλής φλέβας και πλουμίου και αποτελώντας ευρύτερη κατηγορία των προαναφερθέντων. Παρότι η ροή καθορίζεται τόσο από την πυκνομετρική διαφορά των ρευστών όσο και από την αρχική ταχύτητα, οι ανωστικές φλέβες σε κοντινή απόσταση από την πηγή παρουσιάζουν χαρακτηριστικά απλής φλέβας ενώ με την απομάκρυνση από αυτήν η ροή μετατρέπεται πάντα σε πλούμιο εάν οι γεωμετρικοί παράγοντες το επιτρέπουν. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το σύνολο των πειραμάτων που πραγματοποιούνται αφορούν αποκλειστικά ανωστικές φλέβες, εστιάζοντας στην περιοχή του πλουμίου, συνεπώς η θεωρητική κατανόησή τους καθίσταται ουσιώδης.

Δεδομένου ότι το σύνολο των πιθανών ανωστικών φλεβών είναι αρκετά μεγάλο η παρούσα θεωρητική και πειραματική ανάλυση θα περιοριστεί σε κατακόρυφες ανωστικές φλέβες κυκλικής διαμέτρου που παροχετεύονται προς τα πάνω σε αποδέκτη με ρευστό μεγαλύτερης πυκνότητας από το εισερχόμενο (φλέβες θετικής άνωσης). Στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζονται δύο ειδών φλέβες θετικής άνωσης: (α) φλέβες νερού διοχετευόμενες σε αλατόνερο και (β) φλέβες θερμού νερού διοχετευόμενες σε κρύο νερό.

Επιπρόσθετα πραγματοποιείται ένα σύνολο θεωρητικών υποθέσεων οι οποίες είναι (Παπανικολάου 2017):

- i. Το περιβάλλον ρευστό είναι ομοιόμορφης πυκνότητας  $\rho_a$  και ακίνητο
- ii. Η διαφορά μεταξύ της μέσης χρονικά πυκνότητας του ρέοντος ρευστού σε κάθε σημείο  $\rho(r,z)$  και της πυκνότητας του αποδέκτη  $\rho_a$  είναι αρκετά μικρή ώστε :

$$\frac{\rho_a - \rho(r,z)}{\rho_a} \ll 1 \quad (2.26)$$

Συνεπώς ισχύει ότι το σφάλμα που θα προκύψει από την αντικατάσταση της τοπικής πυκνότητας  $\rho(r,z)$  με την περιβάλλουσα πυκνότητα  $\rho_a$  στις εξισώσεις κίνησης θα είναι αρκετά μικρό (προσέγγιση Boussinesq).

- iii. Η ροή όπως προαναφέρθηκε είναι πλήρως τυρβώδης. Η ιξώδης και μοριακή μεταφορά θερμότητας ή οποιοδήποτε άλλου δείκτη μπορεί να αγνοηθεί συγκρινόμενη με την μεταφορά λόγω τύρβης.
- iv. Η πίεση υποτίθεται ότι είναι υδροστατική σε όλο το πεδίο.

Δεδομένου ότι η ροή στις ανωστικές φλέβες καθορίζεται από την παροχή, την ποσότητα κίνησης (ορμή) και την άνωση καθώς και την απόσταση από την πηγή, οι

παράμετροι που συμμετέχουν είναι Q, M, B και z αντίστοιχα. Μέσω της διαστατικής ανάλυσης προκύπτουν δύο ανεξάρτητα μονώνυμα (Fischer et al. 1979) :

$$\frac{z}{l_Q} = \frac{M^{\frac{1}{2}}z}{Q} \quad (2.27)$$

$$\frac{z}{l_M} = \frac{B^{\frac{1}{2}}z}{M^{\frac{3}{4}}} \quad (2.28)$$

όπου  $l_Q$  και  $l_M$  είναι κλίμακες μήκους και ισχύει :

$$l_Q = \frac{Q}{M^{\frac{1}{2}}} \quad (2.29)$$

$$l_M = \frac{M^{\frac{3}{4}}}{B^{\frac{1}{2}}} \quad (2.30)$$

Αναφορικά με την φυσική ερμηνεία των κλιμάκων μήκους  $l_Q$  και  $l_M$  αντίστοιχα (Wang & Law 2002, Παπακωνσταντής 2009) :

- i. Σε απόσταση από το σημείο εκροής ίση με  $l_Q$ , η παροχή από την συμπαράσυρση ρευστού του αποδέκτη είναι περίπου ίση με την αρχική παροχή από την πηγή Q. Κατά την μετάβαση σε αποστάσεις αρκετά μεγαλύτερες της κλίμακας μήκους  $l_Q$ , ( $z/l_Q \gg 1$ ) η αρχική παροχή καθίσταται πλέον αμελητέα σε σχέση με την παροχή συμπαράσυρσης και δύναται να παραληφθεί, ενώ σε πολύ μικρές αποστάσεις ( $z/l_Q \ll 1$ ) η αρχική παροχή και η γεωμετρία του στομίου εκροής διαδραματίζουν τον καθοριστικότερο ρόλο.
- ii. Σε αποστάσεις από το σημείο εκροής ίσες με  $l_M$  η ποσότητα κίνησης (ορμή) που δημιουργείται ισούται περίπου με την αρχική ποσότητα κίνησης στην πηγή M. Κατά την μετάβαση σε αποστάσεις πολύ μεγαλύτερες της κλίμακας μήκους  $l_M$  ( $z/l_M \gg 1$ ) ισχύει ότι η αρχική ποσότητα κίνησης κρίνεται αμελητέα συγκρινόμενη με την ορμή που προκαλείται εξαιτίας της άνωσης, συνεπώς δύναται να παραληφθεί. Αντίθετα σε πολύ μικρές αποστάσεις από την εκροή ( $z/l_M \ll 1$ ) προκύπτει ότι η αρχική ποσότητα κίνησης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική.

Συνεπώς ισχύει ότι κάθε εμφανιζόμενη μεταβλητή κατά την ανάλυση των ανωστικών φλεβών, ύστερα από κατάλληλη αδιαστατοποίηση, θα είναι συνάρτηση των μονωνύμων  $z/l_Q$  και  $z/l_M$ .

Θεωρώντας ροή με μηδενική αρχική παροχή προκύπτει ότι κάθε μεταβλητή θα είναι συνάρτηση των M, B, z. Άρα για την μέγιστη ταχύτητα στον άξονα  $w_m$  ισχύει (Fischer et al. 1979) :

$$w_m \frac{M^{\frac{1}{4}}}{B^{\frac{1}{2}}} = f\left(\frac{zB^{\frac{1}{2}}}{M^{\frac{3}{4}}}\right) \quad \text{όπου} \quad \frac{zB^{\frac{1}{2}}}{M^{\frac{3}{4}}} = \frac{z}{l_M} \quad (2.31)$$

Εντούτοις όταν  $B \rightarrow 0$ , ( $z \rightarrow 0, M \rightarrow \infty$ ) τότε η  $w_m$  είναι ανεξάρτητη της άνωσης άρα προκύπτει :

$$w_m \frac{M^{\frac{1}{4}}}{B^{\frac{1}{2}}} = c_1 \frac{M^{\frac{3}{4}}}{zB^{\frac{1}{2}}} \quad \text{για } z \ll l_M \quad (2.32)$$

Ομοίως :

$$w_m \frac{M^{\frac{1}{4}}}{B^{\frac{1}{2}}} = c_2 \left(\frac{M^{\frac{3}{4}}}{zB^{\frac{1}{2}}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{για } z \gg l_M \quad (2.33)$$

Εκ των ανωτέρω συνεπάγεται ότι η ροή συμπεριφέρεται ως απλή φλέβα για  $z \ll l_M$  και ως πλούμιο για  $z \gg l_M$ .

Ως προς τη κλίμακα  $l_Q$  σημειώνεται ότι για  $z \gg l_Q$  η ροή είναι πλήρως ανεπτυγμένη ενώ όταν  $z \sim l_Q$  τότε καθορίζεται ακόμη από την γεωμετρία εξόδου. Κατά συνέπεια αν  $l_M$  και  $l_Q$  είναι της ίδιας τάξης τότε η ροή θα είναι παρόμοια με πλούμιο αμέσως μετά την έξοδο. Ο λόγος  $l_Q/l_M$  ονομάζεται αριθμός Richardson και για μια κυκλική ανωστική φλέβα ισχύει ότι (Fischer et al. 1979) :

$$R_0 = \frac{l_Q}{l_M} = \frac{QB^{\frac{1}{2}}}{M^{\frac{5}{4}}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{g'_0 D}{U^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{F_0} \quad (2.34)$$

Όπου η παράμετρος  $F_0$  ονομάζεται πυκνομετρικός αριθμός Froude για τον οποίο για κυκλικές φλέβες ισχύει:

$$F_0 = \frac{U}{\sqrt{g'_0 D}} \quad (2.35)$$

Ως προς την ελάχιστη αραιώση ισχύει ότι (Kostsovinos 1978):

$$S_m(x) = 0,205 \left(\frac{z}{D}\right) \left[1 + 0,246 \left(\frac{z}{D}\right)^2 F_0^{-2}\right]^{\frac{1}{3}} \quad (2.36)$$

όπου  $F_0$  ο πυκνομετρικός αριθμός Froude,  $z$  η απόσταση από το στόμιο εκροής και  $D$  η διάμετρος του στομίου.

Ολοκληρώνοντας, σε μια ανωστική φλέβα γίνεται διάκριση 3 περιοχών συμπεριφοράς συναρτήσει της απόστασης  $z$  από την πηγή. Πιο συγκεκριμένα (Papanicolaou & List 1988, Lee & Chu 2003, Παπακωνσταντής 2017) ισχύει ότι για:

- i.  $\frac{z}{l_M} \leq 1 - 2 \rightarrow$  Η ροή φέρει χαρακτηριστικά απλής φλέβας
- ii.  $1 - 2 \leq \frac{z}{l_M} < 5 \rightarrow$  Η ροή φέρει χαρακτηριστικά ανωστικής φλέβας
- iii.  $\frac{z}{l_M} \geq 5 \rightarrow$  Η ροή φέρει χαρακτηριστικά πλουμίου

Σημειώνεται πως ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική διερεύνηση της περιοχής όπου η ροή συμπεριφέρεται ως πλούμιο δηλαδή σε αποστάσεις  $z \geq 5 l_M$ .

## 2.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Η μελέτη των απλών και ανωστικών φλεβών αποτελεί από τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα αντικείμενο αυξημένου ερευνητικού ενδιαφέροντος, ισχυρισμό στον οποίον συνηγορεί το εκτεταμένο σχετικό επιστημονικό υλικό, σε θεωρητικό, πειραματικό και υπολογιστικό επίπεδο. Η πρακτική σημασία της κατανόησης της ροής των φλεβών, με εφαρμογές σε πολλαπλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, όσο και η εγγενής επιστημονική έλξη που ασκεί η ερευνητική αναζήτηση των εξισώσεων που διέπουν την μορφή αντίστοιχων ελεύθερων διατμητικών ροών, έχουν οδηγήσει σε μια πληθώρα επιστημονικών εργασιών που επεκτείνουν διαρκώς τα όρια του γνωστικού αυτού αντικειμένου.

Κύριο ζητούμενο των περισσότερων εργασιών αποτέλεσε η πειραματική διερεύνηση της ροής των κατακόρυφων απλών φλεβών και εν συνεχεία των φλεβών θετικής άνωσης, όπου η συνισταμένη βάρους και άνωσης είναι ομόρροπη με την κατεύθυνση της ροής (Παπακωνσταντής 2009). Παράλληλα σημαντικές προσπάθειες για θεωρητική σύνοψη του αντικειμένου και των έως τότε πειραματικών εργασιών, έγιναν από τους Fischer et al. (1979), Chen & Rodi (1980) και Lee & Chu (2003). Στα βιβλία αυτά, πέρα από την μελέτη τυρβωδών κατακόρυφων ανωστικών φλεβών σε ακίνητο αποδέκτη, πραγματοποιείται ανάλυση πολλαπλών σχετικών ζητημάτων όπως η ροή φλεβών σε στρωματωμένο αποδέκτη ή σε αποδέκτη όπου διέρχεται εγκάρσια ροή.

Επιπρόσθετα, σημαντικό επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι φλέβες αρνητικής άνωσης όπου η συνισταμένη βάρους και άνωσης είναι αντίρροπη της ορμής της ροής. Αρχικά παρουσιάστηκαν πειραματικές εργασίες για κατακόρυφες φλέβες (π.χ. Turner 1966, McLellan & Randall 1986, Baines et al. 1990, Pantzloff & Lueptow 1999, Papanicolaou & Kokkalis 2008), ενώ σταδιακά το ενδιαφέρον επεκτάθηκε και σε φλέβες αρνητικής άνωσης διοχετευόμενες υπό γωνία (π.χ. Papanicolaou et al. 2008, Παπακωνσταντής 2009, Papakonstantis et al. 2011a,b, Papakonstantis & Tsatsara 2018, 2019, Papakonstantis & Christodoulou 2020, Papakonstantis & Mylonakou 2021, Papakonstantis & Papanicolaou 2022).



Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά μερικές από τις σημαντικότερες μελέτες σχετικά με την ροή των τυρβωδών φλεβών που χρήζουν αναφοράς εξαιτίας της σημασίας τους, του σχετικού τους αντικειμένου και της συνεισφορά τους στην περάτωση της παρούσας εργασίας.

Οι Kotsovinos & List (1977) παρουσίασαν αποτελέσματα πειραματικής διερεύνησης της διδιάστατης κατακόρυφης ανωστικής φλέβας για ένα ευρύ φάσμα αρχικών τιμών Richardson και μελέτησαν τους μηχανισμούς που διέπουν την ροή. Μέσα από τα πειράματα υπολογίστηκαν σε 1<sup>ο</sup> μέρος η ταχύτητα, η θερμοκρασία και η μέση τιμή αυτών και σε 2<sup>ο</sup> σκέλος και η τυπική απόκλιση αυτών, δηλαδή η ένταση της τύρβης.

Αναλυτικότερα, η πειραματική διάταξη περιλάμβανε την παραγωγή διδιάστατης φλέβας μέσα από την εκροή θερμού νερού σε τετραγωνική δεξαμενή διαστάσεων 4 m x 4 m πληρωμένη με νερό βάθους 1 m ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε διάταξη 6 θερμιστόρων ενώ ο υπολογισμός της ταχύτητας επετεύχθη μέσω της χρήσης LDV (Laser Doppler Velocimeter). Αρχικά, επιβεβαιώθηκε ότι η υπόθεση ότι ο συντελεστής συμπαράσυρσης είναι γραμμική συνάρτηση του αριθμού Richardson είναι λογική.

Σε δεύτερο επίπεδο, προέκυψε ότι έως και το 40% της μεταφοράς θερμότητας που υφίσταται στην ροή του πλουμίου προκύπτει εξαιτίας της έντασης της τύρβης και παράλληλα μέσα από τα πειράματα και τη μελέτη των μετρήσεων προέκυψε ότι η ένταση των διακυμάνσεων της θερμοκρασίας και της ταχύτητας αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού Richardson. Κλείνοντας, ο Kotsovinos (1977) προτείνει μια εξήγηση για την μορφή μεγάλων δομών, στροβίλων (large scale structures) που δημιουργούνται στο πλούμιο.

Στην πειραματική μελέτη των George et al. (1977), πραγματοποιήθηκε διερεύνηση της μορφής της ταχύτητας και της θερμοκρασίας σε αξονοσυμμετρική τυρβώδη θερμαινόμενη φλέβα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω κατάλληλου ανεμομέτρου. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία της πηγής ήταν 300 °C και η λήψη των μετρήσεων έγινε μέσω διπλού αισθητήρα.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων κατέδειξαν ένταση τυρβωδών διακυμάνσεων για την ταχύτητα και την θερμοκρασία με μέγιστα περίπου 0,25 και 0,4 αντίστοιχα ενώ το ημιπλάτος της θερμοκρασίας προέκυψε ίσο με  $b_c=0,125 z$

Οι Dimotakis et al. (1983), χρησιμοποιώντας την μέθοδο Laser Induced Fluorescence (LIF), διεξήγαγαν μια σειρά πειραμάτων με σκοπό την διερεύνηση της δομής και των δυναμικών συνθηκών της τυρβώδους φλέβας.

Πιο συγκεκριμένα, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με την δημιουργία τυρβώδους φλέβας από κυκλικό στόμιο διατηρώντας την ταχύτητα της εκροής σταθερή. Ως ουσία φθορισμού χρησιμοποιήθηκε η Ροδαμίνη Β ( Rhodamine B) χωρίς ωστόσο να αναφέρεται η ακριβής συγκέντρωση του διαλύματος που προέκυψε. Τα πειράματα

διεξήχθησαν για αριθμούς Reynolds έως 2500 και λήφθηκαν φωτογραφίες της ροής καθώς και βίντεο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Μέσα από την ανάλυση αυτών προέκυψε ότι σε μεγάλες αποστάσεις από την εκροή (far- field region) η ροή καθορίζεται από τις μεγάλες δομές- στροβίλους μεγάλης κλίμακας (large structures) οι οποίοι είναι κατά κύριο λόγο αξονοσυμμετρικοί. Επιπρόσθετα, η συμπαράσυρση και ανάμειξη του περιβάλλοντος ρευστού με το ρευστό της φλέβας προκύπτει να είναι στενά συνδεδεμένη με την κινηματική των δομών αυτών.

Στην εργασία των Noutsopoulos & Yannopoulos (1987) πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο πειραμάτων για τη διερεύνηση των κυκλικών κατακόρυφων τυρβωδών ανωστικών φλεβών, όπου το ρευστό της φλέβας ήταν νερό και το περιβάλλον ρευστό της δεξαμενής ήταν διάλυμα αλατόνευρο. Αναλυτικότερα, έγιναν μετρήσεις της αξονικής ταχύτητας και της αξονικής και ακτινικής συγκέντρωσης. Μέσα από τις πειραματικές μετρήσεις και την θεωρητική ανάλυση, προέκυψαν αναλυτικές εκφράσεις σχετικά με την αξονική ταχύτητα και την κατανομή της συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα της φλέβας.

Οι Papanicolaou & List (1987) πραγματοποίησαν μια σειρά πειραμάτων σε τυρβώδη αξονο-συμμετρική ανωστική φλέβα όπου μελετήθηκε η μεταβολή της θερμοκρασίας και η ένταση της τύρβης. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας μια σειρά θερμιστόρων και υπολογίζοντας τις τιμές των θερμοκρασιών, τα πειράματα εστίασαν στην περιοχή μετάβασης σε πλούμιο καθώς και σε πλήρως ανεπτυγμένο πλούμιο. Παρήχθησαν οι εγκάρσιες κατανομές της αδιάστατης θερμοκρασίας καθώς και οι κατανομές των τυρβωδών διακυμάνσεων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν συμφωνία με παλαιότερες μελέτες.

Στην μελέτη των Papanicolaou & List (1988) πραγματοποιήθηκαν πειραματικοί υπολογισμοί των συνιστωσών των ταχυτήτων και των συγκεντρώσεων στο πεδίο της ροής τυρβώδους ανωστικής φλέβας χρησιμοποιώντας τις τεχνικές Laser Induced Fluorescence (LIF) και Laser Doppler Velocimetry (LDV). Μέσα από τα πειράματα προέκυψαν εκτός των άλλων οι κατανομές των συγκεντρώσεων και των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης κατά μήκος της ροής και οι σταθερές αναλογίας στις σχέσεις που προκύπτουν από την διαστατική ανάλυση των ανωστικών φλεβών.

Αναλυτικότερα, η πειραματική διάταξη περιλάμβανε την παραγωγή τυρβώδους κατακόρυφης ανωστικής φλέβας αυξημένης αλατότητας μέσω κυκλικής διαμέτρου σε δεξαμενή βάθους 3,3 m και πλάτους 1,15 m καθώς και κατάλληλο εξοπλισμό μεταφοράς των συστημάτων LDV και PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) ώστε να επιτραπεί η τρισδιάστατη μετακίνηση των 4 ακτινών laser που χρησιμοποιήθηκαν. Η κατακόρυφη (αξονική) και η οριζόντια (ακτινική) ταχύτητα υπολογίστηκαν μέσω του συστήματος LDV ενώ οι συγκεντρώσεις με την χρήση της μεθόδου PLIF. Ως προς αυτήν, προστέθηκε Ροδαμίνη 6G ( Rhodamine 6G ) ως ουσία φθορισμού με συγκέντρωση στην πηγή ίση με 200 p.p.b. Παρά την αυξημένη τιμή

αυτής που δεν εντάσσεται στην γραμμική περιοχή συσχετισμού φωτεινότητας και συγκέντρωσης, σημειώνεται ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε αποστάσεις τέτοιες όπου είχε εξασφαλιστεί η απαιτούμενη αραίωση και οι συγκεντρώσεις βρισκόντουσαν εντός των επιθυμητών ορίων.

Ως προς τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι η τύρβη προερχόμενη από άνωση παρουσιάζεται να μεταφέρει σχεδόν διπλάσια ποσότητα δείκτη έναντι της τύρβης από την φλέβα. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης τα αποτελέσματα για το πλάτος ροής και την αραίωση της συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα, που συγκρίνονται με εκείνα προηγούμενων εργασιών και βιβλίων (Fischer et al., 1979, George et al., 1977). Ως προς την τύρβη στην περιοχή του πλουμίου, αυτή προκύπτει μεγαλύτερη από την απλή φλέβα και εμφανίζει κορυφή επί του άξονα. Η κεντρική τιμή είναι περίπου 0,4, μεγαλύτερη από τις τιμές 0,25-0,4 που πρότειναν οι George et al., εξαιτίας των μετρήσεων σε μη - πλήρως ανεπτυγμένη ροή.

Οι Pantzloff & Lueptow (1999) παρουσίασαν εργασία που πραγματεύεται την συμπεριφορά των φλεβών αρνητικής άνωσης σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Πιο συγκεκριμένα μελέτησαν τη μεταβολή του ύψους ανόδου για φλέβα που εκρέει από ακροφύσιο στη βάση κατακόρυφης κυλινδρικής δεξαμενής, σε υδάτινο αποδέκτη με ρευστό διαφορετικής πυκνότητας. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται με την χρήση μεθόδου PIV και μεταβάλλονται ανά πείραμα οι αρχικοί αριθμοί Reynolds καθώς και ο λόγος των συγκεντρώσεων των 2 ρευστών.

Από την διεξαγωγή της έρευνας προέκυψε ότι αναφορικά με τις φλέβες θετικής άνωσης, αυτές φθάνουν ως την ελεύθερη επιφάνεια, όπου το αραιότερο ρευστό στρωματώνεται σε επίπεδο πάνω από το περιβάλλον ρευστό της ροής.

Η εργασία των Wang & Law (2002) αποσκοπεί στην δημιουργία διαφορικού μοντέλου δεύτερης τάξης για κυκλικές τυρβώδεις ανωστικές φλέβες βασιζόμενη σε πειραματικά δεδομένα που παρήχθησαν. Αναλυτικότερα, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση των μέσων και τυρβωδών χαρακτηριστικών της ανωστικής ροής καλύπτοντας ένα πλήρες φάσμα από τις φλέβες έως τα πλούμια, κάνοντας χρήση συστημάτων DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) και PLIF.

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενή γυάλινη διαστάσεων 3 m x 1 m x 1 m, πληρωμένη με καθαρό νερό έως 0,9 m. Η παραγωγή της ανωστικής φλέβας αυξημένης αλατότητας προκύπτει από δεύτερη δεξαμενή σταθερής στάθμης, και εκρέει εντός της δεξαμενής αποδέκτη διαμέσου κυκλικού στομίου. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ρευστού διατηρείται σταθερή στους 25 °C περίπου ώστε να αποφευχθούν μεταβολές στην ένταση της ακτινοβολίας φθορισμού της Ροδαμίνης Β που επιλέχθηκε.

Ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα, αρχικά προέκυψε αυτό-ομοιότητα για αποστάσεις μεγαλύτερες των 25 διαμέτρων για την μέση συγκέντρωση και την ένταση της τύρβης. Οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης ακολουθούν με ακρίβεια την κατανομή τύπου Gauss. Για την σταθερά της εξίσωσης της αραίωσης της αξονικής

συγκέντρωσης όπως περιγράφεται στην σχέση (2.19) προτείνεται η τιμή 11,3 ενώ για την σταθερά της εξίσωσης (2.25) του πλάτους ροής προτείνεται η τιμή 0,109, αποτελέσματα που απέχουν ελαφρώς από τις έως τότε εργασίες. Αναφορικά με την τύρβη, η τιμή της μέγιστης έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης προέκυψε 0,42 της μέση αξονικής συγκέντρωσης, συμφωνώντας με προηγούμενα αποτελέσματα.

### 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

#### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η θεωρητική κατανόηση του υπό μελέτη αντικειμένου και η αποσαφήνιση του ζητήματος μέσω της διαστατικής ανάλυσης απαιτούν εν συνεχεία την διεξαγωγή κατάλληλων πειραμάτων με σκοπό την ανεύρεση των σταθερών εκείνων που τέθηκαν στο κεφάλαιο 2 αλλά και την κατάρτιση των διαγραμμάτων μεταβολής της έντασης τύρβης και της μέσης χρονικά συγκέντρωσης στη ροή. Τα πειράματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Εφαρμοσμένης Υδραυλικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

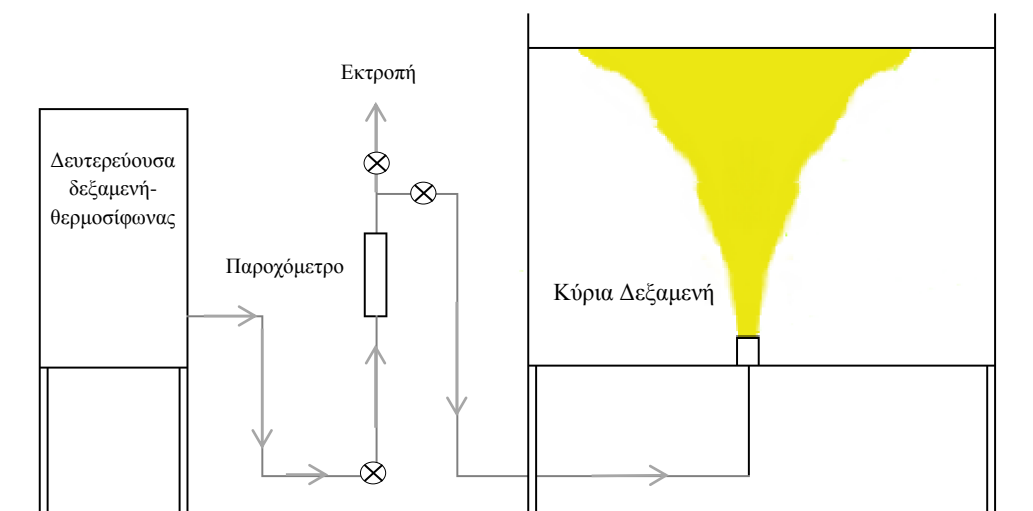
Όσον αφορά στην πειραματική διαδικασία, σε ειδική δεξαμενή-θερμοσίφωνα χωρητικότητας 40 l αποθηκεύεται γλυκό νερό και εν συνεχεία εντός αυτού εισάγεται κατάλληλη ποσότητα διαλύματος ροδαμίνης 6G για την επίτευξη τελικής συγκέντρωσης ροδαμίνης στο νερό εντός του θερμοσίφωνα 50 μg/L για τις απαιτήσεις της τεχνικής LIF. Παράλληλα η δεξαμενή διεξαγωγής των πειραμάτων που λειτουργεί ως αποδέκτης πληρώνεται με νερό και σε ορισμένα πειράματα διαλύεται κατάλληλη ποσότητα άλατος (NaCl) εντός της δεξαμενής (δημιουργία αλατόνευρο) προκειμένου να εξασφαλιστεί πυκνομετρική διαφορά μεταξύ αποδέκτη και διοχετευόμενου υγρού. Στα υπόλοιπα πειράματα η πυκνομετρική διαφορά δημιουργείται με την αύξηση της θερμοκρασίας (θέρμανση) του διοχετευόμενου υγρού. Ύστερα από την επίτευξη συνθηκών ηρεμίας στην δεξαμενή- αποδέκτη, μέσω κατάλληλου αεροσυμπιεστή, ο οποίος συνδέεται με τον θερμοσίφωνα, ρευστό από το θερμοσίφωνα μεταφέρεται στον αποδέκτη και διοχετεύεται μέσω κυκλικού στομίου. Ο έλεγχος της παροχής του διοχετευόμενου ρευστού επιτυγχάνεται με την βοήθεια παροχομέτρου και η παροχή διατηρείται σταθερή καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος.

Η ροδαμίνη αποτελεί χρωστική ουσία που προκαλεί φθορισμό και κατά συνέπεια ακτινοβολεί σε ορισμένη συχνότητα όταν τα μόρια της διεγερθούν καταλλήλως. Η διέγερση αυτή πραγματοποιείται με την χρήση Laser, το οποίο βρίσκεται πλησίον της δεξαμενής. Το Laser “χτυπά” το εισερχόμενο ρευστό, το οποίο εξαιτίας της παρουσίας ροδαμίνης που διεγείρεται ακτινοβολεί, επιτρέποντας τελικά την οπτικοποίηση της ροής εντός της δεξαμενής. Η προαναφερθείσα διαδικασία καταγράφεται από ειδική κάμερα υψηλής ανάλυσης και διαρκεί από 3 έως 5 min. Εν συνεχεία, το βίντεο του πειράματος αναλύεται σε κατάλληλο πρόγραμμα το οποίο βάσει της συσχέτισης έντασης ακτινοβολίας - συγκέντρωσης ροδαμίνης παράγει τα επιθυμητά αποτελέσματα.

## 3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων και ο τρόπος χρήσης του περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται η πειραματική διάταξη.

Σημειώνεται πως η διαδικασία του πειράματος αναλύεται λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο ύστερα από την διεξοδική περιγραφή και ανάλυση του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.



Σχήμα 3.1 Σχεδιάγραμμα πειραματικής διάταξης

### 3.2.1 ΚΥΡΙΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ -ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ

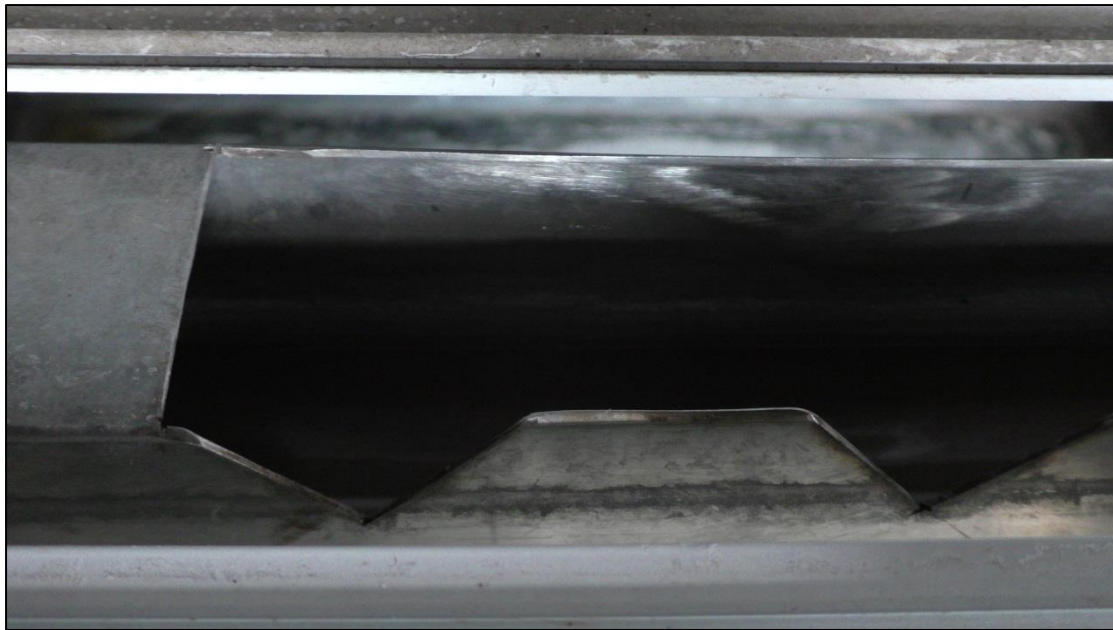
Η δεξαμενή διεξαγωγής των πειραμάτων έχει μεταλλικό σκελετό και οι πλευρές της είναι από Plexiglas και γυαλί. Είναι σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου διαστάσεων μήκους, πλάτους και ύψους 1,00 m-0,8m-0,7 m αντίστοιχα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Η δεξαμενή είναι στερεωμένη επί μεταλλικών στηριγμάτων πάνω από το δάπεδο του εργαστηρίου και το επίπεδο της βάσης της είναι οριζόντιο. Με σκοπό να αντέχει στις υδροστατικές πιέσεις το υλικό κατασκευής των τοιχωμάτων της δεξαμενής είναι από διάφανο Plexiglas πάχους 12,5 mm.



**Σχήμα 3.2.** Κύρια δεξαμενή-αποδέκτης.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2 όλες οι πλευρές της δεξαμενής εξαιρουμένης της εμπρόσθιας είναι καλυμμένες με κατάλληλο μαύρο χαρτόνι. Η κάλυψη αυτή πραγματοποιείται με σκοπό την αποφυγή αντανακλάσεων που θα επηρέαζαν τα αποτελέσματα του πειράματος. Επιπρόσθετα επί του αριστερού τμήματος της εικόνας, εσωτερικά της δεξαμενής διακρίνεται μεταλλικό εξάρτημα με 7 χαρακτηριστικές άκρες για την μέτρηση της θερμοκρασίας(θερμίστορες). Παρότι δεν χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη μελέτη, δεν αφαιρέθηκε για πρακτικούς λόγους, και λόγω της απόστασης του από το κέντρο της δεξαμενής η επιρροή του στην ροή κρίνεται αμελητέα.

Στο ανώτερο τμήμα της δεξαμενής βρίσκεται τοποθετημένος ειδικός μεταλλικός υπερχειλιστής για την συλλογή των υδάτων όταν αυτά υπερβαίνουν την ανώτατη στάθμη και την ελεγχόμενη μεταφορά τους εκτός δεξαμενής. Η μορφή του υπερχειλιστή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 που όπως φαίνεται είναι V-notch και αποτελείται από διαδοχικά V ίσων διαστάσεων και κανάλι περιμετρικά των τοιχωμάτων της δεξαμενής για την ροή της υπερχειλίσης.

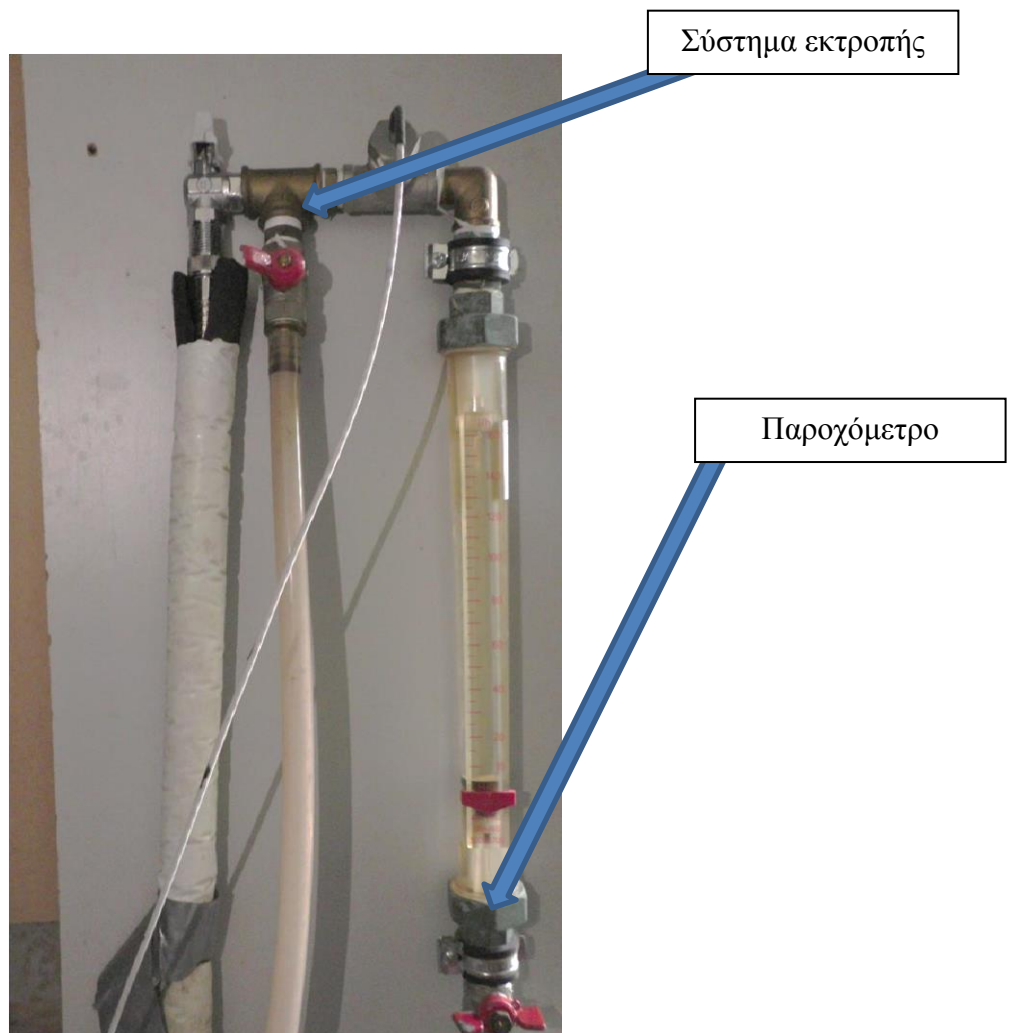


**Σχήμα 3.3.** Υπερχειλιστής τύπου V-notch

Στον πυθμένα της δεξαμενής, στο κέντρο, τοποθετείται ειδικό κατακόρυφο στόμιο από το οποίο διοχετεύεται η ανωστική φλέβα εντός της δεξαμενής- αποδέκτη και το οποίο δύναται να αφαιρεθεί και να αντικατασταθεί με άλλο διαφορετικής διαμέτρου. Για το σύνολο των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν, έγινε χρήση μόνο του κυκλικού στομίου διαμέτρου 1,5 cm. Ο λόγος γι' αυτό είναι πως δεδομένων των υπάρχουσών δυνατών παροχών, την συνήθη αλατότητα στην δεξαμενή, το μέγιστο δυνατό ύψος καθώς την απαίτηση ο αριθμός Reynolds να είναι μεγαλύτερος του 1000 στην εκροή, μονάχα η συγκεκριμένη διάμετρος δημιουργούσε επαρκές μήκος στην περιοχή του πλουμίου, εντός των ορίων της δεξαμενής, ώστε να επιτρέπεται η μελέτη του.

Εξωτερικά της δεξαμενής είναι τοποθετημένο παροχόμετρο με πλωτήρα (Σχήμα 3.4) για την ρύθμιση της παροχής της φλέβας. Επιπρόσθετα, το σύστημα τροφοδοσίας περιλαμβάνει και ειδική εκτροπή (bypass) ύστερα από το παροχόμετρο και πριν την είσοδο του ρευστού στην κύρια δεξαμενή, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4. Η λειτουργία του παροχομέτρου καθιστά δυνατή την επίτευξη της κατάλληλης παροχής πριν την έναρξη του πειράματος ενώ το σύστημα εκτροπής επιτρέπει την λήψη δείγματος ρευστού για την μέτρηση θερμοκρασίας, αλατότητας και πυκνότητας.





**Σχήμα 3.4.** Παροχόμετρο και σύστημα εκτροπής

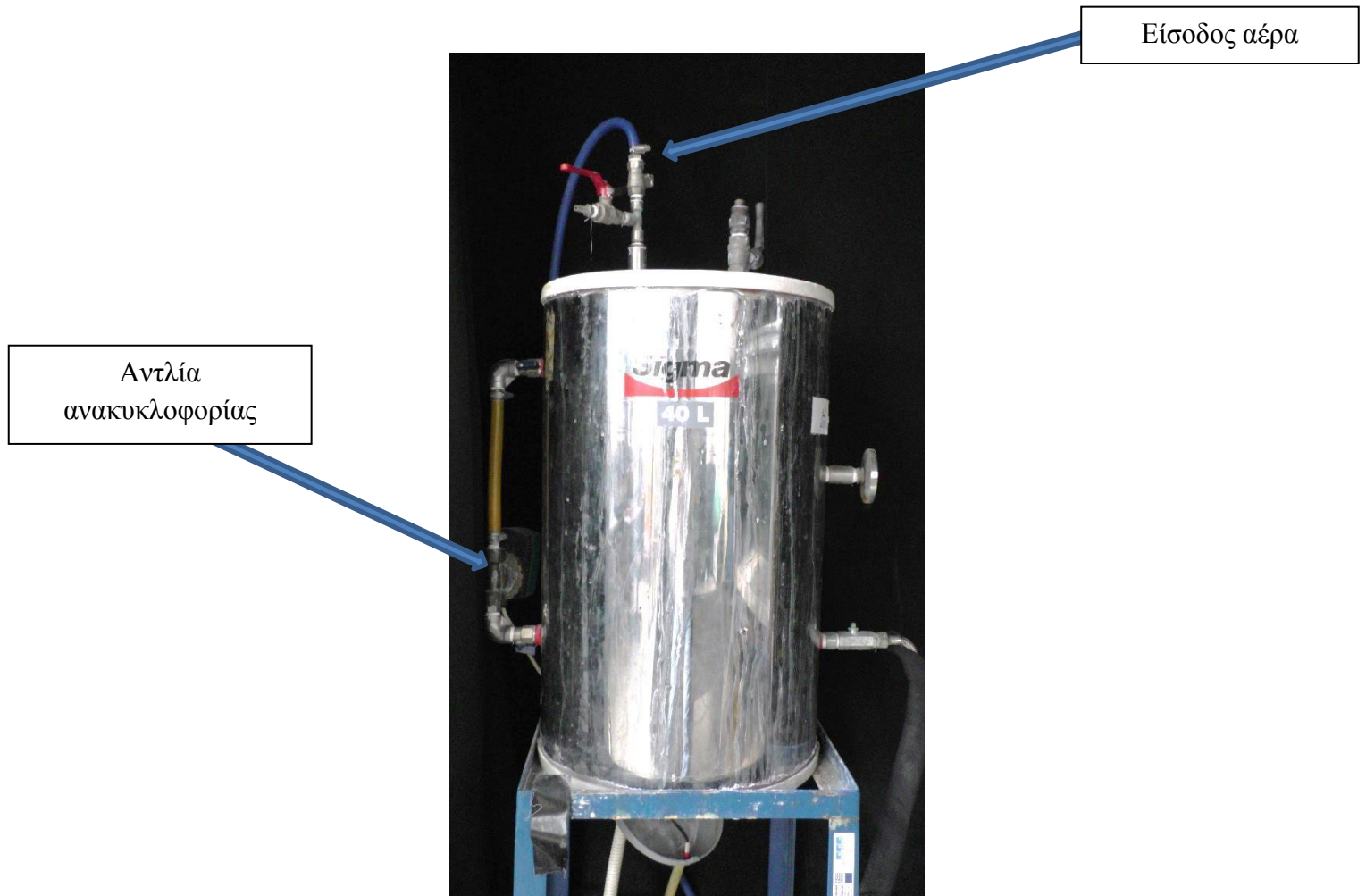
Τέλος σημειώνεται πως με την πλήρωση της δεξαμενής με νερό και την είσοδο της κατάλληλης ποσότητας άλατος ( $\text{NaCl}$ ), θειώδους νατρίου ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ -Κεφάλαιο 3.2.5.) και μικροποσότητας ροδαμίνης εντός του αποδέκτη, απαιτείται η ανάδευση του αλατόνευρου για την ομογενοποίηση του. Αυτό επιτυγχάνεται με την βοήθεια ειδικού μεταλλικού αναδευτήρα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.5



**Σχήμα 3.5.** Μηχανικός αναδευτήρας κύριας δεξαμενής

### **3.2.2 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΔΕΞΑΜΕΝΗ-ΘΕΡΜΟΣΙΦΩΝΑΣ**

Πλησίον της δεξαμενής που περιέχει το περιβάλλον ρευστό υπάρχει ειδική δεξαμενή – θερμοσίφωνα, η οποία ως κύριο σκοπό έχει την προετοιμασία και αποθήκευση του ρευστού της φλέβας που θα διοχετευτεί στην κύρια δεξαμενή και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.6. Η δεξαμενή αυτή είναι κυλινδρικού σχήματος, μέγιστης χωρητικότητας 40 L και έχει τοποθετηθεί σε υπερυψωμένη από το δάπεδο βάση. Η δεξαμενή έχει σωλήνα ανακυκλοφορίας ο οποίος με την βοήθεια αντλίας αποσκοπεί στην ομογενοποίηση του υγρού της φλέβας. Στο άνω μέρος της κυλινδρικής δεξαμενής (θερμοσίφωνα) είναι κατασκευασμένα δύο ανοίγματα που ελέγχονται από κατάλληλες βάνες. Από το δεξί άνοιγμα που είναι μεγαλύτερης διατομής εισάγεται νερό για την πλήρωση της δεξαμενής, ενώ ταυτόχρονα από το αριστερό απομακρύνεται ο υφιστάμενος αέρας.



Σχήμα 3.6. Δευτερεύουσα δεξαμενή – θερμοσίφωνα

Παράλληλα, η δεξαμενή συνδέεται μέσω πλαστικού σωλήνα χρώματος μπλε που διακρίνεται στο άνω μέρος, με κατάλληλο αεροσυμπιεστή, τοποθετημένο επί γειτνιάζοντος δωματίου που απεικονίζεται στο σχήμα 3.7. Ο αεροσυμπιεστής αποσκοπεί στην αύξηση της πίεσης, εντός της δεξαμενής, μέχρι την τιμή των 2,5 atm ύστερα από την πλήρωση της με νερό ώστε να παρέχει νερό με σταθερή παροχή. Εξαιτίας απωλειών, όταν η τιμή της πίεσης μειωθεί, ο αεροσυμπιεστής λειτουργεί αυτόματα για την επαναφορά της στα επιθυμητά επίπεδα.



**Σχήμα 3.7.** Αεροσυμπιεστής

Στην κάτω βάση της κυλινδρικής δεξαμενής, εντός αυτής, υπάρχει κατάλληλη αντίσταση που θερμαίνεται (θερμοσίφωνα) και η λειτουργία της ελέγχεται από τον πίνακα ελέγχου που βρίσκεται πλησίον της δεξαμενής. Σημειώνεται ότι από τον πίνακα πραγματοποιείται έλεγχος τόσο του θερμοσίφωνα όσο και της αντλίας ανακυκλοφορίας. Για την μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας εντός του θερμοσίφωνα έχει τοποθετηθεί επί των τοιχωμάτων του θερμομέτρο, που όμως δεν είναι ακριβείας. Επιπρόσθετα με σκοπό την μεταφορά του υγρού από την δευτερεύουσα στην κύρια δεξαμενή, υπάρχει σωλήνας ο οποίος ξεκινά από την βάση της δεξαμενής- θερμοσίφωνα και καταλήγει στο στόμιο της κύριας δεξαμενής.

### **3.2.3. ΣΑΚΟΙ ΑΛΑΤΟΣ(NaCl)- ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΡΟΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ**

Δεδομένου ότι για την επίτευξη της πυκνομετρικής διαφοράς χρησιμοποιείται μαγειρικό αλάτι (NaCl) απαιτείται η συλλογή και χρήση αυτού. Εντός του εργαστηρίου υπήρχαν σακοί άλατος για τις ανάγκες σχετικών πειραμάτων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Εξαιτίας του χρόνου που μεσολάβησε από την αγορά έως την χρήση του, το αλάτι απορρόφησε υγρασία με αποτέλεσμα να σκληρύνει και να σχηματίσει μεγαλύτερα κομμάτια. Για το διαχωρισμό αυτών και τον θρυμματισμό τους έως την μορφή σκόνης χρησιμοποιήθηκε βαριοπούλα- σφύρα χειρός βάρους 1,5 Kg.(Σχήμα 3.9). Η συλλογή του άλατος σε μορφή σκόνης πραγματοποιήθηκε με την χρήση κοινού πλαστικού φαρασιού.



Σχήμα 3.8. Σάκοι άλατος (NaCl)



Σχήμα 3.9. Βαριοπούλα- σφύρα χειρός και φαράσι

#### 3.2.4 ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ, ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

Δεδομένου ότι στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιήθηκαν πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά αλλά και χρήση άλατος απαιτήθηκε κατάλληλος εξοπλισμός για την μέτρηση των ανάλογων μεγεθών.



**Σχήμα 3.10.** Ψηφιακό μετρητικό όργανο YSI30

Η καταγραφή της αλατότητας και της θερμοκρασίας του διαλύματος της φλέβας και του περιβάλλοντος ρευστού της δεξαμενής πραγματοποιήθηκε με το ψηφιακό μετρητικό όργανο YSI30 (Σχήμα 3.10) . Το συγκεκριμένο όργανο διαθέτει ειδικό αισθητήρα ο οποίος βυθίζεται εντός του υπό μελέτη υγρού και υπολογίζει την αλατότητα δηλαδή τη συγκέντρωση του άλατος σε ppt (parts per thousand) δηλαδή σε g/l ή kg/m<sup>3</sup> και την θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου (°C). Στα πειράματα η θερμοκρασία του ρευστού δεν ξεπέρασε ποτέ τους 50 °C τιμή που ικανοποιεί το εύρος τιμών που δύναται να μετρήσει το όργανο. Μέσα από την λήψη των τιμών των παραμέτρων αυτών δύναται ο έμμεσος υπολογισμός της πυκνότητας του υπό μελέτη ρευστού βάσει των σχέσεων (3.1-3.3) που διαμορφώθηκαν και αναλύονται στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής (Παπακωνσταντής, 2009). Πιο συγκεκριμένα αρχικά υπολογίζεται η πυκνότητα του καθαρού νερού δίχως την ύπαρξη άλατος βάσει της θερμοκρασίας T με την σχέση των (Streeter et al. 1998) :

$$\rho_w(T) = 999,9399 + \frac{4,216485}{10^2} T - \frac{7,097451}{10^3} T^2 + \frac{3,509571}{10^5} T^3 - \frac{9,9037785}{10^8} T^4 \quad (3.1)$$

Εν συνεχεία χρησιμοποιείται ο υπολογισμός της πυκνότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας T σε °C και της αλατότητας s σε ppt όπου προκύπτει :

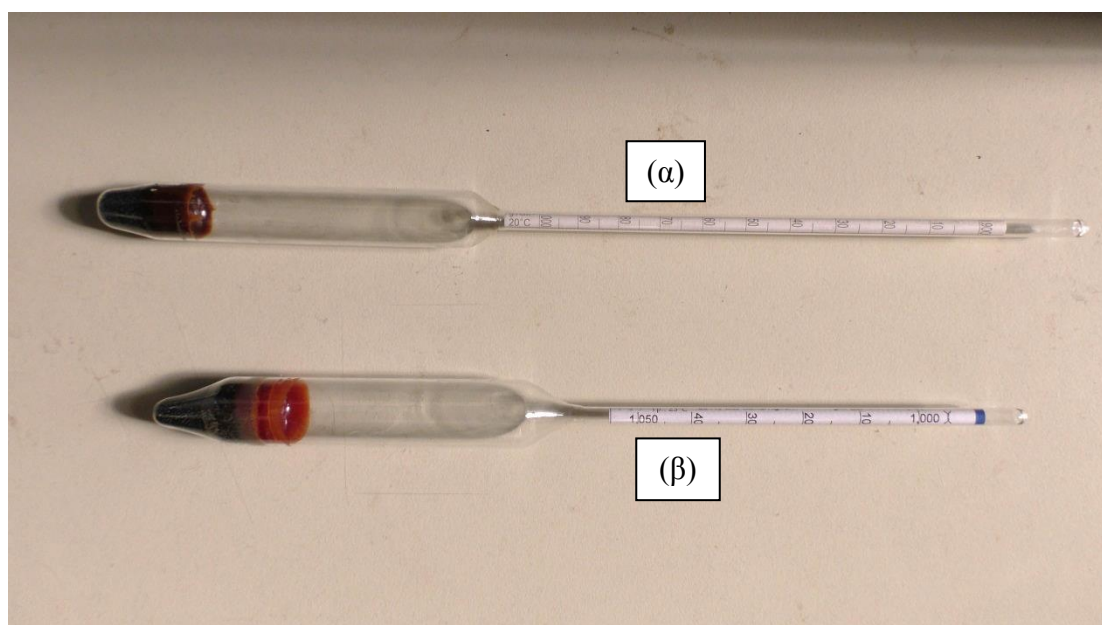
$$\begin{aligned} \rho_s(S, T) = & \rho_w(T) + s(0,824493 - \frac{0,40899}{10^3} T + \frac{7,6438}{10^5} T^2 - \frac{7,6438}{10^5} T^2 \\ & + \frac{8,2467}{10^7} T^3 - \frac{5,3875}{10^9} T^4 \\ & + s^2 \left( -\frac{5,72466}{10^3} + \frac{1,0227}{10^4} T - \frac{1,6526}{10^6} T^2 \right) + s^2 \frac{4,8314}{10^4} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Τέλος, δεδομένου ότι η σχέση (3.2) δίνει την πυκνότητα του θαλασσινού νερού το οποίο περιλαμβάνει περισσότερες διαλυμένες ουσίες συγκριτικά με το αλατόνερο η τελική τιμή της πυκνότητας  $\rho(s,T)$  προκύπτει ύστερα από κατάλληλη διόρθωση (Παπακωνσταντής, 2009) :

$$\Delta\rho(s) = 0,0398s$$

$$\rho = \rho_s(S, T) - \Delta\rho(s) \quad (3.3)$$

Η πυκνότητα του υγρού της φλέβας υπολογίζεται επίσης με την χρήση κατάλληλων πυκνομέτρων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.11. Πιο συγκεκριμένα για τα διαλύματα νερού δίχως αλάτι γίνεται χρήση του πυκνομέτρου (Σχ. 3.11α) που μετράει πυκνότητες έως  $1000 \text{ kg/m}^3$  και για το αλατόνερο χρησιμοποιείται το πυκνόμετρο του Σχήματος 3.11β με εύρος τιμών από  $1000 \text{ kg/m}^3$  έως  $1050 \text{ kg/m}^3$ .



**Σχήμα 3. 11.** Πυκνόμετρα

Στα περισσότερα πειράματα, οι τιμές των πυκνοτήτων που προέκυψαν από τις εξισώσεις (3.1)-(3.3) με βάση τις μετρήσεις του οργάνου YSI30 και τα πυκνόμετρα είχαν μικρή διαφορά. Ως εκ τούτου, αποφασίστηκε η λήψη της τιμής των πυκνομέτρων.

### **3.2.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΟΣ ΑΝΩΣΤΙΚΗΣ ΦΛΕΒΑΣ**

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για την οπτική καταγραφή της ροής ονομάζεται PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) και βασική προϋπόθεσή της είναι η έγχυση στο διάλυμα της φλέβας της ουσίας εκείνης που προκαλεί τον φθορισμό, στην συγκεκριμένη περίπτωση της Ροδαμίνης 6G. Φθορισμός ονομάζεται η έκλυση φωτός από μια ουσία ύστερα από την διέγερσή της με φως ή άλλη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Wiki:Fluorescence).

Η Ροδαμίνη 6G (Rhodamine 6G) με χημικό τύπο  $C_{28}H_{31}ClN_2O_3$  αποτελεί χρωστική ουσία της οικογένειας των ροδαμινών με υψηλή ικανότητα φθορισμού. Σε άυδρη μορφή φέρει χαρακτηριστικό κόκκινο χρώμα, ενώ είναι ιδιαίτερα τοξική συνεπώς απαιτείται η προσεκτική χρήση αυτής. Εξαιτίας του έντονου φθορισμού της (fluorescence) χρησιμοποιείται ευρέως σε τεχνικές ιχνοθέτησης όπως και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Η μέθοδος PLIF αναλύεται ενδελεχώς στην Ενότητα 3.2.7 ενώ στο Σχήμα 3.12 απεικονίζεται το δοχείο αποθήκευσης της άυδρης Ροδαμίνης που χρησιμοποιήθηκε για πειράματα.



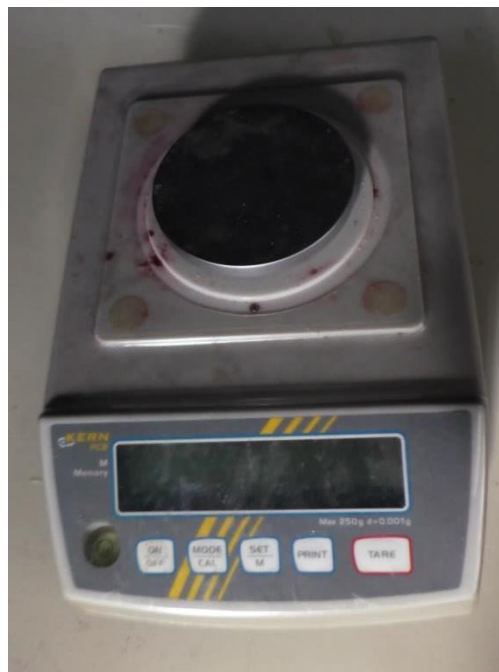
**Σχήμα 3.12.** Δοχείο αποθήκευσης άυδρης Ροδαμίνης-6G





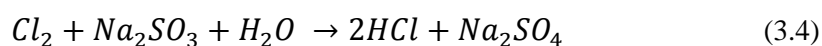
**Σχήμα 3.13.** Διάλυμα Ροδαμίνης-6G

Πιο συγκεκριμένα κατασκευάστηκε υδατικό διάλυμα ροδαμίνης συγκέντρωσης 1 g/L (Σχήμα 3.13) ζυγίζοντας 1 gr άνυδρης ροδαμίνης σε ειδική ζυγαριά που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14. Η ζυγαριά έχει ακρίβεια χιλιοστού καθιστώντας την ιδανική για μετρήσεις ακριβείας.



**Σχήμα 3.14.** Ζυγαριά ακριβείας

Το νερό περιείχε μικροποσότητες χλωρίου (free chlorine) το οποίο εξουδετερώνει την ροδαμίνη μειώνοντας έτσι την συγκέντρωσή της εντός του δοχείου. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού, πριν την τοποθέτηση σκόνης ροδαμίνης στο δοχείο όγκου 1 L, τοποθετήθηκε ποσότητα Θειώδους Νατρίου (άλας) ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) εντός του δοχείου του διαλύματος. Το Θειώδες Νάτριο, όντας άοσμη λευκή σκόνη, διαλύεται στο νερό και αντιδρά με το ελεύθερο χλώριο στο νερό παράγοντας Θειικό Νάτριο (άλας) και υδροχλώριο βάσει της εξίσωσης :



Δεδομένης της πολύ μικρής συγκέντρωσης ελεύθερου χλωρίου εντός του νερού (περίπου 4  $\mu\text{g/L}$ ) η ποσότητα θειώδους νατρίου που απαιτείται είναι ελάχιστη. Η τοποθέτηση του έγινε με κοινό πλαστικό κουτάλι και κατάλληλου μεγέθους χωνί (Σχήμα 3.15). Ύστερα από την τοποθέτησή του, απαιτήθηκε κατάλληλη ανάδευση ώστε να διαλυθεί και να επιτευχθεί ομοιομορφία. Η διαδικασία της ανάδευσης πραγματοποιήθηκε μέσω μαγνητικού αναδευτήρα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.16.



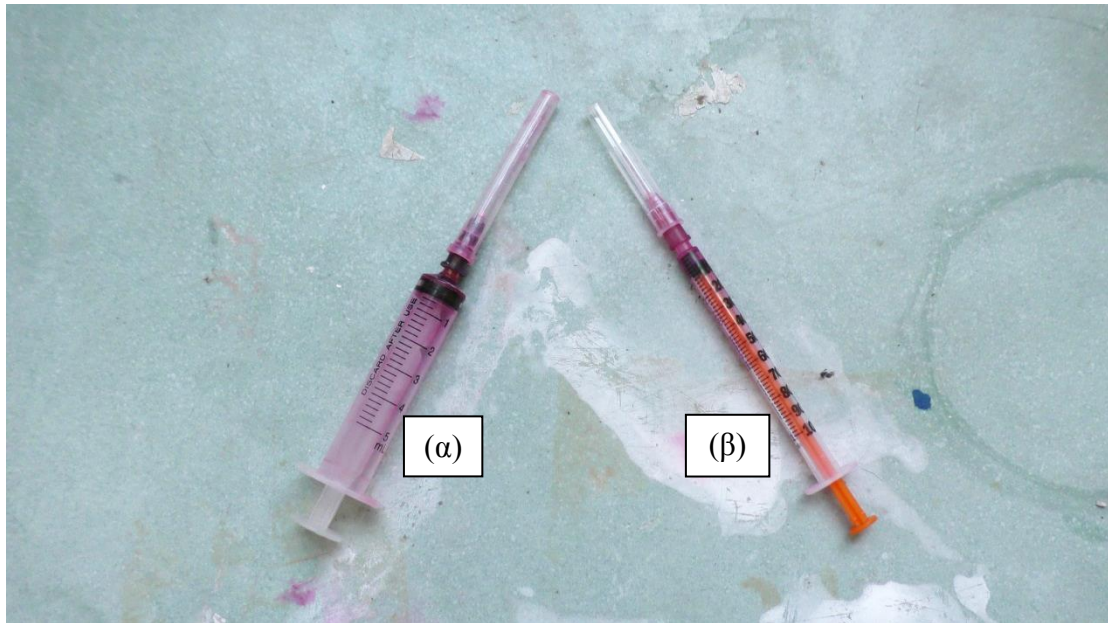
**Σχήμα 3.15.** Θειώδες Νάτριο άνυδρο και χωνί



**Σχήμα 3.16.** Μαγνητικός αναδευτήρας

Η ανάδευση συνεχίστηκε και αφού τοποθετήθηκε η ποσότητα της ροδαμίνης και ολοκληρώθηκε μετά από σύντομο χρονικό διάστημα. Το θειώδες νάτριο θα χρησιμοποιηθεί και εν συνεχεία για τον ίδιο σκοπό, εξουδετερώνοντας το ελεύθερο χλώριο στην δεξαμενή-θερμοσίφωνα καθώς και στην δεξαμενή αποδέκτη πριν την τοποθέτηση της ροδαμίνης.

Σημειώνεται ότι η συγκέντρωση του 1 g/L ροδαμίνης είναι ιδιαίτερα υψηλή και οι συγκεντρώσεις που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια είναι σημαντικά μικρότερες (π.χ. 50  $\mu\text{g/l}$ ). Το παραχθέν διάλυμα λειτουργεί ως ενδιάμεσο, με σκοπό την δημιουργία διαλυμάτων μικρότερων συγκεντρώσεων κατά το δοκούν. Η αφαίρεση ροδαμίνης και η τοποθέτηση της στις δύο δεξαμενές επιτυγχάνεται με την χρήση κατάλληλων πλαστικών συρίγγων διαφορετικού μέγιστου όγκου (5 ml και 1 ml αντίστοιχα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.17) ανάλογα με τον βαθμό της απαιτούμενης ακρίβειας στην συγκέντρωση (2ml και 0,05ml αντίστοιχα).



**Σχήμα 3.17** Σύριγγες λήψης Ροδαμίνης – 6G

Για την ανάδευση ύστερα από την τοποθέτηση της ροδαμίνης στις δεξαμενές καθώς και του θειώδους Νατρίου νωρίτερα χρησιμοποιείται ο προαναφερθέντας μηχανικός αναδευτήρας (Σχήμα 3.5). Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δεδομένο ότι καθώς το τοποθετούμενο άλας είναι περισσότερο από το απαιτούμενο για την διάλυση του χλωρίου, ένα μέρος του θα περισσέψει με αποτέλεσμα την αμελητέα αύξηση της πυκνότητας του διαλύματος σε βαθμό που δεν χρήζει αναφοράς.

### **3.2.6. ΚΑΜΕΡΑ, ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ ΒΙΝΤΕΟΣΚΟΠΗΣΗΣ**

Βασικό κομμάτι της μεθόδου PLIF, αποτελεί η βιντεοσκόπηση της ροής και στη συνέχεια η επεξεργασία των δεδομένων. Υπό το πρίσμα αυτό, χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα ειδική κάμερα και πιο συγκεκριμένα η κάμερα Panasonic HC-V770, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18.



**Σχήμα 3.18** Κάμερα Panasonic HC-V770

Η κάμερα τοποθετείται σε ειδικό τρίποδο (Σχήμα 3.19) μπροστά από την κύρια δεξαμενή, επί της ακάλυπτης πλευράς σε κατάλληλο ύψος. Η απόσταση τοποθέτησης καθορίζεται αποκλειστικά από την ανάγκη για πλήρη και όσο τον δυνατόν καλύτερη κάλυψη του πειράματος. Η κάμερα περιστρέφεται κατά 90° ως προς το οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία τοποθετείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στη δεξαμενή, καλύπτοντας όμως παράλληλα όλο το σημαντικό εύρος της ροής. Κατά αντίστοιχο τρόπο ρυθμίζεται και το ύψος τοποθέτησης με την πρόσθετη σημείωση ότι ως προς την ελευθερία κίνησης της κάμερας επί του κατακόρυφου επιπέδου, αυτή απαιτείται να “κλειδωθεί” σε οριζόντιο επίπεδο, με σκοπό την αποφυγή μεγάλων σφαλμάτων κατά τον υπολογισμό των μηκών στην μετέπειτα ανάλυση των αποτελεσμάτων.



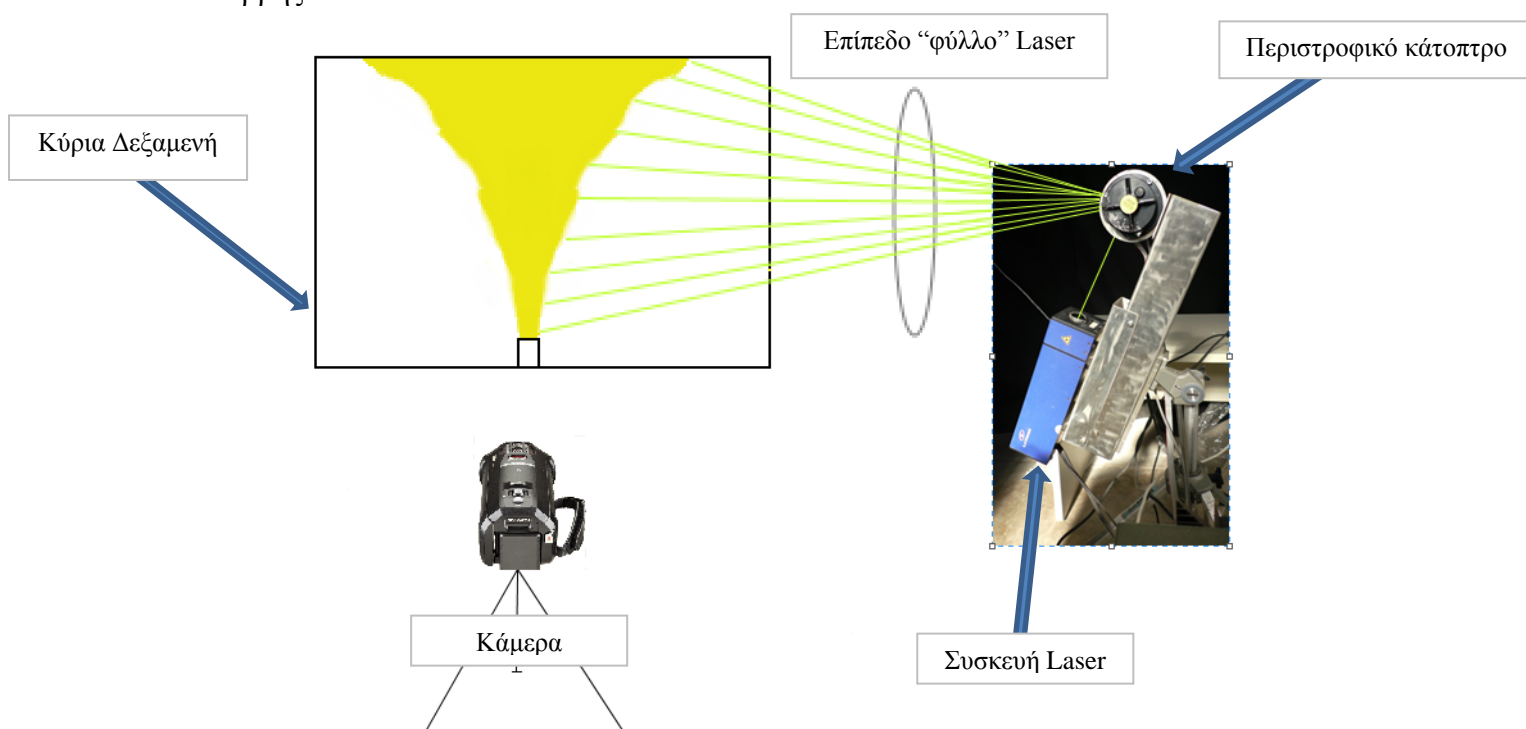
**Σχήμα 3.19.** Τρίποδο τοποθέτησης κάμερας

Αναφορικά με τις ρυθμίσεις της κάμερας ισχύουν τα ακόλουθα. Αρχικά, βασική προϋπόθεση για την ορθότερη βιντεοσκόπηση του πειράματος καθίσταται η απενεργοποίηση της αυτόματης λειτουργίας (Intelligent Auto Mode) και η χρήση της κάμερας στο Manual Mode. Ως προς την ταχύτητα του κλείστρου (shutter speed) αυτή τίθεται στη τιμή του 1/100 που είναι επαρκής και βολικότερη για τα πλαίσια του παρόντος πειράματος. Το άνοιγμα του διαφράγματος (Iris) δεν είναι καθοριστικό και τίθεται ίσο με 18dB(Open). Παρότι καθορίζει την ένταση του φωτός στο βίντεο, είναι η αναλογία μεταξύ των εντάσεων της ακτινοβολίας για κάθε pixel που έχει σημασία και αυτή, για συγκεκριμένη τιμή ανοίγματος διαφράγματος, παραμένει σταθερή. Αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση του Manual Mode για την βιντεοσκόπηση των πειραμάτων είναι καθοριστικής σημασίας. Στην λειτουργία Auto Mode το σύνολο

των προαναφερθέντων τιμών όπως η ταχύτητα του κλείστρου και το άνοιγμα του διαφράγματος αλλάζουν συνεχώς με σκοπό την επίτευξη ιδανικών, κατά τον κατασκευαστή, συνθηκών λήψης. Αυτό όμως στα πλαίσια της παρούσας μελέτης δεν ενδείκνυται καθώς προτιμάται η χρήση σταθερών παραμέτρων για καλύτερο έλεγχο των πειραμάτων.

### 3.2.7 ΣΥΣΤΗΜΑ PLIF (PLANAR LASER INDUCED FLUORESCENCE)

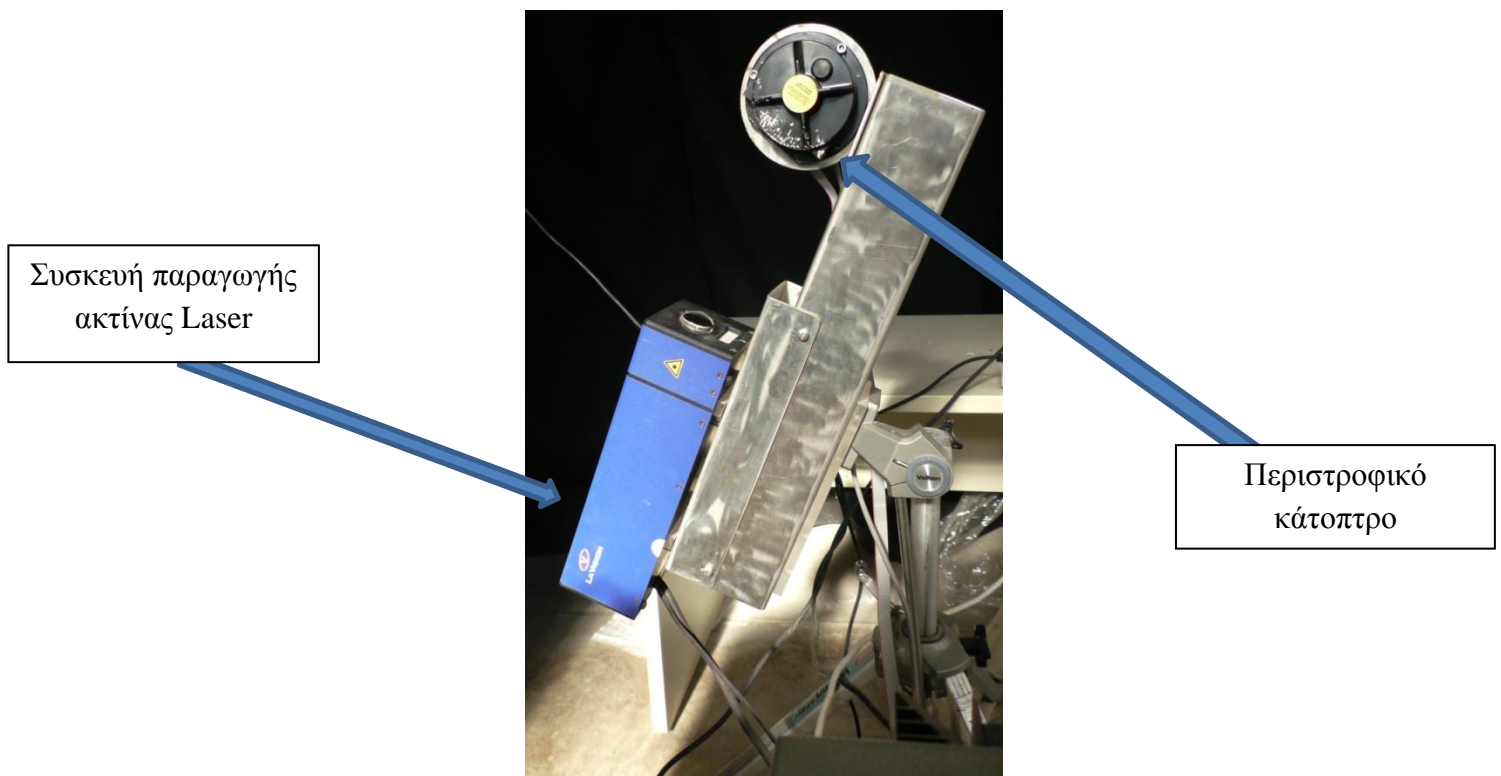
Δεδομένου ότι η παρούσα εργασία αποσκοπεί στην μελέτη της μεταβολής της συγκέντρωσης στην μεταβατική περιοχή έναρξης της ροής του πλουμίου, απαιτείται η χρήση κατάλληλης μεθόδου για την επίτευξη του στόχου αυτού. Υπό το πρίσμα αυτό, τέθηκε σε εφαρμογή η τεχνική PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence). Πρόκειται για τεχνική οπτικοποίησης της ροής βασιζόμενη στο φθορισμό δείκτη εντός αυτής, που επάγεται από επίπεδο φύλλο ακτινοβολίας Laser. Η τεχνική επιτρέπει τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων της ουσίας καθώς και της έντασης της τύρβης σε επίπεδο .



**Σχήμα 3.20** Διάταξη δημιουργίας φύλλου laser με την τεχνική LIF

Μια τυπική διάταξη PLIF, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.20 περιλαμβάνει μια πηγή εκπομπής ακτινοβολίας τύπου Laser, μια σειρά κατόπτρων σε περιστροφή για την δημιουργία επίπεδου φύλλου καθώς και μια κάμερα για την καταγραφή του πειράματος. Αναλυτικότερα, μονοχρωματική ακτινοβολία Laser εκπέμπεται από την πηγή προς τα περιστρεφόμενα κάτοπτρα τα οποία αντανακλούν την ακτινοβολία σε ένα εύρος κατευθύνσεων δημιουργώντας έτσι ένα επίπεδο ακτινοβολίας και η συχνότητα περιστροφής αυτών είναι αρκετά μεγάλη ώστε το επίπεδο να είναι ενιαίο.

Το φύλλο Laser τέμνει την ροή και διεγείρει την ουσία δείκτη, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ροδαμίνη 6G. Στον φθορισμό η ουσία απορροφά ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος και αυτομάτως εκπέμπει ακτινοβολία μεγαλύτερου μήκους κύματος ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας συνήθως μετατρέπεται σε θερμική που όμως είναι αμελητέα και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Αναφορικά με την Ροδαμίνη 6G ισχύει ότι κατά την διέγερσή της με ακτινοβολία μήκους κύματος 532 nm(πράσινη) αυτή εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος 556 (κίτρινο) (Dimitriadis 2017) . Για μικρές συγκεντρώσεις της, που κυμαίνονται από 0 έως 50  $\mu\text{g/l}$  η σχέση έντασης ακτινοβολίας και συγκέντρωσης ροδαμίνης είναι γραμμική (Ferrier et al. 1993). Η εκροή του ρευστού κατά την διάρκεια του πειράματος καταγράφεται από την κάμερα και προκύπτουν οι εντάσεις φθορισμού στο πεδίο ροής. Δεδομένου ότι η συγκέντρωση της ουσίας είναι γνωστή και σταθερή στο στόμιο εκροής της φλέβας, επιτυγχάνεται τελικώς ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων σε όλο το επίπεδο.



**Σχήμα 3.21.** Σύστημα PLIF-Τρίποδο, συσκευή παραγωγής Laser, περιστροφικό κάτοπτρο

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η συσκευή εκπομπής ακτινοβολίας Laser που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.21. Είναι τύπου DPSS (Diode Pumped Solid State), εκπέμπει σταθερή ακτίνα ισχύος 1W και τοποθετείται σε ειδικό τρίποδο μαζί με τον μηχανισμό των περιστρεφόμενων κατόπτρων. Ο μηχανισμός αυτός αποτελείται από ένα πολυγωνικό περιστρεφόμενο κάτοπτρο 24 εδρών το οποίο έχει συχνότητα περιστροφής 20kHz. Η μεγάλη αυτή συχνότητα καθίσταται απαραίτητη για την δημιουργία επιπέδου φύλλου Laser δεδομένου και του

πολύ μικρού χρόνου λήψης των frames από την κάμερα (1/50 s το 1 frame). Η λειτουργία των δύο μηχανισμών επιτυγχάνεται μέσω 2 τροφοδοτικών (Σχήμα 3.22).



Σχήμα 3.22 Τροφοδοτικά Laser και περιστροφικού κατόπτρου

Η τοποθέτηση του τριπόδου γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το επίπεδο ακτινοβολίας Laser που θα δημιουργηθεί Σχήμα 3.20 να είναι κάθετο ως προς το οριζόντιο επίπεδο, παράλληλο ως προς την πλευρά όπου βιντεοσκοπείται η ροή και ταυτόχρονα να διέρχεται από το κέντρο του επιστομίου για την ορθότερη λήψη των αποτελεσμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ένταση της ακτινοβολίας του χρησιμοποιούμενου Laser είναι σημαντική και κατά συνέπεια επικίνδυνη για τα μάτια. Για την ασφαλέστερη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν ειδικά γυαλιά απορρόφησης ακτινοβολίας (Σχήμα 3.23) προστατεύοντας τα μάτια από την ακτίνα αλλά και πιθανές αντανακλάσεις.



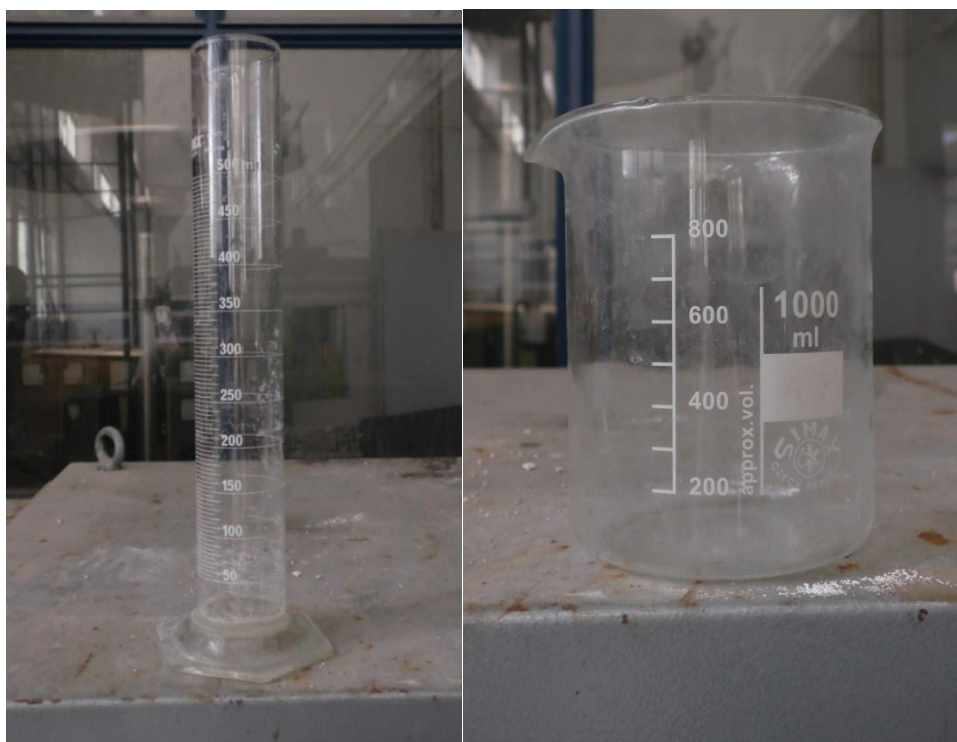
Σχήμα 3.23 Γυαλιά απορρόφησης ακτινοβολίας



### 3.3 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΑΡΟΧΟΜΕΤΡΟΥ

Με σκοπό τον έλεγχο και την ρύθμιση της διερχόμενης παροχής από την δεξαμενή-θερμοσίφωνα στη κύρια δεξαμενή κατά την διάρκεια των πειραμάτων, έχει τοποθετηθεί ειδικό παροχομέτρο επί του εξωτερικού τοιχώματος της κύριας δεξαμενής. Η λειτουργία του βασίζεται στην εξισορρόπηση πλωτήρα και έχει εύρος τιμών από 10 έως 160 l/h, ενώ η επιθυμητή παροχή επιτυγχάνεται με την χρήση δικλείδας.

Όπως όλα τα όργανα μέτρησης, έτσι και στην περίπτωση του συγκεκριμένου παροχομέτρου απαιτείται η βαθμονόμησή του. Μέσω της διαδικασίας αυτής πραγματοποιείται συσχέτιση των ενδείξεων του παροχομέτρου με την πραγματική παροχή που διέρχεται. Για την εκτέλεση της διαδικασίας αυτής, η οποία έγινε σε συνεργασία με την Π. Σολωμού (Σολωμού 2022), χρησιμοποιήθηκε ειδικό δοχείο το οποίο πληρωνόταν με νερό με ταυτόχρονη χρονομέτρηση του χρόνου συλλογής που κυμαινόταν μεταξύ 1 και 5 min ανάλογα με την παροχή. Στη συνέχεια το νερό μεταφερόταν σε ογκομετρικά δοχεία (Σχήμα 3.24) όπου μετρούνταν ο όγκος του και τελικά υπολογιζόταν η πραγματική παροχή.



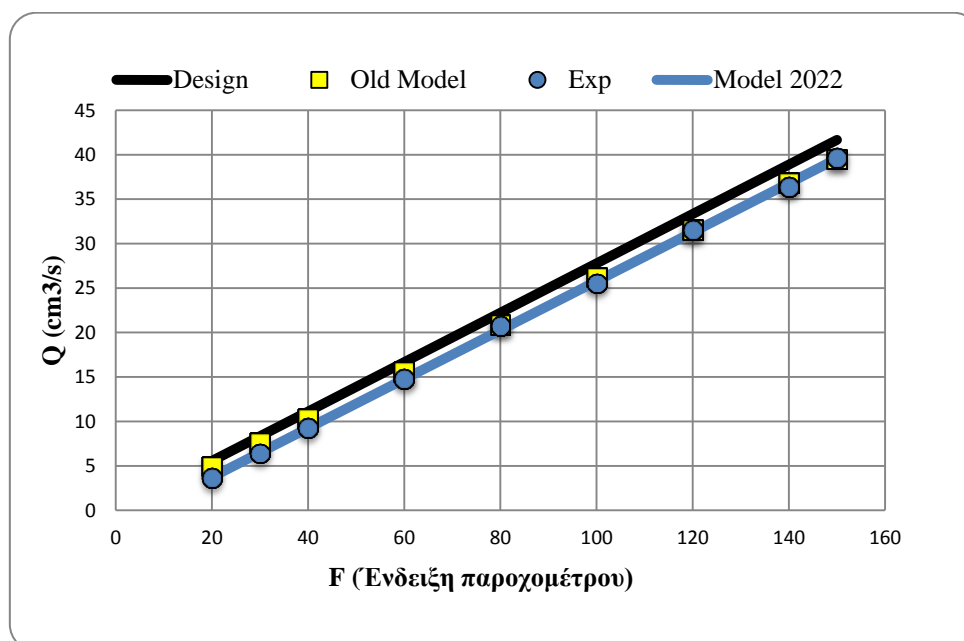
Σχήμα 3.24 Ογκομετρικοί σωλήνες- δοχεία

Η διαδικασία αυτή εκτελέστηκε για 9 διαφορετικές παροχές, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Στο Σχήμα 3.25 απεικονίζονται οι ενδείξεις παλαιότερου μοντέλου βαθμονόμησης (Old Model), η σχέση που προτείνεται από τον κατασκευαστή (Design) καθώς και τα αποτελέσματα ( $t(\text{min})$  και  $V(\text{ml})$ ) από τις

μετρήσεις βαθμονόμησης που έγιναν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ως Exp. ονομάζονται οι παροχές που προέκυψαν από τα πειράματα.

**Πίνακας 3.1** Μετρήσεις και υπολογισμοί βαθμονόμησης παροχομέτρου

Ενδείξεις	Design	Old Model	Exp.	Model 2022		
F (l/h)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	t (min)	V (ml)	Q (cm <sup>3</sup> /s)
20	5,6	5,0	3,6	5	1090	3,7
30	8,3	7,6	6,4	5	1920	6,5
40	11,1	10,3	9,3	3	1665	9,2
60	16,7	15,6	14,8	1	885	14,8
80	22,2	20,9	20,8	1	1245	20,3
100	27,8	26,2	25,5	2	3062,5	25,8
120	33,3	31,5	31,5	2	3783	31,3
140	38,9	36,8	36,4	2	4367,5	36,8
150	41,7	39,5	39,7	2	4762	39,5



**Σχήμα 3.25** Καμπύλες βαθμονόμησης παροχομέτρου

Τελικώς, επί των αποτελεσμάτων των μετρήσεων προσαρμόζεται ευθεία που δίνεται από τη σχέση (3.4) σύμφωνα με την οποία η πραγματική παροχή Q σε cm<sup>3</sup>/s από την ένδειξη του παροχομέτρου F σε L/h είναι :

$$Q = 0,2755F - 1,7752 \quad (3.5)$$

Βάσει της σχέσης αυτής υπολογίζονται οι παροχές για κάθε ένδειξη του παροχομέτρου (τελευταία στήλη Πίνακα 3.1)

### 3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για την εκτέλεση των πειραμάτων ακολουθήθηκε μια ορισμένη διαδικασία για την δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών και τον προσδιορισμό των παραμέτρων της πυκνότητας, της θερμοκρασίας και της αλατότητας. Η διαδικασία αυτή, που αναλύεται στη συνέχεια, διαφοροποιείται ανάλογα με το αν η άνωση στο κάθε πείραμα προκύπτει λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς ή διαφοράς αλατότητας.

- 1) Αρχικά, πραγματοποιείται η πλήρωση της δεξαμενής- αποδέκτη και της δευτερεύουσας δεξαμενής με νερό. Σημειώνεται ότι:
  - α) Στα πειράματα με διαφορά αλατότητας, συλλέγεται νωρίτερα ποσότητα αλατιού με την βοήθεια των προαναφερθέντων εργαλείων και τοποθετείται στην κύρια δεξαμενή. Εν συνεχεία η δεξαμενή πληρώνεται με νερό και αναμιγνύεται το αλάτι με το νερό. Η ποσότητα του αλατιού καθορίζεται βάσει εμπειρίας και η πυκνότητα του υγρού προσδιορίζεται τελικά από μετρήσεις με το αγωγιμόμετρο YSI30 και το πυκνόμετρο.
  - β) Στα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά, δεν απαιτείται καμία επιπρόσθετη διαδικασία πέρα από την πλήρωση με νερό και των δύο δεξαμενών.
- 2) Εν συνεχεία, τοποθετείται μικρή ποσότητα Θειώδους Νατρίου και στις δύο δεξαμενές. Μια ποσότητα που αντιστοιχεί από μισό (στην δευτερεύουσα) έως ένα κοινό πλαστικό κουτάλι (στην κύρια) είναι απόλυτα ικανοποιητική. Στη συνέχεια πραγματοποιείται καλή ανάδευση με τον μηχανική αναδευτήρα στη μεγάλη δεξαμενή και με κατάλληλη αντλία ανακυκλοφορίας στη δεξαμενή παρασκευής του διαλύματος της φλέβας (θερμοσίφωνα). Σημειώνεται πως στα πειράματα με ύπαρξη άλατος η ανάδευση διαρκεί πολύ περισσότερο χρόνο με σκοπό την επίτευξη ομοιογένειας εντός του αποδέκτη .
- 3) Ύστερα από μικρό χρονικό διάστημα, προστίθεται ποσότητα Ροδαμίνης και στις δύο δεξαμενές. Πιο συγκεκριμένα μέσω της σύριγγας (α) (Σχήμα 3.17) συλλέγονται 2 ml ροδαμίνης από το παραχθέν διάλυμα του 1 g/l και τοποθετούνται στην δεξαμενή –θερμοσίφωνα ενώ η ανακυκλοφορία της αντλίας συνεχίζεται. Επιπλέον, μέσω της σύριγγας (β) (Σχήμα 3.17) συλλέγονται 0,56 ml ροδαμίνης από το προαναφερθέν διάλυμα και εκλύονται στην κύρια δεξαμενή

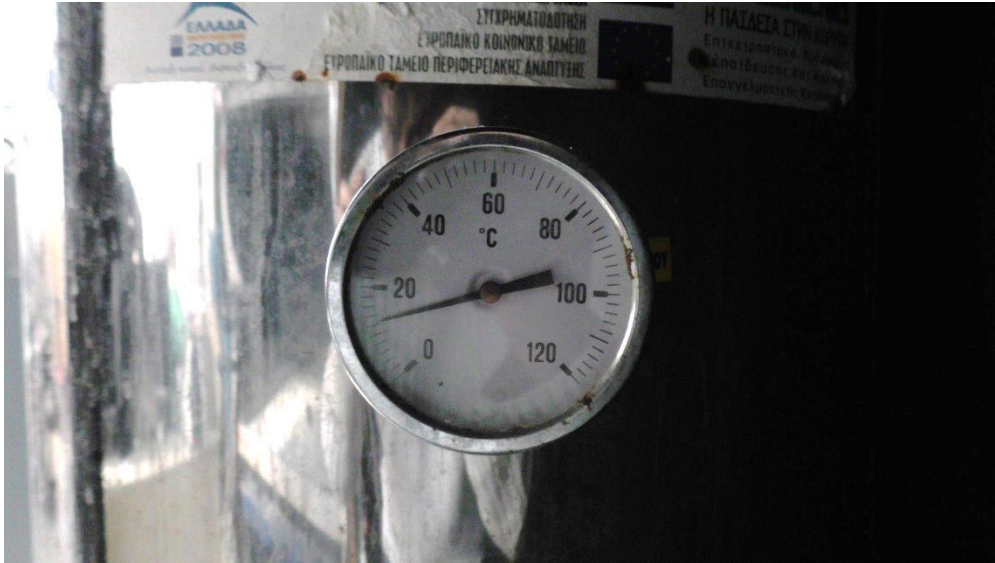
και η ανάδευση πραγματοποιείται μηχανικά με τον αναδευτήρα. Μετά την ομογενοποίησή τους, τα διαλύματα ροδαμίνης εντός της δευτερεύουσας και της κύριας δεξαμενής έχουν πλέον συγκεντρώσεις 50 mg/l και 0,1 mg/l αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι η πρόσθεση ροδαμίνης εντός του αποδέκτη αποσκοπεί στην δημιουργία ενός πολύ ασθενούς φθορισμού για την καλύτερη επεξεργασία των αποτελεσμάτων σε επόμενο στάδιο.

- 4) Εν συνεχεία, ακολουθεί ανάδευση του υγρού της κύριας δεξαμενής ώστε να ομογενοποιηθεί.
  - α) Για τα πειράματα με αλάτι η διαδικασία πραγματοποιείται για αρκετό χρονικό διάστημα έως ότου επιτευχθεί απόλυτη ομοιογένεια. Ο έλεγχος της απαίτησης αυτής γίνεται με την χρήση του οργάνου μέτρησης αλατότητας YSI30. Αναλυτικότερα, ο αισθητήρας του YSI30 βυθίζεται εντός της δεξαμενής και κινείται αργά και προς τις 3 διευθύνσεις. Απόλυτη ομοιογένεια θεωρείται ότι έχει επιτευχθεί όταν η ένδειξη της αλατότητας διατηρείται σταθερή.
  - β) Για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά η ανάδευση κατά την φάση προσθεσης της ροδαμίνης επαρκεί.
- 5) Μετά την ομογενοποίηση του διαλύματος του αποδέκτη, μετριέται με το YSI30 η θερμοκρασία και αλατότητα. Επιπρόσθετα:
  - α) Για τα πειράματα με αλάτι, συλλέγεται ικανό δείγμα με ογκομετρικό δοχείο (Σχήμα 3.24) και με την βοήθεια του κατάλληλου πυκνομέτρου υπολογίζεται και καταγράφεται η πυκνότητά του.
  - β) Στα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά μετριέται η θερμοκρασία του υγρού του αποδέκτη.
- 6) Στο σημείο αυτό τοποθετείται η κάμερα. Η τοποθέτηση γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το πλέγμα που προβάλλει η οθόνη να ευθυγραμμίζεται με τις οριζόντιες και κατακόρυφες ευθείες που διατρέχουν το απέναντι τοίχωμα της δεξαμενής και έτσι ώστε να έχει εντός οπτικού πεδίου ολόκληρη τη ροή της φλέβας. Εξαιτίας της εγγύτητας ως προς την υπό μελέτη ροή δημιουργούνται σφάλματα προοπτικής (Ενότητα 4.4). Η επίλυση αυτών πραγματοποιείται με τη βιντεοσκόπηση χάρακα ο οποίος βυθίζεται κατακόρυφα εντός της δεξαμενής (Σχήμα 3.26) για την διόρθωση των κατακόρυφων αποστάσεων.



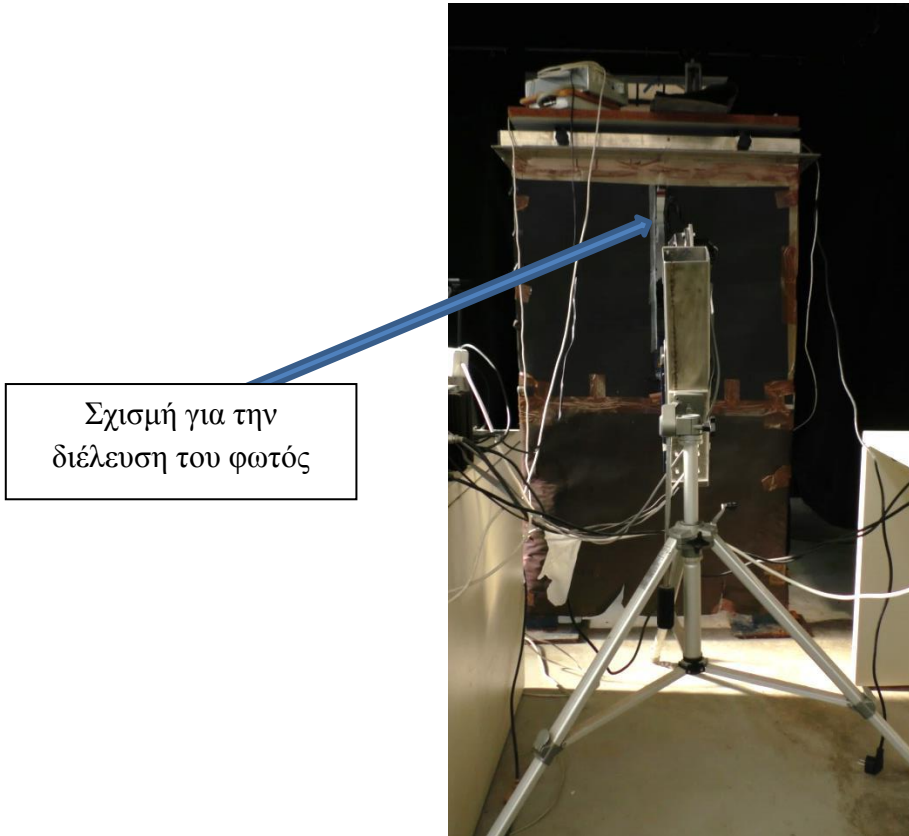
**Σχήμα 3.26** Κατακόρυφος χάρακας για διόρθωση σφαλμάτων

- 7) Στη συνέχεια ο αποδέκτης αφήνεται να ηρεμήσει για περίπου μισή ώρα με σκοπό την ελαχιστοποίηση της εσωτερικής ροής του περιβάλλοντος ρευστού.
- 8) Ως προς την δεξαμενή παρασκευής του υγρού της φλέβας :
  - α) Στα πειράματα με αλάτι η αντλία ανακυκλοφορίας απενεργοποιείται ύστερα από ένα εύλογο χρονικό διάστημα καθώς έχει επιτευχθεί η ομογενοποίηση. Το υγρό της φλέβας έχει την ίδια θερμοκρασία με το υγρό του αποδέκτη.
  - β) Στα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά ενεργοποιείται ο θερμοσίφωνας. Με την βοήθεια του ειδικού θερμομέτρου παρατηρείται η αύξηση της θερμοκρασίας και ο θερμοσίφωνας απενεργοποιείται όταν η θερμοκρασία που μετρείται με θερμόμετρο (Σχήμα 3.27) φτάσει τους  $40^{\circ}\text{C}$ .



Σχήμα 3.27 Θερμόμετρο επί της δευτερεύουσας δεξαμενής

- 9) Εν συνεχεία ενεργοποιείται το Laser και το περιστρεφόμενο κάτοπτρο και ελέγχεται ότι το φύλλο Laser προσπίπτει κατακόρυφα στη δεξαμενή, παράλληλα με την εμπρόσθια πλευρά της και διέρχεται από το κέντρο του στομίου διοχέτευσης της φλέβας. Στο σχήμα 3.28 φαίνεται το Laser και η θέση του ως προς τη δεξαμενή.



Σχισμή για την  
διέλευση του φωτός

Σχήμα 3.28. Ευθυγράμμιση συστήματος PLIF

- 10) Παράλληλα, απενεργοποιείται η αντλία ανακυκλοφορίας και η δευτερεύουσα δεξαμενή απομονώνεται από την ανακυκλοφορία μέσω κατάλληλων δικλιδών. Εν συνεχεία ενεργοποιείται ο αεροσυμπιεστής και μεσολαβεί κάποιο διάστημα έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή πίεση εντός της δευτερεύουσας δεξαμενής.
- 11) Αφού επιτευχθεί η σωστή πίεση με την βοήθεια του συστήματος εκτροπής (bypass) συλλέγεται υγρό φλέβας από την δευτερεύουσα δεξαμενή, ενώ παράλληλα ρυθμίζεται η επιθυμητή παροχή για την εκτέλεση του πειράματος. Ως προς τις παραμέτρους του δείγματος:
- α) Για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας, μετρώνται η αλατότητα (ppt), η θερμοκρασία (°C) και η πυκνότητα μέσω του πυκνομέτρου και καταγράφονται.
  - β) Για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά γίνεται καταγραφή της θερμοκρασίας και της αλατότητας και η πυκνότητα υπολογίζεται από τις σχέσεις (3.1-3.3).
- 12) Εν συνεχεία, απομονώνεται το σύστημα εκτροπής, δημιουργείται συσκότιση μέσω των ειδικά διαμορφωμένων κουρτινών, ενεργοποιείται η κάμερα και η λήψη του βίντεο και αρχίζει το πείραμα.
- 13) Τυπικά κάθε πείραμα διαρκεί από 3-5 min ανάλογα με τις συνθήκες. Σημειώνεται ότι για καθαρά πρακτικούς λόγους η χρονική διάρκεια που χρησιμοποιείται τελικά για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αντιστοιχεί περίπου σε 1- 1,5 min.

### 3.5 ΑΡΧΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο πειραμάτων εκ των οποίων διατηρήθηκαν προς επεξεργασία 11 εξ αυτών (5 πειράματα με διαφορά αλατότητας και 6 πειράματα με διαφορά θερμοκρασίας). Εξαιτίας δυσμενών συνθηκών και σφαλμάτων( είσοδος αέρα στη ροή-αντανακλάσεις-λάθος ρυθμίσεις κάμερας) πολλά πειράματα απορρίφθηκαν. Οι αρχικές συνθήκες των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν τελικά παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.2. και 3.3.

Αρχικά σημειώνεται ότι για τα πειράματα όπου η πυκνομετρική διαφορά οφείλεται στην αλατότητα, η άνωση ( $\mathbf{B(cm^4/s^3)}$ ) προκύπτει βάσει των πυκνοτήτων που μετρήθηκαν με χρήση των πυκνομέτρων. Οι πυκνότητες που προκύπτουν με βάση τη μετρούμενη αλατότητα και θερμοκρασία από το YSI30 (s-meas. (kg/m<sup>3</sup>)) διαφέρουν ελαφρώς από εκείνες των πυκνομέτρων.

Επιπρόσθετα, παρατηρείται μικρότερος αριθμός Reynolds στην πηγή για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας έναντι εκείνων με θερμοκρασιακή διαφορά εξαιτίας του μειωμένου κινηματικού ιξώδους στα δεύτερα. Στα πειράματα με αριθμό Reynolds  $Re > 2000$  (Exp.5S, Exp.7T-11T) εξασφαλίζεται η τυρβώδης φύση της ροής κατευθείαν από την εκροή της από το ακροφύσιο. Στα πειράματα με  $Re < 2000$  η ροή μεταπίπτει σε τυρβώδη. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.29-3.31 η ροή “σπάει” σε απόσταση περίπου 2 διαμέτρων (2D) από το ακροφύσιο

**Πίνακας 3. 2** Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με διαφορά αλατότητας

a/a	Date	D(cm)	F (L/min)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	U (cm/s)	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	s(ppt)	ρ <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>a</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	M (cm <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> )	B (cm <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	Re	l <sub>Q</sub>	l <sub>M</sub>	Ri	F <sub>0</sub>	5l <sub>M</sub>
Exp.1S	1/2/2023	1,5	65,00	16,13	9,13	15,5	14,2	26,7	998,7	1017,9	147,3	304,3	1222	1,329	2,424	0,548	1,72	12,118
Exp.2S	1/2/2023	1,5	75,00	18,89	10,69	15,6	14	26,6	998,7	1017,5	201,9	348,8	1434	1,329	2,868	0,464	2,03	14,338
Exp.3S	1/2/2023	1,5	85,00	21,64	12,25	15,8	13,9	26,4	998,7	1017,5	265,1	399,7	1651	1,329	3,286	0,405	2,33	16,429
Exp.4S	1/2/2023	1,5	95,00	24,40	13,81	15,7	13,9	26	998,7	1017,4	336,8	448,1	1857	1,329	3,714	0,358	2,63	18,570
Exp.5S	1/2/2023	1,5	105,00	27,15	15,37	15,4	13,8	25,7	998,7	1017,1	417,2	490,7	2051	1,329	4,167	0,319	2,95	20,835

**Πίνακας 3. 3** Αρχικές συνθήκες πειραμάτων με θερμοκρασιακή διαφορά

a/a	Date	D(cm)	F (L/min)	Q (cm <sup>3</sup> /s)	U (cm/s)	T <sub>0</sub> (°C)	T <sub>a</sub> (°C)	s(ppt)	ρ <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>a</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	M (cm <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> )	B (cm <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> )	Re	l <sub>Q</sub>	l <sub>M</sub>	Ri	F <sub>0</sub>	5l <sub>M</sub>
Exp.6T	23/1/2023	1,5	60,00	14,75	8,35	38,2	15,9	0,5	992,94	998,95	123,2	87,6	1832	1,329	3,950	0,34	2,797	19,751
Exp.7T	30/1/2023	1,5	70,00	17,51	9,909	41,5	14,4	0,5	991,68	999,18	173,5	129,8	2310	1,329	4,196	0,32	2,971	20,978
Exp.8T	30/1/2023	1,5	80,00	20,26	11,47	41,5	14,6	0,6	991,68	999,15	232,4	149,7	2674	1,329	4,865	0,27	3,445	24,325
Exp.9T	3/2/2023	1,5	90,00	23,02	13,03	43,3	14,3	0,5	990,96	999,19	299,9	187,6	3136	1,329	5,262	0,25	3,726	26,309
Exp.10T	7/2/2023	1,5	65,00	16,13	9,129	43	12,3	0,5	991,08	999,45	147,3	133,6	2186	1,329	3,658	0,36	2,590	18,288
Exp.11T	7/2/2023	1,5	75,00	18,89	10,69	42,8	12,2	0,5	991,16	999,46	201,9	155,1	2550	1,329	4,300	0,31	3,045	21,501



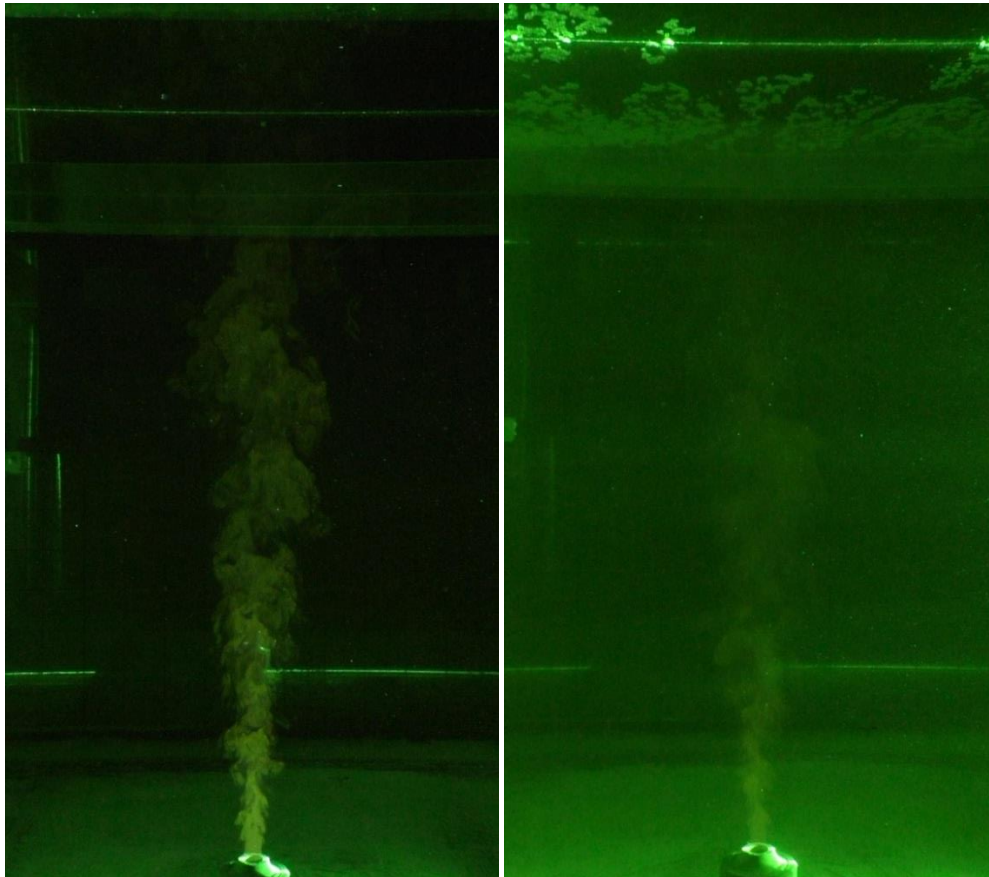
Η διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων ήταν συνήθως από 3 έως 5 min. Η ροή της φλέβας δεν βιντεοσκοπούσαν περαιτέρω εξαιτίας της δημιουργίας του φαινομένου της στρωμάτωσης. Σταδιακά δημιουργούνταν διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υγρών, η οποία κατέβαινε όσο περισσότερο διαρκούσε η ροή.

Κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων το πεδίο ροής από το οποίο έχει διέλθει η διεπιφάνεια ακυρώνεται και δεν προσμετρείται καθώς η στρωμάτωση μεταβάλλει καθοριστικά τις μετρήσεις και προκαλεί αυξημένες απορροφήσεις εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης ροδαμίνης που εντοπίζεται εκεί. Τα βίντεο συνήθως διακόπτονται όταν η διεπιφάνεια κατέβει μέχρι τα 50 cm από τον πυθμένα (70 cm είναι το ύψος της δεξαμενής). Οι υπολογισμοί και η μελέτη της ροής πραγματοποιούνται για μήκη μεγαλύτερα των 10D ώστε η ροή να είναι αναπτυγμένη και  $5I_M$  ώστε η ροή να συμπεριφέρεται ως πλούμιο και ταυτόχρονα μικρότερα των 50 cm (διεπιφάνεια). Κατά συνέπεια, η επιλογή των βασικών παραμέτρων του πειράματος, όπως η διάμετρος του ακροφυσίου (1 cm) ή η διαφορά θερμοκρασίας και αλατότητας, γίνεται για την επίτευξη μικρής κλίμακας μήκους  $I_M$  (από 2-6 cm) ώστε το μετρούμενο πεδίο ροής από 15- 26,3 cm έως 45-50 cm) να είναι ικανοποιητικό.

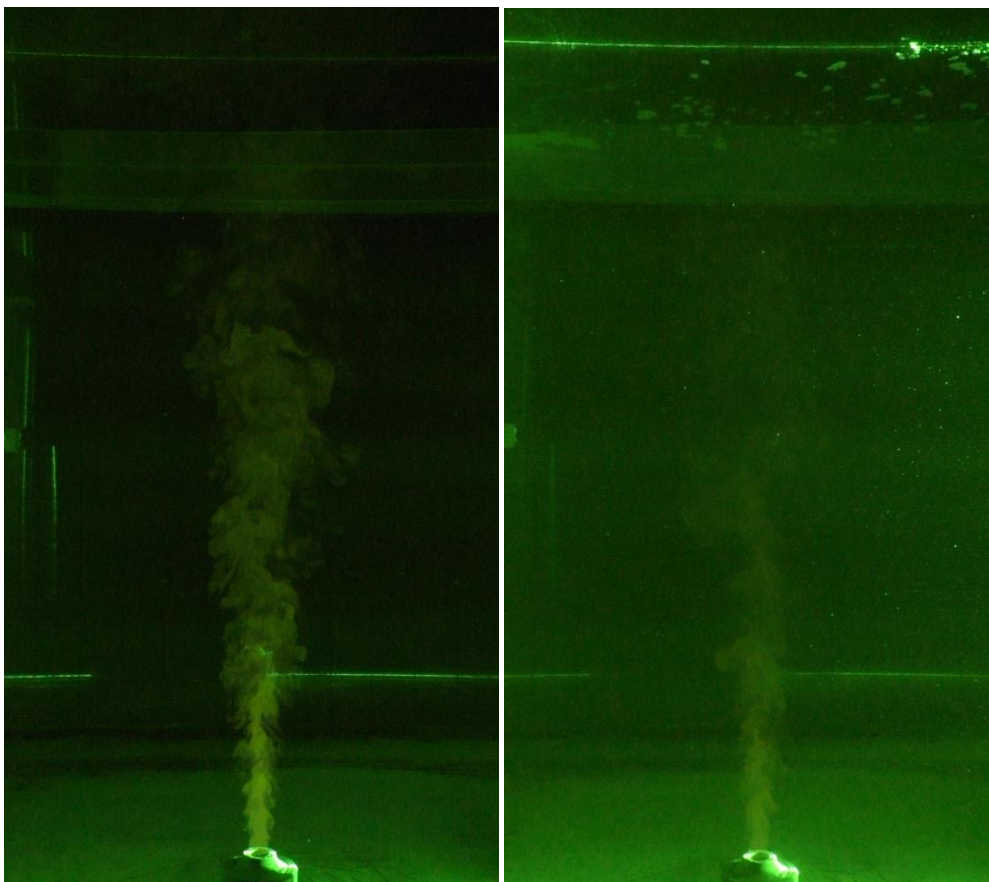
### 3.6 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ

Στα Σχήματα 3.29-3.31 παρουσιάζονται στιγμιότυπα της ροής τις χρονική στιγμή  $t=100$  s από τα πειράματα Exp.6T και Exp.1S,  $t=90$  s από τα πειράματα Exp.8T και Exp.2S και  $t=87$  s από τα πειράματα Exp.9T και Exp.4S. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στα πειράματα Exp.1S-4S, η ύπαρξη άλατος μειώνει αισθητά την διαύγεια του αποδέκτη και αυξάνει σημαντικά την φωτεινότητα που εκπέμπεται από το γειτνιάζον ρευστό μειώνοντας παράλληλα την φωτεινότητα της ροής. Εντούτοις αυτή η μείωση τη ευκρίνειας, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4, δεν επηρεάζει αρνητικά τα αποτελέσματα καθώς η κάμερα έχει αρκετά μεγαλύτερη ευαισθησία και αντιλαμβάνεται τις μικροδιαφορές της φωτεινότητας από pixel σε pixel ακόμα και αν δεν είναι αντιληπτές με “γυμνό μάτι”.

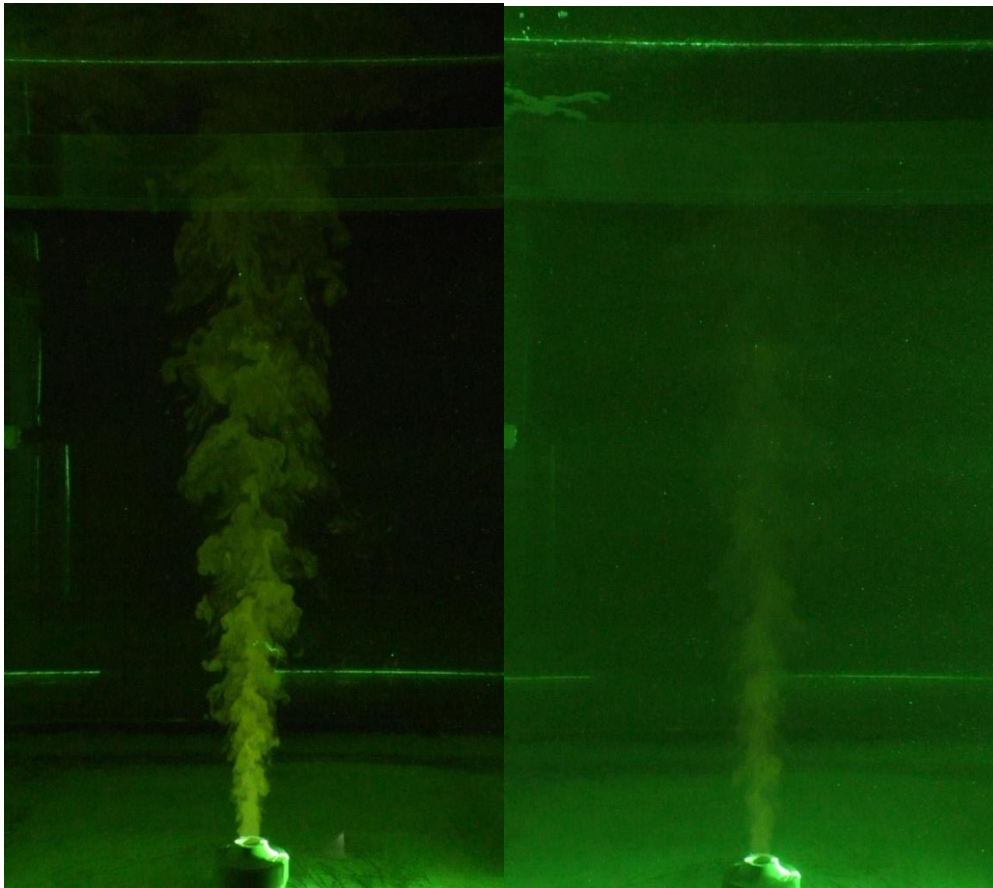
Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την εκτέλεση πολλών πειραμάτων, ο αεροσυμπιεστής τέθηκε σε διάφορες φάσεις αυτόματα σε λειτουργία για να καλύψει τις απώλειες της πίεσης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την είσοδο εντός της ροής αέρα με την μορφή φυσαλίδων (Σχήμα 3.32) Η ύπαρξη αυτών εντός της ροής προκάλεσε την μεταβολή της ορμής του ρευστού και την αύξηση της φωτεινότητας του συχνά εκτός υπολογίσιμων ορίων. Εξαιτίας αυτών, τα πειράματα αυτά απορρίφθηκαν.



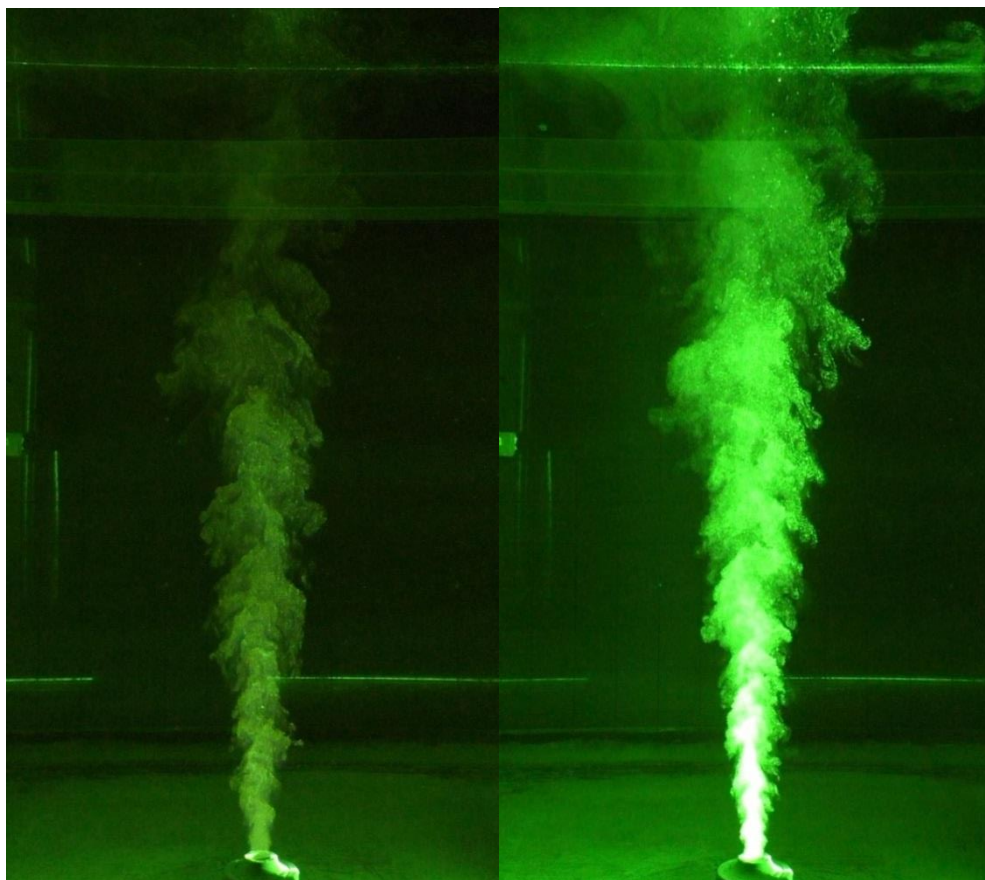
Σχήμα 3.29 Στιγμιότυπα από τα πειράματα Exp.6T και Exp.1S αντίστοιχα ( $t=100$  s)



Σχήμα 3.30 Στιγμιότυπα από τα πειράματα Exp.8T και Exp.2S αντίστοιχα ( $t=90$  s)



Σχήμα 3.31. Στιγμιότυπα από τα πειράματα Expr.9T και Expr.4S αντίστοιχα ( $t=87$  s)



Σχήμα 3.32. Είσοδος φυσαλίδων στην ροή (απορριφθέντα πειράματα)

## 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Με την ολοκλήρωση των πειραμάτων και τη λήψη των βίντεο, γίνεται μετάβαση στη φάση ανάκτησης των αποτελεσμάτων και επεξεργασίας αυτών. Βασικός σκοπός της μεθόδου PLIF καθίσταται ο υπολογισμός των συγκεντρώσεων σε όλο το πεδίο της ροής της φλέβας μέσα από το συσχετισμό φωτεινότητας και συγκέντρωσης ροδαμίνης. Με χρήση του λογισμικού MATLAB εξάγονται τα frames από το βίντεο ενός πειράματος και στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα frames για μια συγκεκριμένη διάρκεια, δημιουργείται η μέση εικόνα καθώς και η τυπική απόκλιση που χρειάζεται για τον υπολογισμό της έντασης της τύρβης. Από αυτές τις εικόνες προκύπτει η εγκάρσια κατανομή της αδιάστατης μέσης (χρονικά) συγκέντρωσης  $C/C_M$  ( $C_M$  η αξονική συγκέντρωση), η εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης (ένταση τύρβης)  $C_{RMS}/C_m$ , ο λόγος της συγκέντρωσης στον άξονα ως προς την συγκέντρωση στη πηγή  $C_m/C_0$  συναρτήσει του αδιάστατου μήκους  $z/l_M$  και η μεταβολή του πλάτους  $b_c$  της κατανομής της συγκέντρωσης για την περιοχή του πλουμίου ( $z > 5 l_M$ ) συναρτήσει της απόστασης από τον άξονα. Η μεθοδολογία για την επίτευξη των ανωτέρω, το σύνολο των ζητημάτων που προέκυψαν και χρήζουν αναφοράς καθώς και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### 4.2. ΑΡΧΙΚΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Σύμφωνα με τους Ferrer et al. (1993), η ένταση του φωτός από φθορισμό της Ροδαμίνης 6G (Effective fluorescence intensity) είναι περίπου γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσης της Ροδαμίνης σε μια περιοχή από 0 έως 50  $\mu\text{g/L}$ . Συνεπώς, από την ανάλυση των εικόνων προκύπτει σε κάθε pixel η ένταση φθορισμού και με γνωστή τη συγκέντρωση Ροδαμίνης στην πηγή είναι δυνατό να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις σε κάθε pixel της εικόνας της ροής της ανωστικής φλέβας.

Οι ψηφιακές κάμερες, οι φωτογραφικές μηχανές καθώς και ένα ευρύ σύνολο ψηφιακών συσκευών βασίζεται στο χρωματικό μοντέλο RGB για την απεικόνιση των χρωμάτων μιας εικόνας. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τα κύρια χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε, προσθέτοντάς τα με διαφορετικούς τρόπους και εντάσεις παράγοντας έτσι ένα ευρύ φάσμα χρωματικών αποχρώσεων. Συνεπώς κάθε εικόνα αποτελείται από 3 εικόνες συνιστώσες της κύριας, με βάση την ένταση κόκκινου, πράσινου και μπλε.

Η χρήση της κόκκινης συνιστώσας της εικόνας της ροής ενδείκνυται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης της Ροδαμίνης έναντι των υπόλοιπων συνιστωσών ή της συνολικής εικόνας (Dimitriadis 2017). Η ροή της φλέβας ακτινοβολεί σε μήκος ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στο κίτρινο, συνεπώς αυτή δύναται να διαχωριστεί στις συνιστώσες (κόκκινο και πράσινο) με την ένταση του μπλε χρώματος να πολύ μικρή (σε κάποια σημεία σχεδόν μηδενική). Μέσα από κατάλληλη βαθμονόμηση παρουσιάζεται ότι παρότι η ένταση του

κόκκινου χρώματος είναι σημαντικά μειωμένη από εκείνη του πράσινου, η χρήση του κόκκινου εξασφαλίζει την αποφυγή αντανάκλασεων από το πράσινο χρώμα της ακτίνας laser καθώς και πολύ πιο βελτιωμένη γραμμική περιοχή (0-50  $\mu\text{g/l}$ ). Κατά αντιστοιχία, η συνιστώσα του κόκκινου χρώματος προτιμάται έναντι της συνολικής εικόνας, αφού αυτή περιλαμβάνει μέσα και την πράσινη και την μπλε που αποφεύγονται. Συνεπώς, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής γίνεται εφαρμογή της βαθμονόμησης των Ferrier et al. (1993), χρησιμοποιώντας όμως μονάχα την κόκκινη συνιστώσα του μοντέλου RGB.

Η επεξεργασία του βίντεο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων γίνεται στο προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB. Πιο συγκεκριμένα, μέσω κατάλληλου κώδικα (Παράρτημα Β), που συνάχθηκε με τη βοήθεια του κ. Δημητριάδη, το κάθε βίντεο διαχωρίζεται στα frames του (με ταχύτητα λήψης - 50 frames/second) και εν συνεχεία από το σύνολο των χρησιμοποιούμενων frames παράγεται η μέση τιμή των εντάσεων φθορισμού της εικόνας και η τυπική απόκλιση αυτών για το κόκκινο χρώμα ενώ τα αποτελέσματα καταγράφονται σε αρχείο Excel. Σημειώνεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των frames που συνθέτουν την μέση εικόνα και την τυπική απόκλιση τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Εντούτοις για λόγους υπολογιστικού φόρτου (η χρήση του κώδικα επεξεργασίας “καταναλώνει” μεγάλο μέρος της προσωρινής μνήμης του υπολογιστή-RAM) η ποσότητα των χρησιμοποιούμενων frames είναι σε συνήθεις περιπτώσεις μεταξύ 3000 και 4000 frames (60 s έως 80 s). Ο αριθμός αυτός μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικός. Άλλωστε η χρήση περισσότερων frames θα οδηγούσε στην μείωση του διαθέσιμου μήκους διεξαγωγής μετρήσεων στη ροή εξαιτίας της αυξανόμενης στρωμάτωσης.

#### 4.3 ΜΕΣΗ ΚΑΙ RMS ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ

Έστω ότι σε ορισμένο σημείο του πεδίου ροής λαμβάνονται  $N$  τιμές της συγκέντρωσης  $c_i$ , με  $c_i$  την τιμή της συγκέντρωσης σε μια χρονική στιγμή. Προκύπτει τότε ότι (Παπακωνσταντής 2009):

$$c_i = \bar{c} + c'_i \quad (4.1)$$

όπου  $\bar{c}$  η μέση τιμή του συνόλου των τιμών και  $c'_i$  η τυρβώδης διακύμανση της συγκέντρωσης. Η μέση τιμή της συγκέντρωσης ισούται με:

$$\bar{c} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} c_i}{N} \quad (4.2)$$

όπου  $c_1$  και  $c_N$  η πρώτη και η τελευταία αντίστοιχα τιμή της συγκέντρωσης που λαμβάνεται. Η παύλα στο εξής παραλείπεται. Επιπρόσθετα μπορεί να υπολογιστεί η τυπική απόκλιση των στιγμιαίων τιμών συγκέντρωσης (RMS-Root Mean Squared) από την σχέση:

$$\sqrt{c'^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (c_i - \bar{c})^2}{N}} \quad (4.3)$$

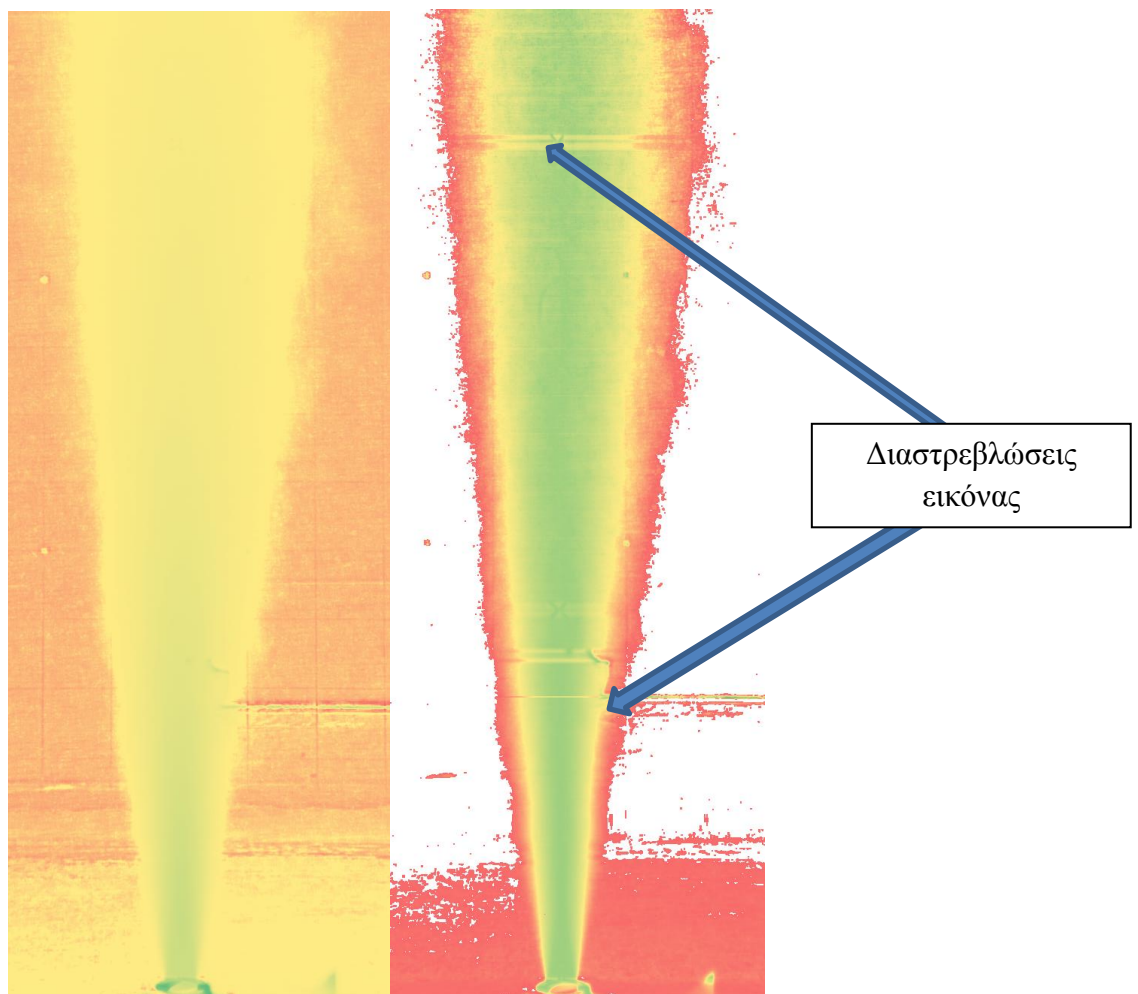
Η ποσότητα  $\sqrt{c'^2}$  θα συμβολίζεται στο εξής ως  $c_{RMS}$ .

Πριν την έναρξη κάθε πειράματος υπάρχει εντός του αποδέκτη συγκέντρωση Ροδαμίνης, ομοιόμορφη σε όλο το πεδίο που συμβολίζεται ως  $c_a$ . Η ύπαρξη αυτής προϋποθέτει ότι για την εύρεση της συγκέντρωσης σε κάθε σημείο απαιτείται η αφαίρεση της  $c_a$  από την μέση τιμή που λαμβάνεται κάθε φορά ώστε να αναφερόμαστε σε καθαρές συγκεντρώσεις υπεράνω της συγκέντρωσης του αποδέκτη. Συνεπώς ισχύει :

$$\Delta c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} (c_i - c_a) = (\Delta c) = c - c_a \quad (4.4)$$

Στο εξής για την καθαρή συγκέντρωση  $\overline{\Delta c}$  θα χρησιμοποιείται το σύμβολο  $C$ .

Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται στο Excel, όπου απεικονίζονται και τα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται, αριστερά, η μορφή της μέσης εικόνας πριν την επεξεργασία και, δεξιά, η μορφή της ροής, ύστερα από την επεξεργασία, αφού έχει αφαιρεθεί η τιμή  $c_a$  και έχει γίνει αδιαστατοποίηση με την  $C_m$  σε κάθε άξονα ( $C_m$  αξονική συγκέντρωση) δηλαδή  $C/C_m$

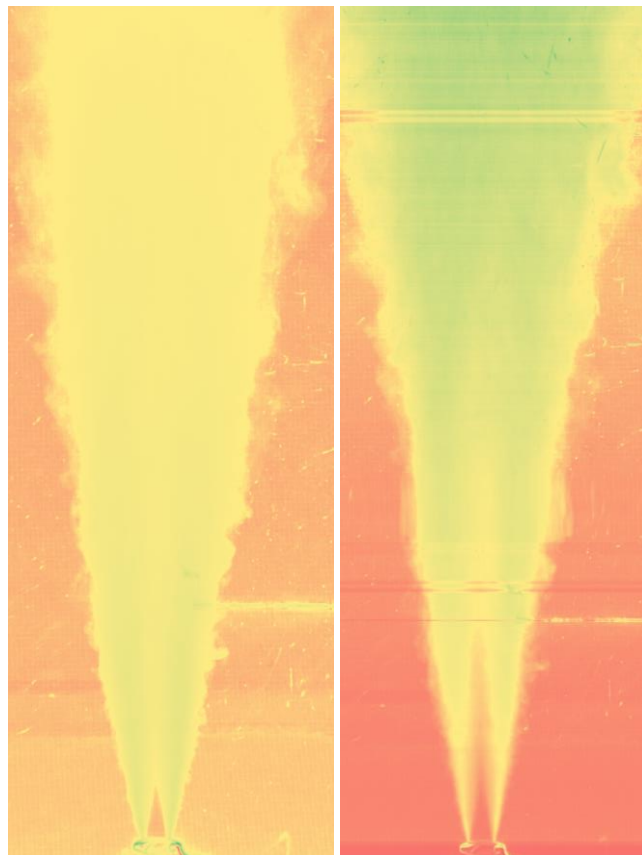


**Σχήμα 4.1.** Απεικόνιση της μέσης τιμής της συγκέντρωσης σε περιβάλλον Excel πριν και μετά την επεξεργασία (Πείραμα Exp.9T)

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται, η αφαίρεση της συγκέντρωσης του αποδέκτη  $c_a$  επιτρέπει την εύκολη διάκριση της ροής από τον γειτνιάζοντα χώρο αλλά και τον εντοπισμό περιοχών όπου προκύπτουν αντανακλάσεις και σφάλματα λόγω ατελειών από το τζάμι καθώς και λόγω καθρεφτίσματος της ροής στην απέναντι πλευρά της δεξαμενής. Όπως είναι αυτονόητο, οι περιοχές αυτές παραλείπονται από τους υπολογισμούς. Εντούτοις, αξίζει να αναφερθεί ότι η ευαισθησία της κάμερας στις μικροδιακυμάνσεις της ακτινοβολίας, μη ορατές με γυμνό μάτι στη μη επεξεργασμένη μορφή, συνηγορεί στην ισχύ της μεθόδου και στις υψηλές δυνατότητες της.

Κατά αντιστοιχία, πριν την έναρξη κάθε πειράματος υπάρχει στον αποδέκτη μια τιμή τυρβώδους διακύμανσης της συγκέντρωσης. Η τιμή αυτή κατά την επεξεργασία αφαιρείται από τις τιμές  $c_{RMS}$  που προέκυψαν αρχικά ώστε να βρεθεί η καθαρή τιμή τυρβώδους διακύμανσης για κάθε σημείο και η οποία στο εξής θα συμβολίζεται ως  $C_{RMS}$ .

Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η μορφή των RMS συγκεντρώσεων πριν και μετά την επεξεργασία. Κατά την επεξεργασία η καθαρή τιμή  $C_{RMS}$  αδιαστατοποιείται με την  $C_M$  σε κάθε άξονα ( $C_M$  αξονική συγκέντρωση) και προκύπτει η μεταβολή της  $C_{RMS}/C_M$ . Όπως και στην περίπτωση της μέσης τιμής, η επεξεργασία της εικόνας διευκολύνει το φιλτράρισμα των “προβληματικών” περιοχών και την αποτύπωση της εξέλιξης της τύρβης. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ευκρίνεια με την οποία αποτυπώνεται ο πυρήνας της ανωστικής φλέβας και η χαρακτηριστική κωνική του μορφή.

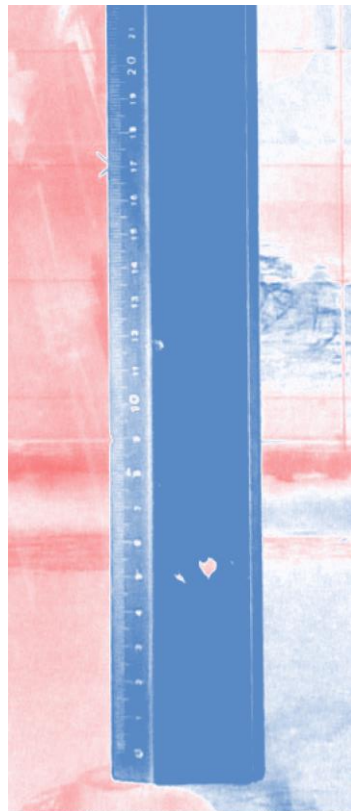


**Σχήμα 4.2.** Απεικόνιση της RMS συγκέντρωσης σε περιβάλλον Excel πριν και μετά την επεξεργασία (Πείραμα Expr.9T)

#### 4.4 ΚΛΙΜΑΚΑ ΕΙΚΟΝΑΣ

Πριν την εξαγωγή των πρώτων ποσοτικών αποτελεσμάτων είναι απαραίτητος ο έλεγχος των κατακόρυφων αποστάσεων και η διόρθωση ενδεχόμενων αποκλίσεων. Αρχικά προσδιορίζεται η κλίμακα της εικόνας με βάση το μήκος του ακροφυσίου. Με δεδομένο ότι η διάμετρος της πηγής αντιστοιχεί σε σταθερό μήκος 1,5 cm, υπολογίζεται ο αριθμός των pixel στο εύρος της διαμέτρου σε κάθε πείραμα, με την τιμή να προκύπτει ότι κυμαίνεται από 36 έως 41 pixel δηλαδή 23,33 έως 27,33 pixel ανά cm που σημαίνει ότι το μήκος του pixel είναι περίπου 0.4 mm. Αυτή είναι και η ακρίβεια στη μέτρηση των αποστάσεων. Εν συνεχεία βάσει της κλίμακας αυτής υπολογίζονται όλα τα απαιτούμενα μήκη.

Για τις ανάγκες του ελέγχου, έχει τοποθετηθεί χάρακας σε κατακόρυφη θέση κατά την προετοιμασία του πειράματος και έχουν ληφθεί φωτογραφίες και βίντεο. Μέσω του σχετικού κώδικα στο MATLAB, η ζητούμενη εικόνα μεταφέρεται σε περιβάλλον Excel και συσχετίζονται οι αποστάσεις με τον αριθμό των pixel. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται τμήμα της εικόνας του χάρακα ύστερα από την ανωτέρω επεξεργασία..



**Σχήμα 4.3.** Επεξεργασμένη εικόνα με χάρακα βυθισμένο στη δεξαμενή

Συγκρίνοντας την κλίμακα που προέκυψε βάσει των pixel του ακροφυσίου και εκείνης που προκύπτει βάσει του χάρακα αποδεικνύεται ότι η διαφορά είναι αμελητέα και αντιστοιχεί σε τιμή περίπου στο 1%. Συνεπώς δεν πραγματοποιείται κάποια διόρθωση και οι αρχικές αποστάσεις διατηρούνται.

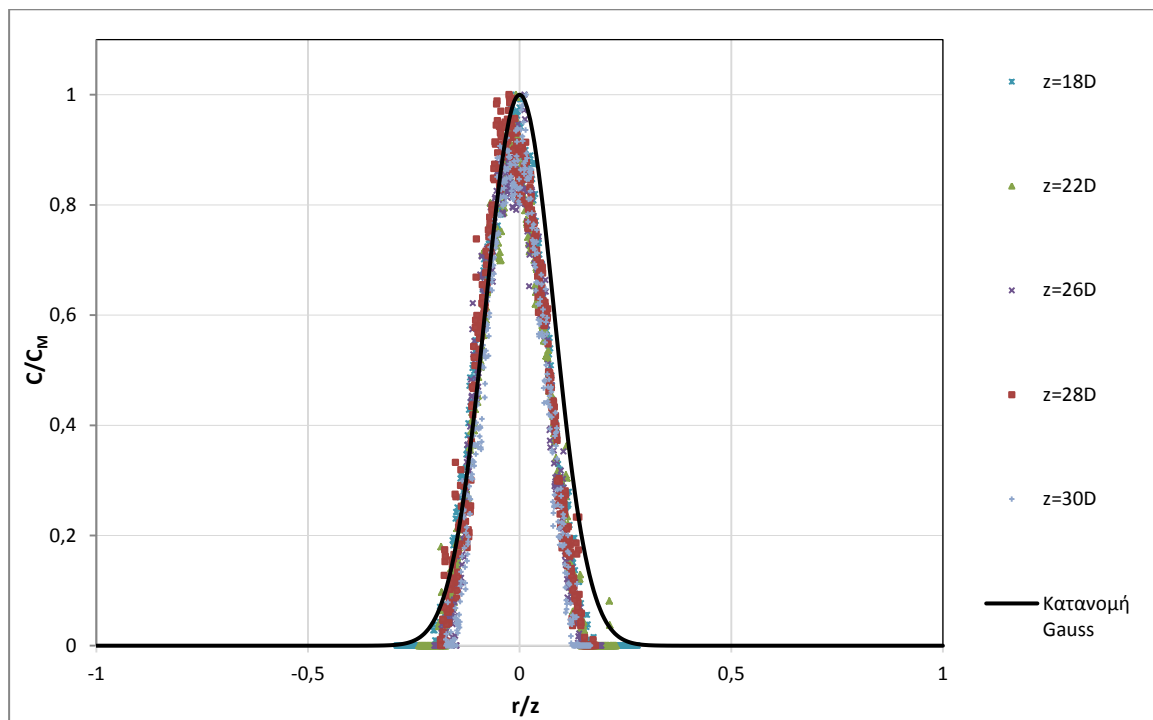


#### 4.5 ΚΑΤΑΝΟΜΕΣ ΜΕΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Η μέση συγκέντρωση σε μια διατομή  $C$  αδιαστατοποιημένη ως προς την μέγιστη συγκέντρωση  $C_m$  στη διατομή αυτή, η οποία εντοπίζεται στον άξονα, παριστάνεται γραφικά ως προς την απόσταση από τον άξονα  $r$ , αδιαστατοποιημένη ως προς την κατακόρυφη απόσταση  $z$  της διατομής από το ακροφύσιο.. Στο Σχήμα 4.4 φαίνονται τα αποτελέσματα της μέσης συγκέντρωσης από μετρήσεις σε ένα πείραμα με θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ φλέβας και αποδέκτη καθώς και η θεωρητική κατανομή Gauss όπως έχει προκύψει από την θεωρητική ανάλυση:

$$\frac{C}{C_M} = e^{-\left(\frac{r}{b_c}\right)^2} \quad (4.5)$$

όπου  $b_c$  το ημιπλάτος της συγκέντρωσης.



**Σχήμα 4.4.** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.6T.

Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά από το διάγραμμα, οι τιμές της αδιαστατοποιημένης συγκέντρωσης κυμαίνονται μεταξύ 0-1 με την μέγιστη τιμή να εντοπίζεται στον άξονα όπως ήταν αναμενόμενο και παράλληλα, ανεξάρτητα από την απόσταση από το ακροφύσιο, παρατηρείται ότι η μορφή των κατανομών δεν αλλάζει σημαντικά μορφή. Η κατανομές σε αδιάστατη μορφή προσεγγίζουν ικανοποιητικά την αδιάστατη κατανομή Gauss κυρίως στην αριστερή πλευρά, ενώ παρατηρείται μια πιο απότομη πτώση στην

δεξιά πλευρά με τις τιμές να αποκλίνουν ελαφρώς από τα θεωρητικά αποτελέσματα. Η απόκλιση αυτή προκύπτει εξαιτίας της απομείωσης της ισχύος της ακτινοβολίας καθώς διέρχεται μέσα από την ανωστική φλέβα.

Σύμφωνα με τους Ferrier et al. (1993), με την είσοδο τους εντός της δεξαμενής, οι ακτίνες εμφανίζουν σημαντική απομείωση ενέργειας συγκριτικά με την απομείωση στον αέρα. Η ισχύς της ακτινοβολίας σε ένα τέτοιο μέσο απορρόφησης μειώνεται εκθετικά με την διανυόμενη απόσταση όπως περιγράφεται από την σχέση των Bouguer-Lambert-Beer Law (Wagner, 1961):

$$P(x) = P_0 e^{-\eta x} \quad (4.6)$$

όπου  $P_0$  είναι η αρχική ισχύς της ακτίνας laser,  $\eta$  είναι ο συντελεστής απομείωσης,  $x$  είναι η ευθεία γραμμή- πορεία που διανύει το φως καθώς διέρχεται από το μέσο και  $P$  είναι η τελική ισχύς σε απόσταση  $x$ .

Η σχέση (4.6) υπολογίζει ικανοποιητικά την απομείωση εντός καθαρά υδάτινου αποδέκτη, ενώ για διαλύματα Ροδαμίνης απαιτείται προσαρμογή.

Σε διάλυμα Ροδαμίνης πλήρως αναμειγμένο ισχύει ότι ο συντελεστής απομείωσης είναι:

$$\eta = \eta_w + \varepsilon_0 C \quad (4.7)$$

όπου  $\eta_w$  είναι η απομείωση σε καθαρό νερό σε  $(\text{cm}^{-1})$ ,  $\varepsilon_0$  είναι ο συντελεστής απόσβεσης εξαιτίας της Ροδαμίνης  $6G$  σε  $(\text{cm}^{-1})(\mu\text{g l}^{-1})^{-1}$  και  $C$  είναι η συγκέντρωση σε  $\mu\text{g l}^{-1}$ .

Σε πεδίο ροής όπου η Ροδαμίνη δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένη και μεταβάλλεται κατά συνεχή συνάρτηση στην κατεύθυνση της ακτίνας  $C(x)$ , η ισχύς απομειώνεται σύμφωνα με τη σχέση :

$$P'' = P' e^{-(\eta_w + \varepsilon_0 C(x)) \Delta x} \quad (4.8)$$

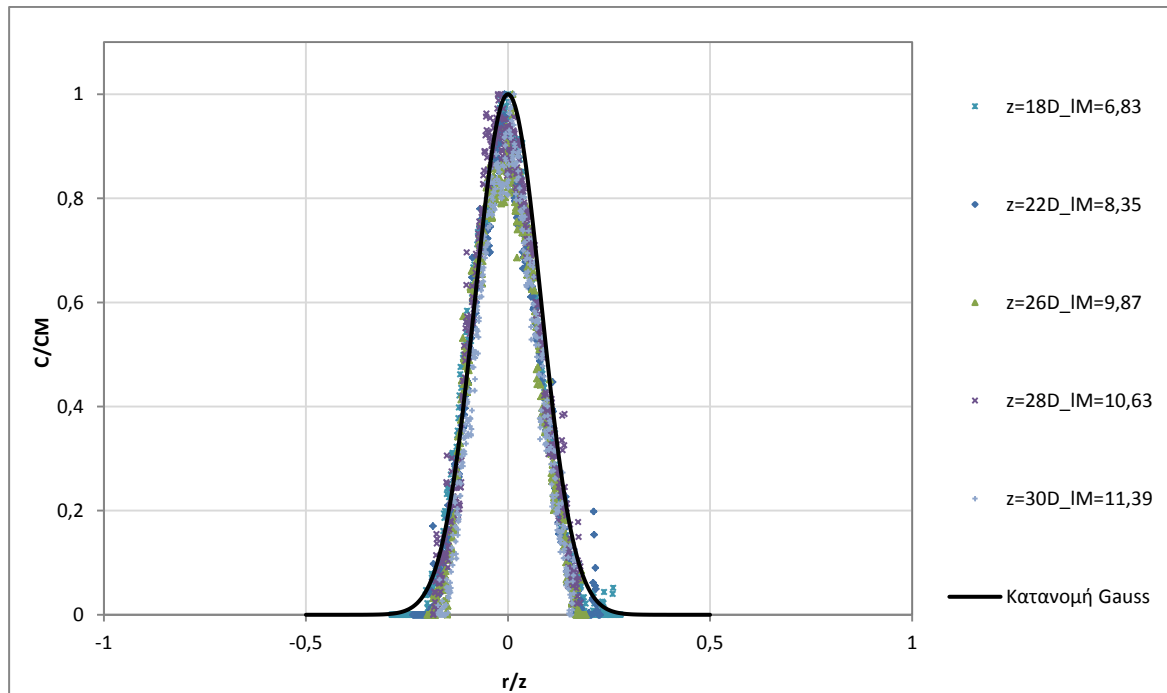
όπου  $P'$  είναι η ισχύς της ακτίνας που εισέρχεται εντός στοιχείου μήκους  $\Delta x$  και  $P''$  είναι η ισχύς που εξέρχεται από αυτήν.

Για την εφαρμογή της σχέσης (4.8) απαιτείται ο προσδιορισμός των συντελεστών απομείωσης και απορρόφησης  $\eta_w$  και  $\varepsilon_0$ , αντίστοιχα. Από πειραματικές διαδικασίες κατά Ferrier et al. (1993), προκύπτει ότι ο συντελεστής απορρόφησης ισούται με  $\varepsilon_0 = 0,00023 (\text{cm}^{-1})(\mu\text{g l}^{-1})^{-1}$  ενώ ως προς τον συντελεστή απομείωσης ισχύει ότι είναι γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσης της Ροδαμίνης (Ferrier et al. 1993) και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας λαμβάνεται σταθερός ίσος με  $\eta_w = 0,008 (\text{cm}^{-1})$ , προσέγγιση που κρίνεται ικανοποιητική.

Για τον υπολογισμό της απομείωσης εφαρμόζεται η σχέση (4.8) θεωρώντας ότι οι ακτίνες “χτυπούν” και διέρχονται κάθετα στην ροή. Επιπρόσθετα θεωρείται ότι απομείωση που υφίσταται καθώς οι ακτίνες διέρχονται μέσα από το περιβάλλον ρευστό (ambient) είναι

αμελητέα. Σημειώνεται ότι το περιβάλλον ρευστό περιέχει νερό αλλά και μικρές συγκεντρώσεις ροδαμίνης.

Βάσει των ανωτέρω και με την χρήση του Excel, πραγματοποιείται υπολογισμός της απομείωσης και καταρτίζονται εκ νέου τα διαγράμματα των κατανομών της μέσης συγκέντρωσης (Σχήμα 4.5). Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται οι κατανομές των συγκεντρώσεων προσεγγίζουν πλέον πολύ καλύτερα την κατανομή Gauss και το διάγραμμα γίνεται συμμετρικό.



**Σχήμα 4.5.** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.6T ύστερα από τον υπολογισμό της απομείωσης

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απομείωση που υφίσταται κατά την διέλευση της ακτινοβολίας εντός της ανωστικής φλέβας λαμβάνεται υπόψη μόνο για την μετατροπή των διαγραμμάτων των κατανομών μέσης συγκέντρωσης σε συμμετρικά. Τα υπόλοιπα δεδομένα επιλέγεται να παρουσιαστούν ως έχει επειδή η απομείωση τα μεταβάλλει σε πολύ μικρό βαθμό.

#### 4.6 ΠΛΑΤΟΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ

Όπως φαίνεται οι κατανομές της αδιάστατης συγκέντρωσης είναι τύπου Gauss συμφωνώντας με τις θεωρητικές εκτιμήσεις. Στην θεωρητική σχέση (4.9) εμφανίζεται το πλάτος της συγκέντρωσης  $b_c$  το οποίο μέσα από την διαστατική ανάλυση για το πλούμιο έχει προκύψει  $b_c = az$  όπου  $a$  σταθερά και  $z$  το κατακόρυφο ύψος από την πηγή.

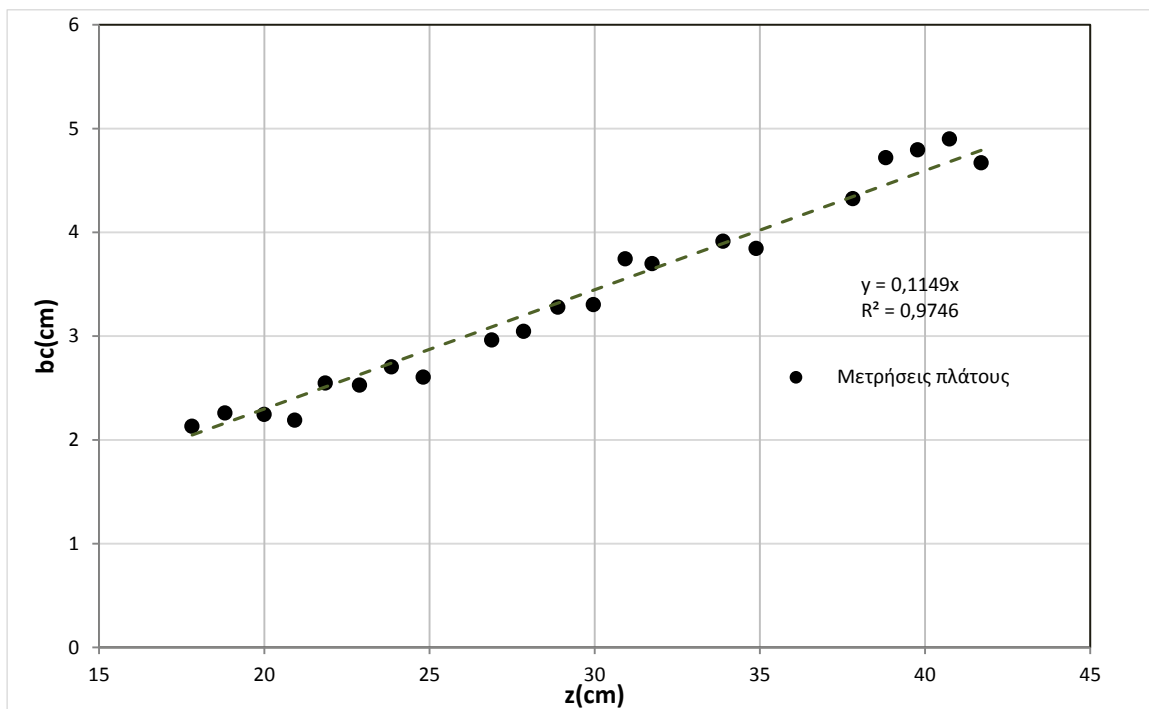
Για τον υπολογισμό του πλάτους λογαριθμίζονται και τα δύο μέλη της σχέσης (2.19) και προκύπτει ότι :

$$\ln\left(\frac{C}{C_M}\right) = -\frac{r^2}{b_c^2} \quad (4.9)$$

Πιο συγκεκριμένα διαιρούνται οι συγκεντρώσεις των διαφόρων σημείων της ροής με την μέγιστη συγκέντρωση στην διατομή και εν συνεχεία γίνεται γραμμική συσχέτιση του πρώτου μέλους της (4.9) με το  $r^2$  δηλαδή την απόσταση κάθε σημείου από τον άξονα υψωμένη στο τετράγωνο. Από την διαδικασία αυτή προκύπτει η κλίση της ευθείας δηλαδή η ποσότητα  $-\frac{1}{b_c^2}$  και τελικά το πλάτος ροής  $b_c$  για κάθε διατομή.

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό του πλάτους, εξαιτίας της απομείωσης που παρατηρείται ιδιαίτερα σε διατομές που απέχουν μεγάλα  $z$  από την πηγή, γίνεται χρήση των σημείων που αντιστοιχούν μονάχα στο πρώτο μισό τμήμα της ανωστικής φλέβας έτσι όπως διέρχεται η ακτινοβολία. Η χρήση σημείων από όλη την ροή οδηγεί σε μικρότερο πλάτος ροής από το πραγματικό εξαιτίας των μειωμένων εντάσεων ακτινοβολίας και αποφεύγεται.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται το πλάτος ροής  $b_c$  συναρτήσει της κατακόρυφης απόστασης από το ακροφύσιο  $z$  για ένα εκ των πειραμάτων (Exp.2S). Στο συγκεκριμένο πείραμα το ημιπλάτος προκύπτει  $b_c = 0,1149 z$ , ίσο με το ημιπλάτος της συγκέντρωσης που προκύπτει από όλα τα πειράματα μαζί (Σχήμα 4.23). Σημειώνεται ότι λήφθηκαν μετρήσεις στην περιοχή του πλουμίου ( $z > 5 I_M$ , στο παρόν πείραμα  $\sim 17$  cm) σε εύρος που δεν υπερβαίνει τη διεπιφάνεια της στρωμάτωσης.

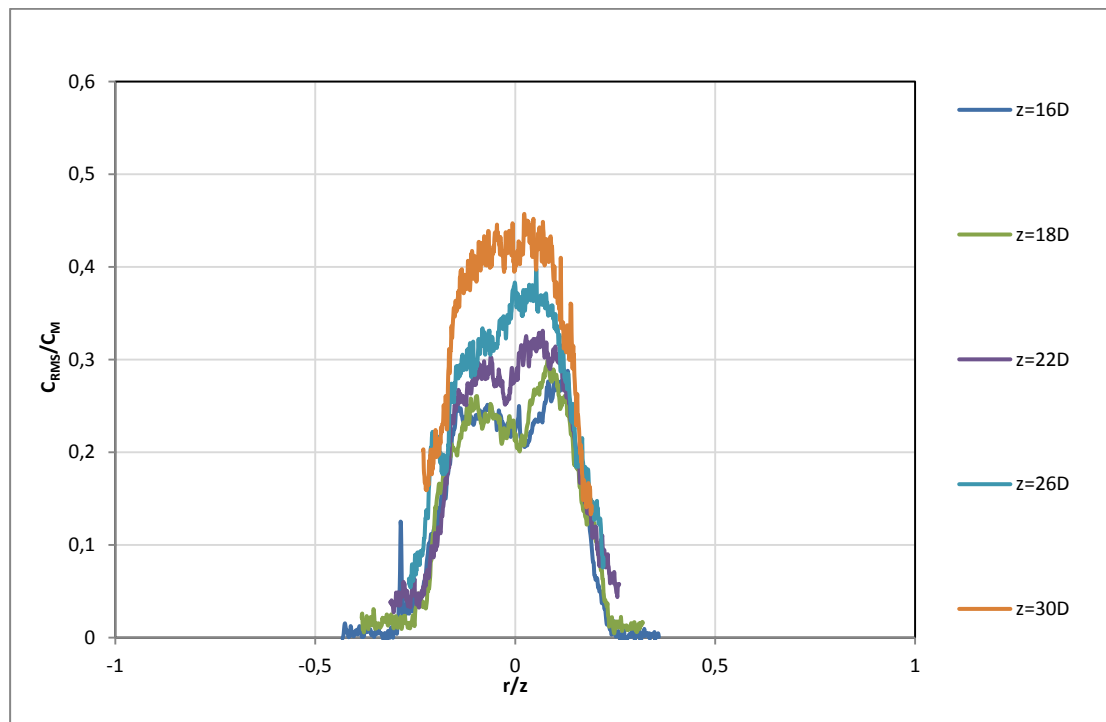


**Σχήμα 4.6.** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.2S

Ενώ για μικρές αποστάσεις και διατομές κοντά στο ακροφύσιο όπου η ροή συμπεριφέρεται ως φλέβα, η χρονική διάρκεια των frames που λαμβάνονται είναι ικανοποιητική, καθώς μεταβαίνουμε σε μεγαλύτερα  $z$  και στην περιοχή του πλουμίου, απαιτείται περισσότερος χρόνος για την πλήρη ομαλοποίηση των δεδομένων. Εντούτοις, θεωρούμενος χρόνος λήψης frames είναι ο μέγιστος δυνατός και η λήψη πολλών σημείων κατά μήκος του άξονα εξασφαλίζει μεγάλη λεπτομέρεια.

#### 4.7 ΕΝΤΑΣΗ ΤΥΡΒΗΣ

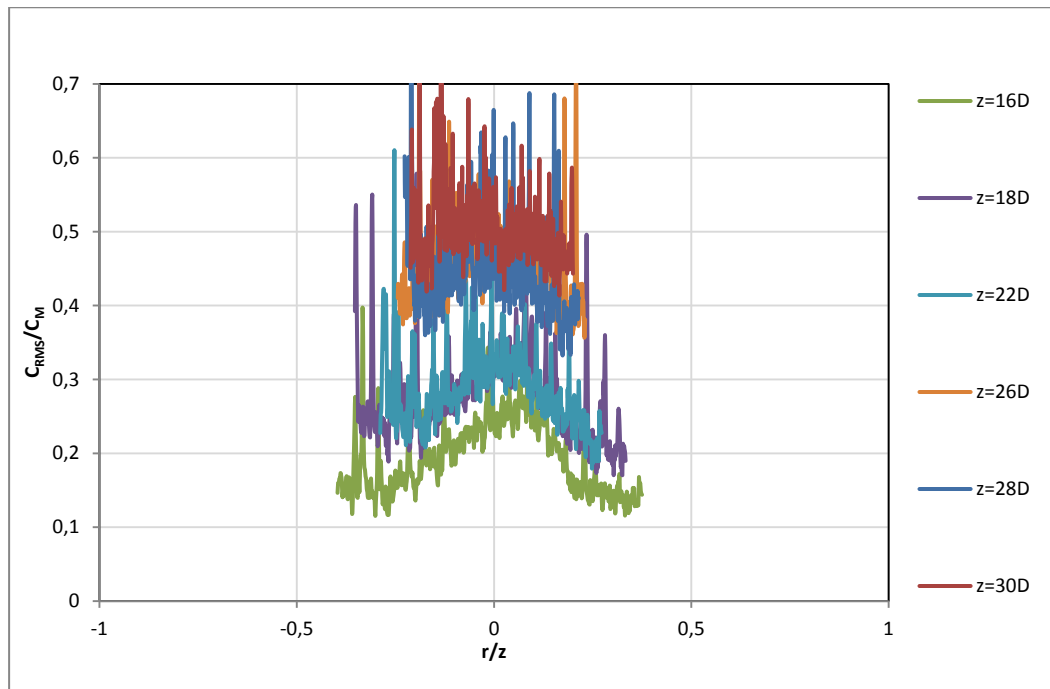
Αναφορικά με την RMS συγκέντρωση, πραγματοποιείται αδιαστατοποίηση αυτής με την  $C_M$  ανά διατομή και προκύπτουν οι κατανομές που απεικονίζονται στα Σχήματα 4.7 και 4.8. για τα πειράματα Expr.9T και Expr.2S, με θερμοκρασιακή διαφορά και διαφορά αλατότητας αντίστοιχα. Ο διαχωρισμός αυτών, εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα αποτελέσματα που παρουσιάζονται ενοποιημένα, οφείλεται στην αξιοσημείωτη διαφορά που παρουσιάζουν μεταξύ τους.



**Σχήμα 4.7.** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.9T

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 4.7 η ένταση της τύρβης για τα πειράματα θερμαινόμενων φλεβών παρουσιάζει την μορφή που αναμένεται από προηγούμενες μελέτες (Papanicolaou & List 1988). Σε κατακόρυφες αποστάσεις μικρότερες των 20 διαμέτρων περίπου εμφανίζονται δυο χαρακτηριστικές κορυφές με τιμή κοντά στο 0,25 περίπου, οι οποίες σταδιακά ενώνονται σε μια. Για αποστάσεις μεγαλύτερες των 30-40 διαμέτρων, αρχίζει η περιοχή του πλήρως ανεπτυγμένου πλουμίου. Εκεί, η ένταση της τύρβης λαμβάνει την μέγιστη τιμή της γύρω στο 0,4 και η καμπύλες πλεόν ταυτίζονται.

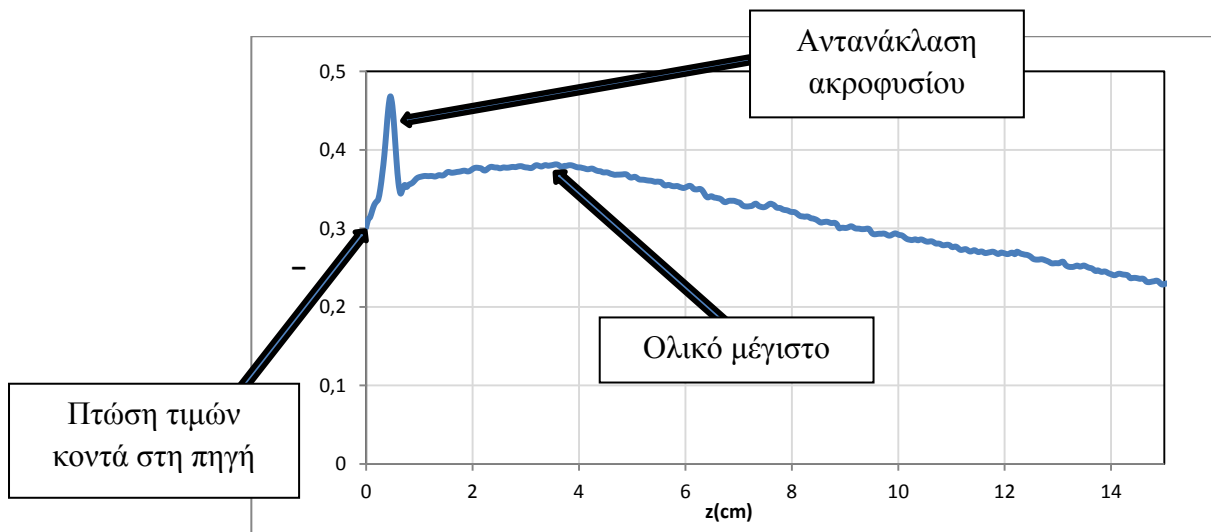
Αντίθετα, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας μεταξύ φλέβας και αποδέκτη, η ένταση της τύρβης εμφανίζει τελείως διαφορετική εικόνα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.8. Η τυπική μορφή των δύο κορυφών εντοπίζεται μονάχα για αποστάσεις μικρότερες των 10 διαμέτρων ενώ μετά τις 15 διαμέτρους η ένταση της τύρβης αυξάνει όσο μεγαλύτερες είναι οι αποστάσεις από το ακροφύσιο, ενώ παράλληλα στο εύρος του πεδίου όπου γίνεται μελέτη της ροής δεν παρατηρείται σημαντική πτώση της καμπύλης καθώς απομακρυνόμαστε από τον άξονα.



**Σχήμα 4.8.** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.2S

#### 4.8 ΑΔΙΑΣΤΑΤΗ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ $C_M$ - ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΓΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΛΑΤΟΤΗΤΑ

Αναφορικά με την μεταβολή της συγκέντρωσης  $C_M$  κατά μήκος του άξονα ισχύει ότι αυτή αδιαστατοποιείται με την αρχική συγκέντρωση  $C_0$ , η τιμή της οποίας προκύπτει από τη μέγιστη φωτεινότητα που εντοπίζεται στον άξονα. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η μεταβολή της έντασης της φωτεινότητας  $I$  (αδιάστατο μέγεθος) για το Exp.3S κατά μήκος του άξονα πριν την αδιαστατοποίηση και την αφαίρεση της φωτεινότητας του αποδέκτη.



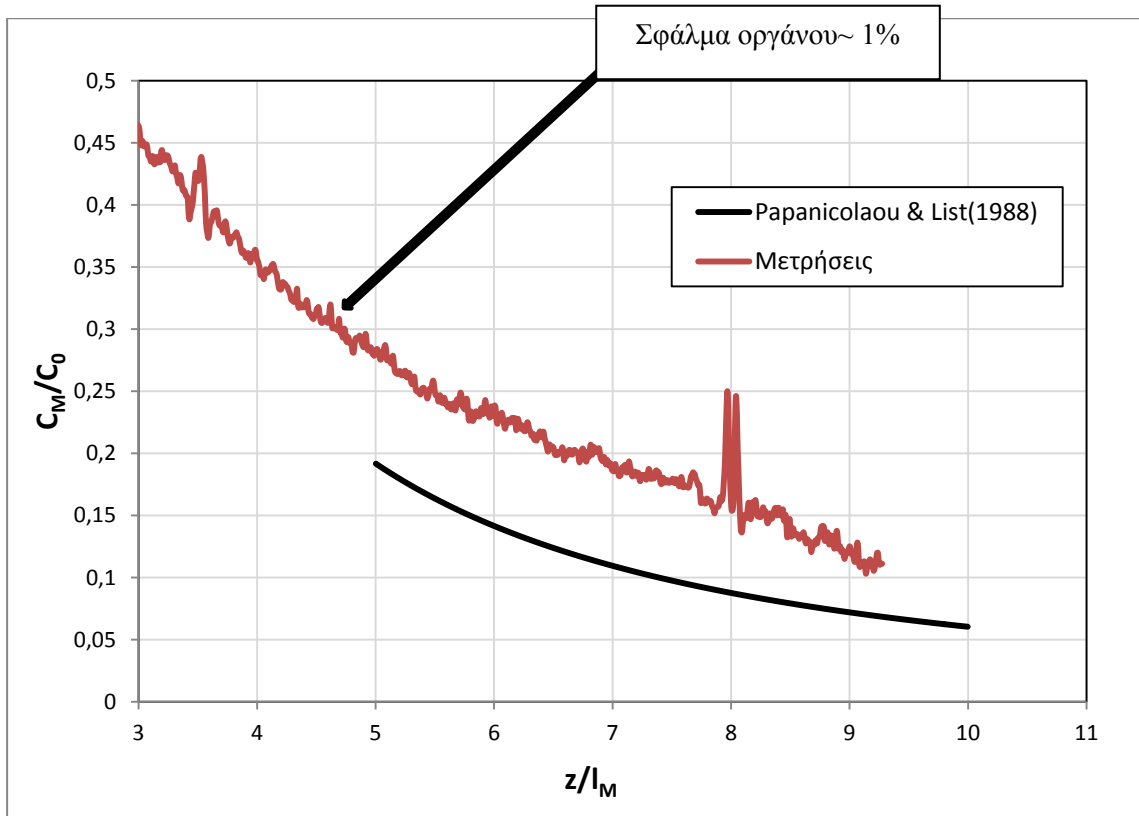
**Σχήμα 4.9.** Μεταβολή της έντασης φωτεινότητας κατά μήκος του άξονα για το πείραμα Exp.3S

Η ένταση της ακτινοβολίας φαίνεται να αυξάνεται κατά την έξοδο της ροής από το ακροφύσιο μέχρι ένα ολικό μέγιστο και εν συνεχεία μειώνεται όπως είναι αναμενόμενο, ενώ ενδιάμεσως παρουσιάζει μια μεγάλη και απότομη αύξηση της τιμής της. Η απότομη αυτή αύξηση δεν αντιστοιχεί σε φωτεινότητα από φθορισμό της ουσίας αλλά σε αντανάκλαση από το ακροφύσιο και παραλείπεται. Ως προς την φαινομενικά πτωτική πορεία της φωτεινότητας σε αποστάσεις πολύ κοντά στην πηγή αυτή οφείλεται στις πιθανώς μεγάλες απορροφήσεις που υφίστανται στον πυρήνα. Συνεπώς σαν μέγιστη τιμή λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί στο ολικό μέγιστο και στο συγκεκριμένο παράδειγμα ίση με 0,38 (αδιάστατη). Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαιτίας των απορροφήσεων η τιμή της  $C_0$  είναι σίγουρα ελαφρώς μεγαλύτερη από αυτή που λαμβάνεται, παρόλα αυτά ελλείψει άλλων δεδομένων κρίνεται ως η βέλτιστη δυνατή.

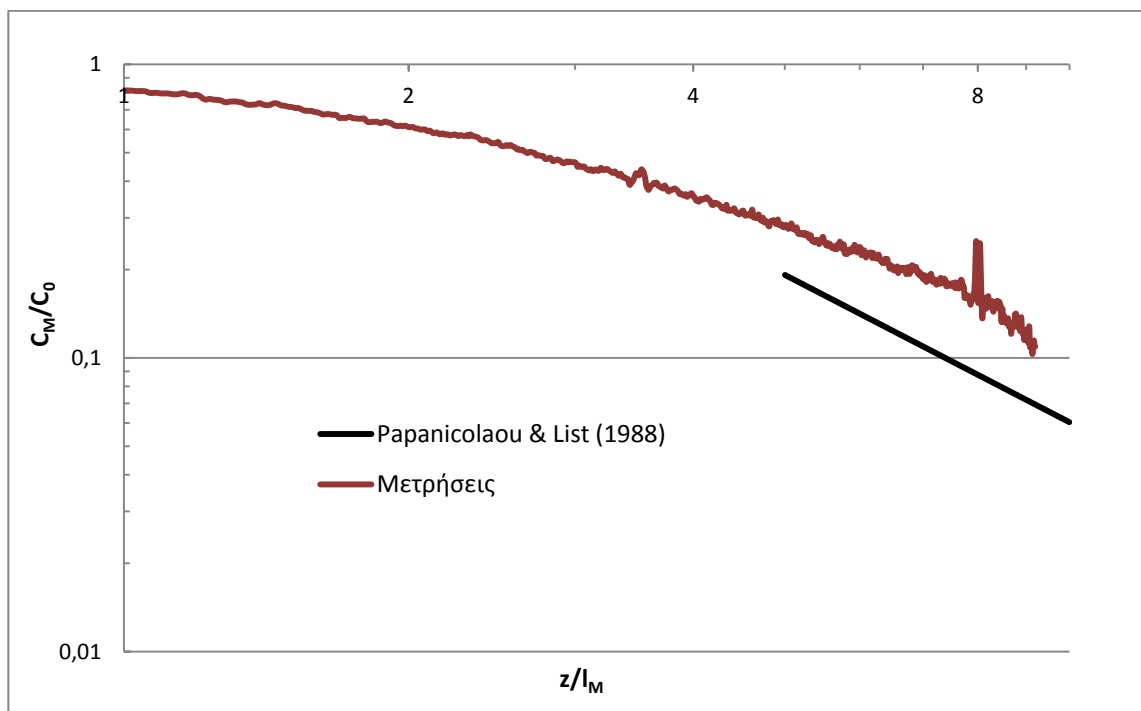
Με την αφαίρεση της τιμής  $c_a$  και την κατάλληλη αδιαστοποίηση προκύπτει το διάγραμμα της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M/C_0$  συναρτήσεως του αδιάστατου μήκους από την πηγή  $z/L_M$ . Στο ίδιο διάγραμμα προστίθεται η μορφή της καμπύλης όπως έχει προσδιοριστεί σε παλαιότερη μελέτη (Paranicolaou & List, 1988). Η εξίσωση της σχέσης των Paranicolaou & List (1988) είναι:

$$\frac{C_M}{C_0} = 11,1 \frac{Q}{B^{\frac{1}{3}} Z^{\frac{5}{3}}} \quad (4.10)$$

Στα Σχήματα 4.10 και 4.11 παρουσιάζεται η μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M/C_0$  για ένα τυπικό πείραμα θερμαινόμενης φλέβας σε καρτεσιανό και λογαριθμικό διάγραμμα, ενώ στα Σχήματα 4.12 και 4.13, φαίνεται η μεταβολή της  $C_M/C_0$  για ένα τυπικό πείραμα με διαφορά αλατότητας αντίστοιχα. Η μικρή διακύμανση των τιμών οφείλεται σε σφάλμα του οργάνου (κάμερα).

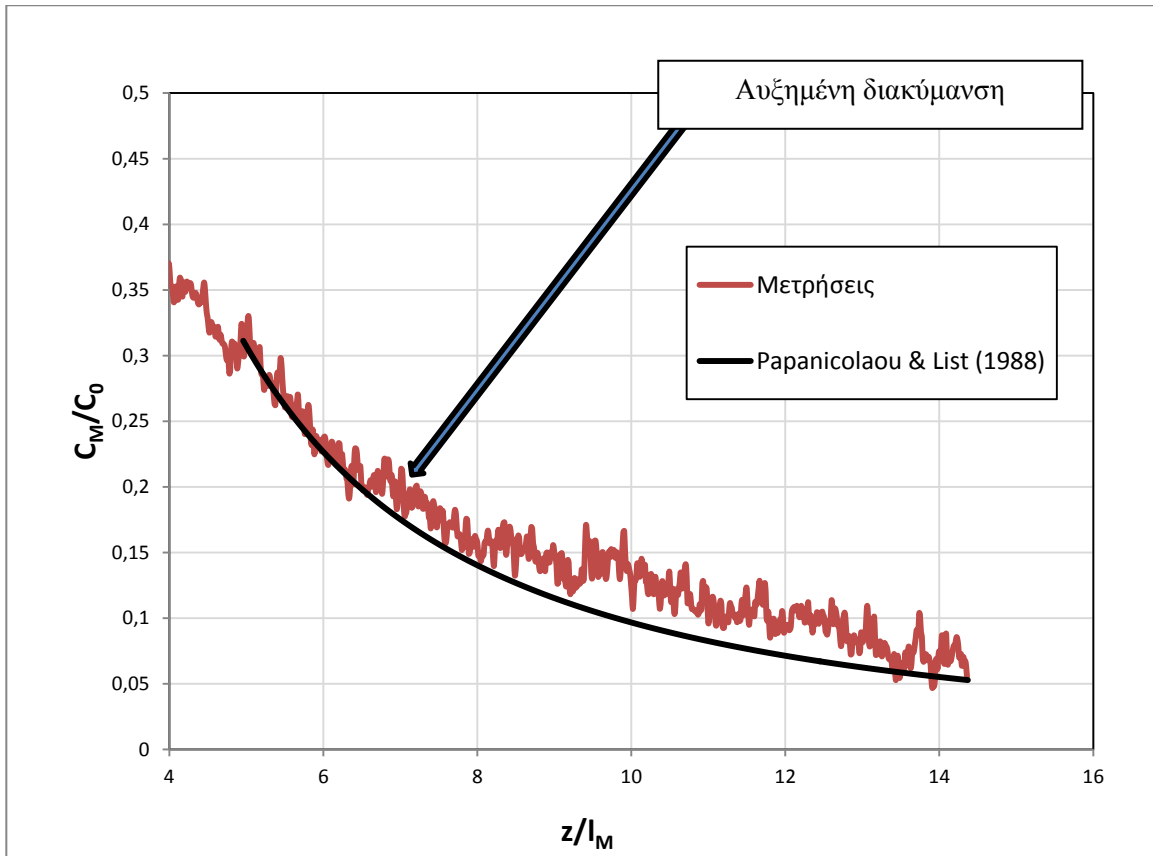


Σχήμα 4.10. Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή (πείραμα Expr.9T)

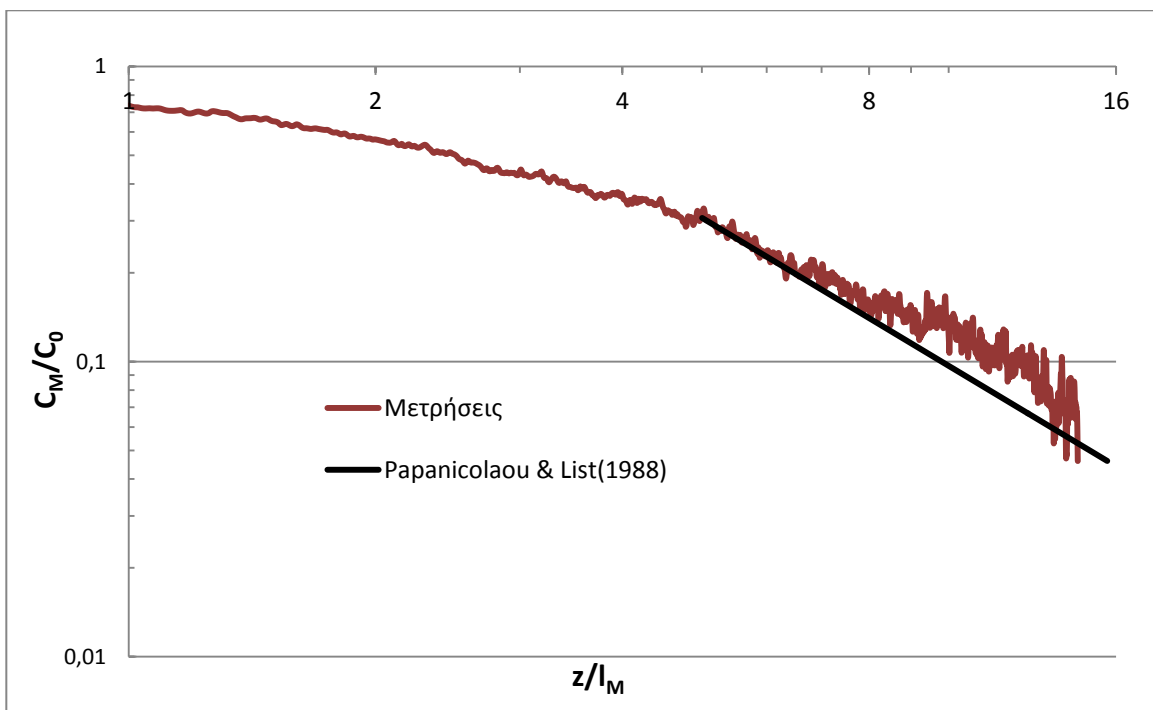


Σχήμα 4.11. Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – (πείραμα Expr.9T) σε λογαριθμικούς άξονες





**Σχήμα 4.12** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή (πείραμα Expr.3S)



**Σχήμα 4.13.** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – (πείραμα Expr.3S) σε λογαριθμικούς άξονες

Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται, τα αποτελέσματα απέχουν από τα προβλεπόμενα θεωρητικά κυρίως στα πειράματα με διαφορά θερμοκρασίας, ενώ στα πειράματα με ύπαρξη άλατος οι μετρήσεις προκύπτουν πλησιέστερα στα προβλεπόμενα. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι στα αποτελέσματα των πειραμάτων με χρήση άλατος η συγκέντρωση παρουσιάζει μια “ταλάντωση- απόκλιση” των τιμών που μολονότι θα μπορούσε να οφείλεται σε συστηματικό σφάλμα του οργάνου, είναι σημαντικά πιο αυξημένη έναντι των πειραμάτων με διαφορά θερμοκρασίας, όπου η καμπύλη είναι ομαλότερη σε μορφή ( σφάλμα οργάνου ~1%). Επιπρόσθετα, η αυξημένη αυτή απόκλιση συμφωνεί με την μορφή των διαγραμμάτων της συγκέντρωσης RMS.

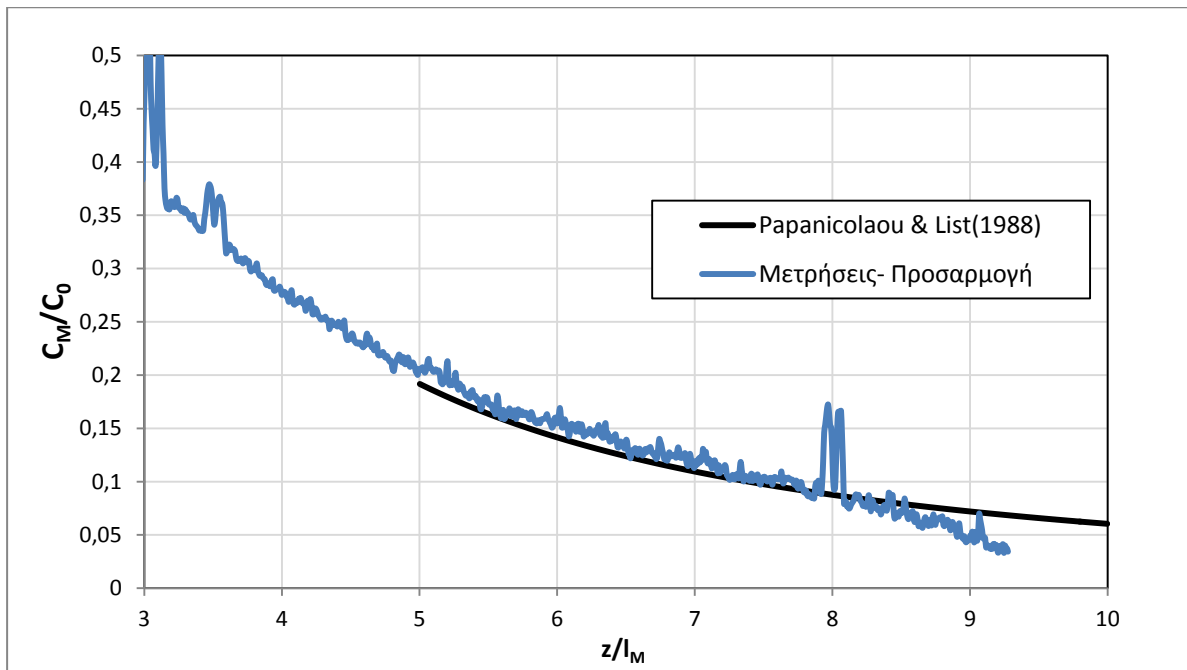
Το σύνολο των παραπάνω αποτελεσμάτων έχει βασιστεί σε βαθμονόμηση που λαμβάνει ίσες θερμοκρασίες και αλατότητες για το ρευστό της ροής και το περιβάλλον ρευστό της δεξαμενής. Στην αρχική βαθμονόμηση, ο λόγος των εντάσεων φθορισμού αντιστοιχούσε σε ίδιο λόγο συγκεντρώσεων. Η αλλαγή όμως της θερμοκρασίας και της αλατότητας σε ένα διάλυμα Ροδαμίνης 6G μεταβάλλει την ένταση φθορισμού του. Η αλλαγή αυτή συμβαίνει μόνο για το ένα από τα δύο ρευστά κάθε φορά. Στα πειράματα με θερμοκρασιακή αύξηση μόνο η ροή είναι θερμαινόμενη και άρα έχει μεταβληθεί η ένταση φθορισμού της και στα πειράματα με αλάτι μόνο το περιβάλλον ρευστό έχει αυξημένη αλατότητα και συνεπώς έχει μεταβληθεί η ένταση φθορισμού του. Ως αποτέλεσμα, πλέον δεν υπάρχει αντιστοίχιση της έντασης φθορισμού και της συγκέντρωσης μεταξύ της ροής και του περιβάλλοντος ρευστού. Κατά συνέπεια πρέπει να ληφθεί υπόψη η αλλαγή της έντασης φθορισμού και να προσαρμοστούν τα δεδομένα.

Ύστερα από μια βιβλιογραφική αναζήτηση, προκύπτει ότι αρχικά η αύξηση της θερμοκρασίας μεταβάλλει γραμμικά σχεδόν την ένταση της ακτινοβολίας φθορισμού της Ροδαμίνης 6G (Kuzkova et al. 2014, Ghifari et al. 2020, Zakiyyan et al. 2021). Οι δημοσιεύσεις αυτές συνοδεύονται από εξισώσεις έντασης φθορισμού βάσει της θερμοκρασίας οι οποίες έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους. Καθώς οι συνθήκες δεν επιτρέπουν την πραγμάτωση μιας πλήρους και ικανοποιητικής βαθμονόμησης εντός του εργαστηρίου, χρησιμοποιείται η γραμμική σχέση των Kuzkova et al. (2014) με κύριο σκοπό την επαλήθευση της πιθανότητας η διαφορά με τα θεωρητικά να οφείλεται στην μεταβολή του φθορισμού.

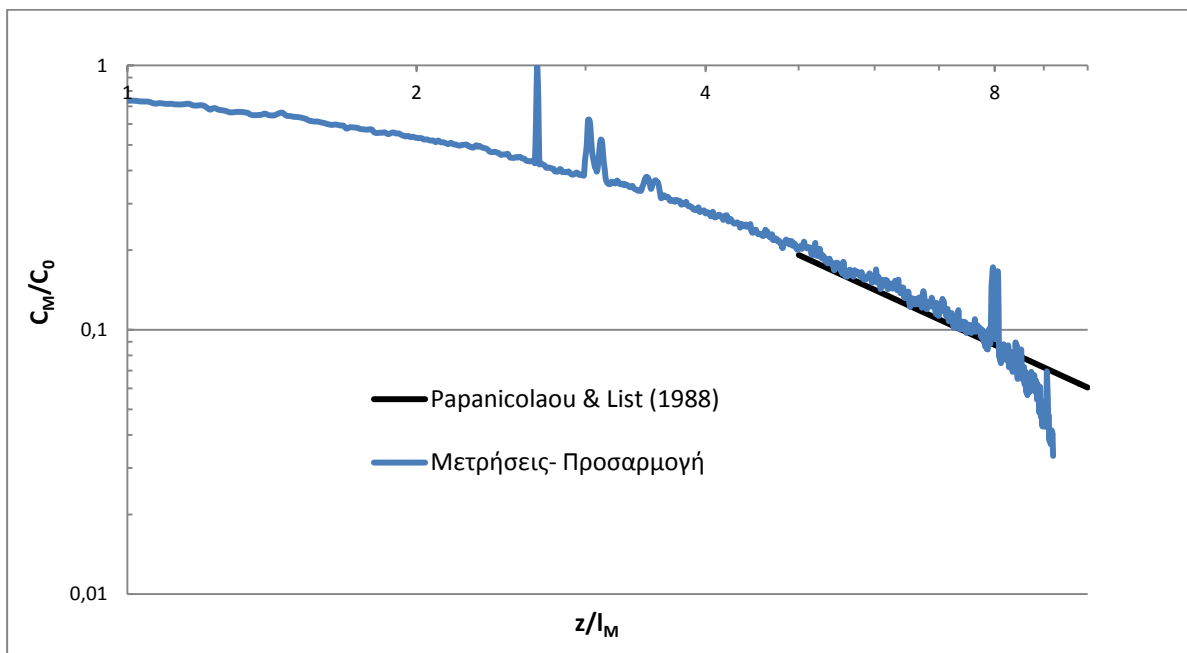
Πιο συγκεκριμένα, η σχετική φωτεινότητα μεταβάλλεται συναρτήσει της θερμοκρασίας από την σχέση (Kuzkova et al. 2014) :

$$I = 0,019T + 0,62 \quad (4.11)$$

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.11) και βάζοντας τις τιμές των θερμοκρασιών του περιβάλλοντος ρευστού  $T_2$  και της ροής  $T_1$  αντίστοιχα στην εκροή προκύπτουν 2 σχετικές εντάσεις φωτεινότητας και ο μεταξύ τους λόγος  $I_1/I_2$ . Στη συνέχεια θεωρώντας τον λόγο αυτό σταθερό κατά μήκος της ροής ( προσέγγιση- ο λόγος σίγουρα μεταβάλλεται) πολλαπλασιάζεται το  $c_a$  με αυτόν ώστε να προσαρμοστεί στην αλλαγή της φωτεινότητας και αφαιρείται από τη μέση συγκέντρωση. Στα Σχήματα 4.14 και 4.15 παρουσιάζεται η μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης από το πείραμα Exp.9T, ύστερα από την παραπάνω προσαρμογή, με τα πειράματα (Exp.6T-11T) να εμφανίζουν αντίστοιχη μορφή.



**Σχήμα 4.14.** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Expr.9T)

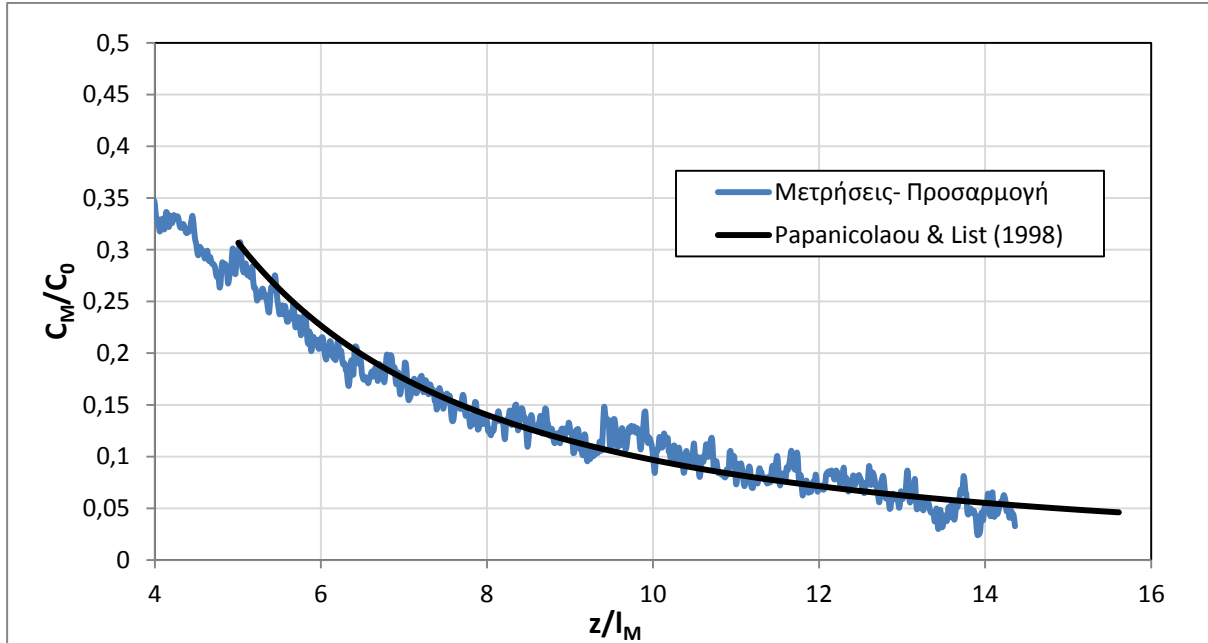


**Σχήμα 4.15.** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Expr.9T) σε λογαριθμικούς άξονες

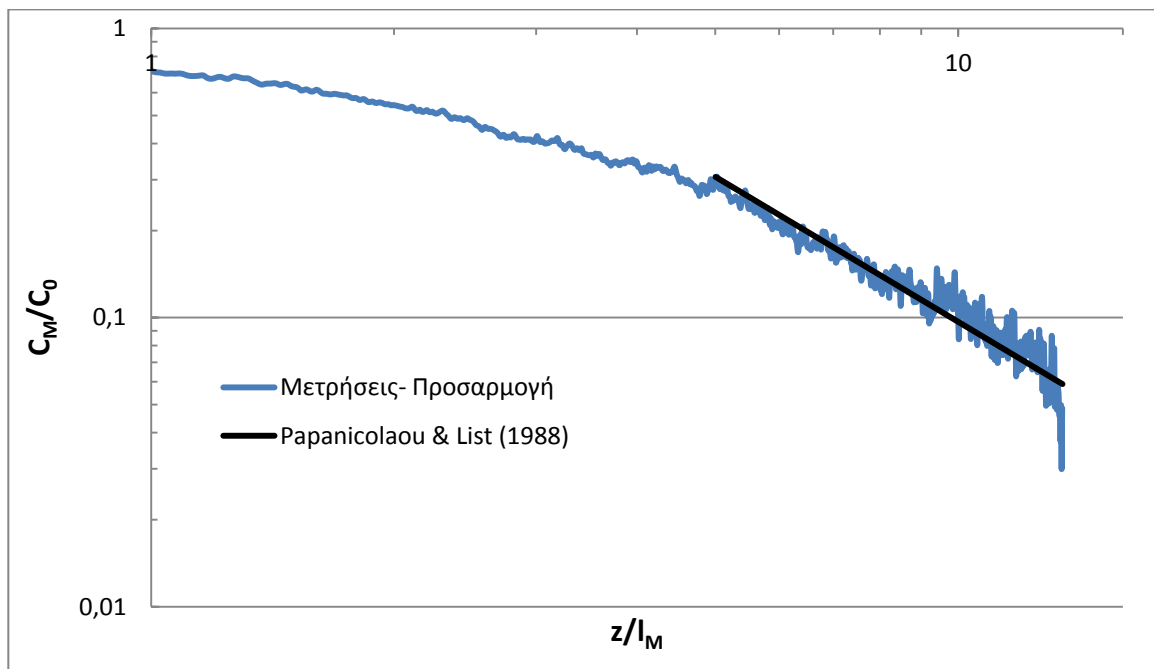
Όπως φαίνεται η μορφή της καμπύλης, προσεγγίζει πλέον πολύ καλύτερα τα αποτελέσματα Papanicolaou & List (1988) ενώ ως προς τις τιμές των καμπυλών όπου στο τέλος ξεφεύγουν, αυτό προκύπτει εξαιτίας απορροφήσεων και σταδιακής στρωμάτωσης.

Σε δεύτερο σκέλος ως προς τα πειράματα με διαφορά αλατότητας, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα η ύπαρξη άλατος εντός διαλύματος Ροδαμίνης να αυξάνει την ένταση της ακτινοβολίας (Chen et al. 2007) σε μικρό βαθμό, περίπου 10%. Κατά συνέπεια, η ένταση

φορισμού του περιβάλλοντος ρευστού αυξάνεται κατά συντελεστή 1,1. Καθώς όμως η ροή ανεβαίνει προς τα πάνω αναμιγνύεται με το αλάτι και αυξάνει ο φορισμός της. Θεωρώντας προσεγγιστικά ότι η αύξηση αυτή είναι σταθερή και ίση με 1,1 προσαρμόζονται αναλόγως τα αποτελέσματα. Στα Σχήματα 4.16 και 4.17 παρουσιάζεται η μεταβολή της αξονικής συγκέντρωσης ύστερα από την προσαρμογή από το πείραμα Exr.3S. με τα υπόλοιπα πειράματα να εμφανίζουν παρόμοια μορφή.



**Σχήμα 4.16.** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Exr.3S)



**Σχήμα 4.17.** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες – τιμές ύστερα από προσαρμογή (πείραμα Exr.3S)

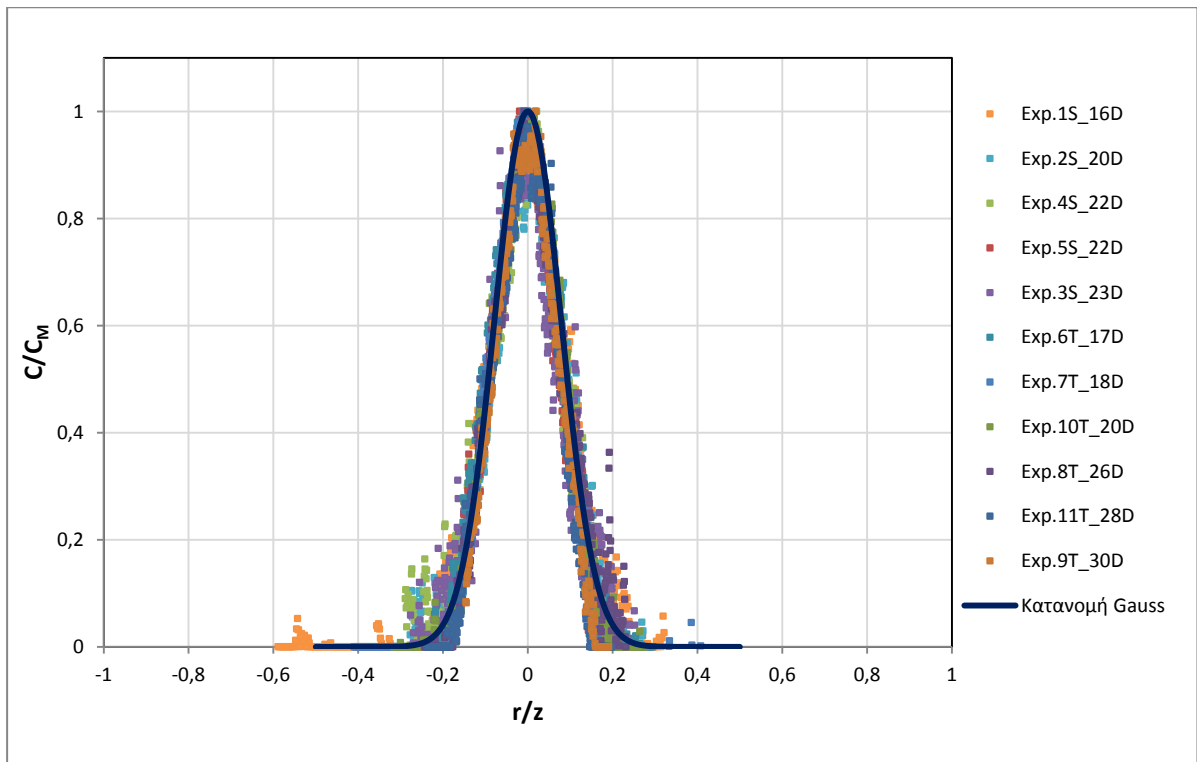
Λόγω του ότι δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθεί μια ολοκληρωμένη βαθμονόμηση που να λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές της θερμοκρασίας και της αλατότητας, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγιναν προσαρμογές (διορθώσεις) στη βαθμονόμηση και ειδικότερα στις εντάσεις φωτεινότητας του περιβάλλοντος, με βάση αποτελέσματα μιας εργασίας. Σημειώνεται ότι οι εργασίες της βιβλιογραφίας παρουσιάζουν μη αμελητέες διαφορές μεταξύ τους ως προς τη μορφή της γραμμικής σχέσης έντασης ακτινοβολίας - θερμοκρασίας. Στο μέλλον, πιθανώς μια πλήρης βαθμονόμηση συναρτήσει της θερμοκρασίας, της αλατότητας, της συγκέντρωσης της Ροδαμίνης και της έντασης φθορισμού, να φωτίσει ακόμα περισσότερο τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου PLIF.

Σημειώνεται επίσης ότι η συμπεριφορά της κάθε ουσίας φθορισμού στην αύξηση της θερμοκρασίας (ακόμα και μεταξύ των Ροδαμινών) είναι εντελώς διαφορετική, κατάσταση που δημιουργεί περισσότερες προκλήσεις. Το γεγονός αυτό έχει επισημανθεί σε παλιότερες μελέτες (Wang & Law 2002). Χαρακτηριστικά αναφέρεται η Ροδαμίνη 6G και η Ροδαμίνη Β που με την αύξηση της θερμοκρασίας παρουσιάζουν αύξηση και μείωση αντίστοιχα της έντασης της ακτινοβολίας φθορισμού τους.

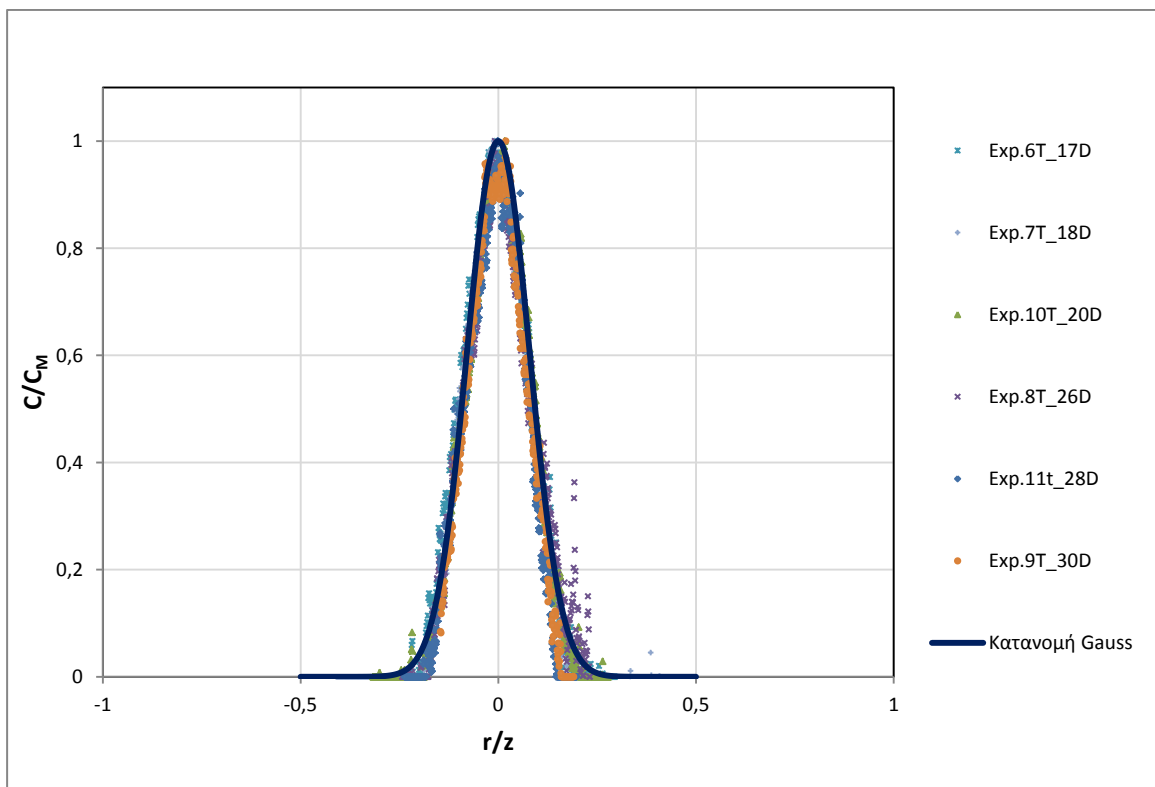
#### **4.9. ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

Στο παράρτημα Α παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα διαγράμματα για κάθε πείραμα ξεχωριστά.

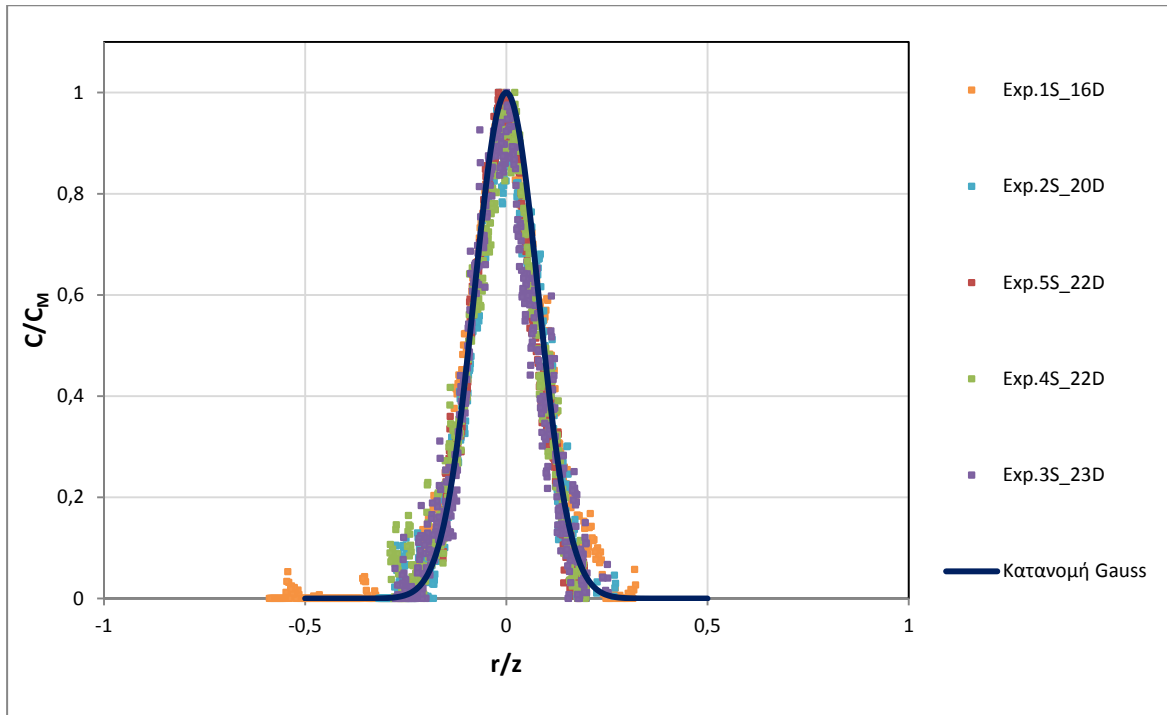
Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα στα οποία έχουν προστεθεί αποτελέσματα από όλα τα πειράματα. Αρχικά ως προς τις κατανομές μέσης συγκέντρωσης προστίθενται καμπύλες από όλα τα πειράματα για ένα πλήθος διαφορετικών διατομών καθώς και η θεωρητική κατανομή Gauss με πλάτος συγκέντρωσης, ίσο με αυτό που βρέθηκε στην μελέτη Papanicolaou & List (1988) ( $b_c = 0,112 z$ ). Επιπλέον παρουσιάζονται δύο διαγράμματα με τα αποτελέσματα ξεχωριστά για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά και εκείνα με διαφορά αλατότητας. Όπως φαίνεται οι κατανομές των πειραμάτων με αλάτι παρουσιάζουν.



**Σχήμα 4.18** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή, για το σύνολο των πειραμάτων, ύστερα από τον υπολογισμό της απομείωσης

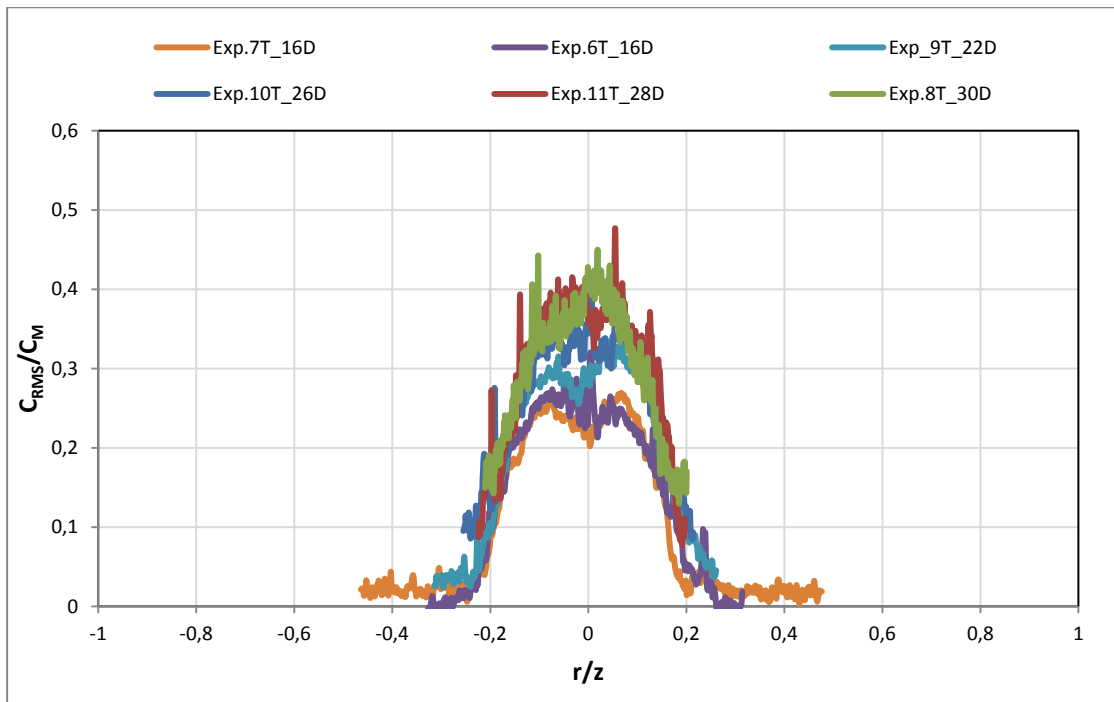


**Σχήμα 4.18** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή ύστερα από τον υπολογισμό της απομείωσης, για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά..

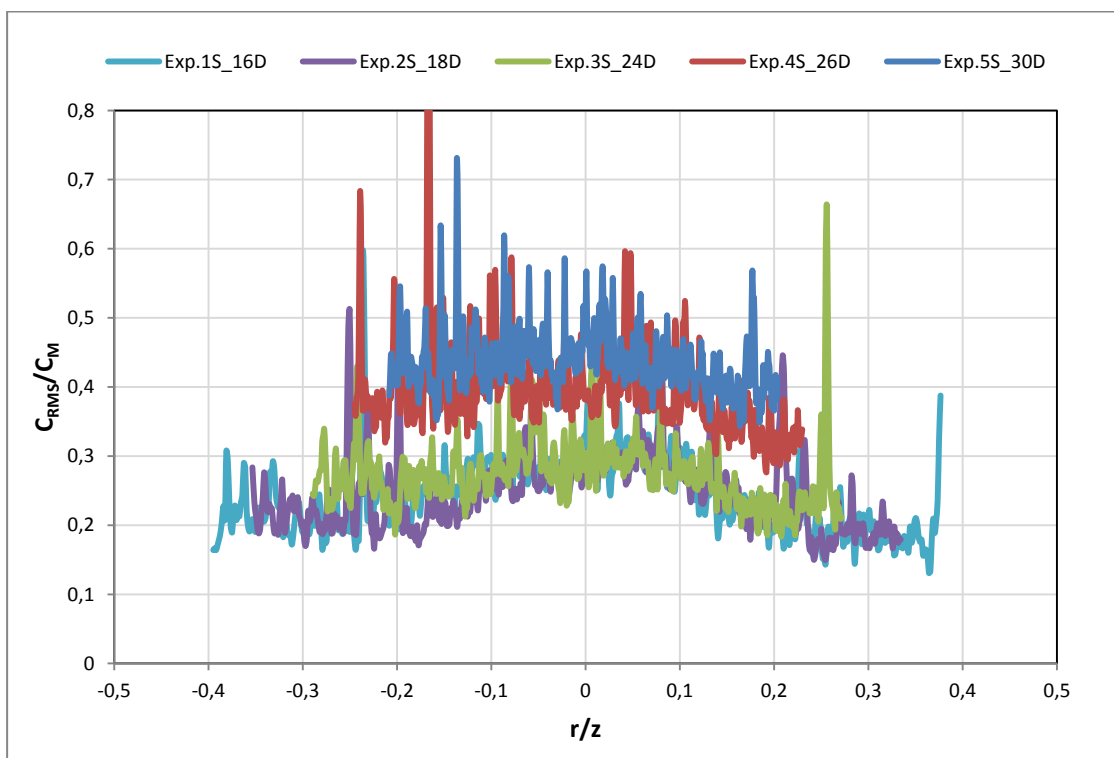


**Σχήμα 4.19** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή ύστερα από τον υπολογισμό της απομείωσης, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας

Αναφορικά με την συγκέντρωση RMS, καταρτίζονται 2 διαφορετικά διαγράμματα (Σχήματα 4.21 και 4.22) για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά και διαφορά αλατότητας. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται, η έντονη διαφοροποίησή τους παρατηρείται σε όλα τα πειράματα.



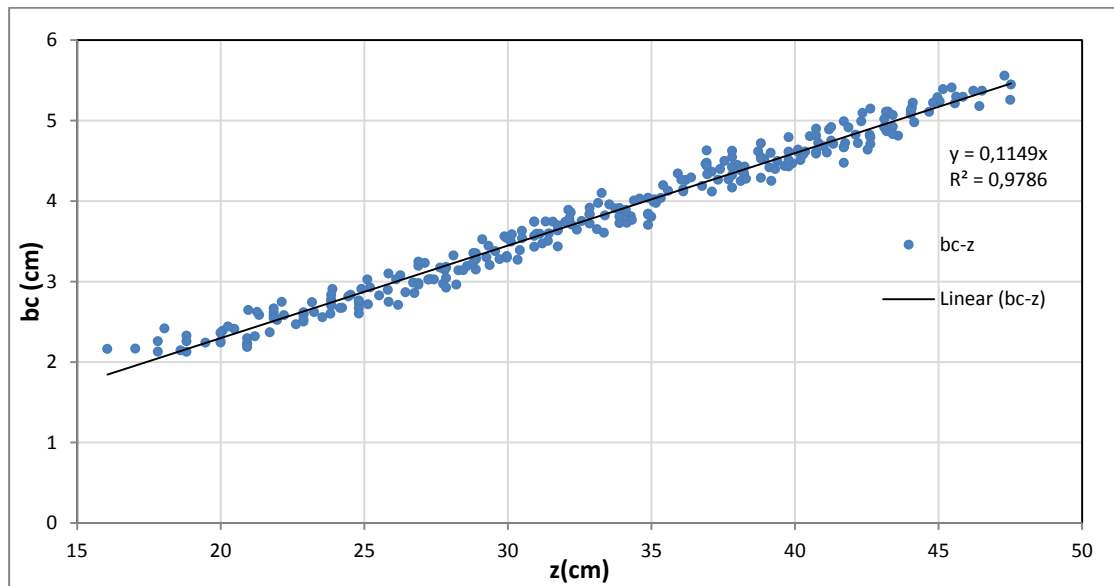
**Σχήμα 4.20.** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για τα πειράματα με θερμοκρασιακή διαφορά



**Σχήμα 4.21.** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας



Ως προς το πλάτος της συγκέντρωσης προστίθενται όλα τα σημεία από όλα τα πειράματα μαζί δημιουργώντας ένα “νέφος” σημείων και προσαρμόζεται (fitting) η ευθεία γραμμή  $b_c = 0,1149 z$ .



**Σχήμα 4.22.** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το σύνολο των πειραμάτων

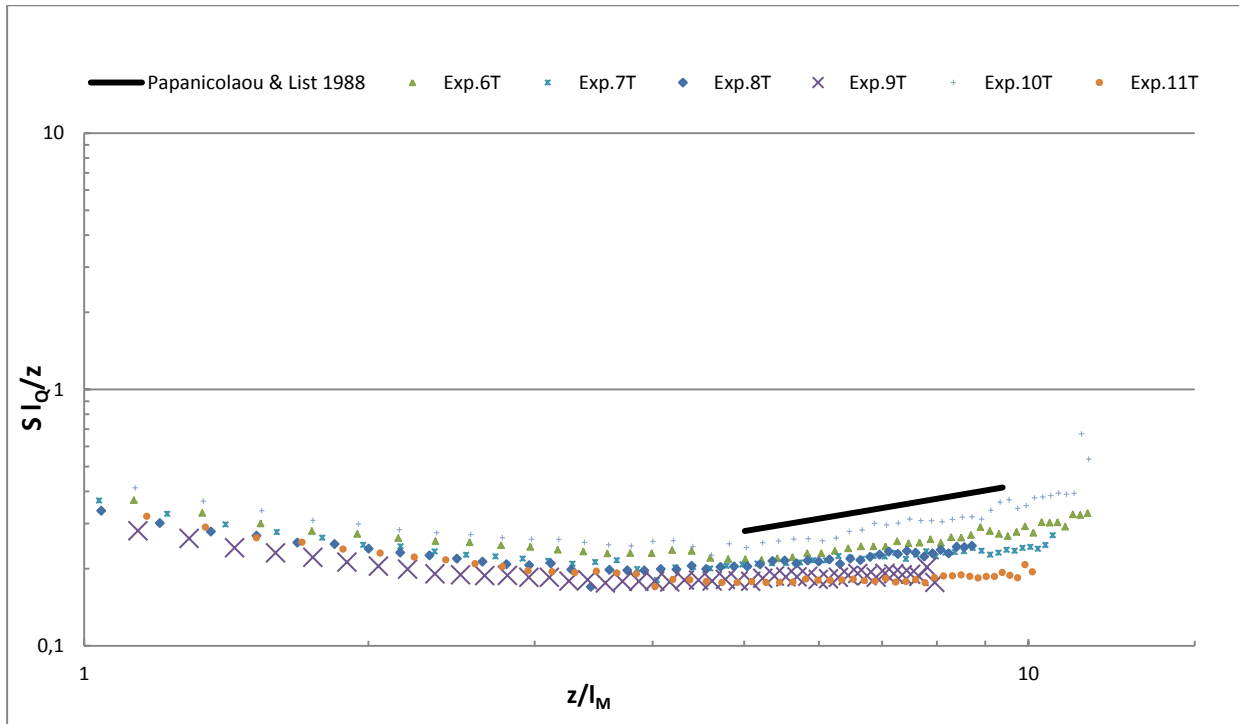
Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα για την μεταβολή της αδιάστατης συγκέντρωσης κατά μήκος του άξονα για τα πειράματα με διαφορά θερμοκρασίας δίχως την προαναφερθείσα διόρθωση, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας πριν και μετά την διόρθωση καθώς και για όλα τα πειράματα μαζί διορθωμένα. Για λόγους σύγκρισης στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζεται καθώς και η καμπύλη των Papanicolaou & List (1988). Σημειώνεται πως για να γίνει δυνατή η τοποθέτηση όλων επί ενός διαγράμματος έχει πραγματοποιηθεί κατάλληλη αδιαστατοποίηση:

$$\frac{\left(\frac{C_0}{C_M}\right) Q}{z M^{\frac{1}{2}}} = \frac{\left(\frac{C_0}{C_M}\right) l_Q}{z} = \frac{S l_Q}{z} \quad (4.12)$$

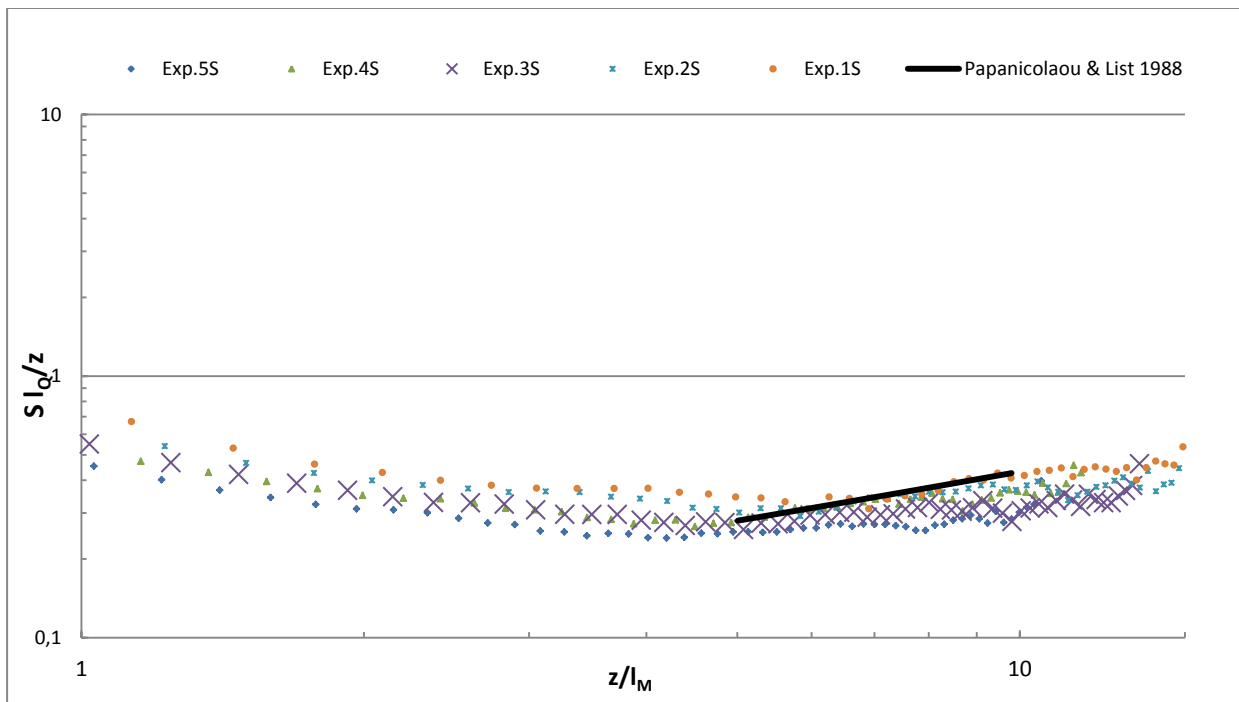
όπου η καμπύλη των Papanicolaou & List (1988) προβλέπει:

$$\frac{\left(\frac{C_0}{C_M}\right) Q}{z M^{\frac{1}{2}}} = 0,09 \left(\frac{z}{l_M}\right) \quad (4.13)$$

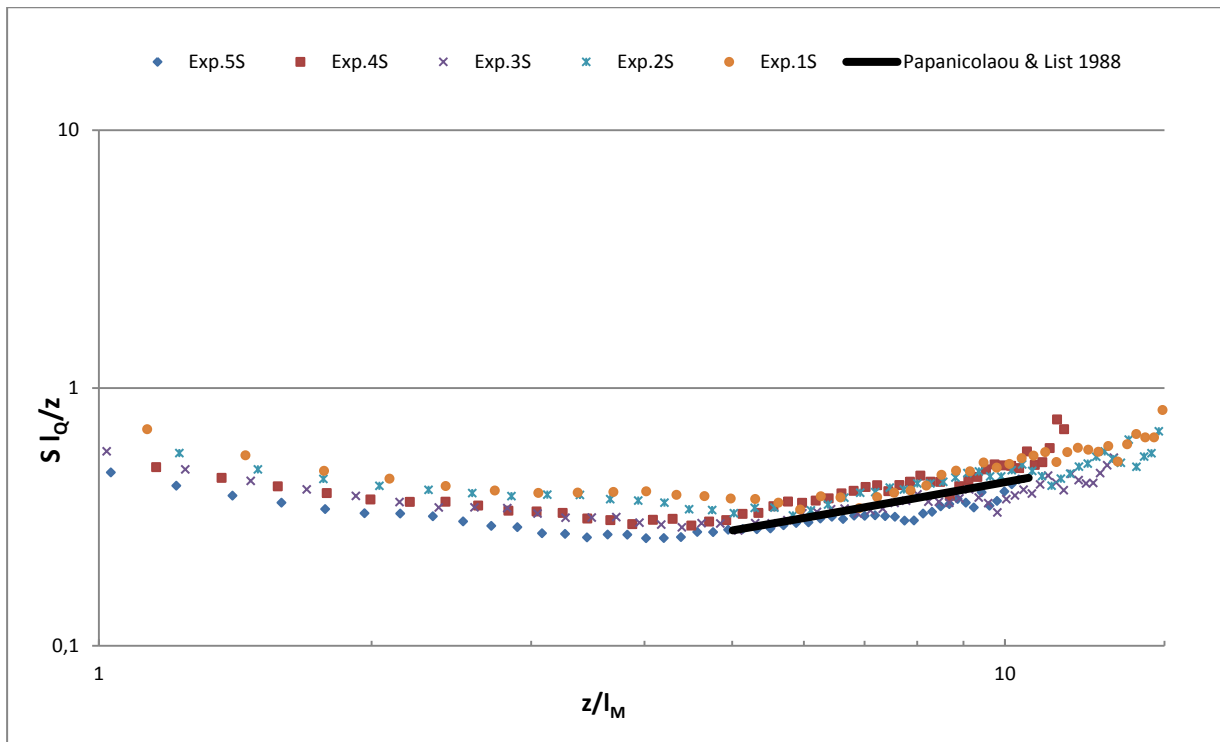
Από την μορφή των διαγραμμάτων είναι φανερή η διαφορά των αποτελεσμάτων πριν και μετά την διόρθωση της απομείωσης και για τις δύο κατηγορίες πειραμάτων, με τα “διορθωμένα” αποτελέσματα να βρίσκονται πλησιέστερα στα αποτελέσματα των Papanicolaou & List (1988).



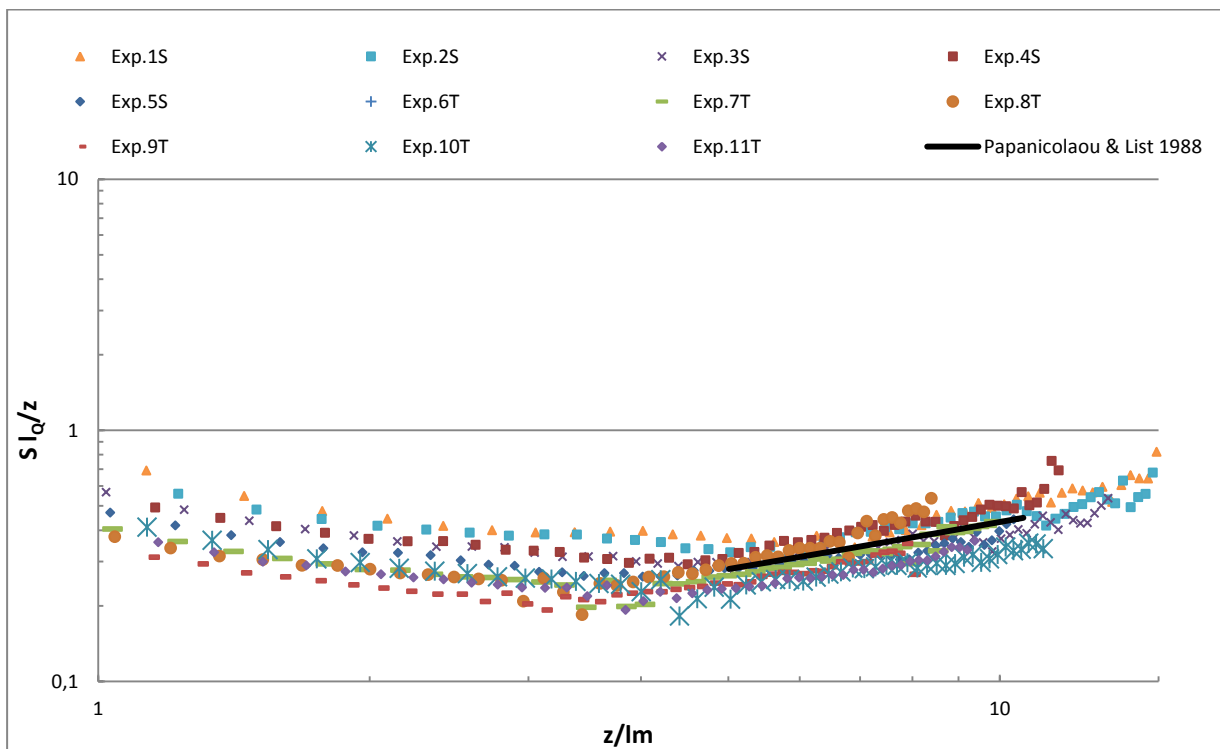
**Σχήμα 4.23** Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για τα πειράματα με διαφορά θερμοκρασίας πριν την προσαρμογή – διόρθωση



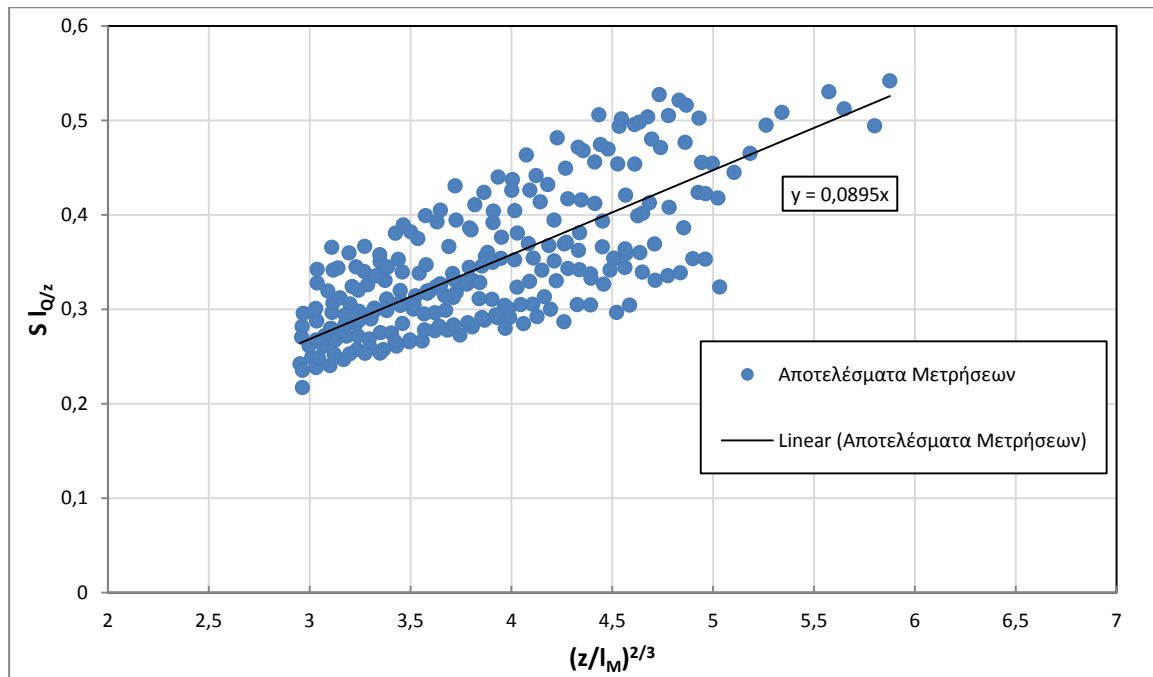
**Σχήμα 4.24** Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας πριν την προσαρμογή – διόρθωση



**Σχήμα 4.25.** Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για τα πειράματα με διαφορά αλατότητας μετά την προσαρμογή – διόρθωση



**Σχήμα 4.26.** Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες, για το σύνολο των πειραμάτων μετά την προσαρμογή –διόρθωση



**Σχήμα 4.28.** Μεταβολή της ελάχιστης αραίωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή, για το σύνολο των πειραμάτων μετά την προσαρμογή –διόρθωση

Στο σχήμα 4.28, λαμβάνονται τιμές για το διάστημα  $l_M > 5$  και πριν τη στρωμάτωση για το σύνολο των πειραμάτων. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται υπάρχει μεγάλη διασπορά τιμών. Ωστόσο η σταθερά 0,0895 που προέκυψε από τη γραμμική συσχέτιση συμφωνεί με τις προτεινόμενες στη βιβλιογραφία (Πίνακας 4.1).

Συνοψίζοντας, στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι σταθερές που προέκυψαν για το πλάτος της συγκέντρωσης και για την ελάχιστη αραίωση κατά μήκος του άξονα στα πλαίσια της παρούσας εργασίας καθώς και οι σταθερές προηγούμενων εργασιών για σύγκριση.

**Πίνακας 4.1** Παρουσίαση προτεινόμενων παραμέτρων για κυκλικά πλούμια

$\alpha/\alpha$	Παρούσα εργασία	Fischer et al. (1979)	Papanicolaou & List (1988)	Wang & Law (2002)
$bc(z)$	$0,1149z$	$0,12z$	$0,112z$	$0,109z$
$\frac{C_M}{C_0}$	$11,18 \frac{Q}{B^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}}$	$9,1 \frac{Q}{B^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}}$	$11,1 \frac{Q}{B^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}}$	$11,3 \frac{Q}{B^{\frac{1}{3}} z^{\frac{5}{3}}}$
$\frac{S l_Q}{z}$	$0,0895 \left(\frac{z}{l_M}\right)^{\frac{2}{3}}$	$0,11 \left(\frac{z}{l_M}\right)^{\frac{2}{3}}$	$0,09 \left(\frac{z}{l_M}\right)^{\frac{2}{3}}$	$0,0885 \left(\frac{z}{l_M}\right)^{\frac{2}{3}}$

#### 4.10.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν συνολικά 11 πειράματα με την τεχνική PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence) για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων κατά μήκος της ροής ανωστικής φλέβας για την περιοχή του πλουμίου ( $z > 5 I_M$ ). Η απαραίτητη πυκνομετρική διαφορά επετεύχθη με αύξηση της θερμοκρασίας του υγρού της φλέβας (θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ υγρού φλέβας και αποδέκτη) για 6 εκ των πειραμάτων και με αύξηση της αλατότητας του περιβάλλοντος υγρού (διαφορά αλατότητας μεταξύ υγρού φλέβας και αποδέκτη) για 5 εκ των πειραμάτων. Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή των πειραμάτων και ανάλυση των αποτελεσμάτων συνοψίζονται παρακάτω.

- 1) Η μέθοδος PLIF, πραγματοποιώντας τη μελέτη χωρίς να παρεμβαίνει στην ροή της ανωστικής φλέβας, επιτυγχάνει μεγάλη ακρίβεια στην λήψη των αποτελεσμάτων. Το γεγονός αυτό καθιστά την μέθοδο ιδανική για την μελέτη τέτοιων ροών. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται για την αποφυγή μικροσφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν από παράγοντες όπως οι αντανακλάσεις επί των γυάλινων τοιχωμάτων της δεξαμενής που κατέστησαν αναγκαία την κάλυψη των επίμαχων επιφανειών.
- 2) Το πλάτος της κατανομής της συγκέντρωσης δεν παρουσιάζει διαφορά ανάμεσα στα πειράματα με διαφορά αλατότητας και εκείνα με διαφορά θερμοκρασίας και προέκυψε  $b_c(z)=0.1149z$  που συμφωνεί με τα αποτελέσματα παλαιότερων μελετών (Fischer et al. 1979, Papanicolaou & List 1988).
- 3) Οι κατανομές της μέσης συγκέντρωσης σε κάθε διατομή προσεγγίζουν ικανοποιητικά τη θεωρητική κατανομή μορφής Gauss. Στα πειράματα με διαφορά αλατότητας οι καμπύλες παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις έναντι των πειραμάτων με διαφορά θερμοκρασίας. Σημειώνεται ότι στα πειράματα με διαφορά αλατότητας έχουμε μικρότερους αριθμούς Reynolds.
- 4) Η κατανομή της RMS συγκέντρωσης διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το είδος του πειράματος. Στις θερμαινόμενες φλέβες, η ένταση των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης εμφανίζει δύο κορυφές (χαρακτηριστική μορφή στην απλή φλέβα) με τιμές κοντά στο 0,3 σε αποστάσεις γύρω στα  $5I_M$ . Για αποστάσεις μεγαλύτερες των  $30D-40D$  (διαμέτρων) από την εκροή, οι δύο κορυφές ενώνονται σε μία, με τιμή που κυμαίνεται γύρω στο 0,4. Η μορφή αυτή είναι τυπική για τα πλούμια και έχει παρατηρηθεί σε παλιότερες μελέτες (Papanicolaou & List 1988). Εντούτοις, στα πειράματα με διαφορά αλατότητας, η συγκέντρωση RMS δεν φαίνεται να μειώνεται στη διατομή της φλέβας.
- 5) Ως προς την μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης  $C_M$  κατά μήκος του άξονα, ισχύει ότι μη λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή αλλαγή της φωτεινότητας λόγω μεταβολών των συνθηκών (αύξηση θερμοκρασίας και

αλατότητας), τα αποτελέσματα διαφέρουν από αποτελέσματα της βιβλιογραφίας. Εντούτοις, χρησιμοποιώντας υπολογισμούς από παλαιότερες μελέτες για την επίδραση της θερμοκρασίας και της αλατότητας στην ένταση του φθορισμού, έγιναν διορθώσεις-προσαρμογές στη βαθμονόμηση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν τελικά συμφωνούν ικανοποιητικά με αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

- 6) Οι αδιάστατες τιμές της ελάχιστης αραίωσης και της αξονικής συγκέντρωσης προέκυψαν 0,0895 και 11,18 αντίστοιχα και συμφωνούν με αποτελέσματα παλαιότερων μελετών, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.
- 7) Στο μέλλον, χρήσιμη θα ήταν η προσπάθεια διεξαγωγής μιας πλήρους βαθμονόμησης μεταξύ έντασης φθορισμού και συγκέντρωσης Ροδαμίνης που να λαμβάνει υπόψη τις επιδράσεις της μεταβολής της θερμοκρασίας και της αλατότητας.

## 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική Βιβλιογραφία

Παπακωνσταντής Η.Γ. (2017). Μηχανική διάθεσης υγρών αποβλήτων σε υδάτινο αποδέκτη και αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Διαφάνειες στα πλαίσια του μαθήματος “Περιβαλλοντική Υδραυλική”, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Παπακωνσταντής Η.Γ. (2009). Τυρβώδεις κυκλικές φλέβες αρνητικής άνωσης υπό γωνία σε ακίνητο ομογενή αποδέκτη. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Παπανικολάου Π.Ν. (2017). Τυρβώδεις ανωστικές φλέβες-Εισαγωγή. Σημειώσεις στα πλαίσια του μαθήματος “Προχωρημένη Περιβαλλοντική Υδραυλική” ΔΠΜΣ “Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σολωμού Π. (2022). Μετρήσεις σε κατακόρυφες κυκλικές τυρβώδεις φλέβες με την τεχνική Laser Induced Fluorescence (LIF). Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.

### Διεθνής Βιβλιογραφία

Baines W.D., Turner J.S., Campbell I.H. (1990). Turbulent fountains in an open chamber. *J. Fluid Mech.* 212, 557–592.

Chen C.J., Rodi W. (1980). *Vertical turbulent buoyant jets: A review of experimental data*. Oxford and New York, Pergamon Press (HMT - Science and Applications of Heat and Mass Transfer. v4, 94.

Dimitriadis P. (2017). Hurst-Kolmogorov dynamics in hydroclimatic processes and in the microscale of turbulence. PhD Thesis, School of Civil Engineering, National Technical University of Athens, Athens.

Dimitriadis P., Liveri-Dalaveri M., Kaldis A., Kotsalos C., Papacharalampous G., and Papanicolaou P. (2012). Zone of flow establishment in turbulent jets. European Geosciences Union General Assembly 2012, Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, Vienna, EGU2012-12716, European Geosciences Union.

Dimotakis P.E., MiakeLye R.C., Papantoniou D.A. (1983). Structure and dynamics of round turbulent jets. *Phys. Fluids* 26(11), 3185-3192.

Ferrier A.J., Funk D.R., Roberts P.J.W. (1993). Application of optical techniques to the study of plumes in stratified fluids. *Dynamics of Atmospheres and Oceans.* 20(1-2), 155-183.

Fischer H.B., List E.J., Koh R.C.Y., Imberger J., Brooks N.H. (1979). *Mixing in inland and coastal waters*. Academic Press Inc.

George W.K., Albert R.L., Tamanini F. (1977). Turbulence measurements in an axisymmetric buoyant plume. *Intl J. Heat Mass Transfer* 20, 1145-1154.

Kotsovinos N.E., List E.J. (1977). Plane turbulent buoyant jets. Part 1. Integral properties. *J. Fluid Mech.* 81, 25-44.

Kotsovinos N.E. (1977). Plane turbulent buoyant jets. Part 2. Turbulence structure. *J. Fluid Mech.* 81, 45-62.

- Lee J.H.W., Chu V.H. (2003). *Turbulent Jets and Plumes. A Lagrangian Approach*. Kluwer Academic Publishers.
- McLellan T.M., Randal R.E. (1986). Measurement of brine jet height and dilution. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 112(2), 200–216.
- Zakiyyan N., Darr C.M., Chen B., Mathai C., Gangopadhyay K., McFarland J., Gangopadhyay S., Maschmann M.R. (2021). Surface Plasmon Enhanced Fluorescence Temperature Mapping of Aluminum Nanoparticle Heated by Laser. *Sensors* 2021, 21, 1585.
- Ghifari N., Rassouk S., Hayat Z., Taleb A., Chahboun A., El Abed A.I. (2020). Dye-Doped ZnO Microcapsules for High Throughput and Sensitive Optofluidic Micro-Thermometry. *Micromachines*, 11(1), 100.
- Kuzkova N., Popenko O., Yakunov A. (2014). Application of Temperature-Dependent Fluorescent Dyes to the Measurement of Millimeter Wave Absorption in Water Applied to Biomedical Experiments Application of Temperature-Dependent Fluorescent Eyes to the Measurement of Millimeter Wave Absorption in Water Applied to Biomedical Experiments. *Int. J. Biomed. Imaging* 12, 12
- Noutsopoulos G., Yannopoulos, P. (1987). The round vertical turbulent buoyant jet. *J. Hydraul. Res.* 25, 481–502.
- Pantzlaff L., Lueptow, R.M. (1999). Transient positively and negatively buoyant turbulent round jets. *Exp. Fluids* 27, 117–125.
- Papakonstantis I.G., Christodoulou G.C. (2020). Simplified Modelling of Inclined Turbulent Dense Jets, *Fluids* 2020, 5, 204.
- Papakonstantis I.G, Mylonakou E.L. (2021). Flow Visualization Experiments of Inclined Slot Jets with Negative Buoyancy, *Environ. Proces.* 8, 1549 – 1565.
- Papakonstantis I.G., Papanicolaou P. (2022). On the Computational Modeling of Inclined Brine Discharges, *Fluids* 2022, 7, 86.
- Papakonstantis I.G., Christodoulou G.C., Papanicolaou P.N. (2011a). Inclined negatively buoyant jets 1: geometrical characteristics. *J. Hydraul. Res.* 49(1), 3-12.
- Papakonstantis I.G., Christodoulou G.C., Papanicolaou P.N. (2011b). Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. *J. Hydraul. Res.* 49(1), 13 -22.
- Papakonstantis I.G. and Tsatsara E.I. (2018). Trajectory Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. *Environ. Proces.*, 5(3), 539-554.
- Papakonstantis I.G. and Tsatsara E.I. (2019). Mixing Characteristics of Inclined Turbulent Dense Jets. *Environ. Proces.* 6(2), 525-541.
- Papanicolaou P.N., List J.E. (1987). Statistical and spectral properties of tracer concentration in round buoyant jets. *Intl J. Heat Mass Transfer* 30, 2059–2071.
- Papanicolaou P.N., List J.E. (1988). Investigations of round vertical turbulent buoyant jets. *J. Fluid Mech.* 195, 341–391.
- Papanicolaou P.N., Papakonstantis I.G., Christodoulou G.C. (2008). On the entrainment coefficient in negatively buoyant jets. *J. Fluid Mech.* 614, 447-470.



Papanicolaou P., Kokkalis T.J. (2008). Vertical buoyancy preserving and non-preserving fountains, in a homogeneous calm ambient. *Intl J. Heat Mass Transfer* 51, 4109–4120.

Streeter V.L., Wylie E.B., Bedford K.W. (1998). *Fluid Mechanics*. 9<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill.

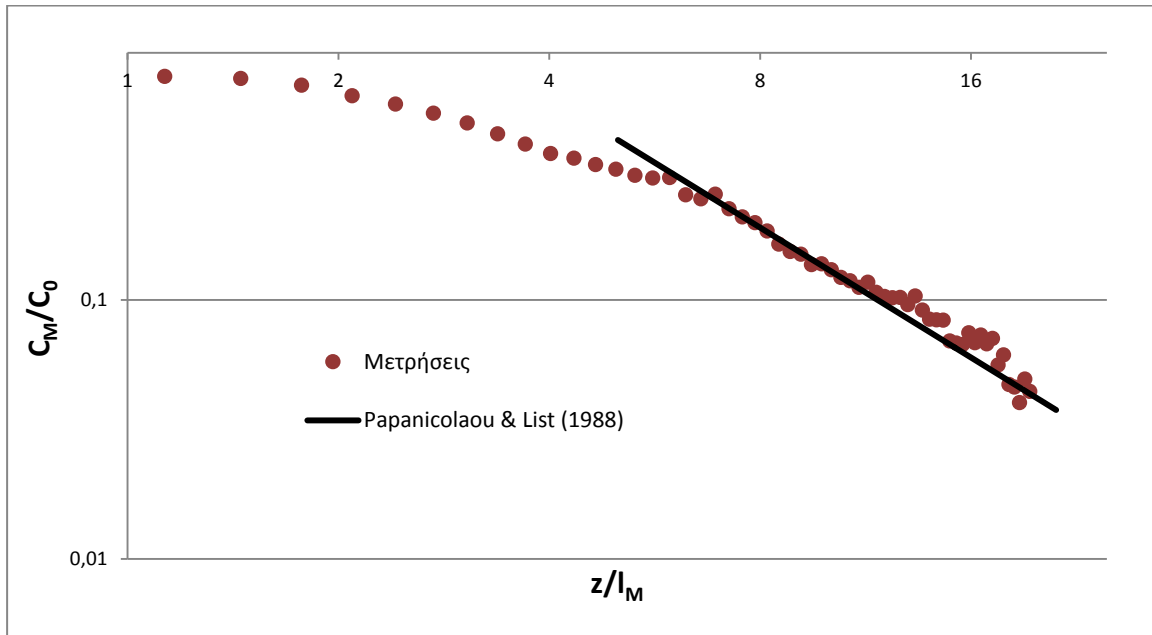
Turner J.S. (1966). Jets and plumes with negative or reversing buoyancy. *J. Fluid Mech.* 26, 779-792.

Wang H., Law A.W.K. (2002). Second-order integral model for a round turbulent buoyant jet. *J. Fluid Mech.* 459, 397–428.

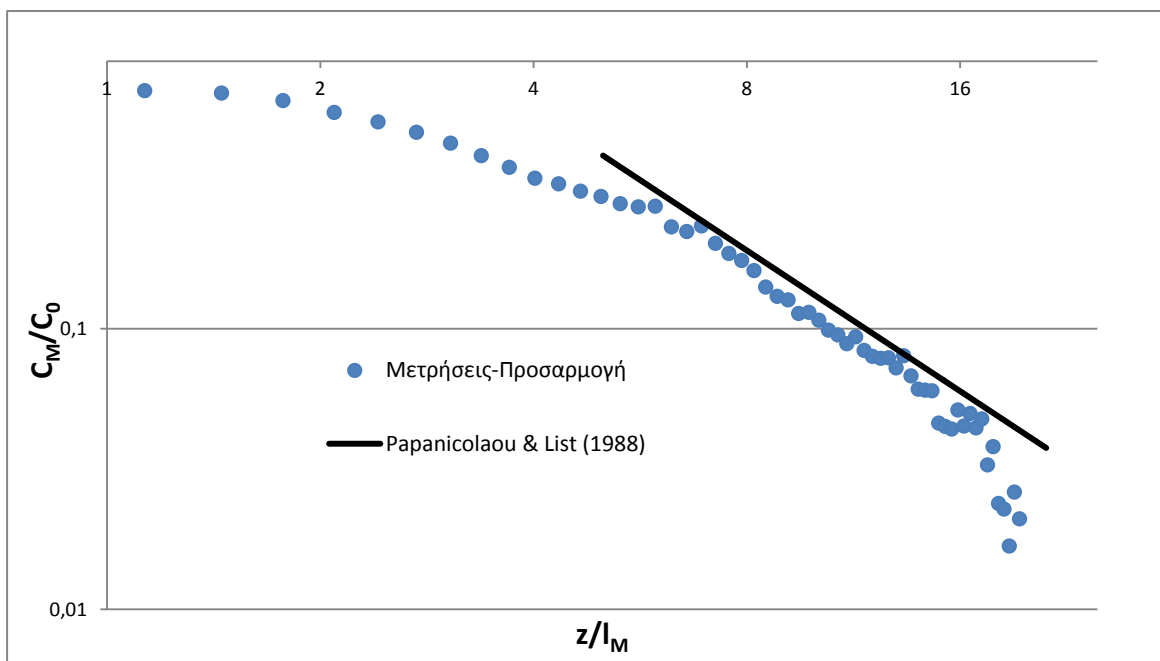
Chen Z., Tang Y.J., Xie T.T., Chen Y., Li Y.Q. (2007). Fluorescence Spectral Properties of Rhodamine 6G at the Silica/Water Interface. *J. Fluoresc.* 18, 93–100.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

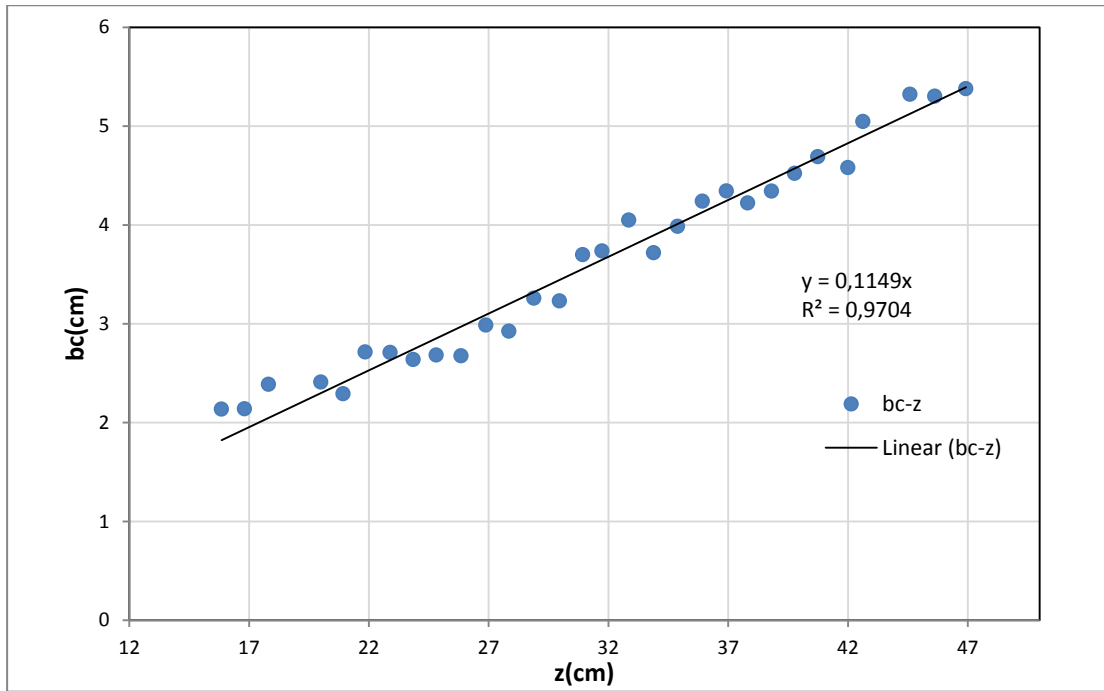
## Exp.1S



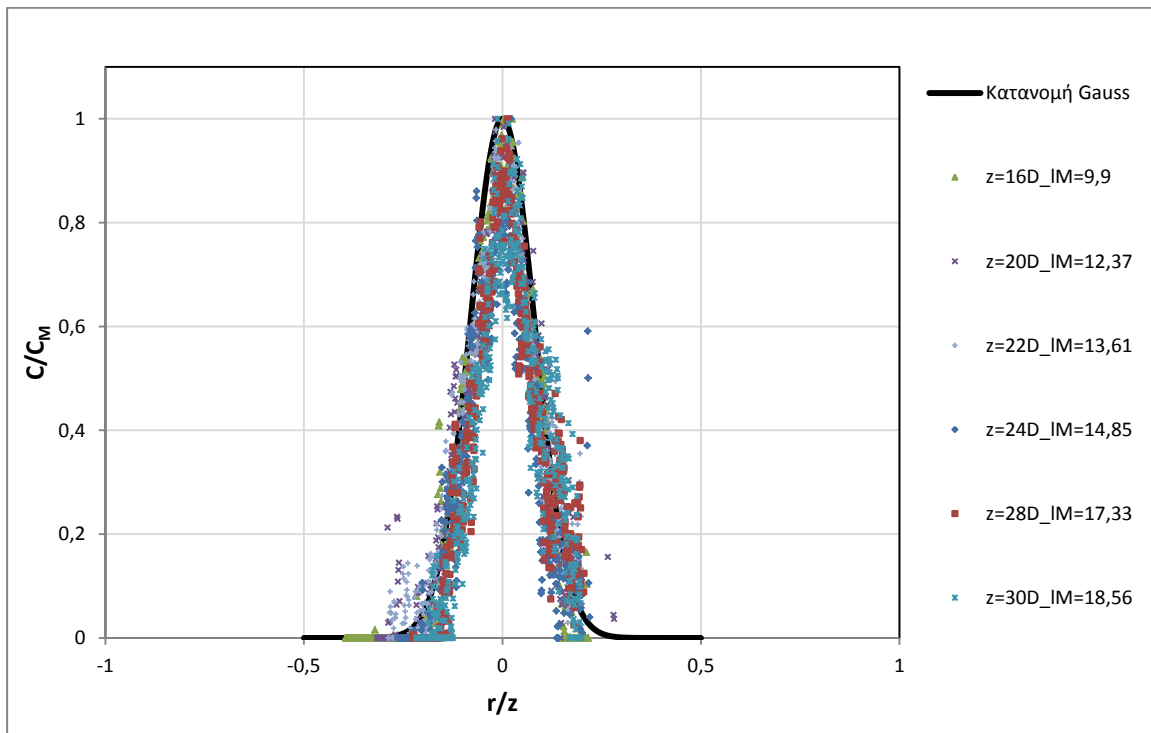
**Σχήμα Α.1** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.1S πριν από την προσαρμογή - διόρθωση



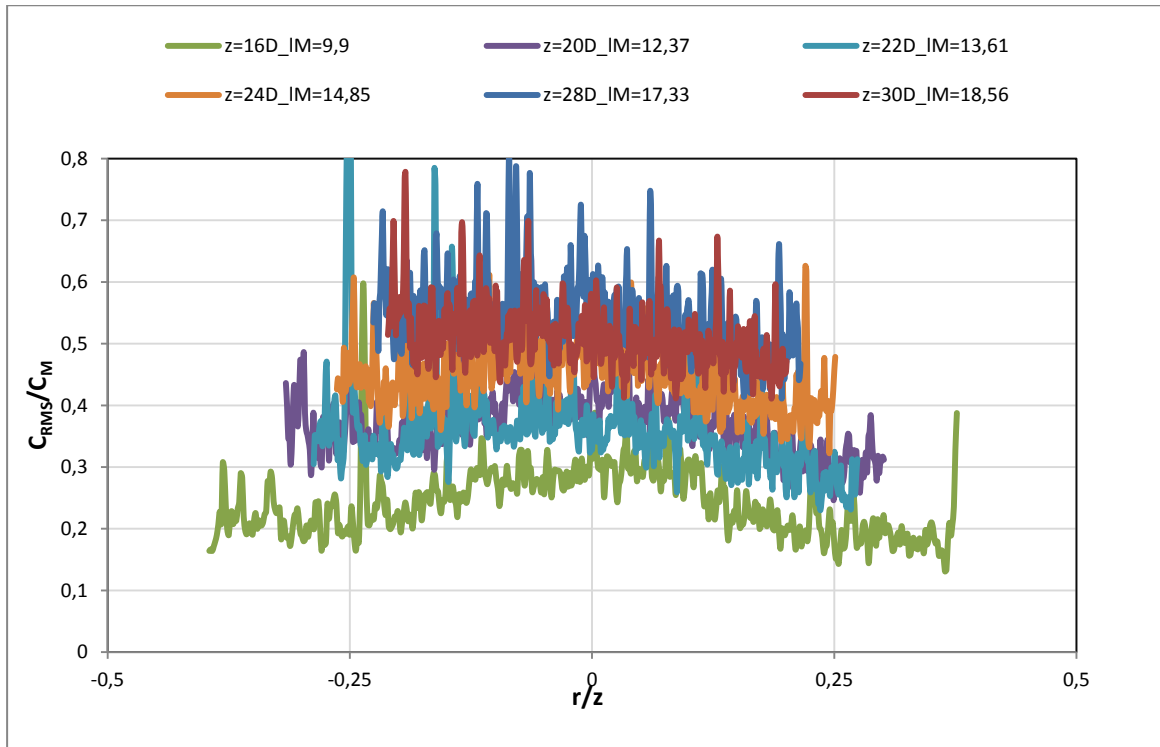
**Σχήμα Α.2** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.1S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση



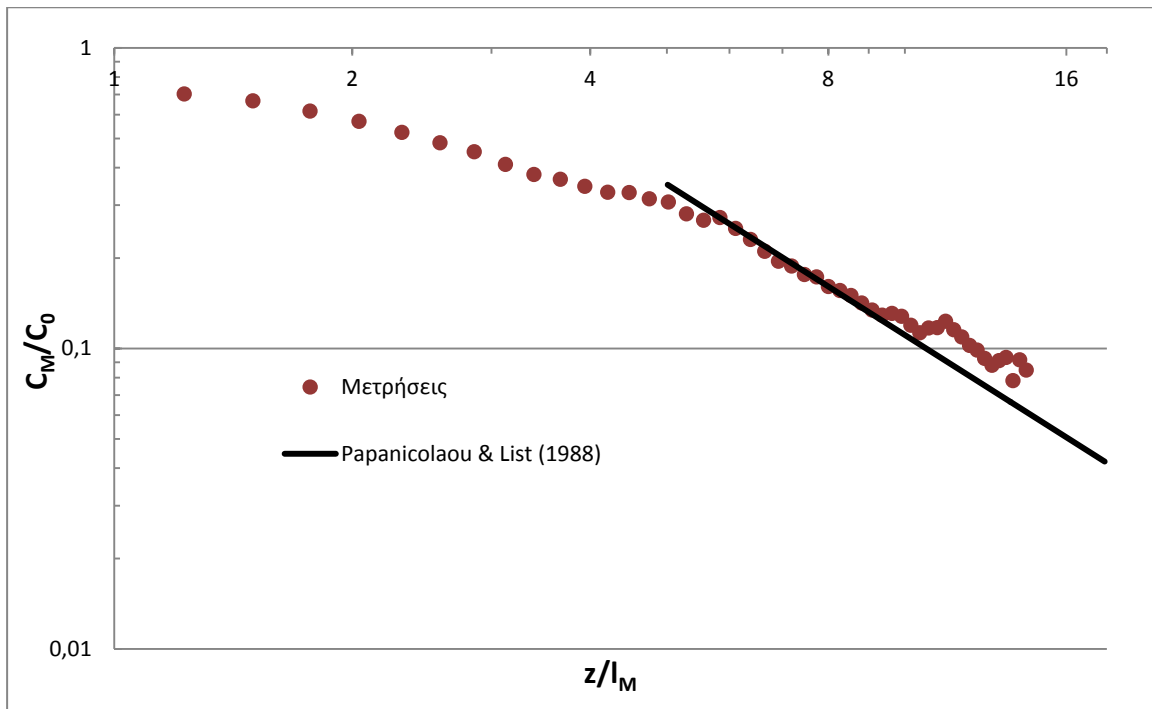
**Σχήμα Α.3** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.1S



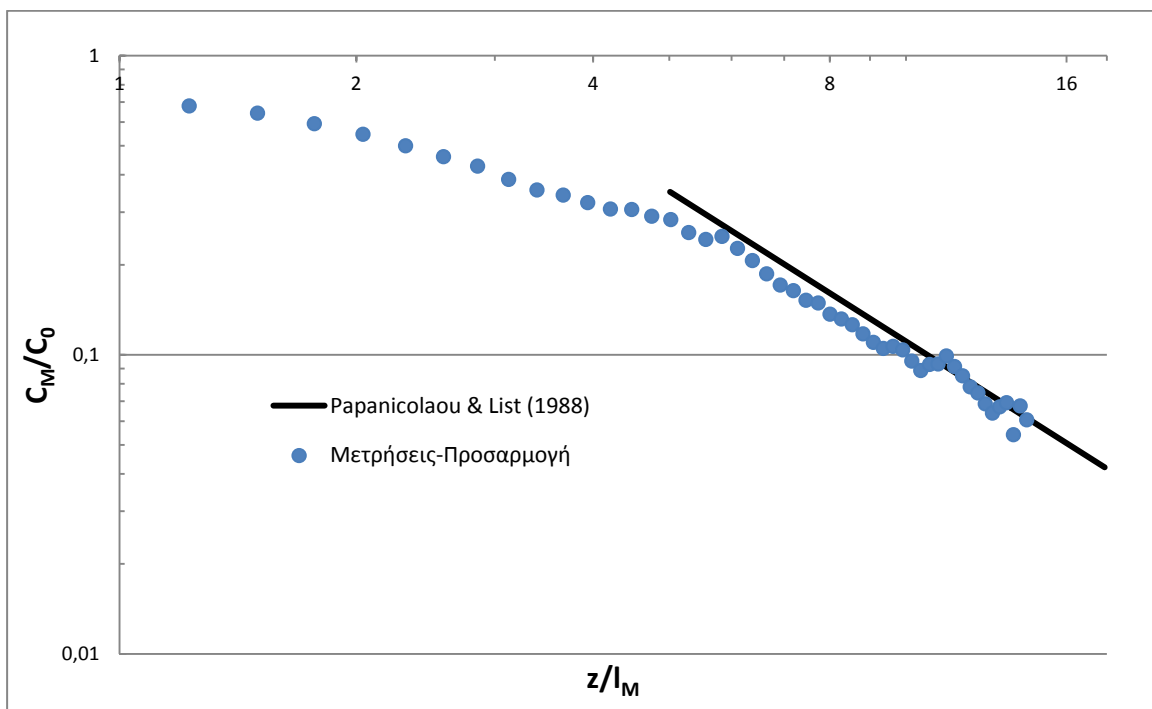
**Σχήμα Α.4** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.1S



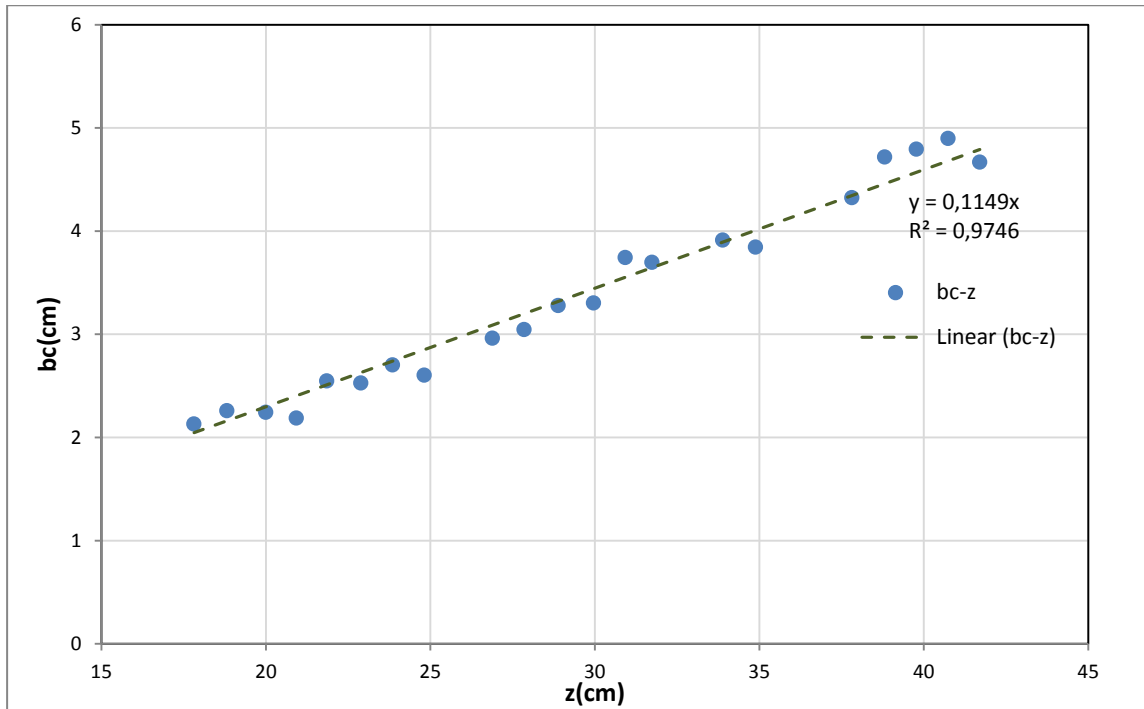
**Σχήμα A.5** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.1S



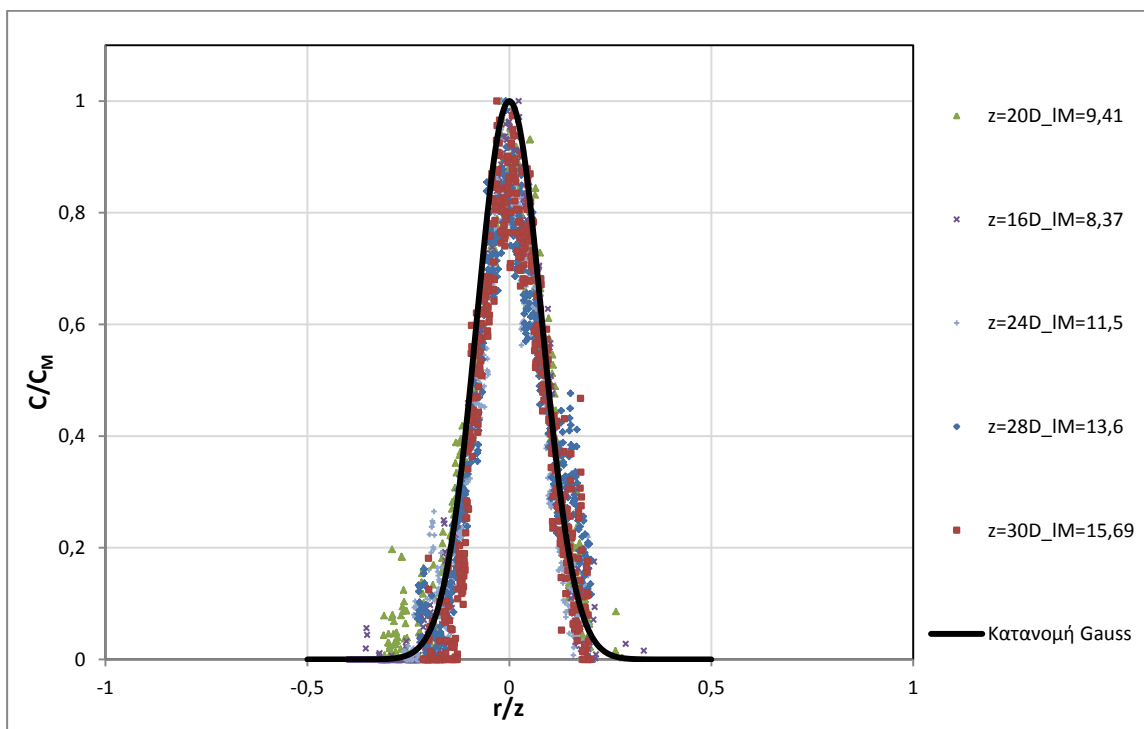
**Σχήμα A.6** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.2S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



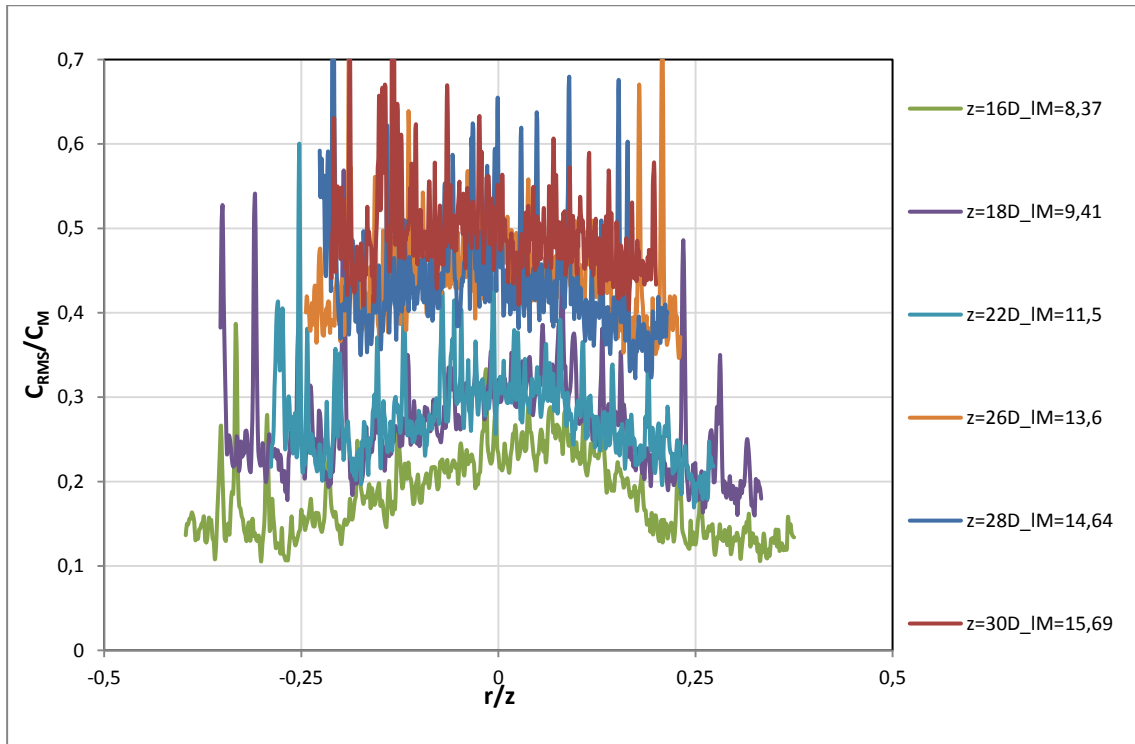
**Σχήμα A.7** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.2S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



Σχήμα Α.8 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.2S

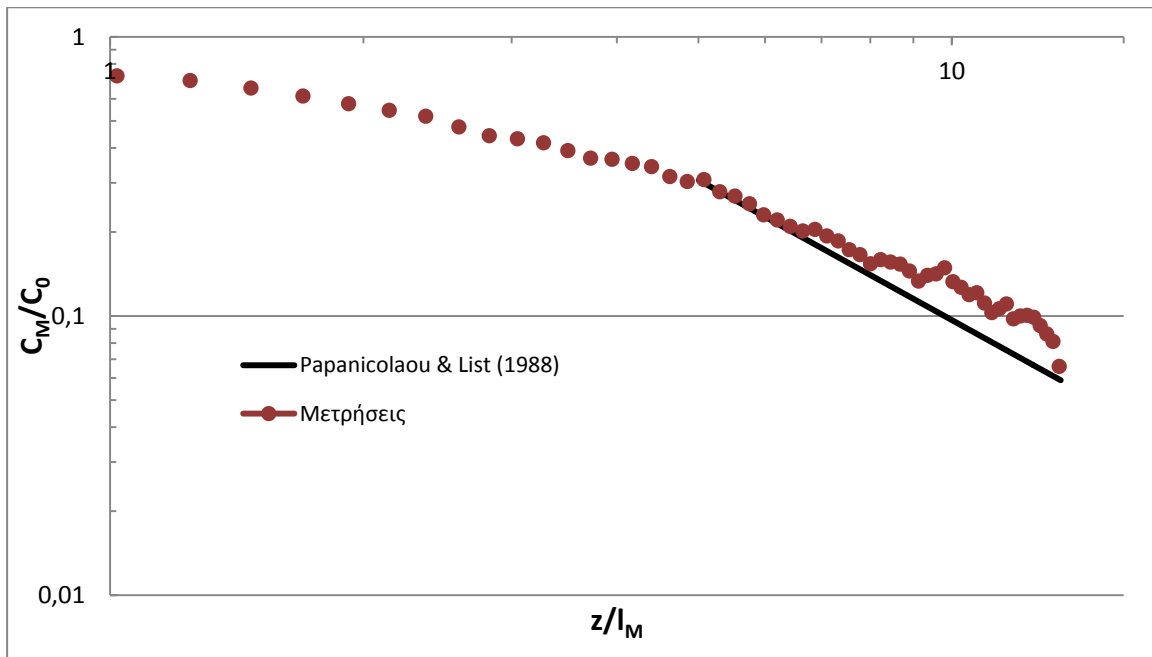


Σχήμα Α.9 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.2S

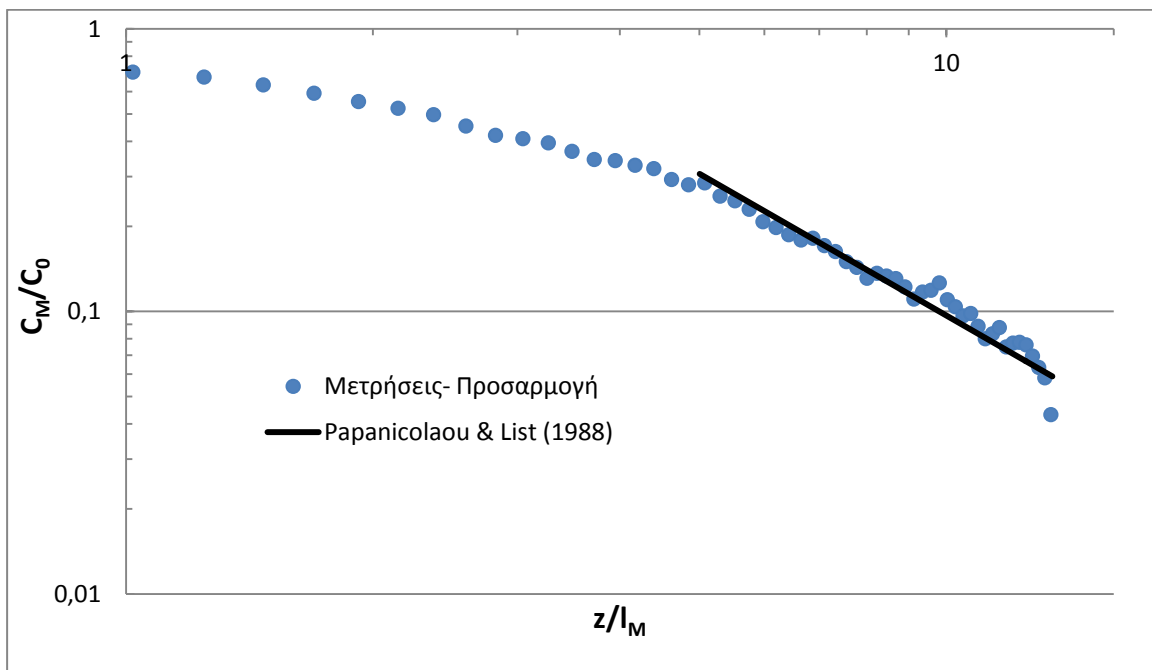


**Σχήμα Α.10** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.2S

Exp.3S

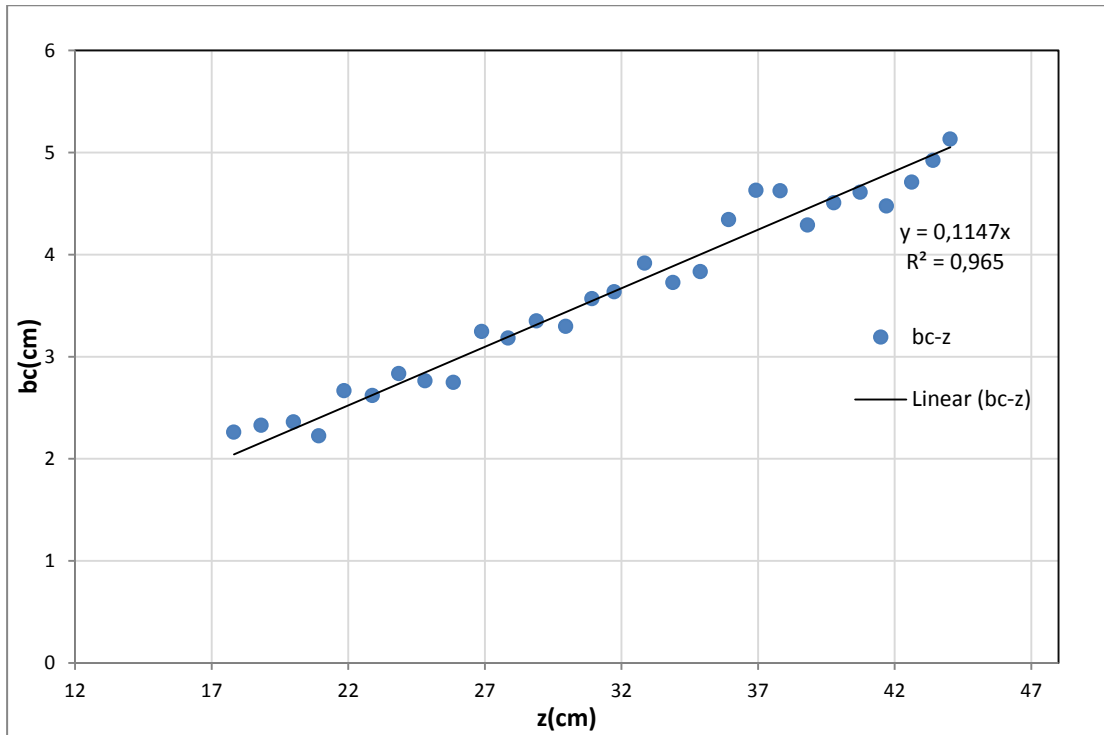


**Σχήμα A.11** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.3S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση

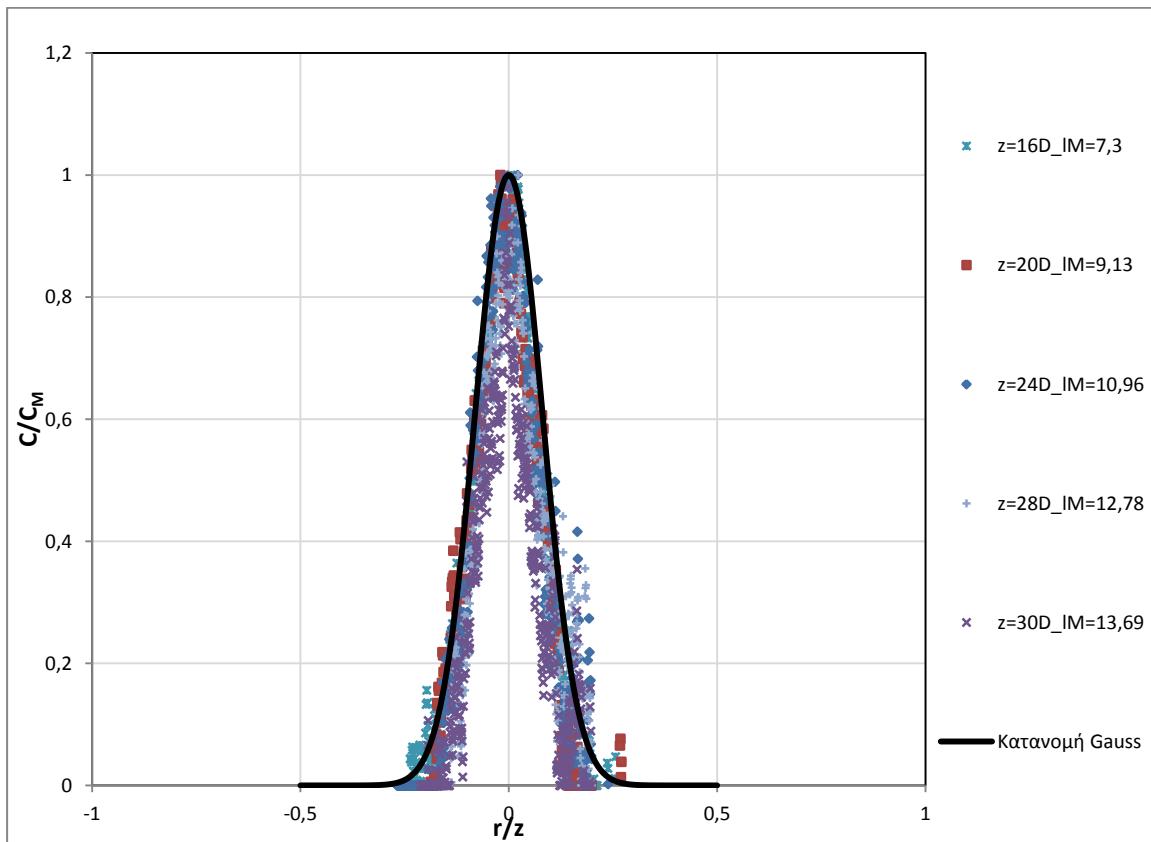


**Σχήμα A.12** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.3S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση

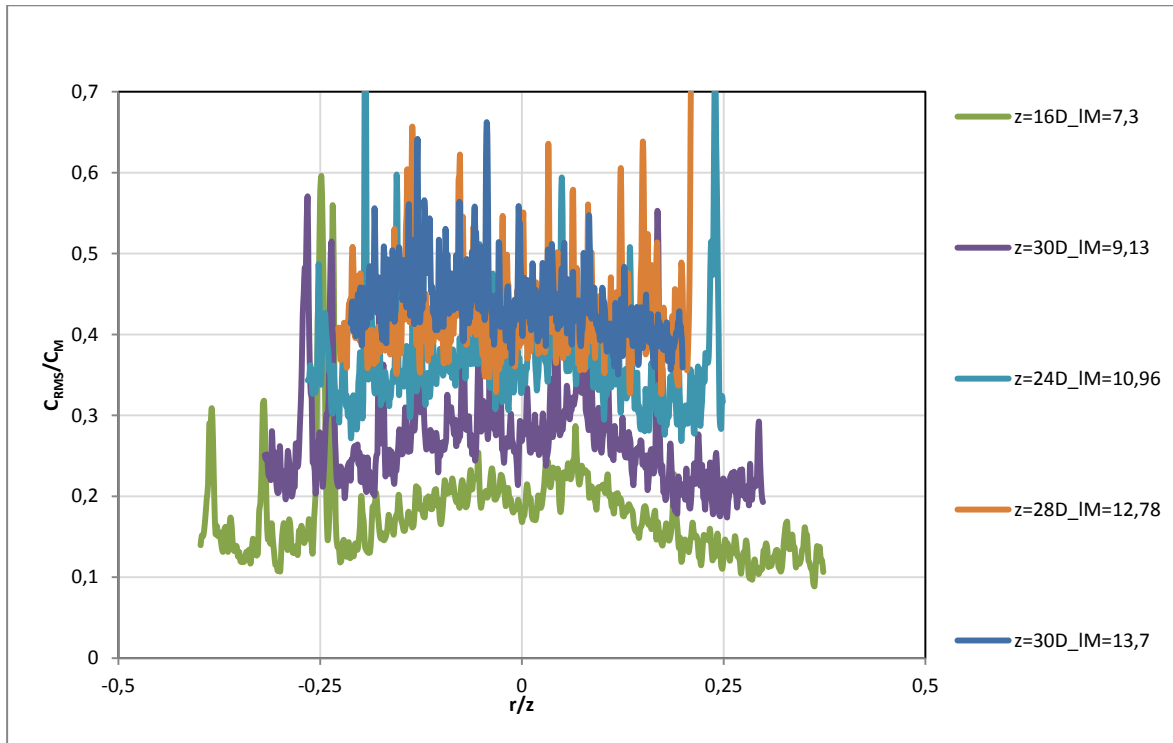




**Σχήμα A.13** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.3S

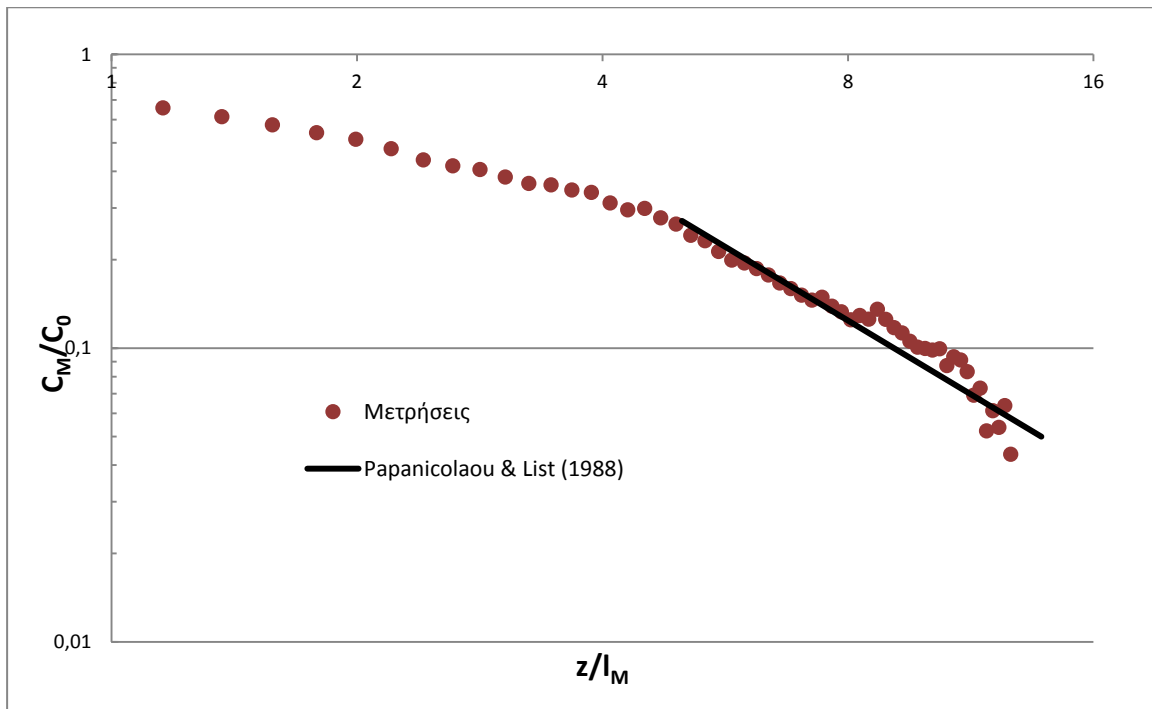


**Σχήμα A.14** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή στη ζώνη της αναπτυγμένης ροής για το πείραμα Exp.3S

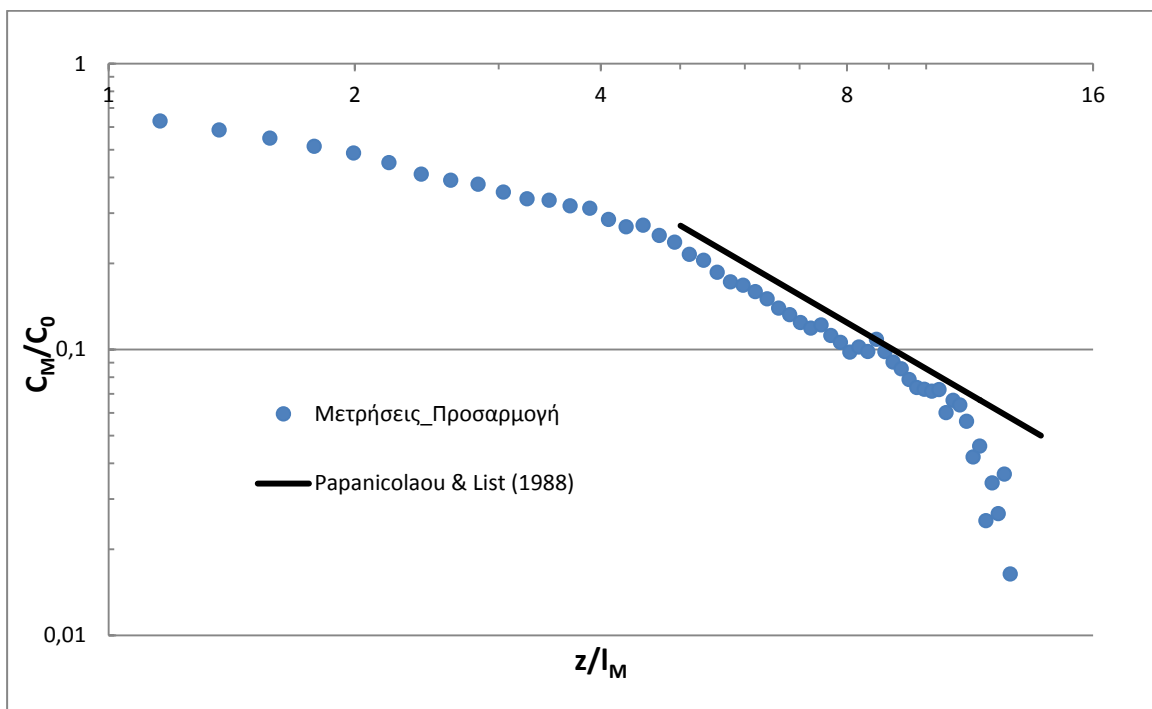


**Σχήμα A.15** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.3S

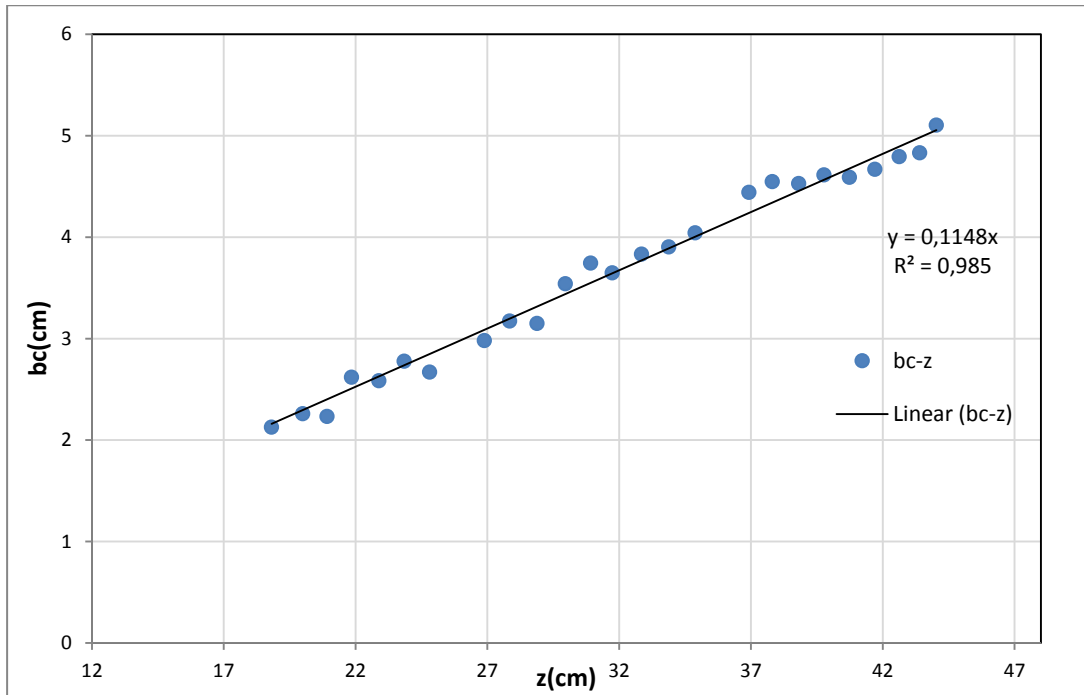
Exp.4S



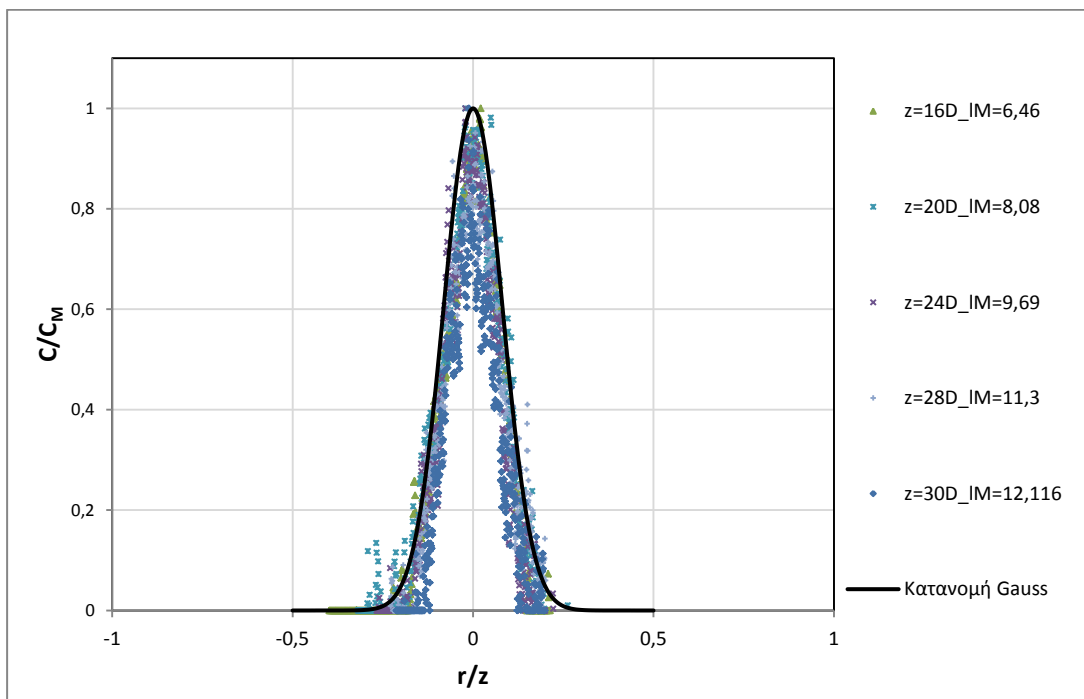
Σχήμα A.16 Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.4S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



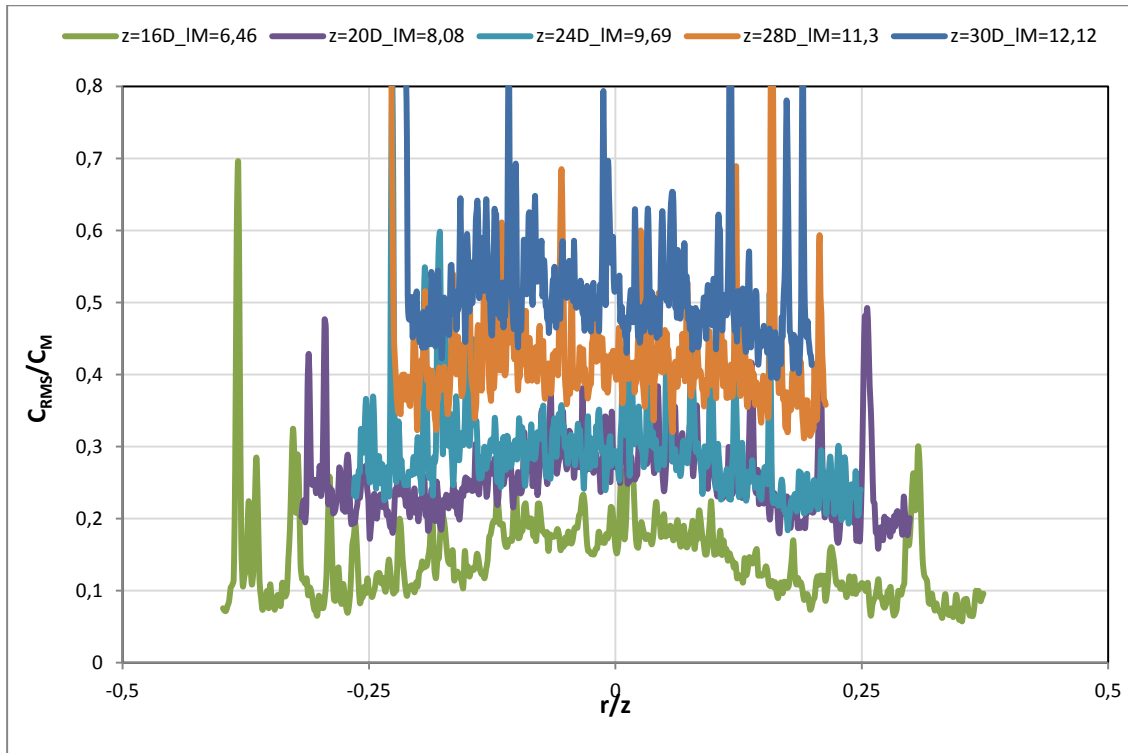
Σχήμα A.17 Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.1S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση



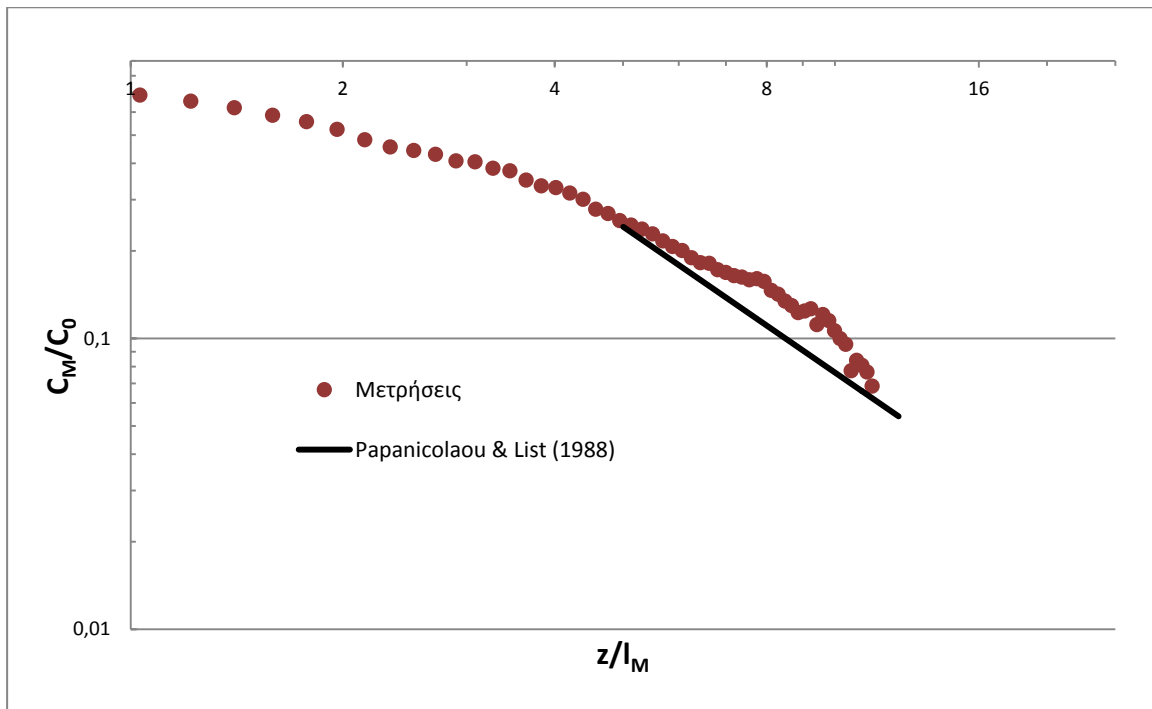
**Σχήμα A.18** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.4S



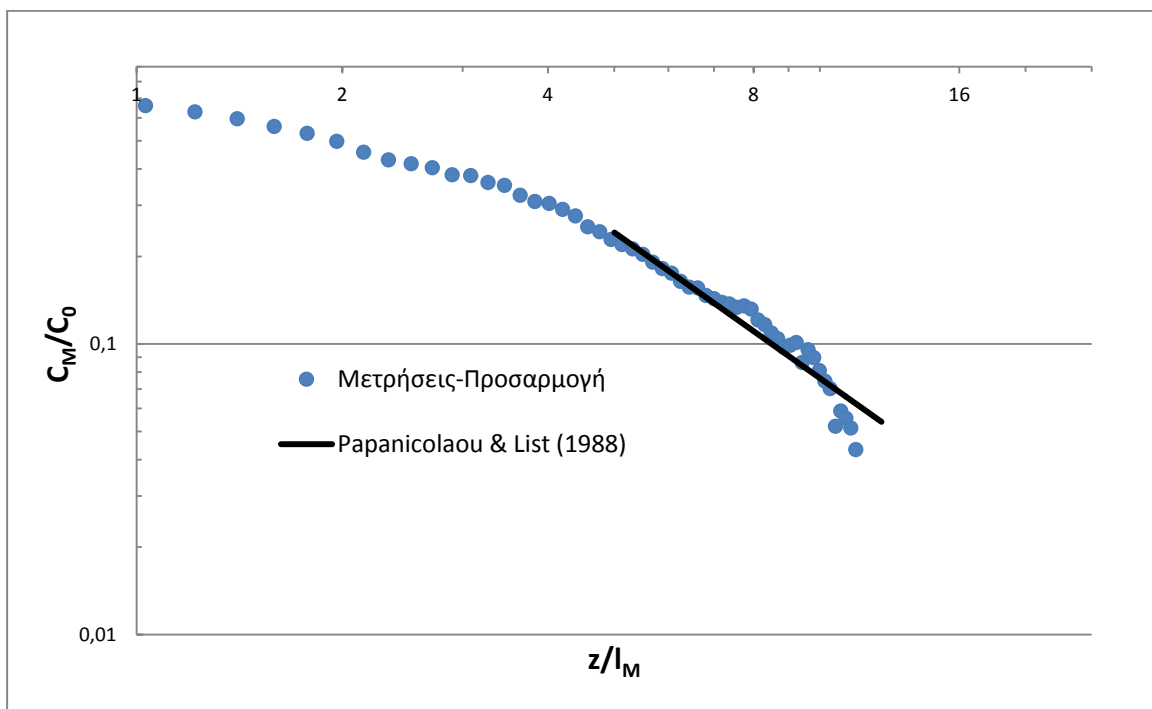
**Σχήμα A.19** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.4S



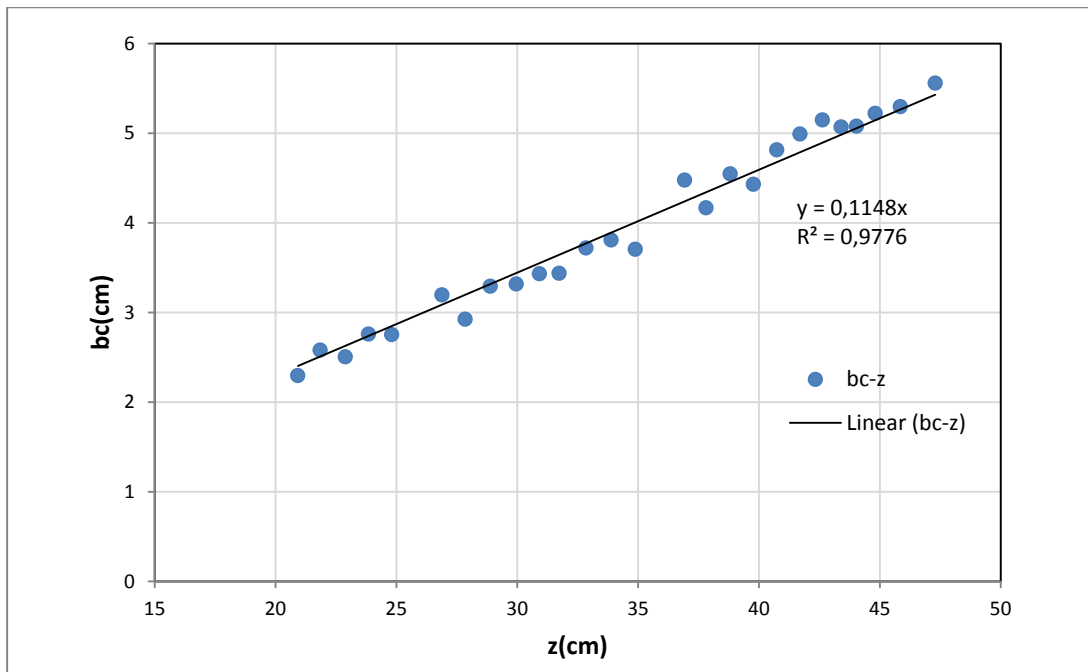
**Σχήμα Α.20** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.4S



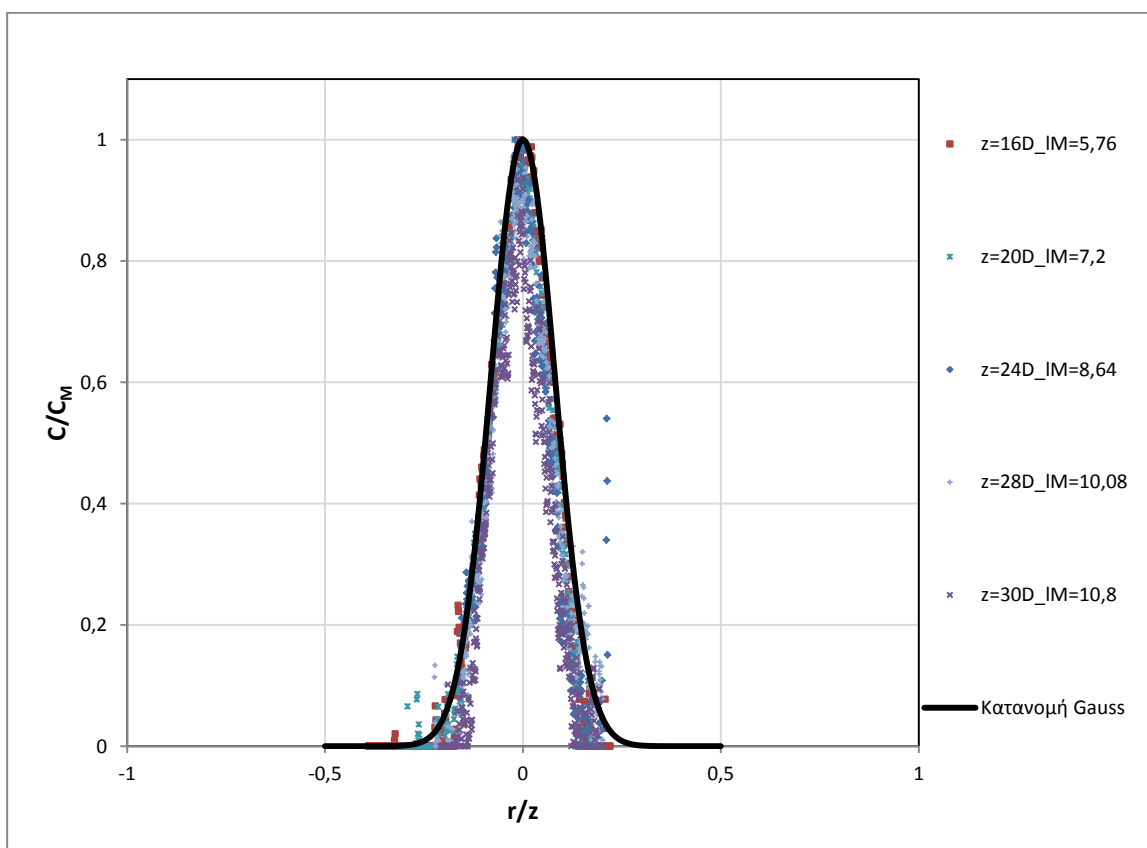
**Σχήμα A.21** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.5S πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



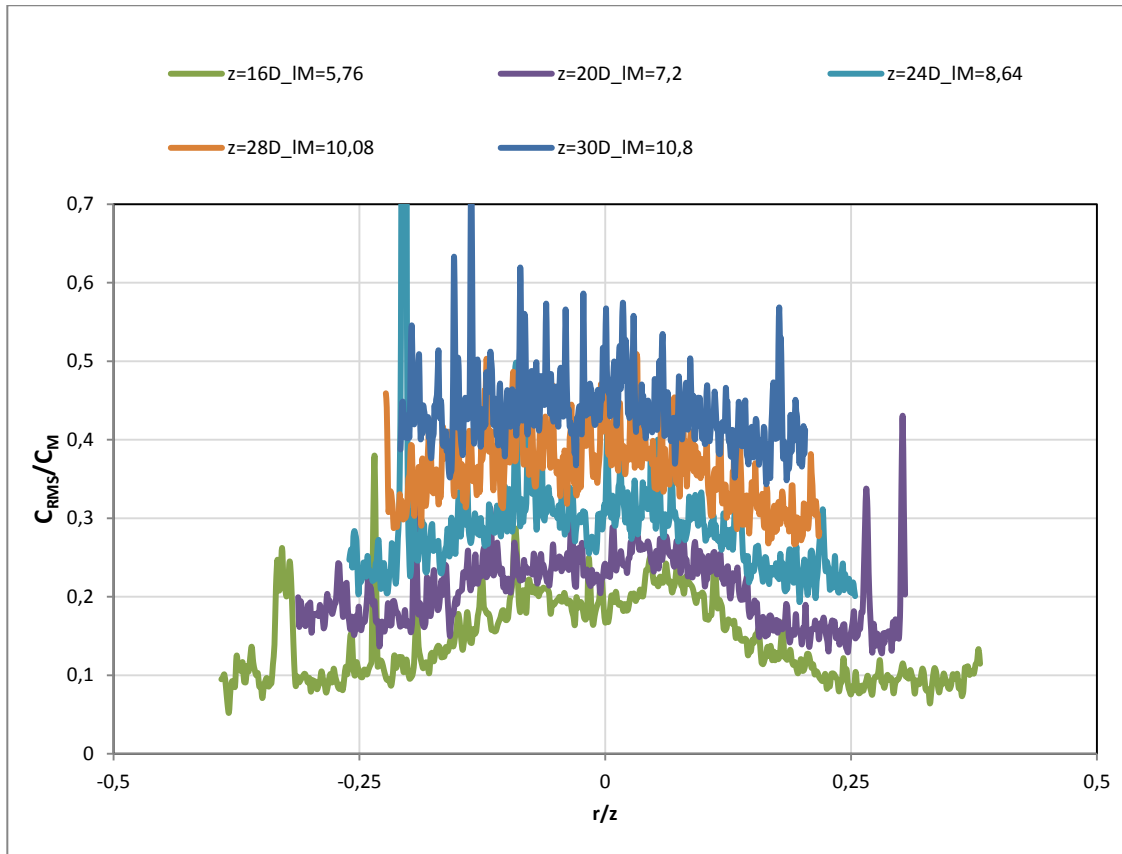
**Σχήμα A.22** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.5S μετά από την προσαρμογή- διόρθωση



**Σχήμα Α.23** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.5S



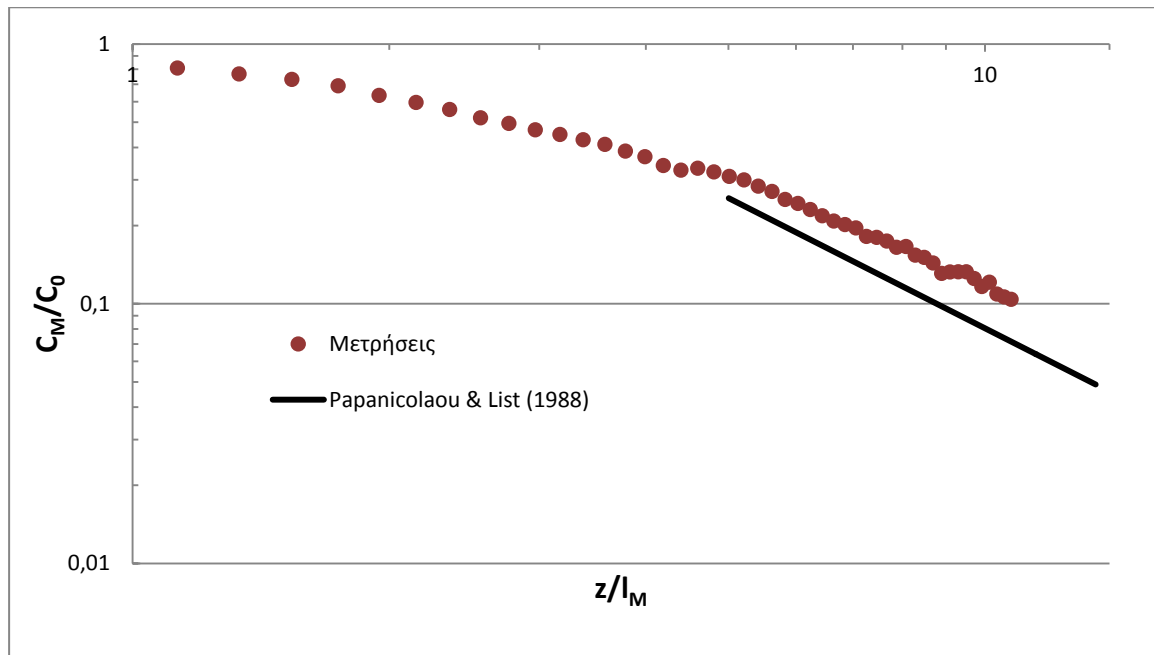
**Σχήμα Α.24** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.5S



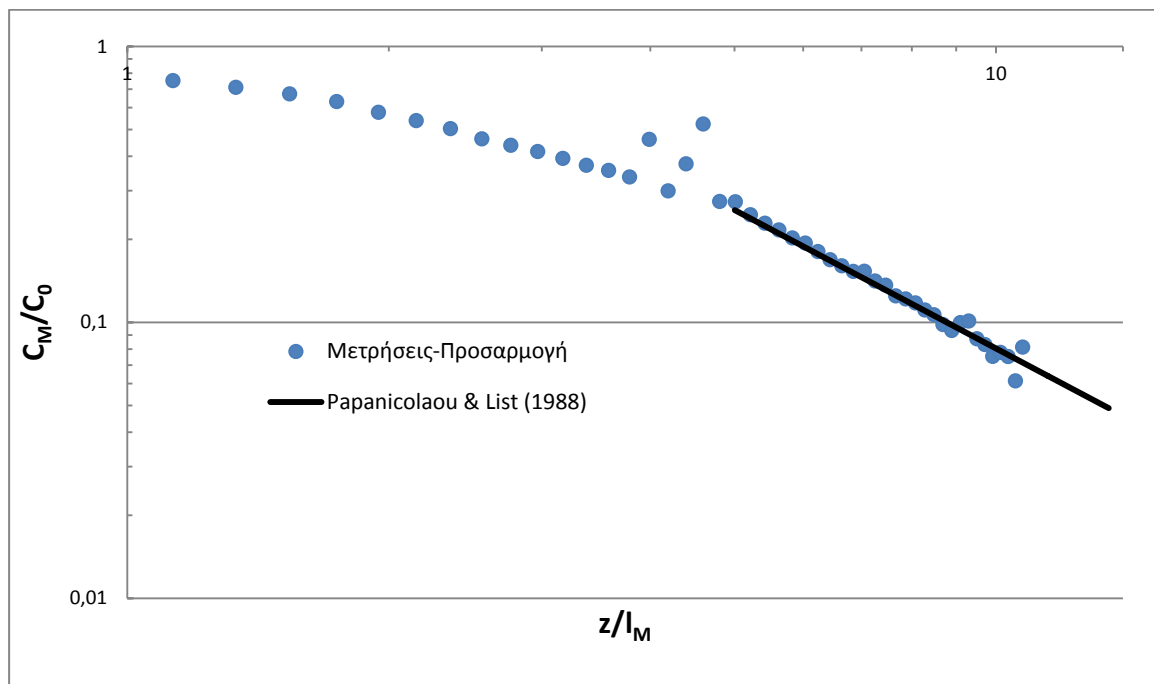
**Σχήμα A.25** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.5S



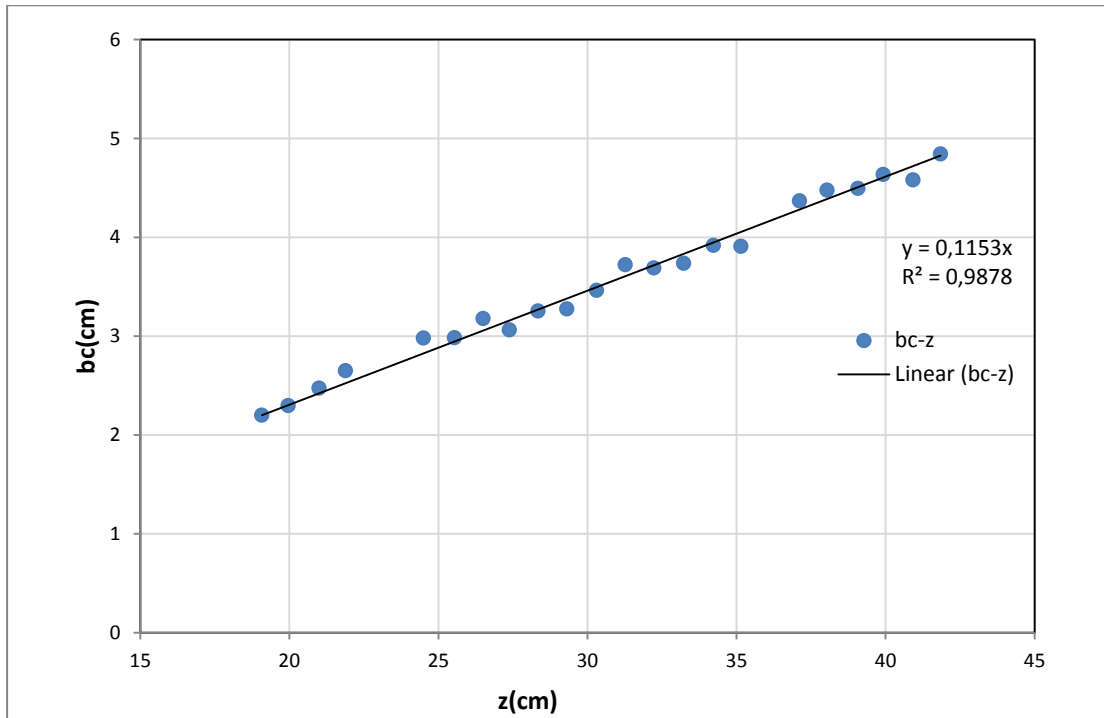
Exp.6T



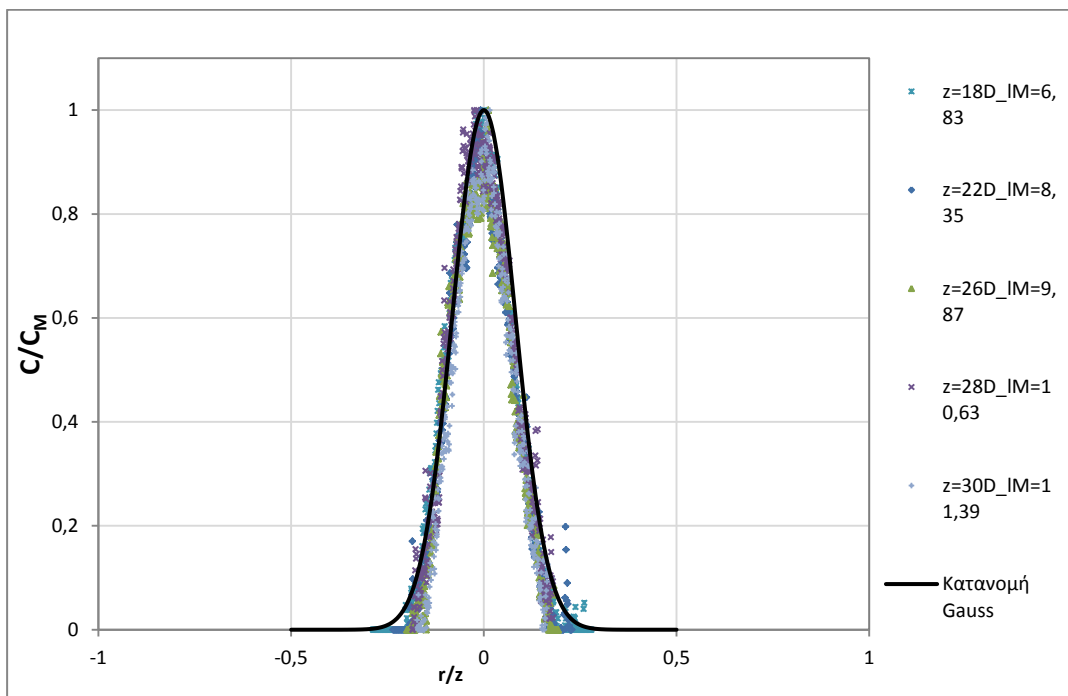
**Σχήμα A.26** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.6T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



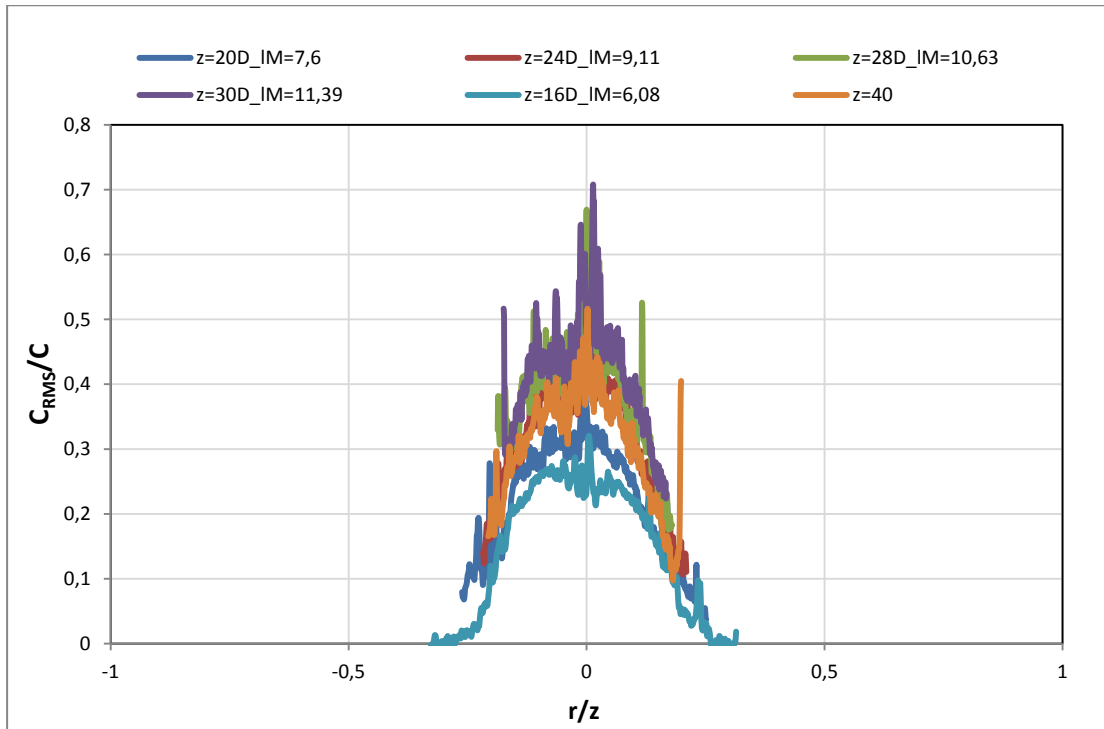
**Σχήμα A.27** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.6T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση



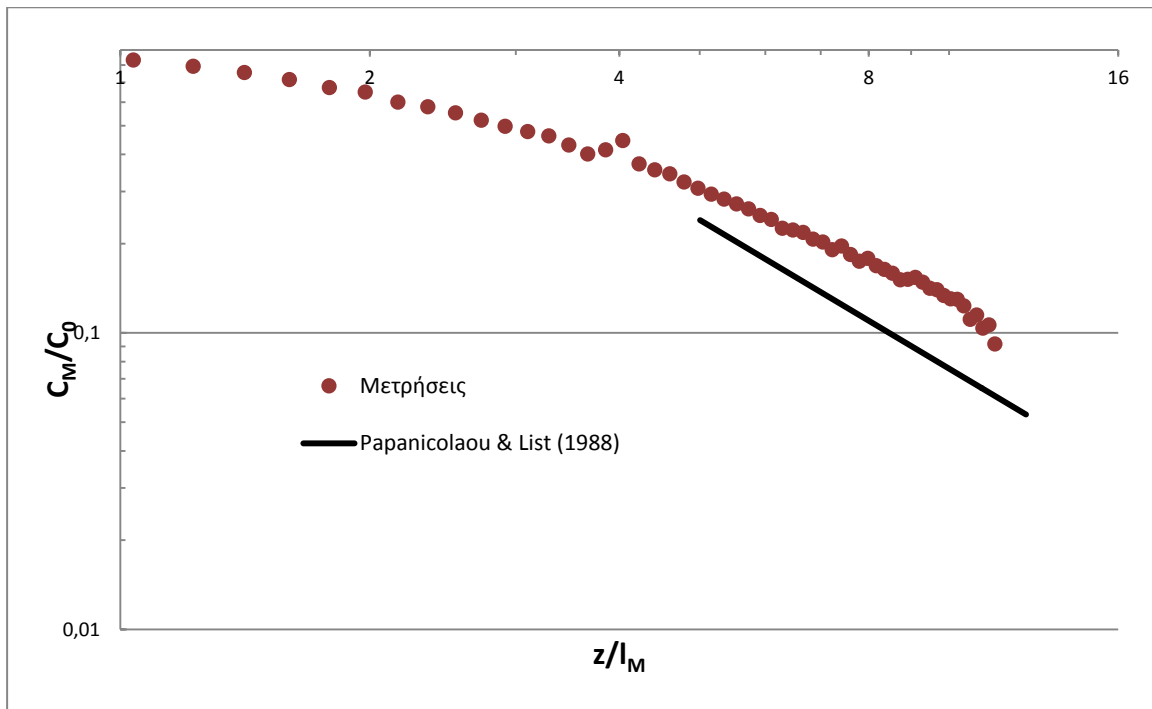
**Σχήμα A.28** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.6T



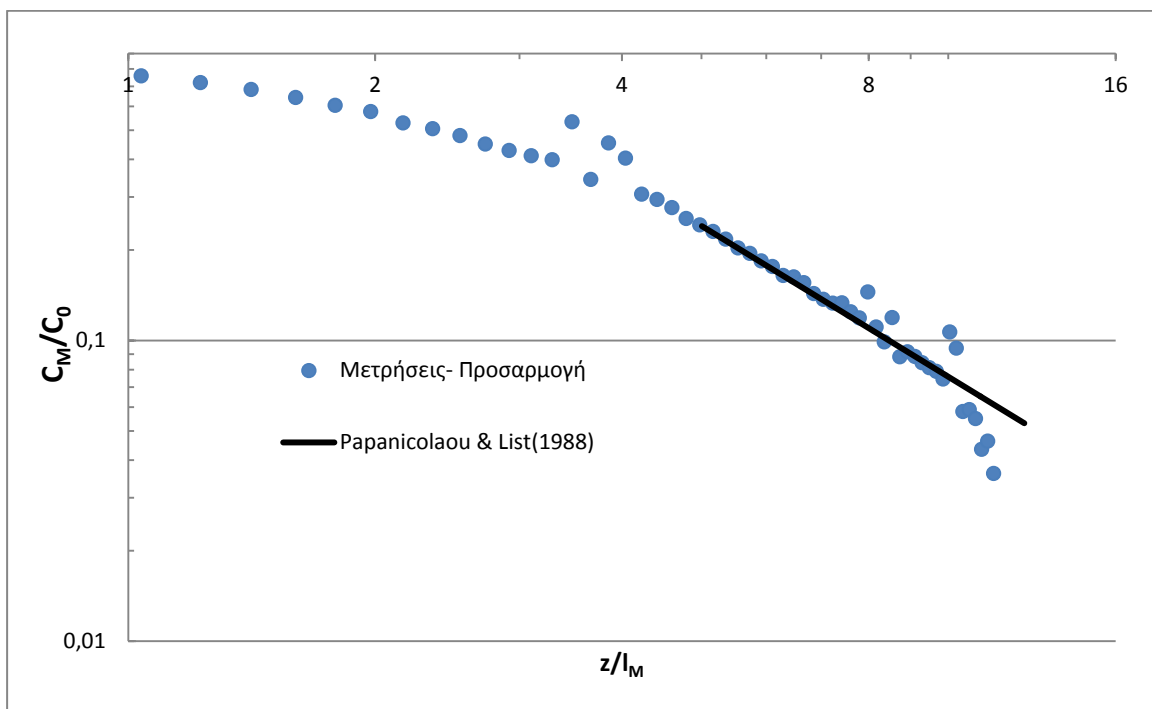
**Σχήμα A.29** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.6T



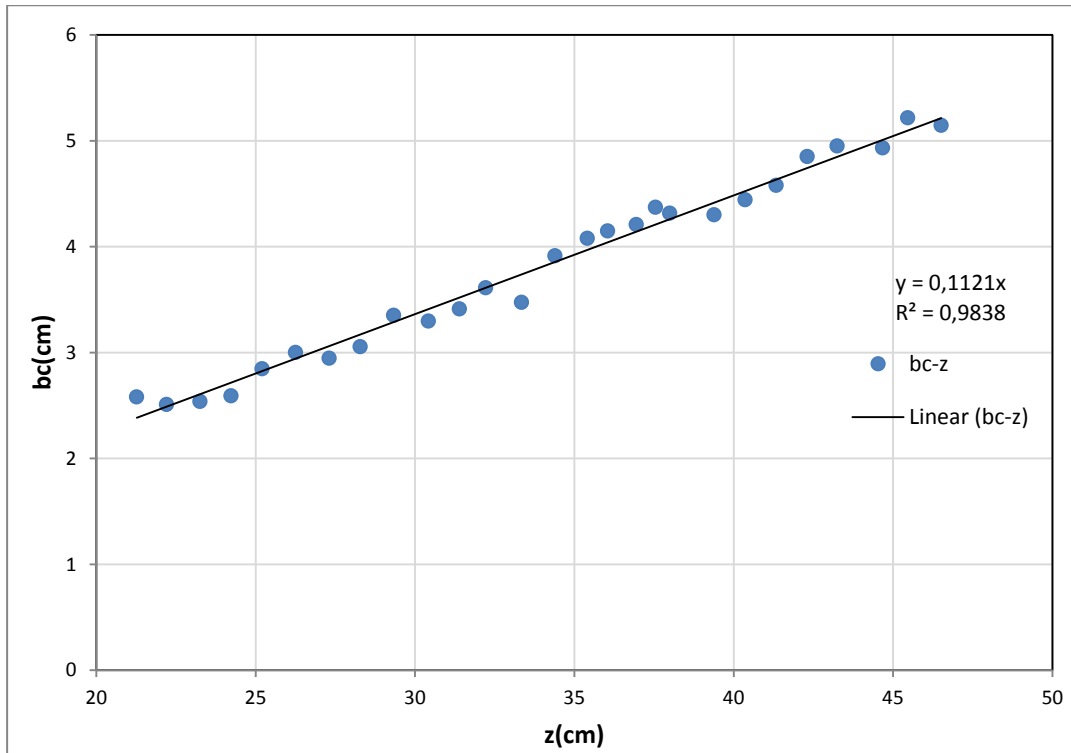
**Σχήμα A.30** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.6T



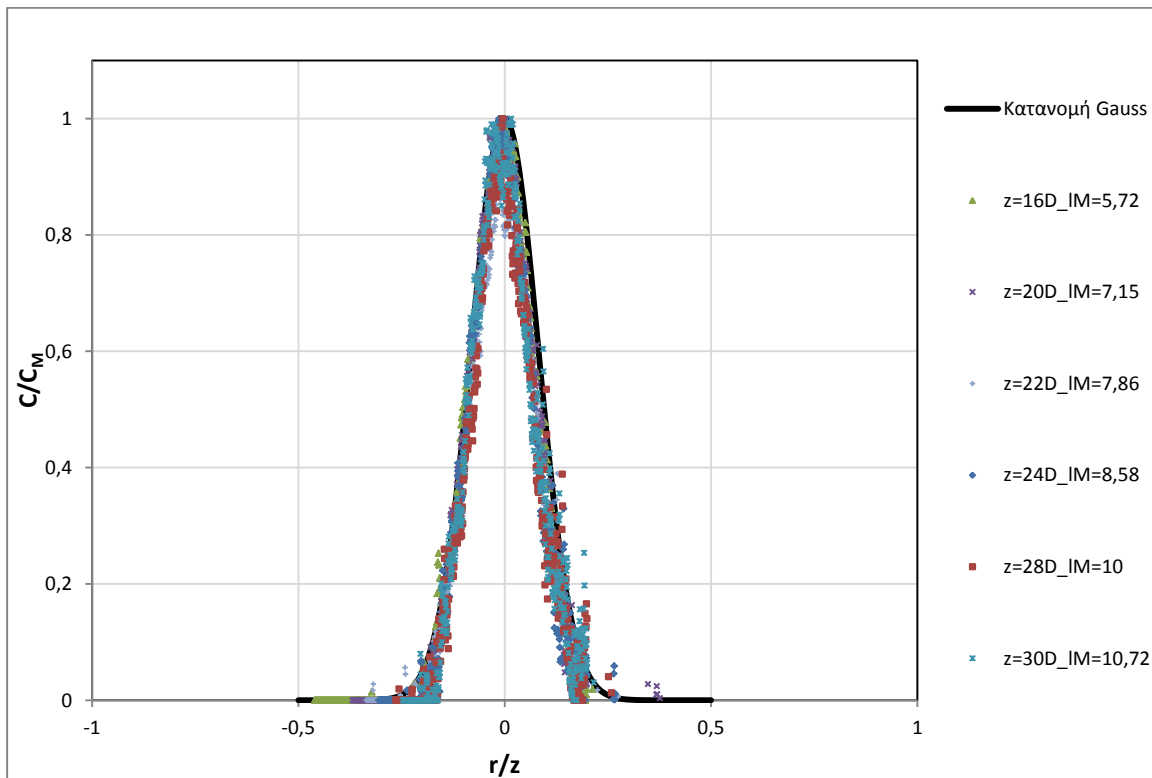
**Σχήμα A.31** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.7T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



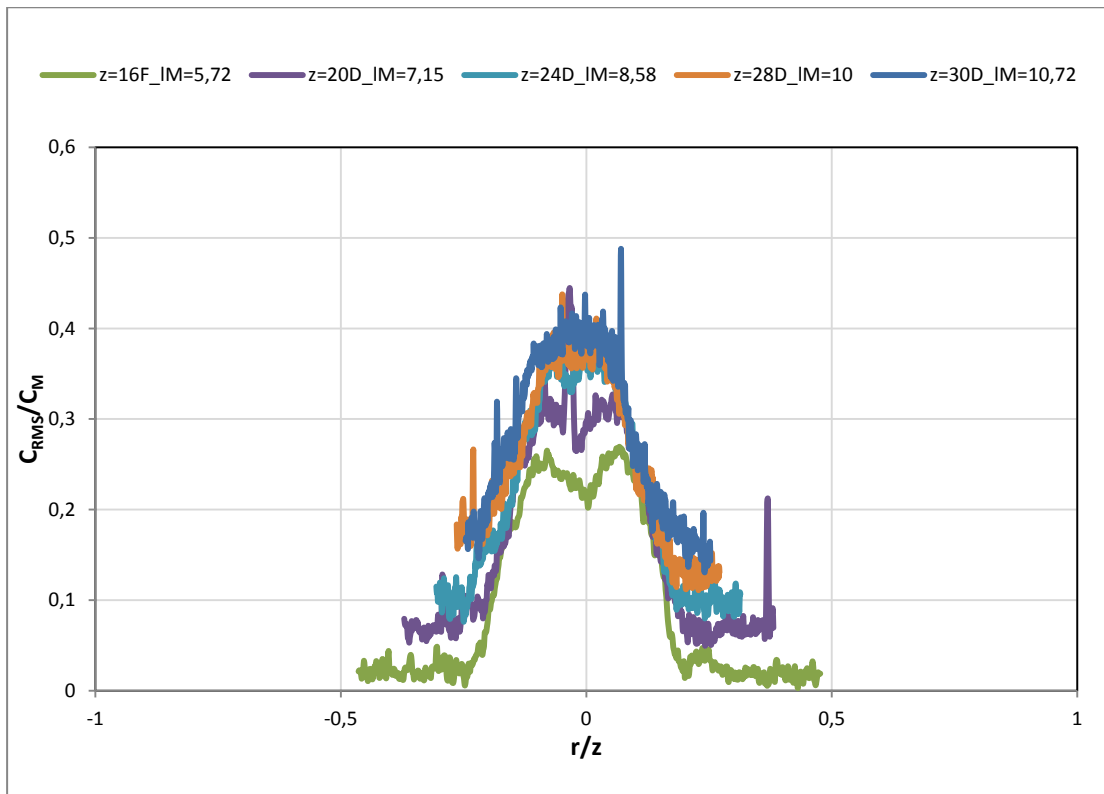
**Σχήμα A.32** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.7T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση



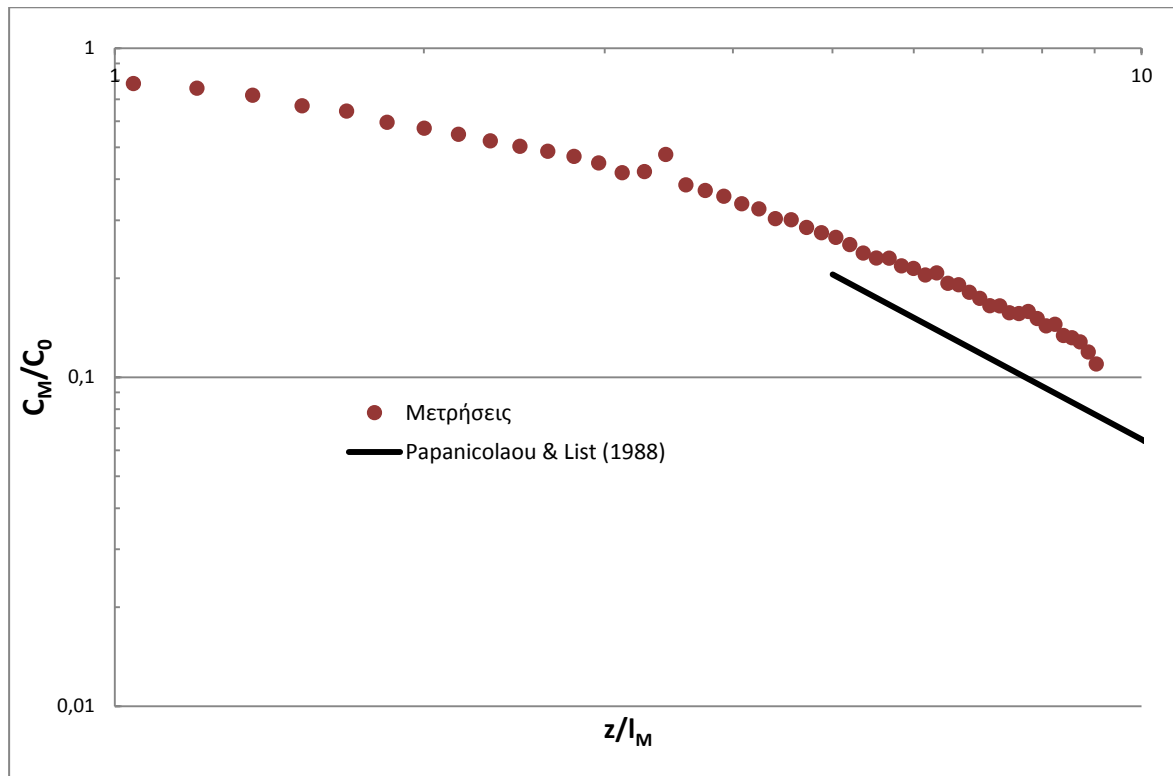
**Σχήμα A.33** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.7T



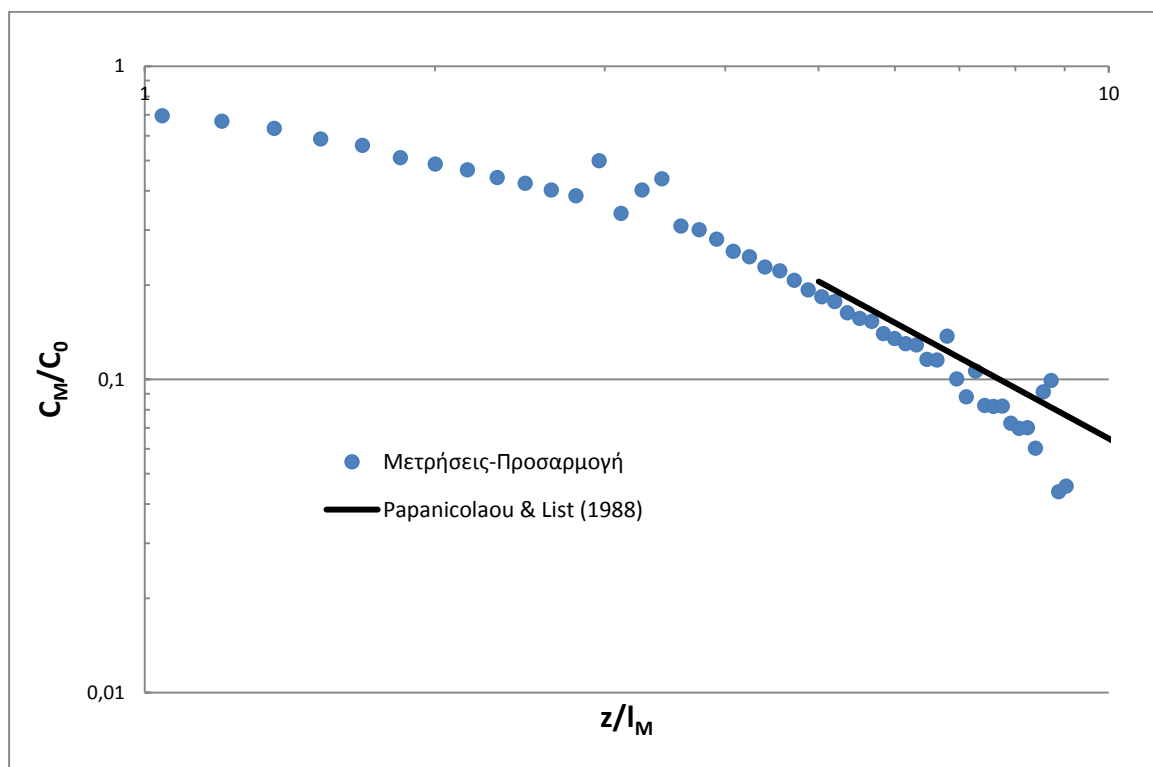
**Σχήμα A.34** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.7T



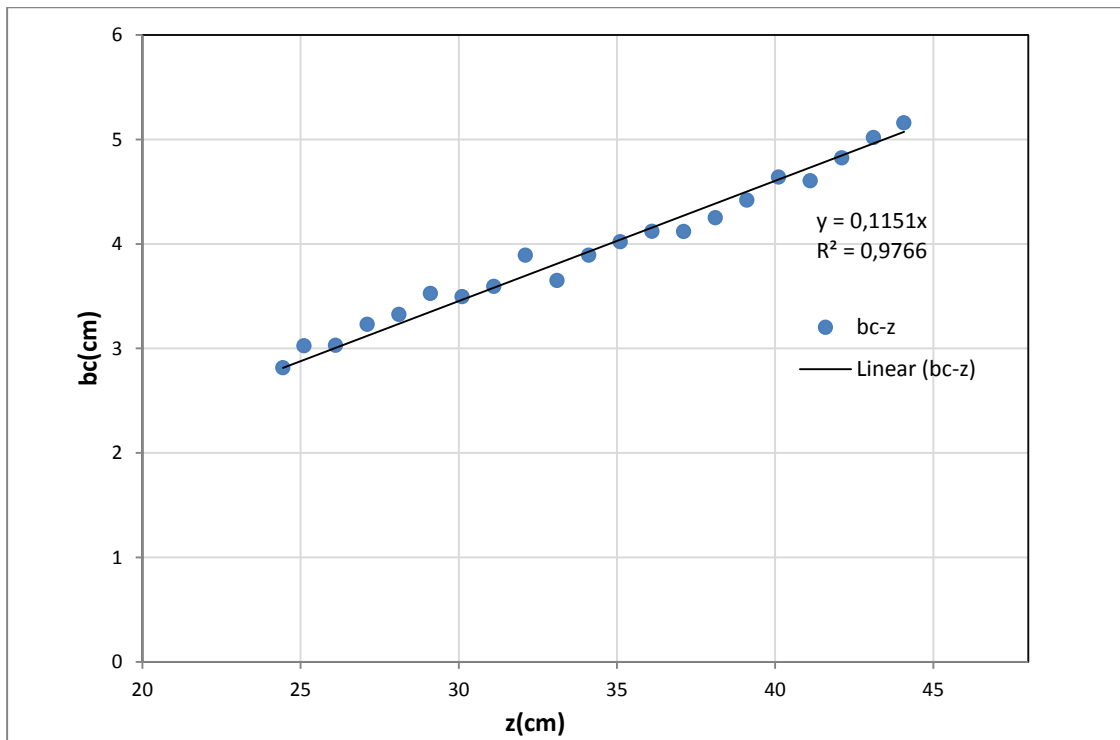
**Σχήμα A.35** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.7T



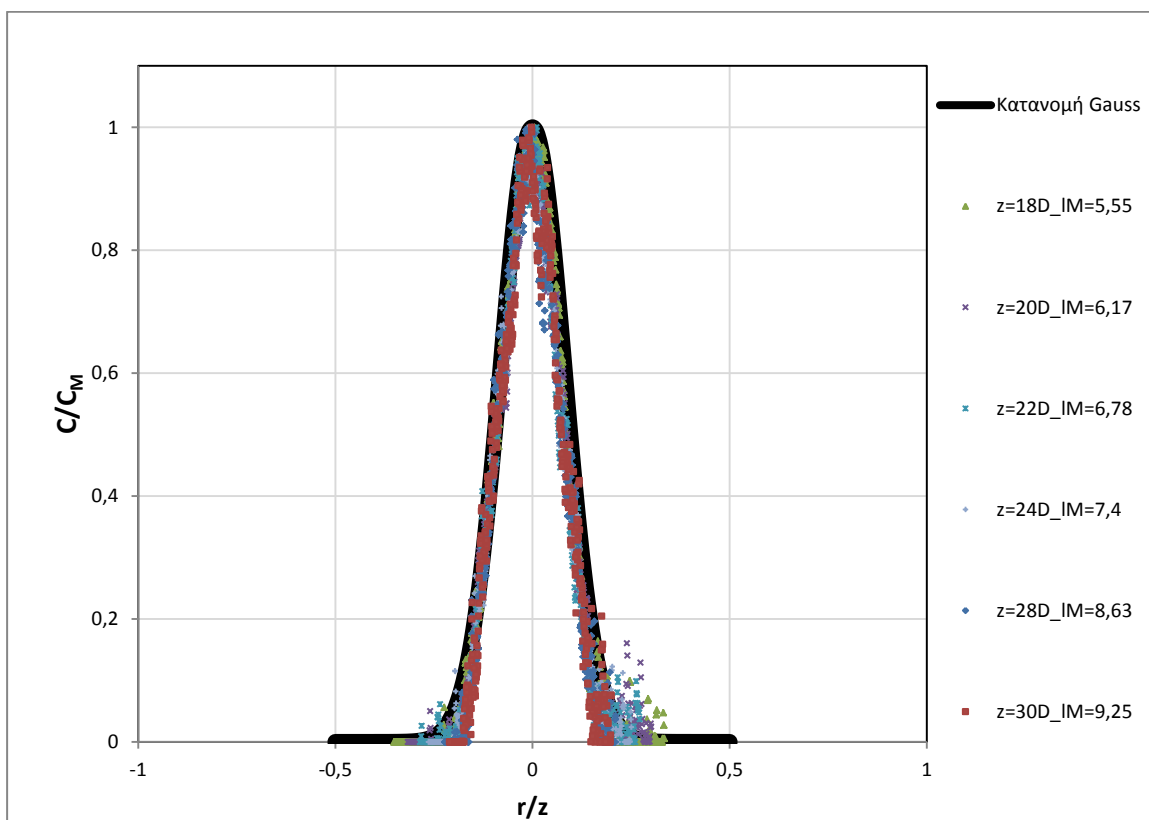
**Σχήμα A.36** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.8T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



**Σχήμα A.37** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.8T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση

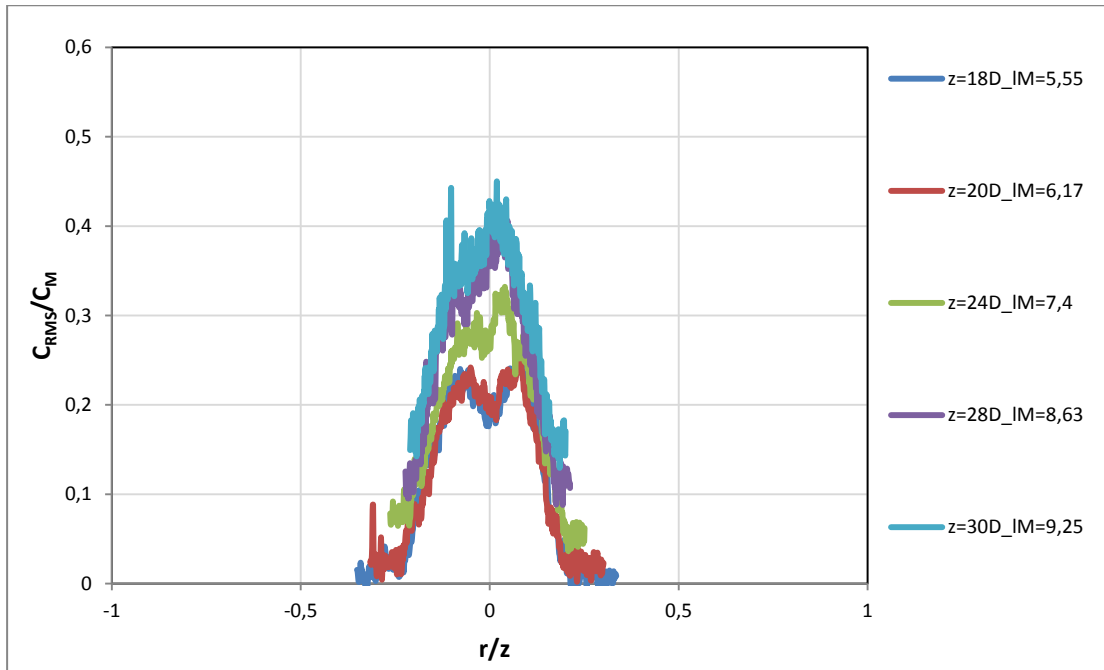


**Σχήμα Α.38** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Expr.8T

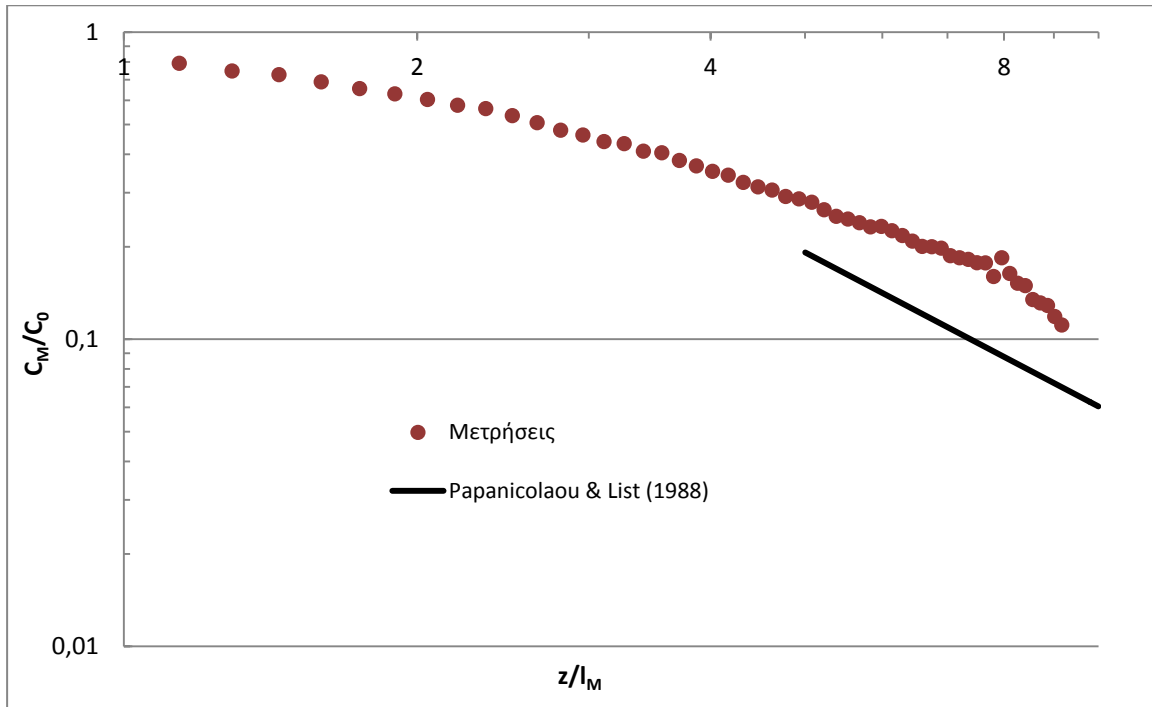


**Σχήμα Α.39** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Expr.8T

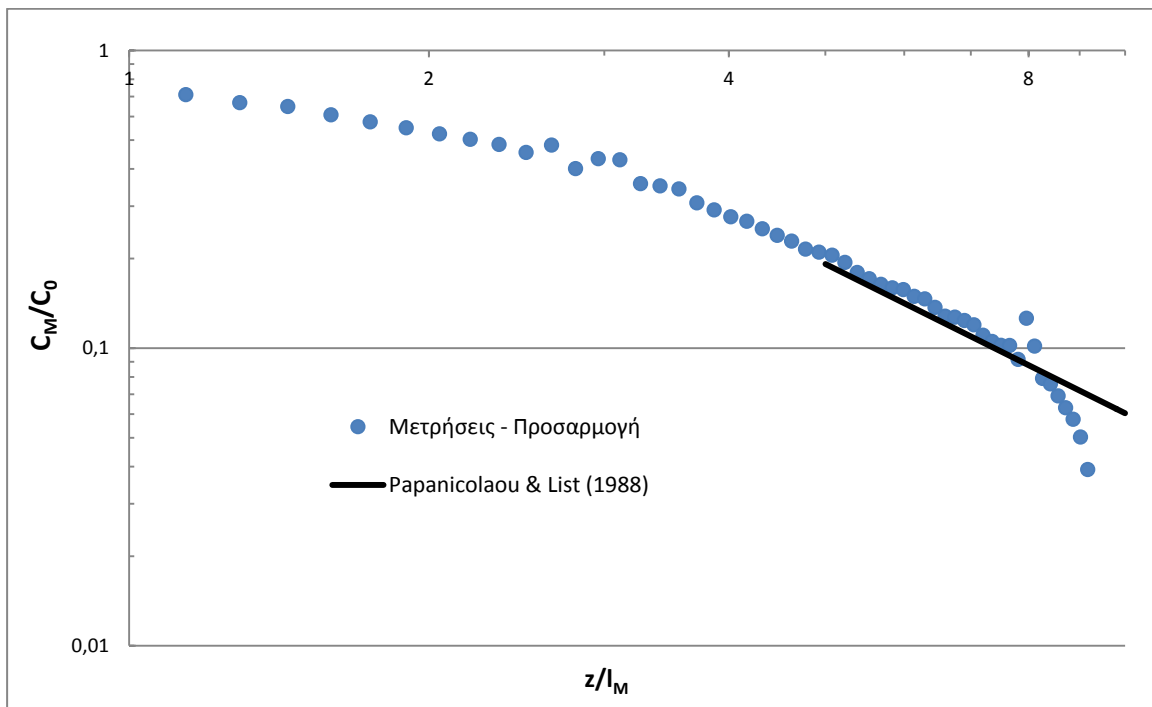




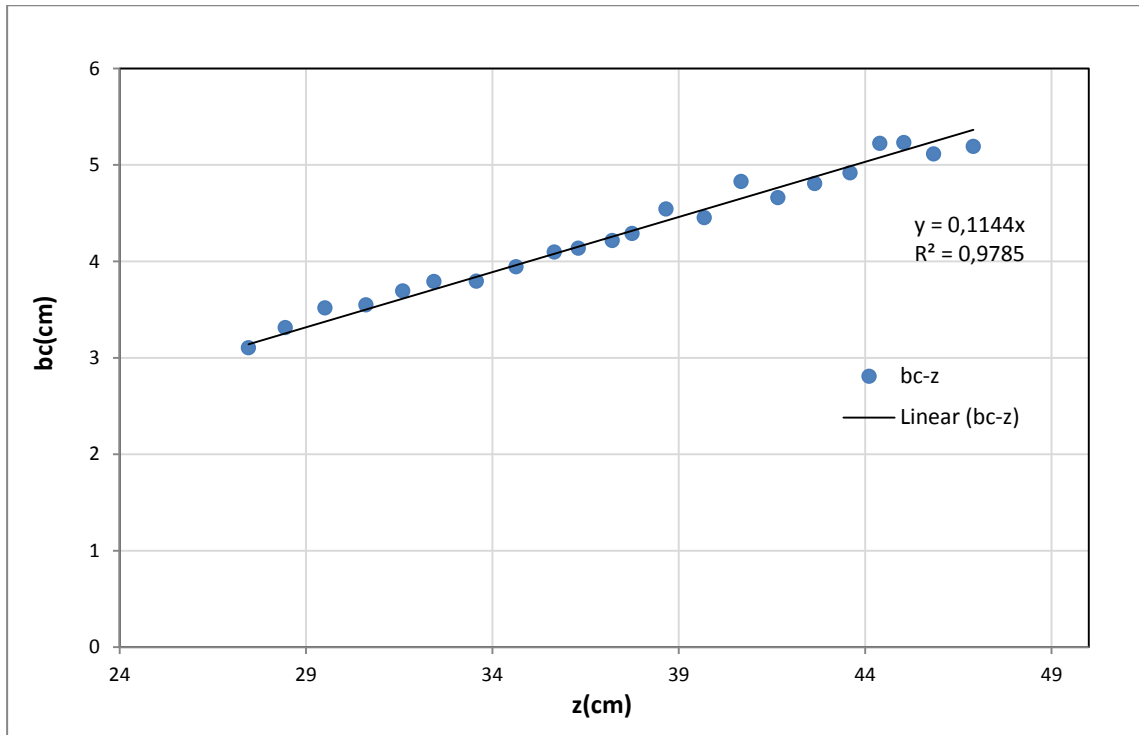
**Σχήμα A.40** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.8T



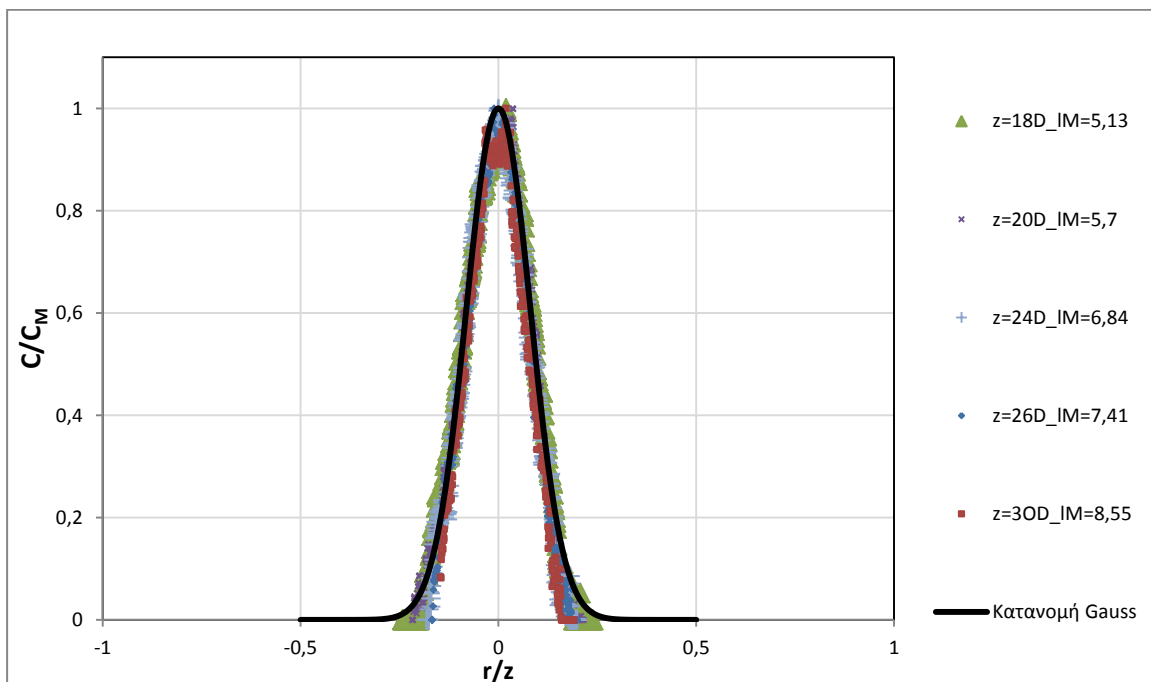
**Σχήμα A.41** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.9T πριν από την προσαρμογή- διόρθωση



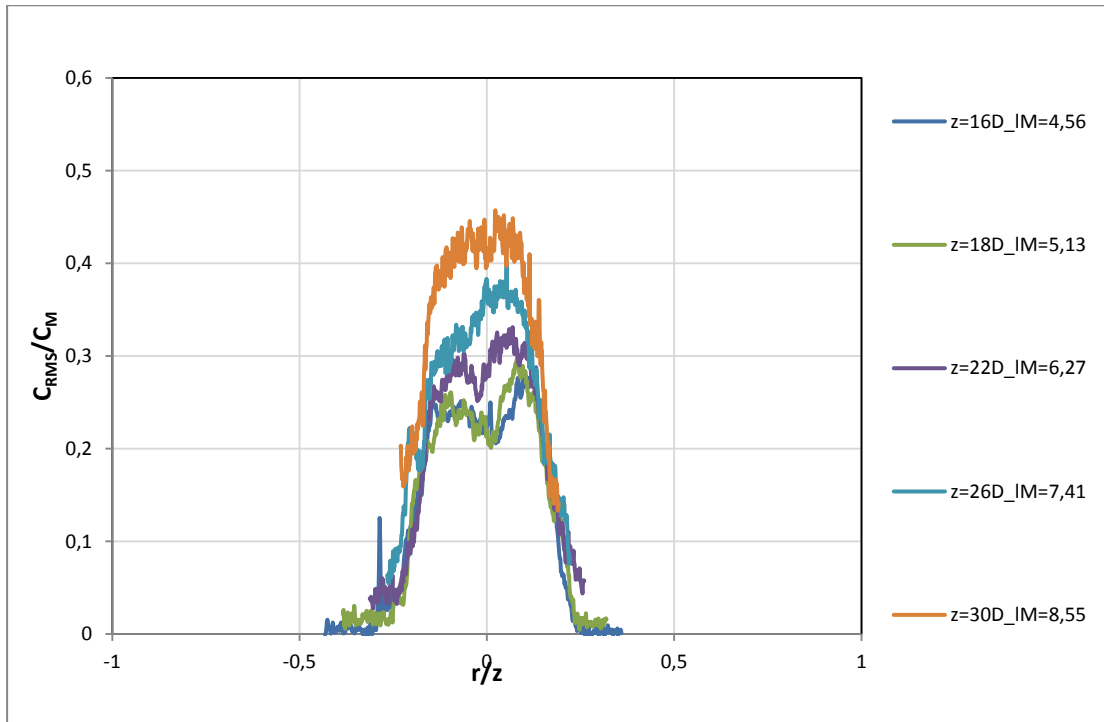
**Σχήμα A.42** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.9T μετά από την προσαρμογή- διόρθωση



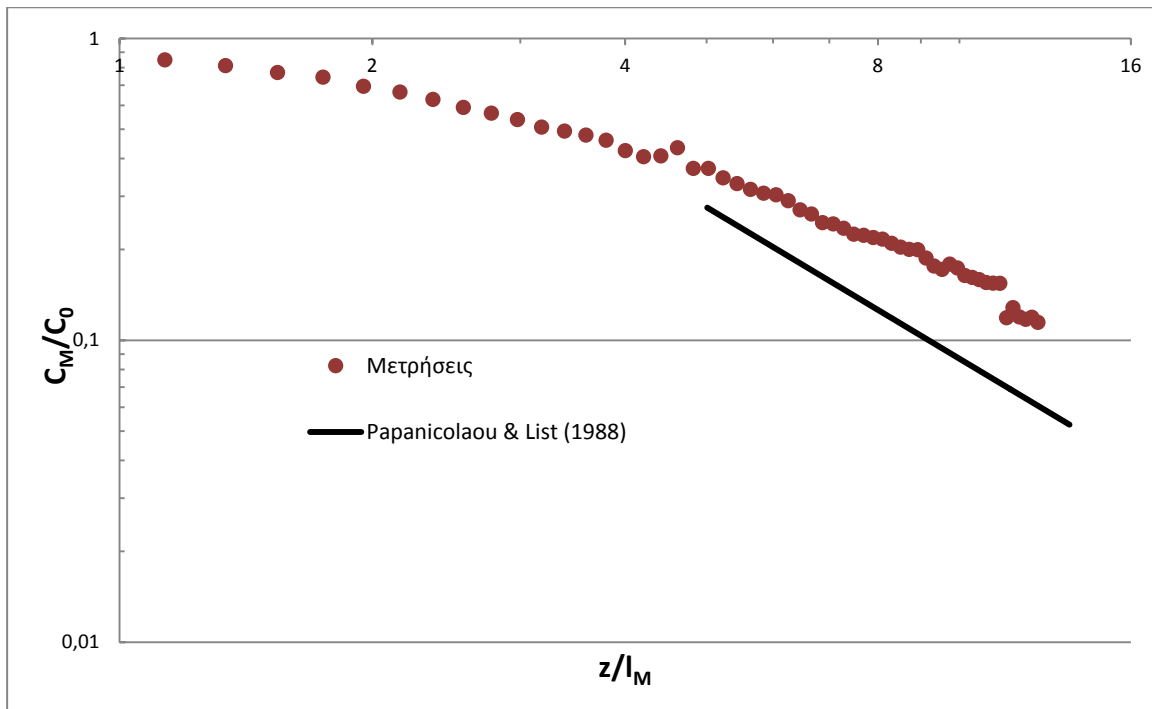
**Σχήμα A.43** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.9T



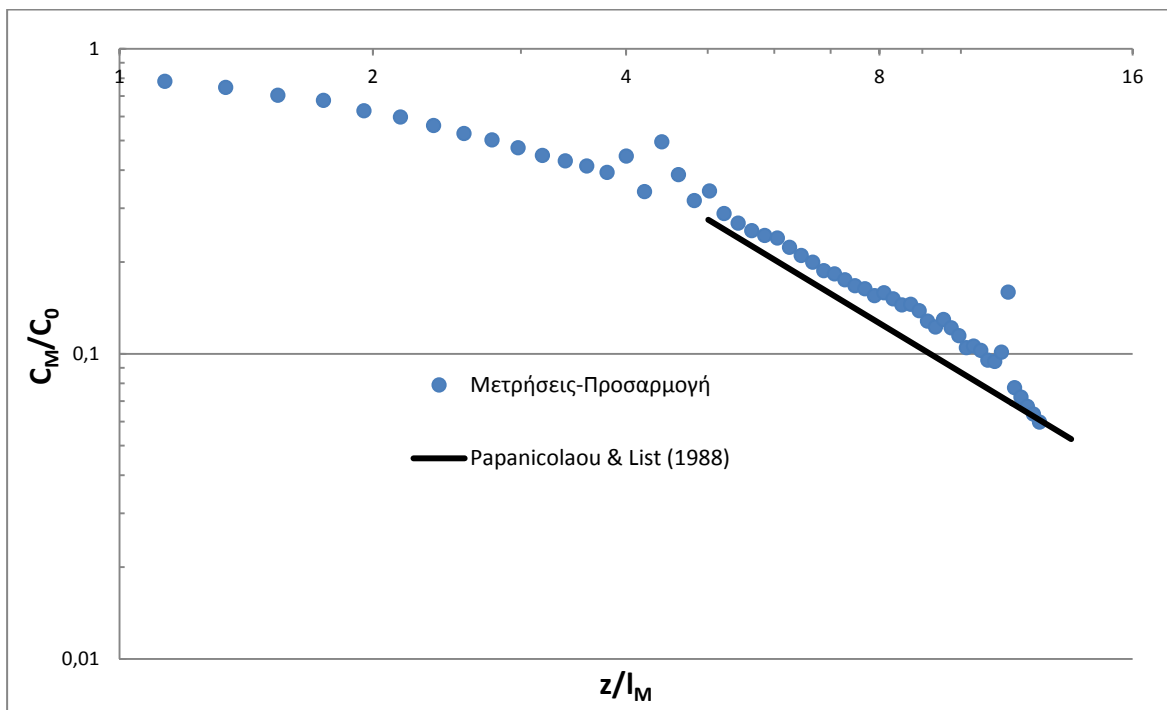
**Σχήμα A.44** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.9T



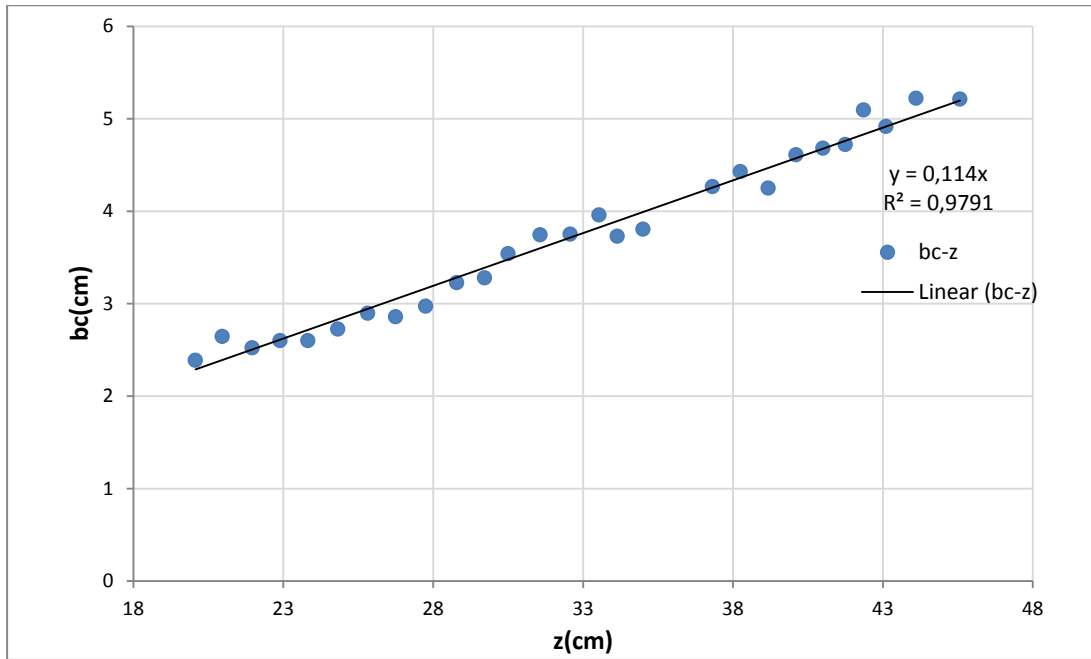
**Σχήμα Α.45** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.9T



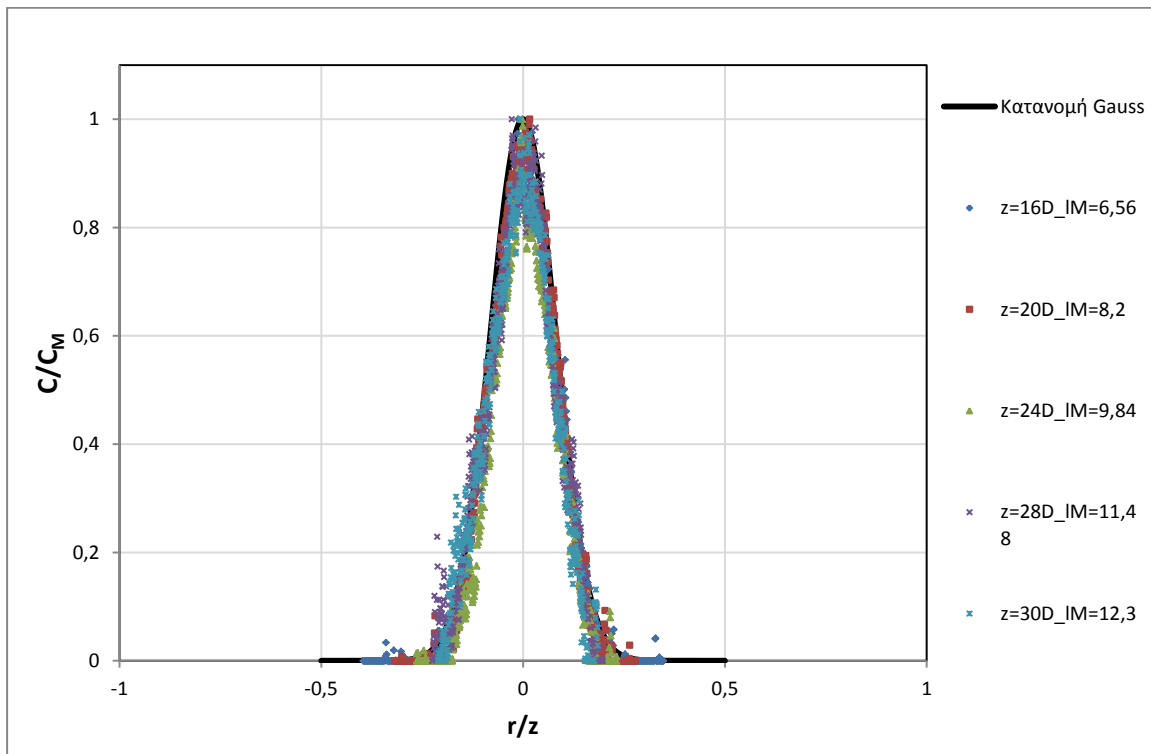
**Σχήμα Α.46** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.10T πριν από την προσαρμογή-διόρθωση



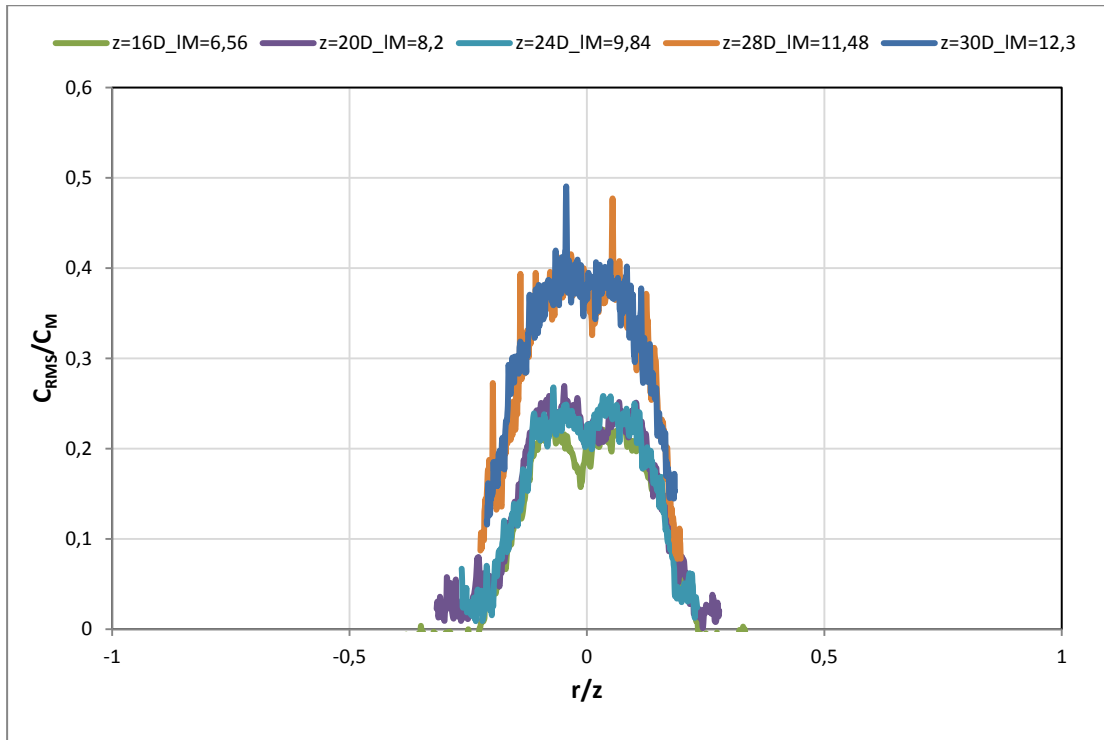
**Σχήμα Α.47** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.10T μετά από την προσαρμογή-διόρθωση



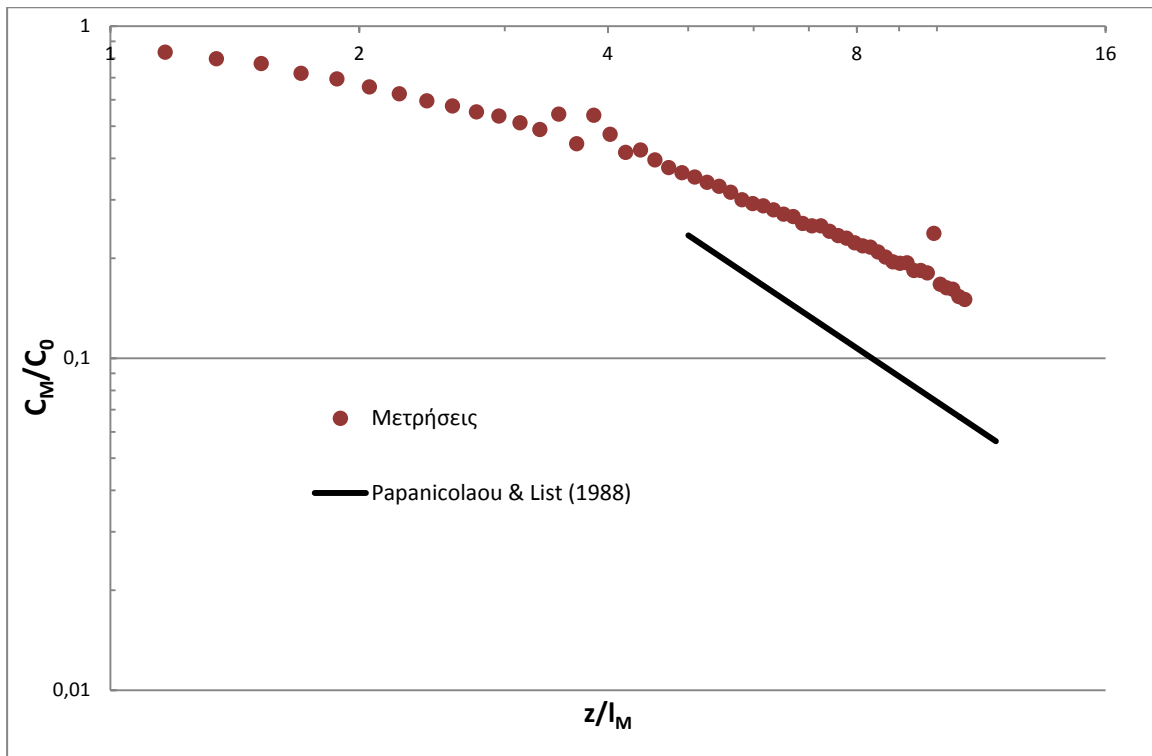
**Σχήμα A.48** Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.10T



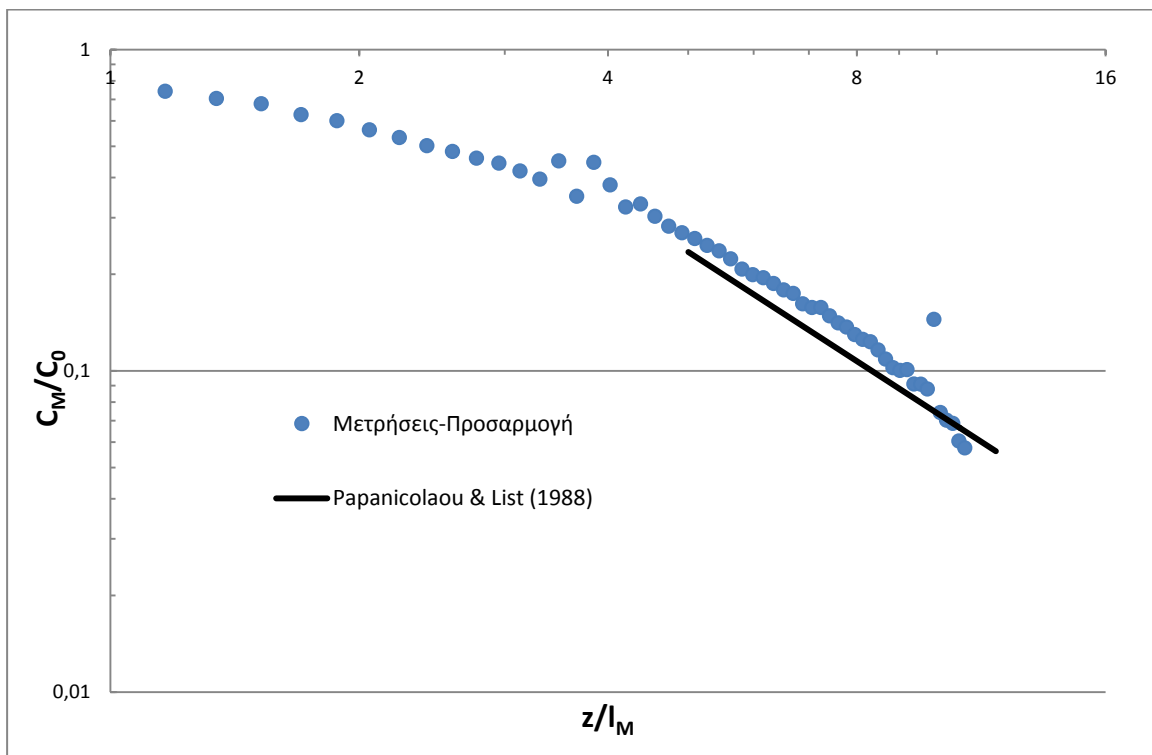
**Σχήμα A.49** Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.10T



**Σχήμα Α.** 50 Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.10T

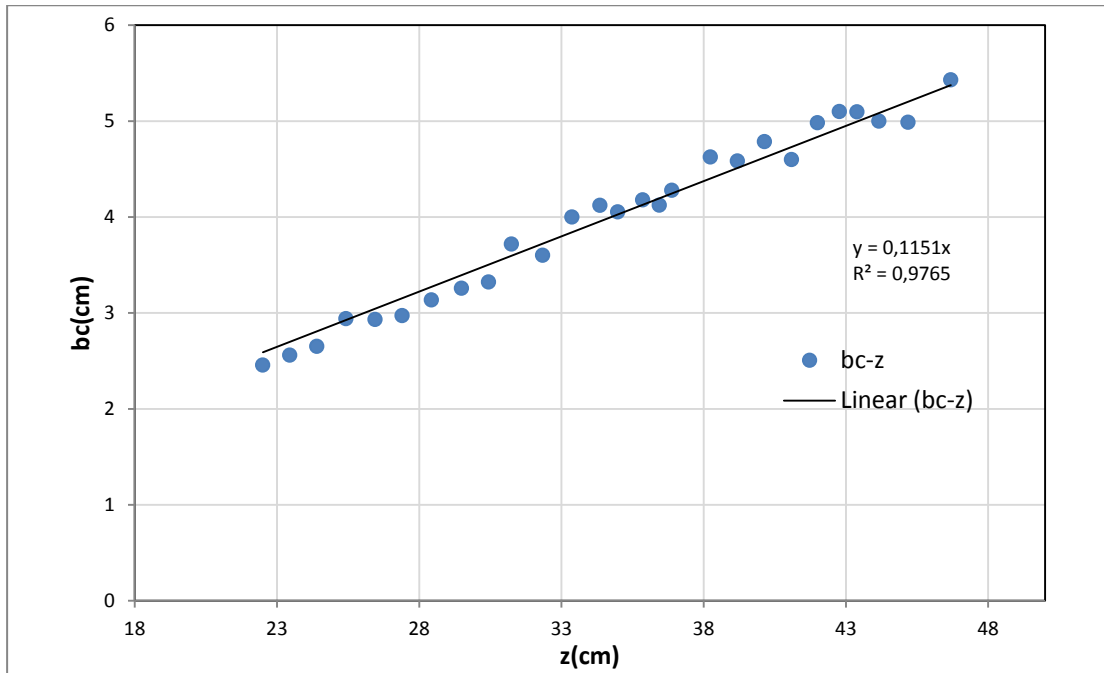


**Σχήμα Α. 51** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.11T πριν από την προσαρμογή-διόρθωση

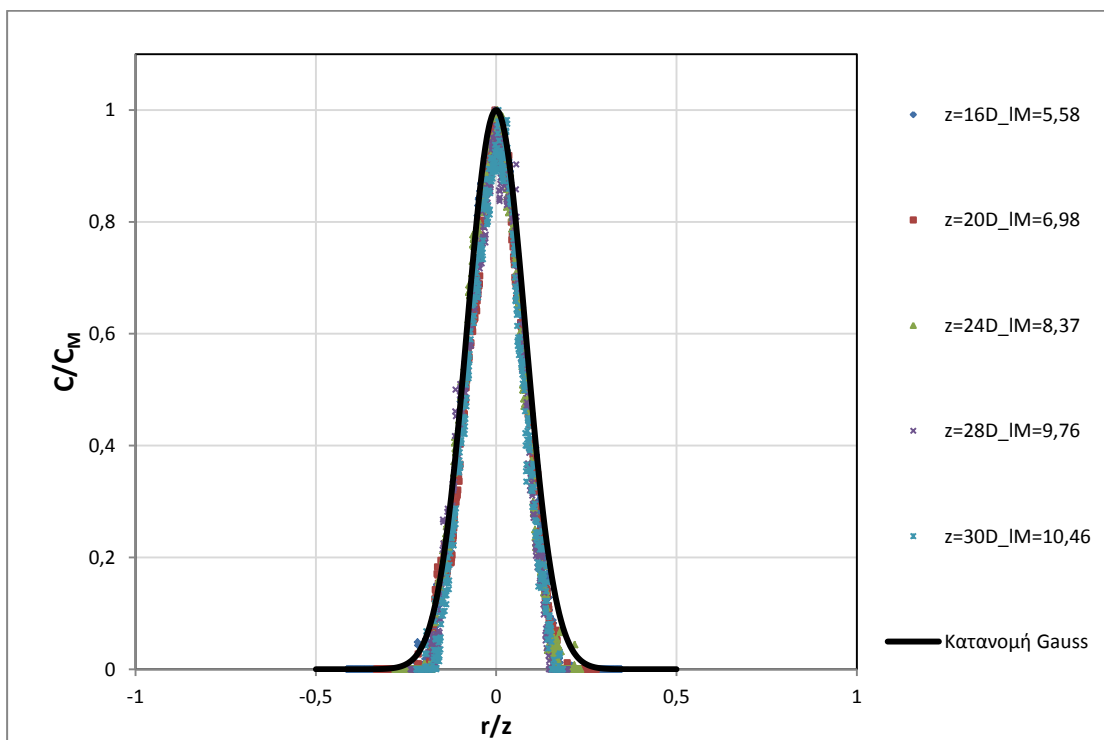


**Σχήμα Α. 52** Μεταβολή της αδιάστατης μέγιστης συγκέντρωσης με την αδιάστατη απόσταση από την εκροή σε λογαριθμικούς άξονες για το πείραμα Exp.11T μετά από την προσαρμογή-διόρθωση

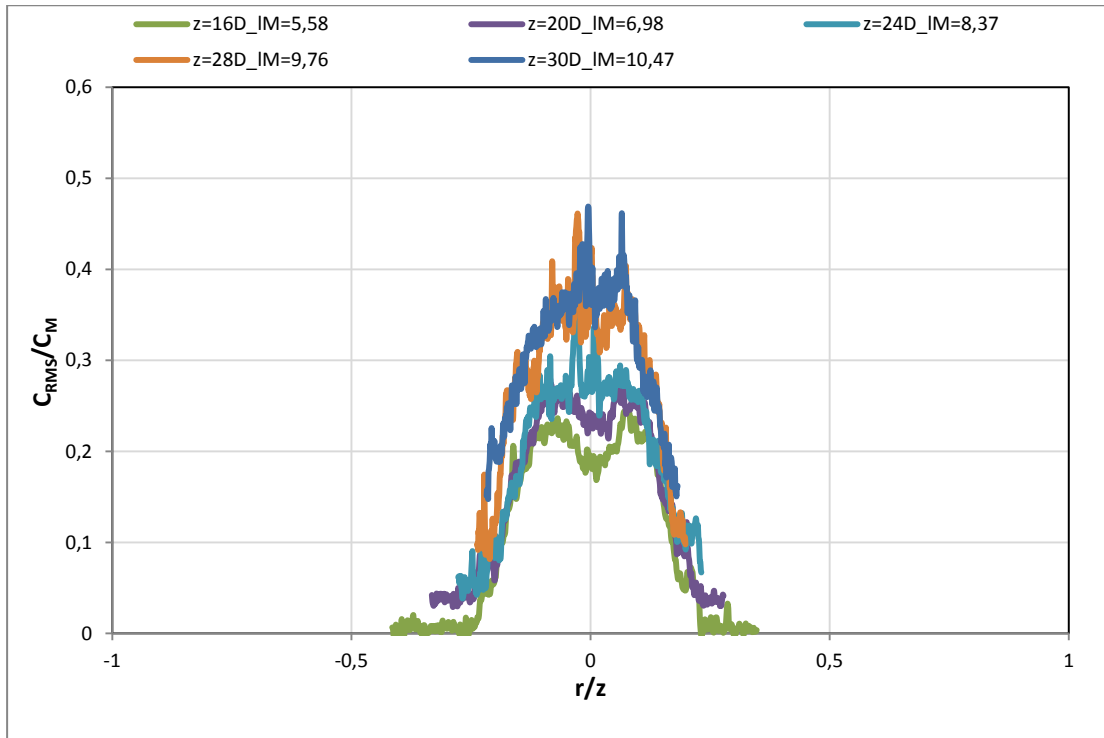




Σχήμα Α. 53 Μεταβολή του πλάτους της κατανομής της συγκέντρωσης με την κατακόρυφη απόσταση από την εκροή για το πείραμα Exp.11T



Σχήμα Α. 54 Εγκάρσια κατανομή της μέσης συγκέντρωσης σε κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.11T



**Σχήμα Α. 55** Εγκάρσια κατανομή της έντασης των τυρβωδών διακυμάνσεων της συγκέντρωσης σε διάφορες κατακόρυφες αποστάσεις από την εκροή για το πείραμα Exp.11T

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### Κώδικας για διαχωρισμό του βίντεο σε Frames

```
clc; clear all; format long;
VID=VideoReader('G:\Βίντεο Κινητού\edo\176YBPHH\S1760003.MP4');
%Number of Frames, Duration of Video (sec), Frames Rate (Frames per secs),
Video Format (in RGB)
NoF=VID.NumFrames; DRT=VID.Duration; FpS=VID.FrameRate; ViFo=VID.VideoFormat;
K=NoF;
for K=5100:5200
Frame=read(VID,K); DF=double(Frame);
save(['G:\Diplomatiki\Output65_thermal\Test\Frames\F' num2str(K)
'.mat'], 'NoF', 'DRT', 'FpS', 'ViFo', 'K', 'Frame');
imwrite(Frame,['G:\Diplomatiki\Output65_thermal\Test\Pictures\P' num2str(K)
'.jpeg'], 'JPEG');
[K NoF]
end
```

### Κώδικας για παραγωγή Μέσης Εικόνας και Τυπικής Απόκλισης

```
clc; clear; format long;
Dir='G:\Diplomatiki\Output65_thermal\Test\Frames';
Vid=004; TmFr=[5192 5192]; SpFr=[310 810 15 1315]; Sc=1/25; %cm/pixels
MR=NaN(SpFr(2)-SpFr(1)+1,SpFr(4)-SpFr(3)+1,TmFr(2)-TmFr(1)+1); MG=MR; MB=MR;
for T=TmFr(1):TmFr(2)
load(['G:\Diplomatiki\Output65_thermal\Test\Frames\F' num2str(T) '.mat']);
MR(:,:,T-
TmFr(1)+1)=double(Frame(SpFr(1):SpFr(2),SpFr(3):SpFr(4),1))/255;MG(:,:,T-
TmFr(1)+1)=double(Frame(SpFr(1):SpFr(2),SpFr(3):SpFr(4),2))/255;
MB(:,:,T-TmFr(1)+1)=double(Frame(SpFr(1):SpFr(2),SpFr(3):SpFr(4),3))/255;
T
end
Mean(:,:,1)=mean(MR,3); Mean(:,:,2)=mean(MG,3); Mean(:,:,3)=mean(MB,3);
Stdev(:,:,1)=std(MR,[],3); Stdev(:,:,2)=std(MG,[],3);
Stdev(:,:,3)=std(MB,[],3);
save(['Results65_thermal_test' num2str(Vid) '.mat'], 'Mean', 'Stdev');
xlswrite(['Results65_thermal_test' num2str(Vid) '.xlsx'],Mean(:,:,1), 'MeanR');
xlswrite(['Results65_thermal_test' num2str(Vid) '.xlsx'],Stdev(:,:,1), 'StdvR');
xlswrite(['Results65_thermal_test' num2str(Vid) '.xlsx'],Mean(:,:,2), 'MeanG');
xlswrite(['Results65_thermal_test' num2str(Vid) '.xlsx'],Stdev(:,:,2), 'StdvG');
xlswrite(['Results65_thermal_test' num2str(Vid) '.xlsx'],Mean(:,:,3), 'MeanB');
xlswrite(['Results65_thermal_test' num2str(Vid) '.xlsx'],Stdev(:,:,3), 'StdvB');
```